Исчерпывающее руководство, посвящённое инженерным альтернативным и возобновляемым энергетическим системам и областям их применения с предоставлением актуализированного статуса с учётом последних тенденций и технологий.

Эта книга создана в помощь инженерам, занятых в области разработок новых подходов к современному энергетическому хозяйству. В этом направлении в книге приведено обсуждение технических вопросов вместе с многочисленными реальными примерами их мировой практики всех альтернативных энергетических ресурсов, областей их применения, систем и компонентов систем. Все главы ориентированы на технические высокоточные расчеты, в них рассматриваются альтернативные возможности использования существующих и возобновляемых энергетических ресурсов. Столь же важное значение имеет и то, что автор приводит описание того, как применять эти концепции к разработкам новых подходов в области энергетических систем.

С того момента, когда 1-е издание этой книги получило признание критиков, развитие применения альтернативных и возобновляемых ресурсов, а также устойчивой и экологически безопасной энергетическая промышленности свидетельствует о наличии процессов изменений и роста. Развитие технологий гидро разрывов, все большее применение ископаемого топлива, и рост популярности гибридных или полностью электрических автотранспортных средств, наряду с уменьшением стоимости солнечной энергии, уже оказывает свое значимое влияние на характер энергопотребления по всему миру. Приводя актуализированный и измененный материал, отражая эти и другие ключевые разработки, данное переиздание характеризуется расширенным охватом тематик первого издания, а также включает новые главы о технологии гидроразрыва пород и применения ископаемого топлива, гибридных и полностью электрических автомобилей и целый ряд другого материала.

- Книга начинается с занимательного взгляда на то, как меняется лицо мирового энергетического комплекса
- Главы о характеристиках посвящены всем практически используемым ресурсам альтернативной энергии и энергетических систем
- Предлагается обсуждение технических вопросов в области гидроэнергетики, использования энергии ветра, пассивного использования солнечной энергии, гелиотермоэлектрических систем, фотоэлектрических систем, топливных элементах, CHP комбинированных систем выработки энергии и тепла (CHP : от англ. Combined heating and power), энергии океана, биомассы, геотермальной и ядерной энергии.
- Содержит обновленную главу, посвященную повторению концепций и обсуждениям, затрагивая вопросы подготовительного направления, основательно пересматривая пособие к ключам решения задач, содержащемуся на сопровождающем вебсайте

«Альтернативные энергетические системы и их применение», 2-е издание представляет собой идеальное пособие и справочник для студентов, которые являются слушателями специализированных курсов, а также для выпускников инженерно-технических специальностей с энергетическим уклоном, а также незаменимый источник профессиональных знаний для инженеров и техников, занятых в сфере разработок альтернативных или возобновляемых энергетических систем.

B. K. Hodge, заслуженный профессор инженерно-технических наук Университета Миссисипи, в котором он продолжает преподавать дисциплины по технологии машиностроения и вести научную деятельность. Область его научных исследований представлена усовершенствованием процессов теплопереноса, моделированием термических и энергетических систем. Он также является руководителем Центра отраслевой оценки при Университете Миссисипи. До пенсии, B.K.Hodge вел профессорскую деятельность в Управлении ресурсами бассейна Теннесси (независимая государственная корпорация в области энергетических систем и экологии), а также являлся почётным профессором инженерно-технических наук школы Джайлза и руководителем магистратуры школы Гришам. Являлся председателем отделения по технологиям машиностроения Американского общества по техническому образованию ASEE (American Society for Engineering Education) и президентом Юго-Восточного направления ASEE. Является коллегиальным членом Американского общества по техническому образованию и членом Американского института авиации и астронавтики.

with website

www.wiley.com\go\Hodge\AESystemsandApplications2E

Дизайн обложки: Wiley
Иллюстрация обложки: при участии NREL/DOE

www.wiley.com

WILEY

Also available as an e-book

ISBN 978-1-119-10921-1

21.0mm

HODGE

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

with website

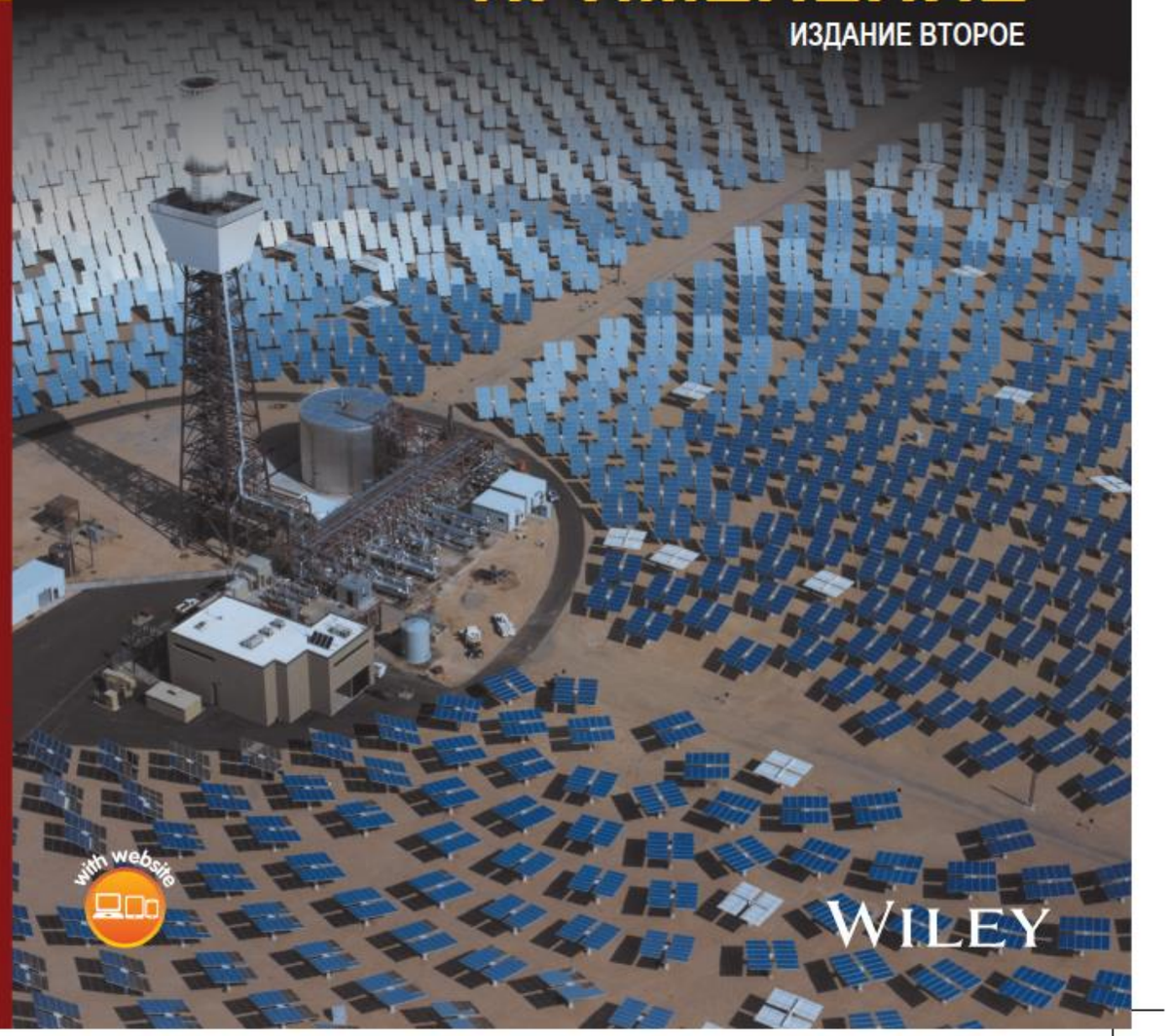
ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ

WILEY

B. K. HODGE

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ



with website

WILEY

Альтернативные энергетические системы и их применение

Издание второе

Альтернативные энергетические системы и их применение

B.K. Hodge (Б.К. Ходж)
Университет Миссисипи, США

Издание второе

WILEY

Издание впервые опубликовано в 2017 году
2017 JohnWiley&Sons, Ltd

Все права защищены. Настоящая публикация не может воспроизводиться, храниться в поисковой системе, либо передаваться частично или полностью в форме электронного, механического воспроизведения, фотокопирования, выполнения записей, сканирования и другими способами воспроизведения, за исключением тех случаев, разрешенных законом.
Информацию о применении разрешения на повторную реализацию авторских прав на материал, содержащийся в этой книге, вы можете найти на вебсайте http://www.wiley.com/go/permissions.

Права Б. К. Ходж, подлежащие реализации при определении его в качестве автора этой работы, завялены в соответствии с законом.

Зарегистрированные офисы
John Wiley & Sons, Inc., 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA
John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK

Редакция
The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK

Подробную информацию о редакциях, осуществляющих деятельность в разных странах мира, услугах в сфере обслуживания клиентов, а также информацию об издательстве «Wiley» «вы можете найти на вебсайте: www.wiley.com

Издательство «Wiley» также публикует книги в различных электронных форматах и выполняет печать на заказ. Некоторые материалы, содержащиеся в стандартных печатных версиях этой книги, могут быть не включены в электронные издания.

Предел ответственности и отказ от гарантии: приложив максимальные усилия для составления этой книги, издательство и автор не предоставляют каких-либо заявлений или гарантий в отношении точности или полноты содержания данной книги и, в частности, отказываются от всех гарантий, включая, среди прочего, гарантии пригодности для определенной цели. Торговые представители, письменные материалы продаж или рекламные заявления об этой работе не создают или не продлевают какие-либо гарантии. Факт того, что какое-либо учреждение или веб-сайт, или продукт упоминаются в этой книге, предоставляя цитату и(или) возможный источник получения дополнительной информации, не означает, что издательство или автор рекламируют информацию или услуги организации, вебсайт или продукт, который может предоставить учреждение или веб-сайт, либо рекомендации, которые могут быть предоставлены ими. Продажа данной книги осуществляется с явным представлением того, что издательство не оказывает профессиональных услуг. Рекомендации и стратегии, содержащиеся в этой книге, могут не подходить к вашей ситуации. При необходимости вам следует обратиться к специалисту. Кроме этого, читателю следует знать, что интернет-сайты, перечисленные в данной книге, могли измениться, либо прекратить свою активность в промежуток написания и до момента прочтения книги. Издательство и автор не несут ответственности за упущенную прибыль или другие коммерческие убытки, включая, среди прочего, особые, случайные, последующие и другие убытки.

Использована библиографическая запись Библиотеки Конгресса США.

Имена: Ходж, В. К., автор.
Название: Альтернативные энергетические системы и их применение/Б. К. Ходж. Описание: Издание второе. | Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. |
Включает алфавитный указатель.
Идентификаторы: LCCN 2016049895| ISBN 9781119109211 (pbk.) |
ISBN 9781119109228 (epdf) | ISBN 9781119109235
(epub)
Темы: LCSH: Возобновляемые источники энергии. | Энергетические ресурсы. | Энергетические системы.
Классификация: LCC TJ808 .H63 2017 | DDC 333.79/4–dc23 Запись Библиотеки конгресса приведена по ссылке: https://lccn.loc.gov/2016049895

Иллюстрация обложки: при участии NREL/DOE
Дизайн обложки: Wiley

Шрифт WarnockPro-Regular, размер кегля 10/12pt напечатано ThomsonDigital, Noida, India (Индия, Ноида)

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

Посвящаю своей супруге и
лучшему другу Гейле

Нашей семье:

Лорен (Ходж) и Адам Симс

Селена и Бен Ходж

Лиам Финн Ходж

Ноа Тауншенд Ходж

Оглавление

Предисловие ко второму изданию IX

1 Использование энергии в США и в мире 1
1.1 Энергия и энергетика, 1
1.2 Использование энергии и уровни жизни, 1
1.3 Историческая перспектива использования энергии в США, 4
1.4 Использование энергии в США в 2014 году, 7
1.5 Мировое использование энергии, 17
1.6 Параметры производительности, 19
1.7 Заключение, 21
1.8 Литература, 21

2 Основы турбокомпрессорного оборудования, 23
2.1 Понятие «турбокомпрессор», 23
2.2 Классификация турбокомпрессорного оборудования, 23
2.3 Анализ турбокомпрессорного оборудования, 23
2.4 Примеры проблемных аспектов, 28
2.5 Заключение, 33
Литература, 33
Дополнительная литература, 34

3 Гидроэнергия, 35
3.1 Введение, 35
3.2 Примеры плотин гидроэлектростанций, 35
3.3 Гидравлический анализ, 40
3.4 Рассмотрение вопросов, связанных с удельной скоростью турбин, 45
3.5 Процесс переноса энергии, проистекающего в турбинах, 50
3.6 Заключение, 60
3.7 Литература, 62
3.8 Дополнительная литература, 63

4 Энергия ветра, 64
4.1 Введение, 64
4.2 Основополагающие концепции, 65
4.3 Ветровая энергия, 73
4.4 Работа ветровых турбин, 81
4.5 Коммерческие примеры ветровых турбин, 86
4.6 Увеличение мощности ветровой энергии, 91
4.7 Заключение, 94
Литература, 97
Дополнительная литература, 97

5 Турбины внутреннего сгорания, 98
5.1 Введение, 98

5.2 Турбина внутреннего сгорания, 98
5.3 Воздушный цикл Брайтона, 100
5.4 Фактический анализ рабочего цикла газовой турбины, 101
5.5 Изменения в рабочем цикле турбины внутреннего сгорания, 111
5.6 Примеры коммерчески доступных турбин внутреннего сгорания, 112
5.6.1 Турбины Solar, 113
5.6.2 Трубины GE Energy, 114
5.6.3 Турбины Capstone, 117
5.6.4 Другие поставщики газовых турбин, 120
5.7 Заключение, 120
Литература, 121
Дополнительная литература, 121

6 Основы солнечной энергии, 122
6.1 Введение, 122
6.2 Обзор передачи тепла излучением, 122
6.3 Описание и расчеты пути движения солнца, 133
6.4 Mathcad-разработки пути движения солнца, 137
6.5 Национальная база данных о солнечной энергии, 144
6.6 Заключение, 147
Литература,148

7 Активное использование систем солнечного теплоснабжения, 149
7.1 Введение, 149
7.2 Пластинчатый солнечный коллектор: Основные принципы,155
7.3 Солнечный коллектор и метеоданные, 160
7.4 Метод преобразования графика функции, 170
7.5 Другие системы, работающие от солнечного тепла, 177
7.6 Заключение, 178
Литература, 179

8 Пассивное использование солнечной энергии, 180
8.1 Основополагающие концепции пассивного использования солнечной энергии, 181
8.2 Количественное выражение пассивных методов использования солнечной энергии,184
8.3 Правило первого уровня (правило буравчика), 187
8.4 Правило второго уровня (соотношение: нагрузка-коллектор), 189
8.5 Использование дневного света, 191
8.6 Программа моделирования пассивного использования солнечной энергии, 192
8.7 Заключение, 193
Литература, 194

9 Фотоэлектрические системы, 195
9.1 Введение, 195
9.2 Фотоэлектрические системы: Основные принципы, 195
9.3 Элементы фотоэлектрических систем, 202
9.4 Фотоэлектрические системы, 209
9.5 Увеличение мощности фотоэлектрических систем, 214
9.6 Заключение, 216
Литература, 216

10 Топливные элементы, 217

10.1 Введение, 217
10.2 Топливные элементы: Основные принципы, 217
10.3 Основы термодинамики топливных элементов, 219
10.4 Виды топливных элементов, 225
10.5 Доступность топливных элементов, 233
10.6 Заключение, 236
Литература, 237

11 Комбинированные системы выработки энергии и тепла, 238
11.1 Введение, 238
11.2 Комбинированные системы выработки энергии и тепла: Основные принципы, 240
11.3 Комбинированные системы выработки энергии и тепла: Экономика и эксплуатация, 244
11.4 Экономическая оценка пригодности комбинированных систем выработки энергии и тепла, 249
11.5 Критерии комбинированных системы выработки энергии и тепла, установленные Федеральной комиссией по регулированию в сфере энергетики и тепловой энергии, 253
11.6 Пример комбинированной системы выработки энергии и тепла, 255
11.7 Заключение, 259
Литература, 260

12 Преобразование энергии биомассы, 261
12.1 Введение, 261
12.2 Доступность биомассы, 262
12.3 Биомасса: Основные принципы, 265
12.4 Биомасса: Характеристики, 267
12.5 Виды топлив на основе биомассы и продукты, 267
12.5.1 Этанол, 267
12.5.2 Метанол, 273
12.5.3 Биодизель и растительное масло, 273
12.5.4 Жидкие продукты пиролиза, 275
12.5.5 Биогаз, 276
12.5.6 Энергетический газ, 277
12.5.7 Синтетический газ 279
12.5.8 Биоэнергетика и статистика использования биотоплив, 283
12.6 Бытовые твердые отходы, 283
12.7 Заключение, 291
Литература, 292
Дополнительная литература, 293

13 Геотермальная энергия, 294
13.1 Введение, 294
13.2 Геотермальные ресурсы, 294
13.3 Геотермальные энергетические системы, 299
13.3.1 Геотермальная энергетика, 299
13.3.2 Газ зон геодавлений, 310
13.3.3 Магма, 311
13.3.4 Увеличение выхода геотермальных систем, 312
13.4 Примеры геотермальных систем, 312
13.5 Геотермальные тепловое насосы, 315
13.6 Заключение, 319
Литература, 321
Дополнительная литература, 321

14 Энергия океана, 323
14.1 Введение, 323
14.2 Преобразование тепловой энергии океана, 323
14.2.1 Системы преобразования тепловой энергии океана с открытым циклом, 324
14.2.2 Системы преобразования тепловой энергии океана с закрытым циклом, 328
14.2.3 Гибридные системы преобразования тепловой энергии океана, 331
14.2.4 Продукт систем преобразования тепловой энергии океана, 331
14.2.5 Оценка систем преобразования тепловой энергии океана, 332
14.3 Энергия приливов и отливов, 337
14.4 Морская и гидрокинетическая энергия, 343
14.4.1 Динамические устройства, 348
14.5 Заключение, 350
Литература, 351

15 Ядерная энергия, 352
15.1 Введение, 352
15.2 Основы ядерной энергии, 353
15.3 Атомная энергетика, 358
15.3.1 Чернобыль, 366
15.3.2 Фукусима-1, 369
15.3.3 Атомная энергетика двадцать первого века, 370
15.4 Термоядерная энергия, 373
15.5 Заключение, 378
Литература, 380

16 Транспорт: гибридные автотранспортные средства и электромобили, 381
16.1 Альтернативное использование энергии для автотранспортных средств вместо двигателей внутреннего сгорания, 381
16.2 Гибридные автотранспортные средства и электромобили, 385
16.3 гибридные автотранспортные средства и электромобили: прошлое, настоящее и будущее, 392
16.4 Заключение, 397
Литература, 398

17 Технология гидроразрыва: нефть, природный газ и новая реальность, 399
17.1 Введение, 399
17.2 Нетрадиционная нефть и газ, 399
17.3 Концепции технологии нефтеотдачи, 303
17.4 Добыча нефти и газа из непроницаемых нефтегазоносных комплексов пород, 408
17.5 Новая реальность, 415
17.6 Заключение, 422
Литература, 423
Дополнительная литература, 423

Приложение А 424
Приложение В 442
Алфавитный указатель 459

Предисловие ко второму изданию

Со времени написания первого издания (2007–2009 гг.) произошло много изменений в энергетической стратегической концепции США и всего остального мира. Эти изменения оказали существенное влияние на содержание второго издания. Были добавлены две главы: одна посвящена электрическим и гибридным автотранспортным средствам (Глава 16), а другая – усиленной добыче нефти и газа (посредством гидравлического разрыва пласта) и достигнутым результатам (Глава 17). Все главы пересмотрены и обновлены, и во многом существенно дополнены. Где представилась возможность, обновлена количественная информация согласно имеющимся данным. Такие данные включают документированные данные об использовании энергии, прогнозы энергоресурсов и потребление, а также показатели производительности и доступности энергетических систем и компонентов. Количество веб-сайтов, упомянутых во втором издании, значительно больше, чем в первом. Все цитируемые веб-сайты были активны по состоянию на декабрь 2016 года. Однако веб-сайты часто обновляются (и переименовываются), но использование поисковой системы с достаточно полным дескриптором обычно перенаправляет на соответствующий сайт. Со времени выхода первого издания полезная количественная информация на многих веб-сайтах компаний и государственных учреждений была сокращена в пользу предоставления более подробной описательной информации, рисунков и иллюстраций. Если на веб-сайте компании или агентства отсутствует достаточная количественная информация, в ответ на запросы, направленные компании или агентству, зачастую такие показатели предоставляются.

Во втором издании продолжается изучение темы первого издания: альтернативные источники энергии и альтернативное использование существующих источников энергии. Добавлена Глава 16 Транспорт: гибридные и электрические автотранспортные средства, поскольку электрические и гибридные автотранспортные средства предлагают альтернативы и повышение эффективности по сравнению с обычными автотранспортными средствами, в которых приводным механизмом является двигатель внутреннего сгорания. Добавлена Глава 17 Технологии гидроразрыва: нефть, природный газ и новая реальность, поскольку усиленная добыча нефти и газа резко изменила энергетическую позицию/перспективы многих стран. Каждая тема была освещена с точки зрения технологического прогресса с акцентом на изменения. Примеры включают рассмотрение новых показателей установленной гидроэлектрической производительности, значительные увеличения установленной мощности энергии ветра, накопленные объемы по заказам на турбины внутреннего сгорания, рост использования солнечной энергии, признание преимуществ пассивного использования солнечной энергии, снижение стоимости фотоэлектрических элементов на киловатт, что повышает экономическую привлекательность, продвижение коммерциализации топливных элементов, проникновение на коммерческий рынок комбинированных систем выработки энергии и тепла, разнообразие основных направлений использования биотоплива, положительные результаты и достижения в области разработок систем генерации геотермальной энергии, признание потенциала энергии океана, возобновление интереса к ядерной энергетике, увеличение продаж гибридных/электрических автотранспортных средств и влияние технологии гидравлического разрыва. С момента выхода в свет первого издания, энергетические проблемы США в некоторой степени уменьшились, но с технической, политической, экологической и экономической точек зрения вопросы энергетики, включая изменение климата, стали вызывать более глубокие разногласия. Действительно, в 2000 году мало кто предсказывал, что США резко сократят импорт энергии и, возможно, даже станут страной-экспортером энергии.

Увеличение объемов добычи нефти и газа привело к неожиданному увеличению добычи ископаемого топлива в стране и доказанных запасов как нефти, так и природного газа. Однако, даже если бы усиленное извлечение нефти и газа должно было обеспечить в краткосрочной перспективе приемлемые энергетические ресурсы для США и остального мира, другие аспекты (например, выбросы парниковых газов, воздействие на окружающую среду, изменение климата, долгосрочная доступность) требуют, чтобы альтернативные источники энергии и альтернативные виды использования существующих ресурсов стали частью удовлетворения будущих потребностей в энергии. Следовательно, темы этого учебника весьма актуальны с позиции будущего. «В процессе определения дополнительных ископаемых ресурсов, мы даем себе больше времени для обнаружения,

внедрения и разработки других, более устойчивых и более экологически чистых энергетических ресурсов».

Вопросы для обсуждения и упражнения, которые были приведены в конце каждой главы первого издания, сейчас доступны только на веб-сайте этой книги.

Благодарю своих коллег за замечания, исправления и предложения, полученные по содержанию первого издания. Во второе издание этой книги внесены соответствующие исправления, также учтены замечания и предложения.

Также признателен профессору Тейас С. Пандия, профессору Пол Стюарт, профессору Сангараджу Шанмугам, профессору Самюэль Сих, профессору Ксианчанг Ли и профессору Алисон Субианторо, которые просматривали рукопись; их замечания были наполнены глубоким смыслом и стали весьма полезными.

Б.К. Ходж
Университет штата Миссисипи
Январь 2017

1

Использование энергии в США и в мире

1.1 Энергия и энергетика

Перед началом изучения альтернативных источников энергии и их применений, возникает целесообразность провести обзор систем единиц, используемых для производства энергии и мощности. Невзирая на то, что большая часть мира использует систему единиц СИ (Le Système International d'Unités), в США, в дополнение к системе СИ, также используют Английские Инженерные единицы и единицы Британской Гравитационной системы. Единицей энергии в системе СИ является ньютон-метр (Н·м), который определяется как Джоуль (Дж). Энергия в Анлийской Инженерной системе определяется как Британская тепловая единица, БТЕ, или, альтернативно как сила в фунт-сила-фут (фсф); коэффициент преобразования составляет 1 БТЕ = 778,16 фсф. Мощность – это скорость потребление или передачи энергии, в джоулях в секунду, Британских тепловых единицах в секунду или фут-фунт-силы в секунду. Мощность выражается в джоулях в секунду и определяется как ватт (Вт). Наиболее распространённое использование единицы мощности является 1000 Вт или 1 кВт. В США мощность иногда выражается в лошадиных силах (л.с.), где 1 л.с. составляет 550 фсф/с или 0,7457 кВт. Киловатт-час (кВт-ч) является часто используемой единицей энергии и представляет собой показатель энергии (киловатт), умноженный на время (час). Конвертация составляет 3412,14 БТЕ = 1 кВт-ч. Любой, кто занимается энергетической инженерией, должен помнить о конвертации между Британскими тепловыми единицами и киловатт-часами; в большинстве случаев используется 3412 БТЕ = 1 кВт-ч.

Тестер и соавт. (2012) предлагают рассмотреть различные виды деятельности и их энергетические затраты. Некоторые из их результатов приведены в Таблице 1.1.

Диапазон затрачиваемой мощности удивительный, он составляет около девяти порядков величины. Таблица 1.1 указывает на различные уровни расходуемой мощности, относящиеся к повседневному опыту, и могут использоваться для установления понимания величины чисел для мощности.

1.2 Использование энергии и уровни жизни

Неопровержимом фактом является то, что развитые страны (например, США, Япония, Великобритания) потребляют больше энергии на душу населения, чем менее развитые страны (например, Мексика, Индонезия). На рис. 1.1 графически представлен ИЧР (Индекс Человеческого Развития) как функция килограммов нефтяного эквивалента (КНЭ) на душу населения в год. ИЧР является мерой измерения уровня жизни, а килограммы нефтяного эквивалента на душу населения в год являются индикатором уровня потребления энергии. В промышленно развитых странах значения ИЧР превышают 0,9, в то время как значения ИЧР во многих развивающихся странах значительно ниже. Существует сильная взаимосвязь между ИЧР и использованием киловатт-часов. Тем не менее, после достижения порогового значения около 3000 килограмм нефтяного эквивалента на душу населения, дальнейшее увеличение потребления электроэнергии не приводит к более высокому показателю ИЧР. Исландия имеет самый высокий ИЧР, США занимает второе место. Некоторые страны с более высоким потреблением киловатт-часов обладают большими масштабами инфраструктуры и обильным количеством производимой энергии. Одна из основных тем, изложенных Голембергом и Йоханссоном (2004), заключается в том, что единственный способ увеличить ИЧР в развивающихся странах – это увеличить их потребление энергии.

Таблица 1.1 Мощность, затраченная для различных видов деятельности.

Деятельность	**Затраченная мощность**
Бьющееся человеческое сердце	1.5 Вт=1.5x10^{-3} кВт
Бытовая лампочка	100 Вт=0.1 кВт
Человек, тяжелый труд	0.1 кВт
Тяжеловозная лошадь	1 кВт
Портативный обогреватель полов	1.5 кВт
Компактный автомобиль	100 кВт
Внедорожник	160 кВт
Турбина сгорания	5000 кВт=5 МВт
Большой круизный лайнер	200000 кВт=200 МВт = 0,2 ГВт
Боинг 747, крейсерская скорость	250000 кВт =250 МВт =0:25 ГВт
Угольная электростанция	1x10^{6} кВт=1000 МВт =1 ГВт
ГЭС Ниагарского Водопада	2x10^{6} кВт =2000 МВт =2 ГВт

Альтернативный подход заключается в изучении количества валового национального продукта (ВНП), в зависимости от потребления энергии на душу населения. Рис. 1.2 a был разработан с использованием информации Всемирного Банка 1992 года. Рис. 1.2 b был разработан на основе более свежих данных Всемирного Банка. Более свежие данные были в основном за 2012–2013 годы, хотя данные из некоторых развивающихся стран были менее свежими.

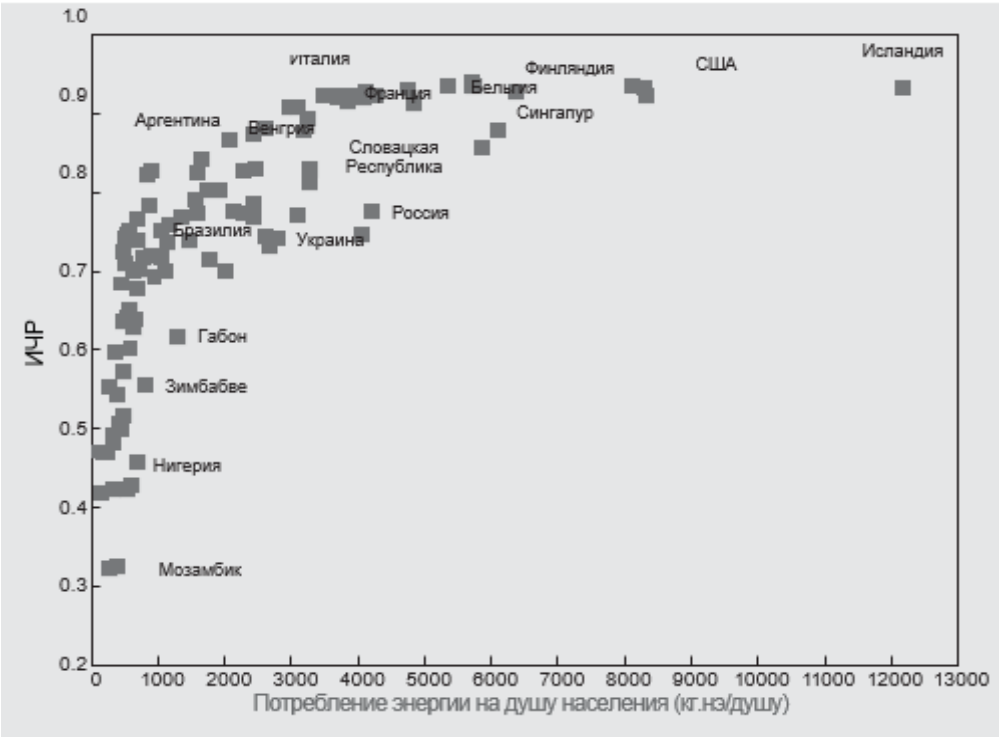


Рис. 1.1 Индекс человеческого развития (HDI (ИЧР) как функция потребления киловатт-часов на душу населения. *Источник*: Големберг и Йоханссон (2004). Воспроизведено с разрешения ПРООН (UNDP).

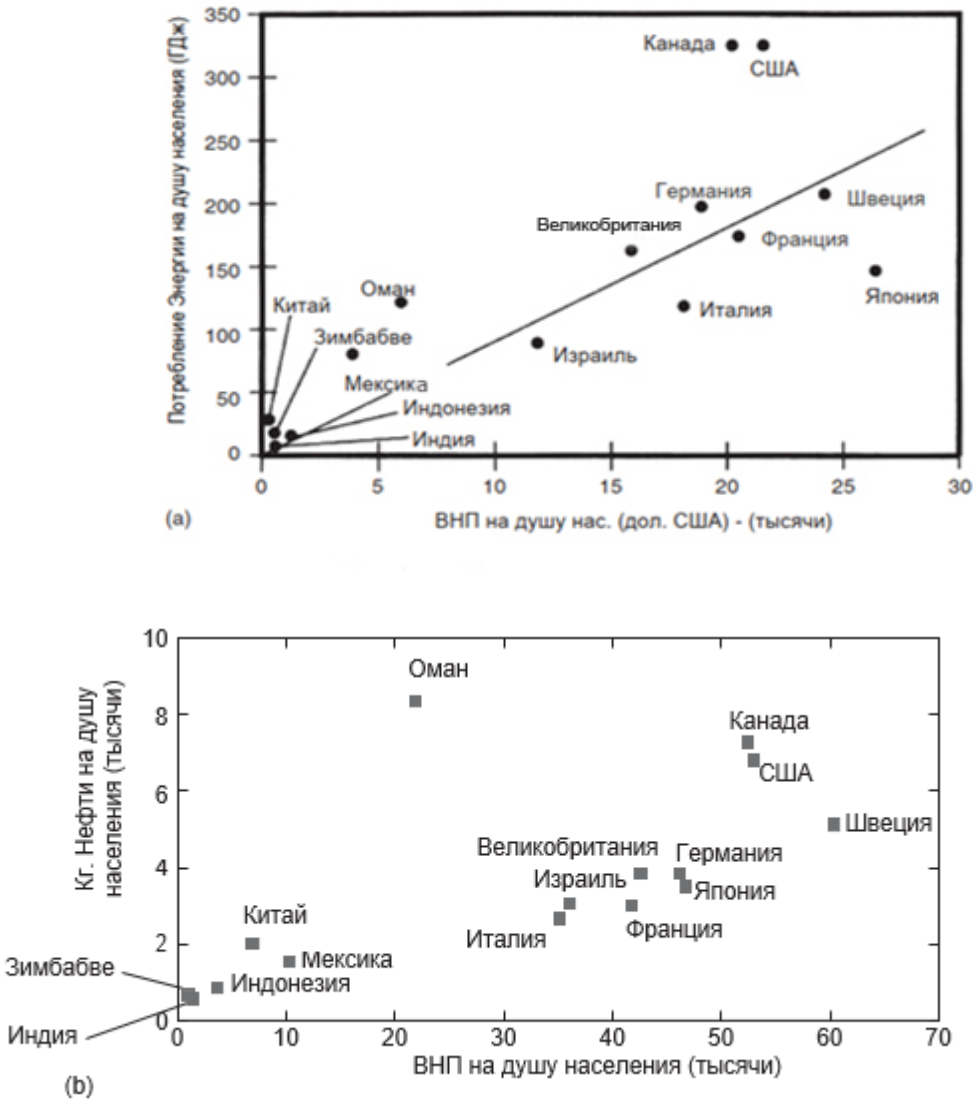


Рис. 1.2 Потребление энергии на душу населения в сравнении с ВНП на душу населения в ряде стран. a) данные Всемирного банка за 1992 год. *Источник*: Тестер и соавт. (2005). (b) Последние данные Всемирного банка (www.worldbank.org, 2012–2013).

Информация о потреблении энергии на душу населения от Всемирного банка представлена в килограммах нефтяного эквивалента на душу населения; следовательно, ординаты на рис. 1.2a и b показаны в разных единицах энергии, а абсциссы (в долларах) не корректировались для учета инфляции. Сравнение рисунков 1.2 a и b не показывает значительных различий в относительных позициях для развитых стран, но Китай добился реального прироста ВНП на душу населения с момента данных за 1992 год, и, как и ожидалось, потребление энергии на душу населения увеличилось по сравнению с другими развивающимися странами с 1992 года. На рисунках 1.1 и 1.2 в США приведены показатели киловатт-часов на душу населения и энергопотребления, которые являются высокими даже для развитых стран. Существует ряд причин высокого потребления энергии на душу населения в США; среди них (1) исторически дешевая энергия, (2) низкая плотность населения, (3) большая площадь (инфраструктура больших масштабов) и (4) историческое изобилие бытовой энергии.

Начиная с первого «энергетического кризиса» конца 1970-х годов, низкие цены на энергию и изобилие внутренней энергии, казалось, исчезли из США. Начиная с 1970-х годов и примерно по 2005 год, США потребовался все больший объем импортной энергии (в основном в форме нефти) и однообразное повышение себестоимости энергии. Зависимость от импорта энергоносителей радикальным образом повлияла как на экономику, так и на внешнеполитическую позицию США. Основой первого издания этого учебника была необходимость рассмотреть как альтернативные источники энергии, так и применение альтернативных (более эффективное использование) источников энергии для решения энергетических проблем, с которыми сталкиваются в США. Примерно с 2005

года увеличение внутреннего производства ископаемого топлива (за счет увеличения добычи нефти посредством «гидравлического разрыва пласта») и определение ранее не обнаруженных запасов природного газа изменили ожидаемое увеличение, как импорта энергоносителей, так и цен на энергоносители. По сути, энергетической экономике США предоставляется еще один шанс снизить влияние экономических затрат на энергию за счет повышения энергоэффективности существующих ресурсов. Глава 17 посвящена данной теме.

Спрос и ожидание стран (например, Индия и Китай) повысить уровень жизни своих граждан обостряют энергетические проблемы в США. Мировое потребление энергии растет быстрее, чем потребление в США. Раздел 1.5 рассматривает модели мирового потребления энергии.

1.3 Историческая перспектива использования энергии в США

Управление энергетической информации (EIA) Министерства Энергетики США обеспечивает доступный и актуальный источник энергетической статистики. Веб-сайт EIAwww.eia.doe.gov. EIA предоставляет ежемесячную и ежегодную энергетическую статистику для США. Эти ежемесячные энергетические статистические данные доступны в Ежемесячном энергетическом обзоре (MER), а ежегодный энергетический обзор появляется в Ежегодном энергетическом обзоре (AER) примерно через 8 месяцев после окончания календарного года и доступен на веб-сайте www.eia.doe.gov/aer. По состоянию на 2012 год выпуск AER был приостановлен из-за проблем с бюджетом. Приостановление AER весьма прискорбно, поскольку это, пожалуй, самый полезный из периодических документов EIA. Основой для информации, содержащейся в настоящем учебнике, являются MER, доступные в Интернете по адресу www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/.

Рис. 1.3 - мозаика спутниковых фотографий в ночное время в США, является довольно яркой иллюстрацией плотности и разбросанности населения США, а также распределения энергоемкости ночного освещения (главным образом, потребления электроэнергии).



Рис. 1.3 Мозаика ночных спутниковых фотографий США. *Источник*: EIA.

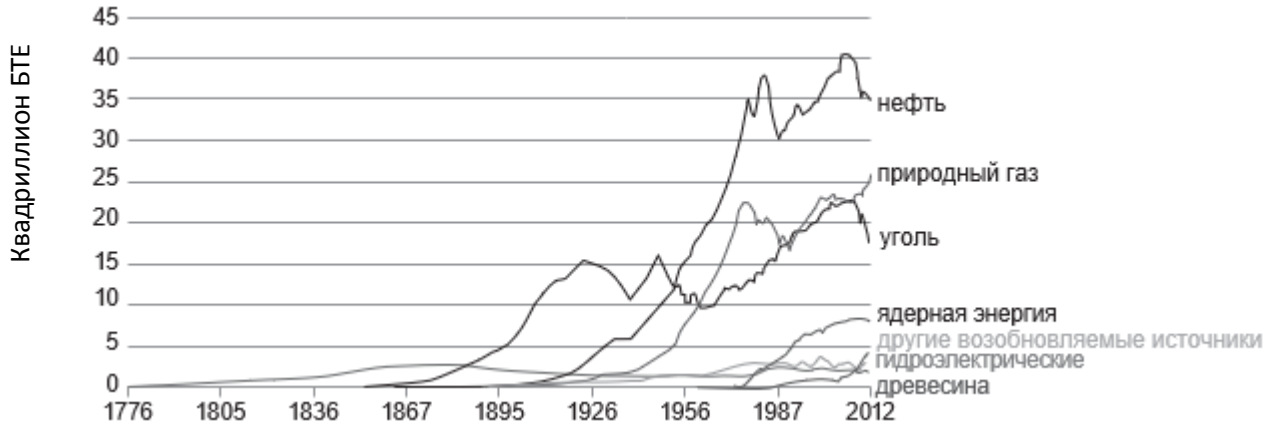


Рис. 1.4 История использовали энергии в США (1775–2012). *Источник:* EIA.

Рассмотрим, как США пришли к своей нынешней энергетической экономике. Рис. 1.4, с информацией из данных EIA, представляет графическое изображение исторического использования энергии. Единица использования энергии – квад (квадриллион БТЕ составляет 10^{15} БТЕ). Главным источником энергии до середины 1800-х годов была древесина. Потребление угля начало увеличиваться с 1850 года, а с 1900 года – превзошло потребление древесины. Нефть становится наиболее важным источником энергии в данный период, а с 1950 года потребление нефти обгоняет потребление угля. Наблюдается резкое увеличение спроса на природный газ. К 2000 году нефть обеспечивает наибольшее количество энергии, природный газ и уголь занимают второе и третье места. Атомная энергетика занимает четвертое место, а гидроэлектростанции и возобновляемые источники энергии (включая древесину) вносят наименьший вклад. Подробная информация об использовании энергии в 2014 году будет рассмотрена в Разделе 1.4.

Зарождение энергетической проблемы изображено на рис. 1.5. До 1950 года США не испытывали большой потребности в импорте энергоносителей. Однако, улучшение экономической ситуации после Второй Мировой войны привело к увеличению зависимости от импорта энергоносителей. Внутреннее потребление превышает внутреннее производство. Начиная с 1980-х годов и до середины 2000-х, внутреннее производство испытывает прирост. Но прирост потребления остается выше. Результатом стало устойчивое увеличение импорта энергии. Несмотря на это, с 2005 (Рис. 1.6) результаты расширения внутреннего производства привели к значительному уменьшению импорта энергоносителей. Большая часть увеличения производства произошла из-за добычи нефти из существующих нефтяных месторождений с использованием методов гидравлического разрыва пласта (см. Главу 17).

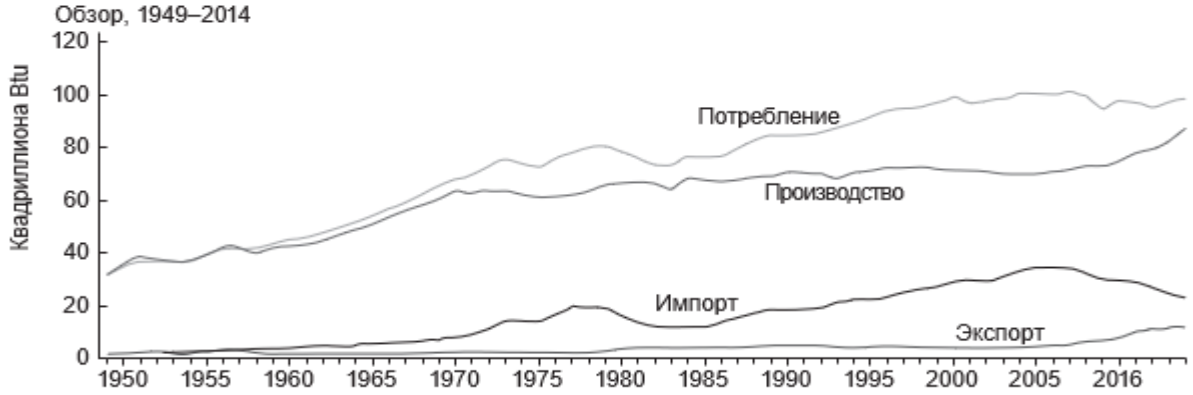


Рис. 1.5 Потребление энергии, импорт и экспорт в США. *Источник*: EIA.

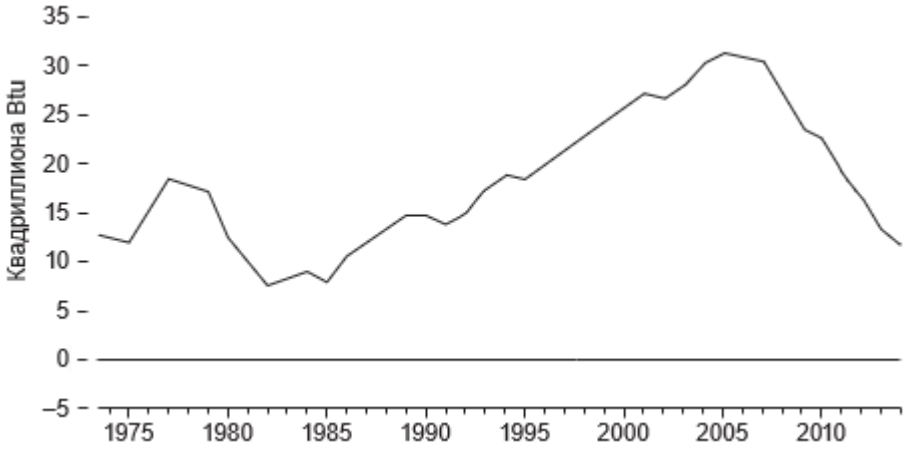


Рис. 1.6 Импорт энергоресурсов с 1975 года. *Источник*: EIA.

Дальнейшее рассмотрение как США пришли к данному уровню потребления энергии можно увидеть на рис. 1.7 и 1.8. Потребление энергии на душу населения можно увидеть на рис. 1.7. В 1980 году данный показатель был 344×10^6 БТЕ на человека, до 1985 года испытал период спада и достиг своего пика в 1995 году с показателем 346×10^6 БТЕ на человека. Одной из основных причин такой динамики потребления в 1970-х и 1980-х годах была реакция на первый «энергетический кризис». Начиная с 2005 года, потребление энергии на душу населения уменьшилось. В 2014 году показатель потребления на душу населения составил 309×10^6 БТЕ на человека. Энергетический кризис 1970-х незначительно повлиял на уменьшения в показателях потребления на душу населения в США. Эти показатели частично объясняют текущую энергетическую дилемму в США. В краткости, США не смогли понять и прислушаться к предупреждениям первого энергетического кризиса. Использование энергии на доллар валового внутреннего продукта (ВВП) представлено на рис. 1.8. С 1980-х годов потребление энергии на доллар ВВП существенно сократилось с почти 12 000 БТЕ/ВВП долл. США до нынешнего значения 6120 БТЕ/ВВП долл. США (за «прикованный» доллар в 2009 году). «Прикованные» доллары – это доллары, которые скорректированы с учетом инфляции, «прикованной» к базовому году (в данном случае 2009). Это снижение объясняется повышением энергоэффективности, особенно в обрабатывающей промышленности, а также структурными изменениями (миграция значительной энергоемкой промышленности в другие страны) в экономике.

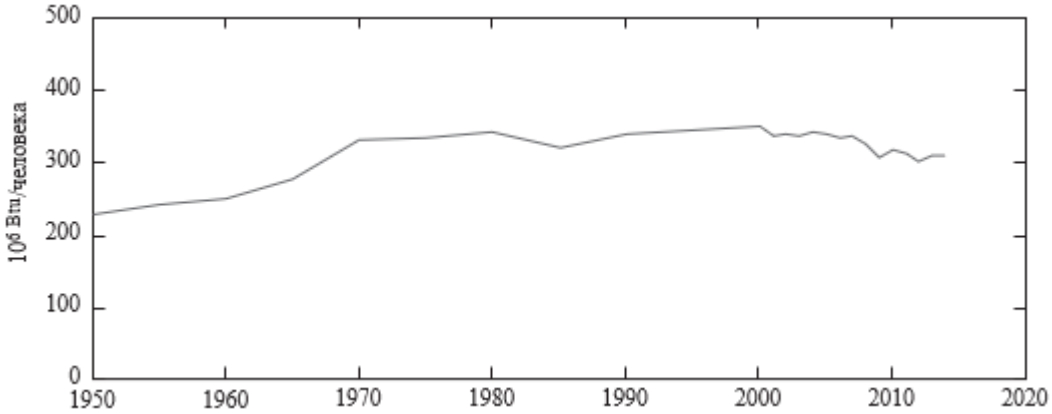


Рис.1.7 Историческое потребление энергии в США. *Источник*: EIA.

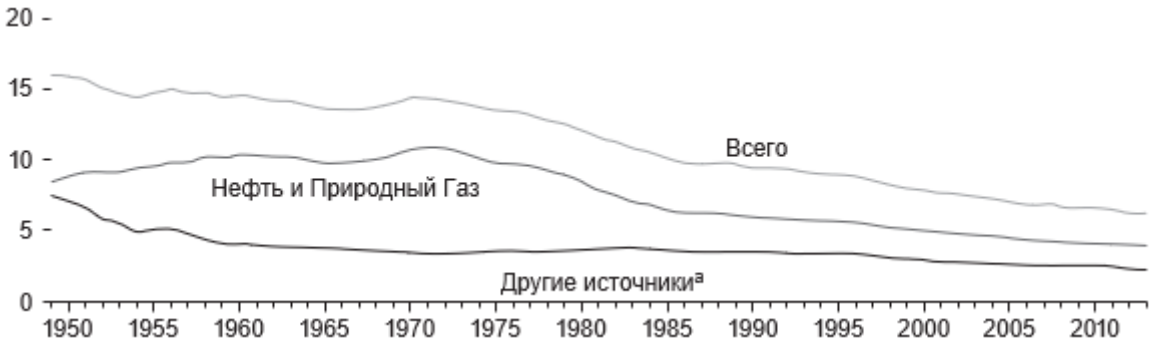


Рис. 1.8 Потребление энергии на доллар ВВП. *Источник*: EIA.

1.4 Использование энергии в США в 2014 году.

Диаграмма энергетического потока EIA за 2014 год, взятая из EIA TotalEnergy (EIA, 2015), является наиболее информативным графическим показателем, представленным EIA, и изображена на рис. 1.9. На данном рисунке все энергозатраты выражены в квадах (1015 БТЕ). Источники энергии обозначены в левой части диаграммы (например, уголь 20.26 квад). Источники затем суммируются и выражаются в виде внутреннего производства (87.04 квад) и импорта (23.31 квад). Общий объем поставок составляет 110.55 квад, где экспорт составляет 12.22 квад, что дает 98.32 квад для потребления. Использование энергии конечным потребителем (классифицированные как жилые, коммерческие, промышленные и транспортные) показано на правой стороне рисунка. Так, в 2014 году энергетическая экономика США составила 98.32 квад, из которых 23.31 квад было импортировано. Другая точка зрения на диаграмму энергетического потока представлена на рис. 1.10, который описывает связь между источниками энергии и использованием энергии конечным потребителем, выраженную двумя различными способами: на рис. 1.10 a как «транспорт», «промышленность», «жилые и коммерческие» и «электроэнергия». А на рис. 1.10 b - более обычные четыре вида: «транспорт», «промышленность», «жилые» и «коммерческие». Традиционные четыре вида конечных потребителей энергии отображаются на круговой диаграмме на рис. 1.11. Промышленное потребление составляет 32% от общего объема используемой энергии, 28% относятся к транспорту. Остальная часть почти поровну разделена между жилыми и коммерческими потребителями. Для всех секторов конечных потребителей в случае предстоящей существенной экономии энергии необходимы альтернативные источники и методы применения энергии, так как используемая сектором не конечных потребителей энергия занимает доминирующую позицию. Рис. 1.10a особенно интересен, поскольку он напрямую связывает, с указанным процентным соотношением, источники энергии и использование энергии в конечной точке. Освоение информации на рисунках 1.9 и 1.10 необходимо для полного понимания потребления энергии в США.

В 2014 году возобновляемая энергия из всех источников обеспечивала около 10% всей энергии, используемой в США. На рис. 1.11 показан процент потребления возобновляемых источников энергии в США за 2014 год. Самая удивительная статистика заключается в том, что на древесину и традиционные гидроэлектростанции приходилось 49% от общего объема возобновляемых источников энергии в данном году! В 2014 году на долю солнечной энергии и энергии ветра приходилось 22% всей возобновляемой энергии (или около 2% от общего энергопотребления). Следовательно, несмотря на большой интерес и ажиотаж в СМИ, проникновение солнечной и ветроэнергетики в общую энергетическую составляющую не показало большого прогресса.

Возобновляемые источники энергии увеличились в последние годы. Рис. 1.12 иллюстрирует вклад различных возобновляемых источников энергии с 2000 года. Гидроэнергия колебалась, в то время как биомасса и геотермальная энергия показали небольшое увеличение. Но, начиная с 2000 года энергия ветра показала резкий рост и стала вторым по величине возобновляемым источником энергии после гидроэнергии. Солнечная энергия также показала рост, но все же отстает от роста ветроэнергетики. Ветроэнергетика и гидроэнергетика в совокупности обеспечивают примерно 87% всех возобновляемых видов производства энергии (за исключением биомассы) в 2014.

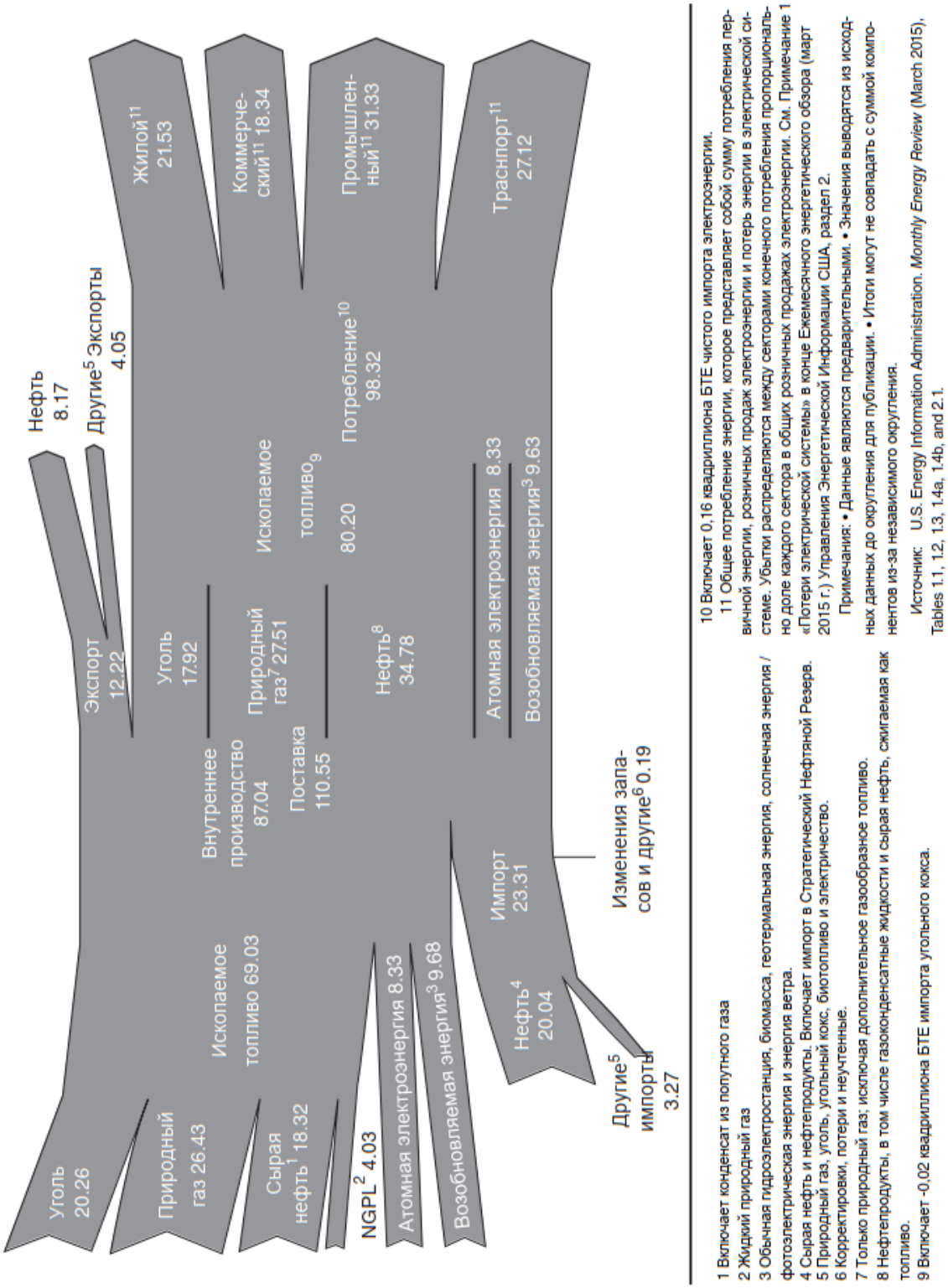


Рис. 1.9 Диаграмма энергетического потока США (квадриллионов БТЕ) за 2014. *Источник*: EIA

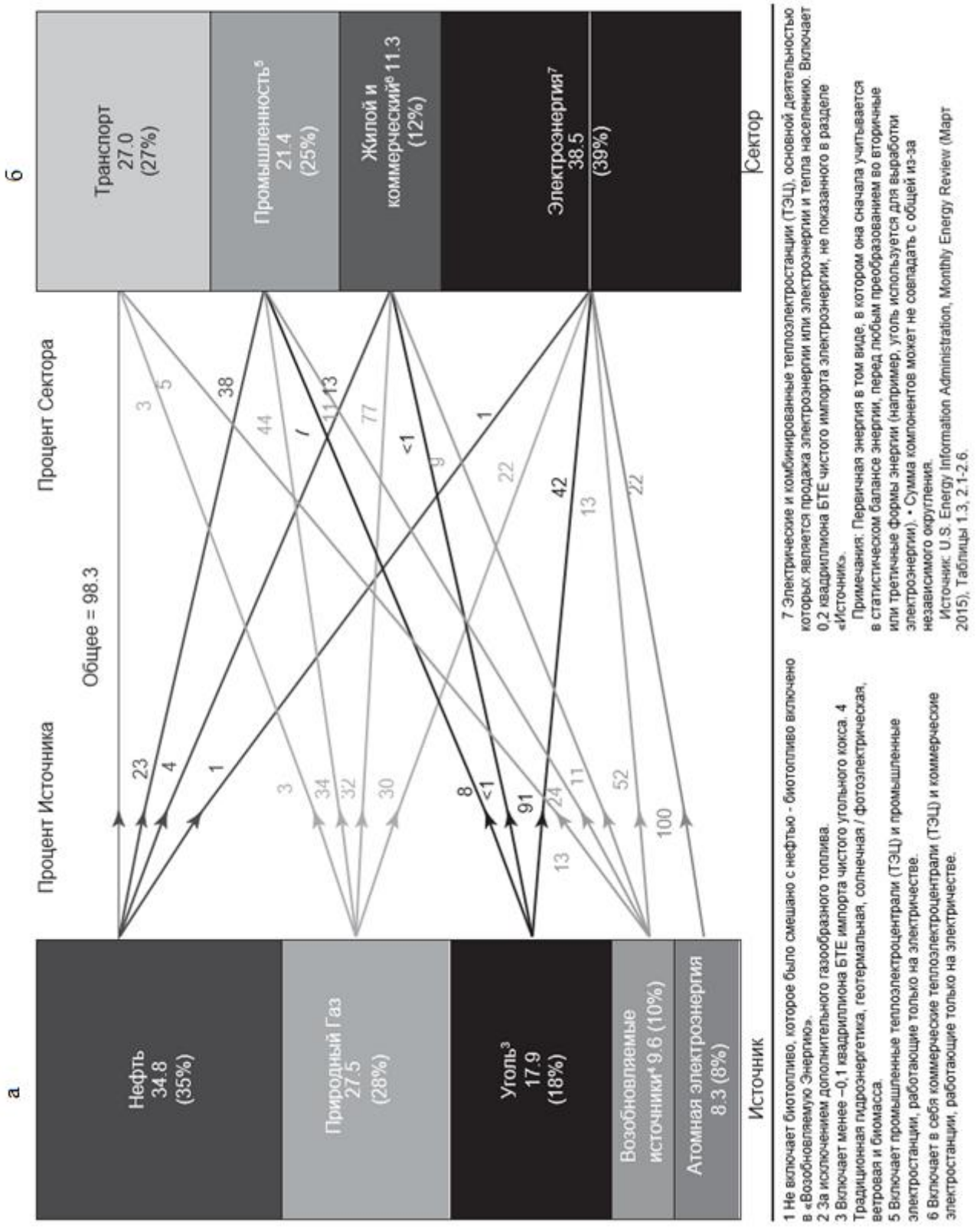


Рис. 1.10 Использование энергии конечными потребителями в 2014 году. *Источник*: EIA.
(а) Использование энергии конечными потребителями (квадриллион БТЕ) с раздельной подачей электроэнергии. (б) Использование энергии конечными потребителями с электроэнергией, включенной в первую четверку.

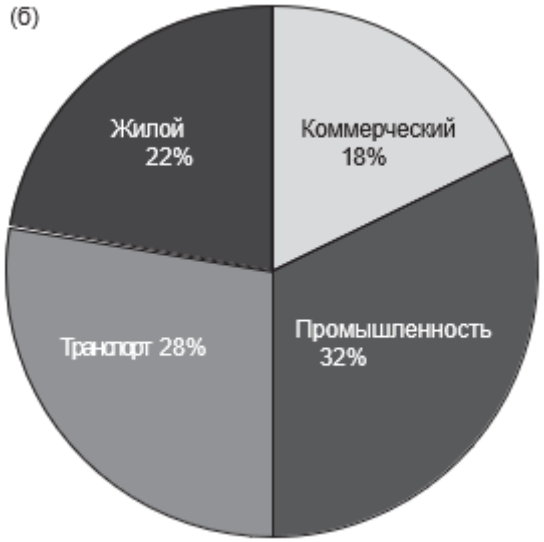


Рис. 1.10 (Продолжение)

В последующих главах этой книги будет более подробно рассмотрена гидроэнергия, энергия ветра, солнечная/фотоэлектрическая энергия, биомасса, геотермальные и муниципальные твердые отходы, а также энергия океана, комбинированное производство тепла и электроэнергии, и ядерная энергия (не как альтернативная или возобновляемая, а одна из энергий, которую нужно учитывать из-за её потенциала). Национальная академия наук и соавт. (2010) разработала очень всестороннее исследование электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых ресурсов. Название исследования: Электричество из возобновляемых ресурсов: состояние, перспективы и препятствия. В учебном издании приводятся оценки и результаты (технические, экономические, экологические) для различных технологий.

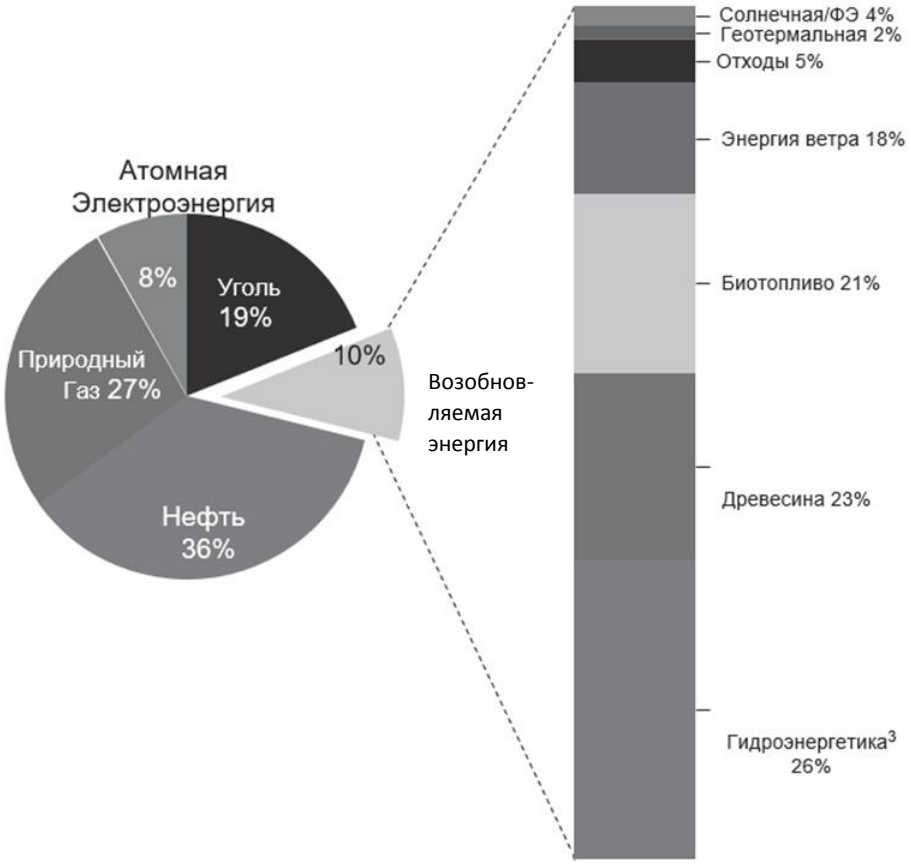


Рис. 1.11 Процент потребления возобновляемых источников энергии в 2014 году. *Источник*: EIA.

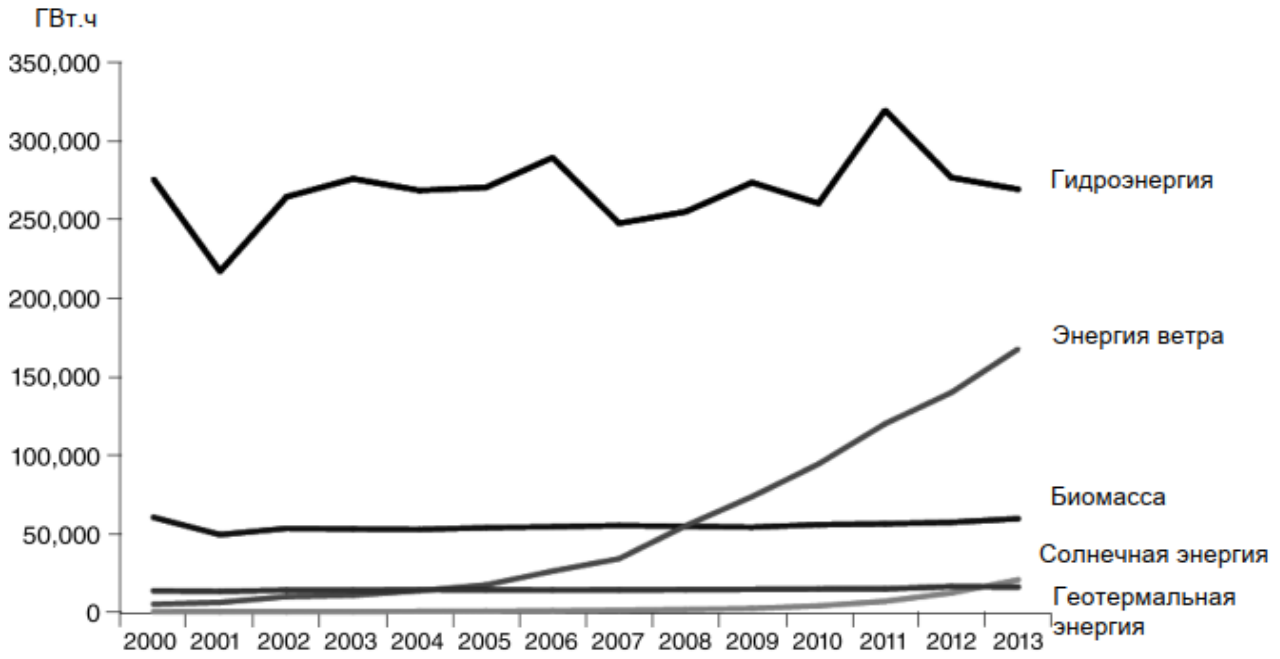
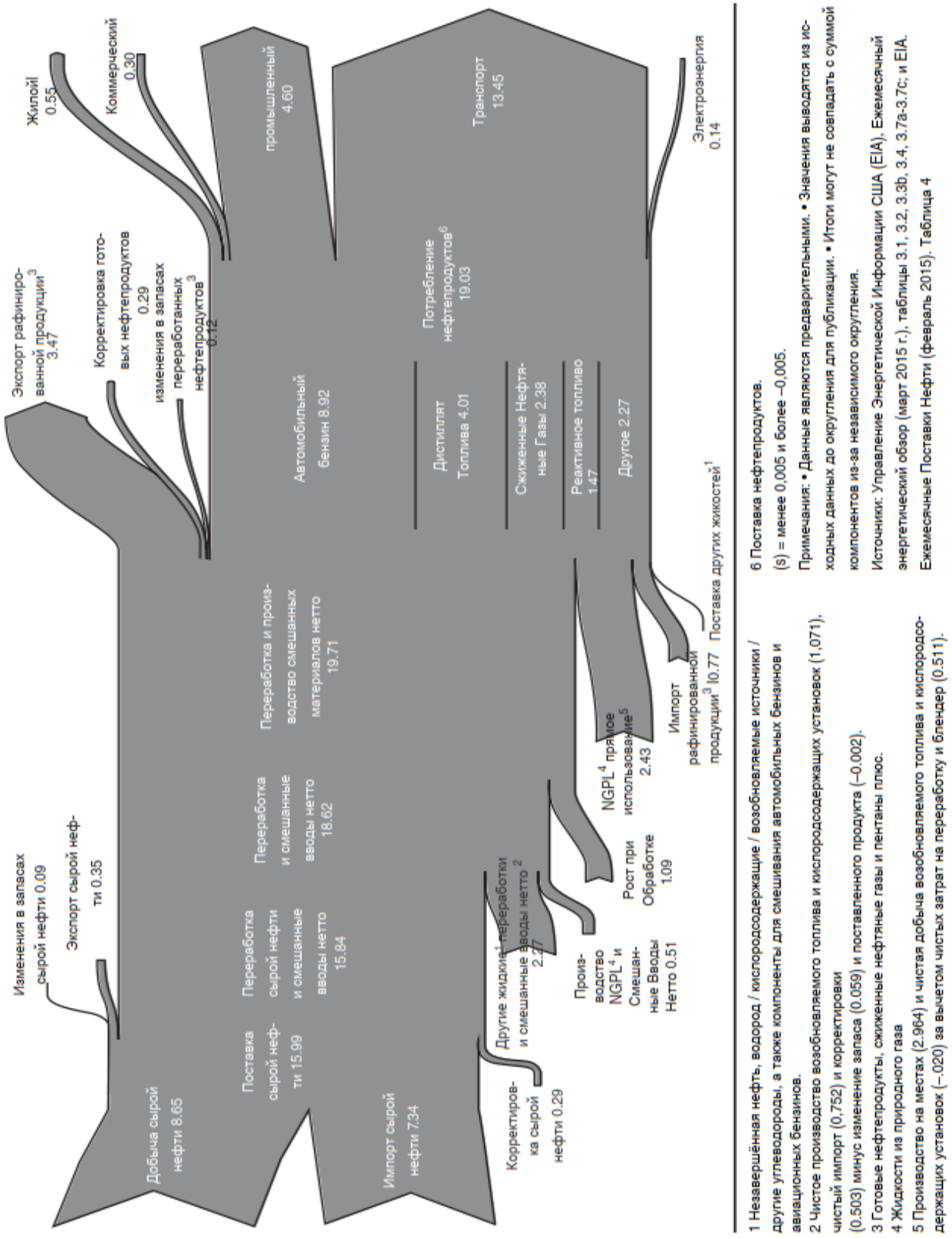


Рис. 1.12 Вклад различных возобновляемых источников энергии с 2000 года. *Источник*: Эстерли и Гельман (2014).

Каждый год Бизнес-Центр по устойчивой энергетике публикует исследование Bloomberg New Energy Finance Study, в котором содержатся некоторые материалы, представленные из федеральных источников, как правило, EIA, но также оценивается влияние текущих событий и технологий на энергетический сценарий. Этот документ является дополнительным, вспомогательным источником информации помимо EIA. Издание 2016 года - «Справочник по устойчивой энергетике в Америке 2016 года», доступное по адресу: http://www.bcse.org/ustralenergyfactbook.html. Прентисс (2015) утверждает, что благодаря изменениям инфраструктуры и альтернативам энергопотребления, США могут развивать устойчивую энергетическую экономику, не основанную на нефти. Она рекомендует использовать гибридные и электрические транспортные средства (см. Главу 16) для личного транспорта и предлагает использовать биомассу (см. Главу 12) в качестве источника авиационного топлива. Такая энергетическая экономика будет сильно отличаться от экономики 2015 года.

Рис. 1.13 представляет собой диаграмму нефтяного потока в США за 2014 год. Формат рисунка: аналогично Рисунку 1.9, за исключением того, что цифры на диаграмме нефтяного потока указаны в миллионах баррелей в день (MMBD). Левая часть диаграммы показывает, что внутренняя добыча сырой нефти немного меньше, чем импорт сырой нефти. Объем выпускаемой нефти определяется с точки зрения автомобильного бензина, мазута, сжиженного нефтяного топлива, реактивного топлива, остаточного мазута и «прочего». Автомобильный бензин, с количеством в 8,92 млн. баррелей в сутки составляет почти половину от общего объема использования нефтепродуктов в США в 2014 году. Правая часть диаграммы нефтяного потока отражает конечное использование нефти. Транспортные средства потребляют 71% от общего объема нефти. Промышленное использование составляет около 24%, при этом на остаток в 5% приходится на жилищную, коммерческую и электроэнергетическую сферы.

Транспорт является доминирующей конечной точкой потребления нефти и требует более тщательного изучения. Многое можно понять, отслеживая стоимость галлона автомобильного бензина в терминах «реальных» и «номинальных» долларов. Реальные доллары – это «прикованные» доллары, основанные на курсе доллара в 2000 году, в то время как номинальные доллары – это фактические расходы в течение данного года. Поэтому, «реальные» доллары отвечают за инфляцию.



1 Незавершённая нефть, водород / кислородсодержащие / возобновляемые источники / другие углеводороды, а также компоненты для смешивания автомобильных бензинов и авиационных бензинов.
2 Чистое производство возобновляемого топлива и кислородсодержащих установок (1,071), чистый импорт (0,752) и корректировки (0.503) минус изменение запаса (0.059) и поставленного продукта (–0.002).
3 Готовые нефтепродукты, сжиженные нефтяные газы и пентаны плюс.
4 Жидкости из природного газа
5 Производство на местах (2.964) и чистая добыча возобновляемого топлива и кислородсодержащих установок (–.020) за вычетом чистых затрат на переработку и блендер (0.511).
6 Поставка нефтепродуктов.
(s) = менее 0,005 и более –0,005.
Примечания: • Данные являются предварительными. • Значения выводятся из исходных данных до округления для публикации. • Итоги могут не совпадать с суммой компонентов из-за независимого округления.
Источники: Управление Энергетической Информации США (EIA), Ежемесячный энергетический обзор (март 2015 г.), таблицы 3.1, 3.2, 3.3b, 3.4, 3.7a-3.7c; и EIA. Ежемесячные Поставки Нефти (февраль 2015). Таблица 4

Рис 1.13 Диаграмма нефтяного потока в США (миллионы баррелей в день) 2014 год. *Источник*: EIA.

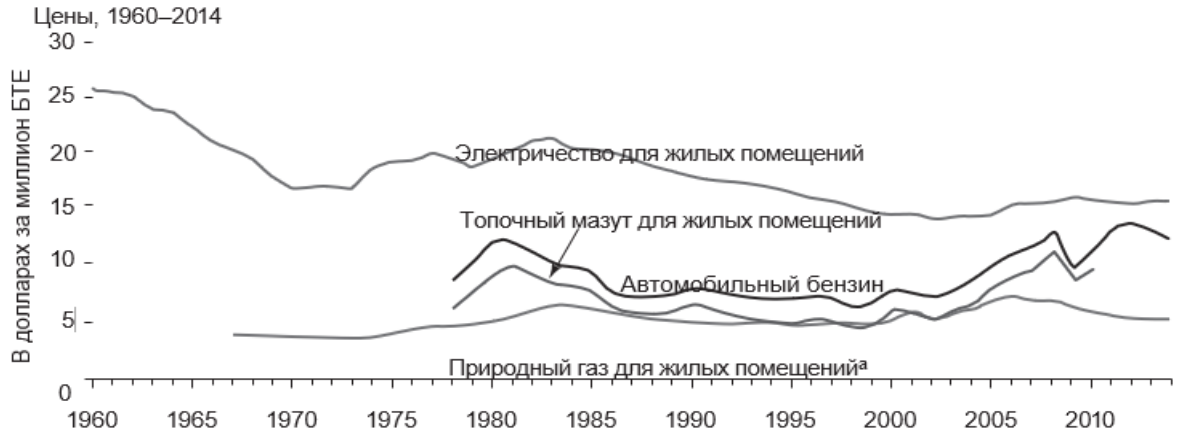


Рис. 1.14 Стоимость топлива в реальных (1982–1984) долларах. *Источник*: EIA.

На рис. 1.14 показана реальная стоимость в долларах на миллион Британских тепловых единиц автомобильного бензина с 1978 по 2014 год. В реальных долларах бензин составлял около 12 долл. США/10^6 БТЕ в 1980 году, такая цена была вновь достигнута только в 2008 году. Быстрый рост цен на бензин, превышающий уровень инфляции привел, в целом, к серьезной экономической нагрузке на экономику США после 2000 года. В последние годы рост добычи отечественной нефти снизил цены на бензин в реальных долларах. В период процветания 1980-х и 1990-х годов, по сравнению с инфляцией, цены на бензин снизились! Неудивительно, что такие вещи как сохранение природных ресурсов, экономичные автомобили и альтернативные источники энергии не вызывали большого интереса у общественности.

Поток природного газа за 2014 год представлен на рис. 1.15. На данном рисунке потребление природного газа выражено в триллионах кубических футов. Как и в случае других диаграмм потоков энергии (Рис. 1.9 и 1.13), информация идет от левой стороны (источники) к правой стороне (потребители энергии). Импорт составляет около 10% от общего потребления. Промышленное использование и выработка электроэнергии составляют 65% от общего объема использования природного газа, а остальная часть делится на жилое, коммерческое и транспортное потребление.

Поток угля в 2014 году показан на рис. 1.16 и выражен в миллионах коротких тонн. По аналогии с другими диаграммами потоков энергии (рис. 1.9, 1.13 и 1.15) информация поступает с левой стороны (источники) на правую сторону (конечные потребители энергии). Весь уголь добывается внутри страны, а небольшое количество экспортируется. Практически все использование угля (93%) в США предназначено для выработки электроэнергии, при этом около 7% приходится на потребление в целях промышленной эксплуатации. Уголь является единственным источником энергии, который не нужно импортировать. Тем не менее, широкое использование угля для производства электроэнергии вызывает значительные экологические проблемы. За последние несколько лет экологические нормы, касающиеся использования угля, стали важнейшим политическим вопросом в США. В результате добыча и использование угля сократились.

Является уместным рассмотреть поток электроэнергии в США, несмотря на то что для этого используются конечные потребители, а не источники энергии. На рис. 1.17 представлена диаграмма потока электроэнергии за 2014 год; числа на рисунке представлены в квадах. На левой части диаграммы описывается потребляемая энергия, включая ядерную электроэнергию. Уголь является доминирующим источником ископаемого топлива (64%) для производства электроэнергии в США. На правой части диаграммы изображены сферы конечного потребления энергии, включая потери при передаче и распределении (около 9%). При потреблении 39,44 квада для производства 14,78 квад, общая тепловая эффективность выработки электроэнергии составляет 37%. Следовательно, из 39,44 квад энергии, использованных для выработки электроэнергии в США в 2014 году, 24,66 квада представляют собой потери при преобразовании. Следовательно, экономия 1 кВтч электроэнергии за счет усилий по сохранению и повышению энергоэффективности позволяет сэкономить почти 3 кВТ эквивалента топлива!

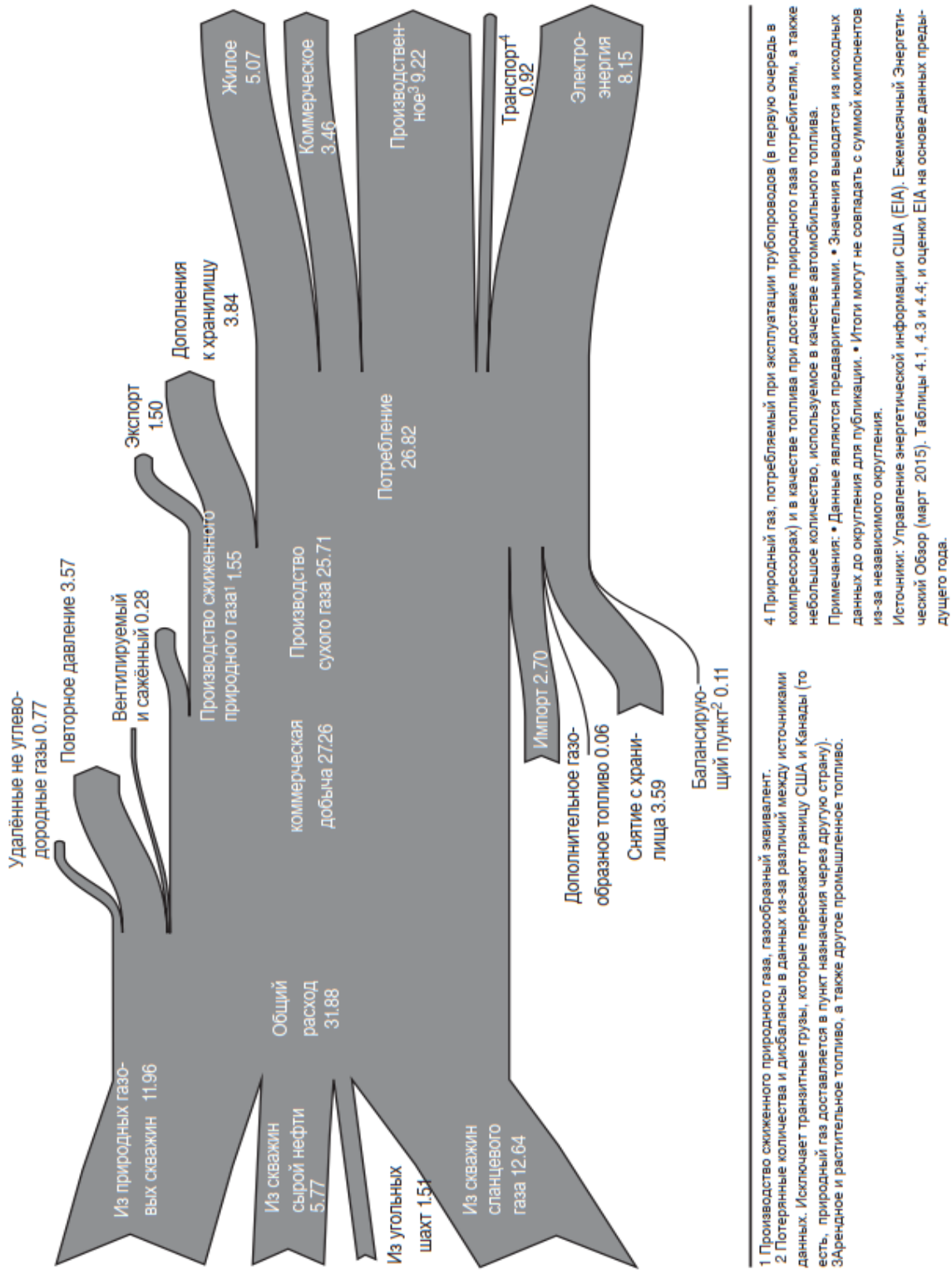


Рис. 1.15 Диаграмма потока природного газа в США (триллион кубических футов) за 2014 год. *Источник*: EIA.

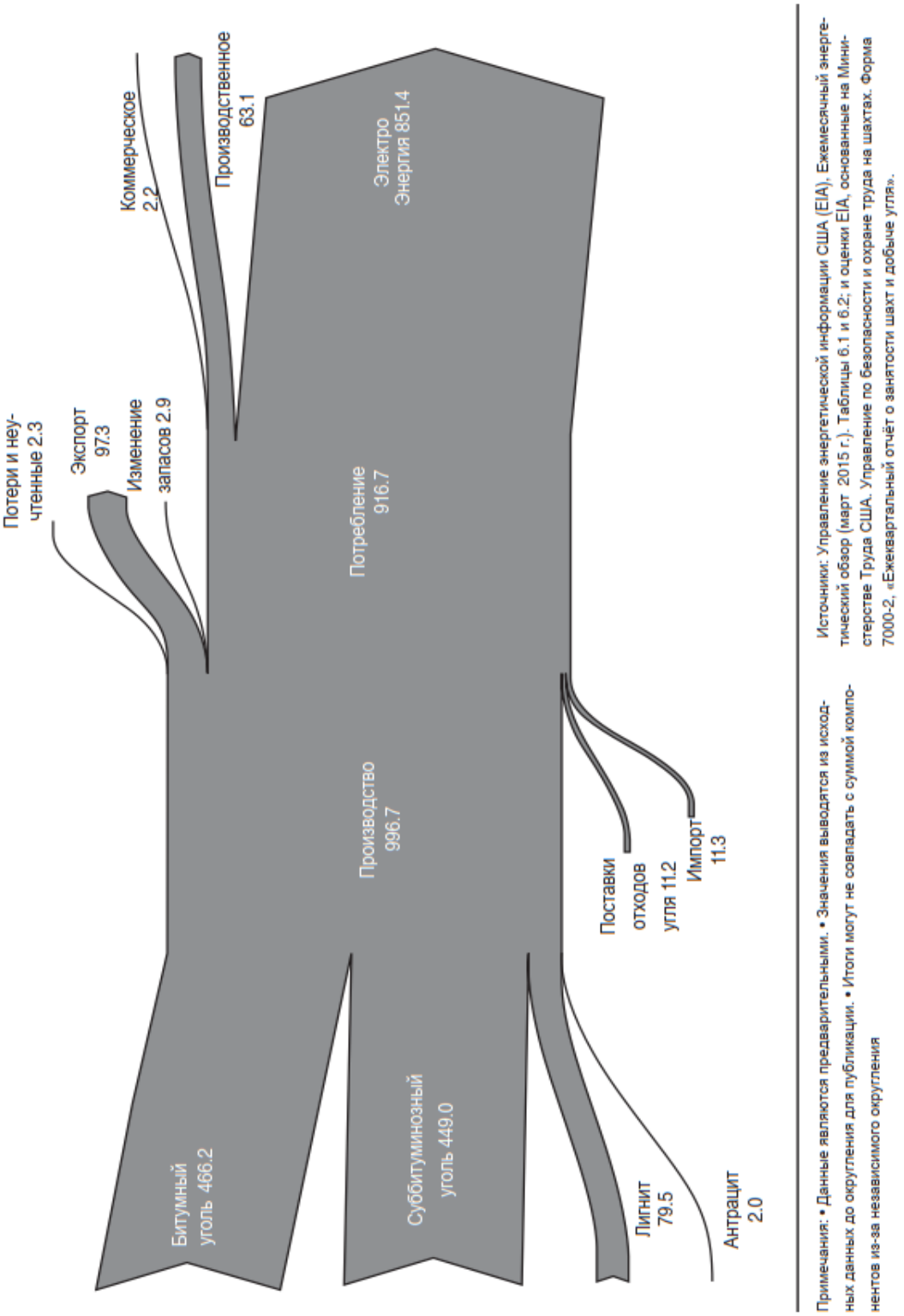


Рис. 1.16 Диаграмма потока угля в США (млн. коротких тонн) за 2014 год.

Источник: EIA.

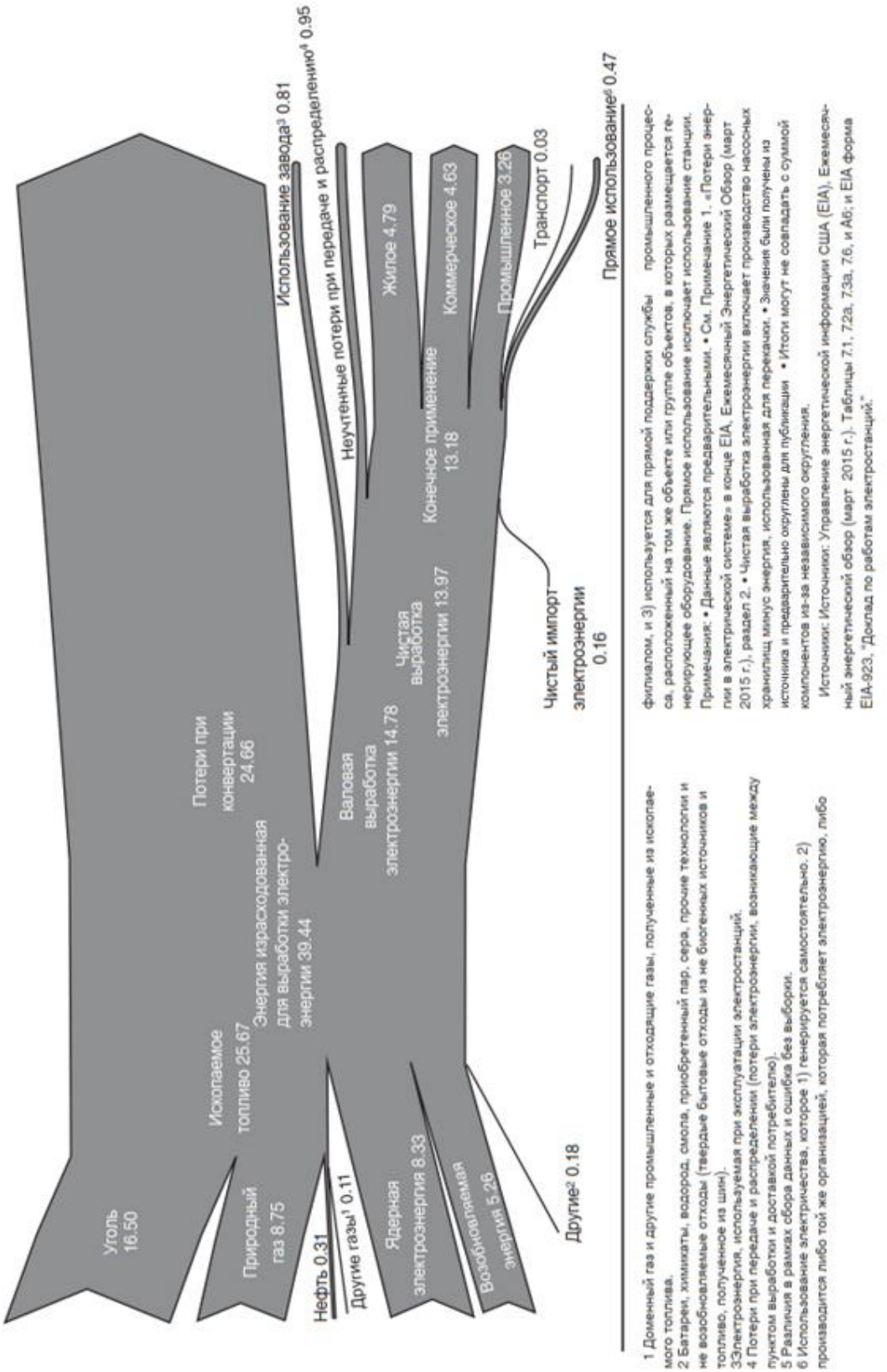


Рис. 1.17 Диаграмма потока электроэнергии в США (квадриллион БТЕ) за 2014 год.

Источник: EIA.

Таблица 1.2 Процент выработки электроэнергии по источникам энергии.

Источник	Процент
Уголь	39
Природный газ	27
Ядерная	19
Гидроэнергия	6
Другие виды возобновляемой энергии	7
Биомасса	1,7
Геотермальная	0,4
Солнечная	0,4
Ветряная	4,4
Нефть	1
Другие газы	<1

Сохранение и энергоэффективность являются наиболее экономически эффективными и энергоэффективными действиями, и их всегда следует рассматривать в первую очередь в качестве мер по снижению затрат на энергию и энергопотребление.

В 2015 году EIA (https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=427&t=3) сообщила о процентном производстве электроэнергии в 2014 году по источникам энергии. Как показано в Таблице 1.2, на уголь, природный газ и ядерную энергию приходилось 85% производимой энергии.

В дополнение к ценам на автомобильный бензин на рис. 1.14 также отслеживается реальная стоимость электроэнергии в долларах на миллион Британских тепловых единиц с 1960 по 2014 год. Реальные доллары – это «прикованные» центы, основанные на долларе в 1982–1984 годах. Действительно, за исключением нескольких лет в 1980-х годах, реальная стоимость электроэнергии была меньше, чем в 1960 году. С 1984 по 2003 год реальная стоимость электроэнергии монотонно снижалась. Как и в случае с автомобильным бензином, снижение реальной стоимости электроэнергии в благоприятные 1990-е годы по отношению к инфляции, не дало экономического стимула для консервации или поиска альтернативных источников энергии. Теперь, с ростом внутреннего производства нефти и выявлением огромных запасов природного газа, вопрос заключается в том, могут ли США воспользоваться этими возможностями для повышения энергоэффективности и расширения использования вариантов и применений возобновляемых источников энергии или уроки 1990-х годов будут забыты.

1.5 Мировое использование энергии

Хотя эта глава была сконцентрирована на энергетическом сценарии в США, изучение использования энергии на всемирном уровне улучшит понимание глобальной природы энергетической проблемы. На рис. 1.18 показано использование энергии в мире и странах с наибольшим потреблением энергии с 1994 по 2007 год. До *Ежегодного энергетического обзора (далее AER)* 2007 года, AER содержал раздел о международном использовании энергии. Однако, начиная с 2008 года, этот раздел был исключён. Поскольку AER в настоящее время приостановлен, обновления из этого источника являются спорными. Но информация 2007 года по-прежнему полезна, поскольку иллюстрируется относительный рост основных стран, использующих энергию. Все данные представлены в квадах. Рост потребления энергии во всем мире и в Китае наглядно отображены на рисунке. Потребление энергии в России несколько снизилось, а потребление энергии в США увеличилось, но не так быстро, как потребление энергии Китаем. Энергетические проблемы США усугубляются растущим спросом на энергию во всем мире, особенно в странах с быстро растущей экономикой

.

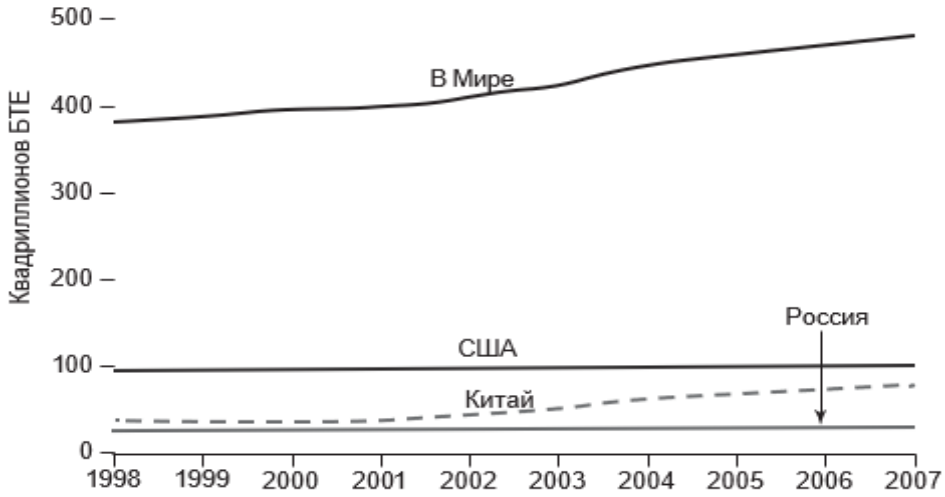


Рис. 1.18 Мировое использование энергии с 1994 по 2007 год. *Источник*: EIA

Хороший источник информации представлен в ежегодном *Статистическом обзоре мировой энергетики* от компании «Бритиш Петролеум» (BP), публикуемый в июне. Данные, представленные в этой главе, взяты из выпуска за июнь 2014 года. На рис. 1.19 представлена удобная сводка мирового потребления в период с 1988 по 2013 годы с разбивкой по источникам (нефть, природный газ, ядерная энергия, гидроэнергия, возобновляемые источники энергии и уголь). Единица измерения в эквивалентах тонны, каждая тонна составляет 7,33 баррелей или 307,86 галлонов. В целом на рис. показана та же мировая тенденция увеличения потребления энергии, что и на рис. 1.18. Единственное снижение происходит в 2008 году в результате экономического спада; однако к 2009 году тенденция увеличения использования энергии возобновится с ростом по всем источникам. На рис. 1.20 представлена диаграмма мирового энергопотребления по регионам с 1988 по 2013 годы.

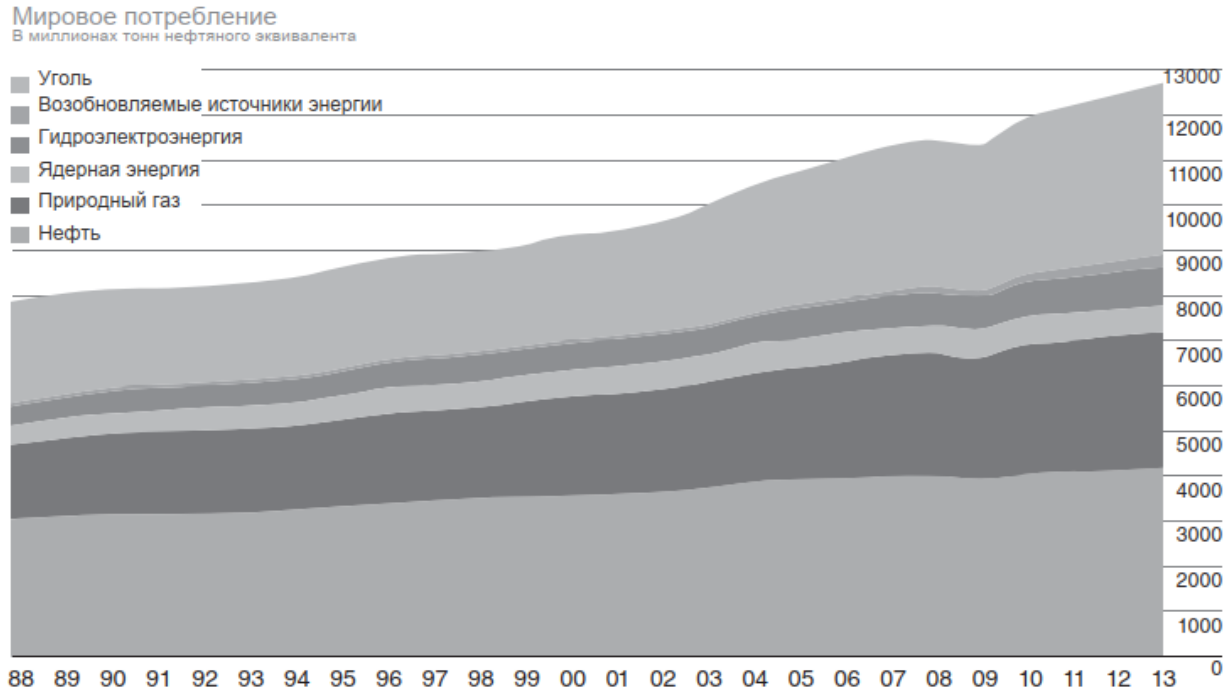


Рис. 1.19 Потребление энергии в мире с 1988 по 2013 год. Источник: Бритиш Петролеум (2014) *Статистический обзор мировой энергетики Бритиш Петролеум Июнь 2014 года.*

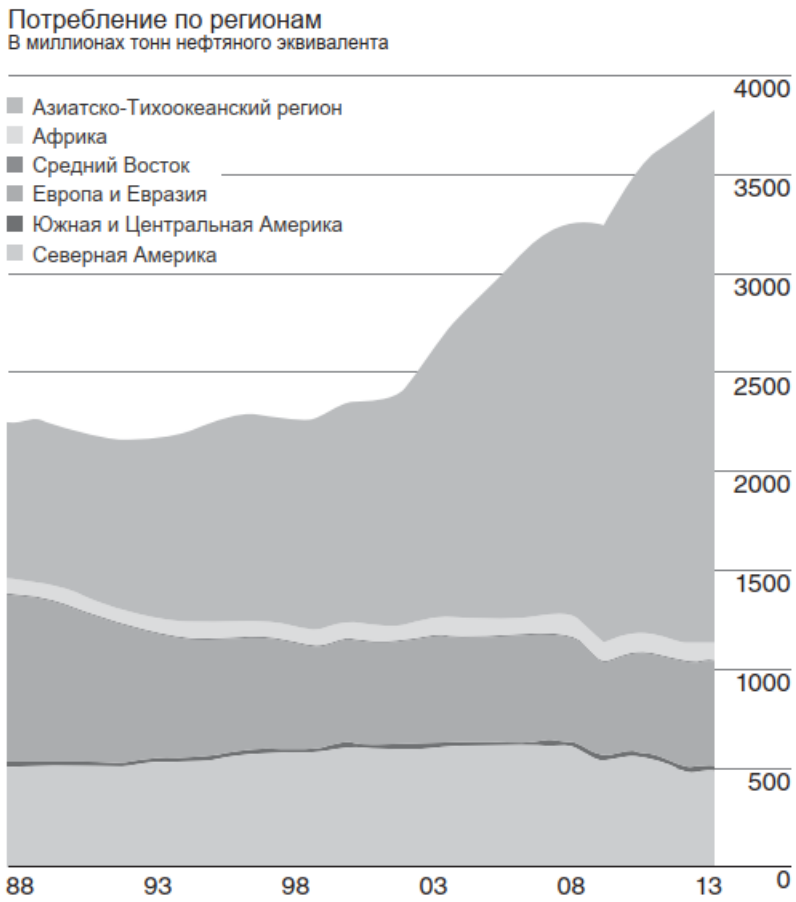


Рис. 1.20 Потребление энергии в мире с 1988 по 2013 год. Источник: Бритиш Петролеум (2014) *Статистический обзор мировой энергетики Бритиш Петролеум Июнь 2014 года.*

Эта цифра гораздо более показательна в понимании изменений в структуре потребления энергии в мире, чем на рис. 1.19. В то время как Северная Америка, Европа и Евразия демонстрируют небольшое снижение в течение нескольких лет до 2013 года, потребление в Азиатско-Тихоокеанском регионе с 2005 по 2013 годы фактически удвоилось! Продолжающееся увеличение энергопотребления такого масштаба создаст серьезную нагрузку на мировые поставки нефти. Действительно, если бы не улучшенная система добычи нефти и открытие значительных дополнительных запасов природного газа в США, цены на ископаемое топливо значительно превысили бы существующую структуру цен. Последствия производства углекислого газа вызывают еще большее беспокойство. Северная Америка потребляет около 25% энергии в мире, но из-за вопросов, касающихся окружающей среды производит гораздо меньше, чем 25% от мирового уровня CO_2. Азиатско-Тихоокеанский регион, как показано на рис. 1.20, в ближайшем будущем будет потреблять значительно больше энергии, чем Северная Америка, но количество CO_2 будет затмевать выбросы CO_2 в Северной Америке из-за более слабых экологических норм в Азиатско-Тихоокеанском регионе. Мюллер (2012) представляет интересное обсуждение этого вопроса.

1.6 Параметры производительности

Обычное определение теплового КПД теплового двигателя:

$$\eta = \frac{\text{Мощность}_{\text{на выходе}}}{\text{Мощность}_{\text{на входе}}} \tag{1.1}$$

Следующие три следствия второго закона термодинамики полезны для установления пределов эффективности теплового двигателя:

1) Никакой тепловой двигатель не может быть более эффективным, чем внешне реверсивный двигатель, работающий в тех же температурных пределах.

2) Все реверсивные тепловые двигатели, работающие в одинаковых температурных пределах, имеют одинаковую эффективность.

3) Эффективность любого внешнего реверсивного теплового двигателя, работающего между температурами T_H (высокая температура) и T_L (низкая температура) определяется эффективностью Карно

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{TH - TL}{TH} = 1 - \frac{TL}{TH} \tag{1.2}$$

Эффективность Карно $\eta_{\text{Карно}}$, таким образом, обеспечивает предел максимальной эффективности, которую может получить любой тепловой двигатель.

Тестер и соавт. (2012) предоставляют полезную сводку типичных показателей эффективности для ряда компонентов и устройств, связанных с использованием энергии. Таблица 1.3, адаптированная из Тестер и соавт. (2012), представляет диапазоны эффективности для ряда компонентов энергетической системы, источников освещения и биологических систем.

Таблица 1.3 Эффективность отдельных компонентов и биологических систем.

Компонент	**Путь преобразования**	**Эффективность**
Большие электрические генераторы	m → e	98–99
Котлы большой мощности	c → t	90–98
Большие электродвигатели	e → m	90–97
Домашние газовые печи	c → t	90–96
Сухие батареи	c → e	85–95
Водяное колесо (ловитель)	m → m	60–85
Маленькие электродвигатели	e → m	60–75
Большие паровые турбины	t → m	40–45
Дровяные печи	c → t	25–45
Большие газовые турбины	c → m	35–40
Дизельные двигатели	c → m	30–35
Фотоэлектрические элементы	r → e	20–30
Большие паровые двигатели	c → m	20–25
Двигатели внутреннего сгорания	c → m	15–25
Паровозы	c → m	3–6
Источники света		
Натриевые лампы высокого давления	e → r	15–20
Флуоресцентные лампы	e → r	10–12
Лампы накаливания	e → r	2–5
Парафиновые свечи	c → r	1–2
Биологические системы		
Производство молока	c → c	15–20
Бройлерная продукция	c → c	10–15
Производство говядины	c → c	5–10
Локальный фотосинтез	r → c	4–5
Мировой фотосинтез	r → c	0.3

a) c: химическая; e: электрическая; m: механическая; r: излучение; t: тепловая.

Кроме того, в Таблице 1.3 также указан путь преобразования энергии для каждого компонента. Например, для больших газовых турбин путь преобразования энергии является химическим в механический (c → m), а номинальный диапазон эффективности составляет 35–40%. Некоторые крупные компоненты обладают КПД выше 90%, но многие широко используемые компоненты (например, двигатели внутреннего сгорания) имеют КПД менее 30%. С исторической точки зрения, причина прекращения использования паровоза также очевидна.

Большая часть вырабатываемой электроэнергии используется для освещения. Как показывают данные Таблицы 1.3, даже самый эффективный источник освещения, натриевые лампы высокого давления, эффективны только на 15–20%. Эффективность ламп накаливания составляет незначительные 2-5%. Биологические системы, используемые для производства продуктов питания, например, молока или говядины, также демонстрируют низкую эффективность. В местном масштабе фотосинтез не превышает 5% эффективности падающего солнечного света, но глобальное среднее значение намного меньше.

В конечном итоге Таблица 1.3 указывает на то, что для сокращения использования энергии за счет повышения эффективности использования различных компонентов требуются значительные инженерные усилия.

1.7 Заключение

Информация, содержащаяся в этой главе, приводит нас к цели этой книги. Если мы хотим удовлетворить растущий спрос на энергию в США и мире, то следует рассмотреть вопрос об использовании альтернативных источников энергии и альтернативном использовании существующих источников энергии даже в свете недавних изменений в энергетических прогнозах США на внутреннем рынке. В следующих главах этой книги рассматриваются фундаментальные принципы и факты о широком разнообразии альтернативных источников энергии и их применение. Уровень материала, охватываемого по каждой теме, в большинстве случаев является основополагающим. Чтобы выполнить детальные инженерные работы по большинству тем, представленных в этой книге, потребуется дополнительная техническая информация. Тем не менее, материал, представленный здесь, обеспечивает введение и обзор многих возможных сценариев альтернативной энергии.

Литература

British Petroleum (2014) British Petroleum Statistical Review of World Energy June 2014. http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world- energy-2014-full-report.pdf (accessed October 3, 2016).

EIA (2015) Monthly Energy Review June 2015. US Department of Energy, Washington, DC. Esterly, S. and Gelman, R. (2014) 2013 Renewable Energy Data Book, Haas, K. (ed.). US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, Washington, DC.

Golemberg, J. and Johansson, T.B. (eds) (2004) World Energy Assessment: Overview 2004 Update. United Nations Development Program, New York.

Muller, R.A. (2012) Energy for Future Presidents: The Science behind the Headlines, Norton, New York.

National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, and National Research Council of the National Academies (2010) Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments, The National Academies Press, Washington, DC. http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12619 (accessed October 3, 2016).

Prentiss, M. (2015) Energy Revolution: The Physics and the Promise of Efficient Technology. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., et al. (2005) Sustainable Energy: Choosing among Options. MIT Press, Cambridge, MA.

Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., et al. (2012) Sustainable Energy: Choosing among Options, 2nd edn. MIT Press, Cambridge, MA.

2

Основы турбокомпрессорного оборудования

2.1 Понятие «турбокомпрессор»

Двумя важными категориями возобновляемых, альтернативных источников энергии являются энергия ветра и гидроэнергия, а одним из часто используемых альтернативных применений для ископаемого топлива является газ или турбина внутреннего сгорания. Все эти устройства классифицируются как турбомашины и принцип действия каждого аналогичен. Цель этой главы - развить базовое понимание и терминологию турбомашин. Для начала представим определение турбомашин:

Турбомашина - устройство, в котором *энергия передается непрерывно текущей жидкостью под воздействием* одного или нескольких *движущихся рядов лопаток*.

Выделенные курсивом слова в определении важны. Передача энергии, а не преобразование энергии, происходит в турбомашине. Поскольку жидкость в турбомашине протекает постоянно, турбомашина не является устройством объемного вытеснения. Происходящая передача энергии вызвана действием движущихся рядов лопаток.

2.2 Классификация турбокомпрессорного оборудования

Турбомашины часто классифицируются как компрессоры (насосы или вентиляторы) и турбины. Компрессор, насос или вентилятор – это турбомашина, в которой энергия добавляется жидкостью по мере того, как жидкость проходит через ротор. В турбине энергия извлекается из жидкости, когда жидкость проходит через ротор.

Другая классификация основана на траектории движения жидкости, проходящей через ротор. Турбомашина может быть радиальным устройством, осевым устройством или смешанным устройством. Как следует из названий, в радиальном устройстве путь жидкости идет в радиальном направлении. В осевом устройстве путь жидкости идет в осевом направлении. А в смешанном устройстве путь жидкости имеет как радиальные, так и осевые компоненты. Рис. 2.1 иллюстрирует некоторые распространенные турбомашины, имеющие радиальные, осевые или смешанные характеристики. В радиальном устройстве, Рис. 2.1a, поток проходит через ротор, преимущественно в радиальном направлении. В смешанном устройстве, Рис. 2.1b, ходы потока поступают в ротор с радиальной и осевой составляющими скорости. В осевом устройстве, Рис. 2.1c, показана турбина пропеллерного типа, с осевым потоком, и поток как входит, так и покидает ротор с осевой скоростью, но небольшой радиальной скоростью.

2.3 Анализ турбокомпрессорного оборудования

Рис. 2.2 изображен контрольный объем, который будет использоваться для разработки фундаментальных отношений для турбомашины. Контрольный объем вращается с угловой скоростью ω вокруг вала.

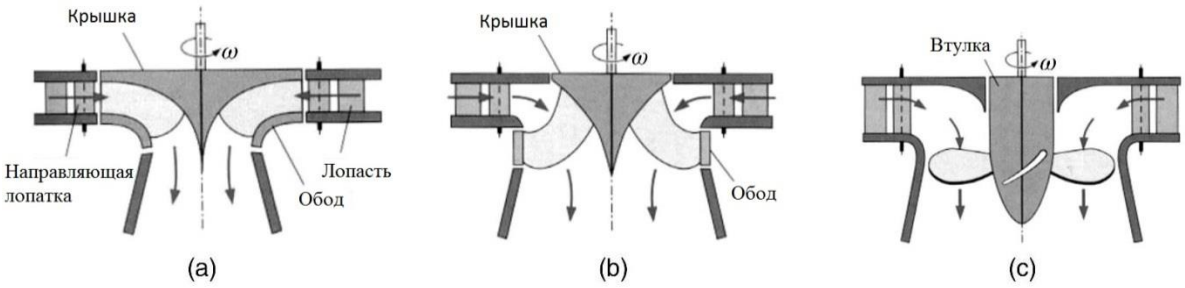


Рис. 2.1 Типы турбомашин в зависимости от типов потока жидкости: (a) радиальный; (b) смешанный; (c) осевой. *Источник*: Ценгель и Симбала (2013). Воспроизводится с разрешения McGraw-Hill.

Грань 1 представляет впускную поверхность управления, а грань 2 представляет поверхность управления на выпуске. В произвольном месте на впускной управляющей поверхности показан вектор абсолютной скорости $\mathbf{V}_1$. Абсолютная скорость на выходе изображена $\mathbf{V}_2$. В этом контексте абсолютная скорость измеряется относительно неподвижного наблюдателя. В произвольных точках расположены радиальные расстояния r_1 и r_2 от оси вращения. Определены три взаимно перпендикулярных компонента скорости: (1) V_a - осевой компонент, (2) V_u - тангенциальный компонент и (3) V_m - радиальный (или меридиональный) компонент. Эти компоненты полностью решают векторы абсолютной скорости. Названия компонентов также описывают их направления; то есть V_a находится в осевом направлении и является коллинеарным с осью вращения. Анализ турбомашин значительно облегчается благодаря использованию компонентов скорости.

Сохранение углового момента импульса является фундаментальным принципом, используемым при анализе турбомашины. Для контрольного объема сохранение момента импульса выглядит как

$$\sum \mathbf{M} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{CV} \rho(\mathbf{r}\times\mathbf{V})\,dVol + \int_{CS} \rho(\mathbf{r}\times\mathbf{V})\mathbf{V}\cdot\mathbf{dA} \qquad (2.1)$$

Уравнение 2.1 утверждает, что векторная сумма моментов, действующих на контрольный объем, равна скорости изменения углового момента в контрольном объеме плюс суммарный поток углового момента через контрольную поверхность.

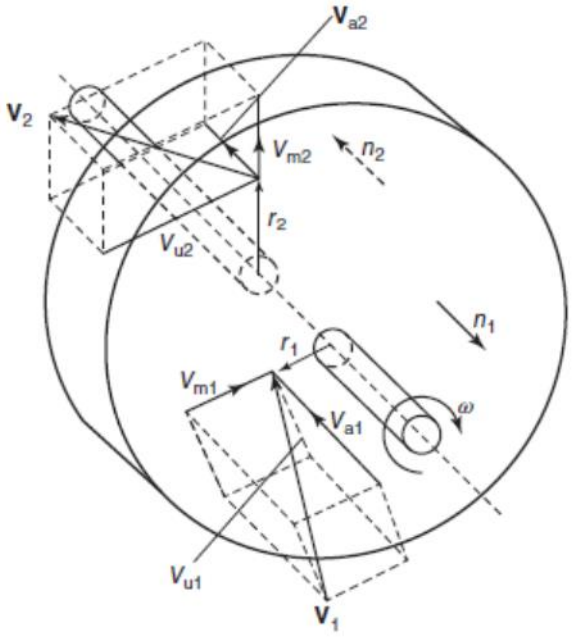


Рис. 2.2 Контрольный объем для анализа турбомашин. *Источник*: Ходжи Тэйлор (1999). Воспроизводится с разрешения Пирсона

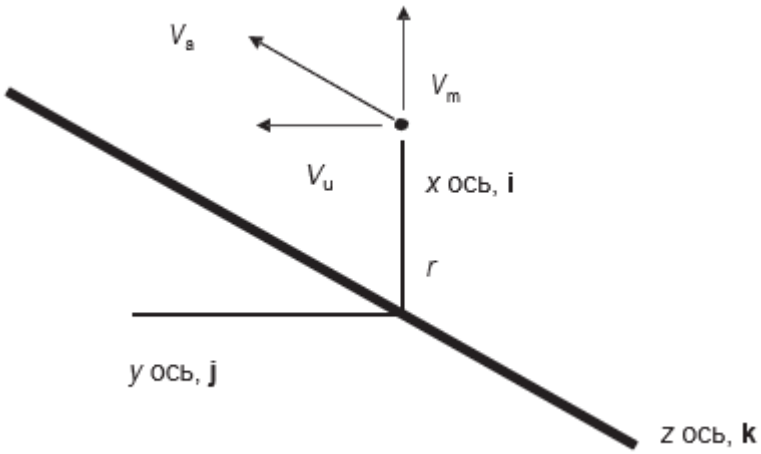


Рис. 2.3 Схематическое изображение составляющих векторов скорости в одной точке.

Однако, для турбомашины важен момент вокруг оси вращения. Рассмотрим на рис. 2.3, схематическое представление компонентов скорости в произвольной точке, расположенной на расстоянии *r* от оси вращения. Оси *x, y* и *z*, а также единичные векторы **i**, **j** и **k** указаны на рис.

Вектора **r** и **V** тогда становятся

$$\mathbf{r} = r\,\mathbf{i} \tag{2.2}$$

$$\mathbf{V} = V_m\mathbf{i} + V_u\mathbf{j} + V_a\,\mathbf{k} \tag{2.3}$$

и перекрестное произведение **r**x**V** определяется как

$$\mathbf{r}\times\mathbf{V} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ r & 0 & 0 \\ V_m & V_u & V_a \end{vmatrix} = rV_u\mathbf{k} - rV_a\mathbf{j} \tag{2.4}$$

Интересующий момент или крутящий момент – это момент вокруг оси *z*, ось вращения. Как показывает уравнение 2.4, единственным компонентом перекрестного произведения, которое создает момент углового импульса вокруг оси *z*, является rV_u. Используя τ как сумму моментов вокруг оси вращения и вызывая устойчивое состояние, сохранение момента углового импульса сводится к

$$\tau = \int_{CS} \rho\, rV_u \mathbf{V}\cdot\mathbf{dA} \tag{2.5}$$

Для контрольного объема, как на рис. 2.2, с входом и выходом, Уравнение 2.5 становится

$$\tau = -\int_{\text{вход}} \rho\, rV_u V_a\, dA + \int_{\text{выход}} \rho\, rV_u V_a\, dA \tag{2.6}$$

Поскольку *n1* является нормальной единицей для входа (как показано на рис. 2.2), она является коллинеарной с осью *z*, **VdA** равно $-V_a dA$. Среднее значение rV_u определяется как $\overline{rV_u}$так что,

$$\int \rho r V_u V_a\, dA = \overline{rV_u}\int \rho V_a\, dA = \dot{m}\,\overline{rV_u} \tag{2.7}$$

Если утверждать, что скорость потока не обходит ротор, то массовая скорость потока, поступающая в ротор и выходящая из него одинаковы; то есть $\dot{m}=\dot{m}_1=\dot{m}_2$. Выражение для крутящего момента вокруг оси вращения принимает вид

$$\tau = -\dot{m}\left(\overline{rV_u}\right)_1 + \dot{m}\left(\overline{rV_u}\right)_2 = \dot{m}\left[\left(\overline{rV_u}\right)_2 - \left(\overline{rV_u}\right)_1\right] \tag{2.8}$$

Для многих турбомашин либо rV_u является постоянным на управляющей поверхности, либо r и V_u являются постоянными, и обозначение «планки» отбрасывается, так что

$$\tau = \dot{m}(r_2 V_u - r_1 V_u) \tag{2.9}$$

Уравнение 2.9 называется уравнением турбины Эйлера (или насоса) и является фундаментальным приложением сохранения момента углового импульса для турбомашины. Если $r_2V_{u_2}>r_1V_{u_1}$, то угловой момент добавляется к потоку, и устройство называется насосом, вентилятором или компрессором. Если $r_2V_{u_2}<r_1V_{u_1}$, то угловой момент извлекается из потока, и устройство называется турбиной. Традиционное правило знаков для турбомашин заключается в том, что крутящий момент должен быть положительным для турбины и отрицательным для насоса. Таким образом, уравнение 2.9 приобретает обычный вид:

$$\tau = \dot{m}(r_1 V_{u1} - r_2 V_{u2}) \tag{2.10}$$

Мощность – это крутящий момент, умноженный на скорость вращения:

$$\text{Мощность} = \tau\omega = \dot{m}(\omega\, r_1 V_u - \omega\, r_2 V_{u2}) \tag{2.11}$$

Но $r\omega$ - тангенциальная скорость ротора на радиусе r, и в обозначениях турбомашин обозначается символ U. Мощность выражается как

$$\text{Мощность} = \dot{m}(U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2}) \tag{2.12}$$

Изменение напора – это мощность на единицу скорости потока массы или Уравнение 2.13 следует турбомашинному протоколу определения напора мощности как энергии на единицу массы (или мощности на единицу массы потока).

$$\frac{\text{Мощность}}{\dot{m}} \equiv H = U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2} \tag{2.13}$$

Введены две скорости: абсолютная скорость **V** и тангенциальная скорость ротора **U**. Относительная скорость $\mathbf{V}_r$ определяется векторным уравнением

$$\mathbf{V} = \mathbf{U} + \mathbf{V}_r \tag{2.14}$$

Графическая интерпретация уравнения 2.14, треугольника скоростей, представлена на рис. 2.4. Поскольку V_u - тангенциальная составляющая абсолютной скорости, V_u определяется как проекция **V** в направлении **U**; то есть $\mathbf{V}\cos\alpha$.

Угол **V** с **U**, α, часто называют «углом сопла». Угол $\mathbf{V}_r$ с **U**, β, – это угол лопасти, поскольку $\mathbf{V}_r$ представляет скорость относительно ротора.

Закон косинусов для входных и выходных треугольников скоростей можно записать в виде

$$V_{r_1}^2 = U_1^2 + V_1^2 - 2U_1 V_1 \cos(\alpha_1) = U_1^2 + V_1^2 - 2U_1 V_{u_1} \tag{2.15}$$

$$V_{r_2}^2 = U_2^2 + V_2^2 - 2U_2 V_2 \cos(\alpha_2) = U_2^2 + V_2^2 - 2U_2 V_{u_2} \tag{2.16}$$

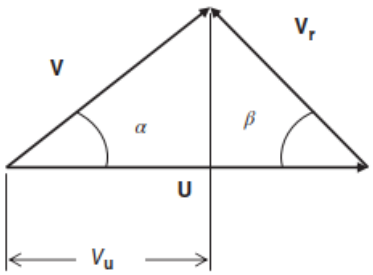


Рис. 2.4 Треугольник скоростей.

Вычитание уравнения 2.16 из уравнения 2.15 и деление на 2 дает

$$U_1 V_{u_1} - U_2 V_{u_2} = \frac{1}{2}\left[(V_1^2 - V_2^2) + (U_1^2 - U_2^2) + (V_{r_2}^2 - V_{r_1}^2)\right] = H \tag{2.17}$$

что представляет собой изменение напора на турбомашине, выраженное в значении абсолютной, относительной скорости и скорости ротора, составляющих треугольник скоростей.

Изучение каждого из значений в выражении между знаками равенства в уравнении 2.17 дает некоторое представление о передаче энергии в турбомашинах. Учтите следующее:

$$\frac{1}{2}[\underbrace{(V_1^2 - V_2^2)}_{\text{динамичный}} + \underbrace{\underbrace{(U_1^2 - U_2^2)}_{\text{центробежный}} + \underbrace{(V_{r_2}^2 - V_{r_1}^2)}_{\text{относительный}}}_{\text{статичный эффект}}]$$

Первое значение представляет собой изменение абсолютной скорости и называется динамическим эффектом. Оставшиеся два значения: центробежный и относительный, образуют статический эффект. Общее изменение в напоре – это сумма статических и динамических эффектов. Некоторая полезная физика может быть выведена из уравнения 2.17 и классификации динамического, центробежного и относительного эффекта. В радиальном устройстве центробежный эффект часто является доминирующим. Для радиального компрессора напор H отрицателен; таким образом, центробежные эффекты помогают процессу передачи энергии, если $U_2 > U_1$ - это означает, что радиус на выходе должен быть больше, чем радиус на входе. Турбина как раз наоборот, поскольку центробежные эффекты должны быть положительными, а это означает, что радиус на входе должен быть больше, чем на выходе. Этот принцип исследован примером 3.3.

Отношение статического эффекта к общему изменению в напоре называется реактивностью и определяется как

$$R = \frac{(U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)}{(V_1^2 - V_2^2) + (U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)} = \frac{\frac{1}{2}\left[(U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)\right]}{U_1 V_{u1} - U_2 V_{u2}} \tag{2.18}$$

Если реактивность R равна нулю, то изменение напора происходит просто из-за динамического эффекта - изменения абсолютной скорости на роторе. Следовательно, статическое изменение в напоре равно нулю, и ротор может быть открыт (корпус не требуется). Устройства с $R=0$ часто называют импульсными машинами, поскольку полное изменение напора происходит только из-за динамического воздействия.

Турбомашины с аксиальным потоком – это устройства, в которых движение жидкости при ее прохождении через ротор преимущественно течет в осевом направлении. Схема осевого компрессора показана на рис. 2.5. В осевой турбомашине со ступенями, за вращающимися рядами лопастей (роторами) следуют статоры, неподвижные ряды лопастей, в которых происходит преобразование энергии, а не передача энергии. Неподвижные лопасти перед первым ротором часто называют входными направляющими лопатками. Для данного ротора или статора радиусы входа и выхода по существу равны, так что $r = r_1 = r_2$, $U = U_1 = U_2$, и

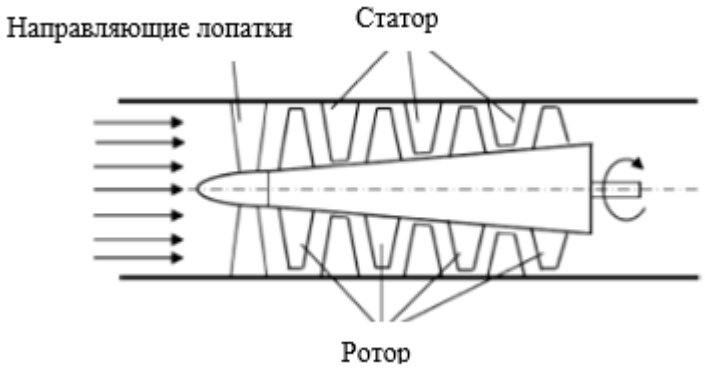


Рис. 2.5 Схема устройства поэтапного осевого потока. *Источник*: Логан (1993). Воспроизводится с разрешения Пирсона.

$V_a = V_{a1} = V_{a2}$. Для осевого потока выражения для крутящего момента, мощности, напора и реактивности сводятся к следующему:

$$\tau = \dot{m}\, r(V_{u1} - V_{u2}) \tag{2.19}$$

$$\text{Мощность} = \dot{m}\, U(V_{u1} - V_{u2}) \tag{2.20}$$

$$H = U(V_{u1} - V_{u2}) \tag{2.21}$$

$$R = \frac{(V_{r2}^2 - V_{r1}^2)}{(V_1^2 - V_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)} = \frac{\frac{1}{2}(V_{r2}^2 - V_{r1}^2)}{U(V_{u1} - V_{u2})} \tag{2.22}$$

2.4 Примеры проблемных аспектов

Пора привести несколько примеров, использующих концепцию, разработанную для турбомашин.

Пример 2.1

Турбомашина с аксиальным потоком располагает симметричными треугольниками скоростей, как на рис. 2.6. Для этих условий ответьте на следующие вопросы.

а) Как связаны компоненты скорости?

б) Какова величина реактивности?

в) Это устройство турбина или компрессор? Объясните.

Решение: треугольники скоростей на рис. 2.6 можно представить как подходящие для расположения ротора на рис. 2.2. В устройстве с аксиальным потоком радиальная составляющая скорости по определению равна нулю, а плоскости треугольников скоростей коллинеарные с осевым направлением. Тогда осевая скорость – это проекция абсолютной скорости, перпендикулярная тангенциальному направлению. Для симметричных треугольников скоростей $V_1 = V_{r2}$ и $V_{r1} = V_2$. Подстановка этих соотношений в уравнение 2.22 приводит к

$$R = \frac{V_1^2 - V_2^2}{(V_1^2 - V_2^2) + (V_1^2 - V_2^2)} = \frac{1}{2}$$

Треугольники с симметричной скоростью в осевой турбомашине дают *R=0.5*. Для многих газовых турбин или турбин внутреннего сгорания со ступенчатыми осевыми компрессорами или турбинами расчетное условие часто составляет *R=0.5*.

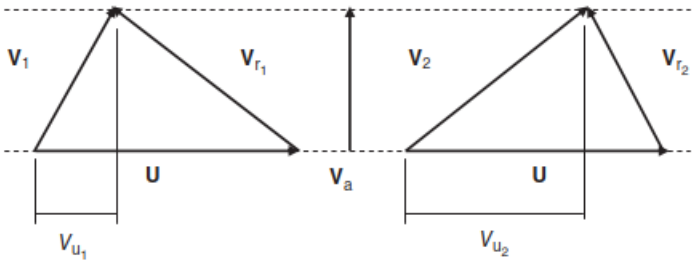


Рис. 2.6 Треугольники скоростей (пример 2.1).

Поскольку $r_2 V_{u_2} \geq r_1 V_{u_1}$, устройство является компрессором (или насосом), так как угловой момент увеличивается при прохождении жидкости через ротор; то есть энергия добавляется к жидкости.

Хотя это и является частью постановки задачи, первый шаг в решении любой задачи по турбомашине состоит в построении треугольников скоростей. Далее мы рассмотрим усложненную задачу.

Пример 2.2

Центробежный двигатель турбомашины имеет компоненты относительной скорости, как показано на рис. 2.7. Кроме того, указано следующее:

$$U_1 = r_1\omega = 3.75 \text{ м/с}$$

$$U_2 = r_2\omega = 7.50 \text{ м/с}$$

$$\dot{m} = 57 \text{ кг/с}$$

Определите мощность, классифицируйте устройство как турбину или компрессор и найдите реактивность.

Решение: первый шаг – построить треугольники скоростей. Рассмотрим треугольник скоростей на входе. Значения U_1 и V_{r_1}, а также то, что V_{r_1} является радиальным, известны. Три элемента информации должны быть известны, чтобы однозначно определить треугольник скоростей. Треугольник скоростей на входе представляет собой прямоугольный треугольник и, таким образом, полностью определяется углом и двумя компонентами скорости. Аналогично, две составляющие скорости (U_2 и V_{r_2}), а также угол известны относительно треугольника скоростей на выходе. Поскольку $V_{r_2}\cos(30.45)=7.5$ м/с$=U_2$, треугольник скоростей на выходе также является прямым треугольником. Треугольники скоростей выглядят так, как показано на рис. 2.8.

Треугольники скорости должны подчиняться векторному выражению $\mathbf{V}=\mathbf{U}+\mathbf{V}_\text{r}$. Поскольку V_2 перпендикулярно U_2, $V_{u_2}= 0$; а V_{r_1} перпендикулярно U_1, $V_{u1}=U_1$. Мощность может быть рассчитана как

$$\text{Мощность} = \dot{m}(U_1 V_{\text{u}1} - U_2 V_{\text{u}2}) = \dot{m}(U_1 U_1 - U_2 \times 0) = \dot{m}\, U_1^2$$

Рис.2.7 Схема (пример 5.2).

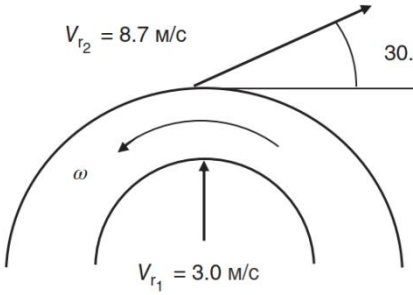




Рис. 2.8 Треугольники скоростей: пример 2.2 (a) вход; (b) выход

Если включить числа и единицы, мощность становится

$$\text{Мощность} = 57\frac{\text{кг}}{\text{с}}\left(3.75\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = 802\frac{\text{кг м}^2}{\text{с}^3}\frac{\text{Н с}^2}{\text{кг м}} = 802\ \frac{\text{Н м}}{\text{с}} = 802\ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 802\ \text{Вт}$$

Устройство является турбиной, так как $r_1 \cdot V_{u1} > r_2 \cdot V_{u2}$. Если U и V_r известны для обоих треугольников скоростей, можно рассчитать абсолютные скорости, которые составляют V_1=4,80 м/с и V_2=4,41 м/с. Альтернативный, но полезный подход к вычислению мощности заключается в использовании расширенного уравнения 2.17 для мощности:

$$\text{Мощность} = \dot{m}H = \frac{\dot{m}}{2}\left[(V_1^2 - V_2^2) + (U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)\right]$$

что для примера становится

$$\text{Мощность} = \dot{m}H = \frac{57}{2}\frac{\text{кг}}{\text{с}}[(4.8^2 - 4.41^2) + (3.75^2 - 7.5^2) + (8.7^2 - 3^2)]\frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$
$$= 28.5(3.59 - 42.2 + 66.7)\ \text{Вт} = 802\ \text{Вт}$$

Поскольку мощность турбины положительна, динамический вклад и вклад относительной скорости положительны, но центробежный эффект отрицателен и уменьшает мощность, извлекаемую из жидкости. Это устройство представляет собой турбину с радиальным потоком, которая должна преодолевать отрицательный вклад центробежного эффекта для извлечения энергии. Как обсуждалось ранее, турбина с радиальным потоком воспользуется преимуществом центробежного эффекта.

С известными компонентами скорости, реактивность R может быть рассчитана непосредственно как

$$R = \frac{(U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)}{(V_1^2 - V_2^2) + (U_1^2 - U_2^2) + (V_{r2}^2 - V_{r1}^2)}$$
$$= \frac{(3.75^2 - 7.5^2) + (8.7^2 - 3^2)}{(4.8^2 - 4.41^2) + (3.75^2 - 7.5^2) + (8.7^2 - 3^2)} = 0.87$$

С небольшим изменением абсолютной скорости, эффект динамики невелик. Это значение R показывает, что, несмотря на противоположно действующие относительные и центробежные эффекты, статическое изменение является доминирующим эффектом в этом устройстве.

Пример 2.3

Схема турбомашины с радиальным потоком показана на рис. 2.9.

Скорость на входе V_1=18 м/с, создает угол 30° с тангенциальным, а скорость на выходе V_2 создает угол 90° с тангенциальным. Ширина лопасти (ротора) постоянна и составляет 90 мм. Ротор вращается со скоростью 764 rpm (об/мин). Вращение против часовой стрелки.

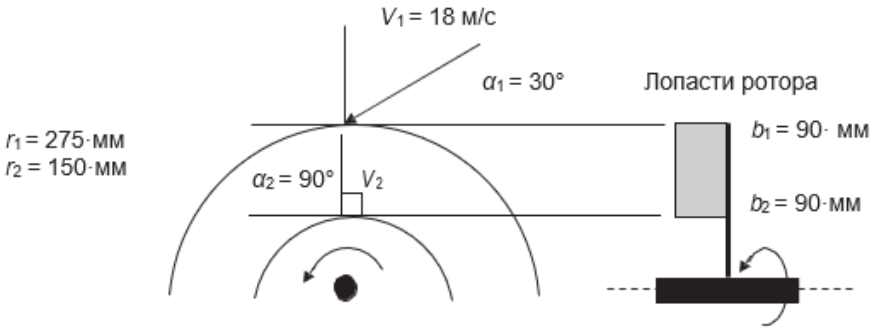


Рис. 2.9 Схема радиальной турбомашины.

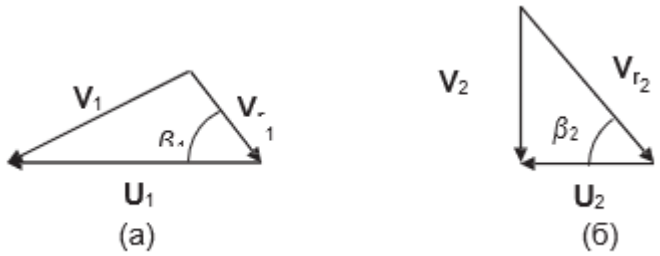


Рис. 2.10 Треугольники скоростей для примера 2.3: (a) вход; (b) выход.

a) Нарисуйте и обозначьте треугольники скоростей для этой ситуации.
b) Найдите V_2,V_{r1}, и V_{r2}.
c) Какое изменение в напоре этого устройства?
d) Это устройство насос или турбина? Объясните
e) Найдите вклад благодаря динамическим, центробежным и относительным эффектам.
f) Какова величина реактивности?
g) Какие углы у роторов β_1 и β_2?

Решение: треугольники скоростей для этого условия представлены на рис.2.10. Скорость ротора U_1и U_2 равна:

$$\omega = 764\frac{\text{обор}}{\text{мин}} \times \frac{2\pi}{1} \times \frac{\text{мин}}{60} = 80.01\frac{1}{\text{с}}$$

$$U_1 = r_1\omega = 275\,\text{мм} \times 80.01\frac{1}{\text{s}} = 22.002\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$U_2 = r_2\omega = 150\,\text{мм} \times 80.01\frac{1}{\text{s}} = 12.001\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Значение V_2 можно рассчитать с помощью консервации массы для турбомашины:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\rho V_{t1} \pi D_1 b_1 = \rho V_{t2} \pi D_2 b_2$$

$$V_2 = V_1 \sin(30^\circ)\frac{r_1}{r_2} = 9\frac{\text{м}}{\text{s}} \times \frac{275\ \text{мм}}{150\ \text{мм}} = 16.5\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

С известными V_1 и V_2, закон косинусов может быть использован для определения двух компонентов относительной скорости:

$$V_{r1} = \sqrt{U_1^2 + V_1^2 - 2U_1V_1\cos(\alpha_1)}$$
$$= \sqrt{22.002^2 + 18^2 - 2 \times 22.002 \times 18\cos(30^\circ)} = 11.051\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$V_{r2} = \sqrt{U_2^2 + V_2^2 - 2U_2V_2\cos(\alpha_2)}$$
$$= \sqrt{12.001^2 + 16.5^2 - 2 \times 12.001 \times 16.5\cos(90^\circ)} = 20.403\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Напор становится

$$H = U_1V_{u1} - U_2V_{u2}$$
$$= 22.002 \times 18\cos(30^\circ) - 12.001 \times 16.5\cos(90^\circ)$$
$$= 342.97\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} = 342.97\frac{\text{Нм}}{\text{кг}}$$

Поскольку момент импульса извлекается ($U_2V_{u2} < U_1V_{u1}$), устройство является турбиной.

Компоненты скорости позволяют рассчитать вклад динамического, центробежного и относительного эффекта:

$$\text{динамический} = \frac{1}{2}(V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{2}(18^2 - 16.5^2) = 25.88\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$$

$$\text{центробежный} = \frac{1}{2}(U_1^2 - U_2^2 = \frac{1}{2}(22.002^2 - 12.001^2) = 170.03\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$$

$$\text{относительный} = \frac{1}{2}(V_{r2}^2 - V_{r1}^2) = \frac{1}{2}(20.402^2 - 11.051^2) = 147.07\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2}$$

Центробежный эффект является самым большим и вносит почти 50% общего изменения в напоре; динамический эффект является самым маленьким с очень скромным вкладом. Поскольку радиус на входе больше, чем на выходе, значение центробежного эффекта является положительным, что указывает на положительный вклад в общий процесс передачи энергии. Следовательно, турбина с радиальным потоком использует преимущество центробежного эффекта, так как входное отверстие имеет радиус больше, чем выходное. Таким образом, многие радиальные турбины представляют собой *приточные* турбины ($r_1 > r_2$).

Реакция – это отношение статических вкладов (центробежных и относительных) к общему. Для этого устройства, реактивность выглядит как:

$$R = \frac{\text{статическая}}{\text{общая}} = \frac{\text{центробежная} + \text{относительная}}{\text{общая}} = \frac{170.03 + 147.07}{342.97} = 0.925$$

В соответствии с наблюдением, что центробежные и относительные эффекты были намного больше, чем динамический вклад, реактивность близка к единице.

Два угла лопасти находятся с использованием функции арктангенса и треугольников скоростей:

$$\beta_1 = \text{арктан}\left(\frac{V_{m1}}{U_1 - V_{u1}}\right) = \text{арктан}\left[\frac{18\sin(30^\circ)}{22.002 - 15.59}\right] = 54.53^\circ$$

$$\beta_2 = \text{арктан}\left(\frac{V_{m2}}{U_2}\right) = \text{арктан}\left(\frac{16.5}{12.001}\right) = 53.97^\circ$$

Используя углы лопастей, можно определить общую форму ротора. На рис. 2.11 показано, как будут выглядеть лопасти ротора. С двумя углами лопастей в пределах доли градуса, лопасти ротора имеют небольшой изгиб или кривизну. Примечание: выше приведен анализ первого порядка, и многие эффекты (например, вязкость, циркуляция и обход) игнорируются; тем не менее, анализ первого порядка фиксирует самые важные нюансы процесса передачи энергии.

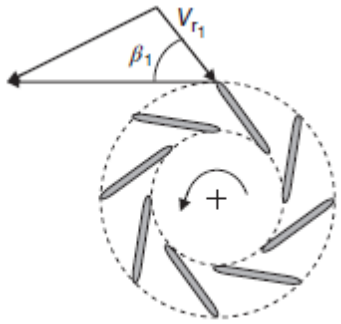


Рис. 2.11 Ориентация лопасти ротора

2.5 Заключение

Введение в анализ и номенклатуру турбомашин достаточно для достижения целей этой книги. Для получения дополнительной информации обратитесь к разделу «Дополнительная литература» этой главы. В следующих трех главах рассматриваются гидроэнергия, энергия ветра и турбины внутреннего сгорания - все темы, для которых необходимо фундаментальное понимание турбомашин.

Литература

Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2013) Fluid Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd edn. McGraw-Hill, NewYork.

Hodge, B.K. and Taylor, R.P.(1999) Analysis and Design of Energy Systems, 3rd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Logan, E. (1993) Turbomachinery, 2nd edn. Dekker, New York.

Дополнительная литература

Dixon, S.L. and Hall, C.A. (2014) Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, 7th edn. Elsevier.

Hibbler, R.C. (2014) Fluid Mechanics. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Shepherd, D.G. (1956) Principles of Turbomachinery. MacMillian, New York. (This is the classic turbomachinery textbook.).

Wright,T. and Gerhart, P. (2009) Fluid Machinery: Application, Selection, and Design, 2nd edn.

3

Гидроэнергия

3.1 Введение

Гидроэлектростанции являются одними из самых известных и самых крупных искусственных сооружений. Такие плотины могут похвастаться долгой и успешной историей в США. В первые десятилетия 1900-х годов было построено много гидроэлектростанций. К 1930-м годам США вырабатывали около 40% своей электроэнергии за счет гидроэнергии. В 2014 году, как показано на рисунках 1.11 и 1.12, это число сократилось примерно до 3%. Норвегия, Непал, Новая Зеландия и Канада производят более 50% своей электроэнергии за счет гидроэнергии.

В течение многих лет гидроэнергия считалась самой экологически чистой из всех источников электроэнергии. Однако в последние годы воздействие гидроэлектростанций на окружающую среду рассматривалось как менее благоприятное и более навязчивое. Книги Лесли (2005) и Скаддер (2005) посвящены проблемам окружающей среды, связанным с крупными плотинами. Спилсбари (2011) исследует плюсы и минусы крупных плотин, используя недавние примеры. Кумар и соавт. (2011) представляют разумную оценку будущего гидроэнергии и делают вывод о том, что дальнейшее развитие гидроэнергетики может обеспечить дополнительные возобновляемые источники энергии. При этом, необходимо тщательно контролировать экологические и социальные последствия.

Большие плотины гидроэлектростанций требуют значительных капиталовложений и могут строиться годами до завершения. Рис. 3.1, разработанный на основе данных EIA за 2002, 2009 и 2012 гг., показывает сравнение общих затрат на топливо, обслуживание и эксплуатацию электроэнергии, произведенной из различных источников за эти годы. Гидроэлектроэнергия имеет самую низкую стоимость за киловатт-час в сравнении с любым другим источником электроэнергии. Несмотря на то, что расходы по эксплуатации и техническому обслуживанию гидроэлектростанций выше, чем у паровых энергосистем, работающих на ископаемом топливе, а также газовых турбин, гидроэлектростанции не требуют топлива, поэтому общая стоимость за киловатт-час является самой маленькой. Атомная и гидроэлектрическая энергия монотонно увеличивались в цене в течение определенного периода времени, но стоимость как паровых энергосистем, работающих на ископаемом топливе, так и газовых турбин в 2009 году была выше, чем в 2012 году, поскольку цены на топливо в 2009 году были значительно выше, чем в 2012 году. Хотя существует несколько исключений, большинство гидроэлектростанций имеют длительный срок службы и позволяют быстро изменять мощность выработки электроэнергии. В США около 2400 плотин, вырабатывающих энергию.

3.2 Примеры плотин гидроэлектростанций

Возможно, самой известной плотиной в США является плотина Гувера на реке Колорадо (Таблица 3.1). Имея высоту 726 футов (221 м) и длину 1244 фута (379 м), она является одной из крупнейших плотин в мире и была построена в период с 1931 по 1936 год. Плотина Гувера является крупным поставщиком гидроэлектроэнергии и обеспечивает контроль за наводнениями и улучшенную навигацию. Электричество распределяется в Калифорнию (56%), Неваду (25%) и Аризону (19%). Плотина Гувера запружает Озеро Мид, которое является самым большим водохранилищем в США.

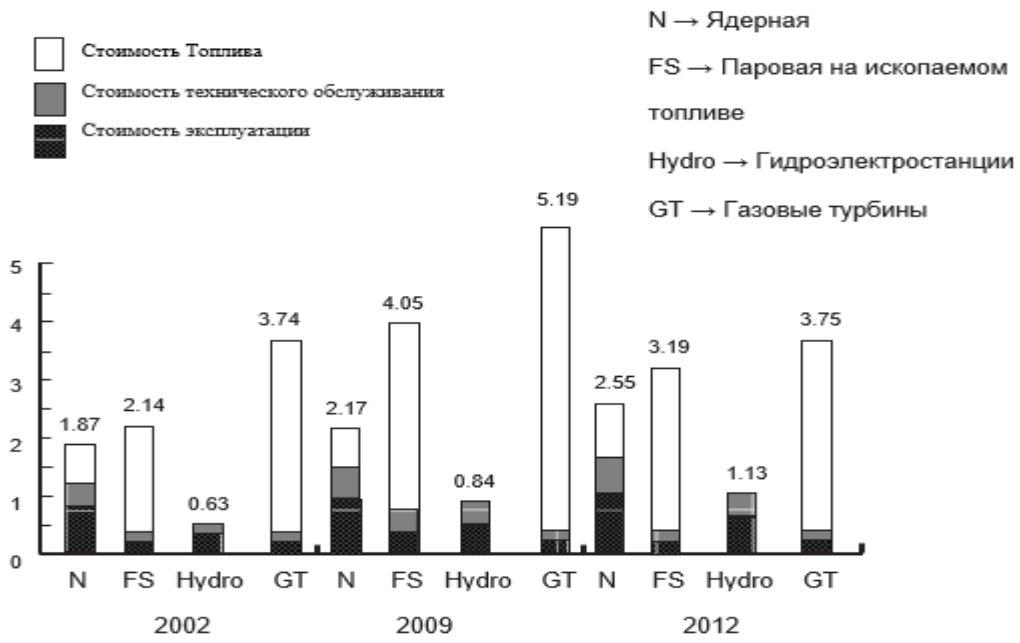


Рис. 3.1 Компоненты затрат на производство электроэнергии из различных источников энергии (взято из данных EIA).

Рис. 3.2 представляет собой воспроизведение оригинальной формы плана плотины Гувера и представляет интерес с исторической точки зрения. На рис. 3.3 представлен вид на плотину с отводящей части, смотрящую вверх по течению на основную конструкцию.

Гидроэлектростанция Итайпу на реке Парана в Южной Америке входит в число крупнейших действующих гидроэлектростанций в мире. Построенные с 1975 по 1991 год, 18 генерирующих блоков имеют общую производственную мощность 12 600 МВт (18 генерирующих блоков по 700 МВт каждый) и надежную выработку 75 ТВт-ч в год. В 2014 году плотина Итайпу произвела 87,8 ТВт-ч. Такой производительности одной электростанции достаточно для питания большей части Калифорнии. Плотина Итайпу обеспечивает 25% энергоснабжения в Бразилии и 78% в Парагвае.

Таблица 3.1 Статистика плотины Гувера.

726.4 футов (221 м) высота
1244 футов (379 м) ширина
660 футов (203 м) толщина у основания
45 футов (13 м) толщина наверху
4.5 года для завершения строительства
4.4×10^{6} кубических ярдов бетона было использовано для строительства
Март 1931 начало строительства
17 генераторов
$>4\times10^{9}$ кВт-ч производится ежегодно

Рис. 3.2 Репродукция чертежа формы плотины Гувера. Источник: Бюро Мелиорации США.



Рис. 3.3 Вид плотины Гувера. Источник: Бюро Мелиорации США.

Впечатляет список материалов, необходимых для строительства плотины Итайпу. Объема железа и стали будет достаточно для строительства 380 Эйфелевых башен, а объем используемого бетона в 15 раз превышает объем, использованный для строительства Тоннеля под Ла-Маншем между Францией и Англией. Обзор плотины и водохранилища представлен на рис. 3.4.

Одна из самых известных современных плотин в мире является плотина «Три ущелья» в Китайской Республике. Таблица 3.2 содержит некоторые статистические данные о плотине «Три ущелья». Предварительные работы начались в 1993 году, а сама плотина была завершена в 2014 году. В 2014 году плотина «Три ущелья» выработала 98,9 ТВт-ч, что сделало ее крупнейшим в мире производителем гидроэлектроэнергии. Из-за количества переселённых людей, а также из-за площади земли, использованной для образования водохранилища, плотина «Три ущелья» породила много споров во всем мире. Несмотря на это, правительство Китая завершило строительство. Размер плотины Три ущелья представлен на рис. 3.5. Ванг и соавт. (2014) представляют оценку влияния крупных плотин, включая плотину Три ущелья на людей и окружающую среду.



Рис. 3.4 Аэроснимок гидроэлектростанции Итайпу.

Таблица 3.2 Статистика плотины «Три ущелья».

607 футов (185 м) высота
7661 футов (2335 м) ширина
666 футов (203 м) толщина у основания
1993–2014 период строительства
36×10^{6} кубических ярдов бетона было использовано для строительства
22500 МВт установленной мощности
32 энергоблока, каждый по700 МВт
2 вспомогательных энергоблока, каждый по 50 МВт
100 ТВт-ч ожидаемое количество энергии в каждом году



Рис. 3.5 Плотина Три ущелья. Источник: Power Engineering International (17 ноября 2014 г.).

Следующие веб-сайты рекомендуются для получения дополнительной информации о гидроэлектростанциях:

http://www.hydropower.org/
http://www.hydro.org/
http://water.usgs.gov/edu/wuhy.html
http://energy.gov/eere/water/hydropower-research-development
http://www.tva.gov/power/hydro.htm
http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12619
http://www.pbs.org/wgbh/buildingbig/wonder/structure/three_gorges.html
http://www.c1b.com/dam2.jpg

3.3 Гидравлический анализ

Для понимания количественных составляющих гидроэлектрических плотин требуются рассмотреть два компонента: (1) гидравлический анализ затвора, путь жидкости между верхним и нижним уровнями воды, и (2) обзор характеристик турбин, подходящих для различных комбинаций скорости потока и разности высот.

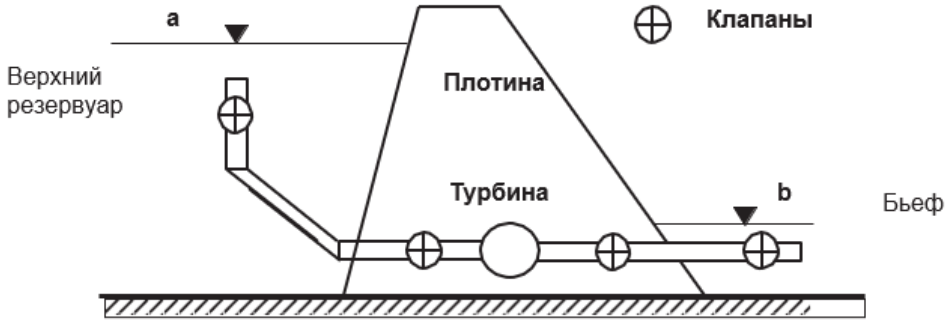


Рис. 3.6 Схема расположения плотины для гидравлического анализа.

В этом разделе описывается гидравлический анализ потока, а в Разделе 3.4 рассматриваются различные типы турбин, подходящих для использования в гидроэлектростанциях.

Рис. 3.2 иллюстрирует водосточную систему плотины Гувера. Впускные башни питают первичные затворы диаметром 30 футов каждая. Первичный затвор затем разветвляется на несколько параллельных затворов, которые питают турбины, расположенные на электростанции. Вода проходит через турбины и затем сливается вниз по течению от плотины. Устройство потока, таким образом, содержит впускное отверстие, затворы разных длин, турбину и выход. Общее расположение схематично показано на рис. 3.6. На схеме показаны несколько клапанов и фитингов, турбины и длина заглушки.

Гидравлический анализ начинается с применения уравнения сохранения энергии для системы, как правило, оно называется «уравнение энергии». Общее уравнение энергии от станции «а» до станции «б» выглядит как

$$\frac{P_\mathrm{a}}{\gamma}+\frac{V_\mathrm{a}^2}{2g}+Z_\mathrm{a}=\frac{P_\mathrm{b}}{\gamma}+\frac{V_\mathrm{b}^2}{2g}+Z_\mathrm{b}+\sum_{n=1}^{N}\frac{V_n^2}{2g}\left(f_n\frac{L_n}{D_n}+K_n+C_nf_{\mathrm{T}_n}\right)+W_\mathrm{t}\frac{g_\mathrm{c}}{g} \tag{3.1}$$

где P - давление, V - скорость, Z - высота, γ - удельный вес, f - коэффициент трения, L - длина трубы, D - диаметр, K - незначительные потери, C - незначительные потери, f_T - коэффициент грубого трения, W_t - изменение напора турбины, а N - количество сегментов трубы; g_c применима, когда используется английская инженерная система, и определяется как

$$g_c = 32.174\,\frac{\text{фут}*\text{фунт масса}}{\text{фунт сила}*\text{с}^2}=1\,\frac{\text{м}*\text{кг}}{\text{Н}*\text{с}^2} \tag{3.2}$$

g_c может использоваться с СИ, но это тождество, просто определяющее ньютон (Н). В уравнении 3.1 единицами изменения напора турбин являются энергия на единицу массы (Н·м/кг или фунт-сила /фунт-масса) в соответствии с практикой турбомашин.

Первые вопросы, на которые нужно ответить, - где начать применение уравнения энергии и где завершить его применение. В случае гидроэлектрической плотины, как показано на рис. 3.6, свободные поверхности уровней воды (a и b на рис.) вверх и вниз по течению принимаются за диапазон применения уравнения энергии. Поскольку обе поверхности находятся под атмосферным давлением, $P_a = P_b$, и поскольку скорости поверхностей верхнего и нижнего резервуаров малы, V_a=V_b=0. Изменение напора поперек турбины становится

$$W_\mathrm{t}\frac{g_\mathrm{c}}{g}=Z_\mathrm{a}-Z_\mathrm{b}-\sum_{n=1}^{N}\frac{V_n^2}{2g}\left(f_n\frac{L_n}{D_n}+K_n+C_nf_{\mathrm{T}_n}\right) \tag{3.3}$$

Изменение в напоре турбины – это разница в высоте за вычетом основных и незначительных потерь. Более полезное выражение получается, если скорость выражается через скорость потока как

$$\frac{V^2}{2g}=\left(\frac{Q}{A}\right)^2\frac{1}{2g}=\left(Q\frac{4}{\pi D^2}\right)^2\frac{1}{2g}=\frac{8Q^2}{g\pi^2D^4} \tag{3.4}$$

так, уравнение 3.3 становится

$$W_t \frac{g_c}{g} = Z_a - Z_b - \sum_{n=1}^{N} \frac{8Q^2}{g\pi^2 D_n^4} \left(f_n \frac{L_n}{D_n} + K_n + C_n f_{T_n} \right) \tag{3.5}$$

Мощность, извлекаемая из жидкости турбиной, равна

$$\text{Мощность}_{\text{извлекаемая}} = \rho Q W t \tag{3.6}$$

В уравнении 3.5 необходимы выражения для коэффициента трения и формулы Дарси - Вейсбаха. Во вводных курсах «механика жидкостей и газов» диаграмма Муди (Ходж и Тэйлор, 1999) часто используется для представления функциональной зависимости коэффициента трения f от числа Рейнольдса $Re_D = \rho VD/\mu$ и относительной шероховатости трубы ε/D. Однако диаграмма Муди неудобна для компьютерных решений, и желательно выражение в закрытой форме. Стандартное выражение при ламинарном течении (Ходж и Тэйлор, 1999)

$$f = \frac{64}{Re_D} \tag{3.7}$$

Несколько различных представлений доступны для турбулентного потока. В этом учебнике используется уравнение Хааленда (Хааленд, 1983):

$$f = \frac{0.3086}{\left\{ \text{Лог}\left[(\varepsilon/3.7D)^{1.11} + (6.9/Re_D) \right] \right\}^2} \tag{3.8}$$

Слагаемые незначительных потерь иногда выражаются в эквивалентных длинах с использованием формулы трения Дарси для полностью шероховатых поверхностей f_T, асимптотического значения коэффициента трения для данной относительной шероховатости. Из уравнения Хааленда коэффициент шероховатости становится

$$f_T = \frac{0.3086}{\left\{ \text{Лог}\left[(\varepsilon/3.7D)^{1.11} \right] \right\}^2} \tag{3.9}$$

С учетом вышеизложенного, в качестве основы для формулирования решения задач по системам трубопроводов будут рассмотрены и обсуждены некоторые примеры единого подхода.

Представления о незначительных потерях, K и C в уравнении 3.5, доступны практически в любом учебнике по механике жидкостей и газов, а также, в специализированных учебниках, таких как Ходж и Тейлор (1999), и Ценгел и Цимбала (2013). Технический отчет Crane Company 410 (Crane Engineering Department, 1957 г.) часто цитируется как постоянный источник информации о крупных и незначительных потерях.

Обратите внимание на следующий пример.

Пример 3.1

Предлагаемый дизайн гидроэнергетического проекта основан на расходе 0,25 м^3/с через затвор и турбину, как показано на рис. 3.7. Наименьшими потерями обладают впускные, $K=0,78$, $K=1$ для потерь на выходе и $C=32$ для двух колен с изгибом в 45° градусов (Ходж и Тейлор, 1999).

a) Определите мощность в киловаттах, которую можно ожидать от установки, если КПД турбины составляет 0,85.

b) Покажите, что тип устанавливаемой турбины – это турбина Фрэнсиса (радиально-осевая), если желаемая скорость вращения составляет 1200 об/мин.

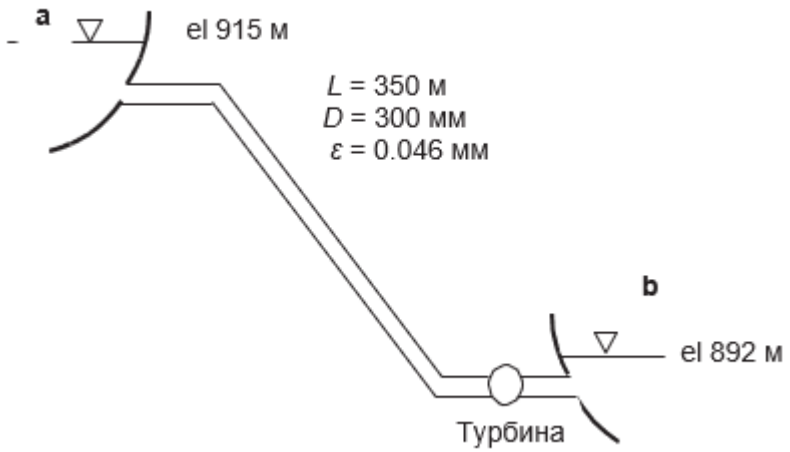


Рис 3.7 Схема (пример 3.1).

Решение: применив общее уравнение энергии к уравнению 3.5, получим незначительные потери, не равные нулю. В классификации задач механики жидкостей и гидравлики, это было бы задачей Категории I, поскольку дана скорость потока, и должно быть определено изменение напора. В любом учебнике по механике жидкостей имеется обширная информация о технике решения таких задач, как эта. В этом учебнике в качестве арифметического инструмента будет использоваться программа Mathcad, и Mathcad мы используем для решения примера 3.1. На рис. 3.8 приведена таблица программы Mathcad с решением этой задачи.

Первая часть таблицы определяет системы с вводными данными, такими как давление, длина, диаметр, незначительные потери и физические свойства. Процедура блока решения программы Mathcad используется для выполнения решений. Блок решения инициируется «поставленной задачей» и заканчивается командой «найти», в которой указывается неизвестное. В результате от турбины поступает 23 кВт.

С некоторыми изменениями, решение примера 3.1, как показано на рис. 3.8, может быть использовано практически для решения любой задачи с затвором. Дополнительные подробности доступны у Ходж и Тейлор (1999), и Ходж (2006).

Гидравлическая механика плотин, как показана на рис. 3.6, интересна. Рассмотрим два ограничивающих условия, имеющих отношение к работе турбины. Первый случай происходит, когда изменение напора поперек турбины равно разности высот между верхним резервуаром и нижним бьефом. Если $W_t = Z_a - Z_b$, то скорость потока должна быть равна нулю, так как нет напора для потока. Другое ограничивающее условие состоит в том, что если изменение напора в турбине равно нулю, в этом случае скорость потока $Q_{макс.}$ является максимально возможной при отсутствии насоса. Поскольку мощность, извлекаемая из жидкости, равна ρQWt, мощность, извлекаемая из жидкости, равна нулю для обоих ограничивающих случаев. Однако для диапазона скоростей потока $0 < Q < Q_{макс}$. извлеченная мощность не имеет нулевых значений. Кроме того, по мере увеличения скорости потока, изменение напора через турбину уменьшается. Такие обстоятельства приводят к тому, что извлекаемая мощность является многозначной функцией, которая обладает максимальной величиной извлекаемой мощности. Для условий примера 3.1 максимальный доступный напор составляет 23 Н·м/кг, а максимальная скорость потока для $W_t = 0$ составляет 0.365 м³/с. Если параметрическое исследование выполнено со скоростью потока в качестве независимой переменной, а выработанная мощность в качестве зависимой переменной, то мы наблюдаем рис. 3.9. Очевидна двойственность скорости потока и извлеченной мощности, также как и наличие максимальной величины извлекаемой мощности. Таким образом, для данного определения системы конкретная комбинация скорости потока и изменения напора на турбине обеспечивает максимальное извлечение мощности. Решение для примера 3.1 показано на рисунке. Скорость потока составляет 0.205 м³/с, а не 0.25 м³/с, как указано в описании задачи, и дает максимальную извлеченную мощность.

Введите геометрию трубы:

Диаметр в мм	Длина в мм	Шероховатость в мм
D:= 0.3·м	L:= 350·м	ε :=0.0046·мм (труба общего назначения)

Введите предельные условия системы (начальные и конечные)

Давление в Па Высоты в м:

$$\begin{pmatrix} P_a \\ P_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ Па} \quad \begin{pmatrix} Z_a \\ Z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 915 \\ 892 \end{pmatrix} \text{ м}$$

Введите коэффициенты потерь:

K фактор

K: =1.78

Эквивалентная длина

C :=32

Введите свойства жидкости:

Плотность в кг/м³

$p := 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Кинематическая вязкость в м²/с

$v := 1.1410^{-6} \cdot \frac{\text{м}^2}{c}$

Введите скорость потока в м³/с:

$Q := 0.25 \cdot \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ Скорость потока

Первоначальное предположение о снижении потока в турбине:

$W_t := 15 \cdot \text{Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{кг}}$

Определите постоянные и настройте единицы для согласованности:

$g := 9.806 \frac{\text{м}}{\text{сек}^2}$

$g_c := 1 \cdot \frac{\text{м·кг}}{\text{Н·с}^2}$

Определите функции для числа Рейнольдса, коэффициента трения Дарси – Вейсбаха и коэффициент трения:

$$\text{Re}(q,d) := \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d \cdot v}$$

$$f_T(d,\varepsilon) := \frac{0.3086}{\text{Лог}\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot d}\right)^{1.11}\right]^2}$$

если

$$\text{Re}(q,d) > 2300$$

$$f(q,d,\varepsilon) := \begin{cases} \dfrac{0.3086}{\text{Лог}\left[\dfrac{6.9}{\text{Re}(q,d)} + \left(\dfrac{\varepsilon}{3.7 \cdot d}\right)^{1.11}\right]^2} \\ \dfrac{64}{\text{Re}(q,d)} \quad \text{Иначе} \end{cases}$$

Обобщенным уравнением считается:

Дано

$$w_t \cdot \frac{g_c}{g} = \frac{P_a - P_b}{p \cdot g} \cdot g_c + Z_a - Z_b - \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D^4 \cdot g} \left(f(Q, D, \varepsilon) \cdot \frac{L}{D} + K + C \cdot f_T(D, \varepsilon) \right)$$

$$W_t := \text{Найти}\,(W_t)$$

$W_t = 108.823 c^{-2} \cdot \text{м}^2$

$W_t = 108.823 \text{ Н} \cdot \frac{\text{м}}{\text{кг}}$

При уменьшении напора на турбину, можно определить генерируемую мощность.

$\text{Мощность} := Q \cdot \rho \cdot W_t$

$\text{Мощность} = 27.206$ кВт

$\text{Мощность}_{\text{генерируемая}} := 0.85 \cdot \text{Мощность}$

$\text{Мощность}_{\text{генерируемая}} = 23.125$ кВт

Рис. 3.8 Пример таблицы 3.1 в программе Mathcad.



Рис. 3.9 Мощность, извлекаемая как функция скорости потока (пример 3.1).

3.4 Рассмотрение вопросов, связанных с удельной скоростью турбин

Гидравлический анализ, рассмотренный в Разделе 3.3, не касается деталей передачи энергии в турбине или каких-либо подробностей спецификации турбины. Учитывая широкий диапазон перепадов высот и скоростей потока, связанных с гидроэнергией, необходимо рассмотреть дополнительную информацию о турбинах.

Начальной точкой для более подробного рассмотрения турбин, пригодных для гидроэнергетического применения, является анализ размерностей. Полный набор размерных переменных для турбомашины представлен в Таблице 3.3.

Если взять ω, ρ, и D в качестве повторяющихся переменных, полный набор параметров выглядит следующим образом:

Коэффициент мощности $$C_w = \frac{W}{\rho\omega^3 D^5} \quad (3.10)$$

Коэффициент давления $$C_P = \frac{\Delta P}{\rho\omega^2 D^2} \quad (3.11)$$

Коэффициент расхода $$C_Q = \frac{Q}{\omega D^3} \quad (3.12)$$

Число Рейнольда $$Re = \frac{\rho\omega D^2}{\mu} \quad (3.13)$$

Таблица 3.3 Безразмерные характеристики турбомашин .

Параметр	**Символ**	**Размеры**
Мощность	W	ML^2/T^3
Скорость	ω	1/T
Диаметр ротора	D	L
Скорость потока (объемная)	Q	L^3/T
Изменение давления	ΔP	M/LT^2
Плотность	ρ	M/L^3
Вязкость	μ	M/LT
Эффективность	η	—

Если $\Delta P = \gamma H$, то

$$\text{Эффективность потока } C_H = \frac{g}{\omega^2 D^2}^H \tag{3.14}$$

Исключая D и оценивая полученный безразмерный параметр в точке максимальной эффективности, мы получаем удельную скорость. Поскольку удельную скорость получается из безразмерных результатов путем исключения диаметра, удельная скорость также безразмерна. Общее использование состоит в том, чтобы определить удельную скорость насоса с точки зрения скорости потока и увеличения напора; для турбины обычно определяют ее удельную скорость в зависимости от мощности и доступного напора. Таким образом, удельные скорости двух устройств различаются. Приводим привычные определения:

$$\text{Насос } N_{SP} = \frac{\omega\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} \quad \text{при максимальной эффективности} \tag{3.15}$$

$$\text{Турбина } N_{SP} = \frac{\omega\sqrt{W}/p}{(gH)^{5/4}} \text{ при максимальной эффективности} \tag{3.16}$$

Обычная процедура в США - не включать плотность ρ и ускорение под действием силы тяжести g и выражать удельные скорости с использованием следующих единиц:

$\omega \equiv$ об/мин $\quad Q \equiv$ галлона/мин или gpm $\quad H \equiv$ фунт $\quad$ Вт≡л.с.

Результатом этой практики является то, что значения удельной скорости больше не являются безразмерными, а содержат измерения. Обычные *пространственные* версии удельных скоростей становятся

$$\text{Насос } N'_{SP} = \frac{\omega\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \tag{3.17}$$

$$\text{Турбина } N'_{SP} = \frac{\omega\sqrt{\mathrm{W}}}{H^{5/4}} \tag{3.18}$$

Полезность использования определенных скоростей проиллюстрирована на следующих составных графиках. При выражении в рабочей точке максимальной эффективности, удельные скорости для насоса и турбины определяют общую геометрию машин для оптимальных условий эксплуатации. Данные графики показывают привычные пространственные версии удельных скоростей. Хотя эта глава в основном рассматривает турбины, используемые в гидроэнергетике, информация о частоте вращения насоса включена для полноты, а также по причине того, что в некоторых гидроэлектростанциях присутствует насосно-гидроциклонная система, в которой используются как насосы, так и турбины.

Рис. 3.10 показывает, почему удельная скорость насоса так важна при классификации турбомашин, таких как насосы. Удельная скорость на этом рисунке основана на традиционной процедуре США, и используется уравнение 3.17. Ниже абсциссы, на которой указана удельная скорость насоса, приведены схемы поперечного сечения, иллюстрирующие характерные особенности насосов в зависимости от удельной скорости. При низком значении N'_{SP} скорости потока низкие, а увеличение напора большое, что приводит к центробежным (радиальным) насосам, в которых центробежный эффект является доминирующим, а площадь входного отверстия относительно мала. По мере увеличения удельной скорости центробежные эффекты уменьшаются, а входные отверстия увеличиваются, в результате чего геометрия насоса изменяется от радиальной к смешанной и к осевой (пропеллер). Следовательно, удельная скорость определяет общую геометрию насоса для данной скорости, скорости потока и увеличения напора по всему насосу. На рис. 3.10 также представлены номинальные КПД, ожидаемые от хорошо сконструированного насоса в зависимости от скорости потока и удельной скорости. Как правило, с увеличением размера насоса эффективность возрастает, поскольку более крупные насосы связаны с большими скоростями потока. Причина состоит в том, что эффекты вязкости становятся более важными, когда размер насоса (и, следовательно, скорость потока) уменьшается, поскольку на большую часть потока влияют эффекты вязкости вблизи поверхностей (или стен).

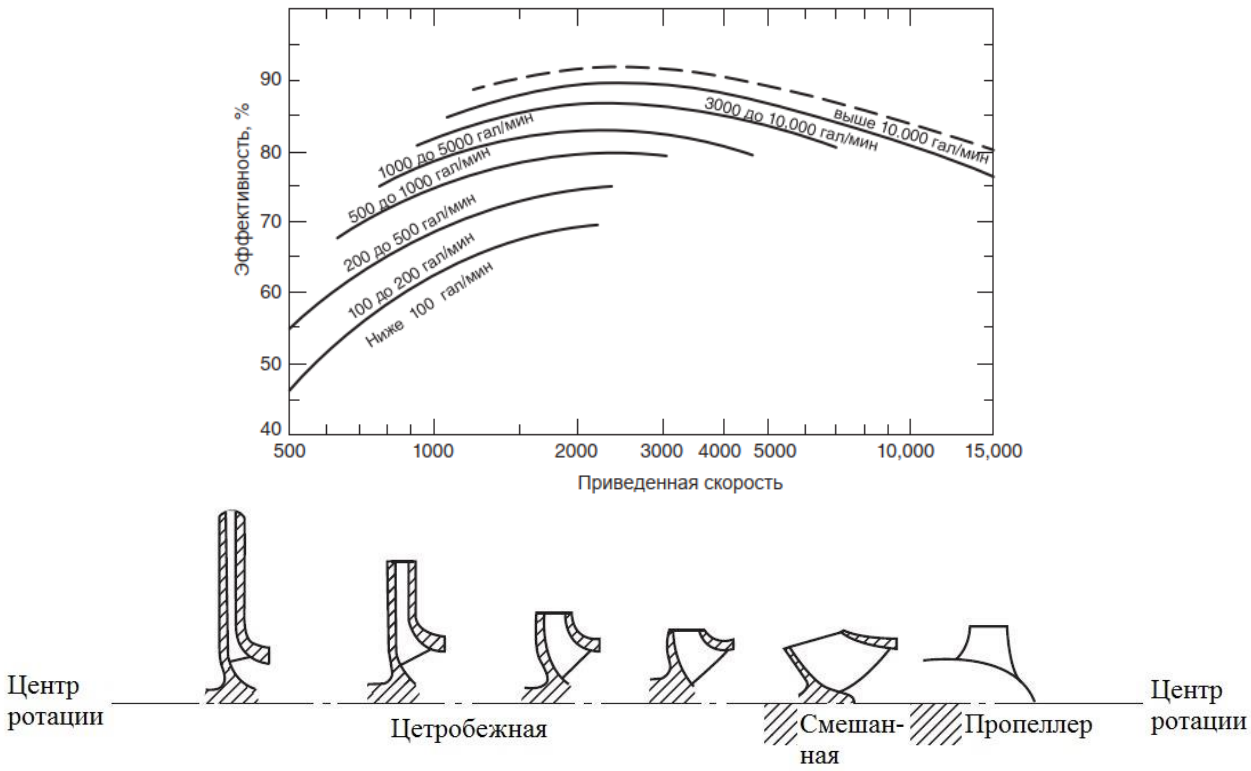


Рис. 3.10 Специфическое соотношение скорости насоса.

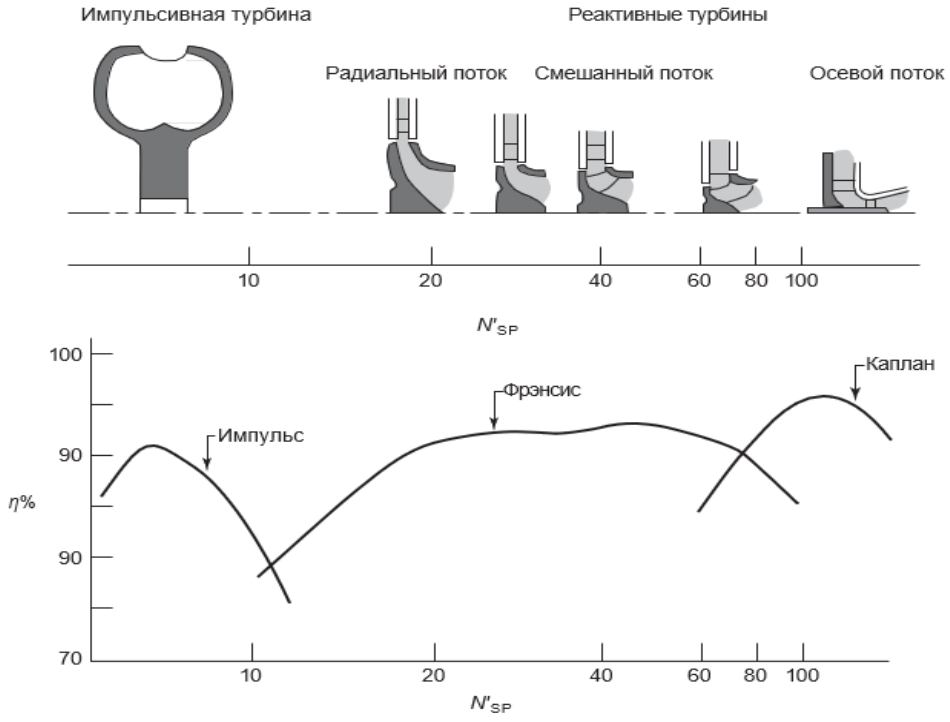


Рис. 3.11 Специфическое соотношение скорости турбины.

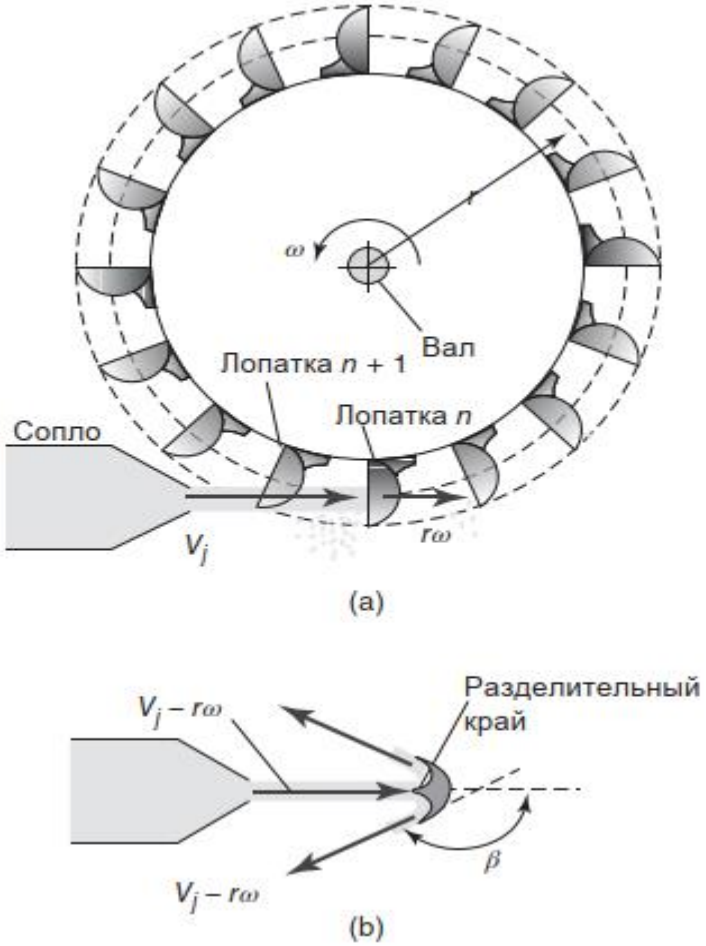


Рис. 3.12 Схема колеса Пелтона

Рис. 3.11 представляет собой версию турбины с определенным соотношением скорости. Для гидроэлектрического применения широко используются три типа турбин: импульсная турбина (или колесо Пелтона) для низких значений удельной скорости турбины, турбина Фрэнсиса для умеренных удельных скоростей и турбина Каплана для высоких удельных скоростей. Общие формы поперечного сечения каждого типа устройства, а также ожидаемая эффективность включены в данный рисунок. Рис. 3.12 содержит схему колеса Пелтона, а также детали разделительного края в «лопатке». Поток ускоряется через сопло и воздействует на ряд движущихся лопастей, по периферии колеса Пелтона. Угловой момент извлекается на разделительном крае, а жидкость сливается. На рис. 3.13 представлены схемы радиальной турбины Фрэнсиса и турбины Каплана. Дополнительная информация об этих различных типах турбин будет рассмотрена в Разделе 3.5.

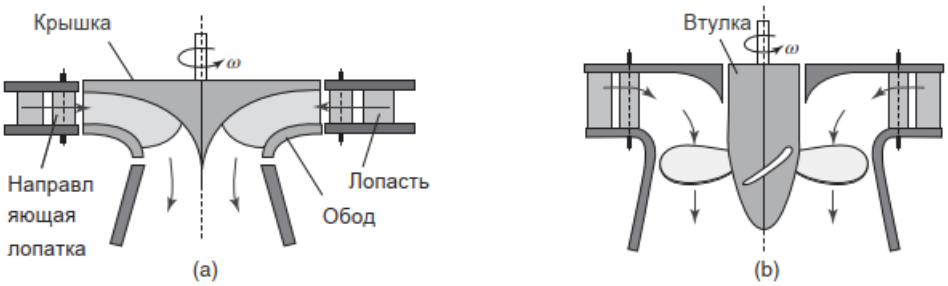


Рис. 3.13 (a) Схема турбины Фрэнсиса и (b) турбины Каплана.

$$\omega := 1200 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\text{мин}}$$

$$N_s := \omega \cdot \frac{\frac{(\text{Мощность}_{\text{генерируемая}})^{0.5}}{\rho}}{[g\cdot(Z_a - Z_b)]^{\frac{5}{4}}} \qquad N_s = 0.691 \qquad \text{Безразмерная величина}$$

$$N_{\text{разм}} := \frac{\omega}{2\cdot\frac{\pi}{\text{мин}}} \cdot \frac{\left(\frac{\text{Мощность}_{\text{генерируемая}}}{\text{л.с.}}\right)^{0.5}}{\left[\frac{(Z_a - Z_b)}{ft}\right]^{\frac{5}{4}}} \qquad N_{\text{разм}} = 30.047 \qquad \text{Размерная величина}$$

Рис. 3.14 Решение Mathcad (пример 3.2).

Пример 3.2

Для условий примера 3.1 определите тип турбины, которая будет установлена, если желаемая скорость вращения составляет 1200 об/мин.

Решение: удельная скорость будет рассчитана с использованием обычного подхода США с уравнением 3.18. Решение в Mathcad воспроизведено на рис. 3.14. Программа Mathcad легко справляется с данными задачами. На рис. 3.14 N_S - безразмерная версия заданной скорости, вследствие чего, результаты показаны как безразмерные в Mathcad. Используя обычное определение с единицами об/мин, л.с. и футы, вычисляется удельная скорость, равная 30,047. В Mathcad деление переменной на набор единиц приводит к безразмерному числу. Таким образом, использование обычных единиц с уравнением 3.18 дает соответствующие результаты $N_{\text{обычная}}$. При обычном значении 30,047 проверка на рис. 3.11 показывает, что подходящим типом турбины для этого применения является турбина Фрэнсиса и что эффективность 0,85 является разумной.

3.5 Процесс переноса энергии в турбинах

В Разделе 3.4 была представлена удельная скорость турбины и обсуждалась ее важность при классификации типа турбины, необходимой для конкретных применений. В этом разделе рассматриваются некоторые детали передачи энергии в различных турбинах. В первую очередь, рассмотрим колесо Пелтона.

Колеса Пелтона подходят для низких значений удельной скорости турбины. Низкие значения удельной скорости турбины связаны с большой доступностью напора (перепад высот) и относительно малыми скоростями потока. Рис. 3.15 - фотография большого коммерческого колеса Пелтона, в котором наблюдаются ковши и разделительные края. На самом деле колесо Пелтона является более сложным, чем стилизованная схема на рис. 3.12.



Рис. 3.15 Фотография коммерческого колеса Пелтона. Источник: Voith Hydro.

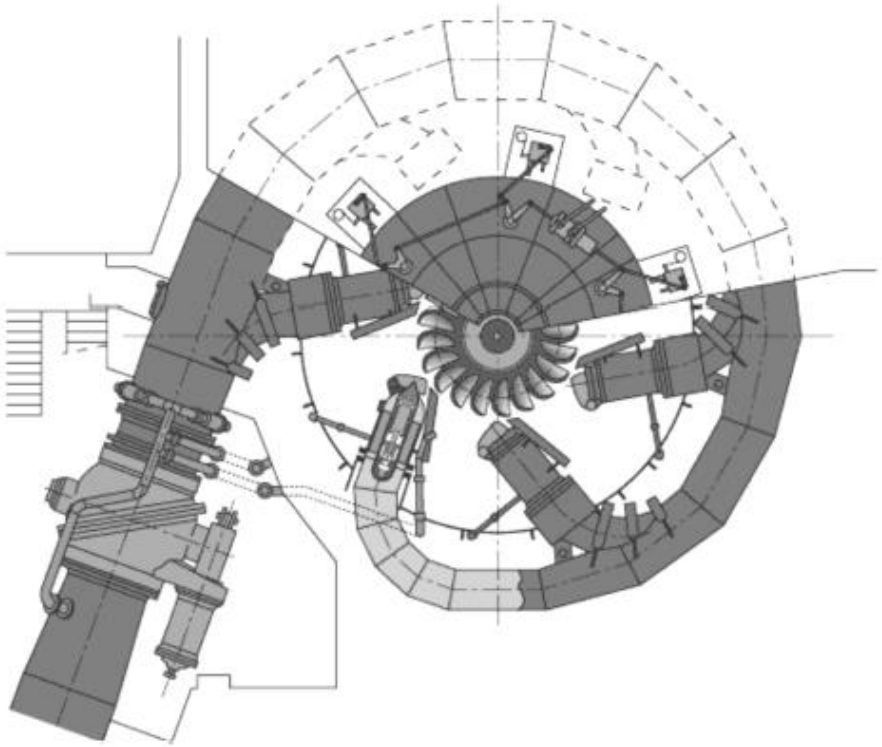


Рис. 3.16 Колесо Пелтона с шестью соплами. Источник: Voith Hydro.

Вода подается из сопла на разделительный край. Большие колеса Пелтона могут использовать более одной форсунки. Использование нескольких форсунок позволяет уменьшить колесо при той же мощности, но несколько форсунок усложняют физическое расположение. Voith Hydro продает колесо Пелтона с шестью форсунками. Рис. 3.16 показывает всю сложность данной конфигурации. На этом рисунке четыре сопла нарисованы, а два обозначены штрихами.

Анализ колеса Пелтона начинается с определения треугольников скоростей. Рис. 3.17 иллюстрирует разделительный край и треугольники скоростей входа и выхода для колеса Пелтона. Поскольку струя входит в разделительный край и покидает его в том же радиальном месте, $U_1 = U_2 = U$.

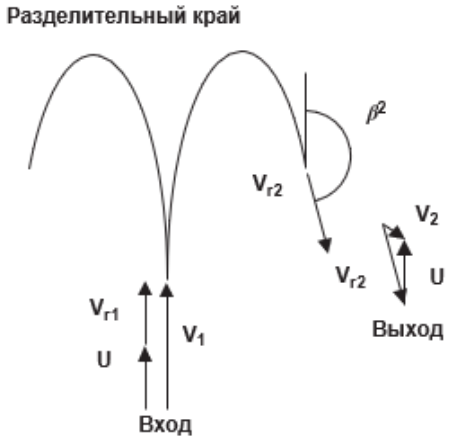


Рис. 3.17 Схема разделительного края с треугольниками скоростей

Колесо Пелтона представляет собой импульсное устройство без кожуха; следовательно, реактивность равна нулю. Для импульсного устройства с $U_1 = U_2 = U$ уравнение 2.18 требует, чтобы $V_{r1} = V_{r2}$. Треугольники скоростей выглядят, как на рис. 3.16, со скоростью V_1 на входе в тангенциальном направлении и, следовательно, коллинеарны скорости U колеса. Относительная составляющая скорости V_{r1} завершает треугольник скоростней на входе. Выходной разделительный край составляет

угол β_2 (<180°) относительно V_1, чтобы жидкость могла выходить из разделительного края, не мешая входящему потоку. При известных V_{r2} и U, треугольник скоростей на выходе определен.

Мощность, извлекаемая из жидкости, становится

$$\text{Мощность} = \dot{m}(U_1V_{u1} - U_2V_{u2}) = \dot{m}U(V_{u1} - V_{u2}) \tag{3.19}$$

А из треугольников скоростей:

$$\begin{aligned} V_{u1} &= V_1 = U + V_{r1} \\ V_{u2} &= U + V_{r2}cos(\beta_2) \end{aligned} \tag{3.20}$$

Заменив уравнение 3.20 на уравнение 3.19, где $V_{r1} = V_{r2}$, получаем:

$$\begin{aligned} P &= \dot{m}U[U + V_{r1} - U - V_{r2}\cos(\beta_2)] \\ &= \dot{m}U\{V_{r1}[1 - \cos(\beta_2)]\} = \dot{m}U(V_1 - U)[1 - \cos(\beta_2)] \end{aligned} \tag{3.21}$$

Значение скорости вращения колеса U для максимальной извлеченной мощности получается вычислением

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dU} &= 0 = \dot{m}(V_1 - U)[1 - \cos(\beta_2)] - \dot{m}U_1[1 - \cos(\beta_2)] \\ &= \dot{m}[1 - \cos(\beta_2)][(V_1 - U) - U_1] = V_1 - 2U \end{aligned} \tag{3.22}$$

Уравнение 3.22 дает важный результат - для максимального извлечения мощности из колеса Пелтона $U = V_1/2$. Максимальная P_{max} извлекаемая мощность может быть приведена как

$$\begin{aligned} P_{\text{макс}} &= \dot{m}\frac{V_1}{2}\left(V_1 - \frac{V_1}{2}\right)[1 - \cos(\beta_2)] \\ &= \dot{m}\left(\frac{V_1^2}{4}\right)[1 - \cos(\beta_2)] \end{aligned} \tag{3.23}$$

Поскольку β_2 обычно очень близко к 180°, 1–cos (β_2) очень близко к 2 и

$$P_{\text{макс}} = \dot{m}\frac{V_1^2}{2} \tag{3.24}$$

Уравнение 3.24 является простым выражением, но оно имеет много последствий для турбин Пелтона. Под выражением подразумевается соотношение между скоростью, доступной на выходе из сопла, скоростью на входе и скоростью вращения колеса. Кроме того, соотношение между мощностью и скоростью на входе является квадратичным. Скорость на входе зависит от разницы высот; чем больше разница, тем выше скорость. Высокие скорости на входе могут возникать только из-за больших перепадов высот; из этого следует положение о том, что колеса Пелтона подходят для высоконапорных плотин. Давайте разберем пример.

Пример 3.3

Какую мощность в киловаттах можно развить с помощью колеса Пелтона, показанного на рис. 3.18, если КПД генератора составляет 85%? Суммарные незначительные потери приведены как K = 5,25 и C = 1500. Какова будет угловая скорость колеса для максимальной извлеченной мощности? Какова мощность при удельном числе оборотов? Какова величина крутящего момента?

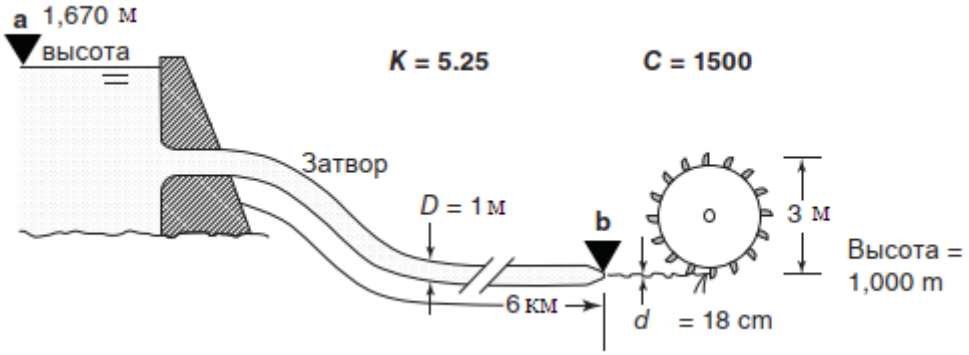


Рис. 3.18 Схема примера 3.3.

Решение: для такого устройства, как на рис. 3.18, уравнение энергии должно применяться между свободной поверхностью верхнего резервуара (a) и выходной плоскостью сопла (b), которое питает турбину Пелтона. Уравнение энергии становится

$$\frac{P_a}{\gamma}+\frac{V_a^2}{2g}+Z_a=\frac{P_b}{\gamma}+\frac{V_b^2}{2g}+Z_b+\frac{V^2}{2g}\left(f\frac{L}{D}+K+Cf_T\right)$$

Как и в предыдущем гидравлическом примере, $P_a = P_b$ и $V_a = 0$. В отличие от примера 3.1, V_b - не ноль, а скорость на выходе из сопла $V_{сопло}$, и поскольку турбина Пелтона находится ниже по потоку от (b), из турбины не извлекается энергия между точками (a) и (б). Уменьшенная форма уравнения энергии становится

$$Z_a=\frac{V_b^2}{2g}+Z_b+\frac{V^2}{2g}\left(f\frac{L}{D}+K+Cf_T\right)$$

или

$$\frac{V_b^2}{2g}=Z_a-Z_b-\frac{V^2}{2g}\left(f\frac{L}{D}+K+Cf_T\right)$$

Это уравнение интересно тем, что оно утверждает, что кинетическая энергия, доступная для турбины Пелтона, равна разности высот (потенциальной энергии) минус основные и незначительные потери. Однако более полезное выражение для решения задачи получается, если скорости привести в значении скорости потока через уравнение 3.4 с результатом:

$$\frac{8Q^2}{g\pi^2D_B^4}=Z_a-Z_b-\frac{8Q^2}{g\pi^2D^4}\left(f\frac{L}{D}+K+Cf_T\right)$$

Для примера 3.1 уравнение приобретает вид:

$$0=Z_a-Z_b-\frac{8Q^2}{g\pi^2D_B^4}-\frac{8Q^2}{g\pi^2D^4}\left(f\frac{L}{D}+K+Cf_T\right)$$

Таблица Mathcad, использованная для решения примера 3.1, была модифицирована для решения этой задачи. Решение представлено на рис. 3.19. Первая часть таблицы представляет решение для скорости потока. Решение скорости потока – это задача по трубопроводу II Категории, и результат составляет 2.79 м^3/с. Остальная часть таблицы связана с расчетами турбины Пелтона. Извлеченная мощность 16 780 кВт рассчитывается уравнением 3.23, а скорость вращения колеса 349 об/мин – как $V_1/2$.

Удельная мощность скорости составляет 3.207. Изучение рис. 3.11 подтверждает, что удельная мощность скорости находится в диапазоне, ожидаемом для турбины Пелтона, и что указанная эффективность подходит для этого устройства.

ПРОИСХОЖДЕНИЕ ≡ 1 Обозначьте счетчики происхождения до 1, с начальным показателем 0

Введите геометрию трубы:

Диаметр в м.	Длина в м.	Шероховатость в мм	Диаметр сопла
D := 1·м	L := 6000 ·м	ε :=0.046·мм (труба общ. назначения)	$D_{сопла}$: = 18 ·см

Введите предельные условия системы (начальные и конечные):

Давление в Па Высота в м:

$\begin{pmatrix} P_a \\ P_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$ Па $\quad \begin{pmatrix} Z_a \\ Z_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1670 \\ 1000 \end{pmatrix}$ м

Введите коэффициенты потерь:

Коэффициент К Эквивалентные длины

K:= 5.25 C:= 1500

Введите свойства жидкости:

Плотность в кг/м³ Кинематическая вязкость в м²/с

$\rho := 1000 \cdot \frac{кг}{м^3}$ $\quad \nu := 1.14 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{м^2}{с}$

Введите скорость потока в м³/с

$Q := 1 \cdot \frac{м^3}{с}$

Изначальное предположение скорости потока

Определите функции для числа Рейнольдса, полностью грубого коэффициента трения и коэффициент трения:

$Re(q, d) := \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d \cdot \nu}$ $\quad f_T(d, \varepsilon) := \frac{0.3086}{Лог\left[\left(\frac{\varepsilon}{3.7 \cdot d}\right)^{1.11}\right]^2}$

$$f(q, d, \varepsilon) := \begin{cases} \dfrac{0.3086}{Лог\left[\dfrac{6.9}{Re(q,d)} + \left(\dfrac{\varepsilon}{3.7 \cdot d}\right)^{1.11}\right]^2} & \text{если } Re(q,d) > 2300 \\ \dfrac{64}{Re(q,d)} & \text{иначе} \end{cases}$$

Рис. 3.19 Решение в программе Mathcad (пример 3.3).

Для умеренных значений удельной скорости предпочтительной является турбина Фрэнсиса. Рис. 3.20 - иллюстрация турбинной установки Фрэнсиса.

Турбины Фрэнсиса являются наиболее часто используемыми из трех типов. С появлением больших плотин, турбины Фрэнсиса выросли в размерах. На рис. 3.21 компания Voith Hydro зафиксировала увеличение размеров и производительности турбин Фрэнсиса, которые они производили за эти годы.

Турбина Каплана – это другой тип устройства, часто используемый в гидроэнергетике. Рис. 3.22 представляет собой воспроизведение турбины Каплана, производимую компанией Voith Hydro, а рис. 3.23 схематически иллюстрирует типичную установку.

Турбины Фрэнсиса и Каплана являются скорее реактивными, чем импульсными устройствами. Общий подход к решению задач, связанных с турбинами Фрэнсиса или Каплана, заключается в построении треугольников скоростей и применении уравнения Эйлера. Следующий пример типичен для подхода, используемого для этих устройств.

Обобщенное уравнение имеет вид:

Дано

$$0 \cdot m = Z_a - Z_b - \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D_{\text{сопло}}^4 \cdot g}\right) - \left[\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{Q^2}{D^4 \cdot g}((Q, D, \varepsilon) \cdot \frac{L}{D} + K + C \cdot f_T(D, \varepsilon))\right]$$

q := Найти (Q)

$q = 2.79\ м^3 \cdot с^{-1}$ $q = 1.674x10^5 \frac{литр}{мин}$ $q = 737.167 \frac{гал}{сек}$

Скорость струи:

$$V_{струи} := \frac{q}{0.25 \cdot \pi \cdot D_{сопло^2}} \qquad V_{струи} = 109.659 м \cdot с^{-1}$$

Кинетическая энергия, доступная для колеса Пелтона равна 0.5 $V_{струи^2}$; доступная мощность - это доступная кинетическая энергия умноженная на скорость потока. Это предполагает ($1+\cos\beta_2=2$)

$$Мощность := q \cdot \rho \cdot \frac{V_{струя}^2}{2} \qquad Мощность = 1.678 \times 10^4 кВт$$

$$Мощность_{\text{генерируемая}} := 0.85 \cdot Мощность \qquad Мощность_{генерируемая} = 1.426 \times 10^4 кВт$$

Для максимальной эффективности колеса Пелтона, скорость лезвий составляет 0.5 скорости струи

$U := 0.5 \cdot V_{струя}$ $U = 54.83\ м \cdot с^{-1}$ Об/мин $:= \frac{2 \cdot \pi \cdot рад}{мин}$

$D_{колесо} := 3.0 \cdot м$ $\omega := \frac{U}{0.5 \cdot D_{колесо}}$ $\omega = 36.553 с^{-1}$

$$Крутящий\ момент := \frac{Мощность_{генерируемая}}{\omega}$$

$$Крутящий\ момент = 3.902 \times 10^5 ньютон \cdot м$$

$$\omega = 349.056\ об/мин$$

Мощность при удельном числе оборотов для данного примера:

$$N_{cus} := \frac{\omega}{об/мин} \cdot \frac{\left(\frac{Мощность\ gen}{л.с}\right)^{0.5}}{\left(\frac{Z_a - Z_b}{фут}\right)^{\frac{5}{4}}}$$

$N_{cus} = 3.207$

Данная величина является размерной

Рис. 3.19 (продолжение).

Пример 3.4

Радиальная турбина Френсиса с эффективностью 90% вырабатывает 111 МВт при скорости 167 об/мин. Высота лопатки составляет 0.732 м, а радиус на входе – 5.52 м. Поток выходит из турбины в радиальном направлении.

a) Если угол между радиальным направлением и абсолютной скоростью на входе составляет 30°, определите объем скорости потока.
b) Какое изменение в напоре турбины?

Решение: эта турбина имеет поток в радиальной плоскости на входе и радиальный поток на выходе; таким образом, течение является радиальным (без осевой составляющей скорости) по всей турбине. Рис. 3.24 иллюстрирует общее расположение и треугольники скоростей. На рис. 3.25 показан вид сбоку с заданной геометрией лопатки.

Радиус впуска и скорость ротора позволяют вычислять U_1 непосредственно как

$$U_1 = r_1\omega = 5.52\,\text{m} \times 167\frac{\text{обор}}{\text{мин}}\frac{2\pi}{\text{обор}}\frac{\text{мин}}{60\,\text{s}} = 96.53\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

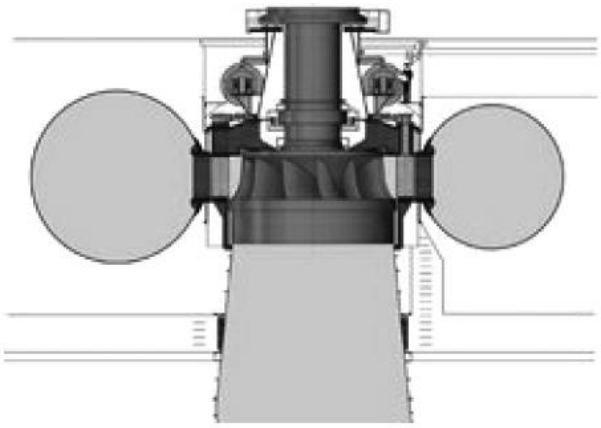


Рис. 3.20 Установка турбины Фрэнсиса. *Источник*: Voith Hydro.

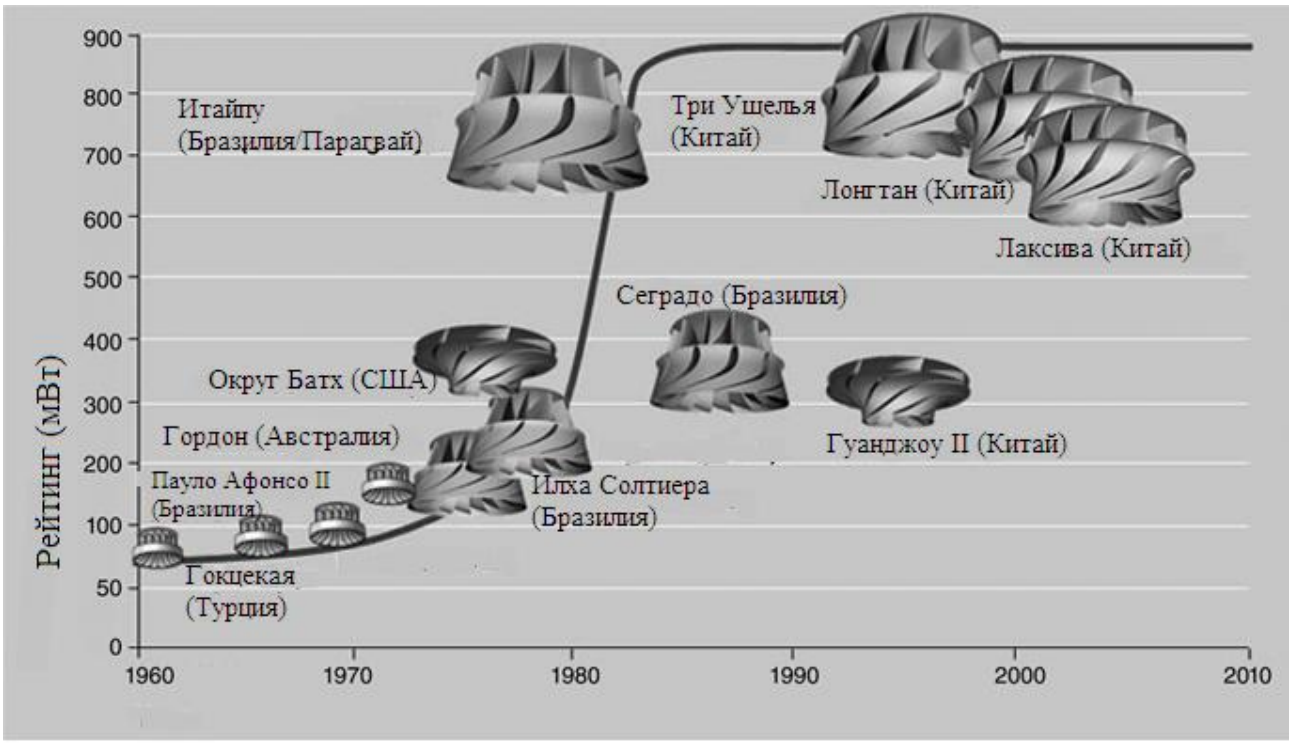


Рис. 3.21 Увеличение в размерах Турбин Фрэнсиса компании Voith Hydro с 1960. *Источник*: Voith Hydro.

Мощность, извлекаемая из жидкости, равна мощности, подводимой к турбине, и может быть выражена как

$$\text{Мощность}_{\text{вход}} = \frac{\text{Мощность}_{\text{выход}}}{\eta} = \frac{111\text{МВт}}{0.9} = 123.33\text{МВт}$$

Так как V_2 является радиальной, $V_{u2} = 0$ выражение мощности становится

$$\text{Мощность}_{\text{вход}} = \dot{m} U_1 V_{u1}$$



Рис. 3.22 Турбина Каплана. *Источник*: Voith Hydro.

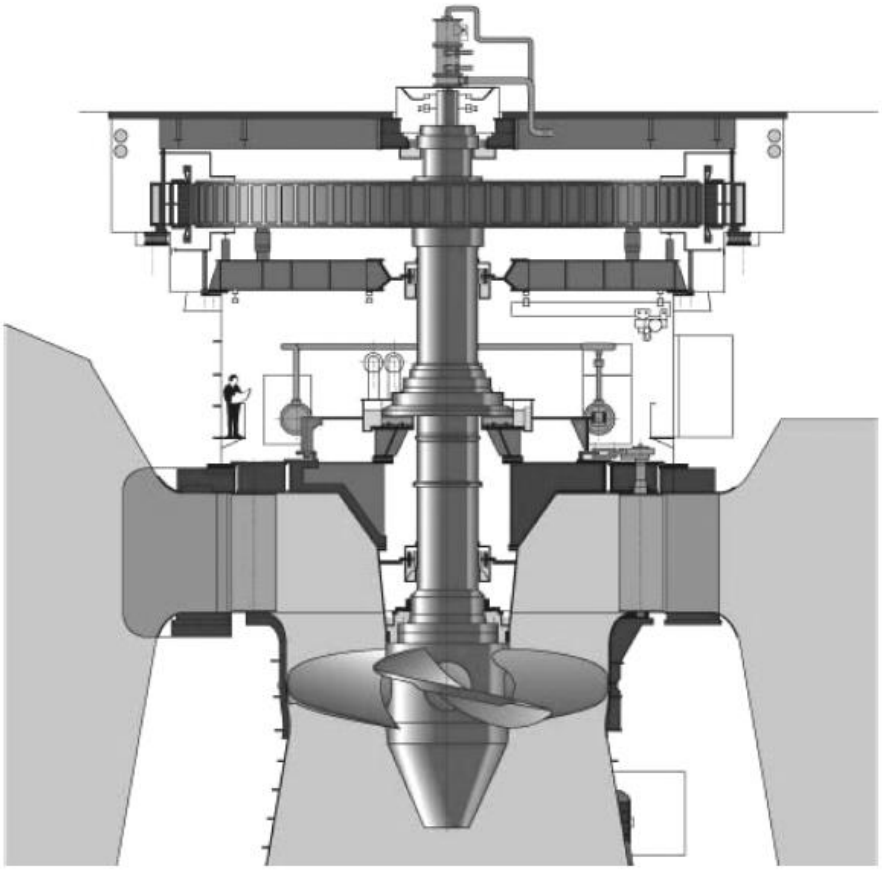


Рис. 3.23 Установка турбины Каплана. *Источник*: Voith Hydro.

Скорость потока в турбину равна радиальной скорости, умноженной на свободный поток, или

$$Q = 2\pi_1 h_1 V_{ml} = 2\pi \times 5.52\text{м} \times 0.732\text{м} \times V_{ml} = 25.39\text{м}^2 \times V_{ml}$$

Объединение двух предыдущих выражений дает

$$\text{Мощность}_{\text{вход}} = 123.33\text{МВт} = \rho \times 25.39\text{м}^2 \times V_{m1} U_1 V_{u1} \qquad (3.25)$$

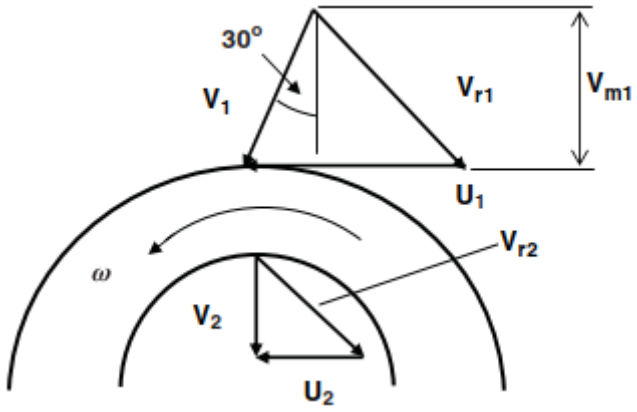


Рис. 3.24 Схема и треугольники скоростей для Примера 3.4.

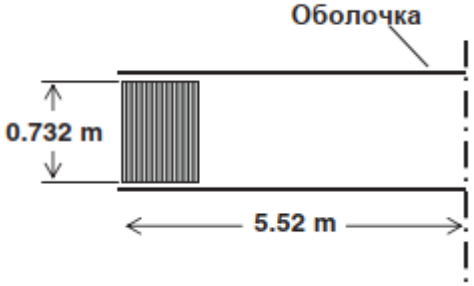


Рис. 3.25 Детали турбинных лопастей.

Но, из треугольника скоростей на входе $V_{ml} = V_{u1}\cot(30°)$; тогда

$$\begin{aligned} 123.33\,\text{MW} &= \rho \times 25.39^{\ 2} \times V_{\text{m1}} U_1 V_{\text{u1}} \\ &= 1000\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 25.39\,\text{м}^{\ 2} \times V_{\text{u1}} \cot(30°) \times 96.53\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \times V_{\text{u1}} \\ &= 4.245 \times 10^6\ \text{—} \times V_{\text{u1}}^2 \end{aligned} \tag{3.26}$$

Из чего мы заключаем V_{u1}= 5.39 м/с, и

$$\begin{aligned} V_{\text{m1}} &= 5.39\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \cot(30°) = 9.336\,\frac{\text{м}}{\text{с}} \\ Q &= 25.39^{\ 2} \times 9.336\,\frac{\text{м}}{\text{с}} = 237\ \text{—}^{3} = 3.757 \times 10^6 \frac{\text{гал}}{\text{мин}} \end{aligned} \tag{3.27}$$

Как и следовало ожидать от турбины Фрэнсиса, которая выдает 111 МВт, скорость потока велика: 237 м³/с или 3.757×10^6гал/мин

Изменение напора на турбине Фрэнсиса можно рассчитать непосредственно из соотношения между мощностью, скоростью потока массы и изменением напора:

$$\text{Мощность} = Q\Delta P = Q\rho g\Delta h$$

$$\Delta h = \frac{\text{Мощность}_{\text{вход}}}{Q\rho g} = \frac{123.33\ \text{МВт} * \frac{10^6\text{Вт}}{\text{МВт}} * \frac{\text{Дж}}{\text{с*Вт}} * \frac{\text{Н*м}}{\text{Дж}}}{237\,\frac{\text{м}^3}{c} \times 1000\,\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \times 9.807\,\frac{\text{м}}{\text{с}^2}} * \frac{\text{кг} * \text{м}}{\text{Н} * \text{с}^2} = 53.06\ \text{м}$$

Таким образом, изменение напора через турбину Фрэнсиса составляет 53.06 м.

Пример 3.4 является типичным для процесса, используемого для решения задач, связанных с устройствами турбомашин. Большая часть основы для решения была разработана в Главе 2.

Выработка гидроэлектроэнергии напоминает о массивных системах плотин и водоотводов, таких как на Рисунках 3.3, 3.4 и 3.5, которые приводят в движение турбины (как рассмотрено в этой главе) и

сбрасывают воду в нижний бьеф под плотиной. Другим типом гидроэлектрической системы является системы с гидроаккумулирующей конфигурацией, где насосы используются при низких тарифах на электроэнергию (обычно ночью), для закачки воды в резервуар, который сбрасывается для приведения в действие турбин. Данные процедуры приводятся в действие, когда электрическая сеть испытывает нагрузку, а электричество дорогое (в периоды пиковой нагрузки на сеть). Таким образом, гидроаккумулирующие системы содержат как насосы, так и турбины.

Гидродинамические потери возникают при перекачке, а также при производстве в таких системах; кроме того, насосы, турбины и генераторы имеют свои неэффективности. Конечным результатом является то, что на накапливание расходуется больше энергии, чем на выработку, поэтому гидроаккумулирующая система является конечным потребителем электроэнергии, но с точки зрения коммунального предприятия такие системы можно быстро подключить к сети и обеспечить электроэнергию дешевле, чем из внешнего источника при пиковых нагрузках.

Гидроаккумулирующая ГЭС Raccoon Mountain Администрации Штата Теннесси - хороший пример современного гидроаккумулирующего предприятия; информация доступна по адресу https://www.tva.gov/Energy/Our-Power-System/Hydroelectric/Raccoon-Mountain и http://www.energystorageexchange.org/projects/216. В 2015 году EIA сообщила о 42 гидроаккумулирующих систем, мощностью от 1 до 3000 МВт в США, общей мощностью 22 ГВт.

Гидроаккумулирующие системы генерировали 23×10^6кВт-ч, но накачивание потребляло 29×10^6кВт-ч - общая эффективность 79%. Гидроаккумулирующие системы в 2015 году обеспечило 97% от общего объема хранения электроэнергии. Упражнение 3.20 – это упражнение, построенное на основе системы хранения с накачкой.

3.6 Заключение

В этой главе исследовалась гидроэнергия путем изучения некоторых крупных гидроэлектростанций, разработки и использования концепции удельной скорости, рассмотрения того, как работает турбина Пелтона (импульсное устройство), и демонстрации того, как использовать треугольники скоростей для решения задач.

Даже являясь возобновляемым источником энергии, использование гидроэлектроэнергии все равно поднимает некие экономические и экологические вопросы, как указанно в Главе 3.1. Недавнее исследование Као и соавт. (2014), спонсором которого выступила Национальная лаборатория Ок-Риджа, была проведена оценка потенциала гидроэлектростанций в США до 2040 года. Результаты представлены в краткой форме Боуманом на рис. 3.26, взятом из EIA *Today in Energy* (*Сегодняшняя энергия*) за 14 июля 2014 года.

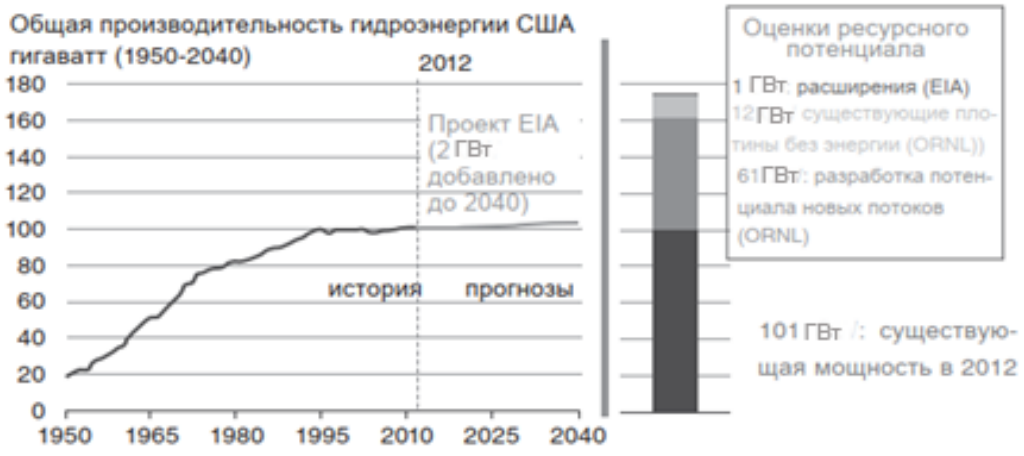


Рис. 3.26 Прогноз роста гидроэнергии в США до 2040 года. *Источник*:EIA (http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=17051).

Исследование определило установленную гидроэлектрическую мощность как 101 ГВт в 2012 году. Но прогнозировало добавление только дополнительных 2 ГВт к 2040 году из потенциальных 60 ГВт. Эти результаты в основном совпадают с исследованием 2010 года, спонсируемым Национальной академией наук (2010). Оба исследования признали, что экономические и экологические проблемы

являются основной причиной того, что в США, скорее всего, будет добавлено мало дополнительных гидроэлектростанций.

Каждый год Администрация энергетической информации (EIA) публикует Ежегодный энергетический прогноз (AEO), в котором содержатся 25-летние прогнозы в отношении энергетических ресурсов и потребления. Эти прогнозы строятся на основании стандартных случаев и различных энергетических сценариев. AEO 2016 (EIA, 2016), который прогнозирует рост гидроэнергетики на 0,1% до 2040 года, существенно согласуется с результатами Баумен (2014) и с изучением результатов для роста гидроэнергетики Национальной академией наук и соавт. (2010). В течение ряда лет прогнозы по гидроэнергетике предсказывали незначительный рост. Например, AEO 1998 (EIA, 1997) прогнозировал рост только на 0,1% к 2020 году, что соответствует темпам роста AEO 2016.

Вопрос роста гидроэнергетики считался решенным до июля 2016 года, когда Управление ветро- и гидроэнергетических технологий при Министерстве энергетики США по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии (EERE, 2016) выпустило доклад «HydroPower Vision: A New Chapter for America's 1st Renewable Electricity Source.». Отдел ветро- и гидроэнергетических технологий поддерживает разработку, внедрение и коммерциализацию ветро- и гидроэнергетических технологий. Данный отчет, утверждающий, что сценарий роста гидроэнергетики, далекий от медленного роста был вероятен, основывался на сотрудничестве экспертов из более 150 субъектов, включая федеральные, региональные и местные органы власти, а также отраслевые торговые ассоциации, производителей, природоохранные организации, коммунальные службы и исследовательские организации. Большинство участников были из федеральных агентств. Исследования HydroPower Vision в краткой форме:

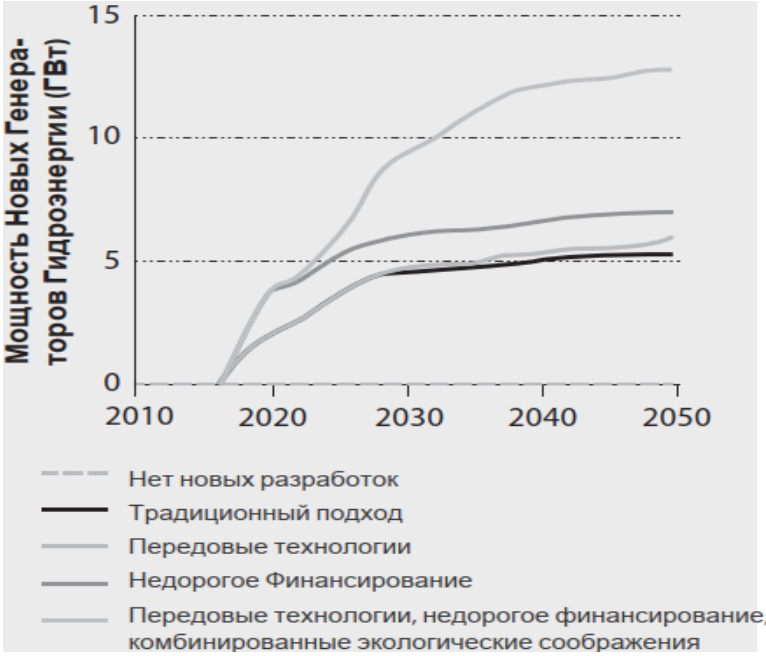


Рис. 3.27 Сводные прогнозы HydroPower Vision по традиционной гидроэнергетике на период с 2016 по 2050 года. *Источник*: http://energy.gov/eere/water/new-vision-united-states-hydropower.

гидроэнергетика США может вырасти с мощности 101 ГВт до почти 150 ГВт к 2050 году. Рост по этому смоделированному сценарию будет обусловлен сочетанием 13 ГВт новых мощностей по выработке гидроэлектроэнергии (модернизация существующих станций, добавление электроэнергии на существующих плотинах и каналах, и ограниченное освоение новых потоков) и 36 ГВт мощностей новых гидроаккумулирующих систем.

Эти результаты противоречат принятым прогнозам скудного роста гидроэнергии. HydroPower Vision рассматривает несколько альтернативных сценариев для традиционной гидроэнергии: (1) нет новых разработок, (2) общепринятые сценарии (3) передовые технологии, (4) низкая стоимость финансовых ресурсов и (5) передовые технологии, низкая стоимость финансовых ресурсов и комбинированные экологические соображения. Рис. 3.27, взятый из HydroPower Vision, дает отличную сводку различных сценариев и результатов для традиционной гидроэлектроэнергии. Без новых

разработок, увеличение мощности (гигаватт) невозможно, в то время как бизнес будет увеличивать мощность по 5 ГВт до 2050 года. Прогнозируется, что передовые технологии добавят около 5 ГВт, в то время как низко затратное финансирование обеспечит дополнительно около 7 ГВт. Тем не менее, если передовые технологии и недорогое финансирование будут сочетаться с экологическими соображениями, к 2050 году увеличение обычной мощности по производству электроэнергии на гидроэлектростанциях составит около 13 ГВт.

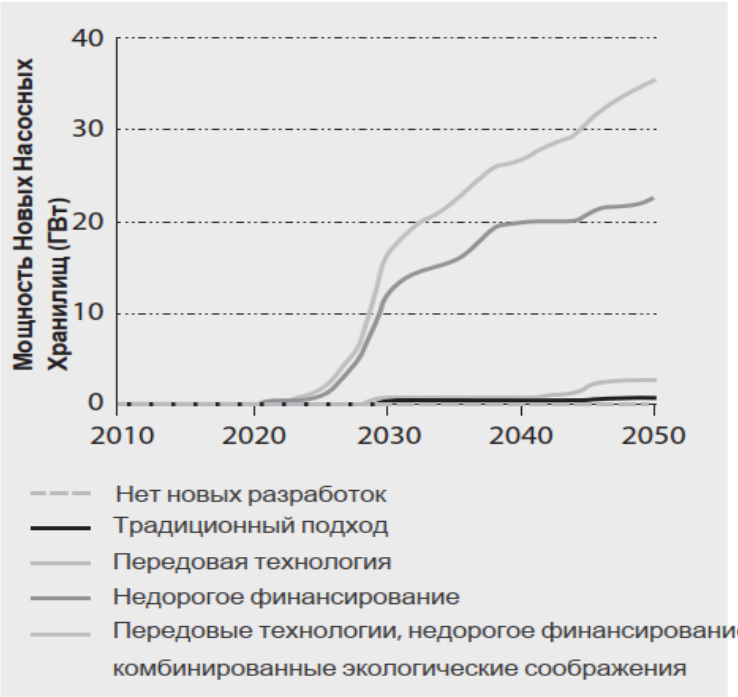


Рис. 3.28 Сводные прогнозы HydroPower Vision по гидроаккумулирующим системам с 2016 по 2050. *Источник*:http://energy.gov/eere/water/new-vision-united-states-hydropower.

В дополнение к обычному увеличению гидроэнергетической мощности (13 ГВт), HydroPower Vision рассматривает дополнительные мощности гидроаккумулирующих систем (36 ГВт). Сценарий для гидроаккумулирующих систем такой же, как и для обычного гидроузла. Прогноз на гидроаккумулирующие системы показан на рис. 3.28. Гидроаккумулирующие системы демонстрируют незначительный рост благодаря передовым технологиям, но намного выигрывают от небольших финансовых затрат перед классической гидроэнергией. Как и в случае с обычной гидроэлектроэнергией, сочетание передовых технологий и недорогого финансирования, вместе с экологическими соображениями демонстрирует наибольшее увеличение проектной мощности. Действительно, для гидроаккумулирующих систем, дешевое финансирование более важно, чем экологические соображения. Гидроаккумулирующие системы могут стать основным источником накопленной электроэнергии к 2050 году, отмечает HydroPower Vision.

Какой из этих сценариев гидроэнергетики (традиционный или HydroPower Vision) или какое сочетание этих двух вариантов произойдет к 2050 году, неизвестно в 2016 году. Модернизация существующих гидроэлектростанций, безусловно, возможна, и добавление значительной мощности гидроаккумулирующих систем обеспечивает повышенную гибкость для стратегии управления электросетями. Исследование HydroPower вносит вклад в энергетический комплекс и должно быть рассмотрено.

Литература

Bowman, M. (2014) EIA projections show hydro growth limited by economics not resources.

Today in Energy, EIA, July 14.

Cengel, Y.A. and Cimbala, J.M. (2013) Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, 3rd edn. McGraw-Hill, New York.

Crane Engineering Department (1957) Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Technical Paper 410, 4th printing. Crane Company, Chicago, IL.

EERE (2016) HydroPower Vision: A New Chapter for America's 1st Renewable Electricity Source. DOE/GO-102016-4869, July.

EIA (1997) Annual Energy Outlook 1998:With Projections to 2020. DOE/EIA-0383(98). http://www.greatchange.org/bb-moredinoblood-aeo98.pdf (accessed October14,2016).

EIA (2016) Annual Energy Outlook 2016. https://www.eia.gov/forecasts/aeo/tables_ref.cfm (accessed October 14, 2016).

Haaland, S.E. (1983) Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent flow.

Transactions of the ASME, Journal of Fluids Engineering, **103** (5): 89–90.

Hodge, B.K. (2006) Aunified approach topiping system problems. ASEE Computers in Education Journal, 16 (2): 68–79.

Hodge, B.K. and Taylor, R.P. (1999) Analysis and Design of Energy Systems, 3rd edn. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Kao, S.C., McManamay, R. A., Stewart,K.M., et al. (2014)New Stream-reach Development: A Comprehensive Assessment of Hydropower Energy Potential in the United States. Contract DE-AC05-00OR22725, Oak Ridge National Laboratory, GPODOE/EE-1063.

Kumar, A., Schei, T., Ahenkora, A., et al. (2011) Hydropower. In Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Edenhofer, O., Pichs-Madruga, Y., Sokona,K., et al. (eds). Cambridge University Press, New York.

Leslie, J.(2005) Deep Water: The Epic Struggle over Dams, Displaced People, and the Environment. Farrar, Straus and Giroux, New York.

National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, and National Research Council of the National Academies (2010) Electricity from Renewable Resources: Status, Prospects, and Impediments, The National Academies Press, Washington, DC.http://www.nap.edu/openbook.php?record_id=12619 (accessed October 3, 2016).

Scudder, T. (2005) The Future of Large Dams: Dealing with Social, Environmental, Institutional, and Political Costs. Earthscan, London.

Spilsbury, L. (2011) Dams and Hydropower: Development or Destruction. Rosen Publishing Group. Wang, P., Dong, S., and Lassoie, J. (2014) The Large Dam Dilemma: An Exploration of the Impacts of Hydro Projects on People and the Environment in China .Springer Netherlands, Dordrecht.

Дополнительная литература

Munson, B.R., Rothmayer, A.P., Okishii, T.H., and Huebsch, W. W. (2012) Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th edn. JohnWiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

4 Энергия ветра

4.1 Введение

Энергия ветра, как и солнечная энергия, в последнее время привлекла большое внимание средств массовой информации. Действительно, энергия ветра продемонстрировала самый быстрый рост среди всех возобновляемых источников энергии за последние несколько лет. Как показано на рис. 1.11, энергия ветра составляла 18% возобновляемой энергии, использованной в США в 2014 году, по сравнению с 4% в 2007 году. Рис. 1.12 иллюстрирует скорость увеличения установленной мощности ветровой энергии в США с 2000 по 2013 год. Энергия ветра также становится все более важной составляющей энергетического сочетания в Западной Европе. Цели этой главы состоят в том, чтобы развить фундаментальные принципы энергии ветра и дать количественное понимание энергии ветра.

Устройства для сбора энергии ветра доступны во многих различных конфигурациях. Несколько возможных конфигураций показаны на Рисунках 4.1 и 4.2. Основные обозначения ветроэнергетического устройства включают HAWT на рис. 4.1, и VAWT на рис. 4.2. Обозначение зависит от оси вращения ветровой машины: устройства HAWT вращаются в горизонтальной плоскости, а устройства VAWT вращаются в вертикальной плоскости. Устройства HAWT являются более распространенными, чем VAWT, но горизонтальные устройства должны иметь механизм - контроль рыскания - чтобы держать их направленными на ветер. Устройства VAWT, с другой стороны, не нуждаются в контроле рыскания.

Многие из ветроэнергетических устройств, показанных на Рисунках 4.1 и 4.2, являются спекулятивными; у них мало или нет наглядной функциональности, и они не доступны на коммерческом рынке. Наиболее распространенными конфигурациями для HAWT являются двух- и трехлопастные, ветряная мельница и парусное крыло. Ветровые турбины с двумя и тремя лопастями могут работать как против ветра, так и под ветром. При этом наиболее распространенным типом является против ветра. Что касается установленных киловатт, общая мощность HAWT значительно превышает мощность VAWT. На рис. 4.3 представлены фотографии HAWT и VAWT; на рис. 4.3a демонстрируется большой HAWT, который подходит для коммерческого производства электроэнергии, а турбина на рис. 4.3b – это устройство намного меньшего размера, подходящее для мест проживаний. Подробное исследование характеристик коммерчески доступных горизонтальных ветровых турбин будет представлено позже в этой главе.

Наиболее распространенными версиями VAWT являются ветротурбины Савониуса и Дарье, при этом большинство оставшихся вертикальных конфигураций находятся либо в экспериментальной или развивающейся, либо в теоретической стадии. Тем не менее, даже конфигурации Савониуса и Дарье не столь широко предложены на коммерческих рынках. Основываясь на их принципе работы, устройства VAWT обычно классифицируют как устройства сопротивления или подъема. Ротор Савониуса является устройством сопротивления, поскольку сопротивление ветра на «чашках» создает крутящий момент на оси. Устройство Дарье классифицируется как подъемное устройство, поскольку крутящий момент на валу обусловлен, главным образом, подъемом лопастей. Одним из признаков преобладания горизонтальных ветровых турбин является то, что на веб-сайте Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL) в разделе фотографий возобновляемой энергии представлена только одна фотография VAWT (с изображением Дарье). Рис. 4.3c взят с веб-сайта NREL и представляет собой фотографию Ветровой турбины Дарье, корпорации FloWind Corporation 17 EHD, созданную в 1995 году. На рис. 4.3d показан пример современного VAWT, установленного в Мартиньи, Швейцария.

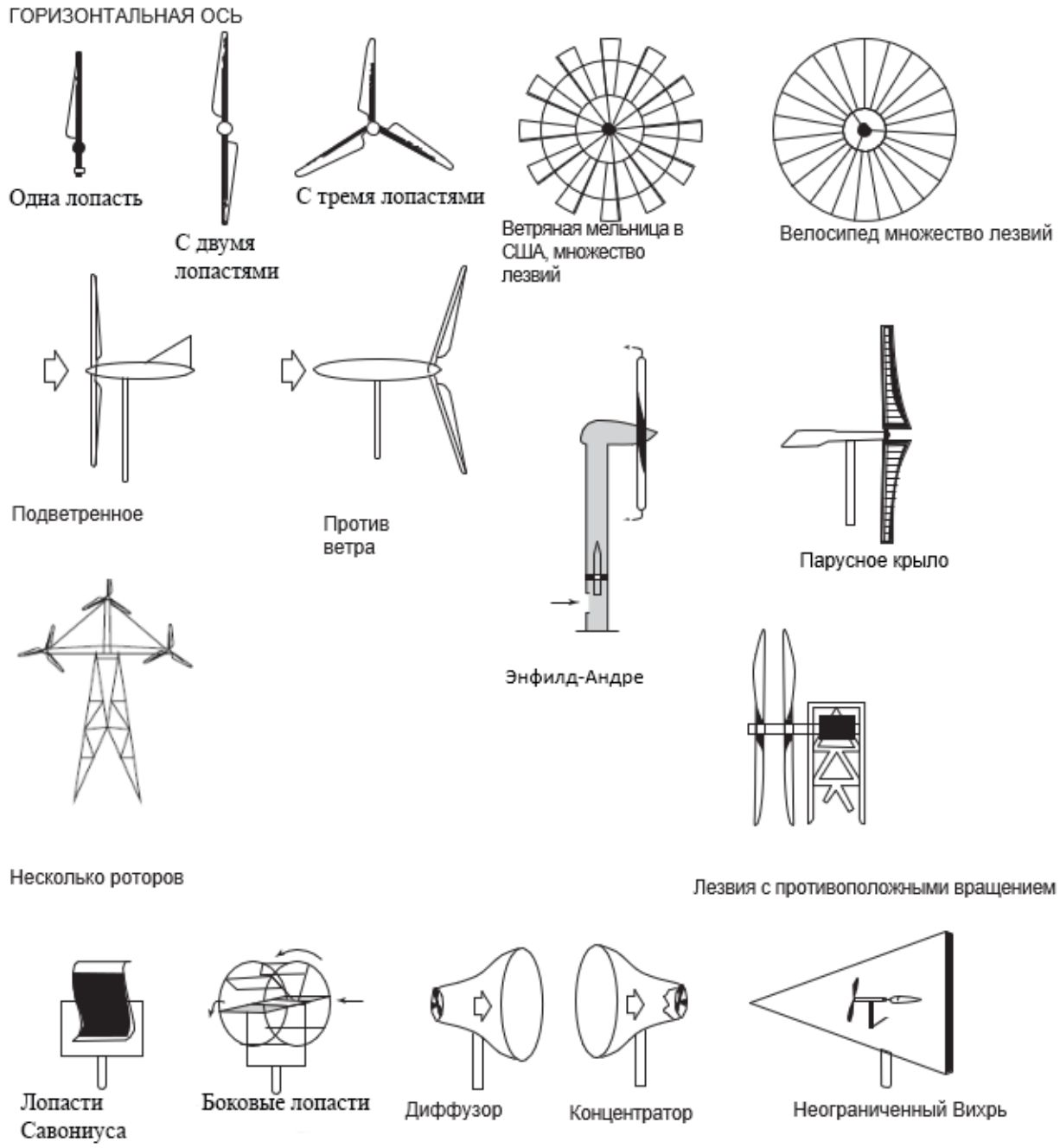


Рис. 4.1 Таксономия ветрогенератора с горизонтальной осью (HAWT). *Источник*: Kreith and West (1997). Воспроизведено с разрешения Тейлора и Фрэнсиса.

4.2 Основополагающие концепции

В качестве вступления к обсуждению работы ветровых турбин, необходимо рассмотреть некоторые детали компонентов ветровых турбин. Рис. 4.4 представляет собой схему, иллюстрирующую важные части типичного HAWT.

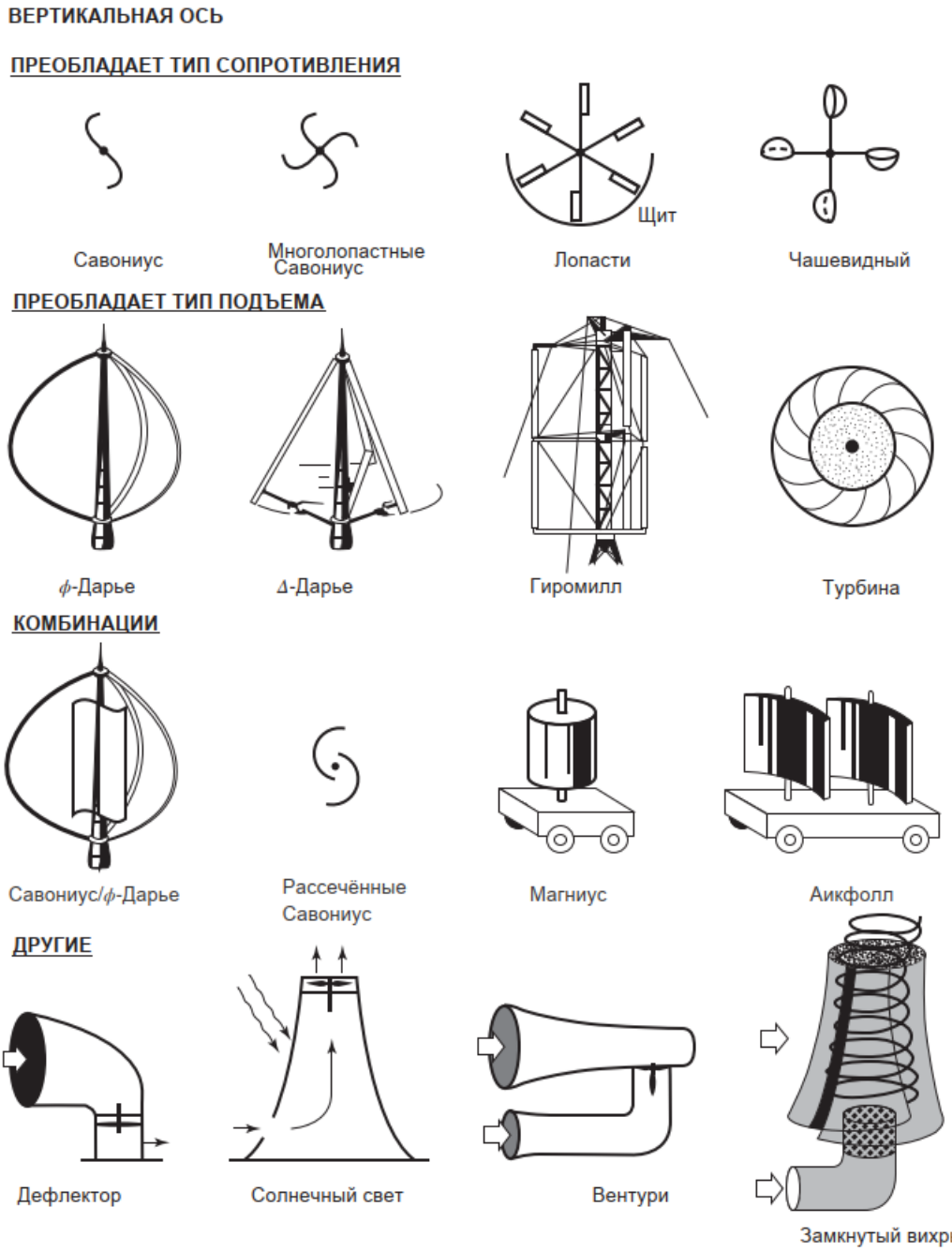


Рис. 4.2 Таксономия ветрогенератора с вертикальной осью (VAWT). *Источник*: Kreith and West (1997). Воспроизведено с разрешения Тейлора и Фрэнсиса.

Башня установлена на основании, а на вершине башни находится гондола ветровой турбины, которая содержит коробку передач, органы управления и подсистемы генератора. Ротор прикреплен к коробке передач и генератору с помощью вала. Указывается диаметр ротора и площадь охвата лопастей, а также высота ступицы.

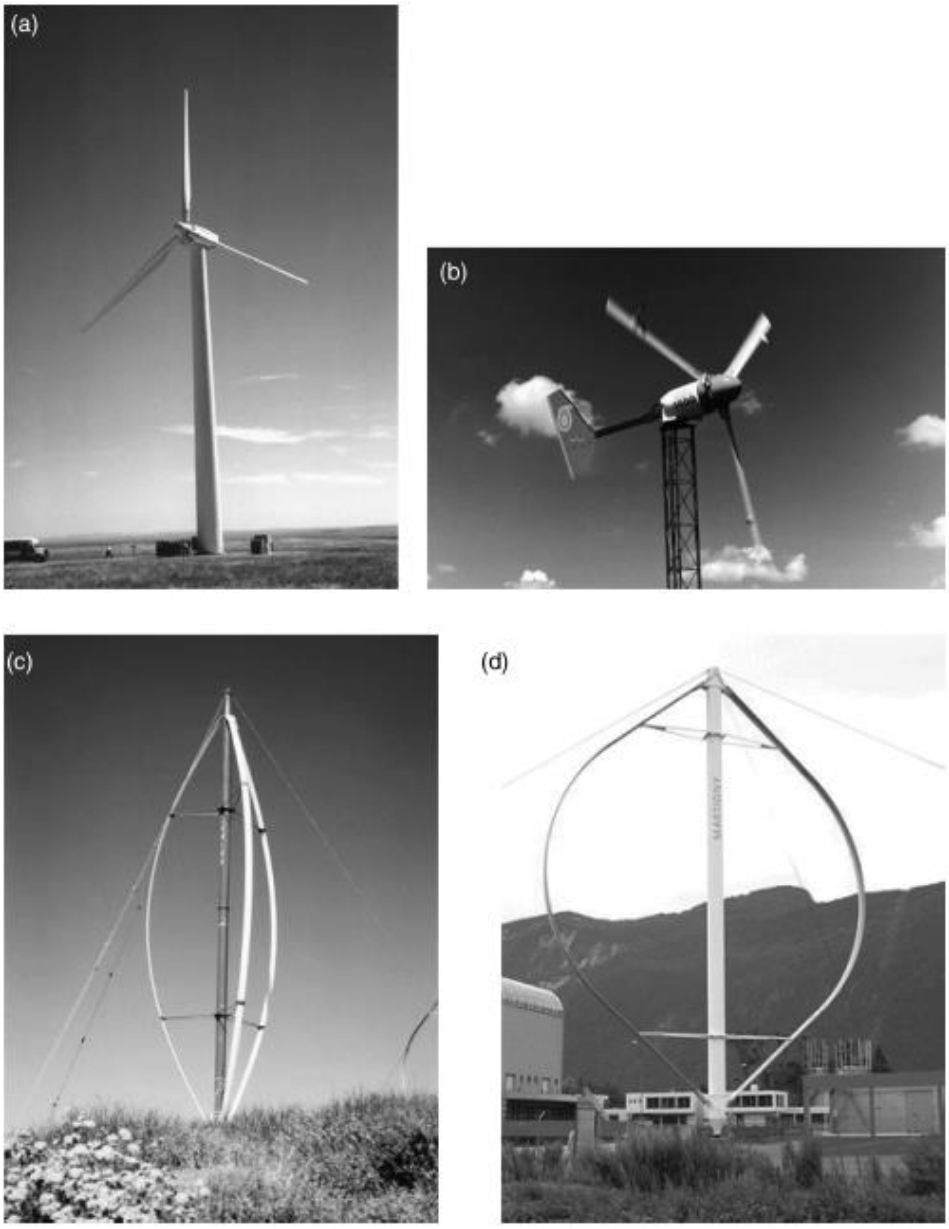


Рис. 4.3 Примеры ветровых турбин.(a) HAWT(600 кВт Митсубиши);(b) HAWT (1.5кВт Бергей); (c)VAWT (FloWindCorporation17EHD);(d)Ветровая турбина Мартинье. *Источник*: NREL.

Доступная мощность скорости ветра *V*с массой скоростью потока $\dot{m}$, охватывая область *A*, является

$$\text{Мощность} = \frac{1}{2}\dot{m}V^2 \tag{4.1}$$

Но, масса скорости потока равна $\dot{m}=\rho AV$, поэтому доступная мощность становится

$$\text{Мощность} = \frac{1}{2}\rho AV^3 \tag{4.2}$$

Уравнение 4.2 очень важно, так как оно показывает, что мощность, получаемая от ветра, пропорциональна площади, охватываемой ветровой турбиной и кубу скорости ветра.

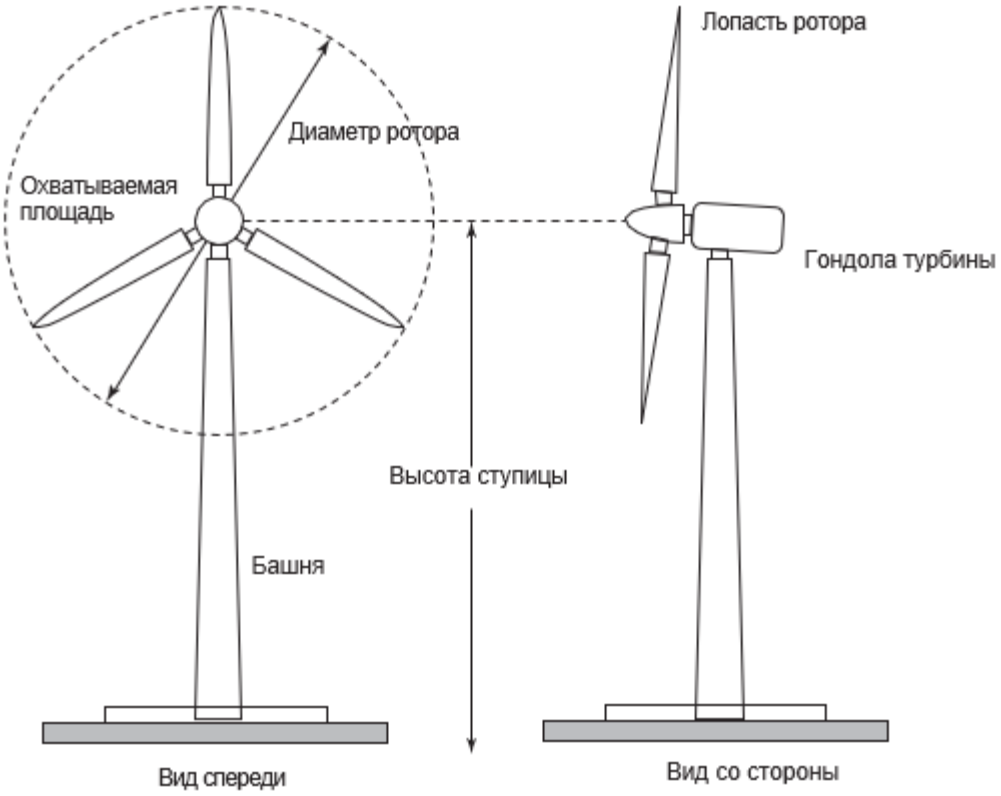


Рис. 4.4 Схема и названия HAWT.

При соотношении кубической располагаемой мощности, неудивительно, что идеальным местом для ветровых турбин является то место, где доступна высокая скорость ветра. Информация о ветровых ресурсах будет рассмотрена в Разделе 4.3. Наиболее фундаментальный вопрос, относящийся к уравнению 4.2, состоит в том, сколько доступной мощности можно извлечь из ветра. Анализ Бетца – это традиционный подход, используемый для ответа на поставленный вопрос. Анализ Бетца использует подход момента импульса. В теории привода вся передача энергии происходит в плоскости привода, и только преобразование энергии происходит выше и ниже по потоку от привода. Анализ диска привода показан на рис. 4.5. На рисунке изображены три распределения: давление, скорость и поперечное сечение площади охвата. Каждый будет рассмотрен по очереди. Диск привода представлен лопастями в распределениях давления и скорости, и сплошной линией в распределении площади поперечного сечения. Площадь привода – это площадь, охватываемая лопастями, составляет $A = \pi D^2/4$, где D – диаметр ротора. Вверх по потоку от привода, в точке, обозначенной (e), для входа, на рис. 4.5c в данном анализе скорость c – это скорость ветра. На диске привода скорость была уменьшена до $c(1 - a)$, а на выходе, обозначенном (o), скорость равна $c(1 - b)$. Когда скорость уменьшается от c до $c(1 - a)$ – выше по потоку от привода, статическое давление увеличивается от P_e до P_1.

Когда энергия извлекается из потока на электроприводе, давление прерывисто снижается до P_2. Вниз по потоку от электропривода, когда скорость продолжает уменьшаться, давление увеличивается от P_2 до P_o. Дальше вниз по потоку от электропривода, атмосферное давление восстанавливается, так что атмосферное давление $P_o = P_e$. Поскольку скорость уменьшается от входа к выходу, площадь потока поперечного сечения должна увеличиваться. В значении переменных, показанных на рисунке, получаем доступную мощность, и 4.2 приобретает вид:

$$\text{Мощность}_{\text{доступная}} = \frac{1}{2}\rho A c^3$$

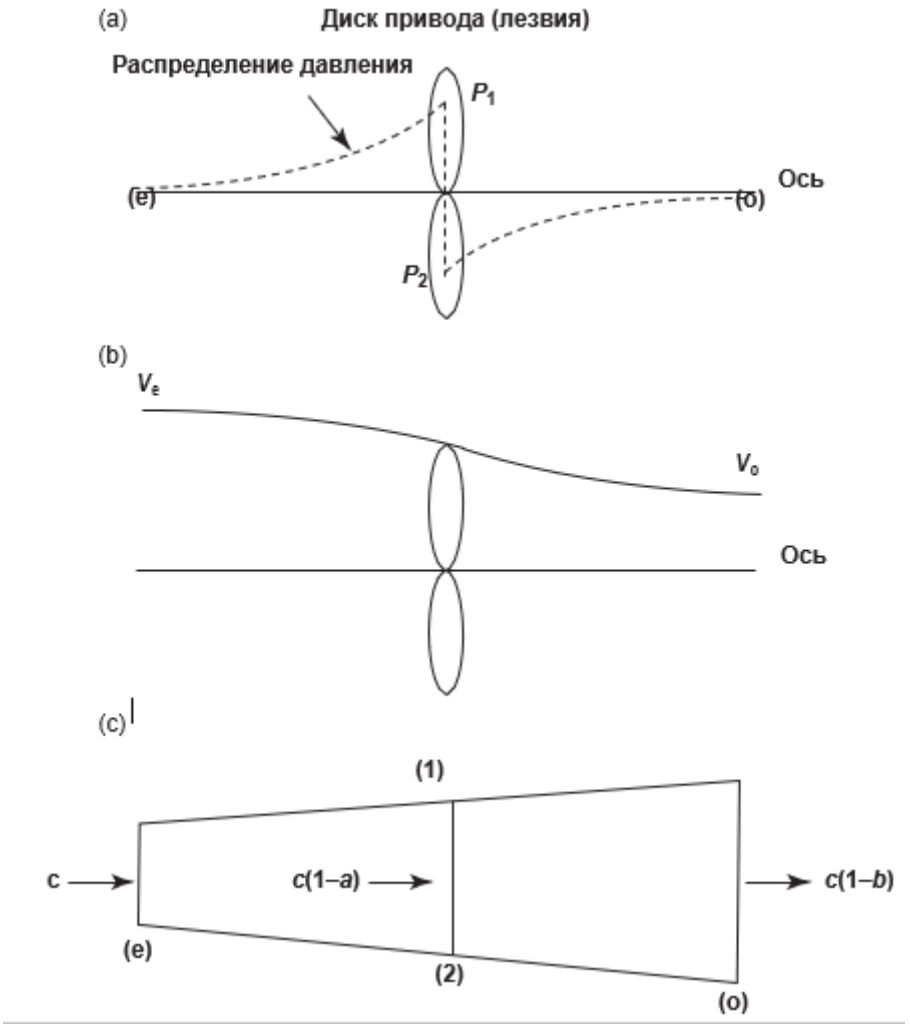


Рис. 4.5 Схема диска привода с распределением давления, скорости и охватываемой площади: (а) распределение статического давления; (б) распределение скорости; (с) распределение площади охвата поперечного сечения.

Выше и ниже по потоку от привода, применяется уравнение несжимаемого потока Бернулли, которое можно записать в виде:

$$P_e + \frac{1}{2}\rho c^2 = P_1 + \frac{1}{2}\rho c^2(1-a)^2$$
$$P_2 + \frac{1}{2}\rho c^2(1-a)^2 = P_o + \frac{1}{2}\rho c^2(1-b)^2 \qquad (4.4)$$

Решение разности давлений дает

$$\frac{P_e - P_1}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-a)^2 - 1\right]$$
$$\frac{P_2 - P_o}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - (1-a)^2\right] \qquad (4.5)$$

Добавляя два вражения и используя $P_e = P_o$, выражение для изменения давления на приводе приобретает вид:

$$\frac{P_2 - P_o + P_e - P_1}{\rho} = \frac{P_2 - P_1}{\rho} = \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - (1-a)^2 + (1-a)^2 - 1\right]$$
$$= \frac{1}{2}c^2\left[(1-b)^2 - 1\right] \qquad (4.6)$$

Разница давлений P_1-P_2 равна:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho c^2\left[1-(1-b)^2\right] \tag{4.7}$$

Осевое усилие на приводе равно:

$$T = (P_1 - P_2)A = \frac{1}{2}\rho A\, c^3\left[1-(1-b)^2\right] \tag{4.8}$$

Но осевая тяга равна изменению осевого импульса:

$$T = \dot{m}[c - c(1-b)] = \rho A\, c(1-a)[c - c(1-b)] = \rho A\, c^2(1-a)b \tag{4.9}$$

Приравнивая уравнения 4.8 и 4.9, получаем итоговое решение:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}\rho A\, c^3\left[1-(1-b)^2\right] = \rho A\, c^2(1-a)b \\ &a = \frac{b}{2} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Уравнение 4.10 демонстрирует, что изменение скорости выше плоскости привода равно изменению скорости ниже плоскости привода. Во многих анализах диска привода, скорость в плоскости привода принимается за среднее значение скорости выше плоскости потока c и скорости нижнего потока $c(1 - b)$ – что является эквивалентным результатом.

Скорость изменения кинетической энергии, выраженная через c и a, равна

$$E_k = \frac{1}{2}\rho A\, c(1-a)\left[c^2 - (1-b)^2\right] = \frac{1}{2}\rho A\, c(1-a)\left[c^2 - (1-2a)^2\right] \tag{4.11}$$

Максимальная скорость изменения кинетической энергии и максимальная выработанная мощность проявятся, когда производная Ek по отношению к a равна нулю, или

$$\begin{aligned} &\frac{dE_k}{da} = 0 = (1)(1-a)^2 + a2(1-a)(-1) \\ &a = \frac{1}{3} \end{aligned} \tag{4.12}$$

Затем, используя a=1/3 в уравнении 4.11, получаем выражение максимальной извлеченной мощности:

$$\text{Мощность}_{\text{макс}} = \frac{8}{27}\rho A c^3 \tag{4.13}$$

Коэффициент мощности определяется как извлеченная мощность, деленная на доступную мощность потока ветра или

$$C\rho = \frac{\text{Мощность}_{\text{извлеч.}}}{\frac{1}{2}\rho A V^3_{\text{ветра}}} \tag{4.14}$$

Максимальное значение коэффициента мощности, предел Бетца, становится

$$C_{P_{\text{макс}}} = \frac{\frac{8}{27}\rho A\, c^3}{\frac{1}{2}\rho A\, c^3} = \frac{16}{27} = 0.5926 \tag{4.15}$$

Предел Бетца представляет максимальное значение коэффициента мощности и определяет максимальную мощность, которая может быть извлечена из данного потока ветра. Коэффициент мощности является, пожалуй, самым важным метрическим показателем, используемым при характеристике ветротурбины. Уравнение 4.14 обычно переписывается, чтобы указать извлеченную мощность в значении коэффициента мощности:

$$\text{Мощность}_{\text{извлеч.}} = \frac{1}{2}Cp\rho A\, V^3_{\text{ветер}} \tag{4.16}$$

Если коэффициент мощности является самой важной метрикой для ветровых турбин, то Рис. 4.6, вероятно, является наиболее упоминаемой фигурой в ветроэнергетической технике. На этом рис. представлен ожидаемый диапазон коэффициентов мощности для хорошо спроектированных ветровых

турбин различной конфигурации. Абсцисса, ось-*x*, представляет собой коэффициент продвижения, который представляет собой скорость наклона ротора, деленную на скорость ветра, или

$$\Omega = \frac{\text{радиус ротора} \cdot \text{темп вращения ротора}}{V_{\text{верта}}} \tag{4.17}$$

Предел Бетца показан на рисунке. Идеальное Ср Глауэрта является результатом более детального анализа, который точно включает в себя коэффициент продвижения. Ниже и справа от идеала Глауэрта находятся ожидаемые значения Ср для различных конфигураций ветровых турбин. Американские многолопастные и голландские ветряные мельницы имеют самые низкие значения Ср. Во многих современных изданиях

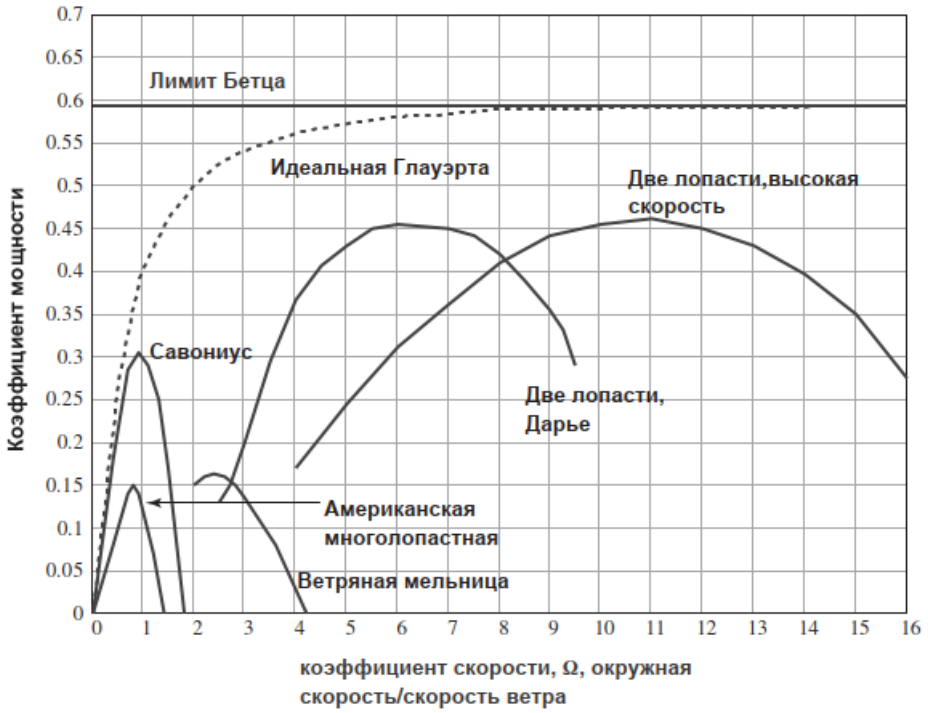


Рис. 4.6 Коэффициент мощности в сравнении с коэффициентом опережения для различных конфигураций ветровых турбин.

метки для Американской многолопастной модели и конфигурации Савониуса были взаимозаменяемыми, в результате чего значения Ср Савониуса были меньше, чем значения для Американской многолопастной модели. Значения, представленные на рис. 4.6, являются правильными. Этот обмен обозначениями конфигураций оказал пагубное влияние на характеристики устройств Савониуса, поскольку подразумевается, что ротор Савониуса не будет столь же эффективным, как Американский многолопастный. Как указывает Джонсон (2001), такая ошибка будет исправляться годами. В дополнение к модели Савониуса и Американскому многолопастному приводятся типичные значения коэффициента мощности для Дарье и современного высокоскоростного двухлопастного HAWT. HAWT показывает относительно высокие значения Ср в довольно широком диапазоне передовых коэффициентов.

Пример 4.1

Ветер со скоростью 27 миль в час при давлении в 14,7 фунт/кв. дюйм и 70°F входит в двухлопастную ветровую турбину диаметром 36 футов. Рассчитайте (a) мощность входящего ветра, (b) теоретическую максимальную мощность, которая может быть извлечена, (c) разумная достижимая мощность, (d) частота вращения ротора в об/мин, необходимая для детали (c), и (e) крутящий момент для детали (c).

Решение: мощность входящего ветра определяется уравнением 4.2.:

$$\text{Мощность} = \frac{1}{2}\rho A V^3$$

Уравнение теплового состояния можно записать следующим образом:

$$P = \rho R T$$

где R – постоянная газа для воздуха. В английских единицах измерения и СИ имеет значение

$$R = 53.35 \frac{\text{фут масса}}{\text{фунт масса } °R} = 287 \frac{\text{Дж}}{\text{Кг} * \text{К}}$$

Абсолютная температура, которая требуется для использования в уравнении состояния:

$$70\ ^\circ\text{F} = (460 + 70)^\circ\text{R} = 530\ ^\circ\text{R}$$

Используя уравнение теплового состояния, получаем плотность:

$$\rho = \frac{P}{RT} = 14.7 \frac{\text{фунт сила}}{\text{дюйм}} * 144\ \frac{\text{дюйм}^2}{\text{фут}^2} * \frac{\text{фунт масса}°R}{53.35\ \text{фут} * \text{фунт сила}} * \frac{1}{530\ °R} = 0.075 \frac{\text{фунт масса}}{\text{фут}^3}$$

Площадь охвата ротором составляет

$$\text{A} = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (36\ \text{фут})^2 = 1018\ \text{фут}^2$$

Таким образом, доступная мощность силы ветра является

$$\text{Мощность}_{\text{доступная}} = \frac{1}{2}\rho A V^3 = \frac{1}{2} * 0.075 \frac{\text{фунт масса}}{\text{фут}^3} * 1018\ \text{фут}^2 \left(27 \frac{\text{миль}}{\text{час}} * \frac{5280\ \text{фут}}{\text{миль}} * \frac{\text{час}}{3600\ \text{с}}\right)^3 =$$

$$= 2.371 \times 10^6 * \frac{\text{фунт масса} * \text{фут}^2}{\text{с}^3} * \frac{\text{фунт сила} * \text{с}^2}{32.174\ \text{фут} * \text{фунт масса}} =$$

$$= 73\ 693\ \frac{\text{фут} * \text{фунт сила}}{\text{с}} * \frac{\text{с} * \text{л. с.}}{550\ \text{фут} * \text{фунт сила}} = 134\ \text{л. с.} = 100\ \text{КВт}$$

Доступная мощность составляет 134 л.с или 100 кВт. Теоретическая максимальная мощность, которая может быть извлечена, является пределом Бетца, или

$$\text{Мощность}_{\text{макс}} = 0.5926 \times \text{Мощность}_{\text{доступ}} = 0.5926 \times 134\ \text{л. с.} = 79.4\ \text{л. с.} = 59.3\ \text{кВт}$$

Для HAWT с двумя лопастями Рис. 4.6 предлагает Ср = 0.45 для передового отношения, Ω = rω/Vветра, из 11. Разумная достижимая мощность от такой ветряной турбины

$$\text{Мощность}_{\text{достиг}} = 0.45 \times 134\ \text{л. с.} = 60.3\ \text{л. с.} = 45\text{кВт}$$

Используя определение коэффициента продвижения, скорость ротора может быть приведена как

$$\omega = \frac{\Omega V_{\text{ветра}}}{0.5D} = 11 \times 39.6 \frac{\text{фут}}{\text{с}} \frac{1}{0.5 \times 36\ \text{фут}} = 24.2 \frac{1}{s} = 24.2\ \text{Гц}$$

$$= 24.2 \frac{1}{\text{с}} \frac{\text{круг} * 60\text{с}}{2\pi * \text{мин}} = 231\ \text{об/мин}$$

Чтобы достичь значения Ср 0.45, необходима скорость 231 об/мин. Через уравнение 2.11 крутящий момент становится:

$$\tau = \frac{\text{Мощность}_{\text{достиг}}}{\omega} = 60.3\ \text{л. с.} \frac{550\ \text{фут} * \text{фунт сила}}{\text{с} * \text{л. с.}} \frac{\text{с}}{24.2} = 1370\ \text{фут} * \text{фунт сила}$$

4.3 Ветровая энергия

В Разделе 4.2 рассматривались характеристики ветровых турбин с точки зрения заданной скорости ветра, и указывалось кубическое соотношение между скоростью и мощностью ветра. Поскольку ветер является переменным с точки зрения скорости, направления и высоты, результаты предыдущего раздела необходимо расширить, чтобы учесть специфические условия ветра для конкретного участка. Обширные данные о ветре доступны на веб-сайте NREL, www.nrel.gov. Основным документом на тему ветровых ресурсов является Атлас Ветроэнергетических Ресурсов США (http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/atlas/). Этот атлас содержит среднегодовые данные о ветровых ресурсах, а также региональные сводки и подробные пояснения и ссылки для статистики ветра. Уникальной особенностью является оценка «достоверности» данных о ветре. Данные о ветре оцениваются от 1 (самая низкая степень) до 4 (самая высокая степень достоверности).

Распределение плотности энергии ветра по США очень полезно для оценки вариантов мест расположения в первичном порядке, чтобы определить, возможен ли сбор энергии ветра. Плотность энергии ветра – это доступная средняя мощность ветра на квадратный метр площади ветровой турбины. Основой классификации распределения являются классы плотности энергии ветра. Плотность энергии ветра измеряется от класса 1 (самый низкий) до класса 7 (самый высокий) и определяется на номинальных высотах 10 м и 50 м. В Таблице 4.1 представлены классы плотности энергии ветра и связанные с ними скорости ветра.

Таблица 4.1 Класс плотности энергии ветра.

Класс энергии ветра	10 м (33 фута)		50 м (164 фута)	
	Плотность энергии ветра (Вт/м²)	Скорость (м/с [ми/ч])	Плотность энергии ветра (Вт/м²))	Скорость (м/с [ми/ч])
1	0	0	0	0
2	100	4.4 [9.8]	200	5.6 [12.5]
3	150	5.1 [11.5]	300	6.4 [14.3]
4	200	5.6 [12.5]	400	7.0 [15.7]
5	250	6.0 [13.4]	500	7.5 [16.8]
6	300	6.4 [14.3]	600	8.0 [17.9]
7	400	7.0 [15.7]	800	8.8 [19.7]
	1000	9.4 [21.1]	2000	11.9 [26.6]

Каждый класс ветра ограничен минимальной плотностью энергии ветра и максимальной плотностью энергии ветра. Скорости ветра в метрах в секунду и милях в час, соответствующие минимальным и максимальным значениям плотности энергии ветра, также указаны в Таблице 4.1. Например, класс 4 определяется как плотность энергии ветра от 200 до 250 Вт/м² или диапазон скорости ветра от 5.6 до 6.0 м/с, на высоте 10 м. На высоте 50 м классы энергии ветра определяются с использованием значений плотности мощности, отличных от высоты 10 м.

Наиболее полезной сводной иллюстрацией из Атласа Ветроэнергетических Ресурсов США является среднегодовое распределение плотности ветровой энергии, которое показано на рис. 4.7a. На этом рис., чем темнее цвет, тем выше класс ветра. Большая часть Среднего Запада США оценивается как класс ветра 3 или 4 с изолированными участками горного запада, содержащими интегрированные области класса 5 или 6. За исключением районов вблизи побережья, юго-восточный регион, как правило, не подходит для производства ветровой энергии. NREL заявляет, что ветровая энергия подходит только для класса ветра 3 и выше. Обновленные данные, полученные от NREL, представлены на рис. 4.7 b: средняя годовая скорость ветра на высоте 80 м. Рис. 4.7 b, более полезен из двух предложенных, поскольку демонстрирует, что район Среднего Запада США является главным местом для высоких скоростей ветра на высоте 80 м. Это является хорошей высотой для больших ветровых турбин.

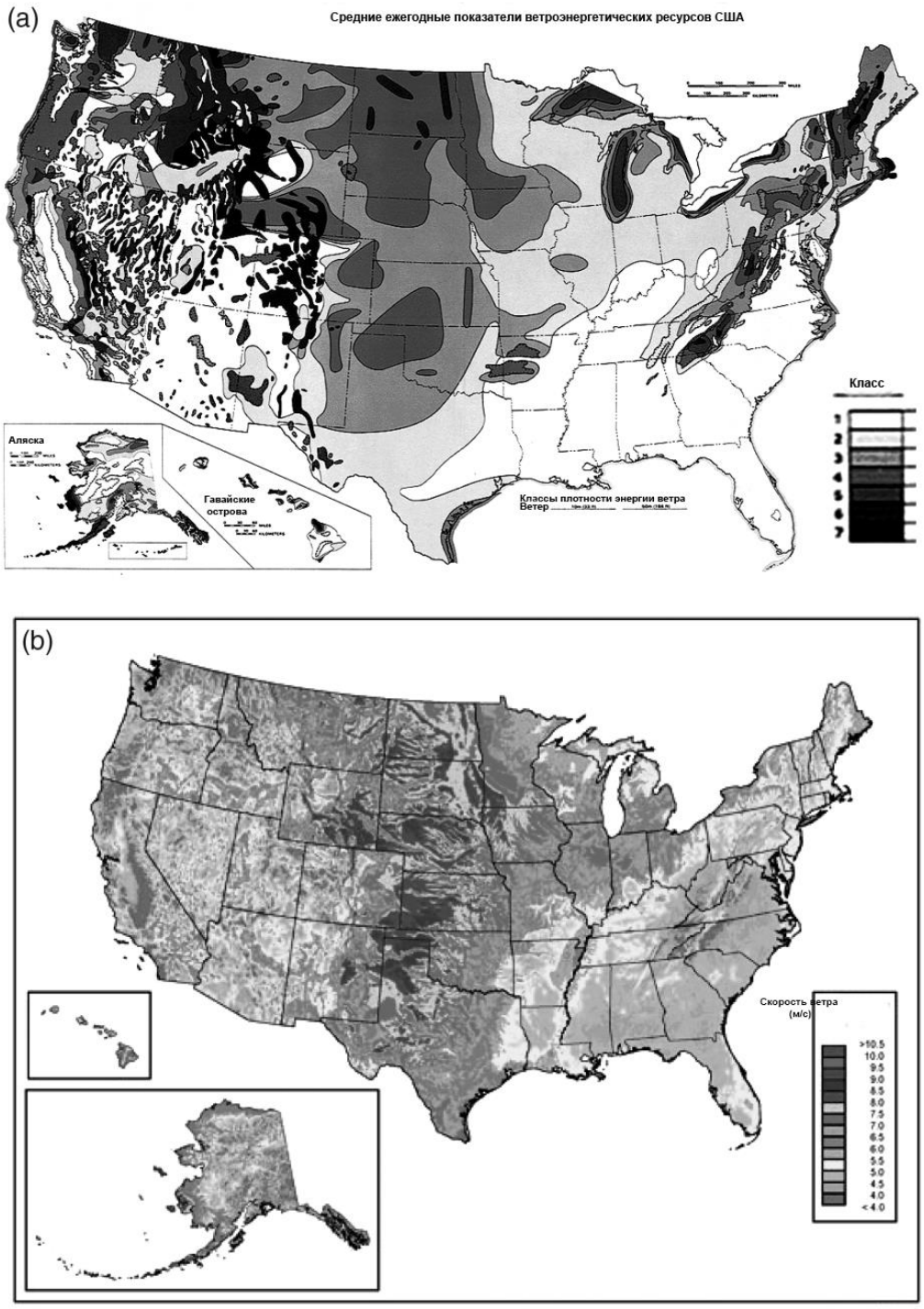


Рис. 4.7 Средние ежегодные показатели ветроэнергетических ресурсов США (a) Плотность мощности ветрового потока (b) скорость ветра на высоте 80 м. Источник: NREL.

Плотность энергии ветра, как показано на рис. 4.7, учитывает ежегодное изменение скорости ветра в определенных местах. Чтобы понять основы развития информации, такой как содержится в Рис. 4.7, необходимо изучить статистику энергии ветра.

Вероятность возникновения заданной скорости ветра v выражается распределением Вейбулла:

$$h(v,k,c) = \frac{k}{c}\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \text{ эксп}\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^{k}\right] \qquad (4.18)$$

В распределении Вейбулла c - параметр масштаба, а k - параметр формы. Параметр формы управляет формой распределения; чем больше коэффициент формы, тем ближе распределение становится Гауссовским. Параметр масштаба контролирует значение режима (наиболее вероятная скорость). Чем больше параметр масштаба, тем выше режим и меньше вероятность того, что данная скорость меньше чем значение режима. Параметр формы является безразмерным, а параметр масштаба должен иметь те же единицы измерения, что и скорость. Для распределения ветра значение параметра формы обычно составляет около 2 (Патель, 2005).

На рис. 4.8 представлено распределение вероятностей, выраженное в процентах, для параметров формы 1, 2 и 3 для постоянного значения c = 10 миль/час Параметр формы, равный 1, дает экспоненциальное распределение, которое имеет наибольший процент часов при нулевой скорости, а параметр формы, равный 2, с большей долей вероятности приведет к искажению распределения на более низких скоростях. Параметр формы 3 дает более симметричное распределение и начинает напоминать Гауссово. Коэффициент формы k = 2 обеспечивает в целом приемлемое соответствие для распределения скорости ветра в большинстве мест.

На рис. 4.9 показано распределение вероятностей, выраженное в часах в год на миль в час, для значений параметров шкалы 10, 15 и 20 миль в час при постоянном значении k = 2. Чем меньше значение параметра шкалы, тем больше часов при более низких скоростях ветра. При увеличении значения c, значения скорости ветра в форме увеличиваются, а количество часов в году при скоростях ветра, превышающих режим, увеличивается.

Рисунки 4.8 и 4.9 дают визуальную интерпретацию поведения распределения Вейбулла. Рис. 4.10 был создан на основании данных о ветре и показывает наложение распределения Вейбулла для k = 2. Хотя это и не точное совпадение, результаты действительно показывают, что распределение Вейбулла разумно, особенно если учесть, что фактическое содержание энергии для низких скоростей ветра (<2 м/с) мало и незначительно способствует выработке электроэнергии. Это рассматривается в примерах 4.2 и 4.3.

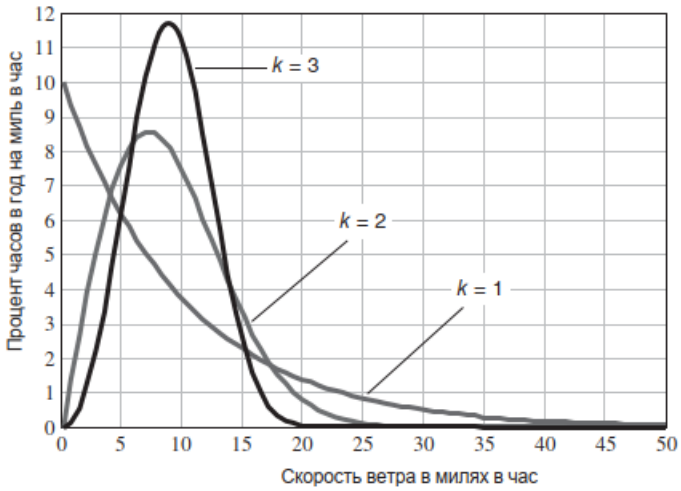


Рис **4.8** Распределение Вейбулла для значений c = 10 миль в час и различных значений k.

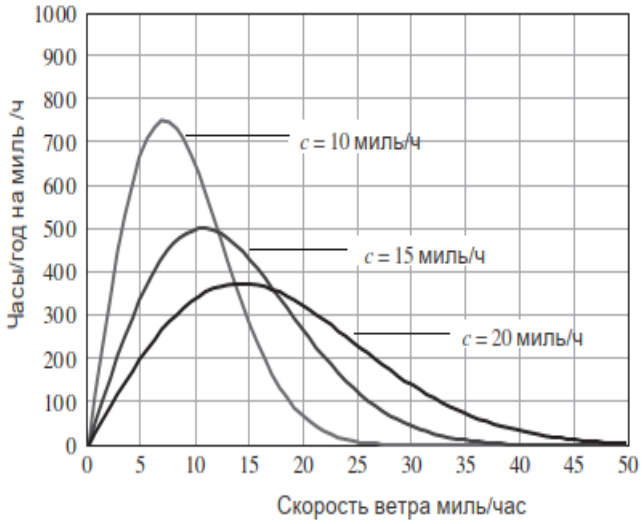


Рис.4.9 Распределение Вейбулла для различных значений *c* и *k* =2.

Однако реальный вопрос заключается в том, как распределение Вейбулла связано с оценкой показателей энергии ветра. Скорость режима является наиболее вероятной скоростью в распределении. Средняя скорость определяется как

$$V_{\text{сред}} = \int_0^\infty h(v,k,c)vdv \qquad .19)$$

Поскольку мощность ветра пропорциональна кубу скорости ветра, средняя плотность мощности, доступная для сбора в течение года на единицу площади охвата, составляет

$$\text{Мощность}_{\text{доступ}} = \int_0^\infty \frac{1}{2} ph(v,k,c)v^3 dv \qquad (4.20)$$

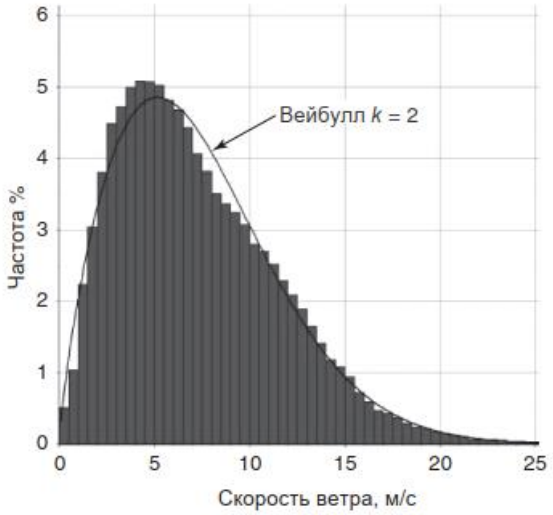


Рис. 4.10 Данные о скорости ветра и распределение *k* =2.
Источник: http://projects-web.engr.colostate.edu/ALP/ALP_78_Walsenburg_South.htm.
Воспроизведено с разрешения Колорадского государственного университета.

Таким образом, скорость, представляющая важность для ветровой энергии, представляет собой среднекубическая скорость (rmc).

$$V_{\text{rmc}} = \sqrt[3]{\int_0^\infty h(v,k,c)v^3 \, dv} \qquad (4.21)$$

и среднегодовая доступная плотность мощности становится

$$\text{Мощность}_{\text{доступ}} = \frac{1}{2}\rho V_{\text{rmc}}^3 \tag{4.22}$$

Исходя из результатов рис. 4.6, разумное значение коэффициента мощности для современной, хорошо спроектированной ветровой турбины составляет 0,5. Среднегодовая плотность извлечения мощности может быть приведена как

$$\text{Мощность}_{\text{эксп}} = \frac{1}{4}\rho V_{\text{rmc}}^3 \tag{4.23}$$

Общая энергия, которая может извлекаться за год (8760 ч/год) для данного распределения, является интегралом уравнения 4.23 для каждой скорости по всем возможным скоростям, или

$$\text{Энергия} = 0.25\rho \int_0^\infty h(v,k,c) \times 8760 v^3 \, dv \tag{4.24}$$

Лучший способ усвоить вышесказанное – это решить пример.

Пример 4.2

Найдите $V_{\text{режим}}$, $V_{\text{сред}}$, $V_{\text{среднекубическая}}$, доступное распределение плотности мощности и мощность, извлеченную на квадратный метр для ветровой турбины в месте, где имеется распределение ветра Вейбулла, где c = 9 м/с и k = 2.0. Плотность составляет 1.225 кг/м³. Выбор c = 9 м/с согласуется с местами, благоприятными для энергии ветра на рис. 4.7b.

Решение: графическое представление распределения Вейбулла для k = 2.0 и c = 9 м/с представлено на рис. 4.11.

Режим – наиболее вероятная скорость ветра, происходит при 6.36 м/с. Средняя скорость ветра и скорость rmc определены в уравнениях 4.19 и 4.21 соответственно. Арифметика для этого примера выполняется в Mathcad, а таблица Mathcad воспроизводится на рис. 4.12.

В начале рабочего листа, миль в час и кВт определяются в переменных Mathcad и указывается плотность (указанная в постановке задачи). Функции определены для распределения Вейбулла как *h (v,k,c)* и плотность мощности PowerDen (*V*). Параметры формы и масштаба из постановки задачи вставляются в таблицу.

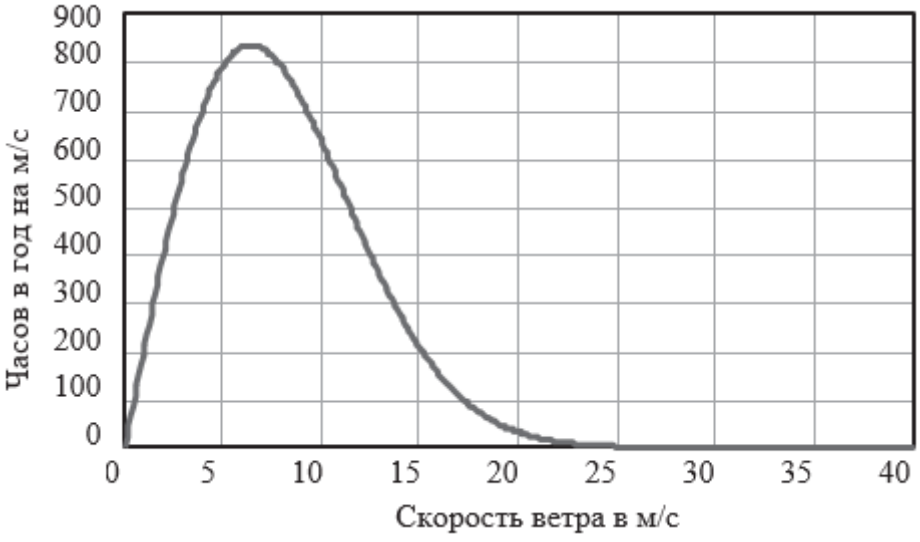


Рис. 4.11. Распределение Вейбулла для k = 2: 0 и c = 9 м/с.

$\rho := -1.225 \frac{кг}{м^3}$ определите плотность $миль/час := \frac{миль}{ч}$ определите миль/час

кВт :=1000 ватт определите кВт

$$c := 9 \cdot \frac{м}{сек} \qquad k := 2.0$$

укажите значения параметра масштаба и параметра формы

$$h(v,k,c) := \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

определение функции распределения Вейбулла

$$\text{Плотность мощности}(V) := 0.5 \cdot \rho \cdot V^3$$

определение плотности мощности

Общий график распределения по заданным параметрам:

Найдите $V_{режим}$.

$$vm := 10 \cdot \frac{м}{с}$$

Дано

$$\frac{d}{dvm}\left[\frac{k}{c} \cdot \left(\frac{vm}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{vm}{c}\right)^k}\right] = 0$$

$V_{режим}$ = Найти (vm)

$V_{режим} = 6.364 \frac{м}{с}$ Плотность мощности $(V_{режим}) = 157.866 \frac{Ват}{2}$

$$V_{сред} := \int_{0 \cdot \frac{м}{сек}}^{\infty \cdot \frac{м}{сек}} \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \cdot v \, dv \qquad V_{сред} = 7.976 \frac{m}{sec} \qquad \text{Плотность мощности}\left(V_{сред}\right) = 310.791 \frac{Ват}{2}$$

$$V_{рмс} := \sqrt[3]{\int_{0 \cdot \frac{м}{сек}}^{\infty \cdot \frac{м}{сек}} \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \cdot v^3 \, dv} \qquad V_{rmc} = 9.896 \frac{m}{sec} \qquad \text{Плотность мощности}\left(V_{rmc}\right) = 593.567 \frac{Ват}{2}$$

$$\text{Мощность}(v) := 0.5 \cdot \rho \cdot h(v,k,c) \cdot v^3$$

$$\text{Мощность Ср}(v) := 0.25 \cdot \rho \cdot h(v,k,c) \cdot v^3$$

доступная плотность мощности с Ср = 1.0.

доступная плотность мощности с Ср = 0.5.

$$= \int_{0 \cdot \frac{м}{сек}}^{100 \cdot \frac{м}{сек}} 0.25 \cdot \rho \cdot \left[\frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right] \cdot 8760 \frac{ч}{г} \cdot v^3 \, dv$$

$$\text{Энергия} = 2.6 \times 10^3 кВт * \frac{ч}{год * м^2}$$

Рис. 4.12 Решение в программе Mathcad (пример 4.2).

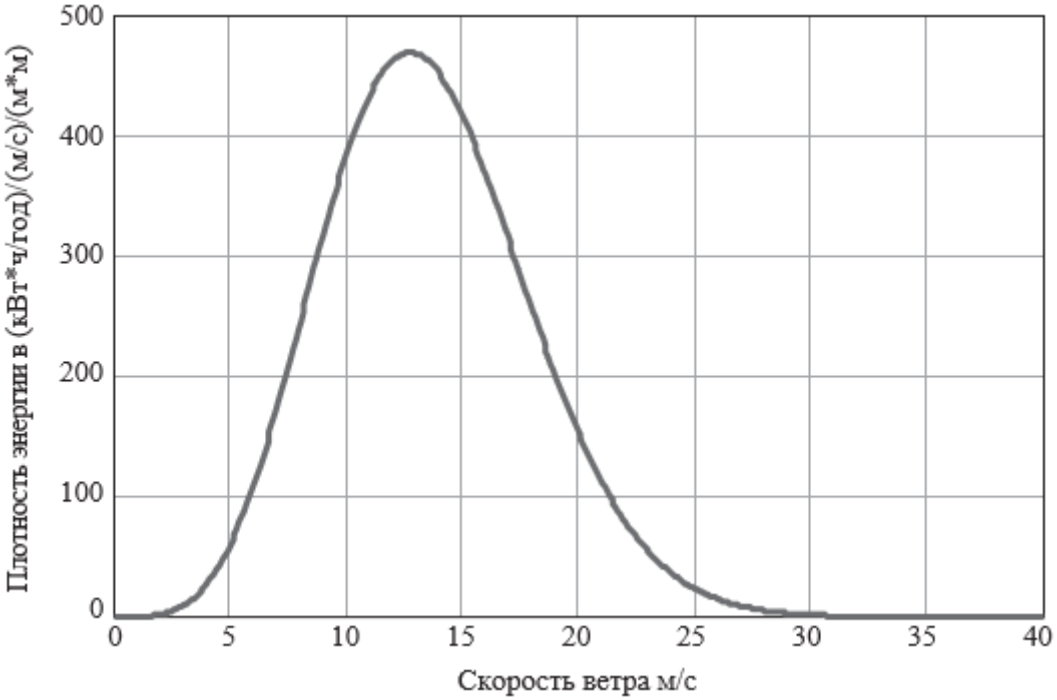


Рис.4.13 Годовое распределение доступной энергии для Примера 4.2.

Скорость режима составляет 6.36 м/с, а плотность мощности рассчитывается как 158 Вт/м². Средняя скорость рассчитывается по уравнению 4.19 и составляет 7.98 м/с при плотности мощности 311 Вт/м². Это значение соответствует тому, что можно ожидать от места, подходящего для извлечения энергии ветра; см. рис. 4.7 b. Среднекубическая скорость составляет 9.90 м/с (полученная через уравнение 4.21), а плотность мощности на средней скорости вращения ротора – 594 Вт/м². Использование Mathcad и его способность переносить единицы в вычислениях упрощает арифметику в этом примере. Поскольку кубическая мощность скорости ветра указывается в выражении средней плотности мощности, чтобы различать режимные, средние и среднекубические скорости необходимо проявить внимательность, так как плотность мощности проявляет значительные изменения в зависимости от того, какое значение используется.

Плотность энергии, доступная для сбора в течение года на единицу площади ветровой турбины, определяется в уравнении 4.24, поскольку $h(v,k,c)\times 8760$ представляет количество часов в год при заданной скорости ветра из распределения. На рис. 4.13 представлена плотность энергии в год на квадратный метр на метр в секунду для распределения скорости ветра, указанного в постановке задачи. Режим для годовой доступной плотности энергии составляет около 13 м/с. Хотя количество часов в году при скорости 13 м/с незначительно (при отклонении от стандартного режима, как показано на рис. 4.11), произведение этой скорости ветра и часов в год является максимальным для распределения из-за кубической функциональной зависимости от скорости ветра.

Годовая оценка количества энергии, выработанной для Ср = 0.5 для данного распределения скорости ветра выражается в уравнении 4.24. При условии, что Ср = 0.5, годовая энергия, извлеченная для этого распределения, составляет 2600 кВт-ч/(год/м²).

В разделе 4.2 описаны рабочие характеристики ветровых турбин на указанных скоростях. В этом разделе обозначено описание распределения скорости ветра и статистика распределения скорости ветра. Раздел 4.4 содержит обобщенную информацию из Разделов 4.2 и 4.3 и рассматривает работу с ветровыми турбинами и управление ими как функцию скорости ветра.

4.4 Работа ветровых турбин

Какой должна быть стратегия работы ветровой турбины в зависимости от скорости ветра? Ответ заключается в том, что ветровая турбина не должна постоянно эксплуатироваться с максимальным коэффициентом мощности (Cp). Почему бы не эксплуатировать ветровую турбину на максимальной Cp? Работа на максимальном Cp для всех скоростей ветра максимизирует произведенную энергию, но такие факторы, как мощность генератора, конструктивные требования и безопасность, препятствуют работе. Максимальный диапазон скоростей будет достигнут только в течение нескольких часов для данного распределения скорости ветра. Таким образом, попытка определения размера генератора для преобразования ветрового потока в энергию, соответствующего диапазону максимальной скорости, привела бы к генератору с завышенной мощностью, который работал бы с максимальной мощностью только несколько часов в год. И если был указан максимальный Cp, коэффициент продвижения Ω должен был бы поддерживаться постоянно. По мере увеличения скорости ветра частота вращения ротора должна увеличиваться, чтобы поддерживать постоянный Cp. Поскольку радиальные напряжения в роторе пропорциональны скорости вращения, для работы при высоких скоростях ветра и постоянном Ω потребуется ветровая турбина прочной конструкции. Кроме того, по мере увеличения скорости ветра, вопросы безопасности и прочности конструкции становятся все более важными.

Но независимо от того, какая стратегия эксплуатации используется, ветровая турбина должна содержать контроллер для реализации стратегических и механических элементов для реагирования на контроллер. Рис. 4.14 с веб-сайта NREL графически иллюстрирует типичные функции HAWT. В разрезе гондолы показаны коробка передач и генератор, а также другие элементы, необходимые для работы. Также показаны лопатки и башня. Двигатель рыскания и привод рыскания используются для удержания плоскости лопасти, ориентированной на ветер. Механизм наклона лопастей регулирует угол лопастей (тангаж) относительно направления ветра, чтобы контролировать мощность, извлекаемую из ветра. Цель тормоза - замедлить или полностью остановить ротор. Все эти элементы необходимы для реализации стратегии управления.

Конечной целью стратегии управления ветровыми турбинами является регулирование выходной мощности турбины в зависимости от скорости и направления ветра. Кроме того, протокол управления должен обеспечивать безопасную работу при любых условиях ветра. Патель (2005) предполагает, что выходная мощность в зависимости от скорости ветра, характерная для ветровой турбины, может рассматриваться как состоящая из нескольких областей. Рис. 4.15, адаптированный из Патель (2005), иллюстрирует типичную выходную мощность в зависимости от скорости ветра и показывает различные режимы работы и условия. Переменная ордината – это процент от выходной мощности генератора.

Первым условием является скорость включения системы. Если скорость ветра незначительная, система КПД компонентов настолько низкая, что запускать систему не стоит. Как только скорость включения достигнута, система работает в области постоянного Cp.

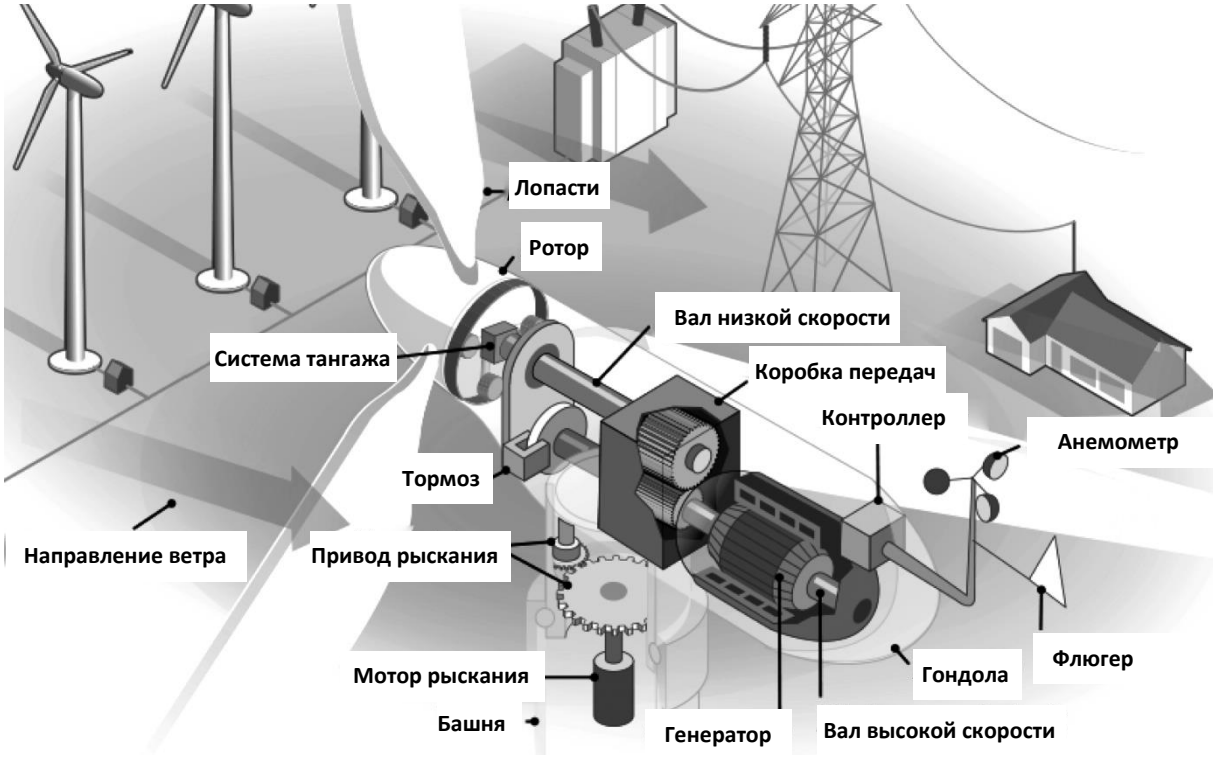


Рис. 4.14 Компоненты гондолы HAWT и функции.
Источник: http://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0 (NREL).



Рис. 4.15 Типичные режимы контроля скорости турбины.

В области постоянного Ср, турбина извлекает максимальную мощность из ветра, но извлекаемая мощность не превышает номинальной входной мощности генератора. Скорость ротора варьируется, так что передаточное число поддерживается около максимального значения Ср. Когда скорость ветра достаточно высока, мощность, извлекаемая ротором, может превышать номинальную мощность генератора. В этом режиме, режиме с постоянной выходной мощностью, система рассчитана на номинальную выходную мощность генератора путем работы турбины на Ср ниже максимальной Ср. Скорость отключения – это скорость ветра, превышение которой приведет к повреждению системы. Для скорости, превышающей отключение, тангаж ротора устанавливается для разгрузки ротора, и ротор блокируется тормозом. Общая энергия, которая может быть извлечена из заданного распределения ветра, уменьшается за счет номинальной входной мощности генератора и скоростей включения и выключения. Пример 4.2 будет расширен для иллюстрации этих эффектов.

Пример 4.3

Система, описанная примером 4.2, имеет скорость включения 5 м/с, скорость выключения составляет 35 м/с и номинальную мощность генератора 0.8 кВт/м². Коэффициент максимальной мощности Ср составляет 0.45. Определите и нанесите на график следующее: для системы без элементов управления, и для системы с элементами управления, чтобы соответствовать ограничениям: (a) плотность мощности системы, (b) требуемый Ср в зависимости от скорости ветра, (c) извлечение энергии и (d) общая энергия, извлеченная системой.

Решение: большая часть информации, запрошенной для части «без элементов управления» этой задачи, была выполнена в примере 4.2. Однако, поскольку результаты являются более значимыми, если сравнивать как «без элементов управления», так и с «элементами управления», оба будут рассмотрены в решении. Mathcad будет использоваться для всех расчетов. Таблица Mathcad для решения этой задачи приведена на рис. 4.16.

Условия и ограничения, определенные в постановке задачи, вводятся в таблицу. Диапазон скорости ветра обозначается переменной диапазона Mathcad v= 0, 0.1, …., 40 м/с. Эта переменная диапазона указывает, что скорость v должна составлять от 0 до 40 м/с. Каждый раз, когда указывается v, все значения в диапазоне включаются автоматически. Функция плотности мощности для указанного диапазона скорости

$$\text{Плотность мощности}(v) = 0.5 Cp_{ном} \rho v^3 \tag{4.25}$$

$$v := 0 \cdot \frac{м}{сек}, 0.1 \cdot \frac{м}{сек} \cdot 40 \cdot \frac{м}{сек}$$

$Cp_{nom} := 0.45$ Коэффициент мощности Входящая мощность$_{макс} := 0.80 \cdot \frac{кВт}{м^2}$ Ввод генератора

$V_{вкл} := 5 \cdot \frac{м}{сек}$ Скорость ветра, при которой включается генератор

$V_{откл} := 35 \cdot \frac{м}{сек}$Скорость ветра, при которой отключается генератор

$$\text{Плотность мощности}(v) = 0.5 Cp_{ном} \rho v^3$$

Доступная площадь мощности с указанным Ср

$$\text{Плотность мощности}(v) := \begin{cases} 0 \cdot \frac{кВт}{2} & \text{if } v < V_{включение} \\ \text{Мощность вкл макс} & \text{if Плотность мощности}(v) > \text{Мощность вкл макс} \\ 0 \cdot \frac{кВт}{2} & \text{if } v > V \\ \text{иначе} \end{cases}$$

Кусочно-гладкая функция, определенная для реализации ограничений на включение, отключение и номинальную мощность

$$CpV(v) := \frac{\text{Плотность мощности}(v) \cdot Cp_{номинальная}}{\text{Плотность мощности}(v)}$$

Коэффициент мощности как функция скорости.

$$\text{Энергия}(v) := \text{Плотность мощности}(v)\, h(v,k,c)\cdot 8760_{\text{г}}$$

Доступная плотность энергии с номинальным Ср.

$$\text{энергия с элементами управления}(v) := \text{плотность мощности}(v)\cdot h(v,k,c)\cdot 8760\cdot \text{г}$$

Плотность энергии с элементами управления.

$$\text{энергия с элементами управления} := \int_{0\cdot\frac{\text{м}}{\text{сек}}}^{1000\cdot\frac{\text{м}}{\text{сек}}} \text{энергия с элементами управления}(v)\cdot\frac{1}{\text{г}}\,dv$$

$$\text{энергия с элементами управления} = 1.912\times 10^{3}\,\text{кВт}\,\frac{\text{hr}}{\text{г м}^2}$$

Извлеченная энергия в год на м² для системы с элементами управления

$$\text{энергия макс} := \int_{0\cdot\frac{\text{м}}{\text{сек}}}^{1000\cdot\frac{\text{м}}{\text{сек}}} \text{энергия}(v)\cdot\frac{1}{\text{г}}\,dv$$

$$\text{Энергия}_{\text{макс}} = 2.34\times 10^{3}\,\text{кВт}\,\frac{\text{hr}}{\text{г м}^2}$$

Извлеченная энергия в год на м² для системы без элементов управления

$$\text{Коэффициент захвата} := \frac{\text{ЭнергияУправ}}{\text{Энергия}_{\text{макс}}} \qquad \text{Коэффициент захвата} = 0.817$$

Рис. 4.16 Таблица Mathcad (пример 4.3).

Функция PowerDenCon(*v*) представляет собой кусочно-гладкую функцию в Mathcad, которая рассчитывает плотность мощности в зависимости от скорости включения, скорости отключения и номинальной входной мощности генератора. В первой строке для скорости ветра, не превышающую скорость, при которой начинает работать ветровой двигатель устанавливается плотность мощности равная нулю; во второй строке ограничивается количество выработанной мощности, во избежание превышения мощности генератора. В третье строке ограничивается скорость, при которой отключается ветровой двигатель, а последняя строка обеспечивает результаты в режиме постоянной Ср. На рис. 4.17 представлены плотности мощности для контролируемых (ограниченных) и неконтролируемых условий. Коэффициент мощности Ср как функция скорости может быть выражен как

$$Cp(v) = \frac{\text{плотность мощности}(v)}{\text{плотность мощности}(v)} \times Cp_{\text{номинальная}} \qquad (4.26)$$

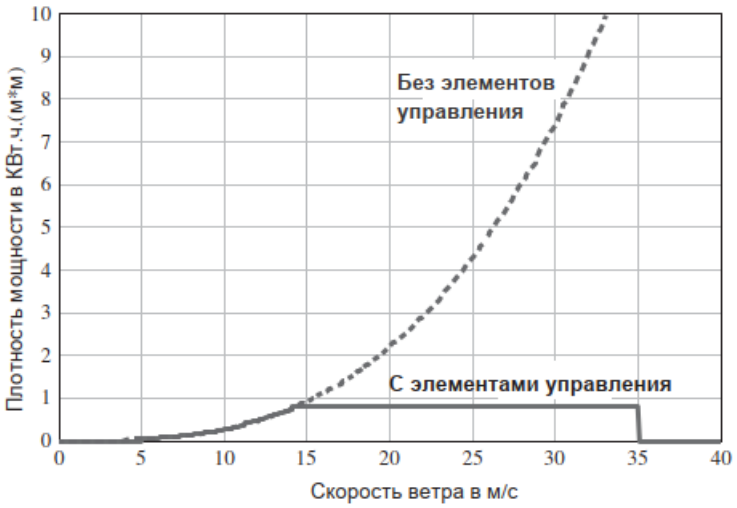


Рис. 4.17 Плотность мощности как функция скорости ветра и ограничений.

и графически проиллюстрирован на рис. 4.18. Ср равен нулю до тех пор, пока не будет достигнута скорость включения, и равен нулю для скорости, превышающей скорость отключения. Режим постоянного Ср присутствует, как и режим переменного Ср.

Плотности мощности, умноженные на распределение вероятности скорости ветра *h(v,k,c)* и количество часов в году, 8760, дает плотность энергии. Рис. 4.19 представляет плотность энергии для контролируемых и неконтролируемых условий. Данный рисунок наглядно демонстрирует решение. Также наглядно представлены эффекты скорости отключения и ограничения на входе генератора. Поскольку области под кривой представляют собой общую извлеченную энергию, эффекты ограничений управления очевидны, особенно при более высоких скоростях ветра.

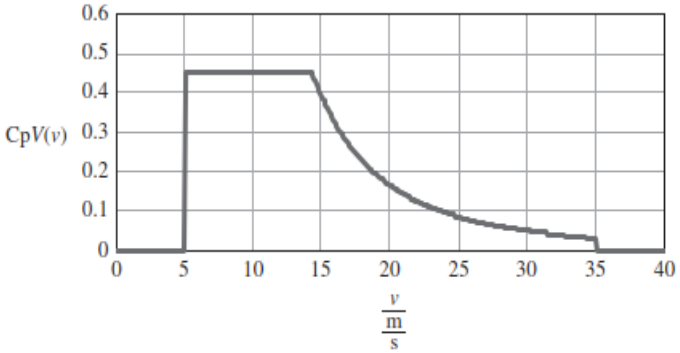


Рис. 4.18 Ср как функция скорости ветра.

Плотности энергии, интегрированные по всем скоростям, дают общую извлеченную энергию. При отсутствии контроля общее количество выработанной энергии составляет 2340 кВт-ч/(год/м²) (немного отличается от результата в примере 4.2, поскольку Ср для Примера 4.3 составляет 0.45). Количество фактически произведенной энергии соответствует случаю с наличием контроля и составляет 1912 кВт-ч/(год/м²). Коэффициент захвата определяется как отношение фактически произведенной энергии, деленное на максимально возможное количество произведенной энергии (без элементов контроля) для данного распределения скорости ветра. Для условий этой задачи коэффициент захвата составляет 0.817; то есть 82% доступной энергии может быть извлечено. Единственные способы значительно изменить коэффициент захвата – это увеличить номинальную входную мощность генератора и увеличить скорость выключения.

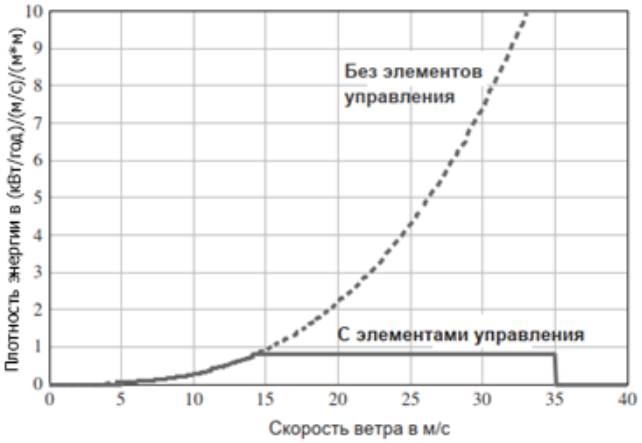


Рис. 4.19 Плотность энергии как функция скорости ветра.

Для заявленных условий этого примера, ни одна из этих стратегий для увеличения коэффициента захвата не подходит. Увеличение номинальной входной мощности будет более дорогим и будет означать, что генератор должен работать больше, при этом номинальная входная мощность будет ниже. Например, удвоение номинальной мощности генератора до 1,6 кВт/м² приведет к коэффициенту захвата 0.941, что увеличит фактическую извлеченную энергию всего на 15%. Увеличение скорости выключения до значения, намного превышающего 35 м/с, потребовало бы повышенной структурной целостности башни, гондолы и лопастей.

Vestas Wind Systems, ведущий производитель крупных (мегаваттных) ветровых турбин, представляет интересную демонстрацию эффективности их стратегии управления для ветровых турбин Vestas V52 850 кВт. Рис. 4.20 иллюстрирует отклик выхода генератора для ветровой турбины V52 в зависимости от изменений скорости ветра.

Случайный характер изменения скорости ветра показан на рис. 4.20a. Целью контрольного протокола является поддержание постоянной мощности генератора 850 кВт. Для этого модулируется шаг лопасти и частота вращения генератора. Рис. 4.20 b и c иллюстрируют необходимые изменения угла наклона и скорости генератора. Выходная мощность генератора отслеживается на рис. 4.20 d. Очевиден успех протокола управления в поддержании постоянной выходной мощности генератора.

До настоящего времени этот раздел освещал эксплуатацию одной ветровой турбины. Тем не менее, «фермы» ветровых турбин, использующие массивы турбин, являются общими для применения в коммунальном хозяйстве. Для ветровых турбин, используемых в массивах, рекомендуемое пространство составляет 2–4 диаметра ротора, обращенных к преобладающему ветру, и 8–12 диаметров ротора, параллельных преобладающему ветру. При более одном ряде ветровых турбин в массиве, турбины в последующих рядах располагаются в шахматном порядке. На рис. 4.21 представлена схематическая иллюстрация рекомендуемого расстояния между ветровыми турбинами на ветровых электростанциях.

4.5 Коммерческие примеры ветровых турбин

Этот раздел содержит некоторую информацию и технические данные по выбору образцов ветровых турбин, которые имеются в продаже. Американская ассоциация ветроэнергетики предоставляет список американских производителей небольших ветровых турбин на сайте www.awea.org.

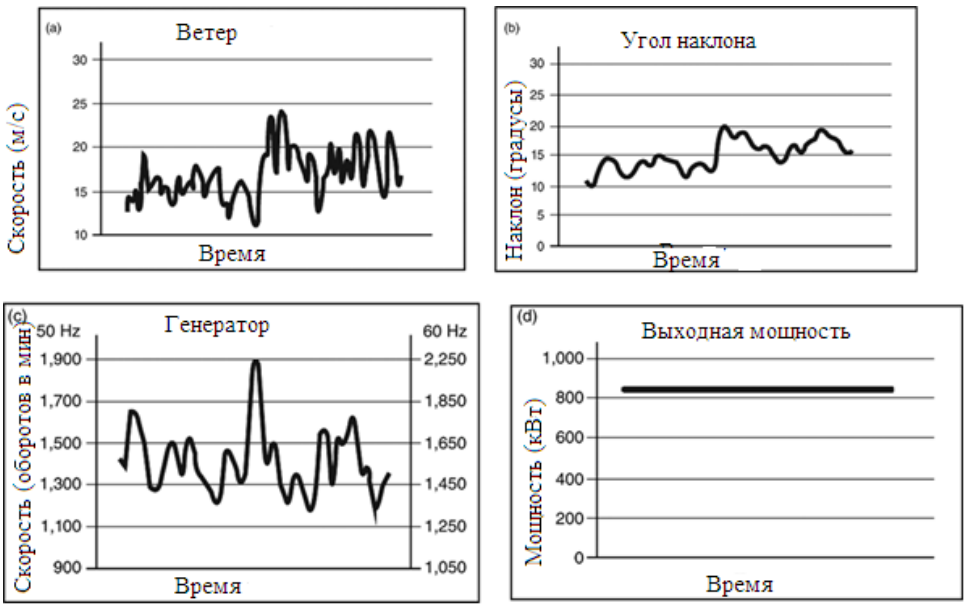


Рис. 4.20 Выходная мощность генератора ветровой турбины Vestas V52 составляет 850 кВт при: (a)изменении в скорости ветра; (b)изменении угла наклона; (c)изменении скорости генератора; (d)выходной мощности генератора. *Источник*: Веб-сайт Vestas.

Список крупных мировых производителей ветряных турбин доступен под рубрикой «Крупные производители ветровых турбин» на www.ecobusinesslinks.com. Информация в этом разделе была получена с различных веб-сайтов и литературы компании, а также из базы данных NREL. Дополнительные технические данные и информацию о ценах можно получить, связавшись с отдельными компаниями. Приведенные здесь примеры относятся к ветровой турбине GE Energy 1.5 МВт, ветровой турбине Vestas V52 850 кВт и ветровой турбине Excel 10 кВт Bergey. Почти все компании, включенные в список малых и крупных производителей ветровых турбин, имеют веб-сайты.

• GE Energy 1.5МВт GE Energy (https://www.gerenewableenergy.com/wind-energy.html и https://www.gepower.com/) производят большие ветровые турбины; в 2015 их ветровые турбины

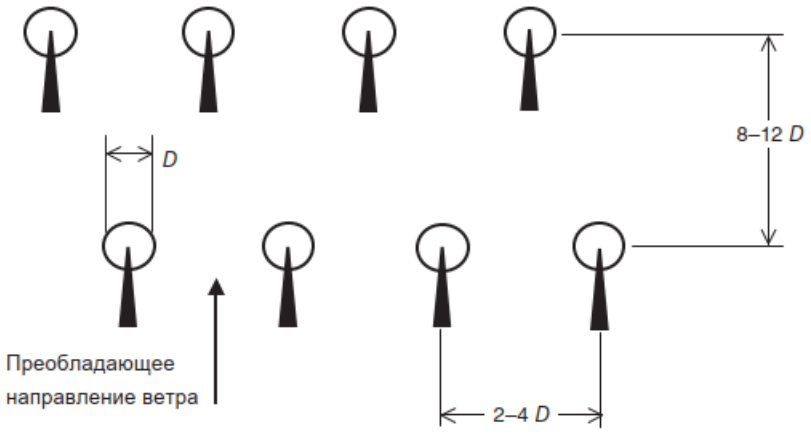


Рис. 4.21 Расположение ветровых турбин для ветровых ферм.

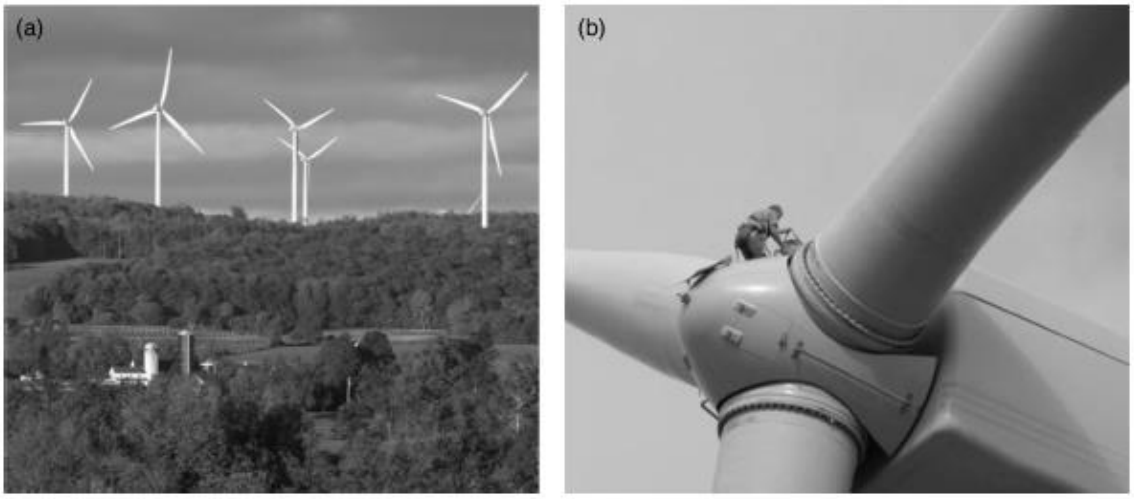


Рис. 4.22 Ветровая турбина GE Energy 1.5 МВт:(a) пример ветровой фермы; (b)гондола и человек. *Источник*: NREL.

имели номинальную мощность от 1.7 до 3.2 МВт. Несмотря на то, что они больше не производятся, семейство устройств мощностью 1.5 МВт GE Energy будет исследовано, поскольку они были очень популярны, причем к 2009 году их было продано более 12 000. На рис. 4.22 представлены изображения ветровых турбин GE Energy мощностью 1.5 МВт. На рис. 4.22 а изображено расположение турбины мощностью 1,5 МВт в ветровой ферме (см. обсуждение в конце Раздела 4.4). На рис 4.22b представлены: гондола, лопасть и человек. Изображение дает представление о размере ветровой турбины мощностью 1,5 МВт.

Техническая информация для турбины представлена в Таблице 4.2. Кривая мощности доступна в брошюре GEA14954C 1.5 МВт, которую можно загрузить из Интернета.

• Ветровая турбина *Vestas V52 850 кВт*. Система, производимая компанией Vestas Wind Systems V52 имеет номинальную мощность 850 кВт и является популярной ветровой турбиной во всем мире. Адрес веб-сайта Vestas: www.vestas.com. Vestas сообщили, что в 2005 году в среднем компания производила более 50 установок в неделю. Эффективность системы управления для V52 обсуждалась в Разделе 4.4. Техническая информация о ветровой турбине V52 мощностью 850 кВт представлена в Таблице 4.3, а фотография представлена на рис. 4.23. Выходная мощность рабочих характеристик скорости ветра показана на рис. 4.24. Рабочие характеристики на рисунке параметризованы в зависимости от уровня звука.

• Ветровая турбина *Bergey 10 кВт Excel.* Предыдущие примеры были для относительно больших ветровых турбин, используемых для коммерческой выработки электроэнергии. Bergey Wind Power Company (www.bergey.com)

Таблица 4.2 Спецификации ветровой турбины GE Power 1.5 МВт.

	1.5s	**1.5se**	**1.5sl**	**1.5sle**	**1.5xle**
Номинальная мощность (кВт)	1500	1500	1500	1500	1500
Скорость включения (м/с)	4	4	3.5	3.5	3.5
Скорость выключения (м/с)	25	25	20	25	20
Номинальная скорость ветра (м/с)	13	13	14	14	12.5
Диаметр ротора (м)	70.5	70.5	77	77	82.5
Область охвата ($м^2$)	3904	3904	4657	4657	5346
Скорость ротора (об/мин)	12-22.2	12-22.2	11-20.4	11-20.4	10.1-18.7

Таблица 4.3 Спецификации ветровой турбины Vestas V52 850 кВт.

Номинальная мощность(кВт)	850
Скорость включения (м/с)	4
Скорость выключения (м/с)	25
Номинальная скорость ветра (м/с)	16
Диаметр ротора(м)	52
Область охвата ($м^2$)	224
Скорость ротора (оборотов/мин)	14–31.4

производят небольшие ветровые турбины, подходящие для бытового и коммерческого применения в небольших масштабах.

Техническая информация о ветровой турбине Excel 10 кВт Bergey представлена в Таблице 4.4, а фотография показана на рис. 4.25. Характеристики выходной мощности и скорости ветра приведены на рис. 4.26.

Цены на полную систему, включая регулятор напряжения и инвертор с линейной коммутацией, в 2014 году варьировались от 23 000 до 29 000 долл. США, в зависимости от вариантов.

BWC Excel чаще всего устанавливается на вантовой или самонесущей решеточной башне, высотой 60 футов с ценами в пределах от $ 9000 до $ 12 000. Другие высоты башни также доступны. Таким образом, стоимость за установленный киловатт составляет от 3600 долл.США/кВт до 4600 долл. США/кВт, опять же, в зависимости от выбранных вариантов. Эти цены были получены от дилеров через Интернет, поскольку веб-сайт Bergey не содержит информации о стоимости.

Три примера, представленные здесь, представляют собой сравнительно небольшой образец коммерчески доступных ветровых турбин. Включенные в этом разделе примеры не подразумевают никаких рекомендаций или одобрительных отзывов о производителях; они просто представлены как образцы коммерчески доступных ветровых турбин.



Рис. 4.23 Ветровая турбина Vestas V52 850 кВт.
Источник:
http://images.nrel.gov/viewphoto.php?imageId=6311986.

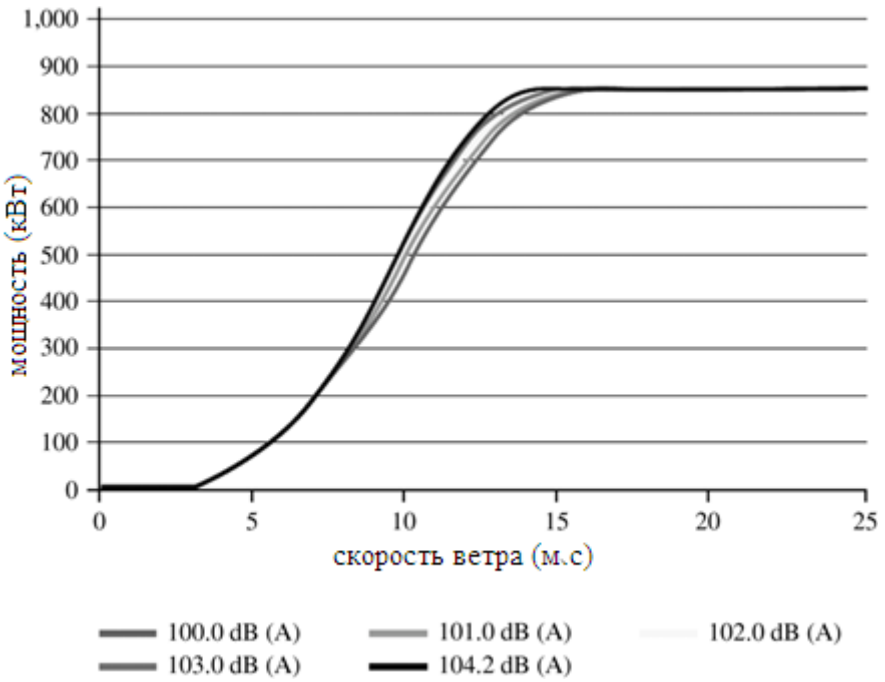


Рис. 4.24 Мощность в зависимости от скорости ветра для ветровой турбины Vestas V52 составляет 850 кВт. *Источник*: Vestas.

Таблица 4.4 Спецификации турбины Bergey 10кВт Excel

Номинальная мощность (кВт)	8.9
Скорость включения (м/с)	2.2
Скорость выключения (м/с)	Никакая (свернутый на 16–18м/с)
Номинальная скорость ветра (м/с)	11
Диаметр ротора (м)	7
Область охвата ($м^2$)	38.5
Скорость ротора (оборотов/мин)	0–400

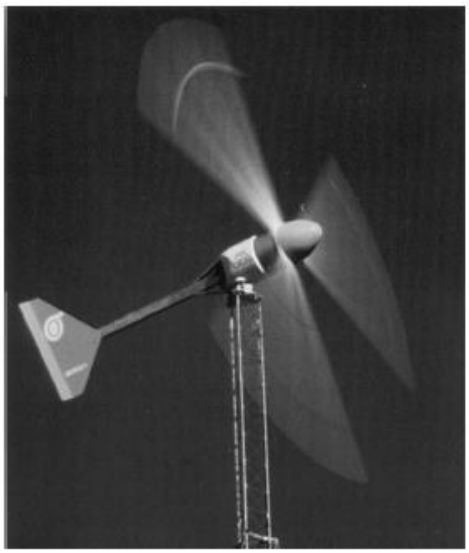


Рис. 4.25 Ветровая турбина Bergey 10 кВт Excel. *Источник*: Bergey.



Рис. 4.26 Мощность в зависимости от скорости ветра для ветровой турбины Excel 10 кВт Bergey. *Источник*: Bergey Excel 10, Руководство пользователя.

4.6 Увеличение мощности ветровой энергии

В двадцать первом веке энергия ветра продемонстрировала наибольший прирост мощности среди всех возобновляемых источников энергии, как в США, так и в мире. На рис. 1.12 показан рост различных возобновляемых источников энергии в США с 2000 по 2013 год; рост энергии ветра является наиболее впечатляющим. Яркое указание на величину увеличения установленной ветроэнергетической мощности с 1999 года дает сравнение рис. 4.27a и b. На рис. 4.27a представлена установленная мощность в 1999 году (конец года), тогда как на рис. 4.27b показана установленная мощность по состоянию на сентябрь 2014 года. В 1999 году установленная мощность составляла 2472 МВт, которая увеличилась до 62 300 МВт к сентябрю 2014 года – увеличение на 2400%!

Ожидается, что темпы роста останутся почти постоянными. Последние прогнозы EIA приведены на рис. 4.28. К концу 2015 года ожидается увеличение мощности на 14 ГВт, в результате чего общая установленная мощность энергии ветра в США составит 76 ГВт. Сравнивая класс ветра на рис. 4.7a и среднюю скорость ветра на рис. 4.7b с установленной мощностью в 2014 году на рис. 4.27b и проектируемыми установками на рис. 4.28 – регион наибольшей активности, «оптимальное» местонахождение в США это – Средний Запад. Хотя Западные горы предлагают более высокие классы энергии ветра, демография местности и населения благоприятствует Среднему Западу.

Одной из причин продолжающегося быстрого расширения установленных ветроэнергетических мощностей была благоприятная налоговая среда. Федеральный налоговый кредит на производство ветра, введенный в действие в 1992 году и продолжавшийся более или менее до настоящего времени, позволил ветрогенераторам, имеющим право на получение компенсации, получить в 2014 году налоговый кредит с поправкой на инфляцию в размере 2.3 цента/кВт-ч. Это налоговое преимущество разрешено в течение первых 10 лет эксплуатации коммерческих ветровых установок. В декабре 2014 года Конгресс США продлил налоговый кредит.

Ряд компаний в США и во всем мире занимается производством, установкой, эксплуатацией и обслуживанием ветровых турбин.

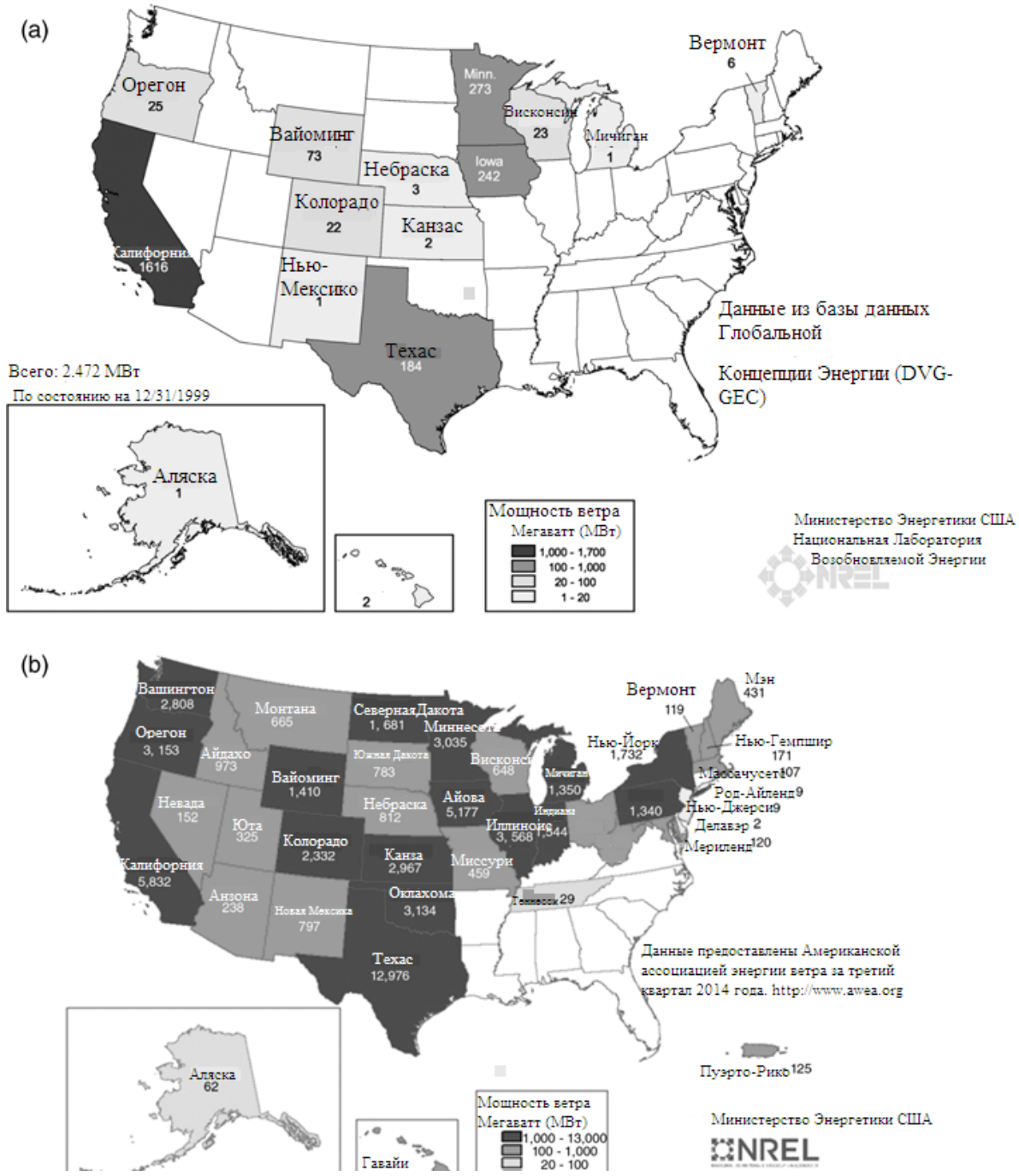


Рис.4.27 Увеличение установленной ветроэнергетической мощности (МВт): а) декабрь 1999 года; (b) сентябрь 2014 года. *Источник*: NREL.

На рис. 4.29 представлена разбивка компаний (с точки зрения доли рынка), которые участвовали в установке ветровых турбин в США в 2012 году. GE Wind захватила почти вдвое большую долю рынка (38%), чем Siemens и втрое большую долю рынка, чем Vestas. Данный рисунок также служит хорошим источником информации о ветровых турбинах, данные для которого получены с веб-сайтов компаний.

Рост популярности ветряной энергии в мире одинаков. Рис. 4.30 графически подтверждает тенденцию. Европейский Союз (ЕС) уже длительное время является приверженцем ветряной энергии. На рис. 4.31 представлено сравнение в 2012 году доли ЕС в мире по производству энергии ветра. Учитывая размер и численность стран-членов ЕС, эти результаты впечатляют и подтверждают позицию ЕС в отношении возобновляемых источников энергии.

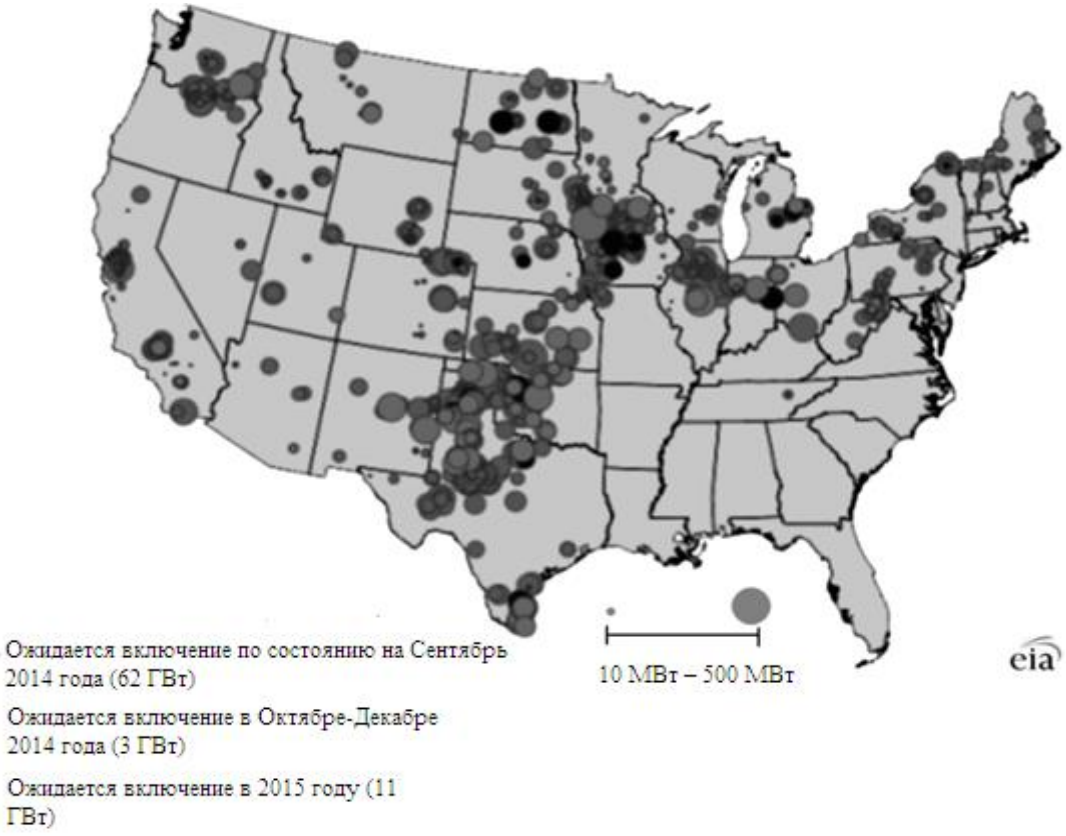


Рис. 4.28 Рост установленных ветроэнергетических мощностей, включая 2015 год. *Источник*: EIA.

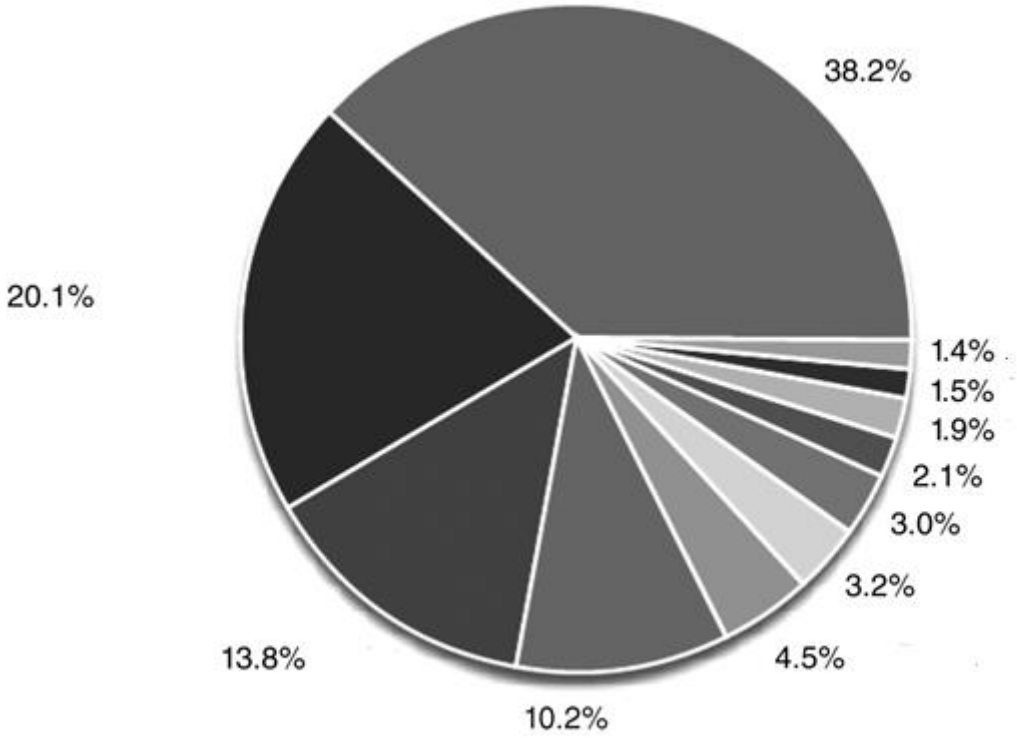


Рис. 4.29 Доля компании на рынке ветровых турбинных установок в 2012 году.

4.7 Заключение

В этой главе исследовалась энергия ветра путем разработки принципов работы ветровых турбин, изучения того, как можно использовать распределение скорости ветра, рассмотрения вопроса о том, как должна регулироваться ветровая турбина, и изучения некоторых коммерчески доступных ветровых турбин.

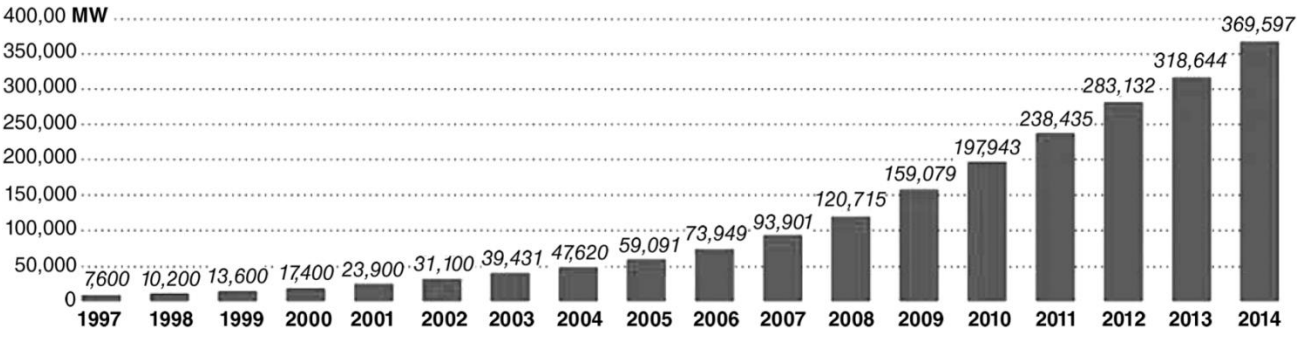


Рис. 4.30 Мировой рост (1997–2014 гг.) установленных ветроэнергетических мощностей. *Источник*: Воспроизведено с разрешения GWEC.

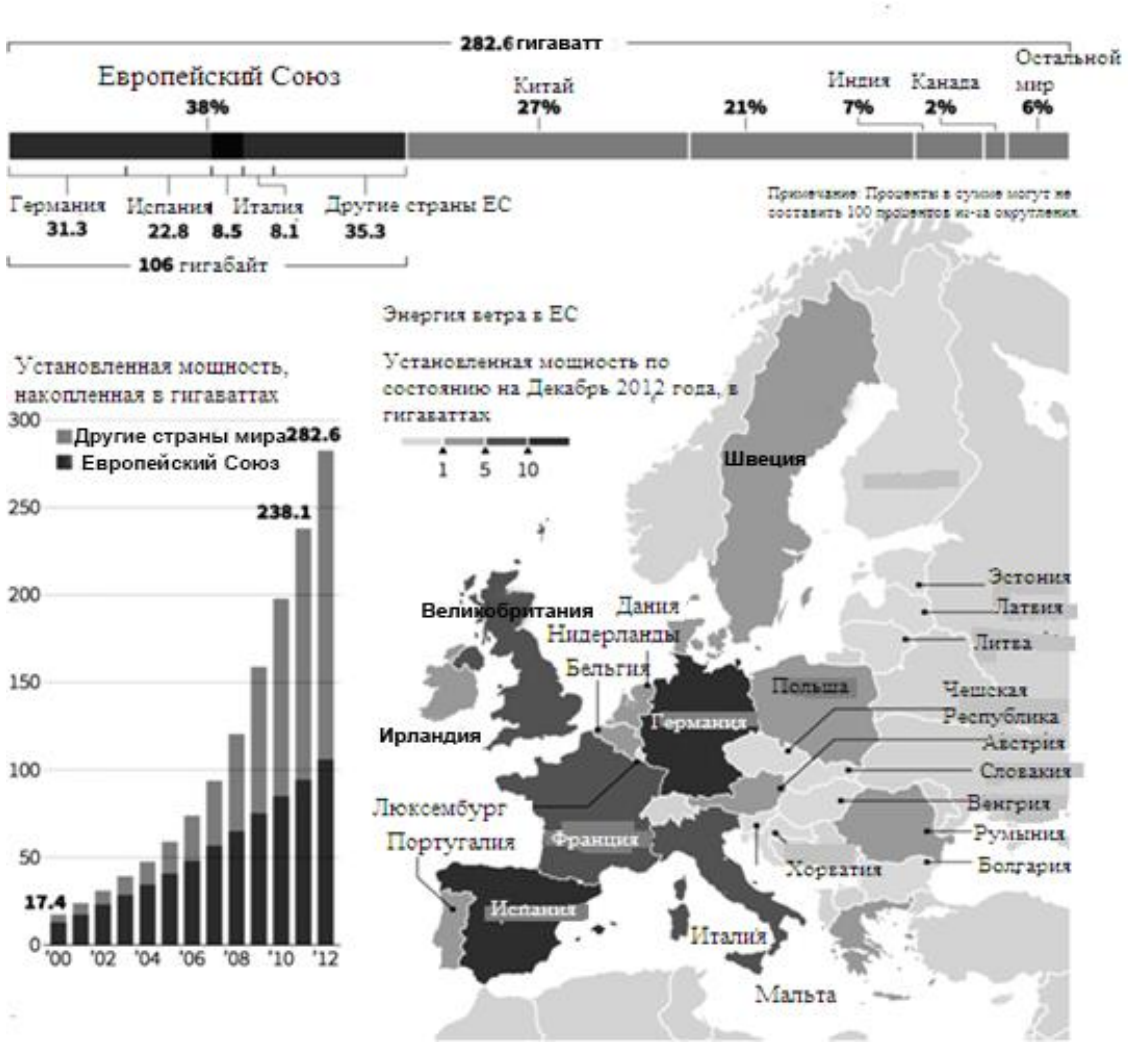


Рис. 4.31 Сравнение ветроэнергетической мощности в ЕС, 2012 год.

Литература

Johnson, G.L. (2001)Wind turbine power, energy, and torque. In Wind Energy Systems, pp.4–1–4–54. http://www.ece.k-state.edu/people/faculty/gjohnson/files/Windbook.pdf (accessed October 15, 2016).

Kreith, F. and West, R. E. (1997)CRC Handbook of Energy Efficiency. CRC Press, Boca Raton, FL. Patel, M.R.(2005)Wind and Solar Power Systems ,2nd edn. Taylor & Francis, New York.

Дополнительная литература

Logan, E.(1993)Turbomachinery,2nd edn. Marcel Dekker, NewYork.

5

Турбины внутреннего сгорания

5.1 Введение

Газовые турбины были разработаны для авиационных применений до Второй мировой войны и непосредственно во время военных действий. Уилсон (1983) дает превосходный исторический обзор инженерных аспектов разработки газотурбинных двигателей. Производство первых полезных, достойных эксплуатации газотурбинных двигателей приписывают одновременно Фрэнку Уиттлу в Великобритании и Хансу фон Охайну в Германии. В течение десятилетий после Второй мировой войны, газотурбинный двигатель стал предпочтительной двигательной установкой для большинства самолетов. В то же время, свойственная простота (по сравнению с другими первичными двигателями) и эксплуатационные характеристики газотурбинного двигателя привели к его адаптации для различных применений, в том числе для выработки электроэнергии и морской тяги. Когда газовые турбины используются для выработки электроэнергии, их часто называют турбинами внутреннего сгорания, чтобы отличать их от паровых турбин, которые долгое время были опорой индустрии электроэнергетики.

Турбины внутреннего сгорания используются для пиковой нагрузки, базовой нагрузки, резервного/аварийного режима, производства независимой от сети электроэнергии, а также как источники энергии для удаленных или изолированных объектов, таких как морские буровые платформы. При использовании для выработки электроэнергии, турбины внутреннего сгорания работают в двух режимах: (1) выработка электроэнергии без рекуперации тепла и (2) выработка электроэнергии с рекуперацией тепла. Последнее называется комбинированной выработкой тепла и энергии (ТЭЦ) и является предметом Главы 11. ТЭЦ часто называют когенерацией - рекуперацией и использованием тепловой энергии в сочетании с децентрализованным производством электроэнергии. В этой главе разрабатываются принципы для турбин внутреннего сгорания.

5.2 Турбина внутреннего сгорания

Рис. 5.1 представляет собой схему турбины внутреннего сгорания, на которой показаны основные компоненты: компрессор, камера сгорания и турбина. Воздух сжимается при прохождении через компрессор. Работа, необходимая для привода компрессора, обеспечивается турбиной. Топливо сжигается в камере сгорания, и температура смеси воздуха и продуктов сгорания увеличивается в процессе сгорания. Когда смесь расширяется через турбину, мощность, извлекаемая турбиной, используется для питания компрессора. В турбине внутреннего сгорания дополнительная энергия, извлекаемая «силовой» турбиной, доступна как выходная мощность двигателя. Выходная мощность турбины сгорания обычно используется для привода генератора для производства электроэнергии. Во многих турбинах внутреннего сгорания присутствует только одна секция турбины; часть извлеченной мощности используется для привода компрессора, а остальная часть - выходной мощности.

Воздушный цикл Брайтона часто используется в качестве представления газовой турбины. Цикл Брайтона состоит из процессов изэнтропического сжатия и расширения, а также процессов добавления и отвода тепла при постоянном давлении. *P*–*v* (объем удельного давления) и

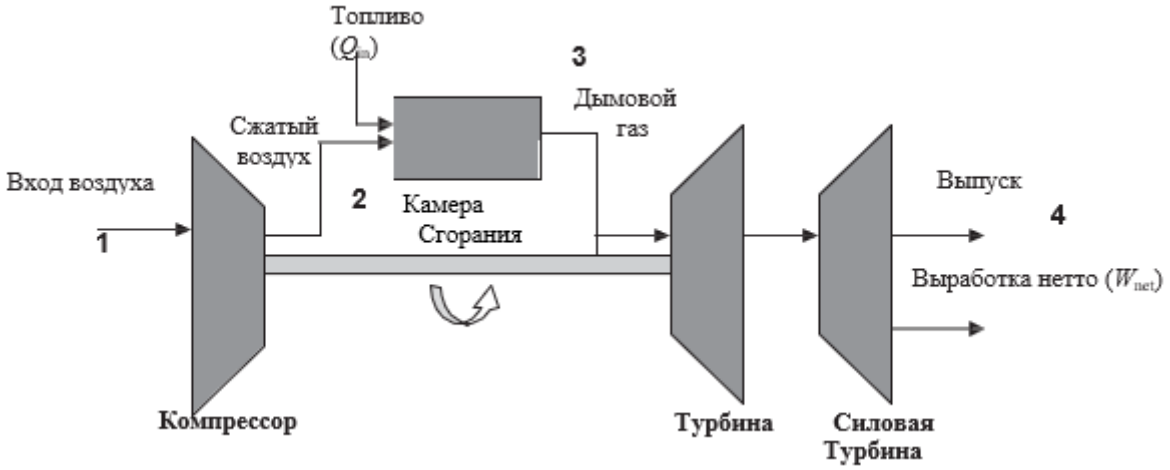


Рис. 5.1 Схема турбины внутреннего сгорания.

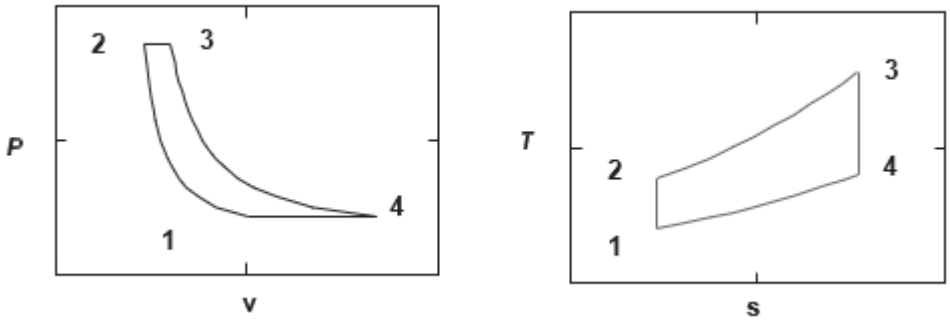


Рис. 5.2 Диаграммы *P–v* и *T–s* для газовой турбины цикла Брайтона.

T–s (температура – энтропия) диаграммы приведены на рис. 5.2 для газовой турбины цикла Брайтона. Состояние 1 – это состояние входа компрессора, состояние 2 - выход из компрессора и входа в камеру сгорания, состояние 3 – выход из камеры сгорания и входа в турбину, а состояние 4 – выход из турбины. Четыре состояния указаны на Рисунках 5.1 и 5.2.

В большинстве процедур анализа газовых турбин первого порядка используется стандартный анализ воздуха. Стандартный анализ воздуха означает, что рабочая жидкость – это воздух, который рассматривается как идеальный газ. Стандартный анализ холодного воздуха означает, что рабочая жидкость рассматривается как воздух со всеми свойствами при их значениях комнатной температуры. Таким образом, термодинамические свойства воздуха и продуктов сгорания необходимы для стандартного анализа воздуха. Термически совершенный газ описывается термическим уравнением состояния

$$P = \rho RT \tag{5.1}$$

где газовая постоянная

$$R = 287\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} * \text{К}} = 53.35\ \frac{\text{фут} * \text{фунт сила}}{\text{фунт масса} * {}^{\circ}R}$$

Калорийно совершенный газ – это газ, для которого удельная теплоемкость при постоянном объеме c_v и удельная теплоемкость при постоянном давлении c_p постоянны. Газ, который является как термически совершенным, так и калорийно совершенным, обозначается как идеальный газ. Соотношение удельных температур определяется как $k=c_p/c_v$

Для термически совершенного газа

$$R = c_p - c_v \quad \text{и} \quad R = \frac{k-1}{k} c_p \tag{5.2}$$

Изэнтропические зависимости выражаются как

$$\frac{T_a}{T_b} = \left(\frac{P_a}{P_b}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{\rho_a}{\rho_b}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_b}{v_a}\right)^{k-1} \tag{5.3}$$

Для воздуха и продуктов сгорания приняты следующие значения термодинамических констант:

Воздух	Продукты сгорания
$c_p = 1.004 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} = 0.24 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт масса} \cdot {}^\circ\text{R}}$	$c'_p = 1.148 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} = 0.2744 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт масса} \cdot {}^\circ\text{R}}$
$k = 1.40$	$k = 1.33$

В газовой турбине продукты сгорания приводят к тому, что свойства на выходе из камеры сгорания отличаются от свойств воздуха. Однако практически во всех газовых турбинах соотношение топлива к воздуху составляет менее 0.02, поэтому фактические отклонения свойств выхода из камеры сгорания от свойств воздуха при той же температуре и давлении невелики. Разумная оценка состоит в том, что термодинамические константы в процессе добавления тепла (сгорания) являются средними значениями воздуха и продуктов сгорания:

$$c''_p = 1.076 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} = 0.2572 \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт масса} \cdot {}^\circ\text{R}}$$
$$k = 1.367$$

5.3 Воздушный цикл Брайтона

Воздушный цикл Брайтона с холодным воздухом - самая простая модель газовой турбины. Для воздушного цикла Брайтона с холодным воздухом, работа компрессора (на единицу массы) W_c и работа расширения W_e является

$$\begin{aligned} W_c &= h_1 - h_2 \\ W_e &= h_3 - h_4 \end{aligned} \tag{5.4}$$

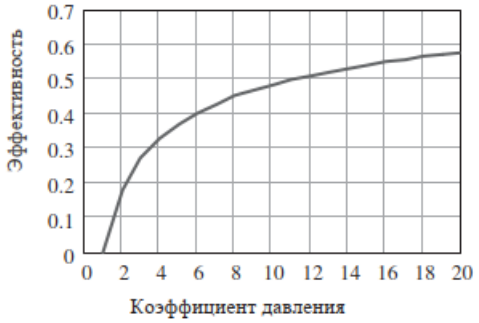
где h представляет энтальпию, которая для термически совершенного газа может быть представлена как $h=cpT$. И поставляемое тепло является

$$Q_s = h_3 - h_2 \tag{5.5}$$

Работа нетто турбины – это разница между работой турбины и работой компрессора. В цикле Брайтона сгорание заменяется добавлением тепла, поэтому скорости потока массы через все компоненты одинаковы. Тепловая эффективность определяется как чистая работа, деленная на поставляемое тепло. Следовательно, для анализа холодного воздуха

$$\eta_t = \frac{\sum W}{Q_s} = \frac{h_1 - h_2 + h_3 - h_4}{h_3 - h_2}$$
$$= \frac{c_p(T_1 - T_2) + c_p(T_3 - T_4)}{c_p(T_3 - T_2)} = \frac{T_1 - T_2 + T_3 - T_4}{T_3 - T_2} \tag{5.6}$$
$$= \frac{T_3 - T_2 + T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{T_2\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}$$

Рис. 5.3 Тепловая эффективность воздушного цикла Брайтона по стандарту холодного воздуха.



Но поскольку процессы либо изэнтропические, либо имеют постоянное давление, можно проверить следующее:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \tag{5.7}$$

Так, тепловой КПД η_t становится

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{T_2/T_1} = 1 - \frac{1}{(P_2/P_1)^{k-1/k}} \tag{5.8}$$

Таким образом, для стандартного цикла Брайтона с холодным воздухом, тепловая эффективность зависит только от отношения давлений. График тепловой эффективности в зависимости от отношения давлений представлен на рис. 5.3. Соотношение давления в 20 единицах представляет собой разумный верхний предел для соотношений давления, ожидаемых для типичных газовых турбин. Рисунок также демонстрирует, что даже при высоких значениях давления, тепловой КПД вряд ли превысит 60%. Тепловая эффективность цикла Брайтона со стандартным холодным воздухом также представляет собой эффективную верхнюю границу для ожидаемых эксплуатационных характеристик газотурбинного двигателя.

5.4 Фактический анализ рабочего цикла газовой турбины

Стандартный воздушный цикл Брайтона с холодным воздухом полезен для быстрого установления пределов и понимания принципов работы газотурбинного двигателя, но необратимость (неэффективность) должна быть включена в составные модели для более реалистичного анализа. Обычные рассматриваемые необратимости – это потери в процессах сжатия и расширения и падение давления в процессе добавления тепла. Каждый будет рассмотрен по очереди.

Рассмотрим процесс сжатия с необратимостью. Рис. 5.4 иллюстрирует диаграмму *T–s* с изэнтропическим сжатием от P_1 до P_2 и процессом сжатия, также от P_1 до P_2, с потерями. Фактический процесс переходит из состояния 1 в состояние 2, а изэнтропический процесс переходит из состояния 1 в состояние 2s. Эффективность изэнтропического сжатия η_C определяется как соотношение работы, требуемой в изэнтропическом процессе, к работе, требуемой фактическим процессом, или

$$\eta_c = \frac{h_1 - h_{2s}}{h_1 - h_2} = \frac{c_p(T_1 - T_{2s})}{c_p(T_1 - T_2)} = \frac{T_1 - T_{2s}}{T_1 - T_2} = \frac{(T_{2s}/T_1) - 1}{(T_2/T_1) - 1} \tag{5.9}$$

Но процесс от состояния 1 до состояния 2s является изэнтропическим, так что

$$\frac{T_{2s}}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \tag{5.10}$$

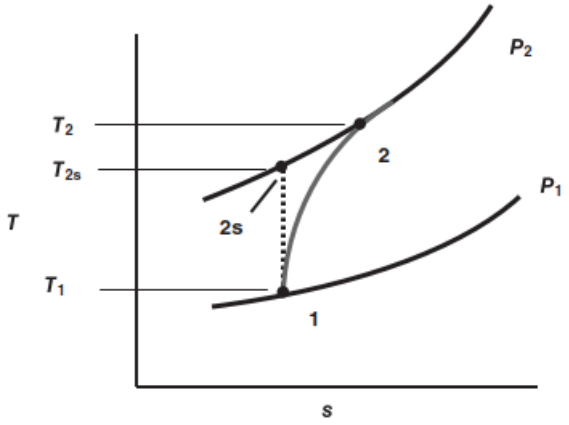


Рис. 5.4 Диаграмма *T–s* для процессов компрессии.

Эффективность изоэнтропического сжатия, выраженная в соотношении давления компрессора и фактической температуры на выходе, равна

$$\eta_c = \frac{(P_2/P_1)^{(k-1)/k} - 1}{(T_2/T_1) - 1} \tag{5.11}$$

Работа сжатия равна

$$W_c = c_p(T_1 - T_2) = c_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) \tag{5.12}$$

Заменив уравнение 5.11 на уравнение 5.12, получаем:

$$W_c = \frac{c_p T_1}{\eta_c}\left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}\right] \tag{5.13}$$

Уравнение 5.13 дает некоторое представление о термодинамике процесса сжатия в газовых турбинах. Чем выше температура T_1 на входе, тем больше работы (на единицу массы) требуется для сжатия газа с заданным отношением давления. Не удивительно, что чем ниже эффективность изоэнтропического сжатия, тем больше требуется работы компрессора. Решение уравнения 5.11 для фактической выходной температуры компрессора дает

$$T_2 = T_1\left\{1 + \frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right]\right\} \tag{5.14}$$

Уравнения 5.11, 5.13 и 5.14 являются «рабочими» выражениями, необходимыми для процесса сжатия в газовой турбине. Уравнение 5.11 обеспечивает эффективность изоэнтропического сжатия с учетом условий на входе (P_1 и T_1) и условий фактического выхода (P_2 и $T_{2)}$. Учитывая соотношение давления, температуру на входе и эффективность изоэнтропического сжатия, уравнение 5.13 можно использовать для расчета работы, необходимой для привода компрессора. Учитывая соотношение давления, температуру на входе и эффективность изоэнтропического сжатия, уравнение 5.14 дает фактическую температуру на выходе из компрессора. Эффективность изоэнтропического сжатия определяется с использованием фактического процесса и эталона изоэнтропического процесса и не

определяется как работа на входе и выходе во взаимоотношениях. Концепция изоэнтропической эффективности показана в примере 5.1.

Пример 5.1

Воздух поступает в компрессор газотурбинного двигателя при 100 кПа (абсолютных) и 300 К. Если коэффициент давления компрессора равен 8, а эффективность изоэнтропического сжатия составляет 0,87, найдите следующее:

a) Температура на выходе и давление воздуха из компрессора;
b) Работа (на единицу массы), добавляемая в воздух компрессором;
c) Температура воздуха на выходе, если процесс сжатия был изоэнтропическим.

Решение: ход выполнения процесса на диаграмме *T*–*s* показан на рис. 5.4. Из постановки задачи используем следующее:

$$T_1 = 300\ \text{K}$$
$$P_1 = 100\ \text{кПа}$$
$$\frac{P_2}{P_1} = 8$$

Поскольку рабочая жидкость - воздух, $k = 1.4$ и $c_p = 1.004$ кДж/(кгК). Фактическая температура на выходе может быть рассчитана с использованием уравнения 5.14:

$$T_2 = T_1\left\{1 + \frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} - 1\right]\right\} = 300\ \text{K}\left\{1 + \frac{1}{0.87}\left[8^{(1.4-1)/1.4} - 1\right]\right\} = 580\ \text{K}$$

И давление на выходе

$$P_2 = \frac{P_2}{P_1}P_1 = 8 \times 100\ \text{kPa} = 800\ \text{кПа}$$

Работа, приданная воздуху

$$W_c = c_p(T_1 - T_2) = 1.004\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}(300 - 580)\text{K} = -281\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Отрицательный знак указывает на то, что работа выполняется на воздухе. Если бы процесс сжатия был изоэнтропическим, то температура на выходе соответствовала бы температуре изоэнтропического сжатия, или

$$T_{2s} = T_1\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} = 300\ \text{K}(8)^{(1.4-1)/1.4} = 543\ \text{K}$$

Работа для изоэнтропического сжатия будет

$$W_{\text{изоэнтроп}} = \eta_c W_c = 0.87\left(-287\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right)$$

Аналогичный подход используется при определении эффективности изоэнтропического расширения. Диаграмма *T*-*s* для процесса расширения показана на рис. 5.5. Фактический процесс переходит из состояния 3 в состояние 4, а изоэнтропический процесс переходит из состояния 3 в состояние 4s. Эффективность изоэнтропического расширения η_e определяется как соотношение фактической работы, извлеченной в процессе расширения, к работе, которая была бы извлечена, если процесс был изоэнтропическим, или

$$\eta_e = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{c_p(T_3 - T_4)}{c_p(T_3 - T_{4s})} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} = \frac{1 - (T_4/T_3)}{1 - (T_{4s}/T_3)} \tag{5.15}$$

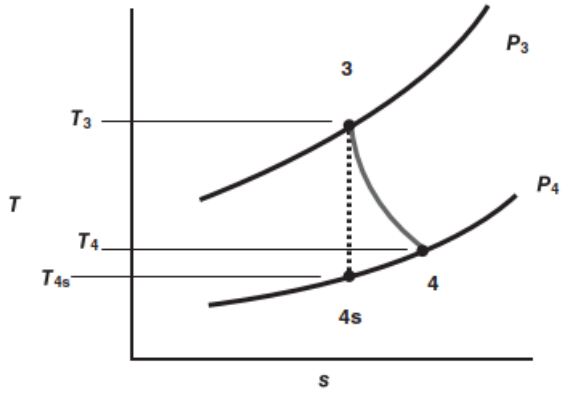


Рис. 5.5 Диаграмма T–s для процесса расширения

Но, процесс от 3 до 4s является изоэнтропическим, поэтому

$$\frac{T_{4s}}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k} \tag{5.16}$$

Эффективность изоэнтропического расширения, приведенная в значении отношения давления турбины и фактической температуры на выходе турбины, равна:

$$\eta_e = \frac{1 - (T_4/T_3)}{1 - (P_4/P_3)^{(k-1)/k}} \tag{5.17}$$

Работа (на единицу массы), извлеченная турбиной, составляет

$$W_e = c_p(T_3 - T_4) = c_p T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) \tag{5.18}$$

Если заменить уравнение 5.17 на уравнение 5.18, то

$$W_e = \eta_e c_p T_3 \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k}\right] \tag{5.19}$$

Руководство по процессу расширения содержится в уравнении 5.19. Чем выше температура $T3$ на входе в турбину, тем больше работы (на единицу массы) можно извлечь из турбины для заданного отношения давления. Эта зависимость от температуры на входе в турбину была движущим стимулом для поиска материалов, способных выдерживать более высокие температуры в секции турбины. И чем ниже эффективность изоэнтропического расширения, тем меньше работы можно извлечь. Решение уравнения 5.19 для фактических выходов температуры турбины на выходе даст

$$T_4 = T_3 \left\{1 - \eta_e \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k}\right]\right\} \tag{5.20}$$

Уравнения 5.17, 5.19 и 5.20 для турбины (процесс расширения) используются аналогично уравнениям 5.11, 5.13 и 5.14 для компрессора. Эффективность изоэнтропического расширения, аналогичная эффективности изоэнтропического сжатия, определяется с использованием фактического процесса и эталонного изоэнтропического процесса и не определяется как отношения между работой на входе и работой на выходе. Концепция изоэнтропического расширения продемонстрирована в примере 5.2.

Пример 5.2

Абсолютное давление на входе и выходе для секции турбины газотурбинного двигателя составляет 550 кПа и 100 кПа соответственно. Если температура на входе в турбину составляет 1000 K, а эффективность изоэнтропического расширения составляет 0,91, рассчитайте следующее:

a) Температура на выходе из турбины;
b) Работа (на единицу массы) извлеченная из турбины

Решение: ход выполнения процесса на диаграмме *T*–*s* показан на рис. 5.5. Исходя из поставленной задачи:

$$T_3 = 1000\,\text{K}$$
$$P_3 = 550\,|\,\text{кПа}$$
$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{100\,\text{кПа}}{550\ \text{кПа}} = 0.182$$

Поскольку рабочая жидкость представляет собой продукт сгорания, k = 1.334 и c_p=1.148 кДж/(кгК). Температура на выходе может быть рассчитана с использованием уравнения 5.20:

$$T_4 = T_3\left\{1 - \eta_e\left[1 - \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k}\right]\right\} = 1000\,\text{K}\left\{1 - 0.91\left[1 - 0.182^{(1.33-1)/1.33}\right]\right\} = 686\,\text{K}$$

Работа, извлеченная турбиной является

$$W_\text{T} = c_p(T_3 - T_4) = 1.148\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}(1000 - 686)\text{K} = 360\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Некоторые положения относительно камеры сгорания являются уместными. Для оценок первого порядка, моделирование процесса горения как процесса добавления тепла не приводит к недопустимым ошибкам. Для стандартного анализа воздушного цикла Брайтона P_2=P_3; то есть никакого изменения давления в камере сгорания не происходит. В реальных газотурбинных камерах сгорания, P_3 меньше, чем P_2; то есть в камере сгорания происходит падение давления. Падение давления вызвано двумя эффектами: (1) потери на трение и перемешивание в камере сгорания и (2) эффект Рэлея («простое» добавление тепла в открытой системе приводит к потере давления) (Ходж и Кёниг, 1995), Для хорошо сконструированных камер сгорания перепад давления невелик, обычно менее 5% от давления на входе в камеру сгорания.

Теплота реакции на единицу массы в результате полного сгорания топлива определяется как величина нагрева топлива. Значения нагрева задаются либо как низкое значение нагрева (LHV), либо как высокое значение нагрева (HHV). HHV означает, что вода в продуктах сгорания находится в жидкой форме, то есть водяной пар был конденсирован. Значение LHV означает, что вода в продуктах сгорания находится в газообразном состоянии. Для большинства газовых турбин используется LHV, поскольку температуры выше температуры конденсации водяного пара. В Таблице 5.1 приведен сборник номинальных значений нагрева типичных газотурбинных топлив.

Простая модель камеры сгорания приравнивает скорость выделения энергии в процессе сгорания к скорости нагрева воздуха, или

$$\dot{m}_{\text{топливо}} H_v = \dot{m}_{\text{воздух}} C_p''(T_3 - T_2) \tag{5.21}$$

где C_p''- удельная теплота для процесса добавления тепла, так что отношение топлива к воздуху f/a становится

$$\frac{f}{a} = \frac{\dot{m}_{\text{топливо}}}{\dot{m}_{\text{воздух}}} = \frac{C_p''(T_3 - T_2)}{H_v} \tag{5.22}$$

Таблица 5.1 Теплотворная способность выбранного топлива.

Топливо	Теплотворная способность H_V	
	БТЕ/фунт-масса	**МДж/кг**
Реактивное A	18400	42.8
Реактивное B/JP4	18400	42.8
Реактивное JP5	18315	42.6
Природный Газ	19800	46.1
Пропан	19807	46.1
Этанол	11500	26.7

Соотношение топлива к воздуху в газовой турбине не большое, потому что количество топлива, которое может быть добавлено, ограничено механическими свойствами высокотемпературного предела материалов, используемых в камере сгорания и турбине. Пример 5.3 иллюстрирует концепцию.

Пример 5.3

Турбина внутреннего сгорания, использующая природный газ в качестве топлива, имеет температуру на выходе из камеры сгорания 1500 К и температуру на выходе из компрессора 690 К. Рассчитайте соотношение топлива и воздуха.

Решение: используя простую модель применительно к камере сгорания, получаем:

$$\frac{f}{a} = \frac{\dot{m}_{\text{топливо}}}{\dot{m}_{\text{воздух}}} = \frac{C_p''(T_3 - T_2)}{H_v} = \frac{1.076 \frac{\text{кг}}{\text{кг}\,K} \times (1500\ K - 690\ K)}{46.1 \frac{\text{мДж}}{\text{кг}}} = 0.019$$

Цифры в этом примере являются типичными для газовых турбин. Соотношение топлива к воздуху составляет 0,019, что подтверждает, что скорость потока топлива является низкой по сравнению со скоростью потока воздуха.

Тепловая эффективность реальной газовой турбины, пренебрегая влиянием скорости потока топлива, определяется как в уравнении 5.5:

$$\eta_t = \frac{\sum W}{Q_s} = \frac{W_{\text{полезная}}}{Q_s} = \frac{c_p(T_1 - T_2) + c_p'(T_3 - T_4)}{\underset{\text{для процесса турбины}}{\text{удельная теплота}}\ (T_3 - T_2)} \tag{5.23}$$

Для турбины внутреннего сгорания, которая вырабатывает электроэнергию без рекуперации тепла, наиболее важным показателем является скорость нагрева, подводимая энергия на киловатт-час. Чем меньше скорость нагрева, тем лучше. Таким образом:

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{\text{Энергия на входе}}{\text{Энергия на выходе}} = \frac{Q_s}{W_{\text{нетто}}} = \frac{C_p''(T_3 - T_2)}{C_p(T_1 - T_2) + C_p(T_3 - T_4)} = \frac{1}{\eta_t} \tag{5.24}$$

Скорость нагрева из уравнения 5.24 основана на мощности на валу, полученной при работе турбины. Если генератор (включая любые механические потери) имеет эффективность η_{gen}, то безразмерная скорость нагрева может быть выражена как:

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{1}{\eta_t \eta_{\text{выработка}}}$$

Однако скорость нагрева, особенно для выработки электроэнергии, обычно выражается в единицах килоджоулей на киловатт-час или Британских тепловых единиц на киловатт-час. Таким образом, более удобным представление скорости нагрева становится

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{1}{\eta_t \eta_{\text{выраб}}} \times 3412 \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}} = \frac{3412}{\eta_t \eta_{\text{выраб}}} \frac{\text{БТЕ}}{\text{kW h}} = \frac{3600}{\eta_t \eta_{\text{выраб}}} \frac{\text{кДж}}{\text{кВт ч}} \quad (5.25)$$

где 1 кВт-ч = 3412 БТЕ - коэффициент пересчета. Во многих случаях эффективность генератора η_{gen} принимается за единицу. Многие компании указывают скорости нагрева своих турбин внутреннего сгорания в Британских тепловых единицах на киловатт-час и килоджоулях на киловатт-час. Рассмотрим Пример 5.4.

Пример 5.4

Турбина внутреннего сгорания обладает тепловым КПД η_t 31% и КПД генератора 0,98. Какова скорость нагрева?

Решение: скорость нагрева может быть рассчитана непосредственно по уравнению 5.25:

$$\text{скорость нагрева} = \frac{3412}{\eta_t \eta_{\text{выраб}}} \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}} = \frac{3412}{0.31 \times 0.98} \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}} = 11\,231 \frac{}{\text{кВт ч}} = 11.850 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт ч}}$$

Скорость нагрева говорит о том, что на каждые 11 231 БТЕ от входной энергии турбиной внутреннего сгорания вырабатывается 1 кВт-ч электроэнергии.

Приведем развернутый пример:

Пример 5.5

Турбина внутреннего сгорания обладает следующими характеристиками:

Компрессор

97 кПа (абс.) и 30°C, условия на входе соотношение давления 5.5

эффективность изоэнтропического сжатия 0.84

Камера сгорания

температура на выходе 1000°C потеря давления 3%

топливо является природным газом

Турбина

давление на выходе100 кПа (абс.)

эффективность изоэнтропического расширения 0.88

Генератор

эффективность генератора 0.98.

Определите общую тепловую эффективность и скорость нагрева, и нарисуйте диаграмму *T*–*s*. Является ли скорость потока топлива небольшой по сравнению со скоростью потока воздуха?

Решение: если скорость потока топлива небольшая по сравнению со скоростью потока воздуха, тепловая эффективность описывается уравнением 5.22. T_1, T_2, T_3, и T_4 необходимы для расчета тепловой эффективности. Температура на входе T_1 задается как 30° C или 303 K. Температуру на выходе компрессора T_2 можно рассчитать как

$$T_2 = T_1\left\{1+\frac{1}{\eta_c}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k}-1\right]\right\} = 303\text{ K}\left\{1+\frac{1}{0.84}\left[5.5^{(1.4-1)/1.4}-1\right]\right\} = 529\text{ K}$$

Давление на выходе компрессора составляет 5.5 x 97 кПа = 533.5 кПа. Температура на выходе из камеры сгорания T_3 определяется как 1000°C или 1273 K, а давление на выходе из камеры сгорания составляет

$$P_3 = (1-0.03)P_2 = 0.97\times 533.5\text{ kPa} = 517.5\text{ kPa}$$

Турбина расширяет поток от 517.5 кПа до100 кПа, или

$$\frac{P_4}{P_3} = \frac{100\text{ кПа}}{517.5\text{ кПа}} = 0.193$$

Температура на выходе турбины T_4 для этих условий становится

$$T_4 = T_3\left\{1-\eta_T\left[1-\left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k}\right]\right\} = 1273\text{ K}\left\{1-0.88\left[1-0.193^{(1.33-1)/1.33}\right]\right\} = 898\text{ K}$$

Тепловая эффективность теперь может быть рассчитана как

$$\eta_t = \frac{c_p(T_1-T_2)+c_p'(T_3-T_4)}{c_p'(T_3-T_2)}$$

$$= \frac{1.004\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}(303\text{ K}-529\text{ K})+1.148\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}(1273\text{ K}-898\text{ K})}{1.076\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}(1273\text{ K}-529\text{ K})} = 0.256$$

Скорость нагрева становится

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{3412 \ \text{БТЕ}}{\eta_t \eta_{\text{выроб}} \ \text{кВт ч}} = \frac{3412 \ \text{БТЕ}}{0.256 \times 0.98 \ \text{кВт ч}} = 13\,600 \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}} = 14\,349 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт}}$$

Соотношение топлива ($\dot{m}_{fuel}$) и воздуха ($\dot{m}_{air}$) рассчитывается по простой модели камеры сгорания:

$$\frac{f}{a} = \frac{\dot{m}_{\text{топлива}}}{\dot{m}_{\text{воздуха}}} = \frac{c_p''(T_3 - T_2)}{H_v} = \frac{1.076 \frac{\text{кг}}{\text{кг К}} (1273 \text{ K} - 529 \text{ K})}{46.1 \frac{\text{мДж}}{\text{кг}}} = 0.017$$

Таким образом, скорость потока топлива незначительна по сравнению со скоростью потока воздуха.

Принимая во внимание состояния (1, 2, 3 и 4) турбины внутреннего сгорания, диаграмма *T*–*s* выглядит так, как показано на рис. 5.6.

Большая часть развития к этому моменту была основана на утверждении, что скорость потока топлива мала по сравнению со скоростью воздушного потока. На основании этого утверждения было сформулировано уравнение 5.23 для тепловой эффективности газовой турбины. Тепловая эффективность газовой турбины, включая влияние скорости потока топлива, может быть разработана с учетом мощности, требуемой компрессором и извлекаемой турбиной, или

$$\begin{aligned} \dot{W}_c &= \dot{m}_{\text{air}} c_p (T_1 - T_2) \\ \dot{W}_e &= (\dot{m}_{\text{воздуха}} + \dot{m}_{\text{топлива}}) c_p' (T_3 - T_4) \end{aligned} \tag{5.26}$$

И скорость подачи тепла в камеру сгорания является

$$\dot{Q}_s = (\dot{m}_{\text{воздуха}} + \dot{m}_{\text{топлива}}) c_p'' (T_3 - T_4) \tag{5.27}$$

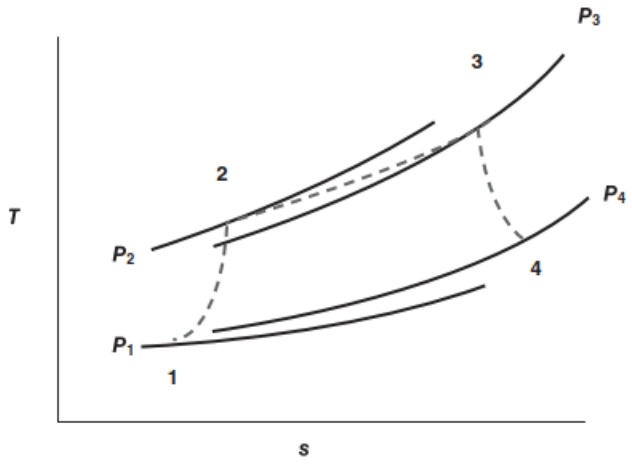


Рис. 5.6 Диаграмма *T*–*s* для примера 5.5.

Тепловая эффективность может быть выражена как

$$\eta_t = \frac{\sum \dot{W}}{\dot{Q}_s} = \frac{\dot{m}_{воз} c_p (T_1 - T_2) + (\dot{m}_{воз} + \dot{m}_{топ}) c'_p (T_3 - T_4)}{(\dot{m}_{воз} + \dot{m}_{топ}) c'_p (T_3 - T_2)}$$

$$= \frac{c_p (T_1 - T_2) + [1 + (f/a)] c'_p (T_3 - T_4)}{[1 + (f/a)] c''_p (T_3 - T_2)} \qquad (5.28)$$

где *f/a* – соотношение топлива к воздуху. Таким образом, чтобы учесть влияние скорости потока массы топлива, выражение тепловой эффективности с включенной скоростью потока массы топлива очень похоже на выражение тепловой эффективности, за исключением того, что коэффициент 1 + (*f/a*) появляется в значении работы турбины и добавления тепла. Цохен и соавт. (1972) указывают, что во многих газовых турбинах 1 или 2% сжатого воздуха отводится из компрессора и что расход топлива составляет 1 или 2% расхода воздуха. Следовательно, эти два, по существу, компенсируются, и, как результат, скорости потока массы топлива через компрессор и турбину имеют тенденцию быть равными.

5.5 Изменение в рабочем цикле турбины внутреннего сгорания

Рис. 5.1 и большая часть этой главы были посвящены аспектам газовых турбин, подобных воздушному циклу Брайтона. Тем не менее, поскольку цены на топливо по-прежнему остаются высокими, а напряжение на электрические сети становится все более ощутимо, термически эффективные турбины внутреннего сгорания становятся все более привлекательными. Хотя существует много вариантов базового цикла турбины внутреннего сгорания, особенно эффективны два: (1) добавление рекуператора (регенератора) и (2) добавление промежуточного охладителя компрессора.

Как показывают примеры, температуры выхлопных газов турбины значительно выше условий окружающей среды и обеспечивают возможность рекуперации тепла. Рекуператор – это теплообменник, который использует выхлопные газы турбины для предварительного нагрева воздуха, выходящего из компрессора, прежде чем воздух поступит в камеру сгорания. Повышение температуры воздуха, поступающего в камеру сгорания, уменьшает количество топлива, необходимого для заданной температуры на выходе из камеры сгорания. Уменьшение Q_S, знаменателя в выражении тепловой эффективности (уравнение 5.23), приводит к увеличению тепловой эффективности. Схема турбины внутреннего сгорания с регенератором представлена на рис.5.7.

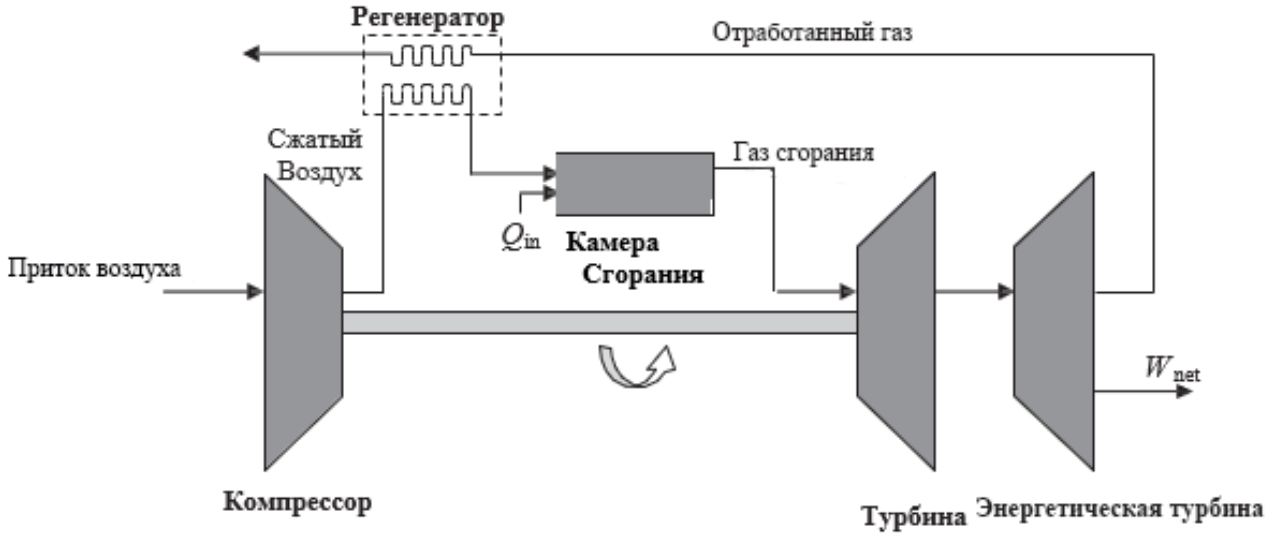


Рис. 5.7 Газовая турбина с регенератором.

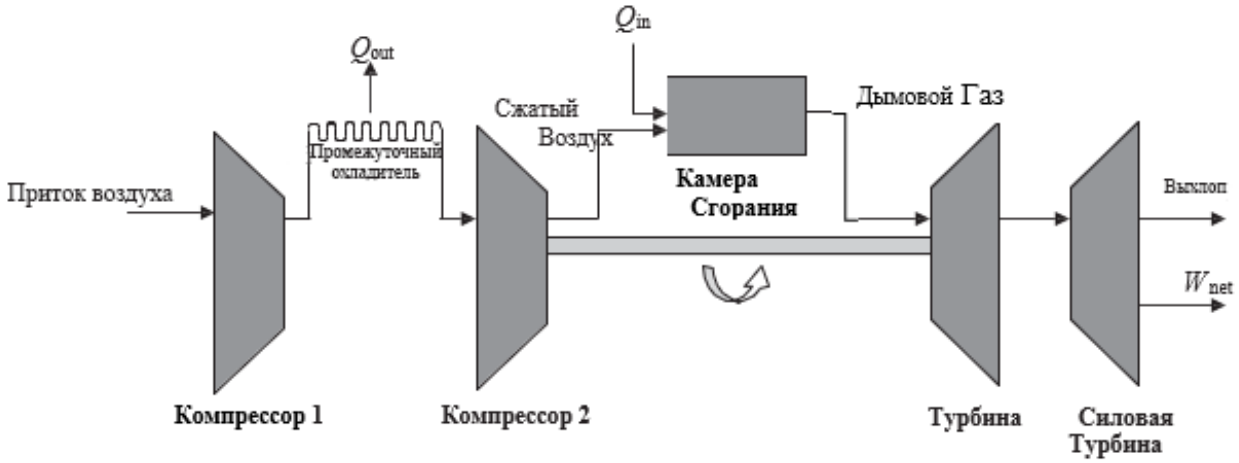


Рис. 5.8 Газовая турбина с промежуточным охладителем и двумя ступенями сжатия.

Другое распространенное изменение основного цикла турбины внутреннего сгорания производится с добавлением промежуточного охладителя. Как показывает уравнение 5.13, работа компрессора, необходимая для достижения заданного отношения давления, прямо пропорциональна температуре на входе. Таким образом, если процесс сжатия разбивается на две или более ступеней, тепло, отводимое от входной ступени, приводит к снижению температуры на входе выходной ступени, уменьшая работу компрессора, требуемую для последней ступени сжатия. На рис. 5.8 показана турбина внутреннего сгорания с промежуточным охладителем между секциями компрессора низкого и высокого давления.

Для наземных газовых турбин, таких как турбины внутреннего сгорания, дополнительный вес и объем регенератора или промежуточного охладителя не являются проблемой. Включение регенератора или промежуточного охладителя снижает скорость нагрева и увеличивает общую тепловую эффективность цикла.

5.6 Примеры коммерчески доступных турбин внутреннего сгорания

В продаже имеются турбины внутреннего сгорания с выходной электрической мощностью от 30 кВт (микро) до 250 МВт. Термин «микротурбина» применяется к турбинам внутреннего сгорания с электрической мощностью менее 60–200 кВт. Промышленные турбины обычно имеют электрическую мощность 0,5–250 МВт. Интернет является готовым источником общей информации о коммерчески доступных турбин внутреннего сгорания.

В США промышленные турбины внутреннего сгорания доступны от ряда компаний, включая Solar Turbines, Siemens-Westinghouse, United Technologies Corporation (подразделение Pratt & Whitney), Rolls-Royce (Северная Америка) и General Electric (GE) Energy. Представленные здесь примеры представляют собой сравнительно небольшой образец коммерчески доступных турбин внутреннего сгорания. Никаких рекомендаций или одобрения производителей не подразумевается при включении примеров в этом разделе; примеры являются просто примерами того, что коммерчески доступно.

5.6.1 Турбины Solar

Solar Turbines Incorporated, дочерняя компания Caterpillar Incorporated, производит линейку турбин внутреннего сгорания с электрической мощностью от 1 до 22 МВт. Более 15 000 установок Solar Turbines были установлены по всему миру. Solar Turbines предлагает системы турбин внутреннего сгорания для (1) нефтегазовой промышленности и (2) энергетической промышленности. В Таблице 5.2 приведено семейство турбин, доступных для нефтегазового сектора. Данный сектор важен, так как, этот сектор предъявляет жесткие требования к оборудованию. Таблица 5.2 также показывает номинальную мощность (киловатты и лошадиные силы) и номинальные тепловые нормы, соответствующие ISO (Британские тепловые единицы на киловатт-час, килоджоули на киловатт-час и

Британские тепловые единицы на лошадиные силы в час). В Таблице 5.3 приведено семейство турбин, доступных для энергетической промышленности, а также их номинальная мощность (киловатты) и номинальные тепловые нормы ISO (Британские тепловые единицы за киловатт-час и килоджоулей за киловатт-час). Как правило, в энергетической промышленности выработка обычно выражается в киловаттах, а скорость нагрева - в килоджоулях на киловатт-час или Британских тепловых единицах на киловатт-час. Эти две таблицы демонстрируют лишь незначительные различия в показателях производительности между нефтегазовым сектором и сектором производства электроэнергии. Информация для таблиц была получена из технических характеристик продукции Solar Turbines на их веб-сайте.

Для семейства турбин внутреннего сгорания Solar Turbines эффект размера интересен, так как скорость нагрева по существу монотонна с электрической мощностью - скорость нагрева уменьшается с увеличением мощности - за исключением турбин Марса и Меркурия.

Таблица 5.2 Семейство турбин Solar Turbines внутреннего сгорания (нефть и газ).

	Номинальная мощность		**Скорость нагрева**		
Название	**кВт**	**л.с.**	**БТЕ/кВт-ч**	**кДж/кВт-ч**	**БТЕ/л.с.-ч**
Сатурн 20	1.185	1590	13910	14670	10370
Кентавр 40	3.5	4700	12240	12905	9125
Кентавр 50	4.57	6130	11400	12030	8500
Телец 60	5.74	7700	10680	11265	7965
Телец 70	8.14	10915	9662	10195	7205
Марс 90	9.86	13220	10270	10830	7655
Марс 100	11.86	15900	9917	10465	7395
Титан 130	15.29	20500	9421	9940	7025
Титан 250	22.37	30000	8529	9000	6360

SolarTurbines внутреннего сгорания (выработка энергии).

Таблица 5.3 Семейство турбин

		Скорость нагрева	
Название	**Номинальная мощность (кВт)**	**БТЕ/кВт-ч**	**кДж/кВт-ч**
Сатурн 20	1.21	14020	14795
Кентавр 40	3.515	12240	12910
Кентавр 50	4.60	11630	12270
Меркурий 50	4.60	8865	9350
Телец 60	5.67	10830	11430
Телец 70	7.965	9955	10505
Марс 100	11.40	10365	10935
Титан 130	15.00	9695	10230
Титан 250	21.745	8775	9260

Веб-сайт SolarTurbines (https://mysolar.cat.com/en_US/products/gas-turbine-overview .html) содержит подробные спецификации своей линейки продуктов нефтегазовой отрасли. Популярной турбиной Solar является турбина внутреннего сгорания Марс 100 с номинальной мощностью ISO 11 860 кВт. Номинальное значение ISO для 15°C на уровне моря с относительной влажностью 60%. Спецификация Марс 100 доступна по адресу https://mysolar.cat.com/en_US/products/oil-and-gas/gas-turbine-packages/compressor-sets/mars-100.html. Как и во всех турбинах внутреннего сгорания, температура воздуха на входе оказывает значительное влияние на электрическую мощность и скорость нагрева для Марс 100. Снижение мощности при увеличении температуры на входе характерно для газовых турбин. В

условиях рейтинга ISO электрическая мощность Марс 100 составляет 11,86 МВт при тепловой мощности 9919 БТЕ/ (кВт-ч) и скорости потока выхлопных газов 337 900 фунт-массы/ч при 905°F. Электрическая и тепловая мощности варьируются, примерно, от 13,7 МВт и 9810 БТЕ/(кВт-ч) при -22 ° F до 10 МВт и 10 300 БТ /(кВт-ч) при 100° F монотонным образом.

5.6.2 Турбины GE Energy

GE Energy является крупным поставщиком различных энергетических систем в США. Компания предлагает турбины внутреннего сгорания с обозначением двух направлений эксплуатации: (1) нефть и газ и (2) энергия и вода. Таблица 5.4 содержит частичный перечень газовых турбин GE Energy, используемых для выработки электроэнергии, хотя большинство турбин в списке также доступны с выходной механической мощностью вместо выработки энергии. Их турбины внутреннего сгорания обозначены как производные авиационные или тяжелые. Подробности доступны на веб-сайте GE Energy (www.gepower.com) и доступны как «нефть и газ» или «энергия и вода».

Производные авиационные турбины внутреннего сгорания GE Energy основаны на их очень успешной линейке авиационных двигателей. Авиационная линейка газовых турбин компании обеспечивает мощность 11–100 МВт, а также возможность использования различных видов топлива. В дополнение к выработке энергии, газотурбинные установки GE Energy авиационного производства использовались для морских применений и различных применений в нефтегазовом секторе. Включены LMS100, LM6000, GE10 и семейство PGT (с компрессорами из газовых турбин LM1600, LM2000 или LM2500). Подробности доступны для каждой из газовых турбин на веб-сайте GE Energy. LM2500, возможно, самый успешный и долговечный из семейства турбин внутреннего сгорания GE, предлагает различную номинальную выходную электрическую энергию, различные области применения (в том числе морские) и различные особенности цикла.

Таблица 5.4 Примеры турбин внутреннего сгорания GE Power.

Название	Номинальная мощность(МВт)	Скорость нагрева БТЕ/кВт-ч	Скорость нагрева Дж/кВт-ч	Комментарии
GE10-1	11.25	10890	11489	Авиационная
PGT16 (LM1600)[a])	13.72	9758	10295	Авиационная
PGT20 (LM2000)[a])	17.46	9704	10238	Авиационная
PGT25 (LM2500)[a])	22.40	9402	9919	Авиационная
PGT25+G4	33.06	8575	9047	Авиационная
LM2500PE	23.30	9315	9827	Авиационная
LM6000	42.26	8329	8787	Авиационная
LMS100	98.20	7580	7997	Авиационная
MS5001	26.83	12026	12687	
MS5002E	31.10	9749	10285	
MS6001B	42.10	10645	11230	
MS7001EA	85.40	10417	10990	
MS9001E	126.10	10095	10650	
7F.05	227	8680	9157	Простой цикл
2x17F.05	688	5740	6056	Комбинированный цикл
7HA.02	330	8240	8693	Простой цикл
2x17HA.02	976	5570	5876	Комбинированный цикл
9F.05	299	8810	9295	Простой цикл
9HA.02	470	8220	8672	Простой цикл

Источник: Адаптировано из Gas Turbine World (2014) и GE Oil & Gas (2011).

a) Обозначает источник компрессора.

GE Energy предлагает множество вариантов своей линейки газовых турбин; значения в Таблице 5.4 являются репрезентативными и представляет собой только образец доступных систем. LM2500 был получен из авиационного двигателя CF6, используемого на больших коммерческих и военных самолетах. LM2500 и LMS100 будут рассмотрены более подробно позже в этом разделе.

Мощные газовые турбины доступны с электрической мощностью от 26 до 470 МВт (в простой конфигурации цикла) и были специально разработаны для коммунальных и промышленных применений. Конфигурации 7F и 9F неуклонно развиваются и обеспечивают максимальную производительность газовых турбин GE Energy. При работе в комбинированном цикле сверхмощные 7F и 9F обладают впечатляющими выходными величинами (до 976 МВт) и мощностью нагрева (до 5570 БТЕ/(кВт-ч)).

Учитывая диапазон выходных мощностей (11–976 МВт), количество и вариации, варианты мощности (выработка электроэнергии или извлечение механической энергии), а также количество единиц в эксплуатации, GE Energy является доминирующим игроком на арене турбин внутреннего сгорания.

На рис. 5.9 показан чертеж выреза для LM2500. В Таблице 5.4 представлена сводка рабочей характеристики газовой турбины LM2500, а на рис. 5.10 показана электрическая мощность и скорость нагрева в зависимости от температуры на входе.

LMS100 – это усовершенствованная производная авиационная турбина внутреннего сгорания, в которой используется промежуточное охлаждение между ступенями компрессора низкого и высокого давления. Уникальной особенностью LMS100 является то, что теплообменник промежуточного охладителя расположен вдали от установки двигателя, а не рядом с блоком двигателя.



Рис. 5.9 Разрез LM2500. *Источник*: Воспроизведено с разрешения GE Power & Water.

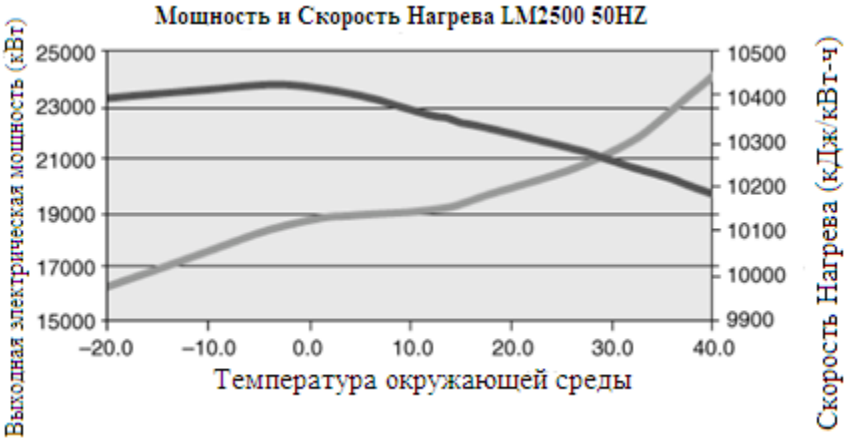


Рис. 5.10 Мощность и скорость нагрева LM2500.

Источник: Воспроизведено с разрешения GE Power & Water.

Выходящий воздух из секции компрессора низкого давления направляется в теплообменник промежуточного охладителя, там он охлаждается и возвращается на вход секции компрессора высокого давления. Такое расположение обеспечивает значительную гибкость при выборе конструкции теплообменника с промежуточным охладителем. Разрез LMS100 представлен на рис.

5.11. Свитки сбора и выгрузки промежуточного охладителя указаны на рисунке. Подробное обсуждение LMS100 дано у Реале (2004) и доступно на веб-сайте GE Power.

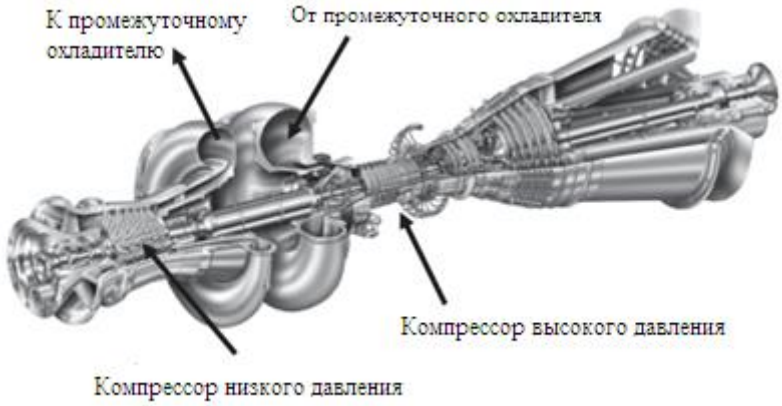


Рис. 5.11 Разрез LMS100. *Источник*: Воспроизведено с разрешения GE Power & Water.

Таблица 5.5 Номинальные показатели LMS100.

Модель	Базовый рейтинг ISO(кВт)	Скорость нагрева (БТЕ/кВт-ч)	Эффективность(%)	Поток массы (фунт/с)	Скорость турбины (об/мин)	Температура выхлопных газов(°F)
LMS100P	97718	7592	45.0	453	3600	783
LMS100P	97878	7579	45.0	453	3600	784
LMS100P	102795	7287	46.8	472	3600	747
LMS100P	102833	7285	46.8	472	3600	749
LMS100P	103112	7773	43.9	469	3600	770
LMS100P	103162	7769	43.9	469	3600	767
LMS100P ASTIG	112166	6845	49.9	438	3600	729

Источник: GE Energy.

Номинальные рабочие характеристики при стандартных условиях рейтинга ISO для различных версий LMS100 приведены в Таблице 5.5. Выход LMS100 в зависимости от температуры на входе показан на рис. 5.12, а на рис. 5.13 представлена скорость нагрева в зависимости от температуры на входе для версии LMS100 STIG (паровая газовая турбина).

5.6.3 Турбины Capstone

Capstone Turbines производит микротурбины мощностью от 30 до 200 кВт и является, пожалуй, самым известным из производителей микротурбин в США. Capstone предлагает турбину C30 с номинальной мощностью 30 кВт, турбину C65 с номинальной мощностью 65 кВт, и C200 с мощностью 200 кВт, Турбины Capstone предлагаются в версиях, которые используют различные виды топлива и предлагают несколько вариантов рекуперации тепла отработавших газов. Основной пример C30, работающей на природном газе, будет представлен здесь. C30 имеет высоту 70, ширину 30, глубину 60 и весит 891 фунт. В Таблице 5.6 приведены технические характеристики в условиях ISO. Дополнительная информация доступна на веб-сайте Capstone (www.capstoneturbine.com).

Разрез базовой конфигурации турбины C30 приведен на рис. 5.14. Компактная компоновка C30 сильно отличается от компоновок гораздо более мощных турбин внутреннего сгорания, рассмотренных ранее. Микротурбины, работающие на природном газе без рекуператоров, производят электроэнергию с максимальной эффективностью около 15%.

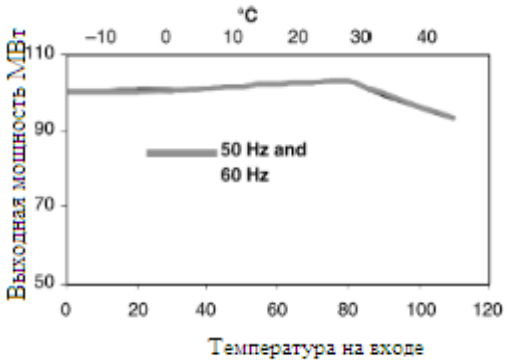


Рис. 5.12 Выход мощности LMS100 как функция температуры на входе.
Источник: Воспроизведено с разрешения GE Power & Water.

Таблица5.6 Технические характеристики Capstone C30.

Выходная мощность	30 кВт
Скорость нагрева	13100 БТЕ/кВт-ч
Электрическая эффективность (LHV)	26%
Температура выхлопных газов	530°F
Скорость потока массы	0.68 фунт/с
Энергия выхлопных газов	310000 БТЕ/ч

Источник: Capstone Turbines.

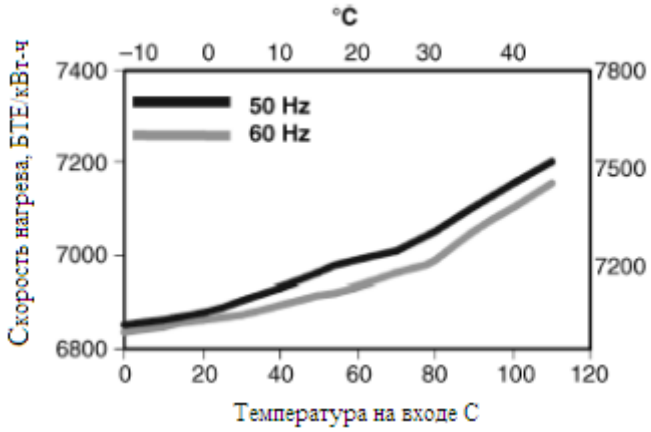


Рис. 5.13 Скорость нагрева LMS100 STIG как функция температуры на входе.
Источник: Воспроизведено с разрешения GE Power & Water.

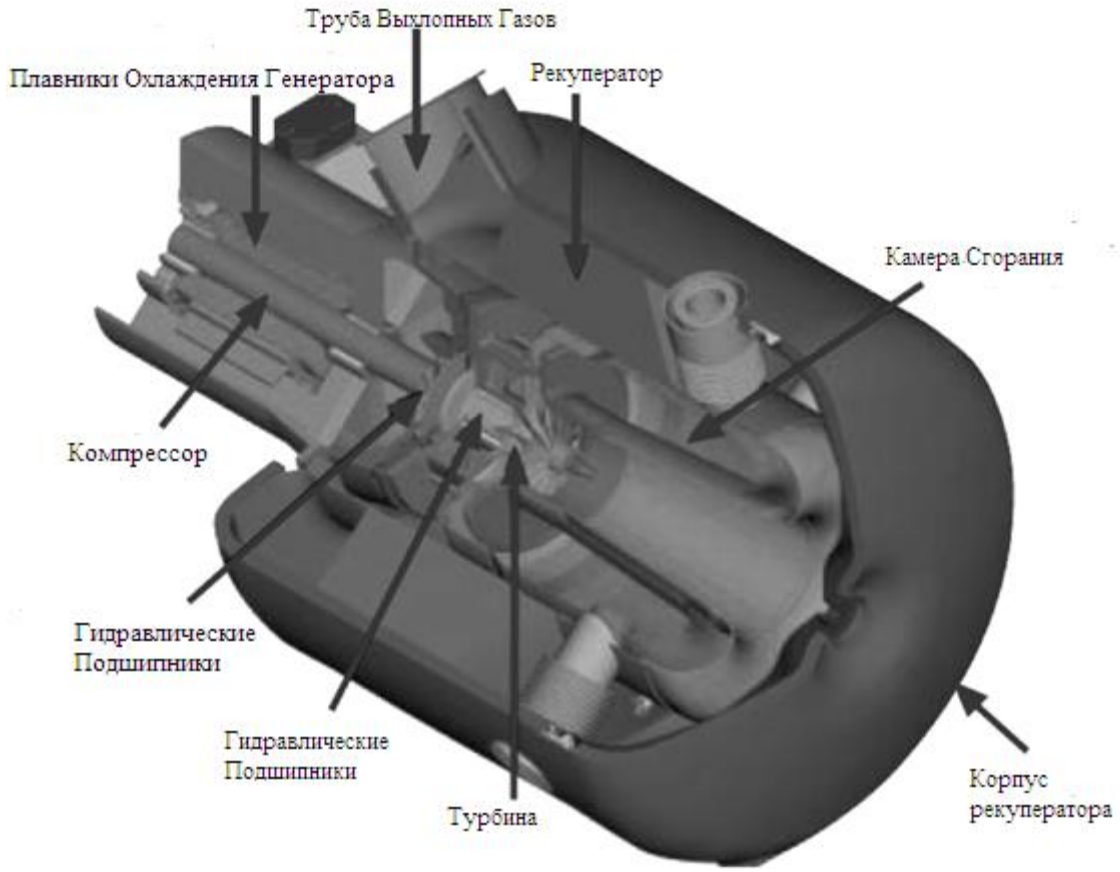


Рис. 5.14 Разрез турбины Capstone C30. *Источник*: Capstone Turbines.

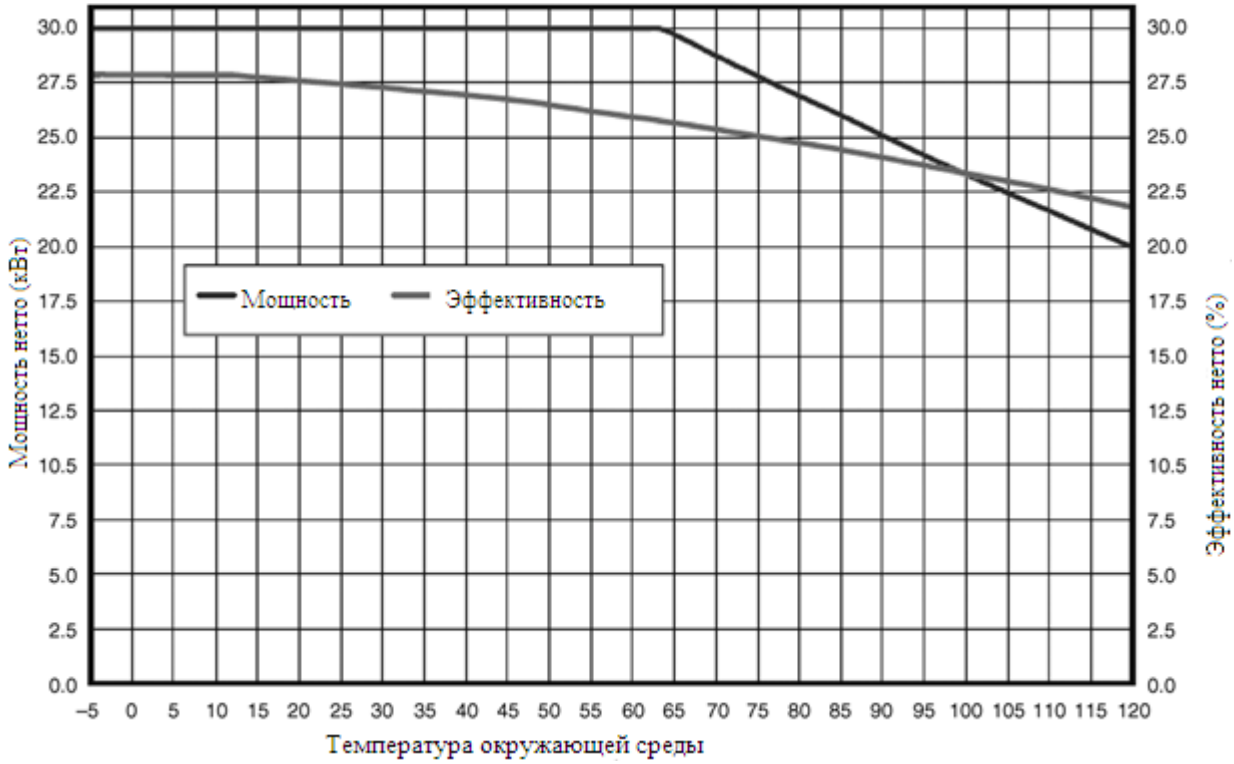


Рис. 5.15 Выходная мощность и эффективность турбины C30. *Источник*: Capstone Turbines.

Таким образом, большинство микротурбин оснащены рекуператорами, которые обеспечивают КПД выработки электроэнергии от 20% до 30%. Микротурбины с рекуператором обеспечивают экономию топлива на 30–40% путем предварительного нагрева поступающего воздуха для горения. Указан рекуператор C30, а также корпус рекуператора. Вращающиеся компоненты прикреплены к одному

валу и опираются на гидравлические подшипники. Гидравлические подшипники допускают скорость вращения до 96 000 об/мин. Поскольку генератор охлаждается входящим воздушным потоком, и используются гидравлические подшипники, масло, смазочные материалы или охлаждающие жидкости не требуются.

Выходная электрическая мощность и электрическая эффективность в зависимости от входной температуры показаны на рис. 5.15. Подобно турбинам внутреннего сгорания с большой выходной мощностью, производительность C30 снижается при повышении температуры окружающей среды.

Турбины внутреннего сгорания относительно недороги по сравнению с большинством децентрализованных систем производства электроэнергии. Базовая стоимость турбин внутреннего сгорания колеблется от 300 долл. США/кВт до 1000 долл. США/кВт и, как правило, уменьшается с увеличением выходной мощности. Турбины внутреннего сгорания стоят дороже, чем двигатели внутреннего сгорания с меньшей выходной мощностью, но стоят дешевле, чем двигатели внутреннего сгорания с большей выходной мощностью. Затраты на установку и стоимость других необходимых компонентов, а также другие расходы владельца и прочие расходы увеличивают первоначальные капитальные затраты на 30–50%. Компрессор на природном газе является примером необходимого компонента, поскольку компрессоры на природном газе необходимы для удовлетворения высоких требований к давлению газа турбин внутреннего сгорания. Компрессоры, работающие на природном газе, увеличивают стоимость турбинной системы сгорания на 5–10%. Кроме того, если добавить возможность рекуперации тепла, капитальные затраты возрастут на 100–200 долл. США за киловатт. При полной установке типичная стоимость установки турбины внутреннего сгорания с рекуперацией тепла находится в диапазоне от 1000 до 1200 долл. США/кВт.

5.6.4 Другие поставщики газовых турбин

Помимо Solar Turbines, GE Energy и Capstone, другие известные компании, предлагающие газовые турбины для энергетических применений, включают Dresser Rand (http://www.dresser-rand.com/products-solutions/), Pratt & Whitney (http://www.pwps.com/) и Siemens (http://www.energy.siemens.com/hq/en/fossil-power-generation/gas-turbines/). В дополнение к Capstone, Ingersoll Rand предлагает газовую турбину номинальной мощностью 250 кВт (http://www.ingersollrandproducts.com/ap-en/solutions/microturbine-energy-solutions/chp-combined-heat-and-power).

5.7 Заключение

В этой главе мы рассмотрели основы турбин внутреннего сгорания, а также исследовали некоторые типичные коммерчески доступные турбины внутреннего сгорания. Основное внимание было уделено использованию турбин внутреннего сгорания только для выработки электроэнергии. Однако, как видно из температур выхлопа газа в примерах, существует возможность значительного восстановления тепловой энергии. В главе 11 рассматривается концепция ТЭЦ или децентрализованного производства электроэнергии в сочетании с рекуперацией и использованием тепловой энергии отработавших газов, как от турбины внутреннего сгорания.

Литература

Cohen, H., Rogers, G.F.C., and Saravanamuttoo, H.I.H. (1972) Gas Turbine Theory, 2nd edn. Longman, London.

Gas Turbine World (2014) 44 (1).http://www.gasturbineworld.com/assets/14–jan-feb-t-of-c.pdf

(accessed November 1, 2016).

GE Oil & Gas (2011) Gas Turbines. https://www.geoilandgas.com/sites/geog.dev.local/files/ge-oil-and-gas-turbines-product-information.pdf (accessed November 1, 2016).

Hodge, B.K. and Koenig, K .(1995) Compressible Fluid Dynamics with Personal Computer Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Reale, M.J. (2004) New High Efficiency Simple Cycle Gas Turbine–GE'sLMS100.General Electric Company, GER 4222A. https://powergen.gepower.com/content/dam/gepower-pgdp/global/en_US/documents/technical/ger/ger-4222a-new-high-efficiency-simple-cycle-gas-turbine-lms100.pdf(accessed October 17, 2016).

Wilson, D.G. (1984)The Design of High-efficiency Turbomachinery and Gas Turbines. MIT Press, Cambridge, MA.

Дополнительная литература

Bathie, W.W.(1984)Fundamentals of Gas Turbines. John Wiley & Sons, Inc., New York.
Harman, R.T.C. (1981) Gas Turbine Engineering. John Wiley & Sons, Inc. /Halsted Press, New York.

6 Основы солнечной энергии

6.1 Введение

В данной главе, а также в Главах 7, 8 и 9 будет исследована солнечная энергия. Цели данной главы – рассмотреть передачу тепла излучением и представить базовую информацию о солнечной энергии, необходимую для понимания способов ее применения, которая приведена в следующих трех главах.

6.2 Обзор передачи тепла излучением

Понимание солнечной энергии должно основываться на спектральном характере солнечного излучения. В данном разделе рассматривается фундаментальная информация о передаче тепла излучением, необходимая для работы с гелиотехникой.

В отношении рассмотрения солнечной энергии выделяется две интересных области, одна из которых – характеристика энергии солнца, другая – реакция поверхности на эту энергию. Начать нужно с учета характеристик передачи тепла излучением. Тепловое излучение можно рассматривать как средство переноса фотонов или распространения электромагнитных волн. Для распространения излучения в какой-либо среде частота и длина волны соотносятся как

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{6.1}$$

где c – это скорость света в среде, λ – длина волны, а ν – частота. В вакууме c = 2,998*10^8 м/с.

Электромагнитный континуум как функция длины волны разделен на различные диапазоны. Диапазоны и длины волн разграничены в Таблице 6.1. Интерес для гелиотехники представляет тепловое излучение с длиной волны в диапазоне $10^{-1} < \lambda < 10^2$ мкм. Видимая часть спектра находится в диапазоне $0{,}4 < \lambda < 0{,}7$ мкм и ограничена ультрафиолетовым и инфракрасным. Часть ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов также относится к тепловому излучению.

Амплитуда теплового излучения изменяется с длиной волны и увеличивает спектральное распределение. Помимо спектральной природы теплового излучения основной характеристикой является распределение по направлениям. Чтобы выразить тепловое излучение количественно, необходимо изучить как спектральные характеристики, так и характеристики направления.

Хорошо было бы начать с учета характеристик абсолютно черного тела.

1) Абсолютно черное тело поглощает любое падающее на него излучение независимо от его длины волны и направления.

2) Для заданной температуры и длины волны никакая поверхность не может излучать больше энергии, чем абсолютно черное тело.

3) Абсолютно черное тело относится к диффузным излучателям (вне зависимости от направления).

Таблица 6.1 Электромагнитный континуум и диапазоны излучения

Название	**Диапазон (мкм)**
Гамма	$\lambda < 10^{-4}$
Рентгеновское	$10^{-4} < \lambda < 10^{-2}$
Ультрафиолетовое	$10^{-2} < \lambda < 0{,}4$
Тепловое излучение	$10^{-1} < \lambda < 10^{2}$
Инфракрасное	$0{,}7 < \lambda < 10^{2}$
Микроволновое	$\lambda > 10^{2}$

Плотность спектральной мощности излучения абсолютно черного тела получаем при помощи распределения Планка (Бергман и соавт., 2011)

$$E_{\lambda b}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5[_{\text{экспо}}(C_2/\lambda T) - 1]} \tag{6.2}$$

где C_1=3,742× 10^8 *Вт мкм*^{4}/*м*^{2} и C_2=1,439× 10^4 *мкм К*. Плотность спектральной мощности излучения $E_{\lambda b}$ обычно выражается в ваттах на микрометр на квадратный метр, что обозначает мощность излучения определенной длины волны на единицу площади. Индексы λ и b в уравнении 6.2

показывают, что мощность излучения соответственным образом связана с длиной волны (спектральной) и вычисляется исходя из характеристик абсолютно черного тела. Общая плотность мощности излучения абсолютно черного тела представляет собой интеграл плотности спектральной мощности излучения по всем длинам волн или

$$E_b(\lambda T) = \int_0^\infty E_{\lambda,b}\, d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1}{\lambda^5[\exp(C_2/\lambda T) - 1]} d\lambda = \sigma T^4 \qquad (6.3)$$

где $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$Вт/(м^{2}К^4) – постоянная Стефана-Больцмана. Функциональная зависимость излучения абсолютно черного тела T^4 является одной из наиболее сильных функциональных зависимостей в физике и подчеркивает важность температуры для теплового излучения

Имеется основание для дополнительного изучения уравнения 6.2. Рис. 6.1, начерченный в системе логарифмических координат, представляет графическое исследование плотности спектральной мощности излучения абсолютно черного тела для нескольких разных температур. Одно из учитываемых значений температуры – T = *5800 K,* поскольку спектральное распределение теплового излучения солнца близко к такому излучению абсолютно черного тела при 5800 К. Выраженный эффект влияния температуры на спектральную мощность излучения абсолютно черного тела можно увидеть по его диапазонам: восемь амплитудных интервалов от 1 Вт/(мкм м^2) до примерно 10^8 Вт/(мкм м^2). Также интересен тот факт, что местоположение максимальной спектральной мощности излучения дано как функция температуры поверхности. Например, при T = 300K (близко к комнатной температуре) максимум расположен примерно на $\lambda = 10$ мкм, но при повышении температуры максимум сдвигается к более коротким волнам; таким образом, при *T* = 5800K максимум близок к 0,5 мкм. Неудивительно, что излучение с $\lambda = 0.5$ мкм находится в середине видимой части спектра, для которого наиболее приспособлено зрение живущих на Земле существ. Диапазон теплового излучения, приведенный в таблице 6.1, совпадает с результатами с Рисунка 6.1, поскольку указанный на рис. 6.1 диапазон $10^{-1} < \lambda < 10^2$ содержит практически всю излучаемую энергию для соответствующих температур. Общая мощность излучения абсолютно черного тела находится под кривой, а мощность излучения абсолютно черного тела при *T* = 5800K в 140 000 раз отличается от нее же при *T* = 300K.

Для многих факторов передачи тепла излучением нужна часть энергии в интервале длины волны. Основой получения такой части является функция излучения абсолютно черного тела.

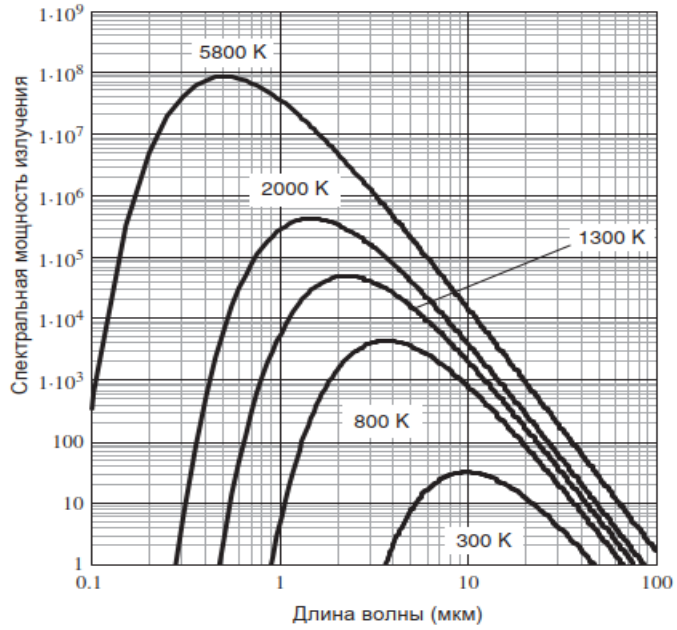


Рис. 6.1 Плотность спектральной мощности излучения абсолютно черного тела для выбранных температур поверхности.

С использованием распределения Планка часть тепловой энергии в диапазоне длин волн от нуля до λ вычисляется следующим образом:

$$F(0-\lambda T)=\frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,\mathrm{b}}\,\mathrm{d}\lambda}{\int_0^{\infty} E_{\lambda,\mathrm{b}}\,\mathrm{d}\lambda}=\frac{\int_0^{\lambda} E_{\lambda,\mathrm{b}}\,\mathrm{d}\lambda}{\sigma T^4}=\int_0^{\lambda T}\frac{E_{\lambda,\mathrm{b}}}{\sigma T^5}\,\mathrm{d}(\lambda T) \tag{6.4}$$

Рис. 6.2 дает графическое представление об этом.

Многие учебники по теплопередаче содержат таблицы функций излучения абсолютно черного тела. Можно также объединить уравнения 6.2 и 6.4, чтобы получить значения функций излучения абсолютно черного тела. Однако Хауэлл и соавт. (2010) разработали замкнутый ряд, который повторяет в рамках одного процента, принятые значения функций излучения абсолютно черного тела, а также представляет удобное выражение для решения многих задач. Их ряд описывается следующим образом:

$$F(\zeta)=\frac{15}{\pi^4}\sum_{n=1}^{20}\frac{\mathrm{e}^{-n\zeta}}{n}\left(\frac{6}{n^3}+6\frac{\zeta}{n^2}+\zeta^3+3\frac{\zeta^2}{n}\right) \tag{6.5}$$

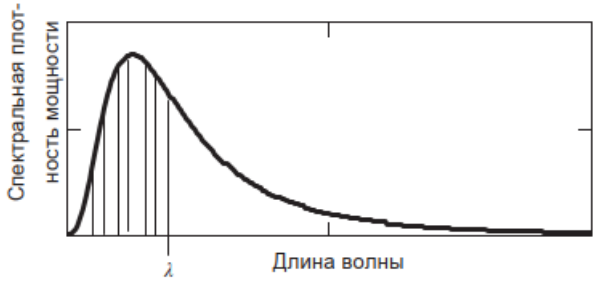


Рис. 6.2 Визуальное представление функции излучения абсолютно черного тела

Таблица 6.2 Таблица функций излучения абсолютно черного тела.

λT мкм К	**F (0- *λT*)**	***λT мкм К***	**F (0- *λT*)**	***λT мкм К***	**F (0- *λT*)**	***λT мкм К***	**F (0- *λT*)**
200	0	5 200	0,6579				
400	$1{,}8554 \times 10^{-12}$	5 400	0,6802				
600	$9{,}263 \times 10^{-8}$	5 600	0,7009				
800	$1{,}6396 \times 10^{-5}$	5 800	0,72				
1 000	0,0003	6 000	0,7377				
1 200	0,0021	6 200	0,754	10 500	0,9236		
1 400	0,0078	6 400	0,7691	11 000	0,9318		
1 600	0,0197	6 600	0,7831	11 500	0,9389		
1 800	0,0393	6 800	0,796	12 000	0,945		
2 000	0,0,0667	7 000	0,808	12 500	0,9504	25 000	0,9922
2 200	0,1008	7 200	0,8191	13 000	0,9551	30 000	0,9953
2 400	0,1402	7 400	0,8294	13 500	0,9592	35 000	0,997
2 600	0,183	7 600	0,839	14 000	0,9628	40 000	0,9979
2 800	0,2278	7 800	0,8479	14 500	0,9661	45 000	0,9985
3 000	0,2731	8 000	0,8562	15 000	0,9689	50 000	0,9989
3 200	0,318	8 200	0,8639	15 500	0,9715	55 000	0,9992
3 400	0,3616	8 400	0,8711	16 000	0,9738	60 000	0,9993
3 600	0,4035	8 600	0,8778	16 500	0,9758	65 000	0,9995
3 800	0,4433	8 800	0,8841	17 000	0,9776	70 000	0,9996
4 000	0,4808	9 000	0,8899	17 500	0,9793	75 000	0,9997
4 200	0,5159	9 200	0,8954	18 000	0,9808	80 000	0,9997
4 400	0,5487	9 400	0,9006	18 500	0,9822	85 000	0,9998
4 600	0,5792	9 600	0,9054	19 000	0,9834	90 000	0,9998
4 800	0,6074	9 800	0,9099	19 500	0,9845	95 000	0,9998
5 000	0,6336	10 000	0,9141	20 000	0,9855	1×10^5	0,9998

где $\zeta = C_2/\lambda T$. Таблица 6.2 содержит табличные значения уравнения 6.5 как функции λT. Таблица 6.2 и уравнение 6.5 будут использованы в решении задач (примеры), требующих использования функции излучения абсолютно черного тела. Пример 6.1 иллюстрирует использование функции излучения абсолютно черного тела.

Пример 6.1

Каково процентное содержание энергии в видимой части спектра для абсолютно черного тела при температуре 5800 К? Сравните с процентным содержанием энергии в видимой части спектра для абсолютно черного тела при температуре 3000 К.

Решение: представим и обсудим два разных подхода к поиску решения: (1) использование Таблицы 6.2 и (2) использование уравнения 6.5 и Mathcad. Видимый спектр охватывает диапазон длин волн $0{,}4 \leq \lambda \leq 0{,}7$ мкм. Рис. 6.3, для которого $\lambda_1 = 0{,}4$ мкм и $\lambda_2 = 0{,}7$, иллюстрирует

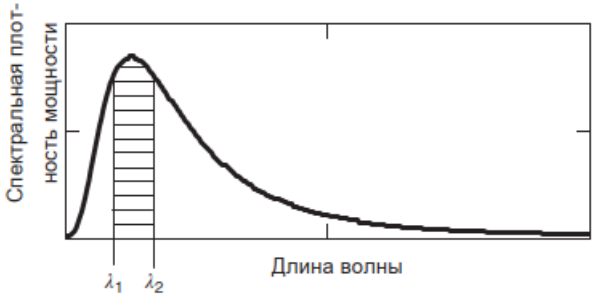


Рис. 6.3 Диапазон видимого спектра для абсолютно черного тела при 5800 К.

зону интереса для абсолютно черного тела при 5800 К. $F(0 - \lambda_2 T)$ дает часть лучистой энергии от 0 до λ_2, а $(0 - \lambda_1 T)$ дает часть от 0 до λ_2. Часть лучистой энергии, содержащаяся между λ_1 и λ_2, может быть выражена как разность или

$$F(\lambda_2 T - \lambda_1 T) = F(0 - \lambda_2 T) - F(0 - \lambda_1 T) \tag{6.6}$$

Уравнение 6.6 – основное алгебраическое отношение функции излучения.

Прежде всего проиллюстрируем подход для Таблицы 6.2 Для абсолютно черного тела при 5800 К имеем

$\lambda_1 T = 0{,}4$ мкм $\times$ 5800 К $= 2320$ мкм К

$\lambda_2 T = 0{,}7$ мкм $\times$ 5800 К $= 4060$ мкм К

Интерполяция между записями в Таблице 6.2 дает

F(2320 мкм К)=0,1244

F(4060 мкм К)=0,4913

Таким образом, часть лучистой энергии, содержащаяся между $\lambda_1 = 0{,}4$ мкм и $\lambda_2 = 0{,}7$ мкм, равна

$$F(\lambda_2 T - \lambda_1 T) = 0.4913 - 0.1244 = 0.3669$$

Отсюда, для абсолютно черного тела при температуре 5800 К 37% лучистой энергии содержится в видимой части спектра.

Ту же самую процедуру применяем для абсолютно черного тела при температуре 3000 К за исключением того, что теперь используется температура не 5800, а 3000 К. Результаты можно обобщить следующим образом

$\lambda_1 T = 0{,}4$ мкм $\times$ 3000 К $= 1200$ мкм К

$\lambda_2 T = 0{,}7$ мкм $\times$ 3000 К $= 2100$ мкм К

F(1200 мкм К)=0,0021

F(2100 мкм К)=0,0838

$F(\lambda_2 T - \lambda_1 T)$= 0.0830-0.0021=0.0817

Следовательно, для абсолютно черного тела при температуре 3000 K только 8% лучистой энергии находится в видимом диапазоне.

Рис. 6.4 представляет решение с использованием уравнения 6.5 и Mathcad. Следуем той же процедуре, единственное крупное отличие состоит в использовании уравнения 6.5 и функции излучения абсолютно черного тела. Использовать выражение Хауэлла и соавт. (2010) очень удобно, поскольку это устраняет необходимость сверяться с таблицами и делать интерполяции для решения задач спектрального распределения. Как будет продемонстрировано в оставшейся части раздела, эта способность будет важна для решения ряда задач на тепловое излучение, не ограниченных формулами абсолютно черного тела. Результаты на рис. 6.4 более точны, чем при использовании Таблицы 6.2, так как исключена необходимость в интерполяции, но различия между двумя подходами столь незначительны, что для большинства целей пригодны оба.

$\sigma := 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{Вт}{м^2 \cdot K^4}$ $мкм := \frac{м}{10^6}$ Постоянная Стефана-Больцмана и мкм.

$C_1 := 3.742 \cdot 10^8 \cdot \frac{мкм^4}{м^2} Вт$ $C_2 := 1.439 \cdot 10^4 мкм \cdot K$ C_1 и C_2 для выражения Планка для плотности спектральной мощности.

$F(\zeta) := \frac{15}{\pi^4} \cdot \left[\sum_{n=1}^{20} \frac{e^{-n \cdot \zeta}}{n} \cdot \left(\frac{6}{n^3} + 6 \cdot \frac{\zeta}{n^2} + \zeta^3 + 3 \cdot \frac{\zeta^2}{n} \right) \right]$ $\zeta = \frac{C_2}{\lambda \cdot T}$ Определение ζ

Абсолютно черное тело при 5800 K.

$\lambda T_1 := 0{,}4 \cdot мкм \cdot 5800 \cdot К$ $F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) = 0{,}12392$

$\lambda T_2 := 0{,}7 \cdot мкм \cdot 5800 \cdot К$ $F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) = 0{,}49154$

$F_{видимая} := F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) - F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right)$ $F_{видимая} = 0{,}36762$

Абсолютно черное тело при 3000 K.

$\lambda T_1 := 0{,}4 \cdot мкм \cdot 3000 \cdot К$ $F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) = 2{,}13115 \times 10^{-3}$

$\lambda T_2 := 0{,}7 \cdot мкм \cdot 3000 \cdot К$ $F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) = 0{,}083$

$F_{видимая} := F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) - F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right)$ $F_{видимая} = 0{,}08087$

Рис. 6.4 Лист Mathcad: решение примера 6.1.

Источником солнечной энергии на Земле, очевидно, является солнце. Солнце располагается на расстоянии $1{,}50 \times 10^{11}$ м от Земли и имеет диаметр $1{,}39 \times 10^9$м. Солнечная постоянная, определенная как поток солнечной энергии, падающей на поверхность, стандартно ориентированную относительно лучей солнца, имеет среднее значение 1353 Вт/м^2. Однако солнечная постоянная – поток, падающий на внешнюю границу атмосферы. Для наземных условий важно то, что поток солнечной энергии падает на поверхность Земли после прохождения лучей через атмосферу. На рис. 6.5 дается количественная оценка потока солнечных лучей.

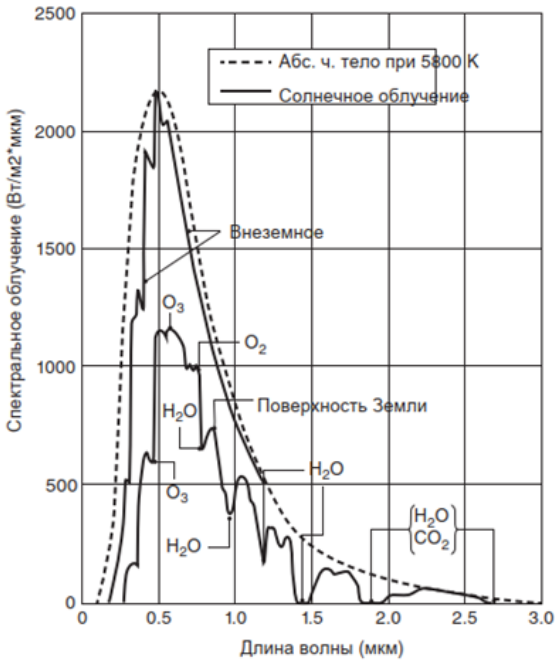


Рис. 6.5 Характеристики солнечного облучения. Источник: Бергман и соавт. (2011).

Спектральное распределение проиллюстрировано как внеземное (падающее на границу атмосферы) и падающее на поверхность Земли. Внеземной солнечный поток имеет примерное спектральное распределение как у излучения абсолютно черного тела при 5800 K, *но не обладает всей мощностью излучения абсолютно черного тела,* что подтвердит сравнение Рис. 6.1 и 6.2.По мере прохождения солнечного потока через атмосферу, он ослабляется из-за присутствия кислорода (O_2), озона (O_3), водяного пара (H_2O) и диоксида углерода (CO_2). В результате, поток солнечного излучения и поверхности земли значительно ниже, чем поток солнечного излучения в космическом пространстве. По мере прохождения солнечного потока через атмосферу его амплитуда и распределение по направлениям меняются. Эти изменения вызваны поглощением и рассеиванием. Внутренняя часть Рисунка 6.5 демонстрирует поглощение лучистой энергии атмосферными газами. В ультрафиолетовом диапазоне ($10^{-2} < \lambda < 0{,}4$ мкм) озон отвечает за поглощение и приводит к тому, что поток солнечного излучения практически не достигает поверхности для $\lambda < 0{,}3$ мкм. Частично беспокойство по поводу разрушения озонового слоя связаны с тем, что без озона куда большая часть теплового излучения в ультрафиолетовом диапазоне достигала бы поверхности Земли и приводила бы к долгосрочным вредным последствиям. В инфракрасном диапазоне поглощение происходит, прежде всего, из-за водяных паров, хотя также роль играет CO_2. Для всех длин волн тепловое излучение также поглощается твердыми частицами, находящимися в атмосфере.

В дополнение к поглощению, рассеивание происходит в результате перенаправления солнечных лучей. Рассеяние Рэлея, применимое к молекулам газа, предусматривает практически однородное рассеивание теплового излучения. Однородность рассеяния Рэлея означает, что примерно половина рассеиваемого излучения перенаправляется вдаль от Земли. В любой точке поверхности Земли рассеянное излучение присутствует во всех направлениях. Рассеяние Ми, происходящее под влиянием твердых частиц в атмосфере, мало влияет на переориентацию солнечных лучей. Бергман и соавт. (2011) обобщает следующее убедительное обоснование:

Часть излучения, которая проникла в атмосферу без рассеяния (или поглощения), находится в направлении зенитного угла и называется прямым излучением. Рассеянное излучение исходит со всех сторон, хотя его интенсивность наиболее высока в направлении, близком к направлению прямого излучения. Однако, поскольку интенсивность излучения часто принимается не зависящей от направления, излучение называется диффузным.

Общее тепловое излучение, достигающее поверхности, представляет собой сумму прямого и диффузного компонентов. В ясный день диффузный может составлять только 10% от общего количества, тогда как в облачный это – фактически 100%.

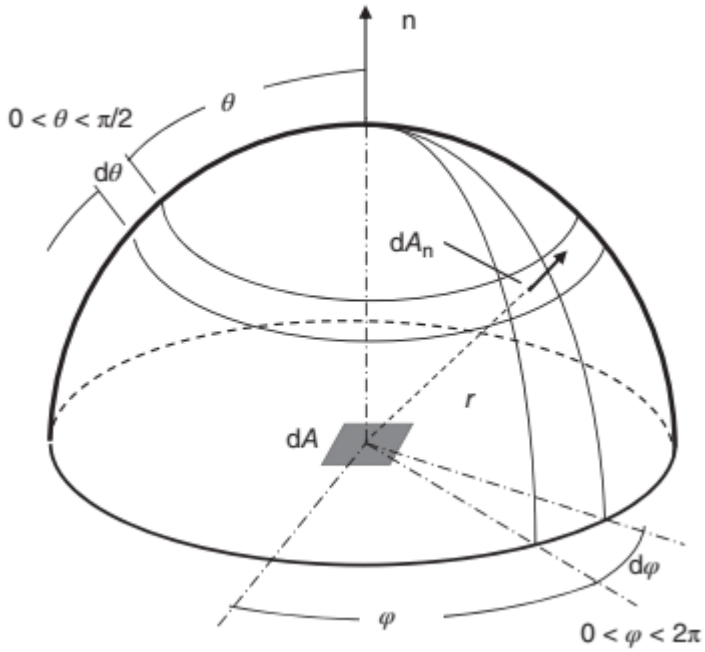


Рис. 6.6 Полусфера вокруг зоны-источника теплового излучения.

Поняв характеристики теплового излучения солнца, надлежит учесть основы передачи тепла к поверхности излучением. К конкретным темам относится (1) что происходит при попадании теплового излучения на поверхность и (2) излучающие характеристики поверхности. Прежде проверим способность к излучению.

Излучающие характеристики абсолютно черного тела уже установлены. Излучение не от абсолютно черного тела может иметь характеристики направления и спектральные характеристики. Учитываем, как на рис. 6.6, полусферу, окружающую элементарную площадь, из которой исходит тепловое излучение. Полусфера у излучающей площади dA – удобный механизм для визуализации геометрии теплового излучения. Спектральная интенсивность $I_{\lambda,e}$ испускаемого излучения определяется как скорость, при которой лучистая энергия испускается с длиной волны λ, в направлении (θ, φ) на единицу площади излучающей поверхности, нормально расположенной к этому направлению, на единичный телесный угол у этого направления и на единицу интервала длины волны dλ *около* λ.Для участка излучающей поверхности в направлении (θ, φ) нормально расположенным является участок dA_n на рис. 6.6. Если в качестве основы используется поверхность абсолютно черного тела, спектральный коэффициент направленного излучения $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T)$ определяется как коэффициент интенсивности испускаемого излучения в данном направлении при данной длине волны, поделенный на интенсивность излучения абсолютно черного тела

$$\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \varphi, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} \tag{6.7}$$

уравнение 6.7 представляет процедуру для вычисления фактического излучения относительно излучения абсолютно черного тела, а также процедуру для вычисления фактического излучения если параметр $\varepsilon_{\lambda,\theta}(\lambda, \theta, \varphi, T)$ известен. Если спектральный коэффициент направленного излучения будет интегрирован по $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ и $0 \leq \theta \leq \pi/2$, то будет получен спектральный коэффициент полусферического излучения $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ и определен как

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, T)}{I_{\lambda,b}(\lambda, T)} = \frac{E_{\lambda}(\lambda, T)}{E_{\lambda,b}(\lambda, T)} \tag{6.8}$$

где $\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T)$ - спектральная мощность полусферического излучения, а $\varepsilon_{\lambda,}(\lambda, T)$ - спектральный коэффициент полусферического излучения. Поскольку угловые зависимости были проинтегрированы, используется слово «полусферический», а не «направленный». Переход от $I_{\lambda,e}(\lambda, T)$ к $E_{\lambda,}(\lambda, T)$проходит беспрепятственно, поскольку интенсивность излучения основана на расчетной площади, а излучение основано на фактической площади, и они относятся друг к другу как $E_{\lambda,}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,e}(\lambda, T)$. Подробности приведены в учебниках по теплопередаче, таких как учебник Бергмана и соавт. (2011).

Если спектральная мощность полусферического излучения интегрирована для всех длин волн, общая спектральная мощность полусферического излучения *E(T)* будет восстановлена и будет равна

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \tag{6.9}$$

где E(T) – общая мощность полусферического излучения, а $\varepsilon(T)$ – интегральный коэффициент полусферического излучения, в общем смысле называемый просто коэффициентом излучения. Последовательность интеграции: от спектрального направленного к спектральному полусферическому и до общего полусферического. Значения для коэффициентов спектрального, полусферического и общего полусферического излучения различных материалов доступны в справочниках и учебниках, а также на ряде веб-сайтов (например, http://www.icess.ucsb.edu/modis/EMIS/html/em.html).

Пример 6.2

Для стены при $T_S = 500\,K$ спектральный коэффициент изображен на рис. 6.7. Определите интегральный коэффициент излучения и мощность излучения поверхности.

Решение: поскольку известен интегральный коэффициент излучения, для расчета мощности излучения поверхности можно использовать уравнение 6.9. Мощность излучения поверхности состоит из отдельных компонентов для каждого диапазона длины волны, связанного с каждым коэффициентом полусферического излучения, или

$$\varepsilon E_b = \varepsilon_1 \int_0^{\lambda_1} E_{\lambda,b}\,d\lambda + \varepsilon_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda,b}\,d\lambda + \varepsilon_3 \int_{\lambda_2}^{\infty} E_{\lambda,b}\,d\lambda \tag{6.10}$$

что можно выразить как

$$\varepsilon = \varepsilon_1 F(0-\lambda_1 T) + \varepsilon_2[F(0-\lambda_2 T) - F(0-\lambda_1 T)] + \varepsilon_3[1 - F(0-\lambda_2 T)] \tag{6.11}$$

Следовательно, используя описание спектрального излучения для характеристик поверхности, для вычисления характеристик поверхности, не относящейся к абсолютно черным телам можно использовать функцию излучения абсолютно черного тела.

Лист Mathcad для этой задачи представлен на рис. 6.8. Интегральный коэффициент излучения равен 0,6099, а общая мощность излучения равна 2161 Вт/м^2. При сравнении, если поверхность была бы абсолютно черным телом, общая мощность излучения будет равна 3544 Вт/м^2.

Уравнения 6.7, 6.8 и 6.9, включают излучающие характеристики поверхности для теплового излучения. Падение излучения на поверхность называется облучением и обозначается *G,* а спектральное облучение (облучение с определенной длиной волны) обозначается как G_λ. С излучением, падающим на поверхность, происходит следующее: (1) некоторая часть поглощается, (2) некоторая часть отражается, и (3) некоторая часть передается. Рис. 6.9 схематично показывает эти процессы. Рассмотрим каждую из возможностей по очереди.

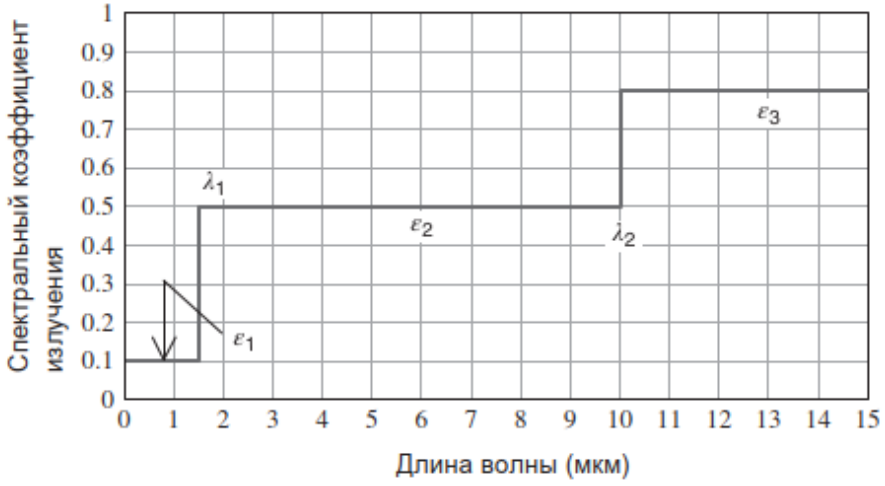


Рис. 6.7 Спектральный коэффициент излучения (пример 6.2).

Оценка интегрального коэффициента излучения:

$\lambda T_1 \coloneqq 1{,}5 \cdot \text{мкм} \cdot 500 \cdot \text{К}$ $\quad F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) = 5{,}93352 \times 10^{-6}$

$\lambda T_2 \coloneqq 10 \cdot \text{мкм} \cdot 500 \cdot \text{К}$ $\quad F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) = 0{,}63363$

$\varepsilon \coloneqq 0{,}1F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) + 0{,}5\left(F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) + 0.8 \cdot (1 - F(\frac{C_2}{\lambda T_2})\right)$

$\varepsilon = 0.60991$

Рассчитываем общую мощность излучения на единичную площадь:

$T_S \coloneqq 500 \cdot K$ $\quad E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_S^4$ $\quad E = 2{,}216137 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Мощность излучения абсолютно черного тела

$E_b \coloneqq \sigma \cdot T_S^4$ $\quad E_b = 3{,}54375 \times 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Рис. 6.8 Решение в Mathcad (пример 6.2).

Облучение, такое как испускаемые лучи, имеет спектральную природу; но в отличие от испускаемого излучения, спектральные характеристики которого определены температурой поверхности, спектральные характеристики облучения определены источником облучения. Как испускаемое излучение, облучение имеет характеристики направления. Свойства поверхности, связанные с облучением, описываются тремя терминами: (1) способность к поглощению для поглощенного облучения, (2) отражающая способность для отраженного облучения, и (3), способность к передаче (проводимость) для проведенного облучения. Используется тот же порядок от спектрального направленного к спектральному полусферическому и до общего полусферического. Рабочие определения таковы.

Поглощающая способность:

спектральное направленное $\alpha_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi) = \frac{I_{\lambda,i,\text{поглощенное}}(\lambda,\theta,\varphi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)}$ (6.12)

спектральное полусферическое $\alpha_\lambda(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{поглощенное}}(\lambda)}{G_\lambda(\lambda)}$ (6.13)

общее полусферическое $\alpha = \frac{\int_0^\infty \alpha_\lambda G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}$ (6.14)

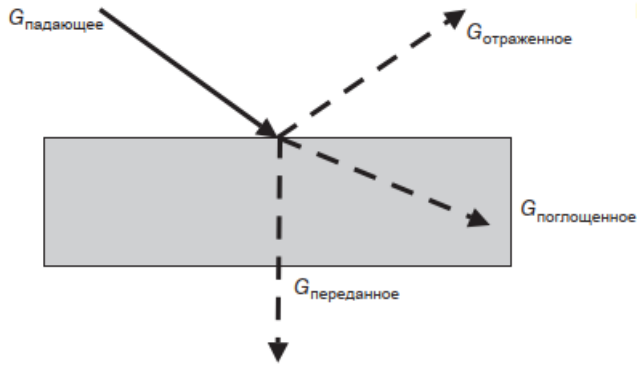


Рис. 6.9 Облучение поверхности

где $I_{\lambda,i}$ – поток падающего облучения, а $G_\lambda(\lambda)$ – спектральное облучение. Аналогичные последовательности также определены для отражающей и передающей способности.

Отражающая способность:

$$\text{спектральное направленное } \rho_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi) = \frac{I_{\lambda,i,\text{отраженное}}(\lambda,\theta,\varphi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)} \tag{6.15}$$

$$\text{спектральное полусферическое } \rho_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{отраженное}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \tag{6.16}$$

$$\text{общее полусферическое } \rho = \frac{\int_0^\infty \rho_\lambda G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{6.17}$$

Передающая способность:

$$\text{спектральное направленное } \tau_{\lambda,\theta}(\lambda,\theta,\varphi) = \frac{I_{\lambda,i,\text{переданное}}(\lambda,\theta,\varphi)}{I_{\lambda,i}(\lambda,\theta,\varphi)} \tag{6.18}$$

$$\text{спектральное полусферическое } r_{\lambda}(\lambda) = \frac{G_{\lambda,\text{переданное}}(\lambda)}{G_{\lambda}(\lambda)} \tag{6.19}$$

$$\text{общее полусферическое } \tau = \frac{\int_0^\infty \tau_\lambda G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda}{\int_0^\infty G_\lambda(\lambda)\mathrm{d}\lambda} \tag{6.20}$$

Для матовой поверхности, т. е. поверхности, не передающей тепловое излучение, все члены, связанные с передающей способностью, равны нулю.

Согласно закону сохранения энергии и вышеприведенным определениям требуется:

$$\begin{aligned} 1 &= \alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda \\ 1 &= \alpha + \rho + \tau \end{aligned} \tag{6.21}$$

Пример 6.3

Если спектральная поглощающая способность равна спектральному коэффициенту излучения из Примера 6.2, $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$, и если облучение G в 750 Вт/м^2 имеет спектральные характеристики абсолютно черного тела при температуре 2000 K, найдите общую поглощающую способность, общую отражающую способность и поглощенное облучение если поверхность матовая.

Решение: спектральная поглощающая способность известна из примера 6.2. Так как облучение имеет спектральные характеристики абсолютно черного тела с температурой 2000 K, функцию излучения абсолютно черного тела с температурой 2000 K можно использовать для описания спектрального распределения облучения. Поскольку поверхность матовая, передающая способность равна нулю. Решение через Mathcad представлено на рис. 6.10. При Решении придерживаются общего подхода из Упражнения 6.2. Для данной задачи интересны несколько позиций. Из-за спектральных характеристик поверхности $\alpha \neq \varepsilon$, хотя такое допущение часто делают для подобных задач. Облучение не такое же как у абсолютно черного тела, но имеет спектральные характеристики абсолютно черного тела при температуре 2000 K.

В формулировке задачи для примера 6.3 $\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$; при каких условиях это утверждение соответствует действительности? Когда допустимо выражение $\alpha = \varepsilon$? Большинство учебников по теплопередаче обращается к этим вопросам. Обычный вопрос: «Когда $\varepsilon_{\lambda,\theta} = \alpha_{\lambda,\theta}$?». Это всегда верно, поскольку $\varepsilon_{\lambda,\theta}$ и $\alpha_{\lambda,\theta}$ − свойства поверхности, и они независимы от излучения или облучения. Спектральный коэффициент полусферического излучения и поглощающая способность равны при двух условиях: (1) когда облучение является диффузным или (2) когда поверхность является диффузной. Для многих интересных задач одно из этих условий часто дается приближенно. Когда при движении вверх по иерархической лестнице $\alpha = \varepsilon$? Общая поглощающая способность равна интегральному коэффициенту излучения при двух условиях: (1) когда облучение соответствует таковому у абсолютно черного тела или (2) когда поверхность является серой.

$$\text{мкм} := \frac{\text{м}}{10^6}$$ Определение мкм.

$C_1 := 3{,}742 \cdot 10^8 \cdot \text{Вт} \cdot \frac{\text{мкм}^4}{\text{м}^2}$ $C_2 = 1{,}439 \cdot 10^4 \cdot \text{мкм} \cdot K$ *C_1 и C_2 выражение Планка для выражения плотности спектральной мощности излучения*

$$F(\zeta) := \frac{15}{\pi^4} \cdot \left[\sum_{n=1}^{20} \frac{e^{-n \cdot \zeta}}{n} \cdot \left(\frac{6}{n^3} + 6 \cdot \frac{\zeta}{n^2} + \zeta^3 + 3 \cdot \frac{\zeta^2}{n} \right) \right]$$

$\zeta = \frac{C_2}{\lambda \cdot T}$ Определение ζ

$G := 750 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ Облучение.

$\lambda T_1 := 1{,}5 \cdot \text{мкм} \cdot 2000 \cdot \text{К}$

$$F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) = 0.27312$$

$\lambda T_2 := 10 \cdot \text{мкм} \cdot 2000 \cdot \text{К}$

$$F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) = 0.98555$$

Функция излучения для поглощающей способности должна быть рассчитана с использованием спектральных характеристик источника облучения.

$$\alpha := 0.1 \cdot F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) + 0.5 \cdot \left(F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) - F\left(\frac{C_2}{\lambda T_1}\right) \right) + 0.8 \cdot \left(1 - F\left(\frac{C_2}{\lambda T_2}\right) \right)$$

$\alpha = 0.39509$

$\rho := 1 - \alpha$ $\rho = 0.60491$ Отражающая способность

$G_{\text{поглощенное}} := \alpha \cdot G$ $G_{\text{поглощенное}} := 296{,}31455 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$

Облучение, поглощенное поверхностью

Рис. 6.10 Решение в Mathcad (пример 6.3).

Серая поверхность – поверхность, для которой $\varepsilon_\lambda = \propto_\lambda$ для всех λ (во всех интересующих диапазонах). Многие спектрально-селективные поверхности, такие, как описанная в Примерах 6.2 и 6.3 *не являются* серыми поверхностями и $\alpha \neq \varepsilon$.

В таблице 6.3 приведены коэффициент излучения и коэффициент поглощения солнечной энергии для выбранных поверхностей. Отношение α/ε поглощающей способности для солнечного облучения и коэффициента излучения – полезный параметр в гелиотехнике, поскольку при малых его значениях тепло отводится, а при больших значениях солнечная энергия поглощается.

Приведенного выше обзора механизмов передачи тепла излучением достаточно для целей данной книги. В следующем разделе будет исследовано движение солнца относительно Земли.

6.3 Описание и расчеты пути движения солнца

В вопросах гелиотехники важно понимать положение солнца относительно Земли. Вероятно, наиболее эффективным инструментом понимания и объяснения положения солнца является путь движения солнца – траектория движения солнца относительно положения на поверхности Земли. Во многих учебниках, справочниках и на веб-сайтах имеются обсуждения, описания, таблицы и иллюстрации путей движения солнца для различных координат местоположения. Но мало где описывается, как рассчитать путь движения солнца, или содержатся программные элементы, помогающие в таких расчетах. Цель настоящего раздела – дать процедуру для вычисления и понимания траектории движения солнца.

Таблица 6.3 Поглощающая способность и коэффициент излучения для солнечной энергии; значение этих параметров для выбранных поверхностей.

Поверхность	**Способность к поглощению солнечной энергии** $\propto$	**Коэффициент излучения** ε	$\propto/\varepsilon$
Алюминий			
осажденная пленка	0,09	0,03	3,00
твердоанодированный	0,03	0,80	0,04
Белая краска	0,21	0,96	0,22
Черная краска	0,97	0,97	1,00
Черный хром	0,95	0,15	6,33
Красный кирпич	0,63	0,93	0,68
Снег	0,28	0,97	0,29
Тефлон	0,12	0,85	0,14
Растительность (кукуруза)	0,76	0,97	0,78

Рассмотрим геометрические отношения между Землей и солнцем. Как изображено на рис. 6.11, земля вращается под углом 23,45° к орбитальной плоскости эклиптики. Этот угол вращения отвечает за смену времен года (и за большую часть трудностей при расчете траектории движения солнца). Хотя Земля вращается вокруг солнца, самым простым способом понять движение Земли будет принятие птолемеевой точки зрения – принятие того, что Земля неподвижна, а солнце находится в движении. С птолемеевой точки зрения отношение солнца к точке на поверхности Земли описывается угловой высотой солнца α и курсовым углом солнца α_s. Эти углы показаны на рис. 6.12. Угловая высота – это угол между прямой, проведенной до солнца и горизонтальной плоскостью. Курсовой угол – это угол между прямой, ориентированной строго на юг и проекцией от направленной на солнце прямой на горизонтальную плоскость. Путь движения солнца на 21 июня для Государственного университета Миссисипи (Mississippi State University или MSU) – 33,455°С. Ш. – показан на рис. 6.13. Помимо отношения между угловой высотой и курсовым углом на рис. показано солнечное время.

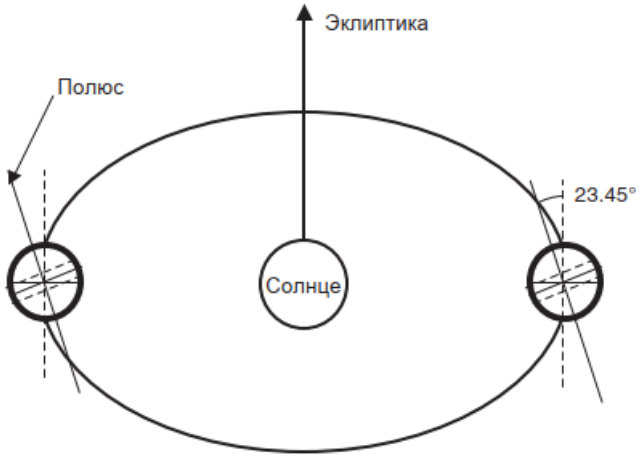


Рис. 6.11 Движение Земли вокруг солнца.

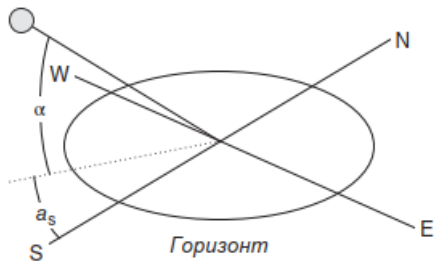


Рис. 6.12 Определение угловой высоты и курсового угла

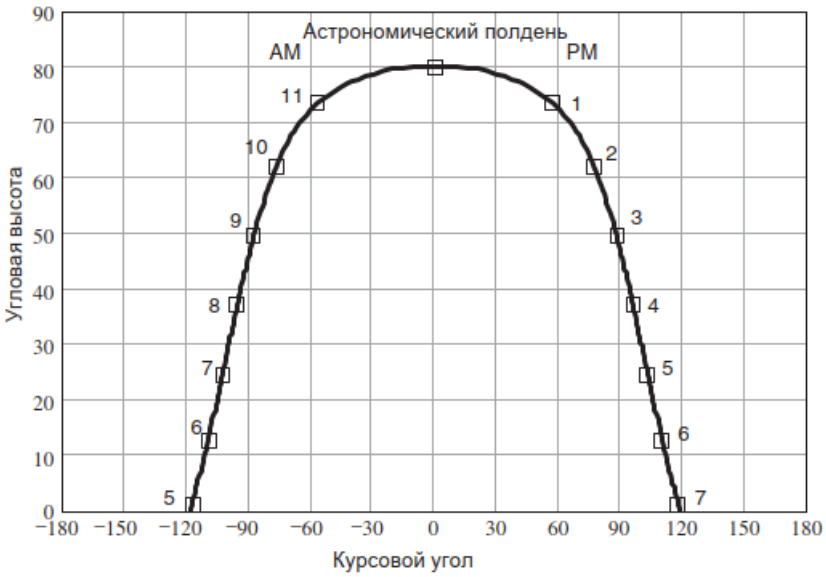


Рис. 6.13 Траектория движения солнца на 21 июня для MSU.

астрономический полдень солнце располагается почти вертикально (80°). Солнце встает почти в 30° к северу от восточного направления, ($\alpha_s \approx -120°$) и садится почти в 30° к северу от западного направления , ($\alpha_s \approx +120°$) Интересный аспект этой траектории – скорость движения солнца между 11 и 13 часами. За это время солнце проходит курсовой угол почти в 120° - почти половину всего пути в 240°. Движение солнца также симметрично относительно астрономического полудня, и все различие между утром и полуднем – в знаке курсового угла.

Однако, как указывают Госвами и соавт. (2000), курсовой угол и угловая высота – не основы, но функции местоположения (географической широты), времени (угла солнечного часа) и солнечного склонения (В качестве отступления: географическая широта и долгота местности, а также данные аэрофотосъемки в США и многих других странах мира можно найти по адресу http://www.latlong.net/). Подобную информацию предоставляют многие другие веб-сайты, включая данные местоположения на картах Google и фотографии Google Earth.

Солнечное склонение δ_s варьируется от -23,45° до +23,45° и имеет те же числовые значения, что и широта, на которой солнце находится прямо над головой в астрономический полдень конкретного дня. Солнечное склонение можно приблизительно вычислить следующим образом:

$$\delta_s = 23.45° \sin\left[\frac{360(284+n)}{365}\right] \tag{6.22}$$

где n – порядковый номер дня, часто называемый юлианским днем или путаемый с ним. Порядковый номер дня – день, последовательно отсчитываемый от 1 января (день с порядковым номером 1) до 31 декабря (день с порядковым номером 365 для обычного года и день с порядковым номером 366 для високосного). Удобная таблица порядковых номеров дней расположена по адресу http://www.atmos.anl.gov/ANLMET/OrdinalDay.txt. Дата по юлианскому календарю – это отсчет количества дней, начинающийся с 1 января 4713 г. до н. э. Строго говоря, количество дней от 1 января – порядковый номер дня, но во многих вариантах использования в гелиотехнике юлианский день принимается за порядковый номер дня. http://aa.usno.navy.mil/data/docs/JulianDate.php - удобный веб-сайт для определения даты и дня по юлианскому календарю. Например, 30 июня 2015 г. – 2 457 203 день по юлианскому календарю, а юлианская дата в полдень 30 июня 2015 г. – 2 457 203,500 000.

Солнечное склонение как функция порядкового номера дня изображено на рис. 6.14.

Угол солнечного часа h основан на периоде в 24 часа, который требуется солнцу на прохождение 360° вокруг Земли. Движение происходит со скоростью 15° в час, и $-180° \leq h_s \leq +180°$. Угол солнечного часа в астрономический полдень (время, когда курсовой угол равен нулю, а угловая высота максимальна для конкретного дня) определяется как нуль, значения к востоку от южного положения (утро) отрицательны, а значения к западу от южного положения (день) – положительны.

Угловая высота α относится к склонению δ_s, широте L и углам солнечного часа h_s как

$$\sin(\alpha) = \sin(L)\sin(\delta_s) + \cos(L)\cos(\delta_s)\cos(h_s) \tag{6.23}$$

Курсовой угол α_s равен

$$\sin(a_s) = \frac{\cos(\delta_s)\sin(h_s)}{\cos(\alpha)} \tag{6.24}$$

Для конкретного дня проработка путей движения солнца с использованием уравнений 6.23 и 6.24 несложна для широты большей, чем солнечное склонение. Необходимо обратить внимание на курсовые углы больше +90° для дня и -90° для утра. Поскольку главный угол для функции arcsin находится в промежутке от +90° до -90°, для курсовых углов более/менее ±90° нужно применить логику, и таким образом добиться значения большего/меньшего, чем 90°. Одним из способов выполнить это является определение предела часового угла $h_{предельн}$ (h_{limit}), который соотносится с $\alpha_s = \pm 90°$ (положение солнца строго на западе/востоке). Затем для всех часовых углов больших/меньших, чем ±h предел курсовые углы должны быть больше/меньше чем ±90°. Госвами и соавт. (2002) дают следующее выражение для h_{limit}:

$$\cos(\text{hlimit}) = \pm\frac{\tan(\delta_s)}{\tan(L)} \tag{6.25}$$

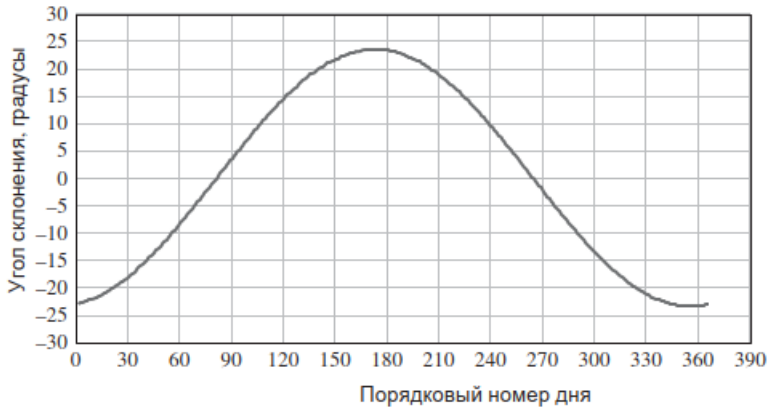


Рис. 6.14 Угол склонения как функция порядкового номера дня

Таблица 6.4 Стандартные широты для временных зон США.

75° для восточного
90° для центрального
105° для горного
12° для тихоокеанского

Когда часовой угол составляет более/менее чем ±hlimit, курсовой угол оценивается как $\{\pi - \arcsin[\sin(a_s)]\}$? надлежащим образом сохраняя $|a_s| > 90°$ для часовых углов более/менее чем ±hlimit.

Отношение между стандартным временем и местным временем необходимо объединить, если время прохождения солнца устанавливается как местное время или по нему сверяют часы. Отношение между солнечным временем и местным представлено в следующих выражениях:

$$\text{Солнечное время} = ST + 4(SL - LL)(\text{мин}) + E(\text{мин}) \tag{6.26}$$

$$ST + 1\ \text{час} = DST \tag{6.27}$$

где SolarTime – солнечное время, ST – стандартное время, SL – стандартная долгота, LL – местная долгота, DST – летнее время, а E – корректировка минут, полученных через уравнение времени. Уравнение времени таково

$$E = 9.87\sin(2B_n) - 7.53\cos(B_n) - 1.5\sin(B_n) \tag{6.28}$$

где

$$B_n = \frac{360(n-81)\pi}{364 \times 180} \tag{6.29}$$

а n – порядковый номер дня (в году, например – номер 1 у 1 января). В таблице 6.4 даны стандартные значения долготы для временных зон США.

График уравнения времени построен как функция порядкового номера дня на рис. 6.15.

Используя уравнения 6.26-6.28 или уравнения 6.26 и 6.27 и рис. 6.15, солнечное время можно соотнести со стандартным временем на любой долготе в любой по порядку день. В таком контексте стандартное время равно локальному или времени на часах.

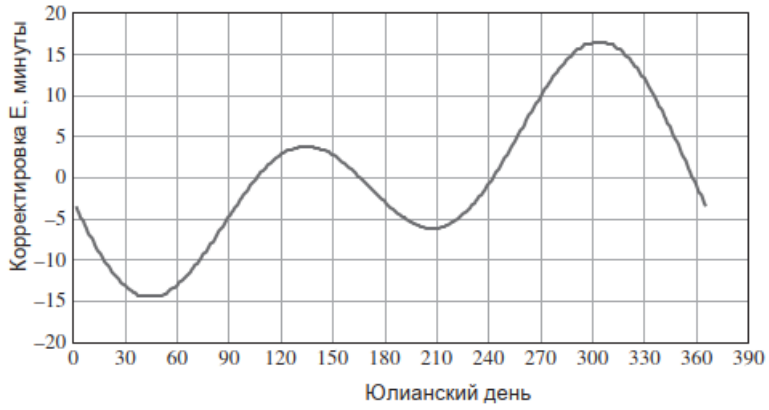


Рис. 6.15 Уравнение времени как функция юлианского дня.

Пример 6.4

Каково стандартное время, соответствующее 13.00 солнечного времени 20 августа в MSU?

Решение: MSU расположен в центральной временной зоне и имеет координаты 33,455°С. Ш. и 88,789° В. Д. Порядковый номер дня для 20 августа – 232.Переход на летнее время имеет место быть. Подставляем уравнение 6.27 в уравнение 6.26, получаем решение для стандартного времени:

Летнее время =Солнечное время + 1 ч – 4 (стандартное время - местная долгота) мин-E мин (6.30)

Уравнение корректировки времени можно прочитать по рис. 6.15 или рассчитать для 232 дня, используя уравнение 6.28 с результатом в -2,946 мин. Вставляя значения в уравнение 6.30, получим общее стандартное летнее время

Летнее время=13:00+ 1 ч-4(90-88,789)мин-(-2,95 мин) =13:58.10

6.4 Mathcad-разработки пути движения солнца

На некоторых вспомогательных сетевых ресурсах идет обсуждение всех или некоторых аспектов вычисления пути движения солнца. Удобный ресурс – веб-сайт Университета Орегона, размещенный по адресу http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.html и генерирующий pdf-файл с путем движения солнца в месте с конкретной широтой и долготой. Веб-сайт военно-морской обсерватории США, расположенный по адресу http://www.usno.navy.mil/USNO, предоставляет широкий спектр данных и

вычислительных возможностей. Веб-сайт Национальной администрации по вопросам океана и атмосферы (NOAA), расположенный по адресу www.srrb.noaa.gov/highlights/sunrise/azel.html, имеет онлайн-калькулятор для расчета положения солнца, а также некоторые объяснения подхода. Кроме того, на сайте www.susdesign.com/sunangle/ представлен онлайн-калькулятор для расчета положения солнца, не содержащий объяснений относительно используемого (-ых) метода (-ов).

Доступны также и программы для расчета положения солнца и путей движения солнца. Например, Центр солнечной энергии Флориды (г. Коко, штат Флорида) предоставляет по адресуhttp://www.fsec.ucf.edu/en/research/buildings/fenestration/software.htm#Software программу SUNPATH 3.2 для расчета траектории движения солнца. Этот веб-сайт также предлагает другие программные элементы, связанные с применением солнечной энергии. sunPATH™ доступна со страницы http://www.sunpathonline.com/csStore/ и разработана для определения проблем с освещением, связанных с видеосъемкой/фотографией, но также sunPATH™ можно использовать для проработки обычных путей движения солнца. Не издающаяся более книга Петерсбриджа (1996) представляет пути движения солнца и оверлейные программы для расчета теплопоступлений.

Если порядковый номер дня и широта известны, для построения траектории движения солнца в соответствующий день в соответствующем месте (широта) достаточно уравнений 6.23-6.29. На рис. 6.13 изображена траектория движения солнца для MSU на 21 июня, сгенерированная с помощью программного элемента Mathcad на основе этих уравнений описанным далее способом.

На рис. 6.16 полностью приведен лист Mathcad, нужный для вычисления и построения пути движения солнца на 21 июня в MSU (Рис. 6.13). Чтобы построить траекторию движения солнца для другого дня или другого места, нужно изменить только дату и широту. Поскольку на листе представлено ядро, необходимое для построения траектории движения солнца, проверка процедуры гарантируется.

Порядковый номер дня используется для расчета склонения из уравнения 6.22. Широта введена, а часовой угол, hss, определен для диапазона от астрономического полудня (0°) до астрономической полуночи (180°). Уравнение 6.23 используется для расчета угловой высоты солнца под каждый часовой угол, каждый конкретный день и широту. Уравнение 6.24 представляет соответствующие курсовые углы солнца. Предоставляется логика для определения курсовой высоты солнца, большей, чем 90°. «hlimit» - часовой угол, для которого курсовой угол равен ±90°, и который определяется с помощью уравнения 6.25. Путь движения солнца можно построить, а значения курсовых углов и угловых высот можно напечатать как функцию часового угла. Первоначальные результаты вычислений охватывают промежуток от астрономического полудня до астрономической полуночи. Однако, поскольку для утреннего положения отличается

Генерация пути движения солнца для конкретного дня как функция широты

n :=1…365 Дни года

Угол склонения

$$\delta_n := 23{,}45\ sin\left[360\frac{(n+284)\cdot\pi}{365\cdot 180}\right]$$

Угол склонения – угол между направлением падения солнечных лучей и направлением на зенит (над головой) в астрономический полдень на экваторе. Склонение зависит от положения Земли на орбите вокруг солнца.

Склонение для конкретного дня (используется юлианский день). Для 21 июня юлианский день 172-ой.

$\delta D := \delta_{172}$ δD =23,45 21 июня Угол склонения в градусах для использования в генерации пути движения солнца.

Ввод широты (в градусах):

L:= 33,455 Местоположение Государственного университета Миссисипи

Установление переменных диапазона для дней и часов

hss :=0.. 180 hsp_{hss} :=hss часов

Преобразование градусов в радианы

dr := $\frac{\pi}{180}$

Расчет углов движения солнца по Госвами и соавт. (2000)

$$\sin\alpha_{hss} := \sin(L\cdot dr)\cdot\sin(\delta D\cdot dr) + \cos(L\cdot dr)\cdot\cos(\delta D\cdot dr)\cdot\cos(hsp_{hss}\cdot dr)$$ Угловая высота

$$\alpha_{hss} := \operatorname{asin}(\sin\alpha_{hss}) \qquad ang_{hss} := \frac{\alpha_{hss}}{dr}$$ Угловая высота в градусах

$$sinas_{hss} := \cos(\delta D\cdot dr)\cdot\frac{\sin(hsp_{hss}\cdot dr)}{\cos(\alpha_{hss})}$$ Курсовой угол

Проверка на курсовой угол>90 градусов.

Поскольку основные значения функции arcsin определены для угла большего чем -90 и меньшего чем 90 градусов, необходимо применение логики для каждого курсового угла большего чем 90 градусов

$$h_{предел.} = \begin{cases} \left(\operatorname{acos}\left(\frac{\tan(\delta D\cdot dr)}{\tan(L\cdot dr)}\right)\right)\cdot\frac{1}{dr} & \text{если } > \delta D \\ 0 & \text{другое} \end{cases}$$

$h_{предел}$=48,968

Определение функции arcsin для включения курсовых углов > 90 градусов.

$$as_{hss} := \begin{cases} \left(\pi - \operatorname{asin}(sinas_{hss})\right) & \text{если } hsp_{hss} > hlimit \\ \operatorname{asin}(sinas_{hss}) & \text{другое} \end{cases}$$

Смена всех углов с радианных на градусные $\alpha_{hss} := \frac{\alpha_{hss}}{dr}$ $as_{hss} := \frac{as_{hss}}{dr}$

Построение пути движения солнца, принимая во внимание симметрию утреннего и дневного сегментов.

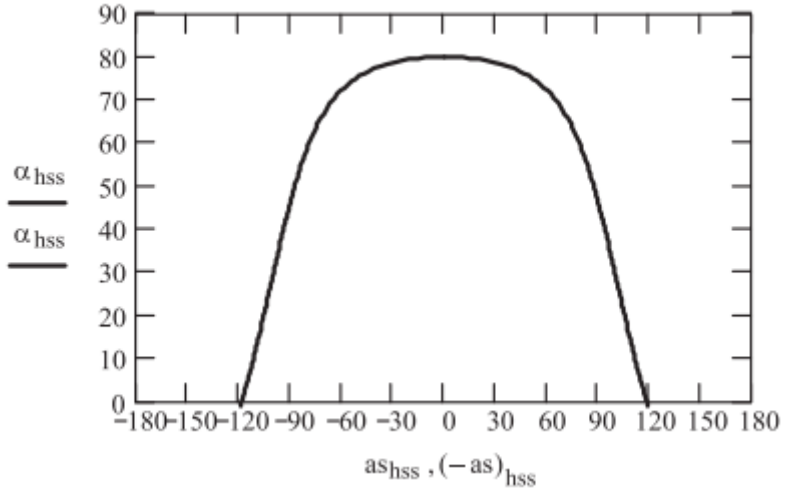


Рис. 6.16 Лист Mathcad с построением пути движения солнца на один день.

Установление линий постоянного солнечного времени (часового угла) на пути движения солнца. Каждый солнечный час соотносится с 15 градусами часового угла. Таким образом, 13:00 по солнечному времени располагается в 15 градусах от астрономического полудня.

солнечное время 1 := α 15 Астрон.полдень 1 := as 15 солнечное время 2 := α 30 Астроном. полдень 2 := as 30

солнечное время 3 := α 45 Астроном. полдень 3 := as 45 солнечное время 4 := α 60 Астроном. полдень 4 := as 60

солнечное время 5 := α 75 Астроном. полдень 5 := as 75 солнечное время 6 := α 90 Астроном. полдень 6 := as 90

солнечное время 7 := α 105 Астроном. полдень 7 := as 105 солнечное время 8 := α 120 Астроном. полдень 8 := as 120

солнечное время 9 := α 135 Астроном. полдень 9 := as 135 солнечное время 10 := α 150 Астроном. полдень 10 := as 150

солнечное время 11 := α 165 Астроном. полдень 11 := as 165 солнечное время 12 := α 180 Астроном. полдень 12 := as 180

Добавление солнечного времени к графику движения солнца с учетом симметрии.

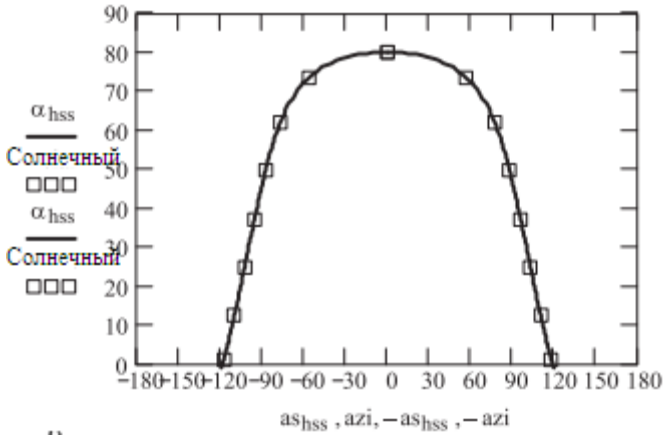


Рис. 6.16 *(Продолжение).*

только знак курсовых углов, путь солнца за день можно сгенерировать, просто построив $-\alpha$ для утренних часов.

Солнечное время, соотносящееся с курсовым углом и угловой высотой, затем извлекается для каждого солнечного часа (hss=0, 15, 30, . . . , 180) из курсового угла и угловой высоты. Чтобы дополнить представление, приведенное на рис. 6.13, к графику движения солнца добавляется солнечное время.

Хотя путь движения солнца для одного дня полезен для этого конкретного дня, требуется также полное понимание годового пути солнца в данной местности. На рис. 6.17 продемонстрированы траектории движения солнца и солнечное время для семи дней.

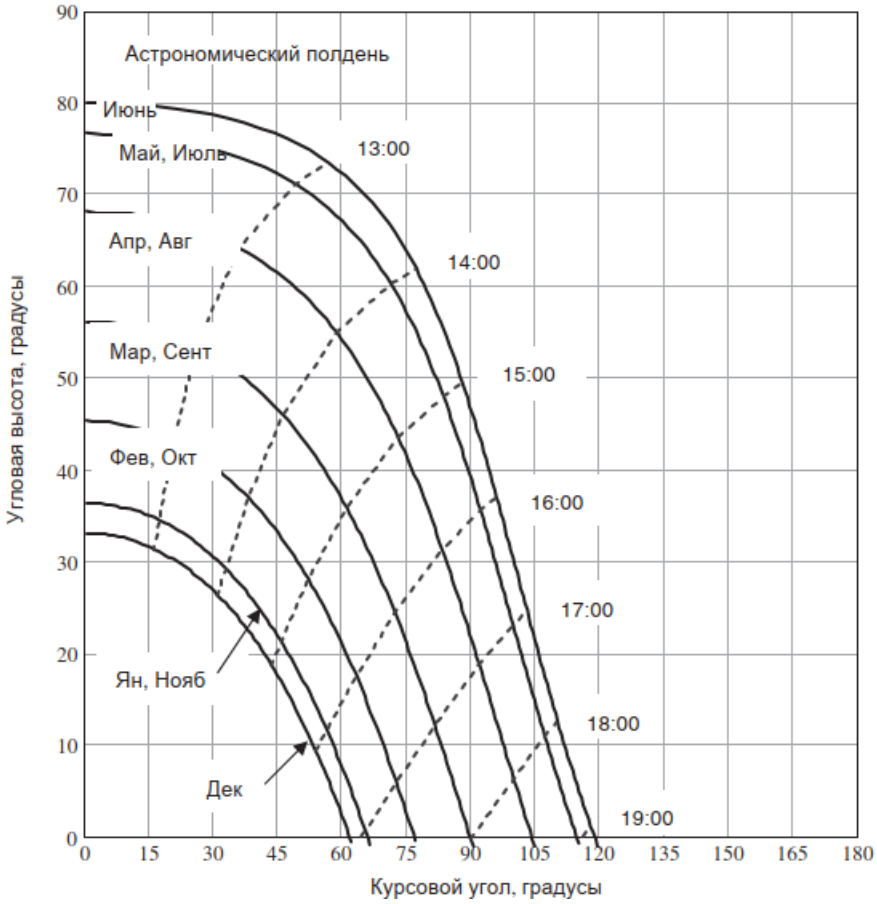


Рис. 6.17 Траектория движения солнца для 21 дня каждого месяца в MSU.

Ежегодно повторяясь несколько раз, данные по этим дням описывают для MSU весь год. Рис. 6.18 демонстрирует лист Mathcad, используемый для генерации путей движения солнца в различные дни года. Для этого примера выбран 21 день каждого месяца. Из-за симметрии пути движения солнца для 21 мая и 21 июля, 21 апреля и 21 августа, 21 марта и 21 сентября, 21февраля и 21 октября, 21 января и 21 ноября одинаковы. Только 21 июня и 21 декабря относятся к месяцам, которым недостает симметрии. Для путей движения солнца, которые совпадают для нескольких дней, чтобы не исказить представление используются только дневные данные, поскольку симметрия дает данные для утренних часов. Семь траекторий движения солнца, представляющих 21 день каждого месяца, дают относительно полную картину вариаций движения солнца (в птолемеевой системе) в течение года для данной местности. Вариации длины дня, курсового угла солнца на закате (и восходе) и угловой высоты солнца в полдень очевидны, если взглянуть на рисунок 6.17. Кроме того, можно определить курсовые углы для каждого часа.

Рис. 6.18 должным образом проверен. Солнечное склонение вычислено для каждого из семи дней, а курсовые углы и угловая высота сгенерированы для каждого часового угла каждого часа каждого дня. Та же самая логика, что использовалась на рис. 6.16 для одного дня, используется для каждого дня на рис. 6.18. Следовательно, угловая высота и курсовые углы являются скорее массивами, чем векторами (терминология Mathcad).

Очевидно, что траектории движения солнца можно представить для большого количества широт. В частности, стоит проверить путь движения солнца в более высоких широтах. Рассмотрим рис. 6.19, приведенный для широт, находящихся за Северным полярным кругом. Такие широты характеризуются тем, что солнце здесь ни разу не садится за несколько летних месяцев. Для параллели 80°С.Ш. рис. демонстрирует, что солнце не садится с апреля по май. Даже летом максимальная угловая высота солнца равна всего 33,45°, то есть оно висит сравнительно невысоко над горизонтом. Но если солнце и не садится в летние месяцы, за несколько зимних месяцев оно ни разу не встает. На 80 параллели северной широты солнце встает совсем невысоко (имеет положительную угловую высоту) в марте и сентябре и, как показывают траектории движения солнца, оно не встает с октября по февраль. В целом, рис. 6.19 описывает движение солнца как зависание невысоко над горизонтом летом и опускание за него зимой.

Дополнительную информацию и подробности описанной здесь процедуры Mathcad можно найти в книге Ходжа (2003).

Генерация таблицы пути движения солнца как функция широты

n :=1…365 Дни года

Угол склонения

$$\delta_n := 23{,}45\ sin\left[360\frac{(n+284)\cdot\pi}{365\cdot 180}\right]$$

Угол склонения – угол между направлением падения солнечных лучей и направлением на зенит (над головой) в астрономический полдень на экваторе. Склонение зависит от положения Земли на орбите вокруг солнца.

Склонение для конкретного дня

$\delta D_0 := \delta_{355}$ 21 дек $\delta D_1 := \delta_{21}$ 21 янв $\delta D_2 := \delta_{52}$ 21 фев $\delta D_3 := \delta_{80}$ 21 мар

$\delta D_4 := \delta_{111}$ 21 апр $\delta D_5 := \delta_{141}$ 21 мая $\delta D_6 := \delta_{172}$ 21 июн

$$\delta D = \begin{pmatrix} -23.45 \\ -20.138 \\ -11.226 \\ -0.404 \\ 11.579 \\ 20.138 \\ 23.45 \end{pmatrix}$$

Угол склонения в градусах для использования в генерации пути движения солнца.

Ввод широты (в градусах):

L:= 33,455 Местоположение Государственного университета Миссисипи

Установление переменных диапазона для дней и часов

i :=0 … 6 Интересующие дни

hss :=0.. 180 Часы

hsp_{hss} :=hss

Преобразование градусов в радианы

$dr := \frac{\pi}{180}$

Расчет углов движения солнца по Госвами и соавт. (2000)

$$\sin\alpha_{hss,i} := \sin(L\cdot dr)\cdot\sin(\delta D_i\cdot dr) + \cos(L\cdot dr)\cdot\cos(\delta D_i\cdot dr)\cdot\cos(hsp_{hss}\cdot dr)$$

Угловая высота

$$\alpha_{hss,i} := \operatorname{asin}(\sin\alpha_{hss,i})$$

Угловая высота в градусах

$$ang_{hss} := \frac{\alpha_{hss}}{dr}$$

$$sinas_{hss,i} := \cos(\delta D_i\cdot dr)\cdot\frac{\sin(hsp_{hss}\cdot dr)}{\cos(\alpha_{hss,i})}$$

Курсовой угол

Рис. 6.18 Лист Mathcad с путем движения солнца в Mississippi State University.

Проверка на курсовой угол>90 градусов.

Поскольку основные значения arcsin определены для -90 градусов, логика необходима для любого курсового угла больше 90 градусов.

$$hlimit_i := \frac{1}{dr}\operatorname{acos}\left(\frac{\tan(\delta D_i\cdot dr)}{\tan(L\cdot dr)}\right)$$

$h_{предел}{}^T$ = (131,032 123,709 107,481 90,611 71,936 56,291 48,968)

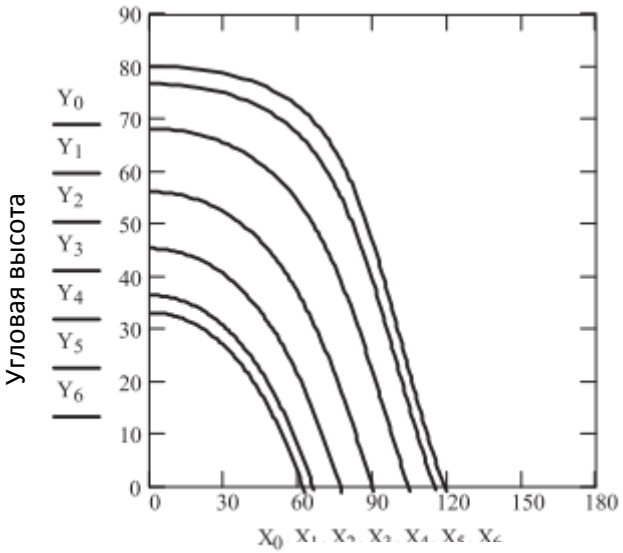
Часовые углы при курсовом угле в 90 градусов для заданной широты.

Определение функции arcsin для включения курсовых углов >90 градусов.

$$as_{hss,i} := \begin{cases} \left(\pi - \operatorname{asin}\left(sinas_{hss,i}\right)\right) & \text{если } hsp_{hss} > hlimit \\ \operatorname{asin}\left(sinas_{hss,i}\right) & \text{другое} \end{cases}$$

Смена всех углов с радианных на градусные $\alpha_{hss,i} := \dfrac{\alpha_{hss,i}}{dr} \quad as_{hss,i} := \dfrac{as_{hss,i}}{dr}$

Переопределение $\alpha_{hss,i}$ и $as_{hss,i}$ как Y_i и X_i соответственно. $X_i := as^{\langle i \rangle}$ $Y_i := \alpha^{\langle i \rangle}$



Установление линий постоянного солнечного времени (часового угла) на пути движения солнца. Каждый солнечный час соотносится с 15 градусами часового угла. Таким образом, 13:00 по солнечному времени располагается в 15 градусах от астрономического полудня.

солнечное время $1_i := \alpha_{15,i}$ Астроном. полдень $1_i := as_{15,i}$ солнечное время $2_i := \alpha_{30,i}$ астроном. полдень $2_i := as_{30,i}$

солнечное время $3_i := \alpha_{45,i}$ астроном. полдень $3_i := as_{45,i}$ солнечное время $4_i := \alpha_{60,i}$ астроном. полдень $4_i := as_{60,i}$

солнечное время $5_i := \alpha_{75,i}$ астроном .полдень $5_i := as_{75,i}$ солнечное время $6_i := \alpha_{90,i}$ астроном. полдень $6_i := as_{90,i}$

солнечное время $7_i := \alpha_{105,i}$ астроном .полдень $7_i := as_{105,i}$ солнечное время $8_i := \alpha_{120,i}$ астроном. полдень $8_i := as_{120,i}$

солнечное время $9_i := \alpha_{135,i}$ астроном. полдень $9_i := as_{135,i}$ солнечное время $10_i := \alpha_{150,i}$ астроном. полдень $10_i := as_{150,i}$

солнечное время $11_i := \alpha_{165,i}$ астроном. полдень $11_i := as_{165,i}$ солнечное время $12_i := \alpha_{180,i}$ астроном. полдень $12_i := as_{180,i}$

Рис. 6.18 (Продолжение).

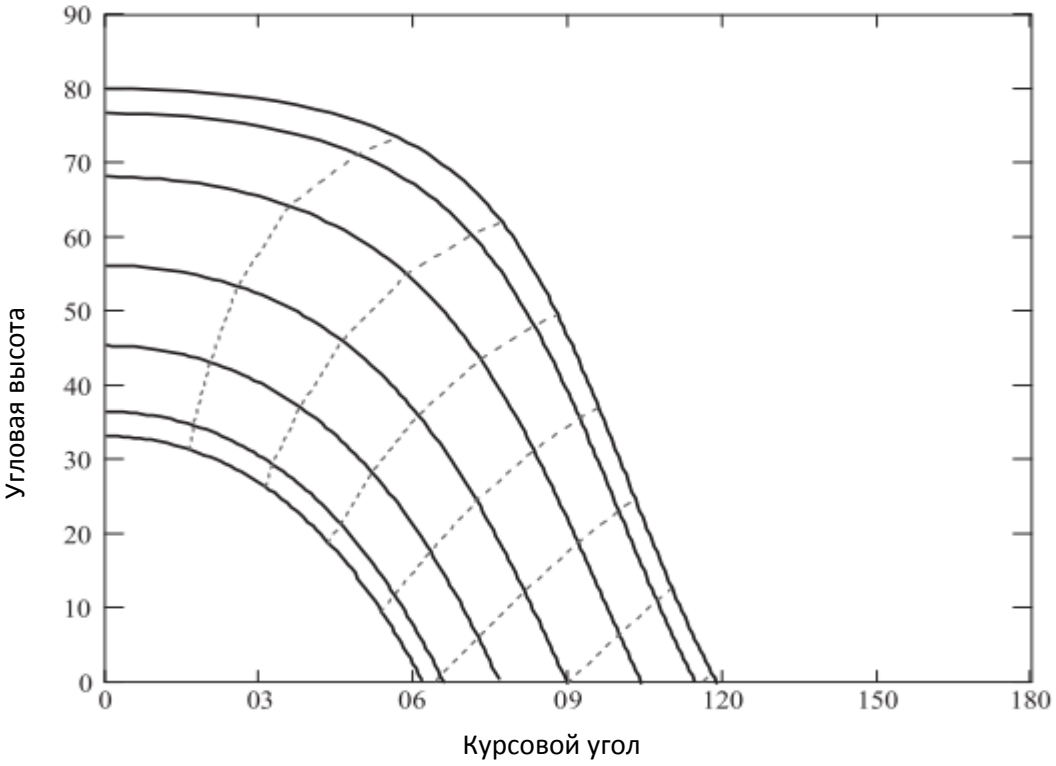


Рис. 6.18 (Продолжение).

6.5 Национальная база данных о солнечной энергии

При учете любых количественных факторов, относящихся к применению солнечной энергии, требуется ежечасная, ежемесячная и ежегодная информация о климате, включая облучение («инсоляцию»). Национальная лаборатория возобновляемой энергии Департамента энергетики США (NREL) в Голдене, штат Колорадо, предоставляет поразительно широкий спектр информации о климате и энергетике, большая часть которой доступна на веб-сайте (http://www.nrel.gov/rredc/).

В Национальной базе данных по солнечной радиации (NSRDB) содержатся сведения за 30 лет (1961-1990) по солнечной радиации и дополнительные метеорологические данные с 237 сайтов Национальной метеорологической службы США, плюс сайты в Гуаме и Пуэрто-Рико. Рис. 6.20 показывает сайты, для которых доступны данные NSRDB за 1961-1990 гг.

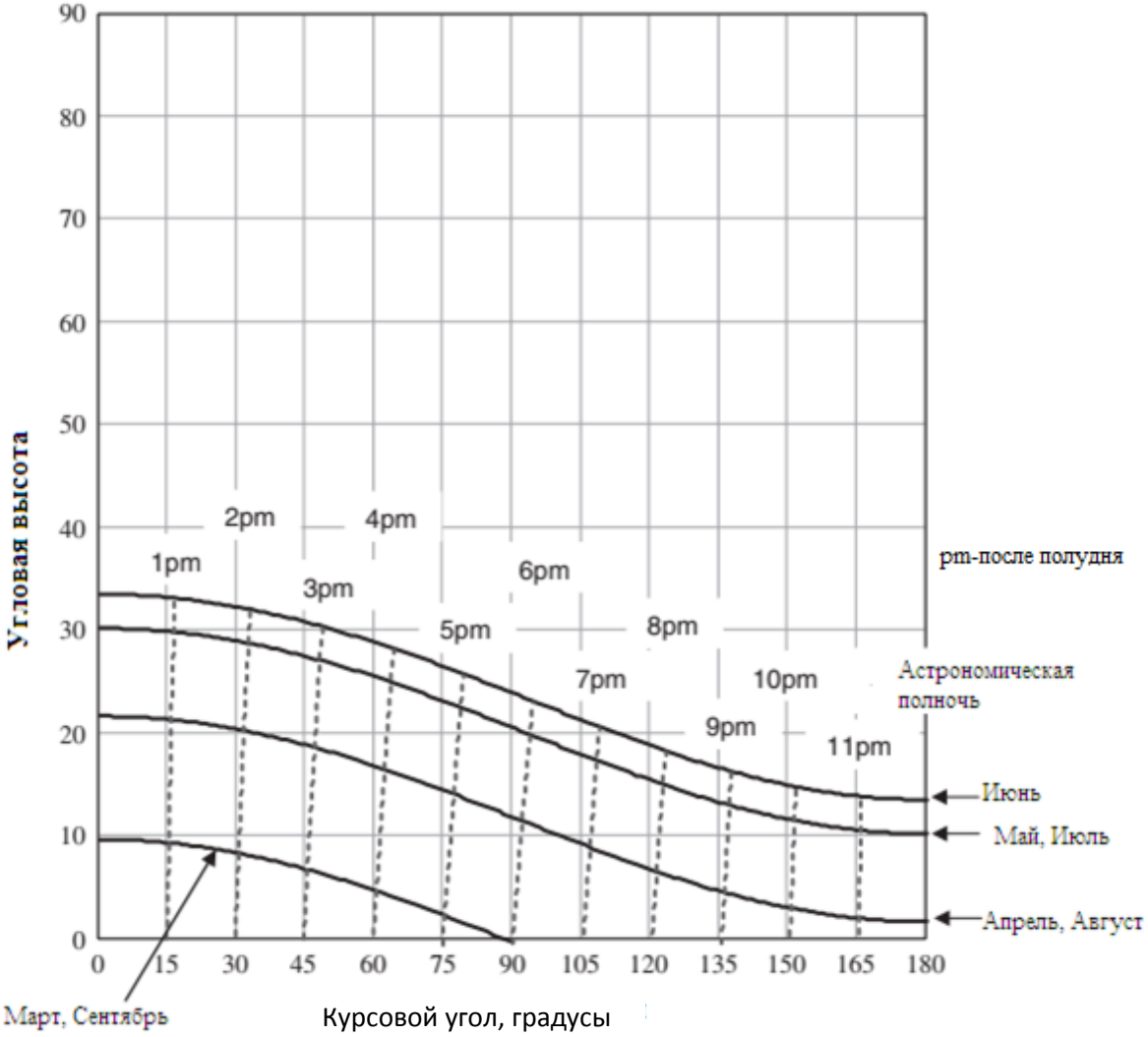


Рис. 6.19 Траектории движения солнца за Северным полярным кругом.

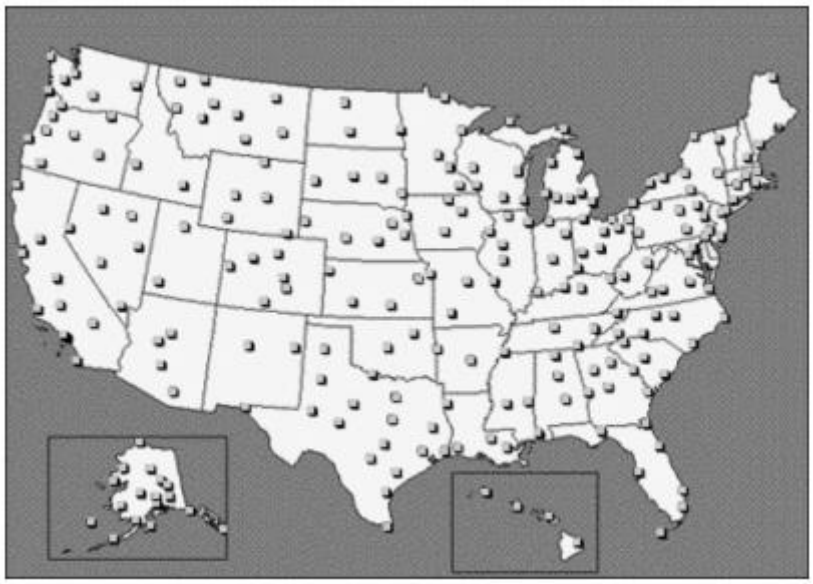


Рис. 6.20 Сайты Национальной метеорологической службы, для которых доступны данные NSRDB за 1961-1990 гг. Источник: http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1961-1990/gifs/NSRDBmap.gif.

В NSRDB за 1961-1990 гг. на веб-сайте NREL включены следующие информационные продукты:
1) файлы ежедневной статистики (усредненные месячные результаты по общим ежедневным данным);
2) файлы данных за каждый час;
3) «Справочное руководство по солнечной освещенности для зданий» – средние данные по солнечному излучению и освещенности для каждого месяца за 30 лет (1961-1990).
4) «Справочное руководство по солнечной освещенности для плоских и концентрирующих коллекторов»:

a) средние показатели солнечного излучения для каждого из 360 месяцев 1961-1990 гг.
b) среднее солнечное излучение для каждого из 360 месяцев 1961-1990 гг.

Подробно применение NSRDB (1961-1990) гг. описывается в Главах 7-9.

Веб-сайт NREL также содержит обновления и добавления к NSRDB 1961-1990 гг. Сюда относится:
1) Обновление за 1991-2010 гг. для NSRDB содержит солнечные и метеорологические данные для 1454 мест в США и на их территориях. Для каждого из этих мест отдельно имеются

a) солнечные данные за каждый час
b) статистические сводки

ежедневные статистические файлы
статистические файлы за каждый час
данные о пороговых значениях

Адрес веб-сайта: http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2010/.
Эти данные более полны, чем исходные, содержат больше переменных, больше внимания уделяют неточностям, делают различия между измеренными и смоделированными данными. Руководство пользователя доступно по адресу: http://www.nrel.gov/docs/fy12osti/54824.pdf.

2) Обновление за 2005-2012 гг. для NSRDB. Обновление за 2005-2010 гг. для NSRDB состояло из тридцатиминутных блоков солнечных и метеорологических данных для приблизительно 1,4 млн. (0,038° широты на 0,038° долготы) пикселей поверхности (условно 4 км^2). Охваченная территория ограничена -25 меридианом восточной долготы с востока и -175 меридианом восточной долготы с запада; а также 5 параллелью северной широты с юга и 60 параллелью северной широты с севера.

3) Typical Meteorological Year 3 (TMY3). С тех пор, как примерно в 1980 г. вышла база данных Typical Meteorological Year («Стандартный метеорологический год»), файлы TMY стали признанным источником входных данных практически для всех программ моделирования зданий. Оригинальная TMY содержала данные, собранные с 1949 по 1980 гг. в 229 местах США. Данные TMY2 были основаны на 239 локациях и использовали информацию за период 1961-1990 гг. TMY3, впервые выпущенная в 2005 г., представляет 1020 локаций. Обновленные файлы TMY3 доступны на сайте TMY3 NREL по адресу http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1991-2005/tmy3.

TMY3 – это наборы данных, содержащие значения солнечного излучения, снимаемые раз в час, и метеорологические элементы за годичный период. Их предполагается использовать для компьютерных моделей систем преобразования энергии и строительных систем, чтобы облегчить сравнение эффективности различных типов систем, конфигураций и мест в США и на их территориях. Поскольку TMY3 представляет скорее стандартные, чем экстремальные условия, она не подходит для проектирования систем, которые соответствовали бы самым плохим моделям развития локальных событий.

4) Карты ресурсов для солнечного излучения в США. Веб-сайт NREL также предоставляет полезную оценку потенциала США в отношении солнечной энергии. Рис. 6.21 демонстрирует среднее ежедневное количество энергии прямых солнечных лучей, падающих на перпендикулярную поверхность с отслеживанием пути движения солнца для США. Пустыни на юго-западе постоянно получают 6,5-8,5 кВт·час/ (м^2·день), тогда как юго-восток из-за облачного покрова и эффектов влажности получает около 4,0 кВт·час/ (м^2·день). Большая часть северо-востока получает 3,0 кВт·час/ (м^2·день) или менее. Хотя юго-запад – наиболее благоприятный регион, солнечные энергосистемы целесообразно размещать в других частях США. NREL предоставляет большое множество карт с различной информацией о погоде и различных параметрах, связанных с солнцем.

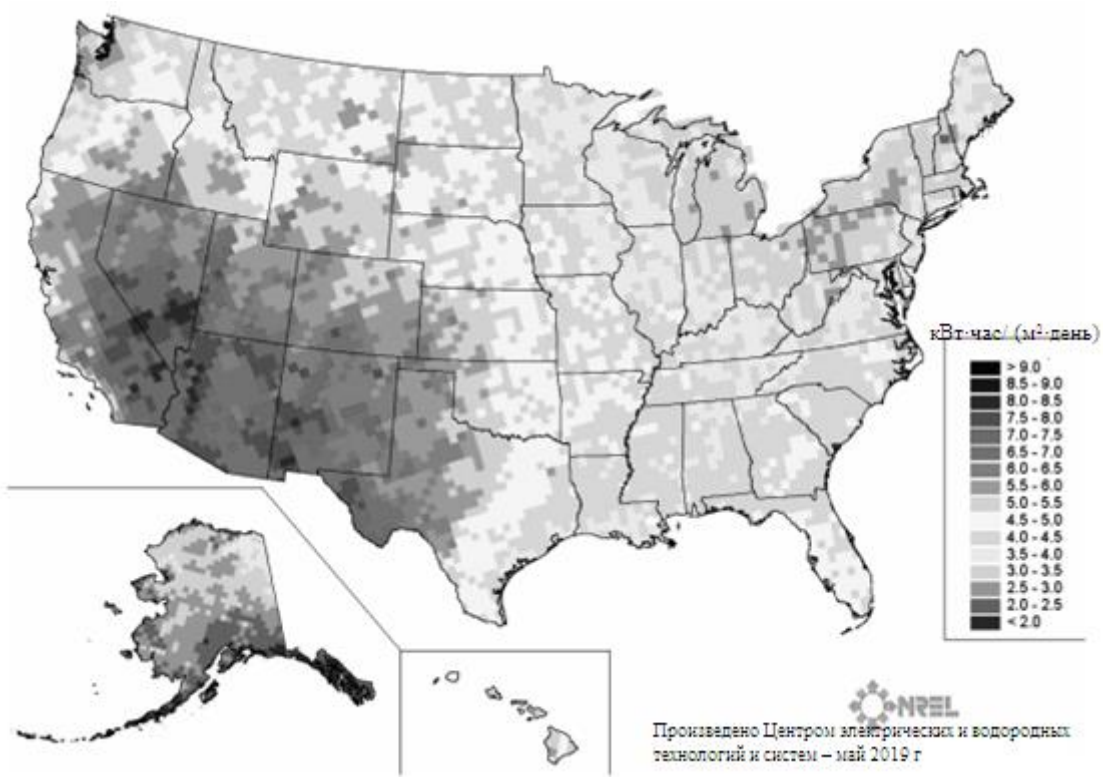


Рис. 6.21 Потенциал использования солнечной энергии в США. Источник: NREL.

Количество солнечных и метеорологических данных, доступных на веб-сайте NREL, значительно возросло в плане доступных локаций, представленных переменных, оценки качества, и вариантов использования. Действительно, настала эра «больших данных».

В дополнение к NREL, NOAA собирает, анализирует и диссимилирует метеорологические данные. NOAA является частью Министерства торговли США. В течение нескольких лет за сбор информации, связанной с погодой, отвечал Национальный центр климатических данных (NCDC). Недавно NOAA объединила все мероприятия по сбору данных, имеющих отношение к климату, в рамках Национальных центров экологической информации (NCEI). NCEI включает Центр погоды и климата (бывший NCDC) и Центр побережий, океанов и геофизики, а также Центральную библиотеку NOAA.

6.6 Заключение

В данной главе была рассмотрена передача тепла излучением, исследованы пути движения солнца и указаны источники гелиотехнических данных. Теперь, зная эти основы, можно изучить принципы гелиотехники. В Главах 7,8 и 9 соответственно обсуждается активное применение солнечной энергии, пассивное применение солнечной энергии и концепции фотоэлектрических солнечных устройств.

Литература

Bergman, F.P., Lavine, A.S., Incropera, F.P., and DeWitt, D.P. (2011) Introduction to Heat Transfer, 7th edn. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Goswami, D.Y., Kreith, F., and Kreider, J.F. (2000) Principles of Solar Engineering, 2nd edn. Taylor and Francis, Philadelphia, PA.

Hodge, B.K. (2003) Sunpath lines using Mathcad. ASEE Computers in Education Journal, 8 (4): 78–92.

Howell, J.R., Siegel, R., and Menguc, M.P. (2010) Thermal Radiation Heat Transfer, 5th edn. CRC Press, New York.

Petherbridge, P. (1966) Sunpath Diagrams and Overlays for Solar Heat Gain Calculations. Building Research Station, London.

7 Активное использование систем солнечного теплоснабжения

7.1 Введение

Это первая из трех глав, посвященных использованию солнечной энергии. Несмотря на то, что условно, по типу использования солнечной энергии системы, как правило, подразделяются на: активные, пассивные или фотоэлектрические, что является главной темой данной, 8 и 9 глав. Активное использование системы солнечной энергии обычно связано со сбором тепловой энергии посредством использования солнечных коллекторов, в которых используются «активные» механические компоненты (такие как насосы) для сбора и транспортировки тепла. Пассивные системы, обычно связанные со встроенной средой, собирают и переносят тепло немеханическими средствами. Фотоэлектрические системы используют солнечную энергию непосредственно для производства электроэнергии. Как видно из названия, данная глава посвящена активному типу систем солнечного теплоснабжения.

Солнечные коллекторы представляют собой известный образ, который является символом солнечной энергетики. Двумя наиболее распространенными конфигурациями являются плоский и параболоцилиндрический коллекторы. На рис. 7.1a показан стандартный плоский коллектор, а на рис. 7.1b - стандартный параболоцилиндрический коллектор. Плоские коллекторы широко используются в жилых домах, коммерческих и промышленных зданиях для горячего водоснабжения и кондиционирования воздуха (отопления). Пример на рис. 7.1a установлен под фиксированным углом на южной крыше жилого дома. Параболоцилиндрический коллектор, показанный на рис. 7.1b, обладает способностью отслеживать угловую высоту солнца. В этом примере параболоцилиндрический коллектор фокусирует солнечные лучи на одной трубе и обеспечивает более высокую температуру горячей воды, чем коллектор с плоской поверхностью. Параболоцилиндрические коллекторы дороже, чем плоские коллекторы, и из-за механизмов слежения требуют большего обслуживания. По этим причинам параболоцилиндрические коллекторы чаще используются в институциональных, промышленных и коммерческих объектах, чем в жилых домах. Дополнительные конфигурации для солнечных коллекторов включают рефлектор Френеля, трубчатые, параболоиды и составные параболики.

Гелиостат с центральным приемником, показанный на рис. 7.2, является наиболее впечатляющим и дает температуры намного выше, чем это возможно при использовании стандартных плоского или параболоцилиндрического коллекторов. Как показано на рисунке, гелиостаты имеют много отражающих зеркал, причем каждое зеркало может располагаться так, чтобы отражать солнечные лучи на центральный приемник. Отражающее поле, расположенное вокруг центрального приемника, позволяет солнечной энергии быть направленной на приемник в течение всего дня. Таким образом, в приемнике достигаются очень высокие температуры.

Тепловые солнечные коллекторы, за исключением систем типа гелиостата, основаны на пяти конфигурациях:

1) неглазурованный коллектор
2) прозрачный коллектор
3) плоский коллектор
4) коллектор с вакуумной трубкой
5) концентрирующий коллектор.

На рис. 7.3 представлены схемы каждого типа с краткими пояснениями принципа сбора энергии.



(a) (b)

Рис. 7.1 Примеры солнечных плоских и параболоцилиндрических коллекторов: (a) плоский (NREL 09188); (b) параболоциллиндрический (NREL 14087).

Неглазурованный солнечный коллектор - самый простой из тепловых солнечных коллекторов, поскольку он имеет приемную пластину (с высокой солнечной поглощающей способностью), через которую вода должна поглощать тепло. Как следует из названия, неглазурованный солнечный коллектор не имеет прозрачного покрытия (остекления). Прозрачный солнечный коллектор довольно прост и состоит из приемной пластины для поглощения солнечной энергии и вентилятора для циркуляции воздуха через камеру в задней части приемника. Воздух подогревается и используется для внутреннего нагрева. Плоский солнечный коллектор похож на неглазурованный тип, за исключением того, что плоский коллектор имеет остекление (высокая солнечная проницаемость и низкая проницаемость) для сохранения длинноволнового теплового излучения внутри коллектора. В солнечном коллекторе с вакуумной трубкой используется вакуумный цилиндр (с высокой поглощаемостью солнечных лучей) для поглощения солнечного излучения. Вода протекает через медную трубку внутри цилиндра и поглощает тепловую энергию. Последним из типов тепловых солнечных коллекторов является концентрирующий солнечный коллектор. В концентрирующем коллекторе в форме желоба или параболической формы солнечное излучение падает на поверхность (низкая солнечная поглощающая способность и высокая солнечная отражательная способность) и отражается на приемник, где он поглощается. Концентрирующие солнечные коллекторы обеспечивают более высокие температуры, чем другие типы. Испытание типового применения на каждый из типов теплового солнечного коллектора является целесообразным.

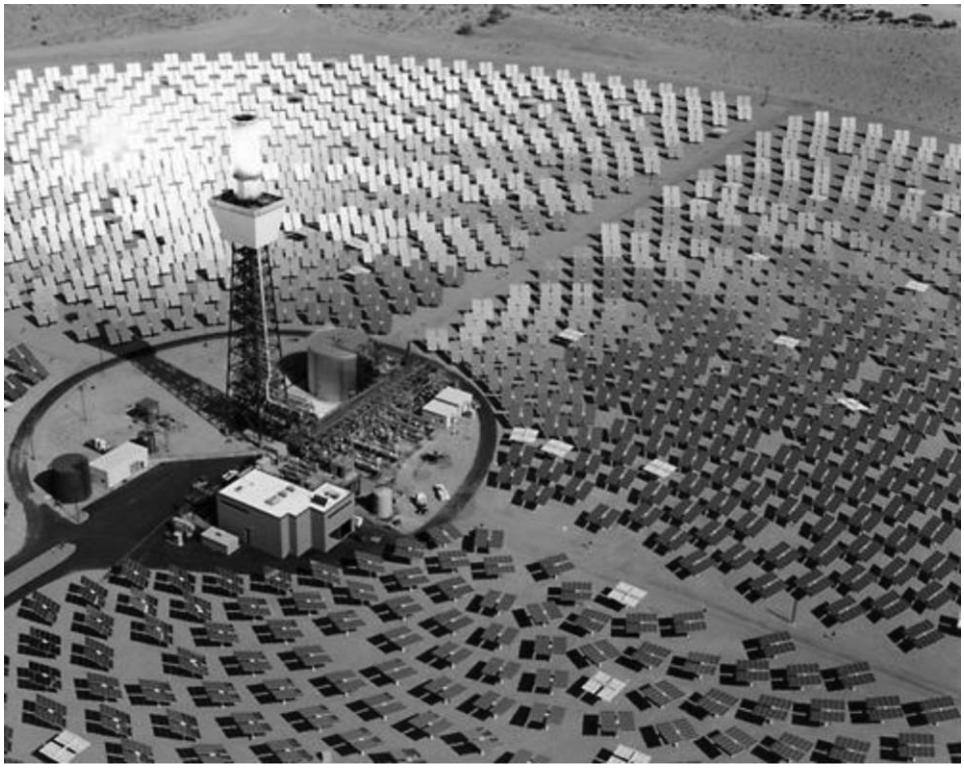
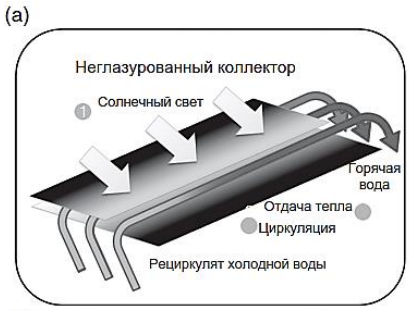
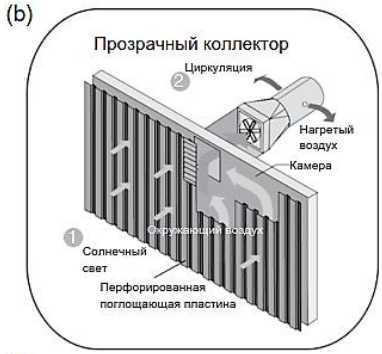


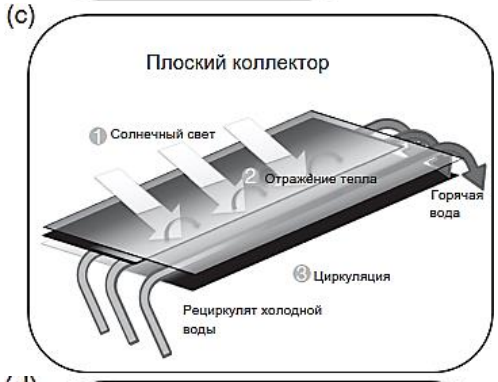
Рис. 7.2 Гелиостат (NREL 00036).



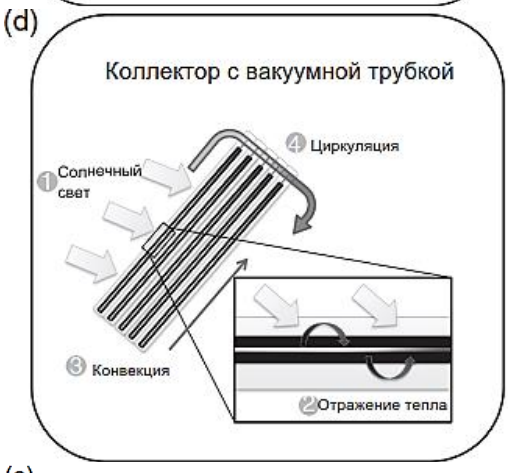
1. **Солнечный свет**: Солнечный свет попадая на темный материал в коллекторе, нагревает его
2. **Циркуляция**: Холодная жидкость (вода) или воздух циркулирует через коллектор, поглощая тепло.
3. **Использование**: Более теплая жидкость используется для таких целей, как подогрев бассейна.



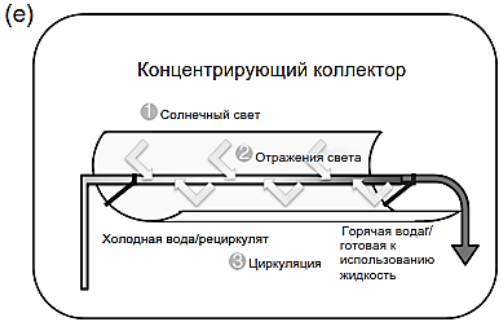
1. **Солнечный свет:** Солнечный свет попадает на темную перфорированную металлическую оболочку, нагревая ее
2. **Циркуляция**. Циркуляционный вентилятор проталкивает воздух через перфорации на задней части металлической оболочки, нагревая воздух, который затем подается в здание для распределения.



1. **Солнечный свет**: Солнечный свет проходит сквозь стекло и попадает на темный материал внутри коллектора, нагревая его.
2. **Отражение тепла**: Прозрачный стеклянный или пластиковый корпус удерживают тепло, которое в противном случае могло бы уйти во внешнюю среду
3. **Циркуляция**: Холодная вода или другая жидкость циркулирует через коллектор, поглощая тепло



1. **Солнечный свет**: Солнечный свет попадает в темный цилиндр, эффективно нагревая его под любым углом.
2. **Отражение тепла**: Прозрачное стекло или пластиковый корпус удерживает тепло, которое в противном случае могло бы уйти во внешнюю среду.
3. **Конвекция**. Медная трубка, проходящая через каждый цилиндр, поглощает накопленное тепло цилиндра, в результате чего жидкость внутри трубки нагревается и поднимается к верхней части цилиндра.
4. **Циркуляция**: Холодная вода циркулирует через верх цилиндров, поглощая тепло.



1. **Солнечный свет**: Солнечный свет попадает на отражающий материал, зеркальную поверхность.
2. **Отражение солнечного света**: Отражающий материал перенаправляет солнечный свет в одну точку (для плоского коллектора) или трубу (для коллектора в форме желоба).
3. **Циркуляция**: Холодная вода или специальная теплообменная жидкость циркулирует по трубе, поглощая тепло.

Рис. 7.3 Типы тепловых солнечных коллекторов: (a) неглазурованный солнечный коллектор; (b) прозрачный солнечный коллектор; (c) плоский солнечный коллектор; (d) солнечный коллектор с вакуумной трубкой; (e) концентрирующий солнечный коллектор.

На рис. 7.4 приведено полезное распределение диапазонов температур и областей применения для каждого из пяти типов тепловых солнечных коллекторов. Неглазурованные и прозрачные устройства, использующие воздух применяются для целей, с диапазонами температур ниже 100°F - как правило, для обогрева бассейна и обогрева помещений. Плоские коллекторы подходят для обогрева помещений, нагрева воды, подогрева бассейна и ограничены температурами, не превышающими 150°F. Вакуумные трубки и концентрирующие солнечные коллекторы могут быть использованы для всех пяти областей. Рабочая температура вакуумной трубки может достигать 400°F. Концентрирующие солнечные коллекторы могут достигать высоких температур в зависимости от коэффициента концентрации (см. Раздел 7.5). В этой главе основное внимание будет уделено плоским коллекторам, поскольку они, вероятно, являются наиболее часто используемым типом солнечных тепловых коллекторов.

Солнечные тепловые коллекторы могут быть отслеживающими или не отслеживающими. Отслеживающие коллекторы, как следует из их названия, отслеживают суточное движение солнца (обсуждается в Главе 6) по одно- или двухосевым системам. Азимутальные и высотные углы не отслеживающих коллекторов фиксированы, и общая схема представляет собой нулевой азимутальный угол и высотный угол, заданные равными широте местоположения коллектора. На рис. 7.5 показаны схемы для не отслеживающих, одноосевых отслеживающих и двухосевых отслеживающих плоских коллекторов на рис. 7.6 показана схема отслеживающего параболоцилиндрического коллектора.

Как правило, плоские тепловые солнечные коллекторы используются для нагрева воды для бытовых и/или отопительных целей. Система простого плоского солнечного коллектора схематично показана на рис. 7.7. Система состоит из двух контуров потока: один от солнечного коллектора до системы накопления и второй от системы накопления до секции нагрузки. Вода, циркулирующая через систему коллектора, нагревается коллектором и хранится в накопительном баке. Горячая вода на секцию нагрузки подается из накопительного бака и возвращается при пониженной температуре в накопительный бак. Вспомогательный нагреватель используется, когда солнечная система обеспечивает недостаточным количеством горячей воды, поступающей в секцию нагрузки. Но основным компонентом системы является солнечный коллектор. Раздел 7.2 разрабатывает и исследует фундаментальные принципы работы плоского солнечного коллектора.

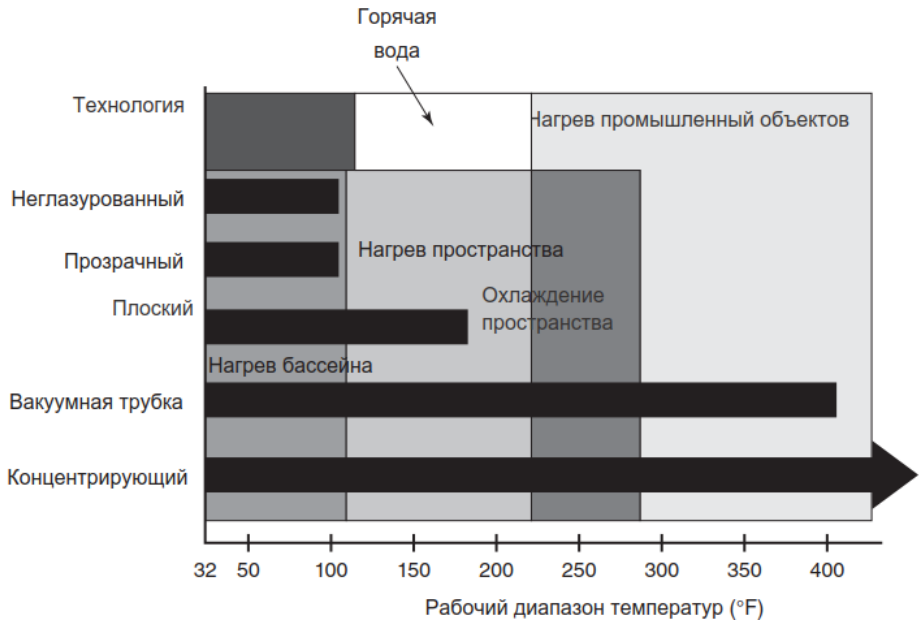


Рис. 7.4 Температурные диапазоны и применение тепловых солнечных коллекторов.
Источник: www2.epa.gov/rhc/rhc - технологии и приложения.

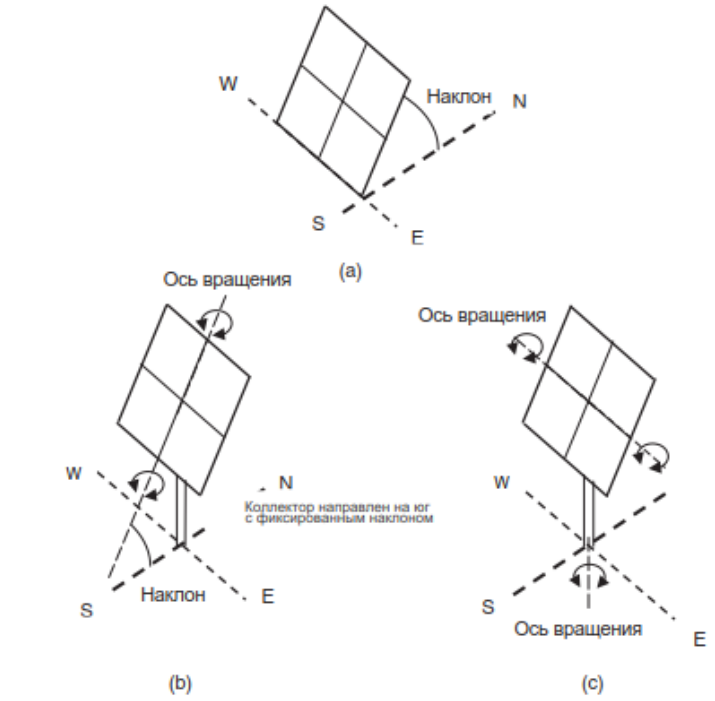


Рис. 7.5. Схема не отслеживающих и отслеживающих плоских коллекторов: (a) фиксированный наклон; (b) одноосевой (N – S), фиксированный наклон; (c) двухосевой отслеживающий.

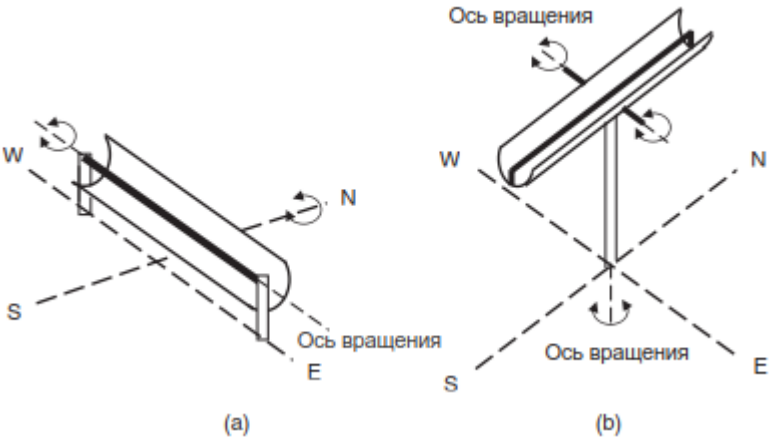


Рис. 7.6 Схема отслеживающего коллектора в форме желоба: (a) одноосевой (E-W) отслеживающий концентрирующий коллектор; (b) двухосевой отслеживающий концентрирующий коллектор.

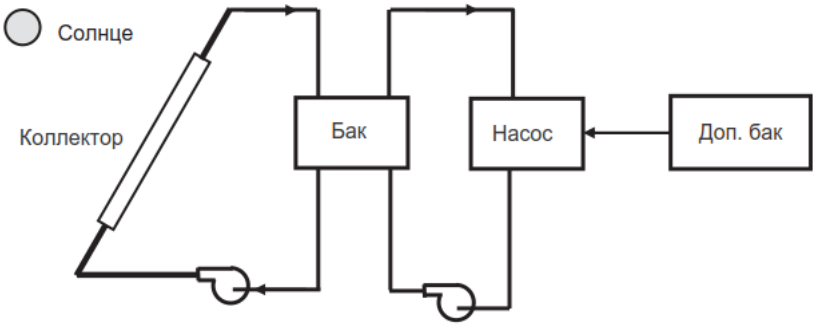


Рис. 7.7 Схема системы плоского солнечного коллектора.

7.2 Пластинчатый солнечный коллектор: Основные принципы

Разрез плоского солнечного коллектора представлен на рис. 7.8. Компоненты коллектора содержатся в корпусе, который обеспечивает опору конструкции и защиту. Остекление– это прозрачное покрытие (как правило, изготовленные из стекла с высокой проницаемостью солнечного света), которое обеспечивает защиту и пропускает большую часть солнечного излучения. Поглощающая пластина изготовлена из материала, который обладает высокой солнечной поглощающей и низкой излучательной способностью. Вода, протекающая через трубки, нагревается энергией от поглощающей пластины. Чтобы свести к минимуму потерю тепла, дно коллектора, которое контактирует с гальваническим покрытием, изолируется.

Поток энергии плоского коллектора показан на рис. 7.9. Полезная энергия $q_{полезн}$:

$$q_{поглощ} - q_{потери} = q_{полезн} \quad (7.1)$$

где $q_{поглощ}$ – солнечный свет, поглощаемый коллектором, а $q_{потер}$ - потери проводимости и излучения от коллектора в окружающую среду. Солнечный свет, поглощаемый поглощающей пластиной (α, поглощающая способность), должно сначала проходить через стеклянные пластины (τ, пропускная способность) так, чтобы

$$q_{поглощ}=I_T A_C \alpha\tau \quad (7.2)$$

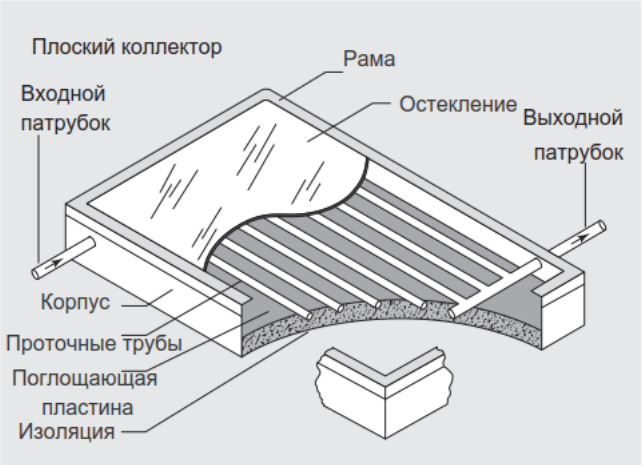


Рис. 7.8 Разрез плоского коллектора (DOE/EERE).
Источник: http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34279.pdf (стр. 3).

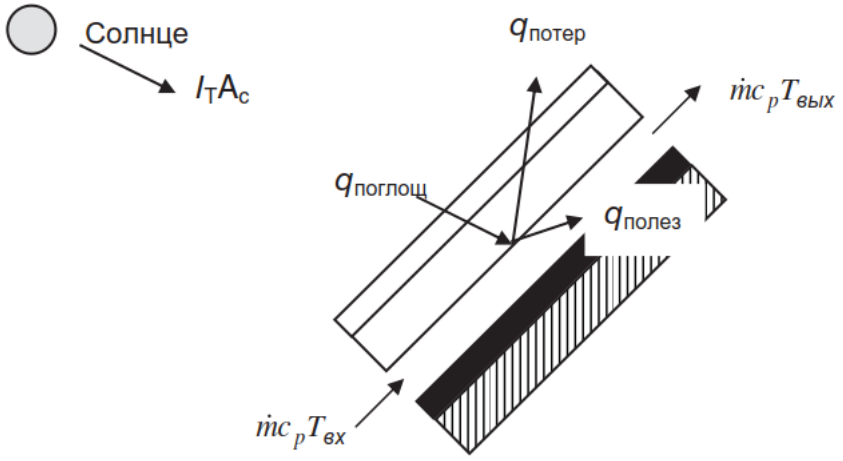


Рис. 7.9. Поток энергии в плоском коллекторе.

где A_C - площадь поверхности коллектора, а I_T - интенсивность облучения солнечным светом. Потери из-за проводимости и излучения во внешнюю среду, выраженные в единицах общей проводимости U_L и разности температур $T_{ср}$-$T_{окр}$, могут быть выражены как

$$q_{потер} = A_C U_L (T_{ср} - T_a) \tag{7.3}$$

где $T_{ср}$ - средняя температура коллектора, а $T_{окр}$ - температура окружающей среды.

Полезная энергия тогда становится

$$Q_{полез} = A_C[I_T\tau\alpha - U_L(T_{ср} - T_a)] = \dot{m}c_p(T_{вых} - T_{вх}) \tag{7.4}$$

что также должно быть равно изменению энергии рабочей жидкости. Данное выражение дает в результате некоторую интересную информацию об ограничении производительности плоских коллекторов. Рассмотрим вариант с уменьшением потерь - $T_{ср} = T_{окр}$. Но если $T_{ср} = T_{окр}$, коллектор и циркулирующая жидкость находятся при температуре окружающей среды, а температура рабочей жидкости настолько низкая, то энергия не является полезной. По мере увеличения температуры коллектора потери возрастают. Для варианта со значимым верхним пределом $T_{ср}$ должна быть настолько высокой, чтобы уровнять $q_{потери} = q_{поглощ}$, при этом $q_{полезная} = 0$.

Энергия при высокой температуре достаточна, но только при очень низкой скорости потока рабочей жидкости.

$$\eta_c = \frac{q_{полезн}}{I_T A_C} \tag{7.5}$$

который, при внедрении $q_{полез}$ с упрощением выражения, становится

$$\eta_c = \tau\alpha - U_L \frac{T_{ср} - T_{окр}}{I_T} \tag{7.6}$$

Эффективность коллектора η_c, таким образом, является линейной функцией разности температур, деленной на облучение солнечным светом I_T, с наклоном $-U_L$. Таблица 7.1 содержит стандартные значения $\tau\alpha$ и U_L для плоских солнечных коллекторов (Митчел, 1983).

Поведение типичных коллекторов при использовании значений из Таблицы 7.1 показано на рис. 7.10. Этот простой анализ передает большинство важных аспектов производительности плоского солнечного коллектора и является основой процедуры, используемой производителями солнечных коллекторов для описания производительности их продуктов.

Таблица 7.1 Типичные плоские свойства солнечного коллектора.

	Черный		**Селективный**	
	$\tau\alpha$	**U_L**	$\tau\alpha$	**U_L**
№ покрытия		**(БТЕ/(час фут^2 °F))**		**(БТЕ/(час фут^2 °F))**
0	0.95	6.0	0.90	5.0
1	0.90	1.0	0.85	0.5
2	0.85	0.6	0.80	0.3

Даже несмотря на то, что произведение $\tau\alpha$ уменьшается при изменении конфигурации покрытия с неглазурованного на одно или два покрытия, уменьшение значений U_L становится еще более выраженным, и в результате получается, что для данной разности температур эффективность при изменении конфигурации покрытия от неглазурованного до двух покрытий.

Простой анализ выражает эффективность коллектора через среднюю температуру коллектора $T_{ср}$. Более полезное выражение включает $T_{вх}$, температуру жидкости на входе, которая может быть приведена как

$$\eta = F_R\left(\tau\alpha - U_L \frac{T_{вх} - T_{окр}}{I_T}\right) = F_R\tau\alpha - F_R U_L \frac{T_{вх} - T_{окр}}{I_T} \tag{7.7}$$

где F_R - коэффициент теплоотвода коллектора. Уравнение 7.7 иногда называют уравнением Хоттеля-Уиллера-Блисса и считается наиболее важным уравнением, связанным с плоскими солнечными коллекторами. Данный подход включает в себя процесс теплообмена между поглощающей пластиной и теплообменником коллектора. Данные коллектора обычно представляются в соответствии с точками пересечения $F_R\tau\alpha$ и наклона F_RU_L.Госвамни и соавт. (2000) и Даффи и Бекман (2006) проводят обсуждение деталей коэффициента теплоотдачи.

Для более точного анализа плоских солнечных коллекторов в уравнение 7.7 часто добавляют модификатор угла падения $K_{\tau\alpha}$:

$$\eta = F_R\left(K_{\tau\alpha}(\tau\alpha)_n - U_L\frac{T_{вх} - T_{окр}}{I_T}\right) = F_RK_{\tau\alpha}(\tau\alpha)_n - F_RU_L\frac{T_{вх} - T_{окр}}{I_T} \tag{7.8}$$

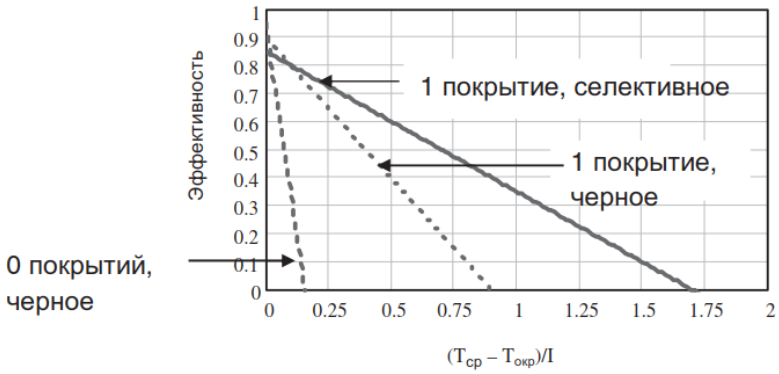


Рис. 7.10 Рабочие характеристики стандартных плоских солнечных коллекторов

В уравнении Хоттеля – Уиллера – Блисса произведение τα будет меняться с углом падения солнечного излучения. Но многие плоские коллекторы фиксированы, и угол падения будет меняться в течение дня. Модификатор угла падения учитывает это изменение, выражая значение τα как

$$\tau\alpha = K_{\tau\alpha}(\tau\alpha)_n \tag{7.9}$$

где – $(\tau\alpha)_n$ для нормального по отношению к коллектору солнечного излучения. $K_{\tau\alpha}$ обычно приводится в виде

$$K_{\tau\alpha} = 1 - b\left[\frac{1}{\cos(i)} - 1\right] \tag{7.10}$$

где i - угол падения и b≈0.1 для одинарного остекления и b≈0.17 для двойного остекления. Рассмотрим следующий пример.

Пример 7.1

На рис. 7.11 представлены результаты испытания производительности однослойного плоского коллектора. Коэффициент прозрачности τ стекла составляет 0,90, а коэффициент поглощения α поверхности 0,92.

Для коллектора:
а) коэффициент теплоотдачи коллектора F_R;
б) общая проводимость U_L в БТЕ/(час фут^2 °F);
с) скорость, с которой коллектор может доставлять полезную энергию, когда солнечное излучение, падающее на единицу площади коллектора, составляет БТЕ/(час фут^2 °F); температура окружающей среды составляет 30 ° F, а вода на входе имеет температуру 60 ° F;
г) температура коллектора, когда скорость потока равна нулю (η = 0).

Решение: на рис. 7.11 точка пересечения (экстраполированная) составляет приблизительно 0,8. Таким образом:

$$0.8 = F_R\tau\alpha = F_R(0.9)(0.92)\ F_R = 0.97$$

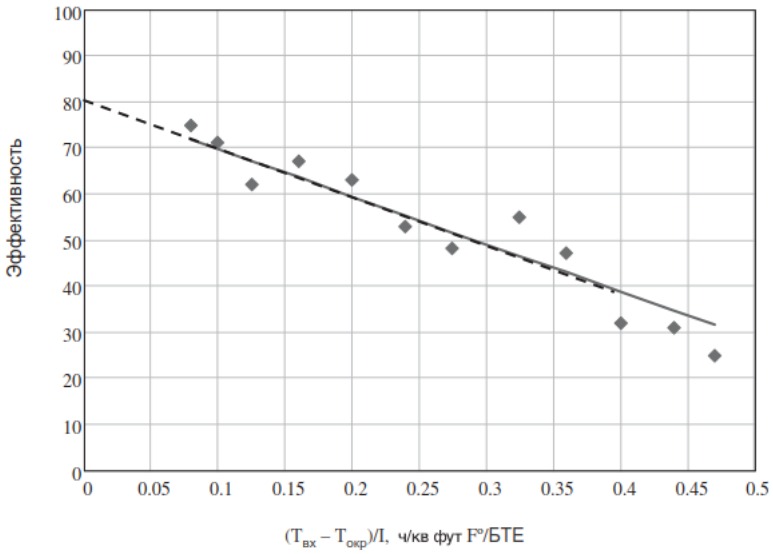


Рис. 7.11. Рабочие характеристики плоского солнечного коллектора.

Из выражения нахождения эффективности коллектора, наклон равен

$$-F_R U_L = \Delta\eta/\Delta X:$$

$$-0.97U_L = \frac{(0.5-0.8)\text{БТЕ}/(\text{ч фут}^2\,^\circ\text{F})}{0.3-0.0} = -1\ \text{БТЕ}/(\text{ч фут}^2\,^\circ\text{F})$$

из чего следует, что общая проводимость U_L находится

$$U_L = 1.03\ \text{БТЕ}/(\text{ч фут}^2\,^\circ\text{F})$$

Выражение эффективности коллектора $\eta = 0.8 - 1.0[(T_{вх} - T_{окр})/I_T]$, из которого следует

$$\eta = 0.8 - 1.0\frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2\,\text{ч}\,^\circ\text{F}}\frac{(60-30)\,^\circ\text{F}}{200\ \text{БТЕ}/(\text{фут}^2\,\text{ч})} = 0.65$$

Определение эффективности коллектора $\eta = q_{полез}/(I_T A_c)$, откуда

$$\frac{q_{полезн}}{A_c} = 0.65 \times 200\frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2\,\text{ч}} = 130\frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2\,\text{ч}}$$

Когда скорость потока равна нулю, достигается условие «застоя», которое приводит к достижению максимальной температуры коллектора. Когда скорость потока равна нулю, полезная энергия не уходит из коллектора при помощи жидкости, и установившаяся температура коллектора увеличивается до тех пор, пока вся поступающая солнечная энергия не рассеивается конвекцией и излучением. Для этого условия $\eta = 0$ и

$$0 = F_R\left(\tau\alpha - U_L\frac{T_{макс} - T_a}{I_T}\right) \quad \text{or} \quad \tau\alpha = U_L\frac{T_{макс} - T_a}{I_T}$$

$$(0.9)(0.92) = 1.03\frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2\text{ч}\,^\circ\text{F}}\frac{T_{макс} - 30\ ^\circ\text{F}}{200\ \text{БТЕ}/\text{фут}^2\text{ч}}$$

$$T_{макс} = 191\ ^\circ\text{F}$$

Температура застоя $T_{макс}$ составляет 191°F. Таким образом, если бы поток был остановлен, коллектор в конечном итоге мог нагреться до 191°F.

Пример 7.1 позволяет получить представление об информации, необходимой для инженерных расчетов для плоского коллектора. Данные наклона и точек пересечения необходимы для любого плоского коллектора, и данные о солнечном излучении, соответствующие конкретной ориентации азимутального и высотного углов коллектора, необходимы для оценки работы коллектора. Источники и примеры данных плоского солнечного коллектора и данных о солнечной энергии рассматриваются в Разделе 7.3.

7.3 Солнечный коллектор и метеоданные

Сторонние сертификационные данные по конкретным тепловым солнечным коллекторам и солнечным системам горячего водоснабжения доступны от Solar Rating and Certification Corporation (SRCC). Адрес веб-сайта SRCC, www.solar-rating.org. На Веб-сайте SRCC доступен онлайн-рейтинг солнечных коллекторов в формате PDF. При выборе пункта «СЕРТИФИКАЦИЯ И СПИСОК ЛИСТИНГОВ» на домашней странице выбран, появляется следующий список:

Сертификаты коллектора OG-100

• Солнечные коллекторы (плоские, трубчатые, ICS, термосифонные, концентрирующие)
• Прозрачные коллекторы
• Водонагревательные коллекторы PV
Сертификация системы OG-300
Список кодов и стандартов
Список компаний-участниц

При выборе одной из трех категорий солнечных коллекторов, доступ к каталогу оценок этого типа коллекторов осуществляется по адресу http://www.solar-rating.org/certifcation_listing_directory/index.html. В каталоге содержится весь перечень оценок для каждого из типов коллекторов, но на начальной странице можно выбрать определенные коллекторы в соответствии с заданными пользователем критериями, включая конкретных производителей. Пункт «Сертификация системы OG-300» ведет к оценкам и сертификации системы солнечного нагрева воды, разработанной SRCC.

SRCC также поддерживает обновленный список названий (и контактную информацию) компаний, которые участвуют в программах сертификации SRCC, а также сводные данные приведенные в удобной форме (название компании, номер модели, площадь коллектора, покрытие поглощающей пластины, наклон, точки пересечения и среднесуточная энергия, собранная при стандартных условиях) для сертифицированных солнечных коллекторов. Некоторые примеры представления данных SRCC приведены по порядку.

На рис. 7.12 приведена таблица данных «остекленного солнечного коллектора». Эти данные были получены в соответствии со стандартом SRCC™ 100-2014-07 Минимальный стандарт для солнечных тепловых коллекторов, который ссылается на стандарт ISO 9806:2013 Солнечная энергия - Солнечные тепловые коллекторы - Методы испытаний. Административная информация представлена в верхней части таблицы данных. Раздел «Оценка тепловых характеристик коллектора» состоит из критериев производительности в единицах СИ и дюйм-фунт (IP) для трех условий освещенности (ясно, слегка облачно и облачно) и пяти (A – E) температурных категорий. Пять категорий предполагают различные направления применения, которые полностью соответствуют разнице температур входящей жидкости и окружающего воздуха. Таблица 7.2 содержит информацию, определяющую категории A – E. Информация о «Спецификации коллектора», «Материалы коллектора» и «Техническая информация» описана под соответствующими заголовками в середине страницы. Наклон и точки пересечения, а также квадратные уравнения эффективности приведены как в единицах системы СИ, так и в единицах дюйм-фунт (IP), а также приводится выражение модификатора угла падения. Нижняя часть страницы посвящена «Падению давления». Таким образом, в листе сертификации имеется достаточная информация для проведения инженерных расчетов.

Как и в случае большинства компонентов энергетических систем, информация о плоских солнечных коллекторах также может быть предоставлена производителями. Например, веб-сайт Альтернативные Энергетические Технологии доступен для информации о коллекторе AE-21. В дополнение к ссылкам на технические данные SRCC, на рис. 7.13 представлен рекламный лист солнечного коллектора AE-21 с веб-сайта Альтернативные Энергетические Технологии. Форма представления продукта, как на изображении, показанном на рис. 7.13, является типичной для производителей солнечных коллекторов.

Таблица 7.2 Описание конечного использования плоского коллектора.

Категория	**Разность температур**		**Область применения**
A	-5 °C	-9 °F	Подогрев бассейна Жидкостной коллектор (тепловой насос)
B	5 °C	9 °F	Обеспечение горячей водой, Отопление помещений, обогрев воздушных систем
C	20 °C	36 °F	Обеспечение горячей водой, Обогрев помещений, жидкостных систем Кондиционирование
D	50 °C	90 °F	Обогрев помещений, жидкостных систем
E	80 °C	144 °F	Кондиционирование, промышленное отопление

СЕРТИФИЦИРОВАННЫЙ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР

ПОСТАВЩИК

Альтернативные энергетические технологии

1345 EnergyCoveCourt

Грин Коув Спрингс, Флорида 32043 США
www.aetsolar.com

Марка:	Alternate Energy
МОДЕЛЬ:	AE-21
ТИП КОЛЛЕКТОРА:	Глазурованный плоский
СЕРТИФИКАТ:	10011940
Дата Сертификации:	12 декабря 2014
Срок действия:	03 декабря 2024

Нижеуказанный солнечный коллектор, был оценен корпорацией Solar Rating & Certification Corporation ™ (SRCC ™), органом по сертификации признанным ISO/IEC 17085 и EPA, в соответствии с SRCC OG-100, Руководством по эксплуатации и Минимальными стандартами для сертификации солнечных коллекторов, также получил сертификат SRCC. Данный сертификат регулируется всеми условиями Программного соглашения и документов, на которые ссылается данное соглашение. Данный документ должен быть воспроизведен полностью.

РЕЙТИНГ ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОЛЛЕКТОРА

Киловатт-часов (тепловых) на панель в день				**Тысячи Бте на панель в день**			
Климат Категория (Титан-Тантал)	**Высокая радиация (6.3 кВч/м² в день)**	**Средняя радиация (4.7 кВч/м² в день)**	**Низкая радиация (3.1 кВч/м² в день)**	**Климат Категория (Титан-Тантал)**	**Высокая радиация (2000 Бте/фут² в день)**	**Средняя радиация (1500 Бте/фут² в день)**	**Низкая радиация (1000 Бте/фут² в день)**
A (-5 ºC)	8.8	6.7	4.6	**A (-9 ºF)**	30.1	22.9	15.6
B (5 ºC)	7.7	5.6	3.3	**B (9 ºF)**	26.4	19.1	11.9
C (20 ºC)	6.1	4.0	2.0	**C (36 ºF)**	20.8	13.7	6.7
D (50 ºC)	3.1	1.3	0.0	**D (90 ºF)**	10.5	4.3	0.0
E (80 ºC)	0.5	0.0	0.0	**E (144 ºF)**	1.8	0.0	0.0

A- Подогрев бассейна (теплый климат) B- Подогрев бассейна (прохладный климат) C- Водяное отопление (теплый климат)
D- Отопление и отопление (холодный климат) E- Горячая вода и охлаждение для коммерческих целей

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЛЕКТОРА					
Общая площадь:	1.932 м²	20.8 фут²	**Сухой вес:**	34 кг	74 фунтов
Общая площадь диафрагмы:	1.783 м²	19.19 фут²	**Объем жидкости:**	2.7 литров	0.7 галлонов
Зона поглощения:	1.747 м²	18.80 фут²	**Давление при испытании**	1103 кПа	180 фунт на квадратный дюйм

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ				
Уравнение эффективности ISO (ПРИМЕЧАНИЕ: основано на общей площади и (P) = Ti-Ta)				
Единицы СИ	η=0,740 – 5,18920(P/G) – 0,01910 (P²/G)	**0.749**	**Наклон:**	**-6.159 Вт/м².ºC**
Стандартные единицы	η=0,740 – 0,91456(P/G) – 0,00187 (P²/G)	**0.749**	**Наклон:**	**-1.086 Бте/ч.фут².ºF**

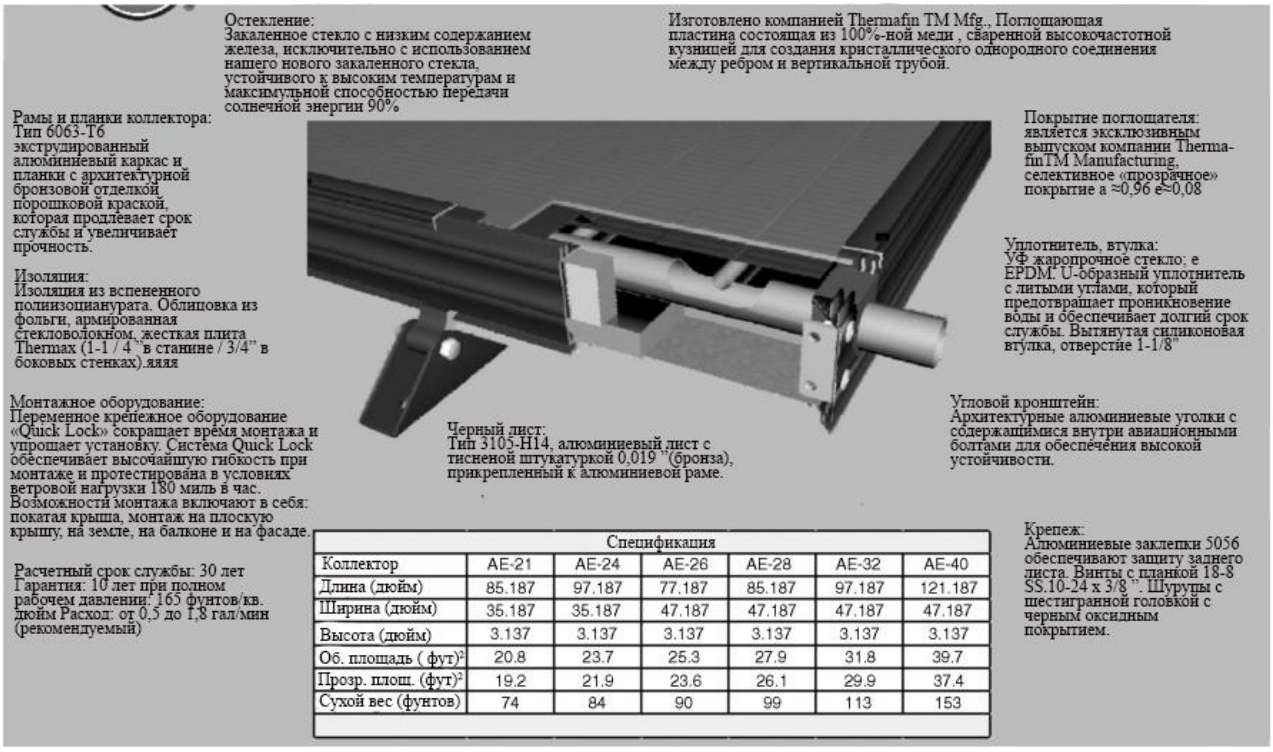
Модификатор угла падения								**Испытательная жидкость:**	**Вода**	
0	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**Испытание расхода массы:**	**0.0194 кг/(s м²)**	**14,29 фунт/(ч фут²)**
Kτα	**1.00**	**1.00**	**0.99**	**0.97**	**0.93**	**0.79**			**Уровень безопасности при негативном воздействии:11**	

Со страницы 3 сертификата AE21 SRCC

ПАДЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ				
Поток	**ΔP**		**Поток**	**ΔP**
мл/с	**Па**		**гал/мин**	**В H_2O**
20	**0**		**0.32**	**0.0**
50	**0**		**0.79**	**0.0**
60	**0**		**1.27**	**0.0**

Рис. 7.12. Образец сертификата SRCC. Источник: SRCC.

Информация о погоде и солнечном излучении для солнечной энергетики была рассмотрена в Разделе 6.5. В дополнение к данным, полученным от NREL, различные авторы учебных руководств предоставили данные о солнечной энергии, необходимые для оценки производительности солнечных энергетических систем. Например, Госвами и соавт. (2000) представили информацию о часовом солнечном освещении, полезную для почасовых вычислений для солнечного коллектора, таких как в примере 7.1. Их табличные данные приводятся для 21-го числа каждого месяца и представлены для 24 °, 32 °, 40 °, 48 °, 56° и 64 ° северных широт. Общее солнечная инсоляция (БТЕ/час*фут^2) предусмотрена для поверхностей, обращенных на юг, наклоненных под углом широты -10 °, + 10 ° и + 20 °, для вертикальных (90 °) поверхностей и нормалей поверхности относительно солнца. Таблицы Госвами и соавт. (2000) солнечной инсоляции включены в Приложение А.



Спецификация						
Коллектор	AE-21	AE-24	AE-26	AE-28	AE-32	AE-40
Длина (дюйм)	85.187	97.187	77.187	85.187	97.187	121.187
Ширина (дюйм)	35.187	35.187	47.187	47.187	47.187	47.187
Высота (дюйм)	3.137	3.137	3.137	3.137	3.137	3.137
Об. площадь (фут)^2	20.8	23.7	25.3	27.9	31.8	39.7
Прозр. площ. (фут)^2	19.2	21.9	23.6	26.1	29.9	37.4
Сухой вес (фунтов)	74	84	90	99	113	153

Рис. 7.13 Информация об альтернативных энергетических технологиях AE-21. Источник: Альтернативные Энергетические Технологии.

Для многих расчетов по солнечной инженерии необходимы месячные значения инсоляции (освещенности) для различных направлений и протоколы отслеживания. Веб-сайт NREL (www.nrel.gov) предоставляет информацию о солнечном излучении и метеорологических условиях в ряде различных наборов данных (обсуждается в Разделе 6.5). Исходная База данных Национальной солнечной радиации (NSRDB) является наиболее подходящей для использования из информации указанной в этом учебном руководстве. Исходная NSRDB содержала ежемесячную информацию о метеорологических показателях и показателях солнечного излучения, основанную на средних значениях за 30 лет (1961–1990) для 239 мест, показанных на рис. 6.20. Исходная NSRDB содержала следующее:

Ежедневные статистические файлы

Почасовые файлы данных

Руководство по данным о солнечном излучении для строений (Марион и Уилкокс, 1995)

Средние показатели (1961–1990) солнечной инсоляции и освещенности за каждый месяц в течение 30-ти лет

Руководство по данным о солнечном излучении для плоских и концентрирующих коллекторов (Марион и Уилкокс, 1994)

Средние месячные показатели инсоляции и метеорологические данные для каждого из 360 месяцев за период 1961–1990 гг.

Кроме того, веб-сайт содержит другие данные о широкополосном солнечном излучении и карты ресурсов в виде атласа для строений, плоских и концентрирующих солнечных коллекторов. Ряд кодов для солнечных компьютеров, алгоритмов, моделей и калькуляторов также представлены и описаны на веб-сайте. Информация, содержащаяся на веб-сайте, а также SRCC и NREL ссылки в конце данной главы, являются логическими инструментами для технических деталей и процедур, выходящих за рамки этой главы.

Руководство по данным о солнечном излучении для плоских и концентрирующих коллекторов (Марион и Уилкокс, 1994) содержит необходимые данные для следующего уровня анализа и оценки эффективности солнечной системы энергообеспечения. Данные из руководства для Меридиана, штат Миссисипи представлены таким же образом, как указано на рис. 7.14. Необходимо изучить содержимое данного документа. Первая серия записей содержит информацию о расположении и обозначает выборку в качестве первичного или вторичного источника (вторичный источник изображен на рисунке). Остальные данные поделены на разделы, посвященные солнечному излучению и климатическим условиям. Данные о количестве солнечного излучения представлены как энергия от падающих солнечных лучей на квадратный метр в день (кВт ч/(м^2 в день)) для четырех типов конфигурации солнечных коллекторов. Конфигурации солнечных коллекторов, указанные в данных, следующие:

1) Плоские коллекторы обращены на юг с фиксированным наклоном
    i) угол наклона 0 ° (горизонтальный)
    ii) широта -15 ° в зависимости от угла наклона
    iii) широта в зависимости от угла наклона
    iv) широта + 15 ° в зависимости угла наклона
    v) угол наклона 90 ° (вертикальный)
2) Одноосевые отслеживающие плоские коллекторы с осью север-юг
    i) наклон 0 °
    ii) широта -15 ° в зависимости от угла наклона
    iii) широта в зависимости от угла наклона
    iv) широта + 15 ° в зависимости от угла наклона
3) Двухосевые отслеживающие плоские коллекторы
4) Прямолинейное излучение для концентрирующих коллекторов
    i) Одноосевой, горизонтальная ось восток – запад
    ii) Одноосевой, горизонтальная ось север-юг
    iii) Одноосевой, наклон север-юг, учитывая широту в зависимости от угла наклона
    iv) Двухосевой



Meridian, MS

WBAN NO. 13865

ШИРОТА: 32.33° север
ДОЛГОТА: 88.75° запад
ВЫСОТА: 94 метров
СРЕДНЕЕ ДАВЛЕНИЯ: 100 миллибар
ТИП СТАНЦИИ: Вторичный

Солнечное излучение для плоских коллекторов, обращенных к югу с фиксированным наклоном (кВтч/м2/день), погрешность ± 9%

Наклон (°)		Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нов	Дек	Год
0	Средняя Мин/Макс	2.6 2.2/3.0	3.4 3.0/3.9	4.4 3.7/5.1	5.4 4.8/6.4	5.9 5.4/6.8	6.2 5.3/6.9	5.9 5.2/6.5	5.6 4.8/6.3	4.8 4.1/5.5	4.1 3.2/4.8	2.9 2.3/3.4	2.4 2.0/2.8	4.5 4.2/4.7
Широта -15	Средняя Мин/Макс	3.2 2.6/4.0	4.1 3.4/4.8	4.8 4.1/5.8	5.7 4.9/6.8	5.9 5.4/6.8	6.0 5.2/6.7	5.8 5.1/6.4	5.7 4.9/6.4	5.2 4.4/6.0	4.8 3.6/5.8	2.6/4.4	3.1 2.5/3.8	4.8 4.6/5.1
Широта	Средняя Мин/Макс	3.6 2.8/4.6	4.4 3.6/5.3	5.0 4.1/6.1	5.6 4.8/6.7	5.6 5.1/6.4	5.6 4.9/6.2	5.4 4.8/6.0	5.5 4.7/6.2	5.2 4.4/6.1	5.2 3.7/6.3	4.1 2.7/5.0	3.5 2.7/4.4	4.9 4.7/5.2
Широта +15	Средняя Мин/Макс	3.8 2.9/5.0	4.5 3.6/5.5	4.9 4.0/6.0	5.2 4.5/6.2	5.0 4.5/5.7	4.9 4.3/5.4	4.8 4.2/5.3	5.0 4.3/5.7	5.0 4.2/5.9	5.2 3.7/6.4	4.3 2.8/5.3	3.8 2.8/4.8	4.7 4.5/5.0
90	Средняя Мин/Макс	3.3 2.4/4.4	3.5 2.8/4.4	3.3 2.7/4.0	2.8 2.5/3.3	2.2 2.1/2.4	2.0 1.9/2.1	2.1 2.0/2.2	2.6 2.3/2.8	3.1 2.6/3.7	3.9 2.6/4.8	3.6 2.2/4.5	3.3 2.3/4.3	3.0 2.8/3.2

Солнечное излучение для одноосевых отслеживающих плоских коллекторов, с осью север-юг (кВтч/м²/день), погрешность ± 9%

Наклон (°)		Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нов	Дек	Год
0	Средняя Мин/Макс	3.5	4.6	5.7	7.0	7.5	7.7	7.2	7.0	6.1	5.5	4.0	3.2	5.7
Широта -15	Средняя Мин/Макс	2.7/4.4	3.6/5.6	4.6/7.1	5.8/8.9	6.5/8.9	6.3/9.0	6.2/8.4	5.6/8.1	4.9/7.3	3.8/6.9	2.6/4.8	2.5/4.0	5.4/6.2
Широта	Средняя Мин/Макс	4.0 3.0/5.1	5.1 4.0/6.3	6.1 4.8/7.7	7.2 5.9/9.1	7.5 6.5/89	7.6 6.2/8.9	7.2 6.1/8.4	7.1 5.7/8.2	6.5 5.1/7.8	6.1 4.1/7.6	4.5 2.8/5.6	3.8 2.8/4.7	6.0 5.6/6.5
Широта +15	Средняя Мин/Макс	4.3 3.1/5.6	5.3 4.1/6.7	6.2 4.9/7.8	7.1 5.9/9.1	7.2 6.3/8.6	7.3 5.9/8.5	6.9 5.9/8.1	7.0 5.6/8.1	6.5 5.1/7.8	6.4 4.3/8.0	4.9 3.0/6.1	4.1 3.0/5.2	6.1 5.7/6.6
90	Средняя Мин/Макс	4.4 3.2/5.9	5.4 4.2/6.8	6.1 4.8/7.8	6.8 5.6/8.7	6.8 5.9/8.1	6.8 5.5/7.9	6.5 5.5/7.6	6.6 5.3/7.7	6.3 4.9/7.7	6.4 4.2/8.1	5.0 3.0/6.3	4.3 3.0/5.5	6.0 5.6/6.5

Солнечное излучение для двухосевых отслеживающих плоских коллекторов (кВтч /м²/день). Погрешность ± 9%

Отслеживатель		Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нов	Дек	Год
2 оси	Средняя Мин/Макс	4.5 3.2/6.0	5.4 4.2/6.9	6.2 4.9/7.9	7.2 6.0/9.2	7.6 6.6/9.0	7.8 6.3/9.1	7.3 6.2/8.5	7.1 5.7/8.3	6.5 5.1/7.9	6.4 4.3/8.1	5.1 3.0/6.3	4.4 3.1/5.6	6.3 5.9/6.8

Прямое солнечное излучение для концентрирующих коллекторов (кВтч/м²/день), погрешность ± 8%

Отслеживатель		Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нов	Дек	Год
1 ось, В-З Гориз ось	Средняя Мин/Макс	2.5 1.3/3.7	2.8 1.8/4.1	2.9 1.9/4.3	3.3 2.4/4.9	3.3 2.5/4.5	3.4 2.3/4.4	3.1 2.1/4.0	3.0 1.9/3.9	2.9 1.9/3.9	3.4 1.7/4.7	2.8 1.2/3.9	2.5 1.4/3.5	3.0 2.7/3.4
1 ось, С-Ю Гориз ось	Средняя Мин/Макс	2.1 1.1/3.2	2.9 1.7/4.1	3.5 2.3/5.1	4.4 3.1/6.5	4.4 3.3/6.0	4.4 2.9/5.8	4.0 2.8/5.3	3.9 2.5/5.1	3.6 2.3/4.8	3.6 1.8/5.1	2.5 1.0/3.4	2.0 1.0/2.8	3.4 3.0/4.0
1 ось, С-Ю Наклон=Широта	Средняя Мин/Макс	2.8 1.5/4.2	3.5 2.2/5.1	3.9 2.6/5.7	4.5 3.2/6.7	4.2 3.1/5.8	4.1 2.7/5.4	3.8 2.6/5.0	3.9 2.5/5.1	3.9 2.5/5.2	4.3 2.1/6.0	3.2 1.3/4.5	2.7 1.4/3.8	3.7 3.3/4.3
2 оси	Средняя Мин/Макс	2.9 1.6/4.5	3.6 2.2/5.2	3.9 2.6/5.7	4.5 3.3/6.8	4.5 3.3/6.1	4.4 2.9/5.9	4.0 2.8/5.4	4.0 2.6/5.2	3.9 2.5/5.3	4.3 2.2/6.1	3.4 1.4/4.7	2.9 1.6/4.2	3.9 3.5/4.5

Средние климатические условия

Элемент	Янв	Фев	Март	Апр	Май	Июнь	Июль	Авг	Сент	Окт	Нов	Дек	Год
Температура (°C)	7.2	9.4	13.7	17.8	21.8	25.6	27.2	27.0	24.1	17.8	13.1	9.1	17.8
Дневная минимальная т-ра	0.8	2.6	6.4	10.5	14.9	18.9	21.1	20.7	17.7	10.3	5.8	2.6	11.0
Дневная максимальная т-ра	13.6	16.2	20.9	25.2	28.7	32.2	33.4	33.2	30.5	25.4	20.3	15.6	24.6
Запись минимальной температуры	-17.8	-13.3	-9.4	-2.2	3.3	5.6	12.8	11.7	1.1	-4.4	-8.9	-16.7	-17.8
Запись максимальной температуры	28.3	29.4	32.2	35.0	37.2	40.0	41.7	40.0	40.6	36.1	30.6	27.8	41.7
HDD, Нижний предел 18.3°C	349	253	162	55	8	0	0	0	3	68	167	292	1358
CDD, Верхний предел 18.3°C	4	3	17	40	117	218	276	269	177	53	9	6	1188
Относительная влажность (%)	74	71	70	71	73	74	77	77	76	75	75	75	74
Скорость ветра (м/с)	3.2	3.4	3.5	3.2	2.6	2.3	2.1	2.1	2.4	2.3	2.8	3.2	2.7

Рис. 7.14 Среднемесячные данные о солнечном излучении по меридиану, штат Миссисипи.

Среднемесячные значения инсоляции для каждой конфигурации солнечных коллекторов приведены на каждый месяц и указаны для минимальных, средних и максимальных условий излучения. Например, в июне для солнечного коллектора с фиксированным уклоном, наклоненного под углом широты, средняя инсоляция на коллекторе составила бы 5,6 кВт ч/($м^2$ в день). Четыре конфигурации солнечных коллекторов и параметры расположения, содержащиеся в каждой конфигурации, предоставляют данные об инсоляции, необходимые для большого спектра применений.

Последняя часть данных представляет собой ежемесячную информацию о климатических условиях. Приводятся средние, дневные минимальные и дневные максимальные температуры, как и рекордные минимумы и рекордные максимумы для каждого месяца. Максимальная температура в течении дня (HDD, верхний предел 65°F или 18,3°C) и минимальная температура в течении дня (CDD, нижний предел 65°F или 18,3°C) указаны наряду со средней относительной влажностью и средней скоростью ветра. HDD и CDD являются индикаторами относительной потребности в нагреве и охлаждении соответственно и будут определены и применены в Главе 8, посвященной пассивной солнечной энергии.

Пример 7.2

Оцените эффективность солнечного коллектора Альтернативные Энергетические Технологии AE-21 21 января, если коллектор расположен на 32° северной широты и наклонен под углом 32°. Температура воды на входе составляет 58°F. Температура окружающей среды колеблется от 25°F в 8:00 до 45°F в солнечный полдень до 35°F в 16:00. Необходимые показатели включают в себя почасовую эффективность, почасовую накопленную солнечную энергию и процент накопленной солнечной энергии.

Решение: информация об AE-21 доступна на веб-сайте SRCC и представлена на рис. 7.12. В примере 7.1 оценивается мгновенная производительность солнечного коллектора с учетом температуры окружающей среды и воды на входе, а также потока падающего солнечного излучения, что служит основой решения данного примера. Поступающая 21 января солнечная энергия при 32 ° северной широты с углом наклона коллектора 32 ° приводится в Приложении A на каждый час. Температура воды на входе принята постоянной, поскольку никакой информации об ее изменении не указано. Температура окружающей среды повышается в 8 часов утра, солнечный полдень и 4 часа дня. Из информации о температуре окружающей среды можно провести оценку температур окружающей среды в 9, 10 и 11 часов утра, а также в 1, 2 и 3 часа дня. Обладая данными о температуре окружающей среды за каждый час, температуре воды на входе и солнечном излучении можно оценить производительность коллектора на каждый час падающего солнечного света. Ежедневная производительность может быть получена путем суммирования почасовой информации о производительности. Рабочий лист Mathcad для решения приведен на рис. 7.15. Вводится информация из спецификации AE-21 SRCC. В соответствии с рекомендациями SRCC, площадь солнечного коллектора– это общая площадь, а не площадь апертуры. Вводятся входное солнечное излучение за каждый час (на 21 января из Приложения A для широты 32 ° и наклона 32 ° от горизонтали), температура воды на входе и температура окружающей среды. Эффективность солнечного коллектора на каждый час рассчитывается при помощи уравнения 7.7. Символ вектора над определением эффективности является оператором Mathcad, указывающим, что вычисление должно быть выполнено для каждых девяти определенных значений «i» - переменной диапазона. Почасовая накопленная энергия рассчитывается при помощи часового значения эффективности коллектора. Последние расчеты даны для ежедневной накопленной энергии (выраженной в киловатт-часах) и для доли накопленной солнечной энергии. По плану, описанному при постановке задачи, коллектор AE-21 будет собирать 7,91 (кВт· ч) в течение дня, или 65% от падающей солнечной энергии в этот день.

Расчеты, подобные представленным в примере 7.2, показывают, как оценить производительность солнечного коллектора за один день; однако для многих технических целей требуется оценка производительности более года. Существует множество программ моделирования, которые могут проводить ежегодные оценки производительности на почасовой основе при помощи TMY3 данных о

погоде. Даффи и Бекман (2013) провели обсуждение подобных программ. Однако приемлемой альтернативой с точностью, достаточной для предварительного проектирования и анализа, является метод преобразования графика функций, который рассматривается в Разделе 7.4.

Введите информацию о плоском солнечном коллекторе (получена с веб-сайта SRCC)

$$\text{Площадь} := 20.80 \cdot \text{ft}^2 \qquad \text{Общ.Площадь} := 1 \cdot \text{Площадь} \quad \text{Общ.Площадь} = 20.8\,\text{фут}^2$$

$$\text{Точка пересечения} := 0.749 \qquad \text{Наклон} := -1.086 \cdot \frac{\text{БТЕ}}{\text{ч} \cdot \text{фут}^2 \cdot \text{F}}$$

Установки для вектора I (солнечное излучение), $T_{вх}$, $T_{окр}$)

$$\text{Начало} \equiv 1 \qquad i := 1 .. 9$$

$$I := \begin{pmatrix} 106 \\ 193 \\ 256 \\ 295 \\ 308 \\ 295 \\ 256 \\ 193 \\ 106 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2 \cdot \text{ч}} \qquad T_{вх} := \begin{pmatrix} 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \\ 58 \end{pmatrix} \cdot F \qquad T_{ср} := \begin{pmatrix} 25 \\ 30 \\ 35 \\ 40 \\ 45 \\ 43 \\ 41 \\ 38 \\ 35 \end{pmatrix} \cdot F$$

Рис. 7.15. Решение в Mathcad (пример 7.2).

Расчет эффективности солнечного коллектора.

$$\eta := \overrightarrow{\left[\text{Точки пер-я} + \text{Наклон} \cdot \frac{\left(T_{вх} - T_{окр} \right)}{I} \right]}$$

$$\eta = \begin{pmatrix} 0.411 \\ 0.591 \\ 0.651 \\ 0.683 \\ 0.703 \\ 0.694 \\ 0.677 \\ 0.636 \\ 0.513 \end{pmatrix}$$

Расчет накопленной полезной энергии.

$$Q_{i} := \overrightarrow{(\text{Общ.площ}_{i} \cdot \eta)} \qquad Q_{\text{полезн}} = \begin{pmatrix} 905.965 \\ 2.374\times 10^{3} \\ 3.469\times 10^{3} \\ 4.189\times 10^{3} \\ 4.505\times 10^{3} \\ 4.257\times 10^{3} \\ 3.604\times 10^{3} \\ 2.555\times 10^{3} \\ 1.132\times 10^{3} \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{БТЕ}}{\text{ч}}$$

Энергия накопленная за день – сумма почасовой накопленной энергии

$$\text{Процент} := \frac{\sum_{i=1}^{9} \left(Q_{\text{полезн}_i}\right)}{\sum_{i=1}^{9} \left(\text{Общ.площ}_{i}\right)}$$

$$Q_{\text{Общ}} := \sum_{i=1}^{9} Q_{\text{полезн}_i} \cdot 1 \cdot \text{ч} \qquad Q_{\text{Общ}} = 7.91\,\text{кВт}\cdot\text{ч} \qquad \text{Процент} = 64.624\,\%$$

Процент захваченной падающей солнечной энергии

7.4 Метод преобразования графика функции

Метод преобразования графика функции часто используется для оценки годовых тепловых характеристик активной солнечной системы отопления здания. Даффи и Бекман (2013), а также Госвами и соавт. (2000), предоставляют гораздо более подробную информацию о разработке и применении метода преобразования графика функции, чем это возможно в данной главе. Метод преобразования графика функции (*f*-диаграмма*) – это* процедура определения доли *f* из общей месячной тепловой нагрузки (помещения и бытовой горячей воды), которая может поставляться активной системой солнечного теплоснабжения. Процедура основана на соотношении *f* как функции двух системных параметров. Соотношение было получено из результатов большого количества почасовых моделирований системы солнечного теплоснабжения. Двумя параметрами являются отношение потерь коллектора к нагревательным нагрузкам X и отношение поглощенного солнечного излучения к нагревательным нагрузкам Y. Для трех конфигураций системы были разработаны графики функции: (1) обогрев помещения и нагрев воды с использованием воды в качестве среды, (2) обогрев помещения и нагрев воды с использованием воздуха в качестве среды, и (3) техническая горячая вода. В данной главе будет представлен только первый вариант. Рис. 7.16 представляет собой схему «стандартной» конфигурации системы с использованием жидкого теплоносителя. Система состоит из солнечного коллектора, трех теплообменников (ТО), основного накопительного бака, бака предварительного нагрева, секции нагрузки и вспомогательных компонентов. Энергия, собранная коллектором, используется для нагрева воды для основного бака при помощи теплообменника коллектор-накопительного бака. Вода из накопительного бака используется в нагрузочном теплообменнике для подачи нагретого воздуха в дом. Питьевая вода предварительно нагревается перед подачей в накопительный бак для горячей воды. Вспомогательные системы предусмотрены как для

обеспечения теплом дома, так и для накопительного бака для горячей воды, если система солнечного теплоснабжения не в состоянии удовлетворить требуемые нагрузки.

Детальное моделирование системы, показанной на рис. 7.16, было использовано для определения соотношения между двумя безразмерными переменными (X и Y) и f – нагрузки, которую несет солнечная энергия. Первый из двух безразмерных параметров определяется

$$X = \frac{A_c F'_R U_L \Delta t (100 - \overline{T}_a)}{L} \tag{7.11}$$

где X - отношение потерь коллектора к нагрузке, A_C - площадь коллектора, F_R - корригированный коэффициент отвода тепла коллектора (обычно принимается равным $0{,}97F_R$), U_L - коэффициент потерь коллектора, $T_{окр}$ - среднемесячная температура окружающей среды, Δt - количество часов в месяце, а L - месячная общая тепловая нагрузка для нагрева (помещений и вода). Выражение безразмерно. Второй безразмерный параметр, Y, представляет собой отношение поглощенной солнечной энергии к общей тепловой нагрузке и определяется как

$$Y = \frac{A_c F'_R \overline{\tau\alpha} H_T N}{L} \tag{7.12}$$

где $\overline{\tau\alpha}$ - среднемесячное произведение τα для коллектора (обычно принимается за $0.96\tau\alpha$), H_T - среднемесячное ежедневное падение излучения на коллектор, а N - количество дней в месяце.

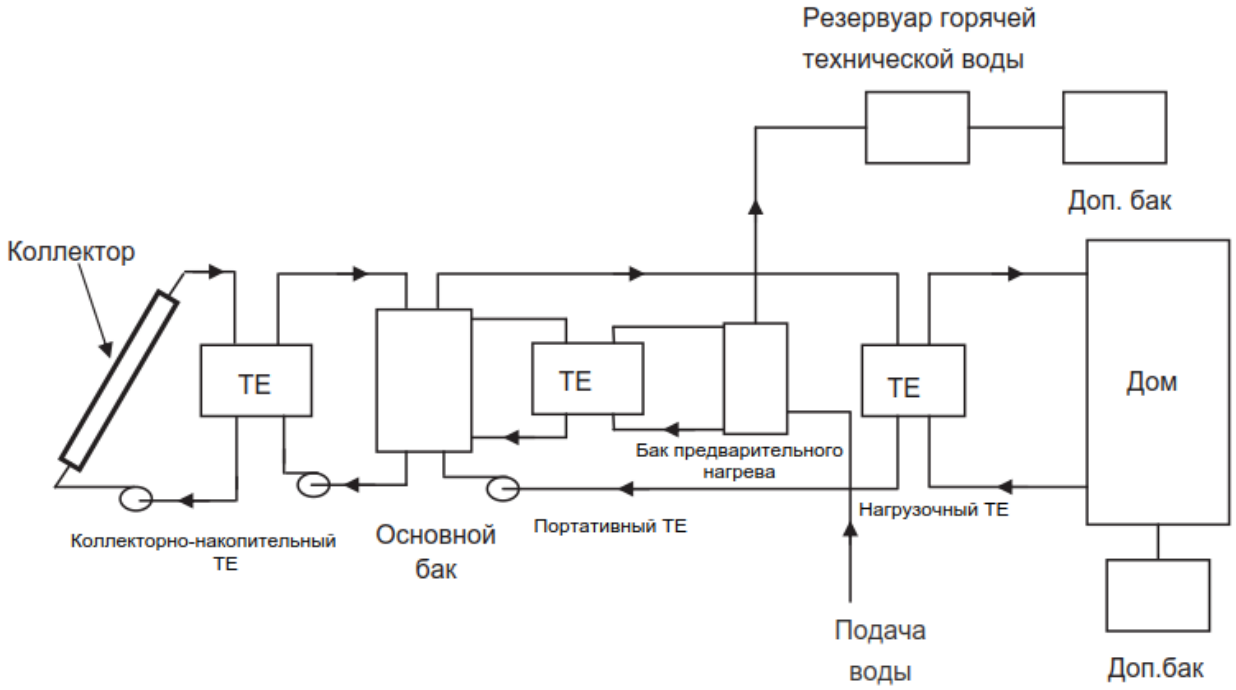


Рис. 7.16 «Жидкостная» схема системы солнечного теплоснабжения

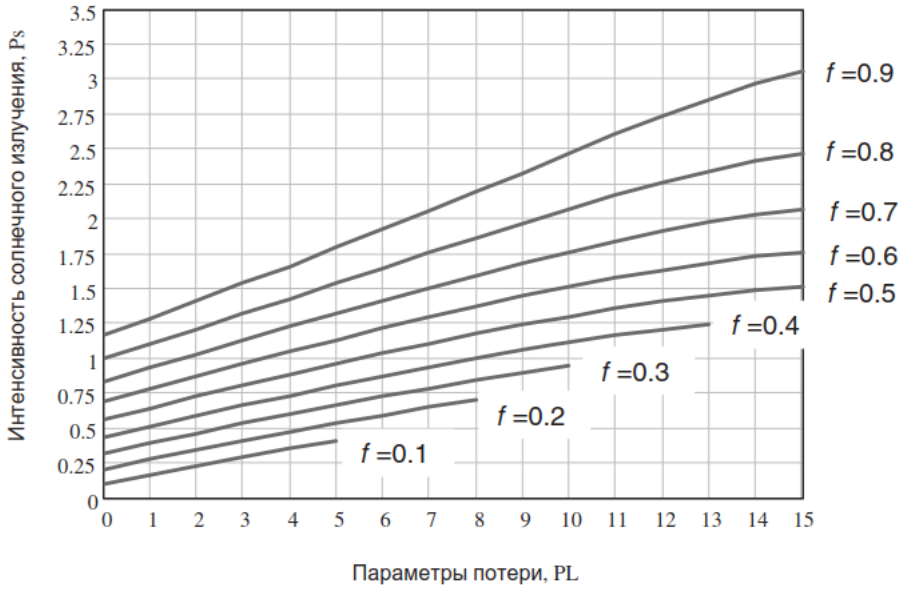


Рис. 7.17. График соотношения функций для жидкостных систем.

Значение доли солнечной энергии *f* за месяц получено для следующего соотношения «жидкостных» солнечных систем отопления:

$$f = 1.029Y - 0.065X - 0.245Y^2 + 0.0018X^2 + 0.0215Y^3 \tag{7.13}$$

На рис. 7.17 показано параметрическое выражение этого уравнения.

Аналогичные соотношения были получены и для систем воздушного отопления. Корреляция доли солнечной энергии за месяц для систем воздушного отопления составляет

$$f = 1.0409Y - 0.065X - 0.159Y^2 + 0.00187X^2 - 0.0095Y^3 \tag{7.14}$$

Пример 7.3

Офисное здание по меридиану штата Миссисипи, использует плоские солнечные коллекторы Альтернативные Энергетические Технологии AE-21 для отопления помещений и нагрева горячей воды. Коллекторы будут установлены в направлении на юг. Расчетная месячная нагрузка приведена в таблице 7.3.

Солнечная энергетическая система должна обеспечить все потребности в горячей воде на летние месяцы и 60% от доли годовой солнечной энергии для отопления

а) Сколько солнечных коллекторов AE-21 необходимо для соответствия спецификациям?

б) Если бы природный газ стоил 10 долларов за 10^6 БТЕ, сколько можно было бы сэкономить установкой такой солнечной энергетической системы?

Решение: решение выполняется в Маткад (Mathcad). Рабочая таблица решения содержится на рис. 7.19. Для упрощения решения, мегаджоули сокращены до Мдж, а дни месяца вводятся при расчете параметров графика функции X и Y. Среднесуточные данные солнечного излучения за каждый месяц и средняя температура каждого месяца получаются из данных о погоде для Меридиана, штат Миссисипи. Поскольку потребность в солнечном отоплении в зимние месяцы намного выше, в качестве угла наклона была выбрана широта + 15 ° для увеличения объемов накопления солнечной энергии в зимнее время.

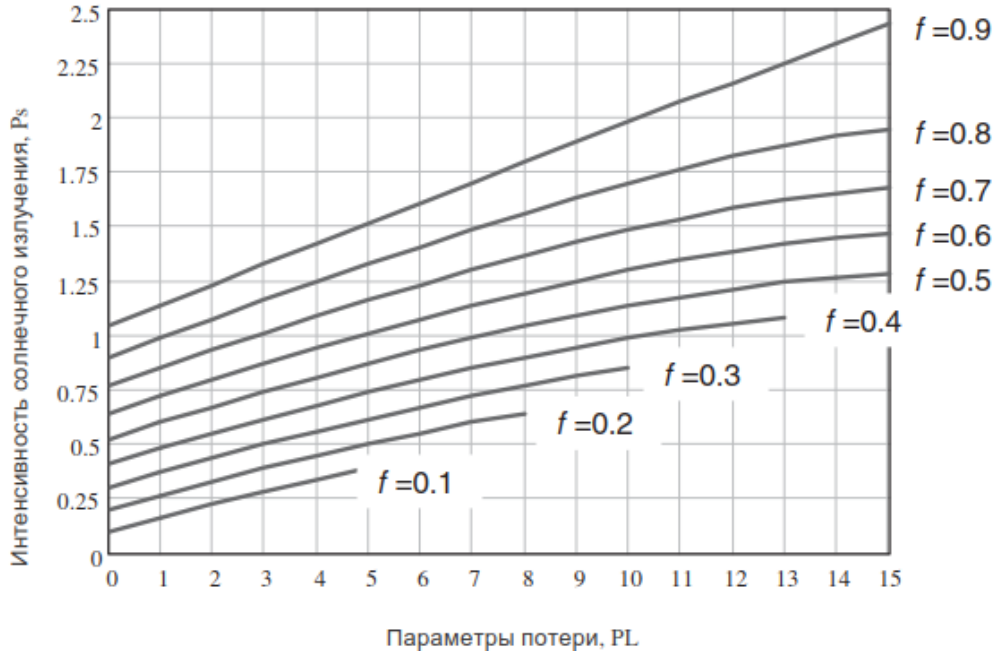


Рис. 7.18. График соотношения функций для воздушных систем.

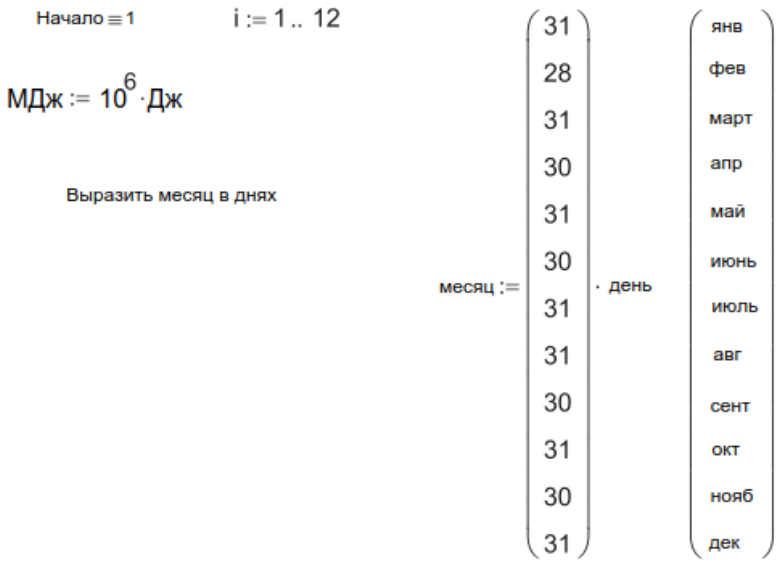
Данные о погоде приведенные на рис. 7.14 берутся из базы данных Руководства по данным о солнечном излучении для плоских и концентрирующих коллекторов на сайте www.nrel.gov. Информация о наклоне и точках пересечения для солнечного коллектора AE-21 была взята из паспорта SRCC, показанного на рис. 7.12. Определение количества необходимых коллекторов AE-21 является итеративным процессом. Требуемое количество коллекторов приблизительно подсчитывается, и анализ завершается для определения эффективности предполагаемого количества коллекторов.

Таблица 7.3. Ежемесячная потребность в тепловой энергии для офисного здания.

Месяц	**Нагрузка (1000 Мдж)**
Январь	140
Февраль	120
Март	80
Апрель	50
Май	28
Июнь	20
Июль	20
Август	20
Сентябрь	20
Октябрь	40
Ноябрь	80
Декабрь	110

Пример графика функции для солнечного отопления в Меридиане, штат Миссисипи

Установите все входные параметры за каждый месяц, используя переменную диапазона i:



Среднемесячные условия из NREL применяются для получения данных о солнечном излучении и погоде для местности, в данном случае Меридиан, штат Миссисипи. Данные о нагрузке должны основываться на информации о строении.

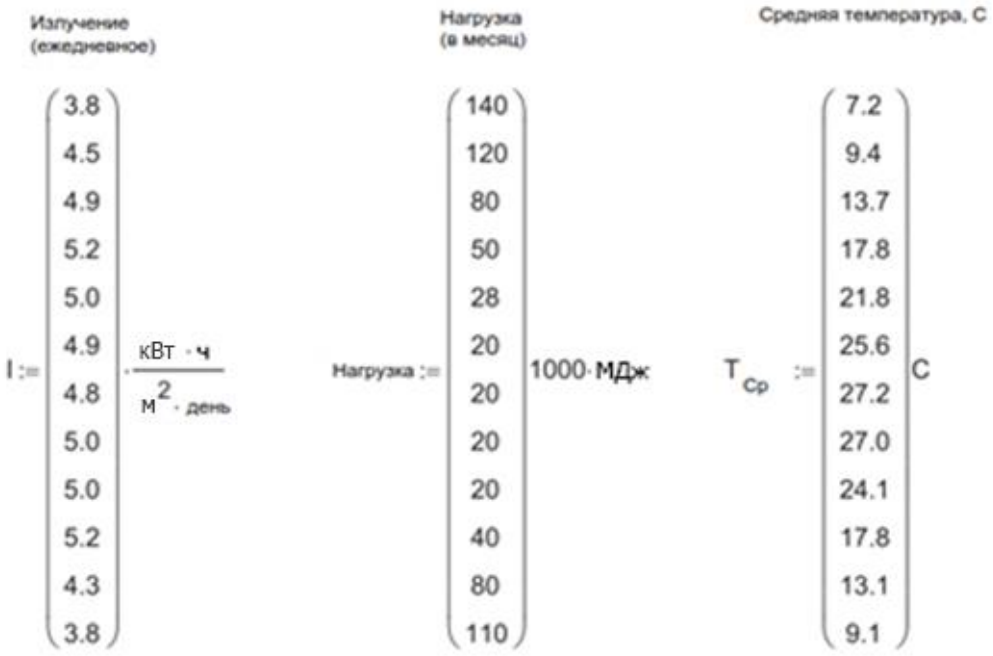


Рис. 7.19 Решение в Mathcad (пример 7.3).

Когда требуемая производительность достигнута, процесс пересечения достигает сходимости. Параметры X и Y рассчитываются для каждого месяца, при этом значение доли солнечной энергии, которое *приходится* на каждый месяц, получают путем корреляции *f-диаграммы*, выражаемой в виде уравнения 7.13. Как X, так и Y должны быть положительными, поэтому в расчетах X значение наклона кривой производительности коллектора принимается за положительное. Поскольку необходимая доля солнечной энергии для данного месяца не может превышать единицу, значение доли солнечной энергии выпадающей в месяц, которая превышает единицу, устанавливается равным единице при помощи кусочно-непрерывного условия «если».

Введите характеристики солнечных коллекторов:

Введите данные солнечного коллектора $Y :=$

$Число := 135$

$FR\tau\alpha := 0.749$ $\quad FRUL := 6.159 \frac{W}{m^2 \cdot C}$ $\quad A := 1.932\ Число \cdot m^2$

Примените анализ графика функции, используя значения X и Y.
Вычислите X и Y:

$X := \overrightarrow{\left[0.97 FRUL \left(100\ C \quad T_{окр}\right) \cdot \frac{A \cdot месяц}{Нагруз}\right]}$ $\quad Y := \overrightarrow{\left(A \cdot 0.96 \cdot 0.97 FR\tau\alpha \cdot 1 \cdot \frac{месяц}{Нагруз}\right)}$

Рассчитайте функцию f (количество солнечной энергии в месяц) на основе соотношения графика функции:

$приходится := \overrightarrow{\left(1.029 \cdot Y - 0.065 \cdot X - 0.245 \cdot Y^2 + 0.0018 \cdot X^2 + 0.0215 \cdot Y^3\right)}$

$приходится_i := \begin{cases} приходится_i & \text{если } приходится_i < 1 \\ 1 & \text{иначе} \end{cases}$ если количество солнечной энергии превышает нагрузку, примите f =1

$X = \begin{pmatrix} 2.766 \\ 2.846 \\ 4.502 \\ 6.64 \\ 11.656 \\ 15.025 \\ 15.191 \\ 15.233 \\ 15.327 \\ 8.576 \\ 4.387 \\ 3.449 \end{pmatrix}$ $Y = \begin{pmatrix} 0.551 \\ 0.688 \\ 1.243 \\ 2.043 \\ 3.625 \\ 4.813 \\ 4.872 \\ 5.075 \\ 4.912 \\ 2.639 \\ 1.056 \\ 0.701 \end{pmatrix}$ $приходится = \begin{pmatrix} 0.33 \\ 0.428 \\ 0.686 \\ 0.911 \\ 1.022 \\ 1.104 \\ 1.112 \\ 1.15 \\ 1.118 \\ 0.979 \\ 0.588 \\ 0.406 \end{pmatrix}$ $f = \begin{pmatrix} 0.33 \\ 0.428 \\ 0.686 \\ 0.911 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0.979 \\ 0.588 \\ 0.406 \end{pmatrix}$

Рис. 7.19 (продолжение)

Значения X, Y, *приходится* и *f* (доля солнечной энергии) приведены в рабочей таблице. Рассчитывается нагрузка, которую несет солнечная энергия за каждый месяц. Затем оценивается годовое количество солнечной энергии, общая накопленная солнечная энергия и экономия средств. Когда предполагаемое количество необходимых коллекторов дает нужное количество солнечной энергии (60% от сформулированной задачи) и единицу солнечной энергии за лето, решение считается выполненным. В данном примере необходимо 135 коллекторов AE-21 для соответствия техническим условиям. Экономия составляет 4141 долларов в год.

Пример 7.3 иллюстрирует, как процедура графика функции может быть использована для оценки производительности системы плоских солнечных коллекторов. Процедура составления *f*-диаграммы основана на корреляции выходных данных ряда системных симуляций TRYNS, которая является приблизительной процедурой. Тем не менее, процедура графиков функций проста в применении и выдает решения, которые намного лучше, чем просто ряд величин. Действительно, со всеми неопределенными параметрами во многих инженерных расчетах плоских солнечных коллекторов

можно утверждать, что метод графиков функций обеспечивает достаточную точность для большинства первоначальных оценок подобных систем.

Определите месячную нагрузку от системы солнечной энергии

$$\text{Нагрузка}_{\text{излуч}} := \overrightarrow{(f \cdot \text{Нагрузка})}$$

$$\text{Нагрузка}^{T}_{\text{излуч}} = (4.623 \;\; 5.14 \;\; 5.487 \;\; 4.554 \;\; 2.8 \;\; 2 \;\; 2 \;\; 2 \;\; 2 \;\; 3.918 \;\; 4.706 \;\; 4.464)\,\text{Мдж} \cdot 10^{4}$$

Установите количество солнечной энергии в год

$$\text{процент} := \frac{\sum_{i=1}^{12} \left(\text{Нагрузка}_{\text{излуч}_i}\right)}{\sum_{i=1}^{12} \text{Нагрузка}_i} \qquad \text{процент} = 60.015\,\%$$

$$\text{ОбщИзлуч} := \sum_{i=1}^{12} \text{Нагрузка}_{\text{излуч}_i} \qquad \text{ОбщИзлуч} = 4.369 \times 10^{11}\,\text{Дж}$$

$$\text{ОбщИзлуч} = 4.141 \times 10^{8}\,\text{БТЕ}$$

$$\text{Экономия} := \frac{\text{ОбщИзлуч}}{10^{6} \cdot \text{БТЕ}} \cdot 10 \qquad \text{Экономия} = 4.141 \times 10^{3}$$

7.5 Другие системы, работающие от солнечного тепла

Как видно из рис. 7.1, 7.1b и 7.2, солнечные системы теплоснабжения могут включать в себя не только плоские коллекторы. На рис. 7.1b показан параболоцилиндрический коллектор, а на рис. 7.2 - гелиостат. Оба устройства собирают, а также концентрируют солнечную энергию, то есть они позволяют достичь более высоких температур. Поскольку более высокие температуры на выходе могут быть достигнуты при помощи концентрирующих коллекторов, полезность собранной энергии возрастает, и становится возможной деятельность, требующая более высоких рабочих температур (см. рис. 7.4). В этом разделе рассматриваются некоторые характерные особенности концентрирующих коллекторов.

Тем не менее, предварительный обзор основ концентрирующих коллекторов также будет проведен. Концентрация падающего излучения достигается направлением (отражением или преломлением) излучения в область апертуры A_a на малую поглощающую пластину или принятую область A_r. Коэффициент геометрической концентрации CR определяется как отношение апертуры к площади приемника:

$$\text{CR} = \frac{A_a}{A_r} \tag{7.15}$$

Энергия, доставляемая в приемник, представляет собой падающий поток солнечной энергии I_c с учетом времени апертуры, равный произведению площади апертуры и оптической эффективности апертуры в процессе приема η_{ar}:

$$q_{del} = \eta_{ar} I_c A_a \tag{7.16}$$

Как и в случае плоского коллектора, конвективные потери выражаются как

$$q_{потер} = U_c A_r (T_{ср} - T_{окр}) \tag{7.17}$$

Полезная энергия тогда становится

$$q_{\text{полезн}} = \eta_{\text{ar}} I_{\text{c}} A_{\text{a}} - U_{\text{c}} A_{\text{r}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}}) \tag{7.18}$$

Эффективность коллектора определяется как полезный поток падающего солнечного излучения, деленный на падающее излучение.

$$\eta_{\text{c}} = \frac{q_{\text{полезн}}}{I_{\text{c}} A_{\text{a}}} = \eta_{\text{ar}} - \frac{U_{\text{c}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}}) A_{\text{r}}}{I_{\text{c}} A_{\text{a}}} \tag{7.19}$$

Принимая во внимание, что геометрический коэффициент концентрации CR равен $A_a = A_r$, уравнение 7.19 становится

$$\eta_{\text{c}} = \frac{q_{\text{полезн}}}{I_{\text{c}} A_{\text{a}}} = \eta_{ar} - \frac{U_{\text{c}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{окр}})}{I_{\text{c}} \cdot \text{CR}} \tag{7.20}$$

Для концентрирующих коллекторов CR> 1. Таким образом, коэффициент потерь в уравнении 7.20 меньше для концентрирующих коллекторов, чем для плоских коллекторов (CR~1), и, как результат, эффективность для концентрирующих коллекторов выше. Для получения дополнительной информации см. Госвами и соавт. (2000), где представляется более обширная оценка концентрирующих солнечных коллекторов.

Техническую и инженерную информацию для плоских солнечных коллекторов можно получить на веб-сайтах производителей и в SRCC. Подобную информацию для концентрирующих солнечных коллекторов и гелиостатов найти сложнее. Большинство веб-сайтов компаний, производящих концентрирующие солнечные коллекторы, содержат мало технической информации.

Интересным является вопрос в отношении концентрирующих коллекторов касающийся температурного предела приемника. Очень высокие температуры могут быть получены в концентрирующих коллекторах, таких как гелиостаты (рис. 7.2). Максимальный температурный предел приемника ограничен вторым законом термодинамики, являясь меньшим, чем эффективная температура Солнца. Действительно, Госвами и соавт. (2000) указывают, что данный вывод эквивалентен утверждению Клаузиуса о втором законе.

7.6 Заключение

Солнечные системы теплоснабжения становятся все более популярными, поскольку стоимость энергии продолжает расти. Управление по энергетической информации контролирует продажу солнечных коллекторов. На рис. 7.20 представлены данные по ежегодно устанавливаемым площадям (в миллионах квадратных футов) солнечных коллекторов за период с 1975 по 2009 год (за исключением 1985 года, когда данные не собирались). Несмотря на последние годы 1990-х годов продажи солнечных коллекторов после наступления второго тысячелетия резко увеличились в первой половине десятилетия, но затем значительно сократились в оставшиеся годы десятилетия. По данному поведению рынка можно отследить постоянство цен на энергию (например, см. рис. 1.14) в 1990-х годах и растущие цены на энергию в первой половине десятилетия 21 века. Снижения популярности солнечной энергии, вероятно, представляет некоторую потерю интереса к солнечным системам теплоснабжения в пользу других возобновляемых источников энергии.

Ассоциация солнечной энергетики SEIA (www.seia.org) представляет в алфавитном порядке список производителей изделий, связанных с солнечной энергией, включая солнечные тепловые коллекторы. Веб-сайт SEIA является замечательным источником адресов и контактной информации, в котором перечислены компании, производящие солнечные коллекторы всех типов.

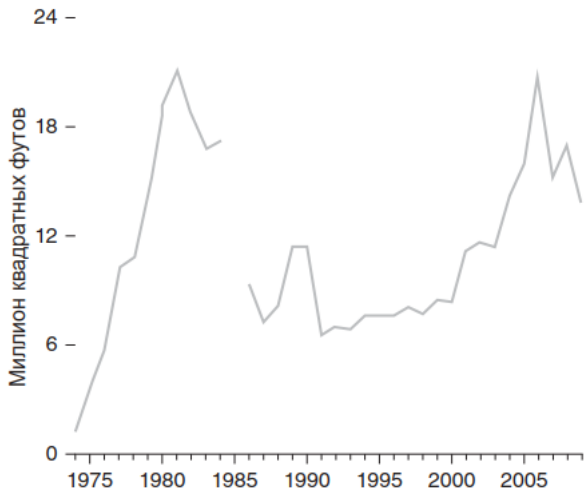


Рис. 7.20 Уровень продаж солнечных коллекторов (в квадратных футах) с 1975 по 2009 год. Источник: http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/pdf/aer.pdf (стр. 292).

Литература

Duffie, J.A. and Beckman, W.A. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes, 4th edn. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Goswami, Y., Kreith, F., and Kreider, J.F. (2000) Principles of Solar Engineering, 2nd edn. Taylor and Francis, New York.

Marion, W. and Wilcox, S. (1994) Solar Radiation Data Manual for Flat-Plate and Concentrating Collectors. NREL, Golden, CO.

Marion, W. and Wilcox, S. (1995) Solar Radiation Data Manual for Buildings. NREL, Golden, CO. Mitchell, J.W. (1983) Energy Engineering. JohnWiley&Sons, Inc., NewYork.

8

Пассивное использование солнечной энергии

8.1 Основные понятия пассивного использования солнечной энергии

Пассивное использование солнечной энергии, как правило, определяется как использование систем, в которых поток солнечной энергии осуществляется пассивным (или естественным) путем, например, посредством естественной (свободной) конвекции. Концепция пассивного использования солнечной энергии известна и является общепринятой с древних времен. Следующие утверждения принадлежат Сократу (около 400 до н.э.) и Аристотелю (около 350 до н.э.) соответственно:

В домах, ориентированных на южную сторону, солнечные лучи зимой проходят через крытые веранды, тогда как летом проникают прямо над нашими головами и над крышей, таким образом, возникает тень.

Для хорошего самочувствия и здоровь помещение должно хорошо проветриваться летом и хорошо освещаться зимой. Длина здания, которое соответствует данным требованиям, должна превышать его глубину, а главный фасад здания должен быть обращен на юг.

В соответствии с современной терминологией, которая охватывает термины, относящиеся к современным пассивным системам солнечного отопления, эти утверждения означают, что здание должно быть ориентировано по оси восток-запад и должно находиться на склонах южной экспозиции, оно должно быть защищено навесом, который обеспечивает зимой попадание прямого солнечного света на окна южной экспозиции, а летом благодаря нему солнечный свет блокируется.

Однако даже для поверхностного изучения концепции использования пассивной солнечной энергии требуется более формальное изучение фундаментальных принципов. В книге Балькомба «Здания с пассивными системами солнечного отопления» (Passive Solar Buildings, 1992) описаны основные современные технологии строительства домов с пассивными солнечными системами, а в трудах Даффи и Бекмана (2013), а также Госвами и соавторов (2000) представлены современные подходы к трактовке концепции пассивного использования солнечной энергии. Различие между активной и пассивной системами заключается в том, что для работы пассивной системы не требуется использование механических средств для осуществления процесса распределения солнечной энергии, осуществляемого за счет излучения и свободной конвекции. Пассивная система солнечного отопления, как правило, включает пять компонентов:

1) солнечный коллектор(апертура)
2) поглотитель
3) теплоаккумулирующая масса
4) протокол распределение
5) стратегия управления.

Кроме того, в большинстве пассивных систем солнечного отопления предусмотрены резервные источники энергии, которые используются, когда характеристик пассивных систем солнечного отопления недостаточно для комфортной или эффективной работы.

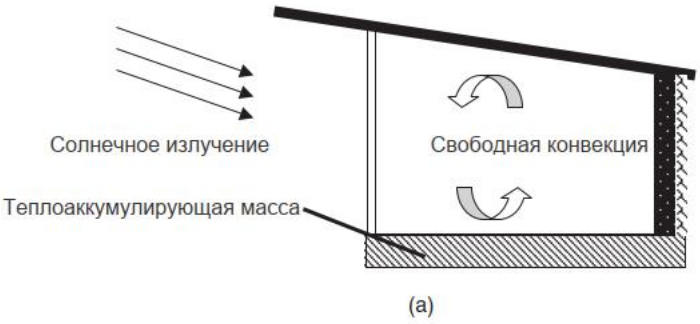
Солнечные коллекторы пассивного типа включают окна или более необычный элемент, называемый водяная крыша. Поглотитель представляет собой твердую поверхность с высокой поглощающей способностью, на которую попадает солнечная радиация, проникающая в коллектор. Теплоаккумулирующая масса обеспечивает накопление тепла наружными или внутренними стенами, полами или экранами. Эти термальные массы получают энергию для солнечного излучения зимой, но блокируются летом. Протокол распределения – это метод, с помощью которого тепловая энергия накапливается, извлекается и направляется в различные участки конструкции. Средства контроля предусмотрены для улучшения распределения тепла от коллектора/поглотителя/термальной массы. Во многих домах средства контроля пассивного использования солнечной энергии предусматривают участие человека для выполнения таких задач, как перемещение панелей или открытие/закрытие заслонок, а некоторые из них, например, навесы выполняют пассивные функции.

Если окна здания выходят на южную сторону, но теплоаккумулирующая масса отсутствует, то

конструкция называется «зданием с удовлетворительными условиями пассивного обогрева и изоляции». В конструкции здания предусмотрено, что площадь всех окон, выходящих на южную сторону, составляет 7% от площади пола, что может значительно снизить потребность в тепловой энергии, особенно в холодном климате. Если остекление, обращенное на юг, превышает примерно 7%, то для эффективного использования солнечного излучения, падающего на внутреннюю часть конструкции, необходима теплоаккумулирующая масса.

Системы пассивного солнечного отопления подразделяются на системы прямого, косвенного или обособленного нагрева. Как следует из названия, в гелиосистемах прямого нагрева солнечное излучение непосредственно попадает внутрь конструкции. Рис. 8.1a представляет собой схему системы прямого нагрева, а рис. 8.1b иллюстрирует осуществление прямого нагрева здания. Толщина тепловой массы не должна превышать 6 дюймов, а теплоаккумулирующая масса не должна быть покрыта коврами. Два общепринятых практических правила: необходимо 150 фунтов каменной кладки на каждый квадратный фут остекления, обращенного на юг, и что для каждого квадратного фута остекления, обращенного на юг, требуется 9 кв. футов помещения для термальной массы.

Системы косвенного нагрева характеризуются наличием теплоаккумулирующей массы, расположенной между солнцем и внутренним пространством. На рис. 8.2 представлена схема и пример пассивной солнечной системы косвенного нагрева со стеной Тромба. Стена Тромба – это толстая стена, обычно построенная из каменной кладки, предназначенная для поглощения солнечного излучения в течение дня, его хранения и излучения тепла ночью или в пасмурные дни. Практическое правило заключается в том, что на каждый квадратный фут площади пола требуется 0,2 фута^2 тепловой массы стены. Рекомендуемая толщина стен Тромба составляет 12–18 дюймов, если стена построена из бетона, или 8–12 дюймов, если стена построена из самана.



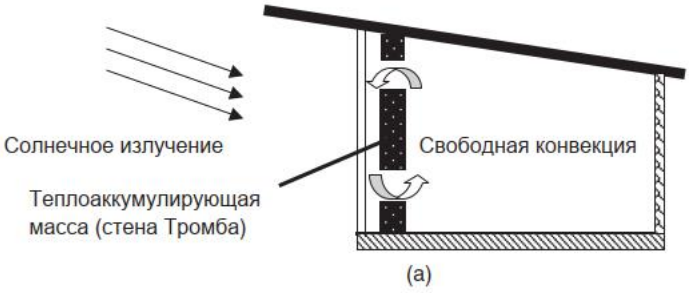
(a)



(b)

Рис. 8.1 Пассивная гелиосистема прямого нагрева:

(a) схематическое изображение; (b) пример использования (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, 08427)

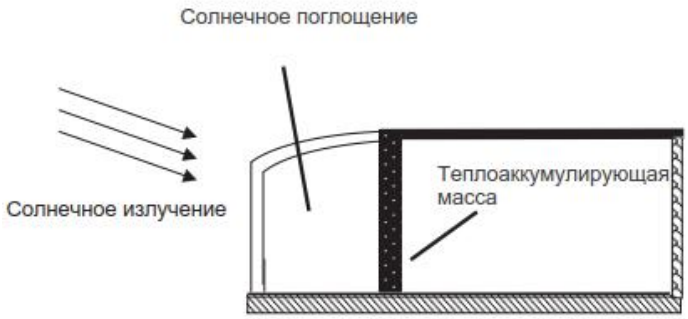


(a)



(b)

Рис. 8.2 Гелиосистема с перераспределением энергии от аккумулятора тепла (a) схематическое изображение (b) Пример применения (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, 02929).



(a)



(b)

Рис. 8.3 Гелиосистема обособленного нагрева (солнечное поглощение): (a) схематическое изображение (b) Пример применения (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, 08427).



Рис. 8.4 Пример дневного освещения (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, 09536)

Рис. 8.3 иллюстрирует схематическое изображение и пример гелиосистемы обособленного нагрева, солнечное поглощение. Система с обособленным нагревом отделена от основного здания, но для хранения энергии предусмотрена теплоаккумулирующая масса. Для кирпичной тепловой стены рекомендуемая толщина такая же, как и для стены Тромба, но для каждого квадратного фута площади пола требуется 0,3 кв. фута южного остекления. В летние месяцы обычно требуются вентиляция и затенение.

На сайте Национального института строительных наук http://passivesolar.stablesources.com/ содержится рекомендательная информация и практические рекомендации касательно пассивных элементов солнечного отопления, представленных на рисунках 8.1, 8.2 и 8.3. Кроме того, в трудах «Проектирование пассивной системы солнечного отопления в домах» (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии, 2001) перечислены рекомендации для пассивных систем в жилых домах.

Еще одной важной характеристикой, часто используемой в пассивных системах солнечного отопления, является дневное освещение, то есть использование излучаемой энергия солнца для внутреннего освещения, так что потребность в искусственном освещении в дневное время сокращается. Рис. 8.4 иллюстрирует использование дневного света в библиотеке.

Пассивные элементы солнечного отопления могут быть реализованы практически в любой структуре, независимо от размера. На рис. 8.5 a и b показаны фотографии Научно-исследовательского центра солнечной энергии (SERF) Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии (NREL) и здания соответственно, иллюстрирующие различные (и некоторых активных) характеристики пассивных систем солнечного отопления.

Научно-исследовательский центр солнечной энергии – это современный исследовательский центр, построенный в 1993 году. Объект расположен с востока на 15 °C строго на юг и прилегает к склону с целью использования преимуществ здания с теплозащитным земляным покровом. Здание Научно-исследовательского центра солнечной энергии включает в себя ряд энергосберегающих характеристик, среди которых дневное освещение, шторы на окнах, испарительное охлаждение и системы рекуперации тепла. Годовое энергопотребление и затраты на 30–40% ниже в сравнении с подобными зданиями, спроектированными в соответствии с государственными стандартами (эпоха 1990-х годов). Затраты на содержание Центра вполовину меньше затрат на содержание обычной исследовательской установки. Фотоэлектрические батареи, которые не являются пассивными элементами солнечного отопления, были установлены на крыше восточного и западного крыльев.

Рисунки 8.1, 8.2 и 8.3 иллюстрируют использование остекления, обращенного на юг, для захвата солнечного излучения с целью отопления здания. Не менее важной особенностью пассивной системы солнечного отопления, особенно в теплом климате, является установка навесов на южных стенах, чтобы блокировать солнечное излучение летом. На рис. 8.5b показан навес, который блокирует попадание солнечных лучей летом (высокие углы высоты солнца), но допускает солнечное излучение зимой (низкие углы высоты солнца).

На предшествующих схемах и рисунках, а также в сопровождающем тексте, представлены основы пассивной солнечной энергии, которые в незначительной степени применимы для количественной оценки ожидаемых характеристик и экономии энергии. В Разделах 8.2–8.4 описан процесс первого порядка и процесс второго порядка для количественной оценки эффектов различных пассивных элементов солнечного отопления.

8.2 Количественные характеристики гелиосистемы

Процедуры первого и второго порядка для оценки или количественного определения воздействия различных характеристик пассивных систем солнечного отопления основаны на коррелированных результатах большого числа примеров компьютерного моделирования. Основа оценок пассивных систем солнечного отопления аналогична процедуре создания f-диаграммы, рассмотренной в главе 7.



(a)

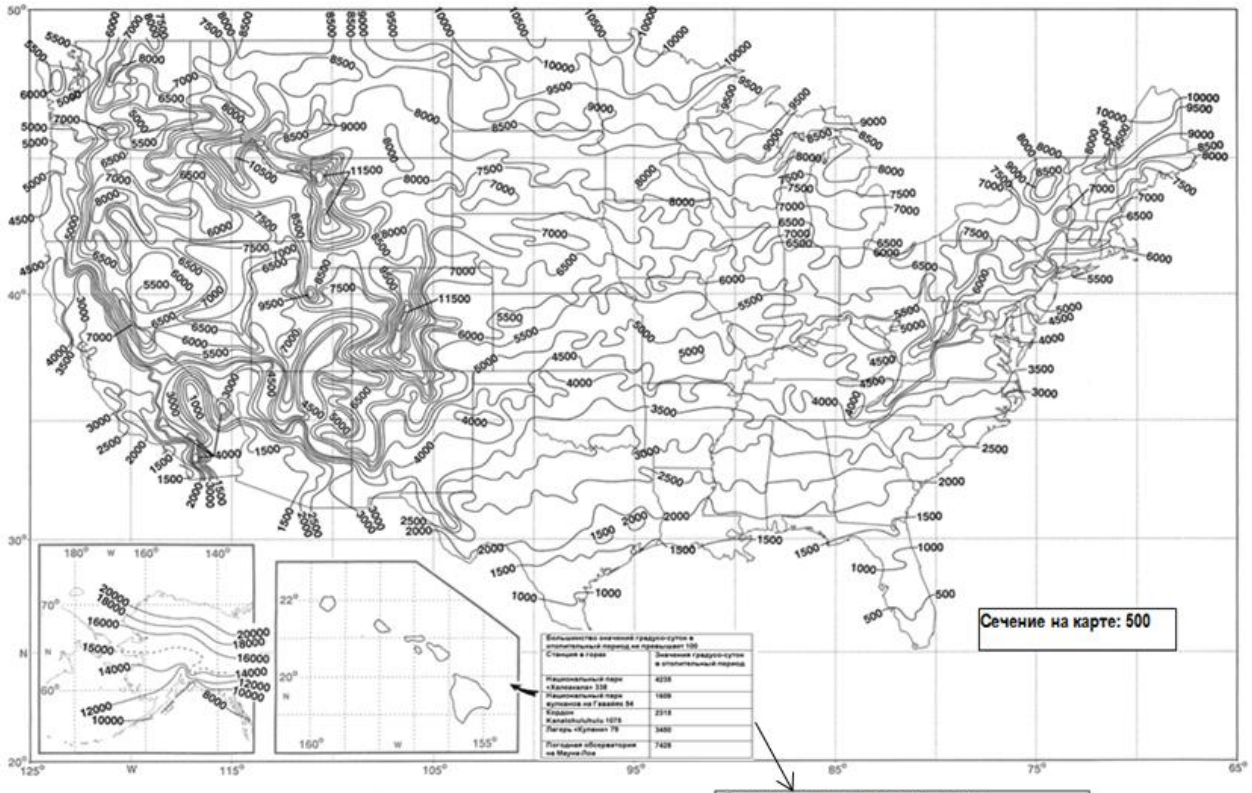


(b)

Рис. 8.5 Пример зданий с пассивными солнечными системами:(a) Центр исследования солнечной энергии (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии 01257); (b)жилое здание (Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии 11050).

Возможно, единственным документом по пассивной солнечной энергии, который упоминается чаще всего, является «Руководство по проектированию пассивных систем солнечного отопления» (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984). Дополнительную информацию можно найти в «Руководстве по проектированию и строительству пассивных систем солнечного отопления» (Гросби, 1997). Далее будет рассмотрен общий набор определений, используемых для количественной оценки характеристик пассивных солнечных элементов.

Наиболее распространенным методом с одной переменной, используемым для выражения климатологических воздействий на энергопотребление здания, является «градусо-сутки». Определение «градусо-сутки» охватывает понятия температуры при отсутствии нагрузки (базовая температура) и средней суточной температуры. Температура при отсутствии нагрузки – это температура окружающей среды (наружная температура), при которой для комфорта нахождения человека в здании не требуется тепловая энергия или энергия для охлаждения. Традиционно, такого рода температура приравнивается к 65°F. Таким образом, нагрев помещения будет необходим при температуре окружающей среды ниже 65°F, а охлаждение потребуется при температуре окружающей среды выше 65°F. Среднесуточная температура определяется как средняя минимальная и максимальная температура для заданного дня. Разница между температурой при отсутствии нагрузки и средней температурой определяется как число градусо-суток для заданного дня. Следовательно, если средняя температура составляет 45°F в течение определенного дня, то для этого дня характерны 20 градусо-суток отопительного периода. Если средняя температура составляет 85°F, то число охлаждающих градусо-суток равно 20. Общее количество градусо-суток отопительного периода для данного местоположения является суммой градусо-суток отопительного периода в сутки, а общее количество охлаждающих градусо-суток представляет собой сумму охлаждающих градусо-дней в сутки для данного местоположения. Общие значения являются количественным показателем для оценки использования энергии для обогрева и охлаждения здания, поскольку требуемая энергия по существу пропорциональна градусо-суткам отопительного периода и охлаждающим градусо-суткам.



Большинство значений градусо-суток в отопительный период не превышает 100	
Станция в горах	Значения градусо-суток в отопительный период
Национальный парк «Халеакала» 338	4235
Национальный парк вулканов на Гавайях 54	1609
Кордон Kanalohuluhulu 1075	2315
Лагерь «Кулани» 79	3450
Погодная обсерватория на Мауна-Лоа	7428

Энергопотребление, рассчитанное по градусо-суткам отопительного периода, как правило, более точное, чем энергопотребление, рассчитанное по охлаждающим градусо-суткам, поскольку при расчете охлаждающих градусо-суток не учитывается влияние влажности, что может быть значительной нагрузкой на охлаждение во влажном климате. Значения охлаждающих градусо-суток и градусо-суток отопительного периода можно получить в Национальной метеорологической службе, при этом данные значения хранятся в архиве Национального центра экологической информации (NCEI). В «Руководстве по данным о солнечном излучении для плоских и концентрирующих коллекторов» (Марион и Вилкокс, 1994), рассмотренном в главе 7, приведены значения охлаждающих градусо-суток и градусо-суток отопительного периода. На рис. 7.14 представлены, что в Меридиане, Миссисипи, число градусо-суток отопительного периода в градусах Цельсия равно 1358. Согласно данным Национальной лаборатории по изучению возобновляемой энергии, представленным на рис. 7.14, градусо-сутки в градусах Цельсия означают температуру при отсутствии нагрузки 18,3°C которая составляет 65°F. Используя эти данные, для перевода градусов Цельсия в градусы Фаренгейта: коэффициент перевода составляет 5/9. Следует проявлять осторожность при использовании единиц СИ для градусо-суток, поскольку некоторые из них приведены в таблице на основе 19,0°C, для которой коэффициент преобразования не равен 5/9.

Кроме того, многие руководства по отоплению, вентиляции и кондиционированию воздуха и солнечной энергии содержат таблицы для определённых городов, а также карты, содержащие контурные линии, обозначающие градусо-сутки отопительного периода и охлаждающие градусо-сутки. Согласно данным из руководства достаточно будет контурной карты. На рис. 8.6 представлены контурные линии, обозначающие градусо-сутки отопительного периода в градусах по Фаренгейту (градусо-сутки отопительного периода в градусах по Фаренгейту) для США.

Чем выше градусо-сутки отопительного периода, тем суровее зима. На рис. 8.6 значения градусо-

суток отопительного периода на севере намного выше, чем на юге. Значения градусо-суток в горах на западе показывают влияние высоты и широты. Более подробнее контурные карты представлены на сайте Национального центра экологической информации (www.ncei. Noaa.gov).

На рис. 8.7 показана контурная карта охлаждающих градусо-суток в градусах по Фаренгейту для США. Как показано на рис. 8.7, значения градусо-суток на севере меньше, чем на юге.

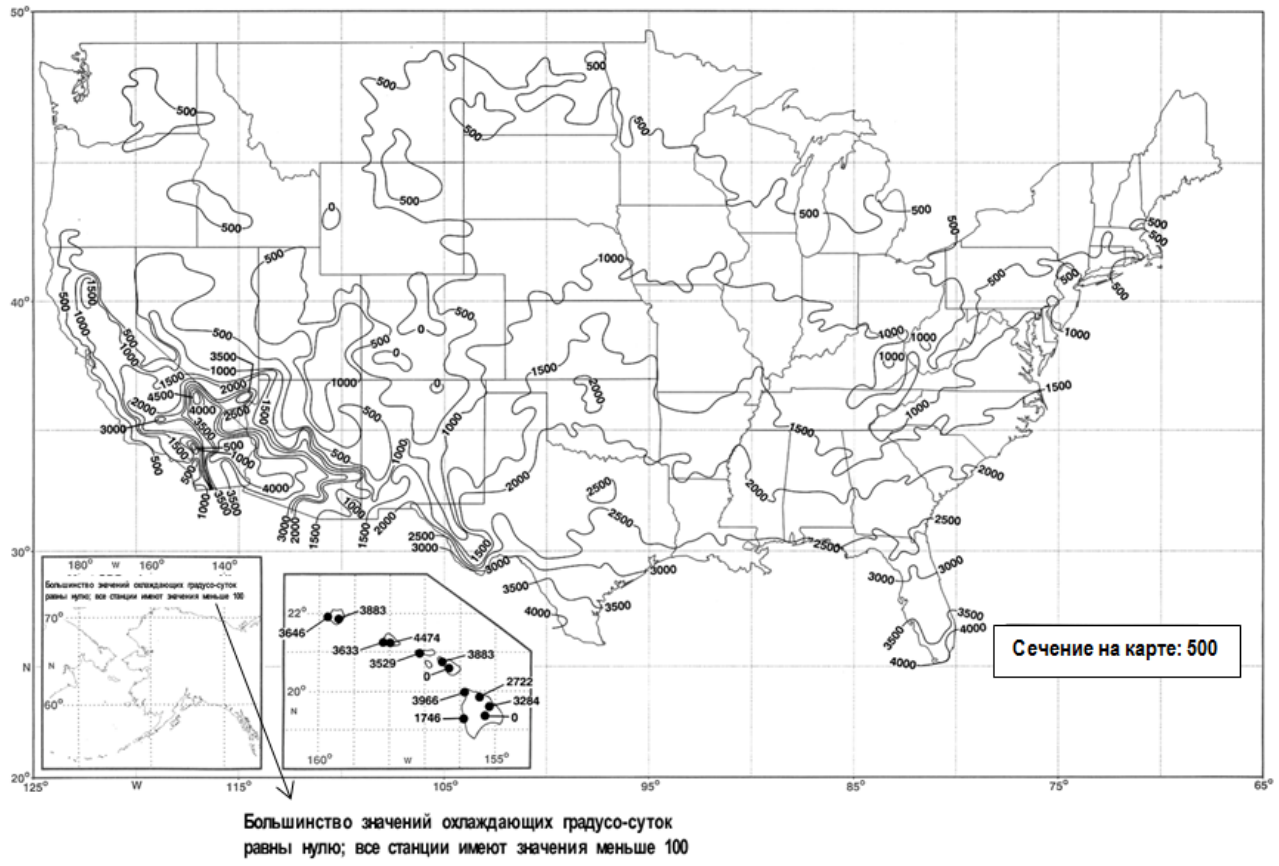


Рис. 8.7 Ежегодные значения охлаждающих градусо-суток в градусах по Фаренгейту, основанные на периоде 1961-1990 гг. Источник:
http://www.ncdc.noaa.gov/img/documentlibrary/clim81supp3/annualcoolingDD_hires.jpg

В дополнение к концепции «градусо-сутки» для многих пассивных систем солнечного отопления используется общая номенклатура. Рассмотрим следующие термины:

A_p	вертикально спроектированное чистое солнечное остекление, ориентированное на юг (фут^2 или м^2)
NLC	чистый коэффициент тепловой нагрузки здания; чистая тепловая нагрузка неосвещенной солнцем части конструкции на одни градусо-сутки отопительного периода (кДж/ градусо-сутки отопительного периода по С или БТЕ/градусо-сутки в градусах по Фаренгейту)
Q_{net}-$Q_{чист}$	чистая тепловая нагрузка; $Q_{чист}$ = нелинейная емкость * градусо-сутки (кВтч или БТЕ)
O_{solar}-$Q_{солн}$	тепловая нагрузка, обеспечиваемая солнечной энергией (кВт/ч или БТЕ)
Q_{aux}-$Q_{всп}$	тепловая нагрузка, не обеспечиваемая солнечной энергией (кВт/ч или БТЕ)
LCR	коэффициент нагрузки на коллектор; коэффициент тепловой нагрузки здания/коэффициент нагрузки на коллектор = A_p (кДж/(м^2 С градусо-сутки отопительного периода) или БТЕ/ (фут^2 градусо-суток в градусах по Фаренгейту)
SSF	доля солнечной энергии; доля полной тепловой энергии, обеспечиваемая солнечной энергией, $Q_{солн}/Q_{чист}$

Необходимая чистая энергия нагрева представляет собой сумму выработки солнечной энергии и вспомогательную энергию

$$Q_{чист} = Q_{солн} + Q_{вспом} \quad (8.1)$$

ПоделивQ$_{чист}$и вычислив Q$_{солн}$/Q$_{чист}$, получим долю солнечной энергии

$$\frac{Q_{\text{солн}}}{Q_{\text{чист}}} = \text{доля солнечной энергии} = 1 - \frac{Q\text{вспом}}{Q\ \text{чист}} \quad (8.2)$$

далее вспомогательная энергия нагрева находится через уравнение

Qвспом= (1-доля солнечной энергии)*коэффициент тепловой нагрузки зданиях*тепловой градусо-день (8.3)

Определения, представленные ранее используются при выполнении двух наиболее распространенных процедур количественной оценки воздействия пассивных солнечных элементов. Эти два метода (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984; Крейт и Уэст, 1997; Госвами и *соавт*., 2000) представляют собой метод первого уровня (практические правила) и метод второго уровня (метод вычисления коэффициента нагрузки на коллектор). Каждый из этих методов рассматриваются в следующих двух разделах.

8.3 Правило первого уровня (правило буравчика)

Метод первого уровня основан на наблюдении, что жилые дома, в которых эффективно используются пассивные солнечные элементы, имеют аналогичные значения чистого коэффициента тепловой нагрузки здания для пола и зависящие от климата значения доли солнечной энергии. Чистый коэффициент тепловой нагрузки здания на квадратный фут площади пола в обычных зданиях с энергосберегающими функциями обычно находится в диапазоне 120–160 кДж/(градусо-сутки в ˚C/м^2) или 6–8 БТЕ/(градусо-сутки в ˚F/фут^2). Эти значения (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984; Крейт и Уэст, 1997; Госвами и *соавт*., 2000) уменьшаются на 20% при добавлении пассивных солнечных элементов, что приводит к делению коэффициента тепловой нагрузки здания на значения площади пола 100–130 кДж/(градусо-сутки в˚C/м^2) или 4,8–6,4 БТЕ/(градусо-сутки в ˚F/фут^2). Если используются зависящие от климата оптимальные пассивные солнечные характеристики, основанные на затратах, ожидаемую долю солнечной энергии для США можно найти на рис. 8.8.

Для хорошо спроектированных пассивных солнечных элементов ожидаемые значения коэффициента нагрузки на коллектор зависят от климата и определены (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984; Крейт и Уэст, 1997; Госвами и *соавт*., 2000) следующим образом:

	Теплый климат	Холодный климат
коэффициент нагрузки на коллектор, кДж/(градусо-сутки в с/м^2) [Бте/(/(градусо-сутки в градусах по ˚F/фут^2)]	610[30]	410[20]

Когда теплоаккумулирующая масса непосредственно поглощает солнечное излучение, должна быть обеспечена достаточная теплоаккумулирующая масса для хранения 613 кДж/(°C/м^2) или 30 БТЕ (˚F/фут^2) на единицу площади остекления (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984; Крейт и Уэст, 1997; Госвами и *соавт*., 2000). Если материал для хранения нагревается из воздуха помещения, тогда требуется в четыре раза больше массы. Приемлемое значение удельной теплоты типового материала для каменной кладки составляет 0,2 БТЕ/(фунт/˚F) (837 Дж/(кг/°C)) плотностью 150 фунт/фут^3 (2400 кг/м^3). Рассмотрим пример 8.1.

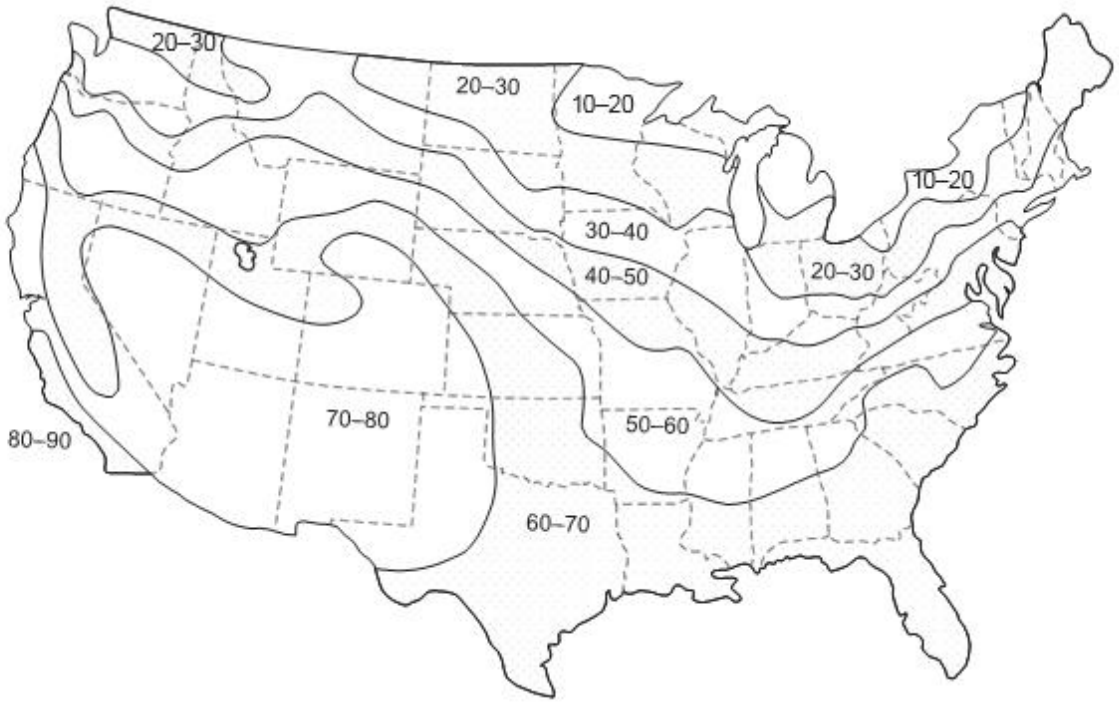


Рис. 8.8 Ожидаемые значения доли солнечной энергии (в процентах)
Источник: Андерсон (1984)

Пример 8.1

Дом площадью 2500 кв. футов, расположенный в городе Меридиан, штат Миссисипи, имеет предполагаемый коэффициент тепловой нагрузки/фут^2 общей площади пола 7,5 БТЕ/(градусо-сутки в ˚F /фут^2). Оцените характеристики эффективной пассивной солнечной конструкции и требуемой энергии вспомогательного отопления. Кроме того, оцените необходимую теплоаккумулирующую массу.

Решение: на рис. 7.11 показано, что значение градусо-суток в городе Меридиан, Миссисипи, равно 1 358, которое переводится (умножить на 9/5) в 2 444 градусо-суток в ˚F. Аналогичное число можно оценить из рисунка 8.6. Таким образом, чистая тепловая нагрузка равна

$$\text{Доля солнечной энергии} = 7{,}5\ \frac{\text{БТЕ}}{\text{градусо}-\text{сутки в}^{\circ}\text{F/ фут}^2} * 2500\ \text{фут}^2 = 18\ 750 * \frac{\text{БТЕ}}{\text{градусо}-\text{сутки в}^{\circ}\text{F}}$$

Коэффициент нагрузки на коллектор для теплого климата равен 30 БТЕ/(градусо-сутки в ˚F/фут^2). Предполагаемое остекление на южной стороне рассчитывается как

$$\text{Ар} = \frac{\text{коэффициент тепловой нагрузки здания}}{\text{коэффициент нагрузки на коллектор}} = 18\ 750 \frac{\text{БТЕ}}{\text{градусо}-\text{сутки в}^{\circ}\text{F}} \frac{\text{градусо}-\text{сутки в}^{\circ}\text{F в фут}^2}{30\text{БТЕ}} = 625\ \text{фут}^2$$

На рис. 8.8 доля солнечной энергии оценивается как 0,6; поэтому $Q_{вспом}$ становится

$$Q_{вспом} = (1\text{-}0{,}6) * 18\ 750\ \frac{\text{БТЕ}}{\text{градусо}-\text{сутки в}^{\circ}\text{F}} * 2444\ \text{градусо-суток в}^{\circ}\text{F} = 18{,}3 * 10^6\ \text{БТЕ}$$

Потребность в хранении тепловой массы может быть оценена путем приравнивания потребности в хранении на БТЕ/в градусах по Фаренгейту с произведением массы на удельную теплоемкость:

$$30\ \frac{\text{БТЕ}}{\text{фут}^2\ \text{по}^{\circ}\text{F}} * 625\text{фут}^2 = \text{масса} * 0{,}2\ \frac{\text{БТЕ}}{\text{фунт/м в}^{\circ}\text{F}}$$

из данного уравнения установлено, что потребность в хранении составляет 94 750 фунтов или около 630 фут^3 при типичной плотности каменной кладки.

Результаты этой задачи дают некоторое представление о продуктивности эффективного использования пассивных элементов солнечного отопления, но в решении не указаны какие-либо подробности о характеристиках солнечных элементов. Метод второго уровня, который рассматривается в следующем разделе, включает в себя некоторые детали о характеристиках солнечных элементов.

8.4 Правило второго уровня (соотношение: нагрузка-коллектор)

В отличие от метода первого уровня, метод расчета коэффициента нагрузки на коллектор основан на обширном компьютерном анализе различных характеристик пассивных элементов солнечного отопления в различных локациях (или климатах). Метод второго уровня схож с подходом f-диаграммы для активных солнечных элементов, обсуждаемым в главе 7. Девяносто четыре различных пассивных солнечных систем были проанализированы для разработки метода второго уровня (Андерсон и *соавт*., 1980; Балкомб и *соавт*., 1980; Андерсон, 1984; Крейт и Уэст, 1997; Госвами и *соавт*., 2000). Метод расчета коэффициента нагрузки на коллектор является специфическим для данной структуры, в которой требуются знание значений коэффициента тепловой нагрузки здания и вертикально спроектированного чистого солнечного остекленияA_p. Из этих двух величин коэффициент нагрузки на коллектор может быть определен по определению, данному ранее:

$$\text{Коэффициент нагрузки на коллектор} = \frac{\text{Коэффициент тепловой нагрузки здания}}{Ap}$$

Если известен коэффициент нагрузки на коллектор, долю солнечной энергии можно вычислить для заданного города, сопоставив коэффициент нагрузки на коллектор с определенными пассивными солнечными элементами.

Далее представлены пять различных пассивных конфигураций солнечного отопления, рассматриваемых методом расчета коэффициента нагрузки на коллектор:

1) прямой нагрев (ПН)
2) вентилируемая стена Тромба
3) невентилируемая стена Тромба
4) экран (Э)
5) солнечное поглощение (СП).

В каждой из этих конфигураций используются разные значения различных параметров характеристик. Эти параметры включают теплоаккумулирующую способность, толщину стен, количество окон, ночную изоляцию, значение термических показателей (ρck) и солнечное поглощение. Разнообразие параметров для каждого из пяти типов приводят к наличию 94 различных пассивных систем солнечного отопления. Для данного города доля солнечной энергии классифицируется как функция коэффициента нагрузки на коллектор. Для расчета коэффициента нагрузки на коллектор удобно использовать Приложение В с таблицами из работ Госвами и соавт., (2000) «Руководство по проектированию пассивных систем солнечного отопления» (Андерсон и соавт., 1980; Балкомб и соавт., 1980; Андерсон, 1984).

Приложение В начинается с описания общих систем (например, плотности кладки), включенных в каждый анализ. Вариации каждого из пяти типов конфигураций сведены в таблицу и им присвоено обозначение, например, TWA1 для вентилируемой настенной системы Тромба. Таблицы для Альбукерке, Бостона, Мэдисона, Медфорда, Нэшвилла и Санта-Марии, в которых приведены значения коэффициента нагрузки на коллектор, представлены для каждого типа системы, которые можно использовать для оценки доли солнечной энергии. Далее приведен пример.

Пример 8.2

Дом площадью 2000 кв. м с пассивными элементами солнечного отопления расположен в Нэшвилле. В ходе анализа тепловой нагрузки выявлено, что коэффициент тепловой нагрузки здания составляет

12 000 БТЕ/градусо-сутки в ˚F. В доме площадью 150 кв. футов имеется остекление с прямым нагревом. Характеристики прямого нагрева включают двойное остекление, ночную изоляцию. Тепловая аккумулирующая способность равна 30 БТЕ/(фут^2 в ˚F). Определите долю солнечной энергии и необходимый вспомогательный обогрев.

Решение: сначала рассчитаем коэффициент нагрузки на коллектор

$$\text{Коэффициент нагрузки на коллектор} = \frac{\text{коэффициент тепловой нагрузки здания}}{Ap} = \frac{12000 \frac{\text{Бте}}{\text{градусо сутки в } F}}{150 \text{ фут}^2} =$$

$$= 80 \frac{\text{Бте}}{\text{градусо сутки в } F \text{ фут}^2}$$

Обозначение системы DGA3 для системы с прямым нагревом с двойным остеклением, ночной изоляцией и тепловой аккумулирующей способностью 30 БТЕ/(фут^2 ˚F). По таблице коэффициентов нагрузки на коллектор (Приложение В) значение коэффициента нагрузки на коллектор для Нэшвилла с коэффициентом нагрузки на коллектор 80 БТЕ/(градусо-сутки в ˚F фут^2) и системным обозначением DGA3, оценивается в 0,2. В Таблице значение градусо-суток в градусах по Фаренгейту равно 3 696. Вспомогательный нагрев $Q_{всп}$ рассчитывается как $Q_{всп}$=(1–0,2)*12 000$\frac{\text{Бте}}{\text{градусо сутки в } F}$ *3696 градусо – сутки в ˚F = 35,5 *10^6 БТЕ

Теплоаккумулирующая масса рассчитана так как в системе DGA3 отношение массы на единицу площади к поверхности остекления равна 6, а толщина составляет 2 дюйма. Таким образом:

$$\text{Масса=объем*плотность=6*150фут}^2\text{*2д*}\frac{\text{фут}}{12 \text{ д}} \text{*150}\frac{\text{фунт/м}}{\text{фут}^3}\text{=22 500 фунт/м}$$

Полезность метода заключается в том, что, если имеется описание базовой структуры, метод обеспечивает простую процедуру для определения эффектов изменения пассивных солнечных характеристик в 94 системах в исходной вычислительной базе.

8.5 Использование дневного света

На рис. 8.4 продемонстрирована эффективность дневного освещения – использование естественного освещения, а не искусственного освещения (например, лампы накаливания или лампы дневного света) – для освещения внутренней части конструкции. Уместно рассмотреть характерные особенности дневного освещения, поскольку значительная экономия энергии возможна для правильно спроектированных и эффективно интегрированных систем дневного освещения.

Для пространств, которые используются в дневное время, с большой вероятностью должно быть обеспечено дневное освещение. Для нового здания, максимальное использование дневного освещения, вероятно, будет означать более высокое значение отношения наружной поверхности к объему, чем для обычного здания. Стандартное окно обеспечивает полезное освещение на глубину, в 1,5 раза превышающую высоту окна. Используя дополнительные характеристики дневного освещения можно добиться проникновения освещения в 2,0 раза превышающее высоту окна. Чем выше расположение окна, тем глубже проникновение. Дневное освещение включает три компонента: (1) внешний отражающий компонент, (2) прямой компонент солнечного излучения/неба и (3) внутренний отражающий компонент. Потолок является наиболее важным внутренним отражающий компонентом. Рекомендуется, чтобы коэффициент отражающей способности потолка превышал 80%. Рекомендуемая отражательная способность стен составляет от 50 до 70%, а напольная – от 20 до 40%. Размер комнат намного важнее, чем параметры дневного освещения.

Одним из методов количественной оценки взаимосвязи между видимым светом и размером окна (остекление) является метод расчета эффективного отверстия. Размер эффективного отверстия является произведением соотношения размеров окна и стены и проницаемости окна. Соотношение между размерами окна и стены – это площадь окна, разделенная на площадь стены, в которой расположено окно. Размеры эффективных отверстий в диапазоне от 0,2 до 0,3 считаются подходящими. Рассмотрим пример.

Пример 8.3

Стена, обращенная на юг, имеет общую площадь 300 кв. футов и площадь окна 100 кв. футов. Если коэффициент пропускания стекла составляет 0,7; определите размер эффективного отверстия. Прокомментируйте уместность этой конфигурации для дневного освещения.

Решение: эффективное отверстие рассчитывается следующим образом:

$$\text{Эффективное отверстие} = \frac{\text{А окна}}{\text{А стены}} * \tau \text{ окна} = \frac{100 \text{ фут}^2}{300 \text{ фут}^2} * 0{,}7 = 0{,}233$$

Поскольку значение эффективного отверстия равно 0,233 и находится в диапазоне от 0,2 до 0,3, то данная конфигурация подходит для дневного освещения.

Один из способов увеличить уровень освещения без увеличения яркости – это использовать световые полки. Световая полка – это горизонтальный светоотражающий выступ, расположенный над уровнем глаз, с окном с фрамугой над светлой полкой. Свет отражается от светлой полки внутрь здания, а потолок используется для распределения света по всей комнате.

Эффективность дневного освещения может быть повышена путем использования верхнего освещения. Верхнее освещение может быть представлено мансардными окнами, окнами верхнего света, световыми фонарями-надстройками и пилообразными крышами. Тем не менее, некоторые из этих вариаций имеют свои сложности установки и, следовательно, используются редко. Мансардные окна кажутся самым подходящим вариантом, но они получают максимальный солнечный эффект в солнечный полдень, что может привести к увеличению охлаждающих нагрузок, а также к серьезным разницам в степени освещенности между утром и днем. Окна верхнего света – это вертикальные стекла, расположенные высоко на внешней стене. Ориентированные на север или юг окна верхнего света являются эффективными вариантами дневного освещения, но ориентированные на восток или запад они могут привести к значительному увеличению тепла и значительной разнице в степени освещенности здания. Световые фонари-надстройки представляют собой плоские секции крыши, поднятые над смежной линией крыши с вертикальным остеклением со всех сторон. Для установки используются большое количество стекол, и данная конструкция может привести к большим тепловым потерям и нагреву, а также к внутренним бликам и проблемам с затенением в течение дня. В некоторых старых промышленных зданиях есть пилообразные крыши. Наклонная поверхность непрозрачна, а вертикальная поверхность остеклена. Пилообразные крыши, обращенные на юг, могут привести к значительному увеличению тепла летом. Таким образом, принимая во внимание все эти факторы, особенности дневного освещения должны быть тщательно рассмотрены, если желательным результатом является удовлетворительное освещение без больших приростов и потерь тепла.

Важной частью любой реализации дневного освещения является управление электрическим освещением в освещаемом дневным светом месте. Датчики уровня освещенности эффективны для отключения или сокращения использования электрического освещения, когда дневное освещение достигает желаемого уровня.

Существует ряд компьютерных программ для моделирования и прогнозирования уровней освещения при дневном освещении в конкретном здании на конкретном участке.

Полное руководство по проектированию зданий Национального института строительных наук, содержащее описание концепций дневного освещения, представлено на веб-сайте (www.wbdg.org/resources/daylighting.php). Данное руководство содержит описания, приложения, вопросы по эксплуатации и техническому обслуживанию, соответствующие коды и стандарты, а также дополнительные ресурсы. Энергетический центр в Висконсине (http://www.seventhwave.org/) предоставляет примеры и обсуждения простых инструментов и расчетов, физического моделирования и компьютерного моделирования концепций дневного света. Ряд элементов компьютерного программного обеспечения доступен для моделирования дневного освещения; Список наиболее распространенных программных средств включает в себя: VeluxDaylightVisualizer (http://viz.velux.com), Radiance (http://www.radiance-online.org/), DAYSIM (http://daysim.ning.com/)., DIVA для RHINO (http://diva4rhino.com/), DIAL + (http://www.estia.ch/), Evalglare (http://www.ise.Fraunhofer.de/) и 3DSMaxDesign (http://www.autodesk.com) .

8.6 Программа моделирования пассивного использования солнечной энергии

Существует множество программных средств и программ для моделирования пассивных систем солнечного отопления, которые доступны для количественной оценки использования энергии в зданиях. Многие из общих программ анализа энергии включа93ют характеристики пассивных солнечных систем, которые более точны, чем методы, описанные в этой главе. Действительно, многие организации имеют программное обеспечение для расчета пассивной солнечной энергии, которое можно запустить с веб-сайта. Но во многих сетевых программах допущения и процедуры расчета четко не определены и не приведены объяснения, поэтому пользователь должен проявлять осторожность.

В первом издании «Энергия-10», которая затем продается и поддерживается «Советом по экологическому строительству», была представлена программа, которая включает в себя множество пассивных элементов солнечного отопления. К сожалению, Energy-10 больше не поддерживается. Загружаемая программа – это EnergyPlus, которая описывается Управлением по строительству зданий Министерства энергетики как программа моделирования энергопотребления в зданиях, используемая для моделирования энергопотребления, которая работает в операционных системах Windows, MacOSX и Linux. EnergyPlus – это профессиональная современная программа для моделирования конструкций и систем с низким энергопотреблением, которая является единственным механизмом моделирования энергопотребления, предоставляемым по коммерческой лицензии с открытым исходным кодом. Информацию и техническую поддержку по EnergyPlus можно получить на следующих веб-сайтах: https://energyplus.net/ и http://energy.gov/eere/Buildings/about-building-energy-modeling. EnergyPlus является комплексной (и сложной) программой и требует определенных усилий для освоения, но она позволяет определить влияние различных вариаций на экономию энергии.

На рис. 8.9, взятом из «EnergyPlus-10», представлено графическое сравнение обычного здания и того же здания с обширными функциями энергосбережения, включая пассивные элементы солнечного отопления. Как видно из рисунка, потребление энергии системой с низким потреблением составляет примерно треть от потребления энергии базовой системой.

Компьютерные программы, похожие по возможностям на EnergyPlus, необходимы для разработки проектов, связанных с использованием энергии здания. Большая часть информации о пассивных системах солнечного отопления доступна в Интернете. Данная информация представлена в небольшом количестве, однако, является качественной. В действительности владельцы/управляющие зданиями и владельцы домов нуждаются в количественной информации об экономии энергии и затрат, чтобы оправдать использование пассивной солнечной энергии.



Рис. 8.9 Energy-10 показывает разницу в потреблении энергии, используемой потребителем.
Источник: изображение предоставлено Советом по экологическому строительству.

8.7 Заключение

В этой главе были рассмотрены основы пассивного использования солнечной энергии. Ко многим характеристикам пассивного использования солнечной энергии могут быть добавлены небольшие дополнительные затраты на строительство новых систем. Затраты на использование пассивных элементов солнечного отопления при реконструкции построенных зданий могут превышать затраты на новое строительство, поэтому нужно провести тщательную оценку. Дополнительную информацию можно получиться в работах из списка литературы или в Интернете. Действительно, в поисковой системе Google представлено много подходящей информации. При оценке достоверности этой информации следует проявлять осторожность. Тем не менее, на веб-сайтах Министерства энергетики США предоставлен широкий спектр проверенной информации о пассивной солнечной энергии.

Литература

Anderson,B. (1984) Passive Solar Design Handbook. Van Nostrand Reinhold, New York. Anderson, B., Michal, C., Temple, P., and Lewis, D.(1980) Passive Solar Design Handbook,Volume 1:Passive Solar Design Concepts. USDOE Report No. DOE/CS-0127/1.US Department of Energy,Washington,DC.

Balcomb,J.D. (1992) Passive Solar Buildings. The MIT Press, Cambridge, MA.

Balcomb,J.E., Barley,C.D., McFarland,R.D., et al. (1980) Passive Solar Design Handbook, Volume2: Passive Solar Design Analysis.USDOE Report No.DOE/CS-0127/2.US Department of Energy, Washington, DC.

Crosbie,M.J.(1997) The Passive Solar Design and Construction Handbook .John Wiley&Sons, Inc.,NewYork.

Duffie,J.A.,and Beckman,W.A.(2013)Solar Engineering of Thermal Processes,4th edn.John Wiley & Sons,Inc., NewYork.

Goswami,Y.,Kreith,F., and Kreider,J.F.(2000) Principles of Solar Engineering, 2nd edn. Taylor and Francis, NewYork.

Kreith,F., and West,R.E. (1997) CRC Handbook of Energy Efficiency. CRC Press, BocaRaton, FL.Marion,W.and Wilcox,S. (1994) Solar Radiation Data Manual for Flat-Plate and Concentrating Collectors. NREL, Golden,CO.

NREL (2001) Passive Solar Design for the Home. DOE/GO-102001-1105. http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/27954.pdf (accessed October19,2016).

9

Фотоэлектрические системы

9.1 Введение

Термин «фотоэлектрические системы» связан с использованием солнечного излучения для производства электрической энергии. Даффи и Бекман (2006), а также Госвами и соавт. (2000) являются авторами известных учебных пособий по гелиотехнике, в которых описаны фотоэлектрические системы. Патель в своих работах (2005) подробно рассматривает ветровые и солнечные фотоэлектрические системы, а в руководстве, написанном Крейтом и Уэстом (1997) содержится глава, посвященная фотоэлектрической энергии. Подобно плоским солнечным коллекторам, относящимся к тепловым солнечным системам, которые описаны в главе 7, «фотоэлементы» являются общепризнанными символами фотоэлектрических систем. В качестве примера фотоэлектрической системы на рис. 9.1 представлена фотография неподвижной плоской фотоэлектрической панели мощностью 18 кВт с двухосевыми трекерами. Система, показанная на рисунке, была установлена компанией Nevada Power Company и является примером применения сложных фотоэлектрических систем. Однако независимо от того, насколько сложной является фотоэлектрическая система, фотоэлементы являются основными элементами конструкции. В разделе 9.2 описаны основные принципы работы фотоэлектрических элементов.

9.2 Фотоэлектрические системы: Основные принципы

Перед изучением принципов работы фотоэлектрических элементов необходимо ознакомиться с атомной теорией и теорией полупроводников. Атом состоит из ядра, содержащего протоны и нейтроны с электронами, движущимися по орбитам вокруг ядра. В атоме число протонов равно числу электронов, и это число называется атомным номером. Атомный номер кремния, распространенного материала, широко используемого в фотоэлектрических элементах, равен 14. Электроны расположены на орбитах или зонах вокруг ядра. Все внутренние полосы должны быть заполнены до того, как любая другая полоса может быть частично заполнена. Энергия электрона определяется его положением в одной из различных зон. Количество электронов во внешней зоне определяет химические характеристики элемента. Самая внешняя зона, которую электрон может занимать и поддерживать связь с атомом, называется валентной зоной. Валентная зона кремния частично заполнена и содержит четыре электрона; она должна содержать восемь электронов для заполнения.

Если валентная зона заполнена, элемент является химически инертным. Если электроны в незаполненной валентной зоне слабо связаны, они могут присоединяться к соседнему атому, что придает этому атому отрицательный заряд, в результате чего донорный атом становится положительно заряженным ионом. Положительно и отрицательно заряженные ионы образуют ионную связь. Если электроны в незаполненной валентной зоне более прочно привязаны, они формируются так, чтобы соседние атомы могли делиться электронами с целью сохранения заполненных валентных зон. Такое явление совместного использования электронов приводит к образованию ковалентной связи. Электроны в валентной зоне могут стать настолько энергичными, что переходят в зону, которая находится далеко от ядра. Эта удаленная зона называется зоной проводимости. Разница в энергии между электроном в валентной зоне и электроном в зоне проводимости называется энергией запрещенной зоны. Для электронов в зоне проводимости требуется лишь небольшое количество энергии, необходимое для того, чтобы отойти от атома. Энергия отвечает за тепло и электрическую проводимость. Энергии запрещенной зоны обычно выражаются в электрон-вольтах (эВ): 1 эВ = 1,602 x 10^{-19} Дж. Изоляторы – это материалы, атомы которых имеют полные валентные зоны и имеют высокие энергии запрещенной зоны,> 3 эВ. Проводники – это материалы, атомы которых имеют относительно пустые валентные зоны. Материалы, атомы которых имеют относительно полные валентные зоны, являются полупроводниками с энергиями запрещенной зоны <3 эВ. Энергии запрещенной зоны для некоторых типичных материалов, используемых в фотоэлектрических элементах, представлены в таблице 9.1.

Кремний является полупроводником (четыре электрона в валентной зоне). Чистый кремний

называют собственным полупроводником. При наличии небольшого количества примесей, обычно называемых легирующими примесями, по сравнению с чистым кремнием он считается внешним полупроводником. Полупроводник n-типа получают, если в легирующей примеси в валентной зоне больше электронов, чем в основном материале. Полупроводник n-типа, по всей вероятности, имеет избыток электронов, хотя полупроводник электрически нейтрален. Полупроводник p-типа получают, если в легирующей примеси меньше электронов в валентной зоне, чем в основном материале. Полупроводник p-типа, по-видимому, имеет недостаток электронов или избыток «вакантных мест», хотя он электрически нейтрален.

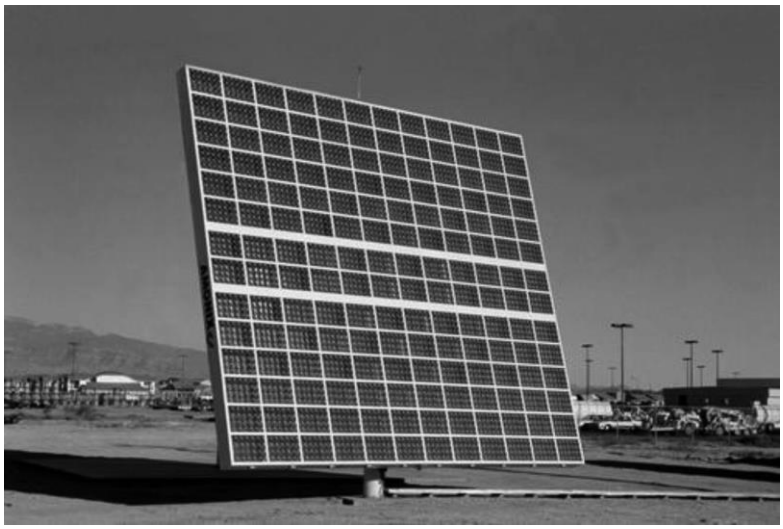


Рис. 9.1 Пример фотоэлектрической системы. *Источник:* Национальная лаборатория по изучению возобновляемых источников энергии 08851.

Таблица 9.1 Энергия свободного электрона типичного фотоэлектрического материала.

Материал	**Энергия запрещенной зоны (эВ)**
Si, кремний	1,11
CdTe, теллурид кадмия	1,44
CdS, сульфид кадмия	2,42
CuInSe2, диселенид индия меди	1,01
GaAs, арсенид галлия	1,40
GaP, фосфид галлия	2,24
InP, фосфид индия	1,27

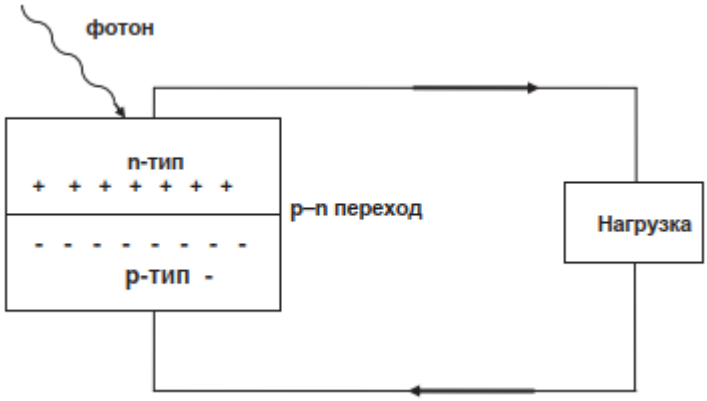


Рис. 9.2 Схематическое изображение фотоэлектрического элемента.

Причина легирования чистого полупроводника, такого как кремний, заключается в том, что переход, образованный из полупроводникового материала n-типа и p-типа, увеличивает поток электронов и дыр.

Рассмотрим схему фотоэлектрического элемента на рис. 9.2. Фотоэлемент показан в виде p-n-перехода с падающим фотоном. Внешняя нагрузка подключена. Если падающий фотон достаточно энергичен, чтобы сместить валентный электрон, электрон переходит в зону проводимости и инициирует течение тока. Для того чтобы электрон был вытеснен из валентной зоны в зону проводимости, фотон должен обладать, по крайней мере, энергией запрещенной зоны.

Энергия фотона вычисляется

$$E = h\nu \tag{9.1}$$

Где h=6,625 * 10^{-34}Дж/с (Постоянная планка) и ν – частота. Частота, длина волны λ, скорость света (с= 2,998 * 10^{8}м/с) обозначаются как

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \tag{9.2}$$

Теперь выполним объединение:

$$E = h\frac{c}{\lambda}$$

Пример 9.1

Определите длину волны света, которая соответствует энергии запрещенной зоны кремния, 1,11 эВ.

Решение: при объединении уравнения 9.1 и 9.2 необходимо найти длину волны:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = 6.625*10^{-34}\ \text{Дж/с} * 2{,}2998 * 10^{8} * \frac{\text{м}}{\text{с}} * \frac{1}{1{,}11\ \text{еВ}} * \frac{eV}{1{,}602*10^{-19}\ \text{Дж}} = 1{,}1169*10^{-6}\ \text{м} = 1{,}12\text{мкм}$$

Следовательно, свет длиной волны 1,12 мкм обладает достаточной энергией для смещения валентного электрона в кремнии.

В примере 9.1 представлены важные аспекты для функционирования и эффективности фотоэлектрических устройств. Фотоны с длиной волны более 1,12 мкм содержат недостаточную энергию для смещения валентного электрона в кремнии; следовательно, фотоны с длиной волны более 1,12 мкм не будут вызывать фотоэлектрического эффекта в кремнии. Фотоны с длиной волны менее 1,12 мкм обладают большей энергией, чем требуется для смещения валентного электрона в кремнии. Однако один фотон может сместить только один валентный электрон, при этом разность в энергии запрещенной зоны и энергии фотона поглощается в виде тепла фотоэлектрическим устройством. На рис. 9.3 представлено графическое изображение характеристик фотоэлектрического устройства, подвергшегося воздействию солнечного излучения.

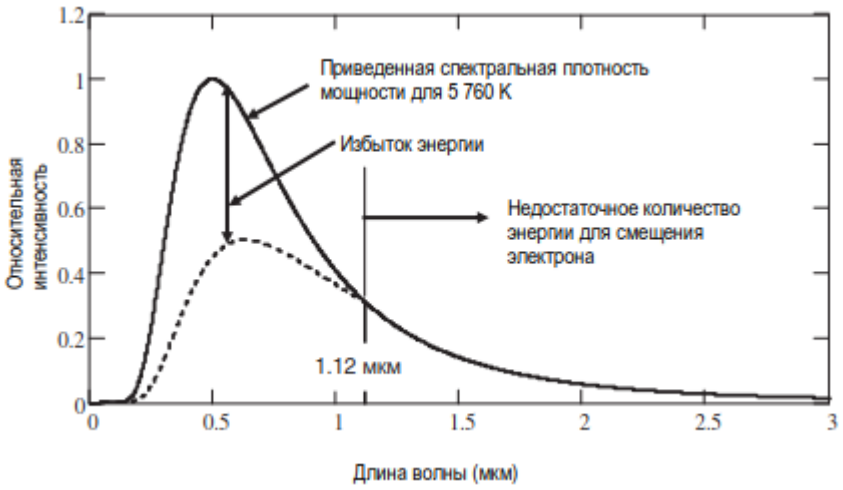


Рис.9.3 Солнечное излучение и ширина запрещённой зоны кремния.

Информация, представленная на рис. 9.3, отражает характеристики кремния, но те же характеристики были бы применимы для любого указанного полупроводникового материала (или энергии запрещенной зоны).

Сплошная кривая представляет спектральную плотность мощности при 5760 К (температура, которая соответствует спектральному распределению энергии солнечного излучения), нормированную к ее максимальному значению. Длина волны 1,12 мкм указана на рисунке. Длина волны более 1,12 мкм содержит недостаточную энергию для смещения валентного электрона, а длина волны менее 1,12 мкм приводит к избыточной энергии. Если $E_{1.12}$ представляет собой энергию, необходимую для смещения валентного электрона кремния, то уравнения 9.1 и 9.2 можно преобразовать в формулу отношения, чтобы выразить ту часть энергии, которая необходима для смещения валентного электрона на длине волны ниже 1,12 мкм:

$$E_{1.12} = E\frac{\lambda}{\lambda_{1.12}} \tag{9.3}$$

и значение избыточной энергии высчитывается

$$E - E_{1.12} = E - E\frac{\lambda}{\lambda_{1.12}} = E\left(1 - \frac{\lambda}{\lambda_{1.12}}\right) \tag{9.4}$$

Таким образом, чем меньше длина волны, тем больше избыточная энергия фотона. Обычно низкая эффективность фотоэлектрических устройств объясняется этим принципом и дополнительными недостатками преобразования, связанными с длинами волн фотонов, чье значение меньше, чем значение волн, которые соответствуют точной энергии запрещенной зоны.

Таблица 9.2 Теоретическая и измеренная эффективность фотоэлектрических элементов.

Материал	**КПД (%)**	
	Теоретич.	**Измер.**
Si, кремний	28	25
Si (аморфный кремний)	23	14
CdTe, теллурид кадмия	29	22
CuInSe2, диселенид меди индия	27	22
GaAs, арсенид галлия	30	29

В Таблице 9.2 представлены значения теоретической и измеренной эффективности для типичных материалов фотоэлектрических элементов.

Теоретическая эффективность – это общепринятые значения (http://www.solarserver.com/знание/базовые-знания/photovoltaics.html) в то время как измеренные значения были получены из Национальной лаборатории возобновляемой энергии (NREL), как показано на рис.9.4, и представляют лабораторные значения, а не производственные значения. Поскольку они являются результатами активных и агрессивных исследовательских программ, измеренная эффективность некоторых материалов в таблице может изменяться. Например, Национальная лаборатория возобновляемой энергии спонсировала Программу партнерства по вопросам тонких пленок (1994–2009 годы), в которой основное внимание уделялось аморфному кремнию (a-Si), теллуриду кадмия (CdTe) и диселениду меди-индия-галлия (CIGS) и его сплавам. Партнерская программа привела к значительному сокращению производственных затрат при одновременном увеличении установленных мегаватт тонкопленочных систем в 25 раз. Веб-сайт Национальной лаборатории возобновляемой энергии: http://www.nrel.gov/materials-science/thin-flm.html.

Сводная информация о длительном усилении эффективности фотоэлектрических элементов была составлена Национальной лабораторией изучения возобновляемых источников энергии в 2015 году и воспроизведена на рис. 9.4. На рисунке представлены общие тенденции производительности различных фотоэлектрических элементов (и участвующих в исследованиях субъектов). За исключением многопереходных приборов, общая тенденция заключается в медленном, но неуклонном повышении производительности элементов со временем. Принцип стратегии, используемой для преодоления относительно низкой эффективности солнечных элементов, состоит в том, чтобы обеспечить более одного соединения; то есть, чтобы произвести два или более соединений, один над другим. За последнее десятилетие эти многопереходные фотоэлектрические элементы продемонстрировали впечатляющий рост эффективности. Действительно, максимальное значение фотоэлектрической мощности в 2015 году составило 46% для концентратора с четырьмя контактами. Несмотря на то, что многопереходные приборы демонстрируют впечатляющую эффективность, затраты на изготовление высоки.

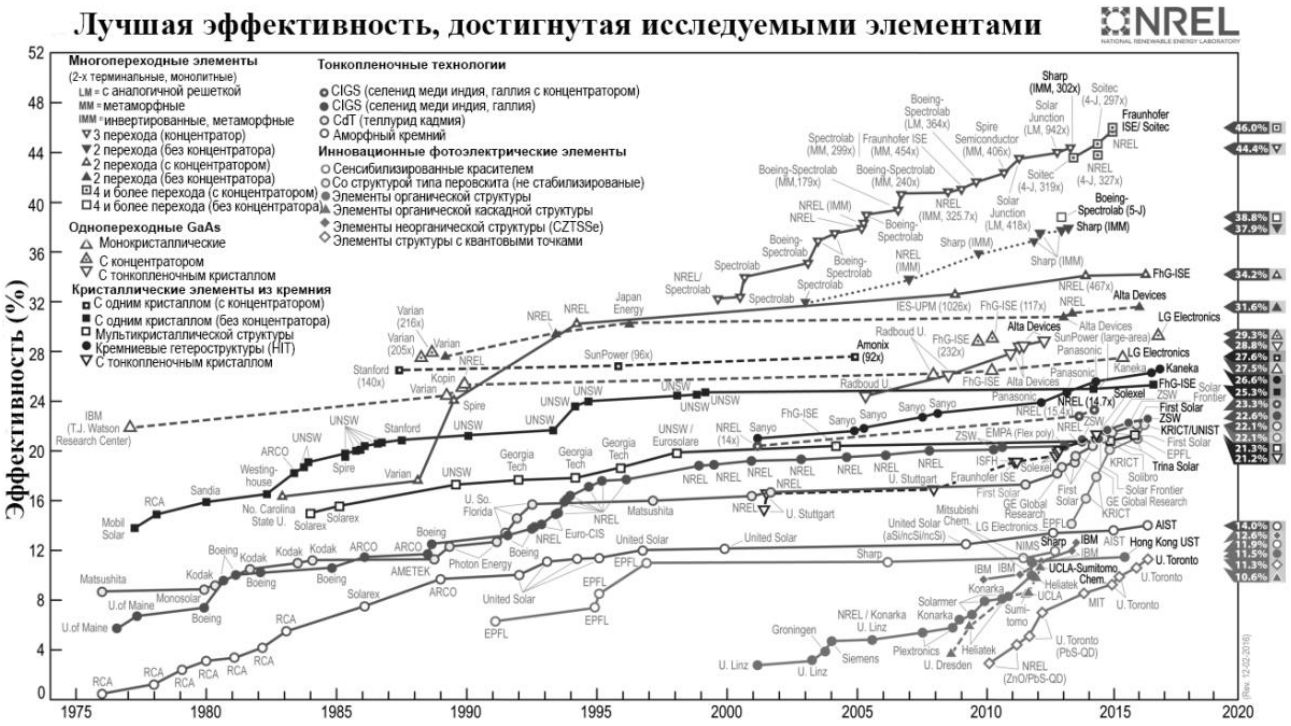


Рис. 9.4 Динамика эффективности фотоэлектрических элементов.
Источник: http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg

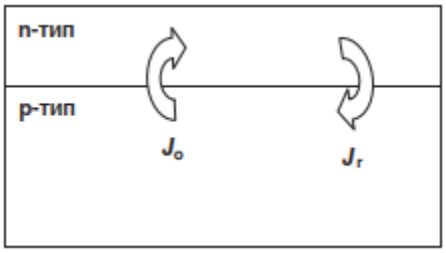


Рис. 9.5 Плотность тока на p-n-переходе

Несмотря на то, что детальная физика фотоэлектрического элемента довольно сложна, тем не менее имеются и простые модели. Рассмотрим рис. 9.5, на котором изображен поток вектора плотности тока сквозь p-n-переход фотоэлектрической ячейки. Плотность тока представляет собой ток I, поделенный на площадь поверхности A, и обозначается как J.

В p-n-переходе генерируется плотность тока J_j при переходе. Плотность тока при переходе – это алгебраическая сумма плотности тока при переходе от p-стороны к n-стороне (темновой ток или ток обратного насыщения) J_o, и плотности тока при переходе от n-стороны к p-стороне (свет – индуцированный ток рекомбинации) J_r. В освещенном фотоэлектрическом элементе плотность тока индуцированной светом рекомбинации пропорциональна току обратной насыщенности и определяется как

$$J_r = J_o \text{Эксп}\left(\frac{e_o V}{kT}\right) \tag{9.5}$$

где e_o=1,602x10^{-19}Дж/В(заряд одного электрона) и k=1,381x10^{-23}Дж/К (Постоянная Больцмана).Плотность тока соединения Jj равна

$$\begin{aligned} J_j &= J_r - J_o \\ &= J_o\left[\text{эксп}\left(\frac{e_o V}{kT}\right) - 1\right] \end{aligned} \tag{9.6}$$

Эквивалентная схема для фотоэлектрического элемента показана на рис. 9.6. В эквивалентной схеме выходная плотность тока солнечного элемента J_s течет параллельно либо через переход, либо при нагрузке. Плотность тока нагрузки J_L может быть выражена как

$$J_L = J_s - J_j \tag{9.7}$$

Используя уравнение 9.6, плотность тока нагрузки может быть приведена как

$$J_L = J_s - J_o\left[\text{эксп}\left(\frac{e_o V}{kT}\right) - 1\right] \tag{9.8}$$

Если элемент короткозамкнут, R_L = 0, так что J_s = J_L, а уравнение 9.8 требует V = 0. Если цепь разомкнута, то J_L = 0 и выход элемента направлен через переход. При этих обстоятельствах напряжение называется напряжением холостого хода V_{oc}.

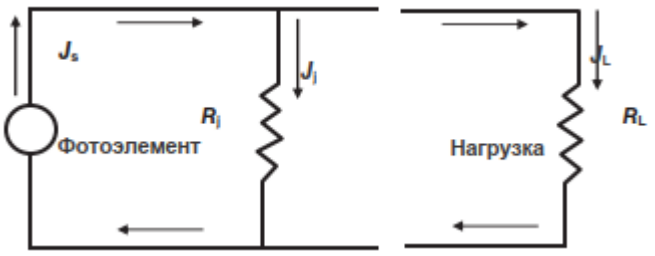


Рис. 9.6 Схема замещения фотоэлемента

Производительность фотоэлектрического элемента обычно описывается с использованием тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

Напряжение холостого хода возникает, когда $J_L = 0$. Если напряжение для $J_L = 0$ обозначается как V_{oc}, то уравнение 9.8 можно решить для V_{oc} следующим образом.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e_o} \ln\left(\frac{J_s}{J_o} + 1\right) \tag{9.9}$$

Учитывая напряжение и температуру холостого хода, уравнение 9.9 может быть решено для отношения J_s/J_o. Типичное значение V_{oc} составляет 0,6 В для одного солнечного элемента. Соотношение J_s/J_o довольно велико. Разделив уравнение 9.8 на J_s, получим выражение для отношения плотности тока нагрузки к плотности тока короткого замыкания

$$\frac{J_L}{J_s} = 1 - \frac{J_o}{J_s}\left[e^{\left(\frac{e_o V}{kT}\right)} - 1\right] \tag{9.10}$$

Используя уравнение 9.10 и указанное значение V_{oc}, можно определить зависимость плотности тока от напряжения. Мощность, подаваемая на нагрузку, равна плотности тока нагрузки J_L, умноженной на падение напряжения на нагрузке, умноженной на площадь фотоэлектрического элемента:

$$\text{Мощность} = J_L V A \tag{9.11}$$

где A – площадь фотоэлектрического элемента. На рис.9.7 представлены изменения напряжения J_L/J_s и нормированной мощности в зависимости от напряжения для V_{oc} = 0,6 В и T = 300 К. Мощность нормализуется с максимальной мощностью на нагрузку, которая возникает при V ≈ 0,5 В. Общая функциональная форма как коэффициента плотности тока, так и коэффициента мощности одинакова для большинства фотоэлектрических элементов. Плотность тока нагрузки медленно уменьшается при увеличении напряжения от нуля, но при приближении к V_{oc} плотность тока быстро уменьшается до нуля при условии разомкнутой цепи. В состоянии короткого замыкания мощность, подаваемая на нагрузку, равна нулю, а мощность, передаваемая на нагрузку, также равна нулю в состоянии разомкнутой цепи. Между этими двумя крайними значениями мощность достигает максимального значения, обычно относительно близкого к напряжению холостого хода. Напряжение и ток при максимальной мощности показаны на рис.9.7 как V_{mp} и I_{mp} соответственно. Не удивительно, что чем выше солнечное излучение, тем выше выходная мощность фотоэлектрического элемента. Рассмотрим, как показано на рис.9.8, влияние излучения на производительность солнечного элемента.

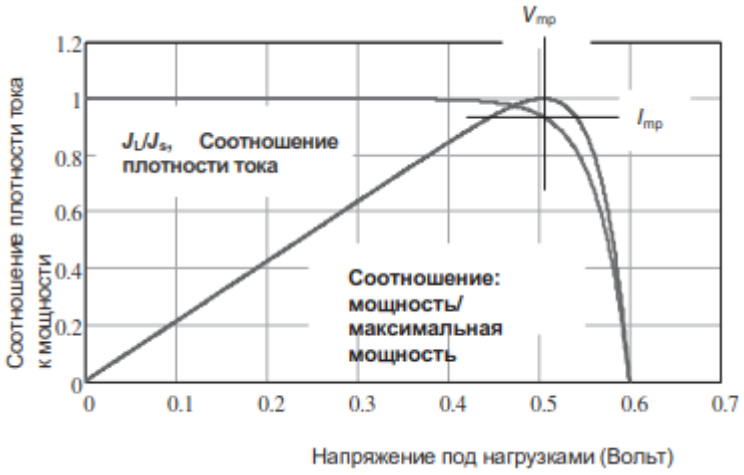


Рис. 9.7 Коэффициент плотности тока и коэффициент мощности в зависимости от напряжения



Рис. 9.8 Влияние солнечного излучения на функциональную характеристику солнечных элементов.

Когда солнечное излучение увеличивается, напряжение холостого хода немного увеличивается, но ток нагрузки почти прямо пропорционален солнечному излучению. Максимальная мощность нагрузки также почти прямо пропорциональна солнечному излучению, падающему на элемент.

С обсуждением фундаментальной физики фотоэлектрических элементов необходимо изучить фактические компоненты и системы, и они будут рассмотрены в разделе 9.3.

9.3 Элементы фотоэлектрических систем

Независимо от того, какие фотоэлектрические системы рассматриваются, самым основным элементом является отдельный фотоэлектрический элемент. Отдельные элементы объединяются в модули; модули собираются в панели, которые интегрированы в системы с широким спектром элементов. Рис. 9.9 схематично иллюстрирует последовательность. В Интернете можно найти большое количество информации обо всех компонентах фотоэлектрических систем.

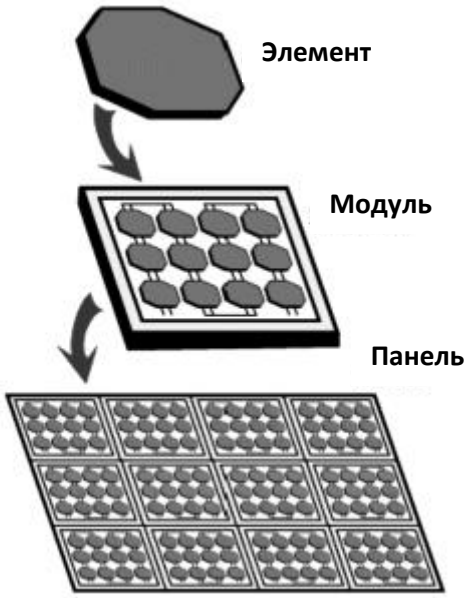


Рис. 9.9 Элементы, модули, панели.
Источник: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2002/solarcells/



Монокристаллический кремниевый солнечный элемент CT7S20 - 3BB
Механические характеристики и конструкция
Размеры 156ммх156мм+/-0,5мм
Толщина200 мкм+/-20мкм
Поверхность фотоэлемента 243см^2+/-3.12см^2
Передн.(-) Щелочная поверхность с антибликовым покрытием из нитрида кремния SINx3 шины шириной 1.5мм
Задн.(+) 3 шины шириной 3.5мм

Электрические характеристики (типовые значения)

V_{oc} (вольт)	I_{sc} (ампер)	Производи-тельность	Коэффициент заполнения
0,622	8,624	0,172	0,787
0,622	8,638	0,174	0,794
0,625	8,654	0,176	0,797
0,626	8,663	0,178	0,802
0,624	8,909	0,180	0,794
0,626	8,940	0,182	0,797
0,627	8,950	0,184	0,801
0,627	8,950	0,186	0,811

Рис. 9.10 Типовые характеристики фотоэлектрических элементов (PhotoWatt6MB).
Источник: http://www.photowatt.com/en/products/cellules

Основным строительным блоком является отдельный солнечный элемент. Несмотря на то, что в интернете содержится важная информация об отдельных фотоэлектрических элементах, большая часть информации представлена в виде описания качественных характеристик, а не количественных данных, при этом данная информация не считается полной спецификацией фотоэлектрических элементов. Веб-сайт французской компании PhotoWatt International (http://www.photowatt.com/en/products/cellules) содержит технические характеристики фотоэлектрических элементов PhotoWatt. На рис.9.10 приведены некоторые технические характеристики фотоэлектрического элемента PhotoWatt 6 MB. Первая часть рисунка представляет собой визуальное изображение элемента и содержит информацию о размере и используемых материалах, а также некоторые детали конструкции. Таблица в среднем сегменте рисунка описывает напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, коэффициент полезного действия и коэффициент заполнения для выборки из элементов 6 MB. Коэффициент заполнения определяется как отношение максимальной мощности $V_{mp}I_{mp}$ солнечного элемента к произведению V_{oc} и I_{sc}:

$$FF = \frac{V_{mp}I_{mp}}{V_{oc}I_{sc}}$$

Общий уровень излучения, используемый для тестирования фотоэлектрических элементов, составляет 1000 Вт/м^2. Напряжение холостого хода составляет ~ 0,62 В, а ток короткого замыкания составляет ~ 8,7 А. Проверка чисел подтверждает, что если необходимо достичь значительных мощности и напряжения, то потребуется более одного элемента. Модули разрабатываются путем размещения фотоэлектрических элементов последовательно и параллельно

Для последовательного и параллельного размещения солнечных элементов применяются те же правила, что и при последовательном и параллельном соединении цепей постоянного тока. Для идентичных компонентов, размещенных последовательно, напряжения добавляются при постоянном токе, а для идентичных компонентов, расположенных параллельно, токи добавляются при постоянном напряжении. Рассмотрим графическое изображение двух одинаковых элементов, размещенных последовательно, а затем параллельно на рис.9.11. Для последовательно размещенных элементов, рис. 9.11a, напряжения добавляются при постоянном токе; следовательно, последовательное размещение элементов приводит к увеличению напряжения. Параллельно размещенные элементы, рис. 9.11b, приводят к увеличению тока. Рассмотрим пример 9.2.

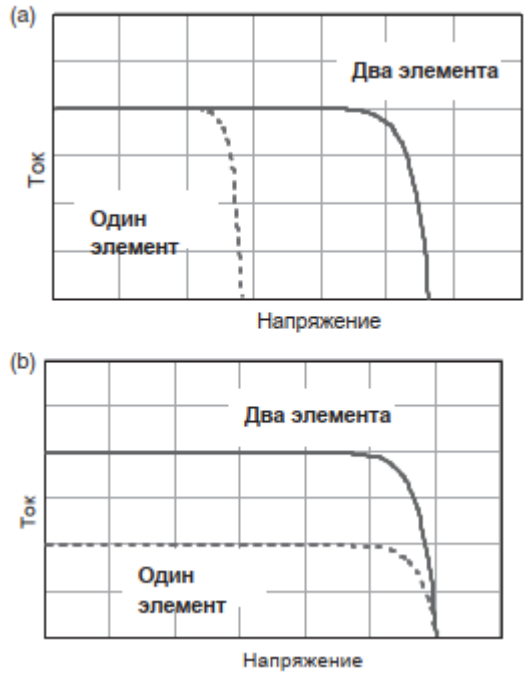


Рис. 9.11 Поведение элементов, расположенных последовательно и параллельно: (a) два идентичных элемента расположены последовательно; (b) два идентичных элемента расположены параллельно

Пример 9.2
Фотогальванические элементы PhotoWatt 6 MB должны иметь выходную мощность 12 В и мощность 210 Вт. Порекомендуйте схему, которая будет соответствовать спецификациям.

Решение: на рис. 9.10 типичное напряжение холостого хода и ток короткого замыкания составляют 0,622 В и 8,625 А соответственно, а коэффициент заполнения = 0,787. Выходная мощность для этих условий

$$\text{Мощность} = I_{sc} V_{oc} \times \text{FF} = 0.622\ \text{В} \times 8.625\ \text{А} \times 0.787 = 4.22\ \text{Вт}$$

Количество элементов, необходимое для 120 Вт

$$\text{Кол-во элементов} = \frac{210\ \text{Вт}}{4{,}22\ \text{Вт/эл}} = 49{,}8\ \text{элементов}$$

Для обеспечения правильного напряжения 12 В количество последовательно расположенных элементов должно быть

$$\text{Последовательно расположенные элементы} = \frac{12\ \text{В}}{0{,}622\ \text{В/эл} * 0{,}787} = 24{,}5\ \text{элементов}$$

где напряжение при максимальной мощности приблизительно равно V_{oc}*FF.

Округлите количество последовательно расположенных элементов до 25 элементов. Для двух рядов по 25 элементов, расположенных параллельно, потребуется 50 элементов с общей мощностью 211 Вт. Рекомендуемая конфигурация показана на рис.9.12.

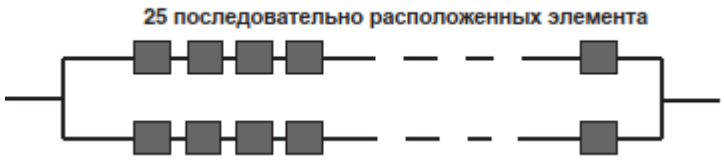
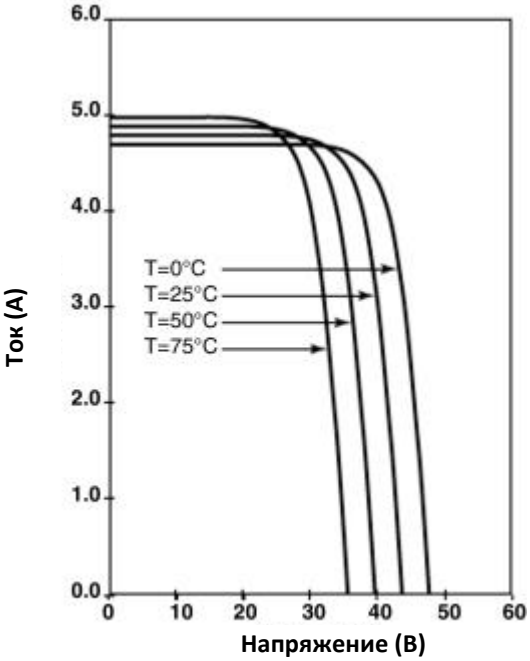


Рис. 9.12 Конфигурация элемента для примера 9.2.





	BP 3160	BP 3150
Максимальная мощность ($P_{макс}$)	160 Вт	150 ъВт
Напряжение при $P_{макс}$ (Imp)	35,1 В	34,5 В
Ток при Рмакс (Imp)	4,55 А	4,34 А
Гарантированная мин. $P_{макс}$	150 Вт	140 Вт
Ток короткого замыкания (I_{sc})	4,8 А	4,75А
Напряжение разомкнутой цепи (V_{oc})	44,2 В	43,5 В
Коэффициент температуры I_{sc}	(0,065 ± 0,015)%/C	
Температурный коэффициент напряжения	-(160±20) мВ)/C	
Температурный коэффициент мощности	-(0,5±0,05) %/C	
Нормальная рабочая температура фотоэлемента	47±2C	

Рис. 9.13 Технические характеристики BP 3160 NOCT: Нормальная рабочая температура фотоэлемента. *Источник:* BP Solar.

Пример 9.2 иллюстрирует, как отдельные солнечные элементы могут быть расположены для обеспечения заданного напряжения и мощности. Такое устройство называется модулем и является типичным продуктом, продаваемым многими фотоэлектрическими производителями. Фотоэлектрические элементы расположены, как описано, чтобы обеспечить определенные характеристики. Однако для обеспечения надлежащей работы модуля в реальных условиях, таких как выход из строя отдельного элемента или затенение части модуля, последовательно соединенные элементы в панелях обычно снабжаются блокирующими диодами для предотвращения обратного тока и других нежелательных последствий.

BP Solar являлась международным производителем фотоэлектрических элементов и компонентов, пока компания не была закрыта в декабре 2011 года. Информация о фотоэлектрическом модуле BP3160 представлена на рис.9.13 и является типичной для модулей, продаваемых на рынке. Модули BP Solar по-прежнему доступны в Интернете.

Параметры BP 3160 62,8 на 31,1 на 1,97 в глубину, модуль весит 33,1 фунта. Цена BP 3160 составляла 719 долларов в 2008 году (www.solarhome.org). Цена (лето 2015) за 1 кВт BP 3160 будет около 5 000 долларов США. Визуальное изображение модуля показано на рис. 9.13 рядом с кривой I–V. Информация о кривой I–V представлена с информацией о температуре, но соответствует ожидаемой форме. Дополнительные сведения о работе модуля прдставлены в прилагаемой таблице. Все рисунки 9.13 были взяты с веб-сайта BP Solar до их закрытия. Кривая и информация в таблице подобны той, которая связана с отдельным фотоэлектрическим элементом, что неудивительно, поскольку при

последовательном и параллельном расположении отдельных солнечных элементов сохраняются одинаковые функциональные формы. Уровень солнечного излучения, соответствующий данным по производительности BP E3160, составлял 1 000 Вт/м^2. Коэффициенты температуры α, β и γ приведены для значений тока, напряжения и мощности соответственно. Это позволяет оценить влияние на производительность модуля различных температур. Изменения значений температур:

$$I_{sc}=I_o(1+\alpha\Delta T) \quad (9.12)$$

$$V_{soc}=V_o(1+\beta\Delta T) \quad (9.13)$$

$$\text{Мощность}=\text{Мощность}_o(1+\gamma\Delta T) \quad (9.14)$$

где индекс «$_O$» обозначает условия при расчетной температуре.

Далее приведен пример

Пример 9.3
Оцените годовое производство киловатт-часов одного модуля BPE160 в городе Меридиан, штат Миссисипи. Изучите два случая: (1) постоянный наклон под углом широты и (2) двухосное отслеживание.

Решение: решение осуществляется в Mathcad. Рабочий лист Mathcad воспроизводится как рис. 9.14. Определены дни каждого месяца. В Руководстве по данным о солнечном излучении для плоских и концентрирующих коллекторов (Марион и Вилкокс, 1994) представлены необходимые данные о солнечной энергии для оценки рабочих характеристик. Данные для Меридиана, Миссисипи, из руководства воспроизводятся на рис.7.12. Для решения первой части задачи используются среднемесячные данные для поверхности, наклоненной под углом широты, для определения солнечного излучения, падающего на установку, и вводятся в вектор I_F. Для части 2 среднемесячные данные для поверхности с двухосным отслеживанием (как на рис.7.3) используются для солнечного излучения, падающего на модуль, и вводятся в вектор IT. Излучение выражено в единицах киловатт-часов на квадратный метр в сутки. Номинальная мощность модуля составляет 160 Вт при излучении 1 000 Вт/м^2. Выработка электроэнергии в день для части 1 рассчитывается как

$$\text{ЭлекF}_{\text{день}}=\frac{160\ \text{Вт}}{1000\ \text{Вт/м}^2}I_F \quad (9.15)$$

Согласно этому выражению выработка электроэнергии прямо пропорциональна уровню излучения. Это утверждение вносит некоторую ошибку в вычисления, но, учитывая то, что входные значения неизвестны, ошибка допустима. Ежемесячное производство электроэнергии *E*t определяется путем умножения ежедневной выработки на количество дней в месяце. Годовой итог EtotF получается путем сложения месячных значений. Та же процедура применяется для части 2, за исключением того, что используются среднемесячные данные для поверхности с двухосным отслеживанием I_T. Годовая выработка электроэнергии модулем BP 3160, наклоненным под углом широты, составляет 286 кВт/ч, тогда как модуль с двухосным слежением вырабатывает 368 кВт/ч. Для модуля BP 3160, расположенного в городе Меридиан, штат Миссисипи, двухосевое отслеживание значительно увеличивает производство электроэнергии. Выработка в месяц изображена на рис. 9.15 для обеих частей задачи. Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии (NREL) предоставляет онлайн калькулятор, PVWatts, для расчета месячной и годовой производительности фотоэлектрических систем. Онлайн калькулятор можно найти по ссылке: http://pvwatts.nrel.gov/pvwatts.php

а также

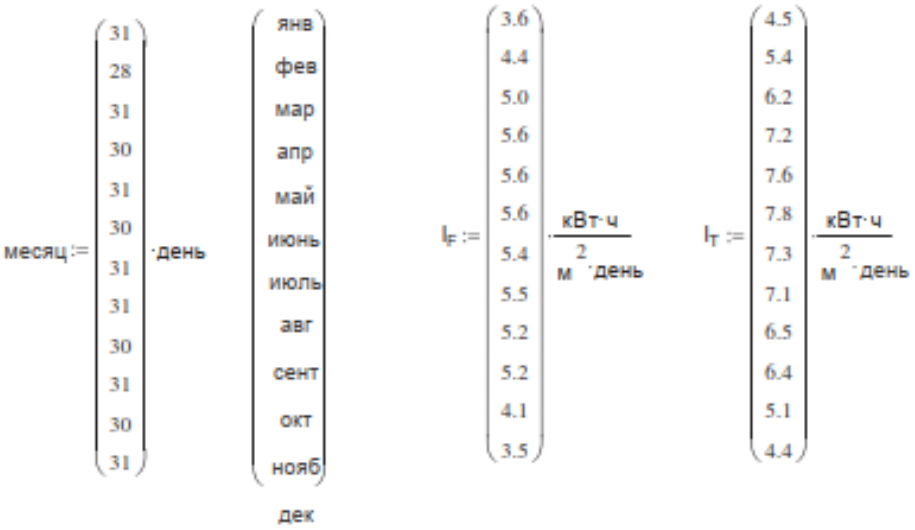
Источник 1

Настройте все входные параметры по месяцам, используя переменный диапазон i:

i : = 1 ..|12

Определите месяц по дням

Среднемесячные условия Национальной лаборатории по изучению возобновляемых источников энергии (NREL) используются для получения данных о солнечной погоде и погоде для заданного местоположения, в данном случае город Меридиан, штат Миссисипи имеется подробное руководство (Добос, 2014).



Номинальное значение выработки энергии составляет 160 Вт при излучении 1000 Вт/м^2

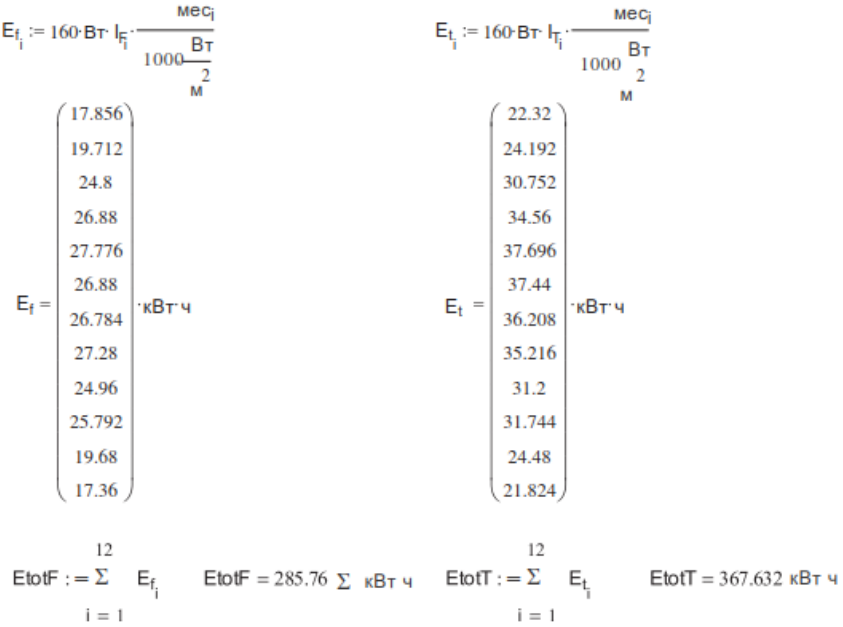


Рис. 9.14 Рабочая таблица Маткад (Mathcad) для примера 9.3.

Результаты из примера 9.3 совпадают с точностью до нескольких процентных пунктов, если потери инвертера составляют 4% (n_i = 0,96) и потери системы 14% (n_i = 0,96). Чтобы учесть эти потери, уравнение 9.15 заменяется на

$$\text{Элек } F_{\text{день}} = \frac{160 \text{ Вт}}{1000 \text{ Вт/м}^2} I_F * 0{,}96 * 0{,}86 \qquad (9.16)$$

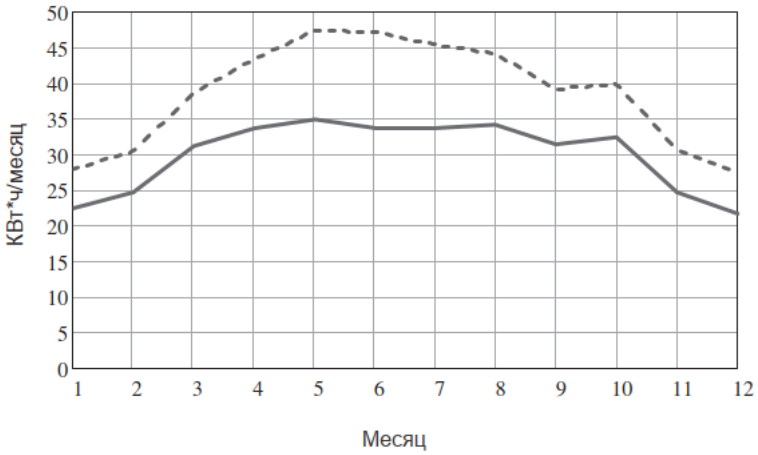


Рис. 9.15 Месячная выработка киловатт-часов для примера 9.3.



Рис. 9.16 Фотоэлектрическая панель 49кВт.
Источник:http://images.nrel.gov/viewphoto.php?imageId=6322492.

Модули, подобно тем, что представлены в примере 9.3, собраны в модули последовательно/параллельно, как элементы в блоках. На рис.9.16 представлена фотоэлектрическая панель. Панели рассчитаны на 49 кВт и были изготовлены компанией SolarEnergySystems и установлены в Квинсе, Нью-Йорк.

9.4 Фотоэлектрические системы

Фотоэлектрические системы представлены широким спектром размеров и функций. Фотоэлектрические системы подразделяются по основным двум параметрам – автономность и подключение к сети (или взаимодействие с системой). Автономные фотоэлектрические системы не подключены к электросети. По функциональному использованию в возрастающей иерархии сложности фотоэлектрических систем различаются следующие системы:

1) непосредственно связанные
2) системы с аккумуляторной батареей
3) системы с резервным источником питания (генератором)
4) гибридные энергетические системы
5) системы, подключенные к электрической сети
6) системы для производства служебных источников питания.



Рис. 9.17 Схематическое изображение непосредственно связанных массивов фотоэлектрических панелей: (a) Нагрузка постоянного тока; (b) Нагрузка переменного тока

Первые четыре в этом списке, как правило, являются автономными системами. Центр солнечной энергии Флориды (FSEC) представляет схематические изображения и некоторые обсуждения различных фотоэлектрических систем. Некоторые из схем в этом разделе являются адаптациями и модификациями схем систем Центра солнечной энергии Флориды. Веб-сайт http://www.fsec.ucf.edu/en/consumer/solar_electricity/basics/types_of_pv.htm.

Непосредственно связанные фотоэлектрические системы подают питание постоянного тока непосредственно на нагрузку или питание переменного тока через инвертер на нагрузку. Схематические изображения непосредственно связанных систем (постоянного или переменного тока) представлены на рис.9.17. Такие системы часто используются при наличии особых требований, обычно при применении при низких киловаттах, в случае, когда электроснабжение недоступно. При отсутствии подключения к сети, резервного копирования или возможности хранения автономные системы полностью зависят от солнечного излучения для выработки и эксплуатации электроэнергии. Тем не менее, они применяются для устройств на фотоэлектрических элементах.

Одним из недостатков непосредственно соединенных фотоэлектрических систем является их способность работать только при воздействии солнечного излучения. Фотоэлектрические системы с аккумуляторной батареей могут функционировать в ночное время или, когда солнечного излучения недостаточно для удовлетворения требуемой потребности в электроэнергии. На рис. 9.18 схематично изображена фотоэлектрическая система с аккумуляторной батареей. Контрольное устройство заряда аккумуляторной батареи, являющееся основным компонентом, направляет выходную мощность фотогальванической панели на нагрузку и на зарядку батареи, когда генерируется электричество; когда панель не генерирует электричество, то для создания нагрузки она получает энергию из аккумулятора.



Рис. 9.18.Автономная фотоэлектрическая система с аккумулятором.

Таблица 9.3 Глубина разряда по отношению к циклам (East Penn Deka)

Глубина разряда (%)	Циклы
10	5700
25	2100
50	1000
80	600
100	450

Контрольное устройство также способствует передаче питания от аккумулятора к инвертеру для нагрузок переменного тока. Обычные устройства переменного тока могут питаться от системы с инвертером. В 2015 году номинальная установленная стоимость несетевого источника энергии 5 кВт, с резервным питанием от батареи (номинально 20 кВт/ч) составляла около 35 000 долл. США, в зависимости от использованных вариантов. Федеральные и государственные налоговые льготы, а также скидки на коммунальные услуги, в зависимости от местоположения, могут использоваться для компенсации затрат на установку таких систем. В Интернете имеется ряд веб-сайтов, предлагающих широкий ассортимент солнечных фотоэлектрических систем.

Характеристики аккумуляторной батареи и требования к применению фотоэлектрической системы важны, поэтому существует необходимость рассмотреть их подробнее. Стандартные показатели батареи включают в себя напряжение, зарядную емкость, продолжительность цикла и глубину разряда. Первые два показателя, напряжение и зарядная емкость, используются для определения потенциала аккумулирования/восстановления энергии аккумулятора. Напряжение на клеммах аккумуляторной батареи указывается в вольтах, а зарядная емкость батареи указывается в ампер-часах. Произведение напряжения и зарядной емкости дает энергию, запасенную в батарее. Например, аккумулятор 12 В с зарядной емкостью 50 А/ч запасает 600 В А/ч = 600 Вт/ч= 0,6 кВт/ч энергии.

Циклическая способность обозначает число циклов зарядки/разрядки, аккумуляторной батареи. Глубина разряда определяет, сколько (какой процент) накопленной энергии при полной емкости может быть извлечено без повреждения батареи. Аккумуляторы для фотоэлектрического применения требуют высокой емкости цикла, а также большой глубины разрядки. Автомобильные аккумуляторы требуют большого количества потребляемой мощности в течение короткого периода времени (время запуска двигателя) с малой глубиной разряда. Таким образом, автомобильные аккумуляторы не подходят для солнечной батареи.

Примером комплекта глубокого цикла является аккумулятор MKSolar® 8G8DEastPenn (www.eastpennmanufacturing.com, http://www.mkbattery.com/images/8G8D.pdf).

В таблице 9.3 приведена глубина разряда в зависимости от количества ожидаемых циклов для батареи Solar 8G8D. Каждая батарея Solar 8G8D обеспечивает номинальную мощность 188–265 А/ч и весит 166 фунтов. Таким образом, емкость блока из шести элементов будет составлять 1 128–1 590 А/ч в зависимости от скорости разряда. Цены (лето 2015 г.) на одну батарею варьируются от 500 до 700 долл. США на различных веб-сайтах или от 3 000 до 4 200 долл. США за указанную емкость для шести. Следовательно, запас энергии в батарее является относительно дорогим, поскольку устройство хранит 1128–1590 А/ч за 3000–4200 долларов.

В Таблице 9.3 показано, что глубина разряда значительно влияет на срок службы батареи. Для большинства видов солнечных фотоэлектрических систем необходимы батареи продолжительного срока службы.

Пример 9.4

Сколько аккумуляторных батарей Solar 8G8D для солнечной фотоэлектрической системы потребуется для запасания и восстановления энергии со значением 10 кВт/ч, которые будут функционировать в течение 4 дней (96 часов).

Решение: батарея должна запасать и извлекать

$$\text{Хранение энергии} = 10 \text{ дней } \frac{\text{кВт/ч}}{\text{дней}} \text{x } 4 \text{ дня} = 40\text{кВт/ч} = 40\,000 \text{ Вт/ч}$$

Если задана глубина заряда 50%, то емкость аккумулятора должна составлять 80 кВт/ч. В одном комплекте аккумуляторов хранится 265 А/ч*12В=3180 А/ч/В=3,1 кВт/ч. Таким образом, количество комплектов

$$\text{Число} = \frac{80\ \text{кВт/ батарея}}{3{,}18\ \text{кВт}} = 25\ \text{батарей}$$

Шесть комплектов по шесть батарей в каждом будут соответствовать требованию, если глубина разряда будет увеличена чуть более до 50%. Альтернативным решением было бы купить 12 комплектов с учетом замены. Таблица 9.3 показывает, что уменьшение глубины разряда с 50% до 25% приводит к чуть более чем удвоенному циклу разряда. Долгосрочные затраты любого варианта будут примерно одинаковыми.

Lazard, финансовая консультационная и управляющая компания, в ноябре 2015 года опубликовала результаты исследования по количественной оценке затрат на хранение и восстановления электроэнергии (Lazard, 2015). Исследование показало большие различия в стоимости в зависимости от технологии хранения и использования, например, системы передачи или фотоэлектрической системы. Для фотоэлектрических систем смета расходов варьировалась от 0,13 долл. США/кВтч до более 1,00 долл. США/кВтч в зависимости от параметров исследования, технологии и допущений. Различия в стоимости за киловатт-час велики для фотоэлектрических систем, но в сравнении стоимость фотоэлектрической системы приближается к стоимости за киловатт-час других технологий хранения; Низкая оценка насосной гидроэлектростанции составила около 0,10 долл. США/кВтч. Результаты исследования Lazard согласуются с другими исследованиями оценок затрат на хранение и поиск электроэнергии. Поскольку стоимость хранения/восстановления за киловатт-час может превышать стоимость киловатт-часа в сети, для фотоэлектрических систем с резервным питанием от аккумуляторной батареи требуется проведение подробного экономического анализа для определения экономической целесообразности.

Использование фотоэлектрической гибридной системы является целесообразным, если автономная система с аккумуляторной батареей снабжена несетевым источником энергии (обычно это генератор, приводимый в движение первичным двигателем). Схема гибридной системы представлена на рис.9.19. Схема гибридной системы аналогична схеме автономной системы с аккумуляторной батареей с добавлением несетевого источника энергии и выпрямителя, который используется для преобразования переменного тока из генератора переменного тока в постоянный для зарядки аккумулятора. Когда фотоэлектрической мощности и/или аккумуляторной батареи недостаточно для удовлетворения нагрузок (переменного и постоянного тока), тогда используется «другой» источник электроэнергии, чтобы компенсировать разницу. Такая система обеспечивает большую гибкость, но для систем, связанных с энергосистемой, тарифы на коммунальные услуги могут ограничивать использование. Если при использовании энергосистемы вводятся большие тарифы или штрафы, стоимость киловатт-часа энергосистемы может быть чрезмерной.

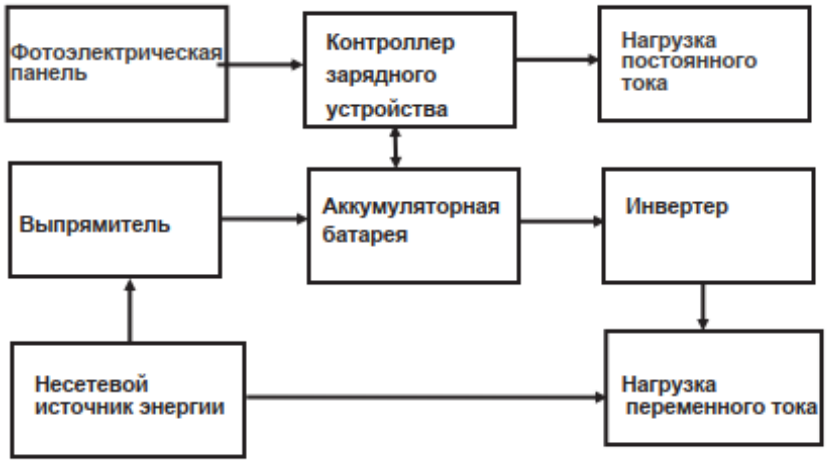


Рис. 9.19 Гибридная фотоэлектрическая система

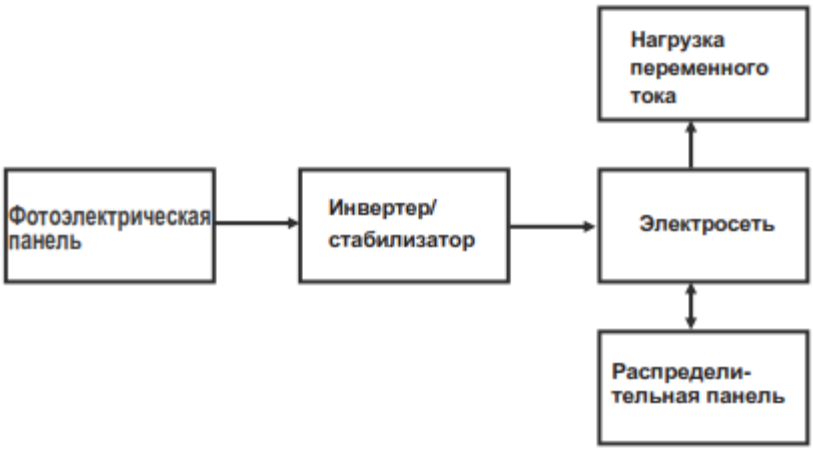


Рис. 9.20 Схематическое изображение фотоэлектрической системы, соединённой с электросетью

Фотоэлектрические системы могут быть использованы для подачи электроэнергии в сеть. Схема фотоэлектрической системы, подключенной к сети, показана на рис.9.20. В любой фотоэлектрической системе, подключенной к сети, мощность солнечных батарей должна быть совместима с напряжением, частотой и фазой сети. Стандарт IEEE 1547 («Соединение распределенных ресурсов с электроэнергетическими системами») устанавливает требования к сетевому подключению фотоэлектрических систем. В 2015 году установленная стоимость номинальной системы 5 кВт, подключенной к сети, составила около 20 000 долларов США, в зависимости от области применения. Могут также применяться федеральные и государственные налоговые льготы, а также скидки на коммунальные услуги. Интернет является хорошим источником информации, также о затратах для широкого спектра солнечных фотоэлектрических систем.

Одной из проблем, связанных с системами, подключенными к сети, является цена за киловатт-час, выплачиваемая коммунальной компанией владельцу системы. Фотоэлектрические системы с высокой установленной мощностью в киловаттах могут принадлежать коммунальным предприятиям, но системы с низкой мощностью в киловаттах для жилых и промышленных зданий, вероятно, будут находиться в частной собственности. Закон об общественной политике в области энергоресурсов (PURPA) 1978 года, определяет федеральные нормативные требования к большинству коммунальных услуг. Из-за структурной сложности Закона об общественной политике в области энергоресурсов на вебсайте Министерства энергетики США (http://energy.gov/oe/services/electricity-policy-coordinationand-implementation/other-regulatory-efforts/public) представлена подробная информация и объяснения многих особенностей Закона. В соответствии с Законом коммунальное предприятие должно приобрести любой киловатт-час, предложенный владельцем фотоэлектрической системы, но коммунальное предприятие обязано оплачивать только свою нормированную стоимость производства 1 кВт-ч. Во многих случаях приведенная стоимость составляет всего 2–3 ¢/кВт ч. Гораздо более выгодным вариантом для продавца является «чистое измерение». При чистом измерении, мощность, потребляемая из сети, приводит к увеличению потребления в киловатт-часах, в то время как мощность, подаваемая в сеть, приводит к уменьшению использования в киловатт-часах. В результате компания платит столько же за купленный киловатт-час, сколько и за проданный киловатт-час, что является преимуществом для владельца фотоэлектрической системы, чем получение выровненной стоимости для покупной цены за киловатт-час. Поскольку фотогальваническое производство считается производством экологически чистой энергии, многие коммунальные предприятия готовы участвовать в чистом учете. Закон об энергетической политике 2005 года требует от коммунальных предприятий чистого учета, а также учета других процедур розничной/оптовой торговли, купли/продажи; тем не менее, коммунальные компании не должны заниматься реализацией чистого учета, только чтобы рассмотреть его. Официальное соглашение с коммунальным предприятием необходимо любому владельцу, который собирается продавать электроэнергию коммунальному предприятию.

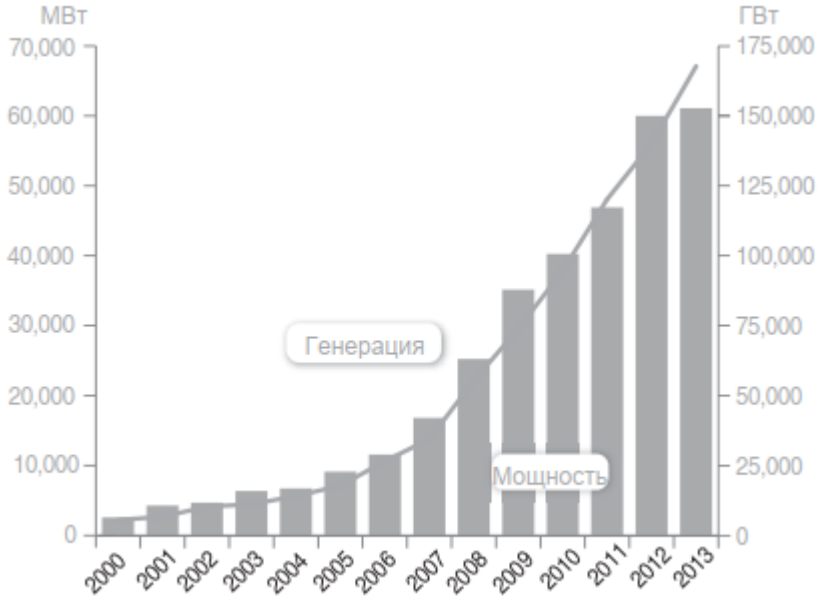


Рис. 9.21 Общая установленная мощность фотоэлектрических систем в США с 2000 до 2013. *Источник*: Истерли и Гельман (2014:54).

9.5 Увеличение мощности фотоэлектрических систем

Фотоэлектрические системы приобретают популярность на фоне обеспокоенности по поводу повышения цен на энергию и экологических проблем (выбросы парниковых газов и изменение климата). В рамках инициативы SunShot Министерства энергетики Национальная лаборатория по изучению возобновляемой энергии осуществляет мониторинг, предоставляет отчеты по фотоэлектрическим системам. Результаты до 2013 года и прогнозы до 2016 года представлены Фельдманом и соавторами. (2014). На рис.9.21 представлена общая установленная пиковая мощность в киловаттах для фотоэлектрических элементов и годовая выработка в гигаватт-часах ($1*10^6$ кВт/ч) фотоэлектрических систем в США с 2000 по 2013 год. Установленная мощность фотоэлектрической системы резко возросла после начала 2000-х. С 1985 по 2000 год (см. Рис. 1.14), скорректированная по порядку цена за киловатт-час электроэнергии в жилых помещениях была снижена, но после 2000 года цена увеличилась, предоставляя больше стимулов для создания фотоэлектрических солнечных батарей. Другой причиной является резкое снижение цены за ватт установленной фотоэлектрической системы. На рис.9.22 показана стоимость установленной системы за ватт фотоэлектрической мощности в зависимости от размера системы (<10 кВт, 10–100 кВт и >100 кВт) с 1998 по 2013 год.

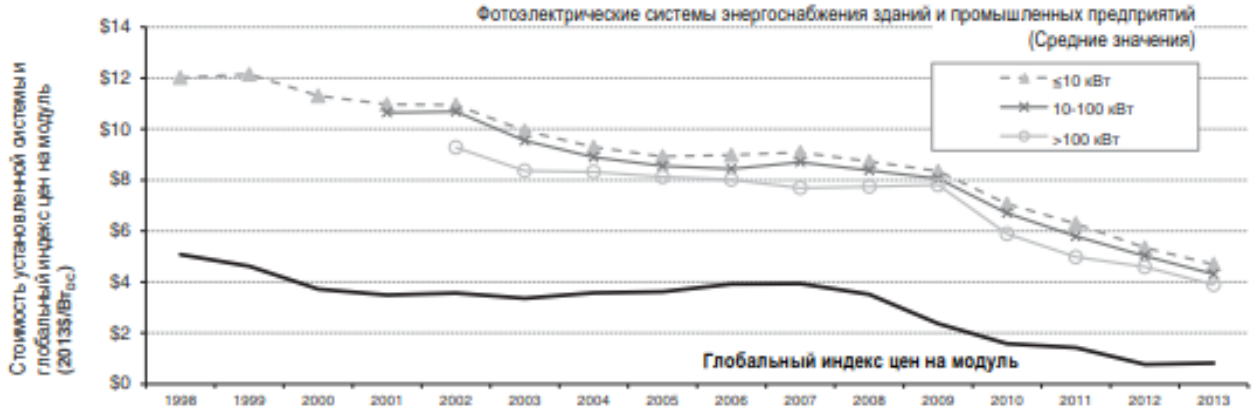


Рис. 9.22 Установленные цены за ватт фотоэлектрических систем США и глобальный индекс цен на модуль. *Источник*: Фельдман и соавт. (2014:8).

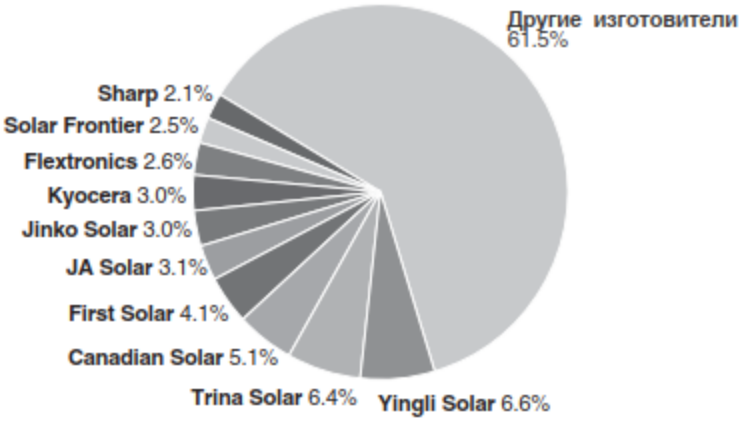


Рис. 9.23 Процентное соотношение фотоэлектрических модулей по состоянию на 2013 год по данным изготовителей. *Источник:* Эстерли и Гельман (2014:66)

На рисунке также показана средняя цена продажи модуля за ватт, глобальный индекс цен на модуль. С 2001 года стоимость за ватт монотонно снижалась (за исключением 2007 года), но с 2009 года снижение стоимости стало более выраженным. В целом, снижение было довольно значительным с 2002 по 2013 год: около 50%! Это снижение стоимости сделало фотоэлектрические системы более привлекательными с экономической точки зрения. Глобальный индекс цен на модули упал с примерно 4 долл. США/Вт в 2007 году до примерно 1 долл. США/Вт в 2013 году – снижение на 75%! Интересным фактом является то, что в то время как установленная цена на бытовые фотоэлектрические системы в США в 2013 году составляла 3,29 долл. США/Вт, в Германии - 2,05 долл. США/Вт. Расходы на проекты коммунального масштаба (>100 кВт) являются более сложными, в зависимости от расположения (фиксированный наклон, отслеживание, концентрирование), а также от типа фотоэлектрического элемента (из тонкой пленки, кристаллический), но с 2007 года стоимость установки снизилась примерно на 50% - см. стр. 14 Фельдман и соавт. (2014).

На рис.9.23, взятом из *Справочника по возобновляемым источникам энергии* за 2013 год (Истерли и Гельман, 2014), приведена разбивка по компаниям по всему миру, которые занимаются производством фотоэлектрических элементов. Рис. представляет собой полную противоположность рисунку 4.30, на котором показан процент производства по производителям ветрогенераторов в США. Принимая во внимание то, что, по крайней мере в США, более 70% ветрогенераторов поставляются компаниями GE, Siemens и Vestas, ни на одну отдельную компанию в мире, производящую фотоэлектрические модули, не приходится более 7% рынка. Более 60% мирового рынка обеспечивается компаниями с долей рынка менее 2% каждая. Суть заключается в том, что сектор ветроэнергетики претерпел значительные изменения, в то время как сектор фотоэлектрической промышленности подвергся незначительным изменениям. В последние годы компания BPSolar перестала заниматься производством фотоэлектрических элементов, чтобы сосредоточиться на других секторах. Далее приведены два дополнительных интересных примечания от Истерли и Гельмана (2014): (1) в 2013 году на Китай пришлось 25 610 МВт, то есть 64% мощности во всем в мире и (2) 65% фотоэлектрических элементов, производимых в мире, являются многопереходными элементами из кремния.

9.6 Заключение

Несмотря на то, что спрос на солнечные фотоэлектрические системы в США не превысил спрос на ветрогенераторы, снижение стоимости солнечных фотоэлектрических систем, по всей видимости, повлияет на повышение спроса на данные системы. Как показано на рис. 9.22, в последние несколько лет затраты на бытовые, коммерческие и коммунальные фотоэлектрические системы значительно сократились. Это снижение стоимости сделало солнечную фотоэлектрическую продукцию более привлекательной с экономической точки зрения, поэтому ожидается дополнительный рост производства.

Ассоциация производителей солнечной энергии (www.seia.org) представляет в алфавитном порядке список производителей элементов, связанных с солнечной энергией, в том числе фотоэлектрических элементов.

Литература

Dobos, A.P. (2014) PVWatts Version 5 Manual. Technical Report NREL/TP-6A20-62641. http:// www.nrel.gov/docs/fy14osti/62641.pdf (accessed October 20, 2016).

Duffie, J.A., and Beckman, W.A. (2006) Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edn. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Esterly, S. and Gelman, R. (2014) 2013 Renewable Energy Data Book, Haas, K. (ed.). DOE/GO-102014-4491. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62580.pdf (accessed October 20, 2016).

Feldman, D., Barbose, G., Margolis, R., et al. (2014) Photovoltaic System Pricing Trends: Historical,Recent, and Near-Term Projections, 2014 Edition. NREL/PR-6A20-62558. http://www.nrel.gov/ docs/fy14osti/62558.pdf (accessed October 20, 2016)

Goswami, Y., Kreith, F., and Kreider, J.F. (2000) Principles of Solar Engineering, 2nd edn. Taylor and Francis, New York.

Kreith, F., and West, R.E. (1997) CRC Handbook of Energy Efficiency. CRC Press, Boca Raton, FL. Lazard (2015) Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis-Version 1. November. https://www.lazard.com/media/2391/lazards-levelized-cost-of-storage-analysis-10.pdf (accessed October 20, 2016).

Marion, W. and Wilcox, S. (1994) Solar Radiation Data Manual for Flat-Plate and Concentrating Collectors. NREL, Golden, CO.

Patel, M.R. (2005) Wind and Solar Power Systems, 2nd edn. Taylor & Francis, New York.

10 Топливные элементы

10.1 Введение

Обычная система сгорания топлива основана на взаимодействии топлива (обычно углеводорода) с окислителем (обычно кислородом в воздухе) для выделения химической энергии топлива в виде тепла. В топливном элементе химическая энергия топлива преобразуется непосредственно в полезную работу, электричество, не проходя процесс сгорания. Как для систем сгорания, так и для топливных элементов используется следующее химическое уравнение, описывающее реакцию

$$\text{Топливо} + \text{Окислитель} \rightarrow \text{Продукты} + \text{Химическая энергия} \qquad (10.1)$$

Если термодинамические состояния топлива, окислителя и продуктов совпадают в обоих случаях, тогда тепло, выделяемое в процессе сгорания и полезная работа электрохимической реакции топливного элемента, должны быть равны.

Топливный элемент не является тепловым двигателем, поэтому ограничение эффективности по циклу Карно не применяется. Одна из причин, по которой топливные элементы представляют интерес, заключается в том, что их эффективность выше, чем эффективность тепловых двигателей.

10.2 Топливные элементы: Основные принципы

Принцип работы топливных элементов схож с принципом работы аккумуляторных батарей в том, что они производят постоянный ток в ходе электрохимического процесса, при этом прямое сжигание источника топлива не осуществляется. Однако аккумуляторная батарея может выдавать энергию только от накопленной энергии (конечное количество), а топливный элемент может работать при наличии надлежащих источников топлива и окислителя. Топливный элемент состоит из анода, электролита и катода. В работе Вестона (1992) приводится описание компонентов топливных элементов и термодинамики. На рис. 10.1 представлена схема водородно-кислородного топливного элемента под нагрузкой. На аноде в ходе каталитической реакции топливо «расщепляется» на ионы и электроны, и ионы движутся от анода через электролит к катоду.

Электроны проходят через внешнюю цепь к нагрузке. На аноде при диссоциации водорода (H_2) образуется два иона водорода ($2H^+$) и два электрона ($2e^-$). Ионы водорода проходят через электролит к катоду, где они соединяются с кислородом и двумя электронами, которые прошли нагрузку для формирования воды.

Топливо и электролит определяют реакции на аноде и катоде, а также напряжение, создаваемое одной парой анод-катод. Катализаторы обычно необходимы на аноде и катоде для увеличения скорости реакции до приемлемых уровней. Катализаторы, необходимые для некоторых типов топливных элементов, представляют собой драгоценные металлы, которые увеличивают стоимость киловатта для топливного элемента. В разделе 10.3 рассматриваются реакции, вызываемые различными электролитами. Несмотря на наличие ряда топлива, окислителей и электролитов, водородно-кислородный топливный элемент является наиболее распространенным.

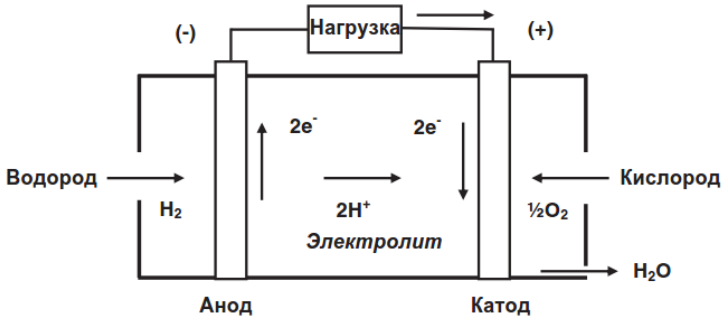


Рис. 10.1 Схема водородно-кислородного топливного элемента

Отдельные топливные элементы вырабатывают от 0,5 до 0,9 В постоянного тока. Топливные элементы объединяются в «блоки» (батареи) для получения полезного напряжения и выходной мощности. Для последовательного и параллельного соединения топливных элементов применяются те же правила, что и для последовательного и параллельного соединения фотоэлектрических элементов (см. Главу 9). Батарея топливных элементов показана на рис. 10.2.

Повторяющиеся блоки, из которых состоит батарея топливных элементов, представляют собой отдельные топливные элементы, содержащие анод, электролит, катод, канал подачи топлива и канал подачи окислителя. Батарея состоит из повторяющихся последовательно соединенных блоков, при этом напряжения блоков складываются друг с другом, в то время как сила тока определяется через площадь поперечного сечения.

Система генерирования электрической энергии на базе топливных элементов состоит из трех основных компонентов: реформера топлива (процессор), который генерирует обогащенный водородом газ из топлива, силового блока, в котором происходит электрохимический процесс, и стабилизатора напряжения (инвертора), который преобразует постоянный ток, генерируемый топливным элементом в переменный ток. Если топливный элемент подключен к сети, то стабилизатор напряжения должен синхронизировать электрический выходной сигнал с сетью в соответствии со стандартом IEEE 1547. Упрощенная схема стандартной системы топливных элементов показана на рис. 10.3.

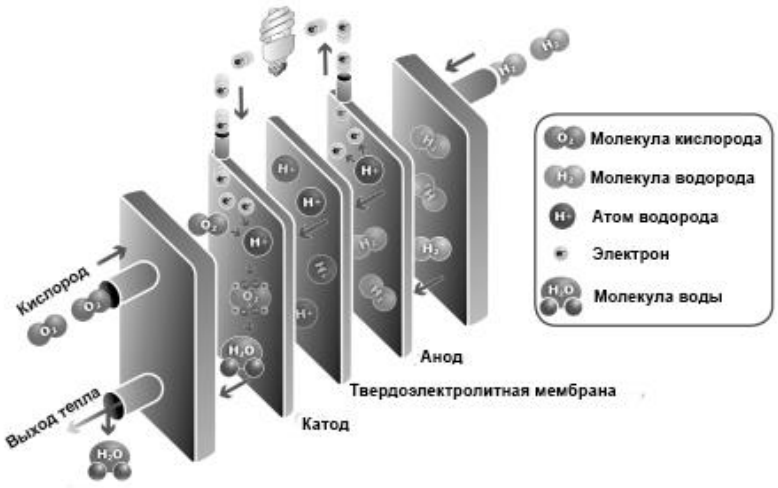


Рис. 10.2 Аккумулятор топливного элемента.
Источник: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/fct_h2_fuelcell_ factsheet.pdf.

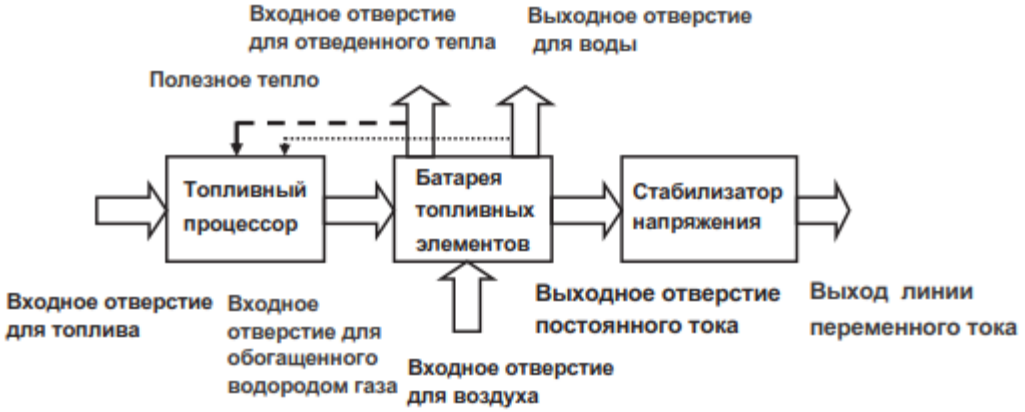


Рис. 10.3 Схема топливного элемента

Природный газ, основную часть которого составляет метан, легко доступен и является одним из самых чистых видов топлива (помимо водорода) для питания топливных элементов. Многие исследования сосредоточены на изучении топливных элементов, работающих на природном газе, однако, топливные элементы способны работать на пропане, дизельном топливе, мазуте и других

видах топлива, а также на биотопливе.

Паровая конверсия метана осуществляется с последующей реакцией перемещения. При паровой конверсии топлива происходит концентрирование и очистка водорода от загрязнений, которые в противном случае могли способствовать отравлению катализатора в ячейке. Химическая реакция паровой конверсии представлена уравнением

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO+3H_2 \quad (10.2)$$

Реакция паровой конверсии является эндотермической реакцией, где ΔH = 206 кДж/моль. Смесь оксида углерода (CO) может быть использована для производства большего количества водорода путем конверсии водяного газа:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (10.3)$$

Реакция конверсии водяного газа является экзотермической реакцией, где ΔH = -41 кДж/моль.

Взятые вместе два процесса приводят к

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (10.4)$$

Таким образом, на выходе из топливного процессора образуются углекислый газ и водород. Для получения дополнительной информации можно обратиться к работам Хугерса (2002), в которых содержится глава с описанием методов и процедур проведения конверсии, а также сравнений различных реакций.

10.3 Основы термодинамики топливных элементов

Подробное описание процессов в термодинамике топливных элементов приведено в литературе, использованной для написания этого пособия, например, в работах Эпплби и Фоулкса (1989), Киносита и соавт. (1988) и Ли (2006). Энергия, выделяемая при химической реакции, равна изменению энтальпии образования ΔH. ΔH – разница суммы энтальпий образования для продуктов и суммы энтальпий образования реагентов:

$$\Delta H = \sum \Delta H_{\text{продукты}} - \sum \Delta H_{\text{реагенты}} \quad (10.5)$$

Значение ΔH отрицательно для экзотермической реакции и положительно для эндотермической реакции. Если вся энергия в химической реакции была преобразована в электрическую энергию, то

$$W_e = \Delta H \quad (10.6)$$

где W_e – выработка электроэнергии с расчетом на моль топлива. Однако часть химической энергии преобразуется во внутреннюю тепловую энергию. Минимальное количество внутренней тепловой энергии, если бы процесс теплопередачи был обратимым, было бы равно

$$Qte = \int T\mathrm{d}s \quad (10.7)$$

Топливный элемент по существу является изотермическим устройством и

$$Qte = \int T\,\mathrm{d}s = T\int \mathrm{d}s = T\Delta S \quad (10.8)$$

Максимальное количество электрической энергии, производимой изотермическим топливным элементом равно

$$W_e \leq \Delta H - T\Delta S \tag{10.9}$$

где знак равенства предназначен для обратимой реакции, а знак меньше – для топливного элемента с необратимостью процесса. Свободная энергия Гиббса определяется как

$$G = H - TS \tag{10.10}$$

Данное выражение для изотермического процесса может быть преобразовано

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \tag{10.11}$$

Следовательно, для топливного элемента

$$W_e \leq \Delta G \tag{10.12}$$

Поскольку ΔH и ΔG обычно выражаются из расчета на моль, то приведенные выше уравнения приведены с расчетом на моль, а W_e – электрическая энергия моля электронов, проходящих через цепь. Килограмм на моль электронов содержит $6{,}022\times10^{26}$ электронов, каждый с зарядом $1{,}602*10^{19}$ С. Таким образом, заряд, содержащийся в килограмме на моль электронов, составляет $9{,}65*10^{7}$ С/кг/моль электронов, при постоянной Фарадея *F*с.

Для заданной реакции ΔG становится

$$\Delta G = \sum \Delta G_{\text{продукты}} - \sum \Delta G_{\text{реагенты}} \tag{10.13}$$

Общее термодинамическое соотношение из первого закона можно выразить как

$$V\mathrm{d}p = \mathrm{d}H - T\mathrm{d}s \tag{10.14}$$

Таким образом

$$\mathrm{d}G = V\mathrm{d}p \tag{10.15}$$

Тепловое уравнение состояния, в расчете на моль равно

$$V = \frac{RgT}{p} \tag{10.16}$$

где R_g – универсальная газовая постоянная, 8,314 кДж/(кг/моль К) или 1 545 футов фунт-сила-фут/(фунт-моль °R). Объединяя уравнения 10.15 между стандартным состоянием, обозначенным верхним индексом «о» при давлении 1 атм., и общим состоянием при р выходах (10.17)

$$\int_{G^\circ}^{G} \mathrm{d}G = R_g T \int_{p^\circ}^{p} \frac{\mathrm{d}p}{p} = G - G^\circ = R_g T \ln\left(\frac{p}{p^\circ}\right) \tag{10.17}$$

Если давление выражено в атмосферах, тогда р° = 1 атм. и

$$G = G^\circ + RgT\ln p \tag{10.18}$$

Общая химическая реакция для топливного элемента может быть записана как

$$a\mathrm{A} + b\mathrm{B} \rightarrow c\mathrm{C} + d\mathrm{D} \tag{10.19}$$

Если реагенты и продукты являются идеальными газами с парциальными давлениями p_A, p_B, p_C и

p_D, то применение уравнения 10.19 к уравнению 10.18 дает

$$\Delta G = \Delta G^\circ + R_g T \ln\left(\frac{p_A^a \, p_B^b}{p_C^c \, p_D^d}\right) \tag{10.20}$$

Если в результате реакции выделяется n молей электронов, а внутреннее напряжение элемента равно E_c, то для топливного элемента с обратимыми реакциями электроэнергия становится

$$W_e = nFcEc \approx \Delta G \tag{10.21}$$

Так как $E_c = \Delta G/nFc$, уравнение 10.20 для реакции уравнения 10.19 принимает форму (с «перевернутым» логарифмическим членом),

$$E_g = E_g^\circ - \frac{R_g T}{nF_c} \ln\left(\frac{p_C^c \, p_D^d}{p_A^a \, p_B^b}\right) \tag{10.22}$$

которая является версией (для идеальных газов) уравнения Нернста. Уравнение Нернста обеспечивает обратимый потенциал разомкнутой цепи через топливный элемент и является одним из фундаментальных выражений в термодинамике топливного элемента.

Максимальная эффективность конверсии определяется как

$$\eta_{макс} = \frac{W_e}{\Delta H^\circ} = \frac{\Delta G}{\Delta H^\circ} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H^\circ} \tag{10.23}$$

ΔH° и ΔG° должны быть известны для применения приведенных выше уравнений. Термодинамические параметры доступны из ряда источников, включая большое разнообразие программ в учебниках по термодинамике и горению. Для определения параметров часто используются таблицы стандартного образца Объединённого отдела армии ВМС и ВВС США по определению физических свойств материалов (JANAF), а на сайте Национального института стандартов и технологии (NIST) (http://kinetics.nist.gov/janaf/ содержится широкий набор термодинамических параметров. Необходимо проявлять осторожность и проверять, совместимы ли параметры, взятые из разных источников, с единицами измерения. Например, результаты выражены в грамм/моль или килограмм/моль, в джоулях или килоджоулях. Может понадобиться список энтальпий реакции при 25°C и давлении 1 атм. для ряда возможных реагентов и продуктов топливных элементов, который можно найти в работах Калпа (1991).

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2e^- + 2H^+ + O \rightarrow H_2O \tag{10.24}$$

Значения ΔH° и ΔG° при давлении 1 атм. и выбранные температуры представлены в таблице 10.1, которая была создана на основе материалов из работ Ангриста (1982).

Пример 10.1

Определите напряжение на выходе и теоретический коэффициент преобразования кислородно-водородного топливного элемента, работающего при 298 К. Кислород подается из воздуха при 1 атм., а все другие продукты и реагенты – при 1 атм.

Таблица 10.1 *ΔH° и ΔG°* для H_2O при 1 атм. и выбранных температурах.

T (K)	$\Delta H°$ (кДж/кг-моль)	$\Delta G°$ (кДж/кг-моль)
298	-2.42×10^5	-2.29×10^5
400	-2.43×10^5	-2.24×10^5
500	-2.44×10^5	-2.19×10^5
1000	-2.48×10^5	-1.93×10^5
2000	-2.52×10^5	-1.35×10^5

Решение: при 1 атм., $E_g^0 = \Delta G°/nF_c$. Для реакции из уравнения 10.24, производится 2 кг-мол-электронов, таким образом n = 2 кг-моль-электронов/кг-моль. Из таблицы 10.1, $\Delta G°$=-229 000 кДж= кг-моль. Используя постоянную Фарадея, можно рассчитать E_g^0:

$$E_g^0 = = \frac{\Delta \mathring{G}}{nFc} = 229\,000\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг−моль}} * \frac{\text{кДж/моль}}{2\ \text{кг−моль*электр}} * \frac{\text{кг−моль*электрон}}{9{,}65*10^7\ \text{С}} = 1{,}187\ \text{В}$$

Если для подачи кислорода используется воздух с давлением 1 атм., парциальное давление кислорода составляет 0,21 атм., поскольку кислород составляет 20,95% от объема воздуха.
Тогда обратимое напряжение разомкнутой цепи становится

$$E_g = E_g^\circ - \frac{R_g T}{nF_c} \ln\left(\frac{p_C^c p_D^d}{p_A^a p_B^b}\right) = E_g^\circ - \frac{R_g T}{nF_c} \ln\left(\frac{p^1_{H_2O}}{p^1_{H_2} p^{1/2}_{O_2}}\right)$$

$$= 1{,}187\ \text{В} - 8{,}314\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг−моль}} * 298\text{К} * \frac{\text{кг−моль}}{2\ \text{кг−моль*электрон}} * \frac{\text{кг−моль*электрон}}{9{,}65*10^7\text{С}} * \ln\frac{1^1}{1^1*0{,}21^{1/2}} = 1{,}177\ \text{В}$$

Эффективность определяется как ηмакс = $\Delta G/\Delta H°$, при этом ΔG определяется из уравнения 10.20. ΔG для водородно-кислородного топливного элемента при 298 К

$$\Delta G = \Delta G° + R_g T \ln\left(\frac{p^1_{H_2} p^1_{O_2}}{p^{1/2}_{H_2O}}\right) = 229\,000\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг−моль}} + 8{,}314\ \frac{\text{кДж}}{\text{кг−моль*К}} * 298\text{К} * \ln\frac{1^1*0{,}21^{1/2}}{1^1} = 227\ 100\ \frac{\text{кДж}}{\text{к г−моль}}$$

Эффективность может рассчитываться как

$$\eta_{макс} = \frac{\Delta G}{\Delta H°} = \frac{\Delta G}{LHV} = \frac{227\ 100\text{кДж/кг−моль}}{242\ 000\text{кДж/кг−моль}} = 0{,}938$$

Эффективность в этом выражении основана на том, что продукт представляет собой водяной пар, при этом ΔH ° – это более низкая теплотворная способность, НТС. Если эффективность основана на том, что продукт представляет собой жидкую воду, то требуется более высокая теплотворная способность, ВТС. Отношения между ними

$$HHV = LHV + \Delta H_{fg} = 242\,000\ \text{кДж/кг-моль} + 44\,010\ \text{кДж/кг-моль}$$

где ΔH_{fg} – теплота испарения на килограмм-моль воды. Эффективность, основанная на ВТС равна

$$\eta = \frac{\Delta G}{\Delta H°} = \frac{\Delta G}{LHV} = \frac{227\ 100\text{кДж/кг−моль}}{286\ 010\text{кДж/кг−моль}} = 0{,}794$$

Несмотря на то, что энергия, необходимая для конверсии топлива, не учитывается при расчетах эффективности, на примере данной проблемы мы видим, почему топливные элементы вызывают такой большой интерес. Эффективность преобразования топливных элементов значительно выше, чем эффективность преобразования теплового двигателя, поскольку топливный элемент является

изотермическим устройством, не ограниченным циклом Карно.

Пример 10.2
Определите влияние рабочей температуры элемента на топливный элемент из примера 10.1. Вычислите и обсудите соответствующие результаты.

Решение: необходимо вычислить влияние рабочей температуры элемента на выходное напряжение и КПД при НТС и ВТС. В примере 10.1 представлены расчеты для рабочей температуры 298 К. В этом примере будет использована та же процедура, за исключением того, что рабочие температуры будут варьироваться. Результаты расчетов представлены в таблице 10.2.

Выходное напряжение топливного элемента и КПД при НТС и ВТС представлены как температурная функция на рис. 10.4.

Хотя мы имеем дело с простой термодинамической моделью, таблица 10.2 и рис. 10.4 отражают большую часть характеристик «реального» топливного элемента. Когда рабочая температура элемента увеличивается, напряжение элемента уменьшается, и КПД (при НТС и ВТС) также уменьшаются наряду с рабочей температурой элемента. В самом деле, влияние рабочей температуры элемента на производительность элемента достаточно выражено.

Анализ, представленный в этом разделе, определяет характерные особенности и ограничения производительности топливного элемента. Работа топливного элемента охарактеризована транспортными ограничениями и ограничениями химической кинетики. В своих трудах Рамани (2006) и Брауэр (2001) определили следующие 13 областей, связанных с потерями в топливных элементах:
1) транспорт реагента к границе раздела газ-электролит;
2) растворение реагента в электролите;
3) транспорт реагента через электролит на поверхность электрода;
4) предэлектрохимические химические реакции;
5) поглощение частиц на электроде;
6) поверхностная миграция поглощенных видов;
7) электрохимическая реакция с участием электрически заряженных частиц;
8) реакции после электрохимических реакций;
9) десорбция продуктов;
10) пост-электрохимическая поверхностная миграция;
11) транспорт продукта от электрода;
12) выделение продуктов из электролита;
13) транспорт газообразных продуктов из электролита.

Таблица 10.2 Сводная таблица результатов из примера 10.2.

T (K)	**ΔH° (кДж/кг-моль)**	**ΔG° (кДж/кг-моль)**	$E^{\circ}g$ **(V)**	E_g **(V)**	**ΔG (кДж/кг-моль)**	$\eta_{\text{нтс}}$	$\eta_{\text{втс}}$
298	$2{,}42 \times 10^5$	$2{,}29 \times 10^5$	1,187	1,177	$2{,}271 \times 10^5$	0,938	0,794
400	$2{,}43 \times 10^5$	$2{,}24 \times 10^5$	1,161	1,147	$2{,}214 \times 10^5$	0,911	0,771
500	$2{,}44 \times 10^5$	$2{,}19 \times 10^5$	1,135	1,118	$2{,}158 \times 10^5$	0,884	0,749
1000	$2{,}46 \times 10^5$	$1{,}93 \times 10^5$	1000	0,966	$1{,}865 \times 10^5$	0,758	0,643
2000	$2{,}52 \times 10^5$	$1{,}35 \times 10^5$	0,669	0,632	$1{,}220 \times 10^5$	0,484	0,412

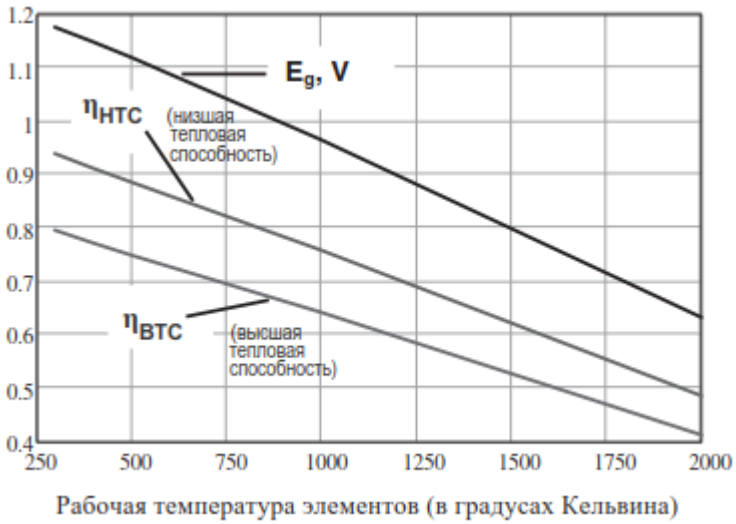


Рис. 10.4 Зависимость напряжения и эффективности элемента от температуры.

Эти потери обычно группируются в три основные категории:
1) активационные (активация поляризации);
2) омические (омическая поляризация);
3) потери, связанные с концентрационной поляризацией.

Потери необратимы и приводят к уменьшению напряжения элемента от идеального значения. Перенапряжение активации является результатом химической кинетики – медленных химических реакций. Омические потери обусловлены сопротивлением потоку электричества в элементе. Потери, связанные с концентрационной поляризацией, обусловлены более низкими концентрациями реагентов на поверхности электрода, чем в объемном потоке.

На рис. 10.5 показаны эффекты и области доминирования каждой из трех основных категорий потерь в зависимости от плотности тока. Указано теоретическое напряжение и показаны различные режимы плотности тока, для которых доминирует каждый из эффектов. Для полной потери необходимо три значения сложить вместе. Как правило, полные потери, которые могут возникнуть из-за активационной поляризации, омической поляризации и концентрационной поляризации, важны и не могут быть проигнорированы. В использованной для написания этой работы литературе, например, в трудах Брауэра (2001), Лармини и Дикса (2003), Ли (2006), Рамани (2006) и Хугерса (2002), подробно рассмотрена каждая из категорий потерь.

Во многих тепловых устройствах при экономии масштаба требуются системы с большей емкостью для достижения почти максимальной эффективности. Экономии масштаба не играют значительную роль для топливных элементов; действительно, увеличение их размера приводит к увеличению потерь, связанных с концентрационной поляризацией. Следовательно, топливные элементы могут оставаться относительно небольшими по размеру. Большие требования к мощности для установок топливных элементов будут удовлетворены путем сборки ряда топливных элементов.

Теоретическая электродвижущая сила или идеальное напряжение

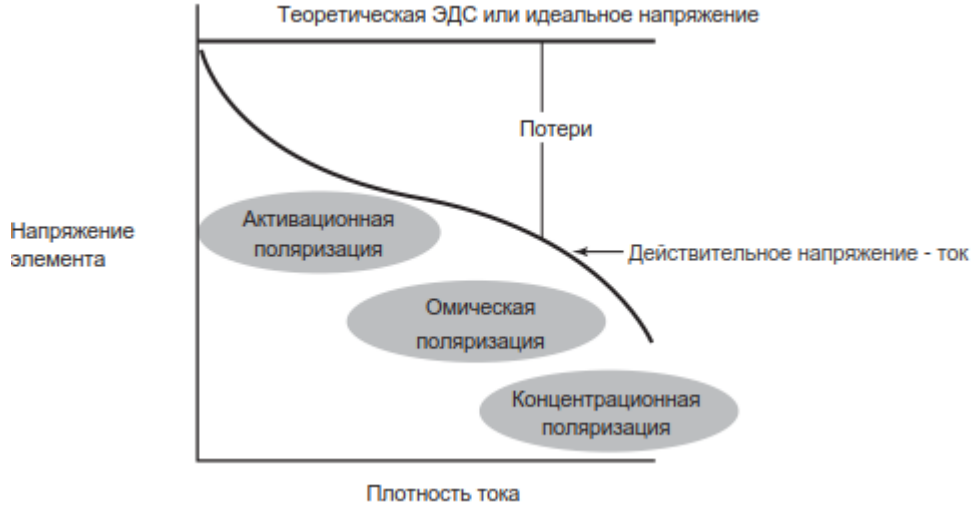


Рис. 10.5 Потери топливных элементов в зависимости от плотности тока.

В этом разделе представлены основы термодинамики топливных элементов и кратко рассмотрены источники потерь в топливных элементах. Примеры даны для типичного водородно-кислородного топливного элемента. В действительности, рабочие характеристики топливного элемента и электрохимические характеристики зависят от окислителя, топлива и электролита. Наиболее распространенные типы топливных элементов рассмотрены далее.

10.4 Виды топливных элементов

Параметры большинства топливных элементов совпадают со схематическим изображением, показанным на рис. 10.1, но отличаются в зависимости от используемого электролита. Ниже перечислены пять основных типов топливных элементов, которые отличаются используемыми электролитами:
1) щелочной топливный элемент (ЩТЭ);
2) фосфорно-кислотный топливный элемент (ФКТЭ);
3) топливный элемент с расплавленным карбонатным электролитом (ТЭРКЭ);
4) твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ);
5) топливный элемент с протонообменной мембраной (ТЭПМ), в котором метанол напрямую используется в топливном элементе (ТЭПОМ).

Каждый тип будет рассмотрен по очереди.

ЩТЭ были первым типом, который был усовершенствован и широко используется в программа космических исследований для производства воды и электричества на космических кораблях. Электролит представляет собой гидроксид калия в воде. Катализатор на аноде и катоде представляет собой недрагоценные металлы, что является преимуществом. Рабочие температуры могут варьироваться от 23 до 250°C (от 74 до 482°F), причем около 70°C являются наиболее распространенными, а эффективность достигает 60%. Но недостатком является то, что для ЩТЭ требуется чистый водород, который сложно и дорого производить. ЩТЭ легко отравляются CO_2, так как даже небольшое количество может повлиять на работу элемента, требуя очистки потоков водорода и кислорода. ЩТЭ не рассматриваются в качестве основного типа элементов, хотя часто встречаются упоминания о широком использовании в программе космических исследований, наряду с коммерческими приложениями.

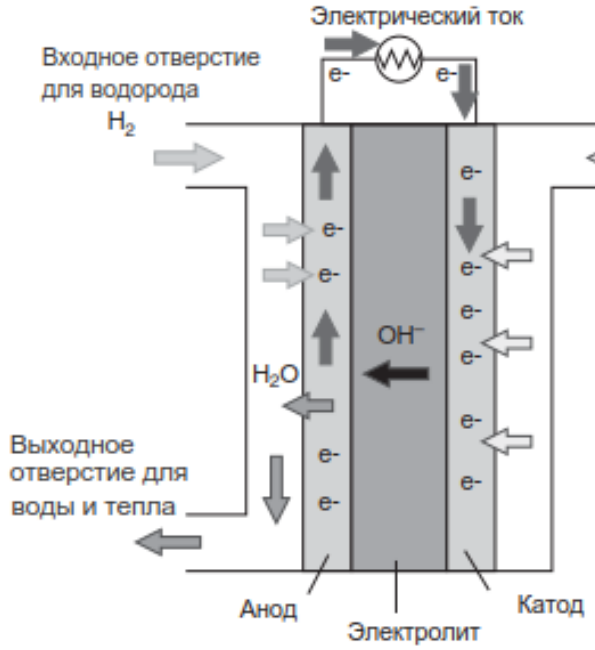


Рис. 10.6 Электрохимические реакции в щелочном топливном элементе. *Источник*: EERE

Электрохимические реакции ТЩЭ представлены на рис. 10.6. На катоде вода, электроны и кислород объединяются, образуя гидроксильный ион (OH). На аноде водород и гидроксильный ион объединяются с образованием воды с выделением электронов (e^-). Ионы гидроксила проходят через электролит к аноду, а электроны проходят по внешней цепи к катоду. Проходят следующие реакции:

$$\text{Реакция на аноде:} \quad 2H_2+4OH^-\rightarrow 4H_2O+4e^-$$
$$\text{Реакция на катоде:} \quad O_2+2H_2O+4e^-\rightarrow 4OH^- \qquad (10.25)$$

ФКТЭ используют жидкую фосфорную кислоту в качестве электролита и, как правило, считаются технологиями топливных элементов первого поколения. Для ФКТЭ используется платина в качестве катализатора и пористые углеродные электроды как для катода, так и для анода. Дорогой катализатор является частью стоимости ФКТЭ, от 4000 до 4500 долларов за установленный киловатт. Эти топливные элементы работают при температуре около 200°C (400 °F) и достигают 37–42% КПД топлива-электричества, лишь немного выше, чем у электростанций с простым циклом сгорания. Таким образом, для данной выходной мощности ФКТЭ больше (больше объема) и тяжелее, чем некоторые другие типы топливных элементов. Тем не менее, технология используется долгое время, и ФКТЭ обладают впечатляющей историей эксплуатации.

Электрохимические реакции ФКТЭ представлены на рис. 10.7. На аноде водород расщепляется на два иона водорода (H^+) и два электрона (e.). Ионы водорода проходят через электролит к катоду, а электроны проходят по внешней цепи к катоду. На катоде ионы водорода, электроны и кислород объединяются, образуя воду. Проходят следующие реакции:

$$\text{Реакция на аноде: } H_2\rightarrow 2h^- +2e^-$$
$$\text{Реакция на катоде: } 1/2\ O_2+ 2H^+ + 2e^-\rightarrow H_2O \qquad (10.26)$$

ТЭРКЭ имеют потенциал достигать 50-60% КПД использования топлива и электроэнергии и могут работать на водороде, окиси углерода, природном газе, пропане, свалочном газе, судовом дизеле и продуктах газификации угля. Высокие рабочие температуры 650°C (1200°F) способствуют эксплуатации ТЭРКЭ напрямую (без применения реформера) на газообразном углеводородном топливе, например, природном газе, тем самым значительно увеличивая кинетику реакций. Таким образом исключается необходимость в использовании дорогостоящих катализаторов из драгоценных металлов. В ТЭРКЭ в качестве электролитов употребляются смеси расплавленных карбонатных солей. Используемые электролиты содержат карбонаты лития, калия и натрия. Значительными

преимуществами ТЭРКЭ являются высокая производительность и способность работать на различных видах топлива. Однако, высокие рабочие температуры и едкий вещества усиливают разрушение компонентов и сокращают срок службы элемента.

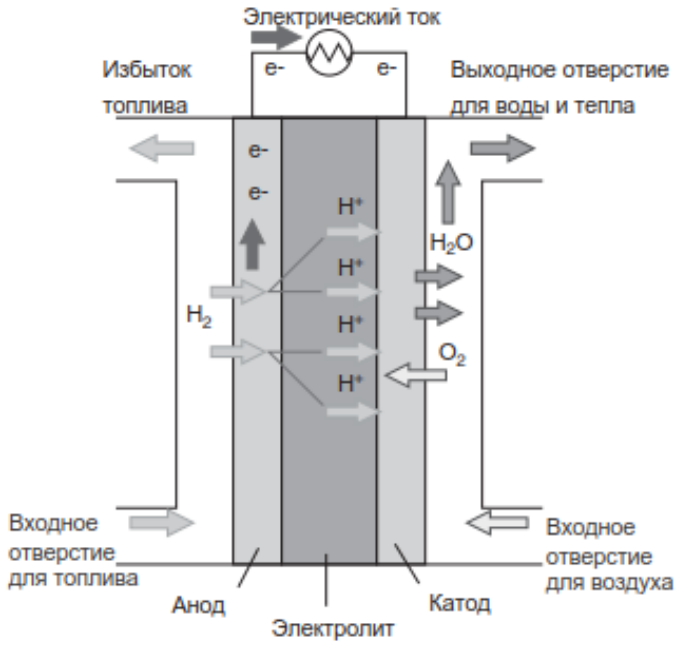


Рис. 10.7 Фосфорно-кислотный топливный элемент. *Источник*: EERE.

Электрохимические реакции топливного элемента с расплавленным карбонатом представлены на рис. 10.8. Реакции являются следующими:

Реакция на аноде:

$$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^- \qquad (10.27)$$

$$CO + CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2e$$

Реакция на катоде:

$$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$$

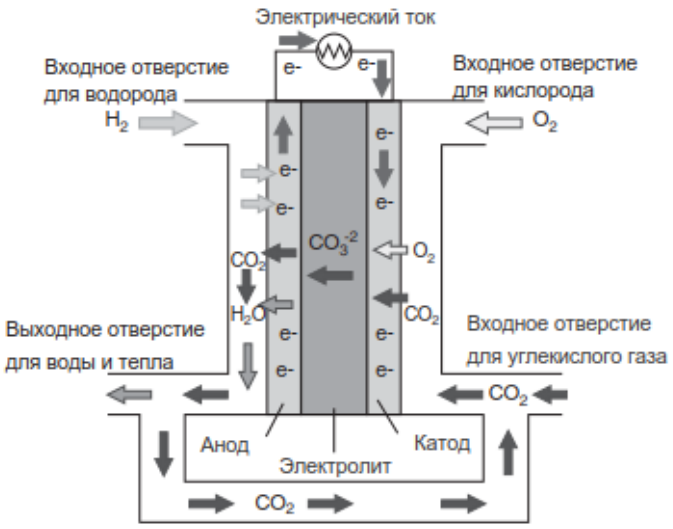


Рис. 10.8 Топливный элемент с расплавленным карбонатным электролитом. Источник: EERE.

Электрохимическая реакция происходит на аноде между ионами водорода и CO^{2-}_3 из электролита. Эта реакция производит воду и углекислый газ (CO_2) и выпускает электроны на анод. На катоде кислород и CO_2 объединяются с электронами с анода для получения ионов углерода, которые попадают в электролит. Дополнительной сложностью для ТЭРТЭ является требование впрыскивать CO_2 на катод, так как ионы углерода расходуются в анодной реакции. ТЭРТЭ используются для большой стационарной выработки электроэнергии. При мегаваттных мощностях топливных элементов почти всегда используются ТЭРТЭ, как установки ТЭЦ (обсуждение таких систем см. в главе 11).

ТОТЭ работают при температурах 800-1000°C (1400-1800°F), что позволяет работать в комбинированном цикле. Как и в случае других высокотемпературных типов топливных элементов, топливный процессор не требуется, а используемые катализаторы – это недрагоценные металлы. Как и ТЭРТЭ, при работе ТОТЭ можно использовать высокие рабочие температуры. ТОТЭ имеют КПД преобразования топлива в электроэнергию более 60%. Вместо жидкого электролита в твердой оксидной системе обычно используется твердокерамический материал, такой как оксид циркония-иттрия. Прочная керамическая конструкция обеспечивает стабильную и надежную конструкцию, допускает высокие температуры и обеспечивает гибкость в выборе топлива. ТОТЭ особенно устойчив к соединениям серы и окиси углерода. В отличие от других типов топливных элементов, ТОТЭ могут использовать в качестве топлива монооксид углерода, а также водород, и они идеально подходят для топлива, выделяемого при газификации угля. ТОТЭ используются в больших и малых стационарных энергосистемах. ТОТЭ с выходами в ваттном диапазоне разработаны для небольших портативных зарядных устройств. Высокие рабочие температуры приводят к медленному запуску и проблемам с долговечностью материала. Электрохимические реакции ТОТЭ представлены на рис. 10.9. Реакции в ТОТЭ включают:

Реакции на аноде:

$$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^- \qquad (10.28)$$

$$CO + O^{2-} \rightarrow CO_2 + 2e^-$$

$$CH_4 + 4O^{2-} \rightarrow 2H_2O + CO_2 + 8e^-$$

Реакция на катоде:

$$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$$

В ТОТЭ водород или оксид углерода (CO) в топливе реагируют с ионами оксидов (O_2-) из электролита. Эти реакции производят воду и CO_2 и обеспечивают электроны аноду.

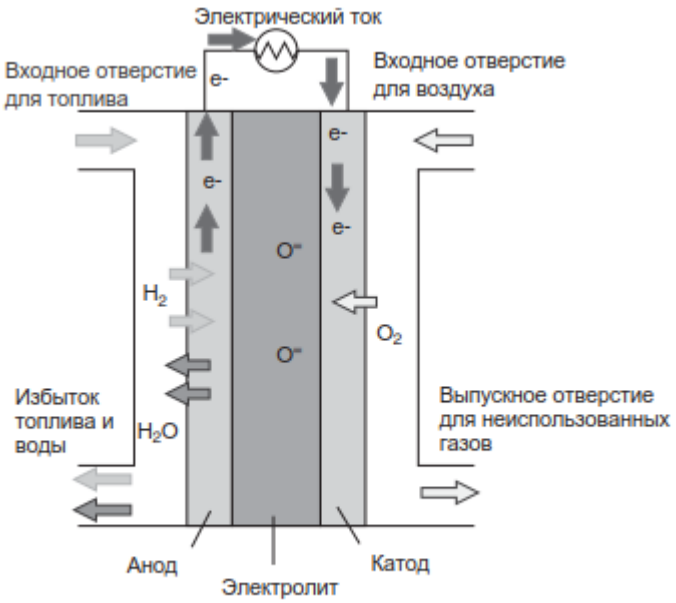


Рис. 10.9 Твердооксидный топливный элемент. *Источник*: EERE.

Электроны проходят через нагрузку. На катоде молекулы кислорода (O_2) из воздуха получают электроны и превращаются в оксидные ионы. Ионы возвращаются в электролит.

ТЭПМ (называемые топливными элементами с полимерной обменной мембраной), содержат тонкую пластиковую полимерную, через которую могут проникать ионы водорода. Мембрана с обеих сторон покрыта частицами металлических сплавов (в основном, платины), которые действуют как катализаторы. Использование катализатора из благородного металла увеличивает стоимость системы. Поскольку электролит в ТЭПМ представляет собой твердый полимер на водной основе, это не является проблемой и не влияет на срок службы батареи. Использование твердого электролита также устраняет проблемы безопасности и коррозийные эффекты, связанные с жидкими электролитами. ТЭПМ работают при относительно низких температурах (ниже 100°C). ТЭПМ обладают высокой удельной мощностью и малым весом по сравнению с другими типами топливных элементов. Низкие рабочие температуры означают, что нужен чистый водород, но в результате низких рабочих температур практически запускается и повышается долговечность компонентов. ТЭПМ являются ведущим типом топливных элементов для использования при производстве транспортных средств малой грузоподъемности и погрузочно-транспортных машин и, в меньшей степени, для стационарных применений. Электрохимия для ТЭПМ показана на рис. 10.10. Реакции на ТЭПМ:

Реакции на аноде:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad (10.29)$$

Реакции на катоде:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Водороды и электроны образуются из топлива на аноде. На катоде, насыщенном кислородом электронами с анода и ионами водорода из электролита, образуется вода. Твердый электролит не впитывает воду; таким образом, вода отклоняется в потоке окислительного газа.

Высокотемпературные ТЭПМ являются относительно недавно (около 2003 года) разработанным типом, разработка которого началась примерно в 1990 году, которые работают при температуре до 200°C. Электролит в ТЭПМ является электролитом на основе минеральной кислоты вместо электролита на основе воды для обычных ТЭПМ. Более высокая рабочая температура означает, что высокотемпературные ТЭПМ более терпимы к примесям топлива, таким как CO (до 5% по объему). ТЭПОМ является относительно новым типом топливных элементов, разработка которого началась примерно в 1990 году. ТЭПОМ аналогичны ТЭПМ, для ТЭПОМ используется полимерная мембрана в качестве электролита, но катализатор из платино-рутениевого сплава на аноде ТЭПОМ способен извлекать водород из метанола (CH_3OH), таким образом, реформатора не требуется.

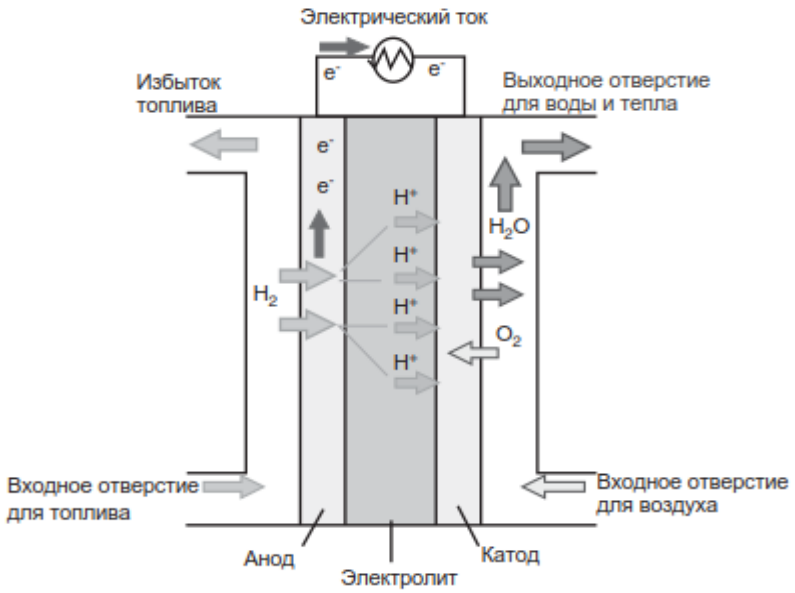


Рис. 10.10 Топливный элемент с полимерной обменной мембраной. *Источник*: EERE.

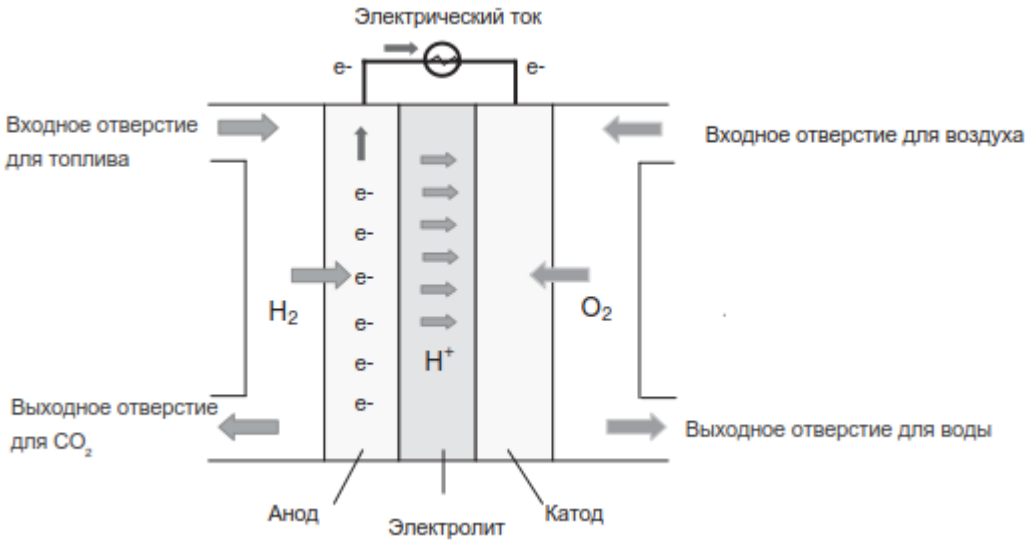


Рис. 10.11 Топливный элемент с прямым окислением метанола.

Метанол (см. Главу 12) является идеальным топливом, представляющим собой недорогую жидкость с высокой плотностью энергии, которую легко хранить, транспортировать и подавать в топливный элемент. ТЭПОМ работают при температуре от 60 до 130 °C и используются в устройствах при наличии умеренных требований по электропитанию, например, в мобильной электроники, портативных блоках питания и подъёмно-транспортных машинах. Для последних ТЭПОМ предлагают быструю заправку, а не длительную зарядку батареи.

Электрохимия для ТЭПОМ показана на рис. 10.11. Следующие реакции происходят в ТЭПОМ:

Реакции на аноде:

$$CH_3OH+H_2O \rightarrow 6H^+ + 6e^- + CO_2 \qquad (10.30)$$

Реакции на катоде:

$$\frac{3}{2}O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$$

На аноде водород извлекается из метанола, и образуются ионы водорода и электроны. На катоде, насыщенном кислородом электронами с анода и ионами водорода из электролита, образуется вода. Диоксид углерода образуется на аноде, а вода - на катоде.

Все топливные элементы имеют одинаковую функцию: электрохимическое производство электричества из топлива и окислителя. Различные типы топливных элементов имеют разные электролиты, что приводит к разным рабочим температурам, эффективности, подходящим видам топлива, требованиям к топливным процессорам и доступности. В таблице 10.3 представлен обзор характеристик топливных элементов для ЩТЭ, ФКТЭ, ТЭРКЭ, ТОТЭ и ТЭПМ (включая ТЭПОМ). Информация, содержащаяся в таблице 10.3, получена с различных интернет-сайтов, включая фабрики, национальные лаборатории, научные круги и отраслевые технические организации, и может быть изменена, так как значительные исследования большинства типов топливных элементов все еще продолжаются.

Практически все топливные элементы имеют преимущества тихой работы, низкого уровня выбросов и высокой эффективности (по сравнению с тепловыми системами простого цикла). ЩТЭ и ФКТЭ являются относительно долго используемыми вариантами, проверенными технологиями. Все типы топливных элементов являются дорогостоящими, если сравнивать доллар за киловатт на основе тепловых двигателей. Типы ТЭРКЭ, ТОТЭ, ТЭМП и ТЭПОМ только начинают выходить на рынок (довольно в ограниченном количестве для некоторых типов). С 2010 года коммерциализация ТОТЭ

Таблица 10.3 Обзор характеристик топливных элементов.

	ЩТЭ	**ФКТЭ**	**ТОТЭ**	**ТЭРКЭ**	**ТЭПМ**	**ТЭПОМ**
Коммерческий статус	Имеется на рынке	Имеется на рынке	Имеется на рынке	Имеется на рынке	Имеется на рынке	Имеется на рынке
Предел мощности	2–100 кВт	100–400 кВт	1 кВт –10 мВт	250 кВт – 10 мВт	3 кВт –1 мВт	25 Вт–5 кВт
Рабочая температура (°F [°C])	480 [250]	400 [200]	1800 [1000]	1200 [650]	200 [90]	200 [90]
Топливо	Чистый водород	Природный газ, биогаз из естественных грунтовых выемок, реакторный газ, пропан	Природный газ, водород, биогаз из естественных грунтовых выемок, мазут	Природный газ, водород	Природный газ, водород, пропан, дизельное топливо	Метанол
Производительность (%)	50–60	40–45	50–60	50–60	35–60	20–30
Риформинг		Внешний	Внешний/ внутренний	Внешний/ внутренний	Внешний	
Катализатор	Платина /палладий	Платина	Не требуется	Никель/оксид никеля	Платина / рутений	Платина / рутений
Воздействие на окружающую среду	Почти нулевые выбросы	Почти нулевые выбросы	Почти нулевые выбросы	Почти нулевые выбросы	Почти нулевые выбросы	Почти нулевые выбросы

Источник: Энергетическая комиссия штата Калифорния

и ТЭМП достигла значительных успехов, поэтому коммерческих предложений стало намного больше, и они стали разнообразнее. На Веб-сайте Офиса по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии (EERE) http://energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells и http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f10/fct_h2_fuelcell_factsheet.pdf представлен перечень источников дополнительной информации о топливных элементах, а также обзор отрасли E4Tech (E4Tech, 2014). С момента появления на рынке ТОТЭ в ограниченном количестве в 2009 году его номинальная мощность возросла на 20% по сравнению с номинальной мощностью в 2013 году. В разделе 10.5 рассматриваются некоторые из доступных в настоящее время топливных элементов.

10.5 Доступность топливных элементов

С 1958 по 2013 год компании UTC Power и United Technologies Corporation занимались продажей топливных элементов серии PureCell™, модель 200 мощностью 200 кВт и модель 400 мощностью 400 кВт. К 2012 году производительность PureCell™, модель 200 превысила 9 миллионов часов работы с учетом работы 275 устройств в 19 странах. PureCell™ Model 400, представленная в 2010 году, проработала 1 миллион часов в 2013 году. В феврале 2013 года UTC Power была продана компании ClearEdge Power, которая в конечном итоге избежала банкротства в мае 2014 года, и Doosan Group, крупному южнокорейскому конгломерату, который приобрел ClearEdge Power и основал Doosan Fuel Cell America. В июле 2015 года Doosan Fuel Cell объявила о значительном увеличении производства топливных элементов на своем заводе в Южном Виндзоре, штат Коннектикут, на первом заводе UTC Power.

Модель PureCell™ Model 400, выпускаемая и продаваемая компанией Doosan Fuel Cell America, представляет собой ЩТЭ мощностью 400 кВт, который является одной из самых продаваемых систем топливных элементов. Модель 400 особенно подходит для использования на ТЭЦ (глава 11). На рис. 10.12 показана схема топливного элемента, а в таблице 10.4 перечислены основные характеристики. Рисунок и таблица взяты с веб-сайта компании Doosan (http://www.doosanfuelcell.com/en/main.do). На рис. 10.12 представлены следующие компоненты согласно нумерации:

1) Топливный процессор (реформер), который превращает природный газ в газ, обогащенный водородом.
2) Батарея топливных элементов – водород и воздух в результате электрохимической реакции объединяются для производства электричества (постоянный ток), воды и тепла. Часть воды (в виде пара) используется в реформаторе.
3) Стабилизатор мощности – мощность постоянного тока преобразуется в приемлемую для сети мощность переменного тока.
4) Интегрированная рекуперация тепла – тепло регенерируется для отопления помещений, нагрева воды для бытовых нужд и других видов использования энергии процесса.

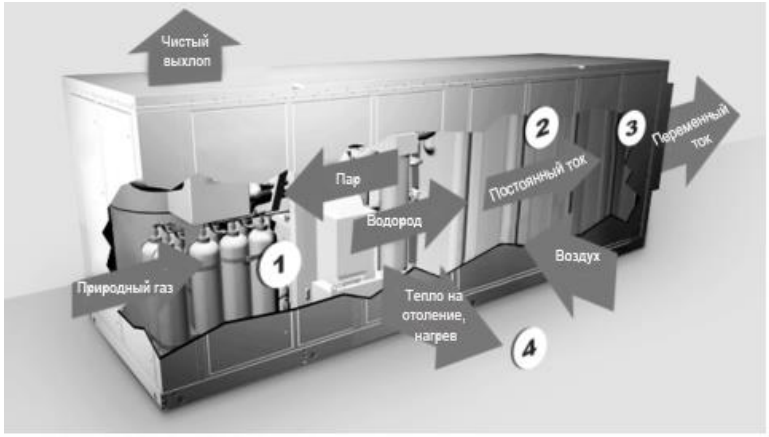


Рис. 10.12 Разрез ФКТЭ PureCell модель 400.
Источник: http://www.doosanfuelcell.com/en/ solutions/inside.do.

Таблица 10.4 Характеристики Doosan PureCell™ модель 400.

Характеристики		**Ед. изм.**	**Режим работы**
		Максимальная мощность	**Мощность при базовых нагрузках**
Выработка электроэнергии	кВт/кВА	440/440	400/471
КПД по электричеству	%, НТС	41	42
Расход газа	млн. БТЕ/ч, ВТС	4.06	3.60
Тепло высокого потенциала при температуре до 250 °F	млн. БТЕ/ч (кВт)	0.76 (223)	0.64 (188)
Тепло низкого потенциала при температуре до 140 °F	млн. БТЕ/ч (кВт)	0.99 (290)	0.88 (258)
Рабочая температура внешней среды	°F (°C)	от -20 до 104 (от -29 до 40)	
Топливо		Природный газ	

Источник: http://www.doosanfuelcell.com/attach_files/link/PureCell%20Model%20400%20Datasheet.pdf.

Как показано на графике, выходная базовая нагрузка системы составляет 400 кВт/471 кВА при 480 В, трехфазная мощность 60 Гц. Объем выбросов в окружающую среду незначителен. Размеры топливного элемента составляют 100 на 119 дюймов на 344 дюйма, а модель PureCell™ 400 весит 60 000 фунтов. На расстоянии 33 фута от элемента шум составляет всего 65 дБ – подтверждение того, что топливный элемент работает в тихом режиме и может быть расположен внутри конструкции. Срок службы батареи топливных элементов составляет 10 лет. Потребление природного газа (базовая нагрузка) составляет 3,60 млн. БТЕ/ч, для которого электрический КПД указан как 42%. Регенерация тепла при базовой нагрузке модели 400 составляет 0,88 млн. БТЕ/ч при 140°F. Модель PureCell™ Model 400 доступна в качестве примера топливного элемента и представлена как типичная для различных производителей топливных элементов. В публикации «Рынок топливных элементов» (2015-2019), компании Research and Markets (2015), которая является международной организацией по маркетинговым исследованиям, перечислены основные компании в Северной Америке и девять других фирм, на которые приходится больший объем производства в топливной индустрии.

Таблица 10.5 Компании-разработчики топливных элементов/компании, реализующие топливные элементы

Наименование компании	**Веб-сайт**	**Тип ТЭ**	**Мощность ТЭ**
Ballard Power Systems	www.ballard.com	ТЭПМ	1.2–85 кВт
Bloom Energy Corp.	www.bloomenergy.com	ТОТЭ	50–250 кВт
Doosan Fuel Cell	www.doosanfuelcell.com	ФКТЭ	400 кВт
FuelCell Energy	www.fuelcellenergy.com	ТЭРКЭ	300 кВт – 2.4 кВт
Hydrogenics	www.hydrogenics.com	ТЭПМ	4–12 кВт
Acumetrics SOFC	www.acumentrics.com	ТОТЭ	3 кВт
Altergy Systems	www.altergy.com	ТЭПМ	500 Вт–7.5 кВт
Delphi Automotive	www.delphi.com	ТОТЭ	9 кВт
Nuvera Fuel Cells	www.nuvera.com	ТЭПМ	10–100 кВт
Oorja Protonics	www.oorjafuelcells.com	ТЭПОМ	1.1 кВт
Plug Power	www.plugpower.com	ТЭПМ	Обработка материалов
Protonex Tech. Corp.	www.protonex.com	ТОТЭ	20–200 Вт
Relion	см. Plug Power	ТЭПМ	0.2–2.2 кВт

Таблица 10.5 создана на основе данного списка. Ряд других компаний разрабатывают или продают топливные элементы разных размеров и типов. Поскольку отрасль достаточно динамична, могут

появиться другие компании, а некоторые из перечисленных в таблице 10.5 могут исчезнуть. Спецификации систем топливных элементов, таким образом, могут измениться. Компании, перечисленные в таблице 10.5, имеют веб-сайты, и каждый веб-сайт содержит информацию о деятельности компании в области производства топливных элементов. Подобно большей части информации из Интернета, часть информации, как правило, не связана с «техническими характеристиками», и о подробных технических характеристиках можно узнать, связавшись с компанией. Тем не менее, таблица содержит информацию о том, какие топливные элементы доступны на рынке, а также, по крайней мере, некоторые значения диапазона мощности и описание типов электролитов.

Индустрия топливных элементов претерпевает постоянные изменения, консолидацию и модификации – свидетельство об отказе UTC Power от UTC и вступлении группы Doosan в компанию Doosan Fuel Cell America. После 2009 года наблюдалось значительное увеличение номинальной мощности топливных элементов в мегаваттах и количества проданной продукции, наряду с ускорением процесса коммерциализации всех типов электролитов. На рис. 10.13 из Книги данных по возобновляемым источникам энергии за 2013 год (Истерли и Гельман, 2014) показано устойчивое увеличение емкости установленных топливных элементов с 2008 по 2013 год. Большая часть роста приходится на стационарную энергетику. В некоторой степени использование топливных элементов в автомобильной промышленности остается темой различных исследований. Основные моменты, взятые из работ Истерли и Гельмана (2014), показывают, что общая мощность стационарных топливных элементов увеличилась в три раза, достигнув 160 МВт в 2013 году, а поставки топливных элементов увеличились на 25% по сравнению с предыдущим годом. Компания E4Tech (2014) представила распределение по категориям электролитов для топливных элементов в зависимости от номинальной мощности в мегаваттах за 2009-2013 годы. Данные, представленные на рис. 10.14, взятом из этого отчета, указывают на увеличение номинальной мощности (в мегаваттах), а также на широкое распространение ТОТЭ за последние несколько лет. С 2009 года номинальная мощность топливных элементов для стационарных установок увеличилась почти в два раза, достигнув значения 178 МВт в 2015 году (см. Главу 11). Мощность ТЭЦ достигла 40 МВт в 2010 году и до сих пор остается на данной отметке.



Рис. 10.13 Установленная мощность в мегаваттах топливных элементов за период 2008 по 2013 год. *Источник*: http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62580.pdf (p. 91).

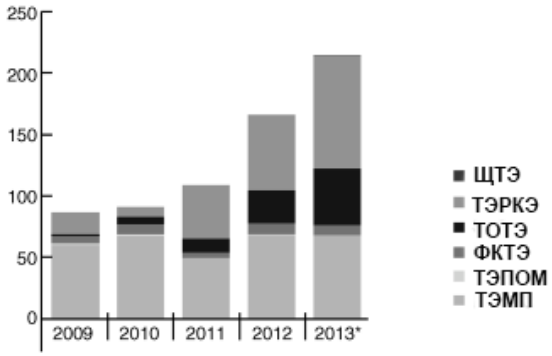


Рис. 10.14 Установленная мощность в мегаваттах различных типов электролитических топливных элементов. *Источник*: E4Tech (www.FuelCellIndustryReview.com)

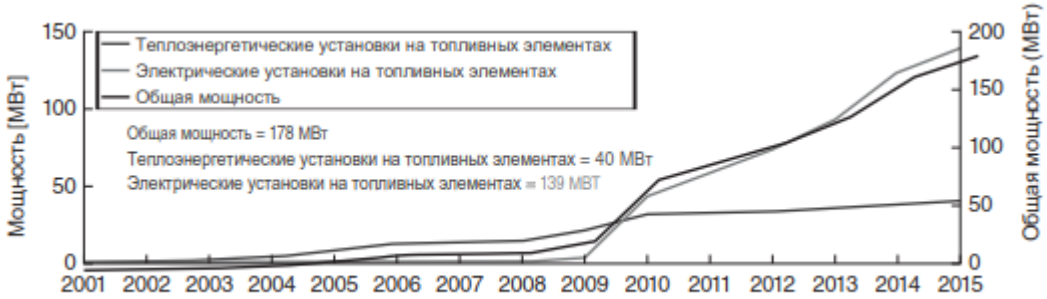


Рис. 10.15 Установленная мощность стационарного топливного элемента с 2001 по 2015 год. *Источник*: http://www.nrel.gov/hydrogen/images/cdp_stat_01.jpg

10.6 Заключение

ЩТЭ сыграли важную роль в разработке пилотируемой космической программы с первых дней ее существования. При этом, несмотря на высокую производительность и другие преимущества топливных элементов, относительно высокая стоимость за киловатт способствовала ограничению их использования в качестве энергосистемы на основе альтернативных источников энергии. Тем не менее, по мере того, как стоимость за киловатт снижается и применение стабильной в цене и экологически чистой электроэнергии приобретает более важное значение, топливные элементы становятся более привлекательными с экономической и экологической точки зрения.

Использование топливных элементов начинает приобретать все большее значение в таких областях, как электроэнергия для удовлетворения основной нагрузки, аварийное/резервное питание, питание портативных и электронных устройств, однако, использование топливных элементов в личных транспортных средствах до сих пор не приобрело широкого распространения по причине высокой стоимости и недоступности водорода.

Литература

Angrist, S.W. (1982) Direct Energy Conversion, 4th edn. Allyn and Bacon, Boston, MA. Appleby, A.J. and Foulkes, F.R. (1989) Fuel Cell Handbook. Van Nostrand Reinhold, New York. Brouwer, J. (2001) Fuel cells. In Distributed Generation: The Power Paradigm for the New

Millennium, A.-M. Borbely and J. F. Kreider (eds). CRC Press, Boca Raton, FL; pp. 151–184. Culp, A.W. (1991) Principles of Energy Conversion, 2nd edn. McGraw-Hill, New York.

E4Tech (2014) The Fuel Cell Industry Review 2014. http://www.fuelcellindustryreview.com/archive/ TheFuelCellIndustryReview2014.pdf (accessed October 21, 2016).

Esterly, S. and Gelman, R. (2014) 2013 Renewable Energy Data Book, Haas, K. (ed.). DOE/GO- 102014-4491. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62580.pdf (accessed October 20, 2016).

Hoogers, G. (2002) Fuel Cell Technology Handbook. CRC Press, Boca Raton, FL.

Kinoshita, K., McLarnon, E.R., and Cairns, E.J. (1988) Fuel Cells: A Handbook. US DOE, DOE/ METC-88/6096.

Larminie, J. and Dicks, A. (2003) Fuel Cell Systems Explained, 2nd edn. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Li, X. (2006) Principles of Fuel Cells. Taylor and Francis, New York.

Ramani, V. (2006) Fuel cells. The Electrochemical Society Interface, **15**(1): 41–44.

Research and Markets (2015) Global Fuel Cell Markets 2015–2019. http://www.researchandmarkets. com/reports/3292488/global-fuel-cell-market-2015-2019#pos-0 (accessed October 21, 2016).

Weston, K.C. (1992) Energy Conversion. West Publishing Co., St. Paul, MN.

11

Комбинированные системы выработки энергии и тепла

11.1 Введение

Комбинированные системы выработки энергии и тепла (СВЭТ) характеризуются децентрализованным производством электроэнергии первичным двигателем, а также сбором и потреблением отводимой тепловой энергии от первичного двигателя. Преимущества систем СВЭТ очевидны: повышенная общая тепловая эффективность системы, улучшенное качество электроэнергии, повышенная энергетическая устойчивость и снижение выбросов парниковых и других газов.

Электрическая сеть основана на крупных центральных электростанциях. Передача энергии от таких станций конечным пользователям осуществляется через электрическую сеть, состоящую из высоковольтных систем передачи и низковольтных распределительных систем. Высоковольтная система передачи передает электричество от электростанций и передает его на подстанции, где высоковольтное электричество преобразуется в низкое напряжение и передается отдельным потребителям.

Общий тепловой КПД генерации, передачи и распределения относительно низок. Рисунки 11.1 и 11.2 иллюстрируют потери, присущие выработке и доставке электроэнергии как на традиционных, так и на электростанциях с комбинированным циклом. Термелер (2001) представляет ясную историю развития электростанций, а Кельхофер и соавт. (1999) подробно описывают функцию электростанции с комбинированным циклом. Традиционные электростанции преобразуют около >30% доступной энергии топлива в электроэнергию конечного пользователя, а высокоэффективные электростанции комбинированного цикла преобразуют около 50% доступной энергии в электроэнергию конечного пользователя. Большая часть энергетического содержания топлива теряется на электростанции из-за сброса или отвода отработанного тепла. Дополнительные потери возникают при передаче и распределении электроэнергии конечному пользователю.

Неэффективность и проблемы выбросов, связанные с традиционными электростанциями, дают толчок для новых и пересмотренных парадигм в «на площадке и в окрестностях площадки» или «децентрализованной» генерации. Новые разработки в области первопроходцев и электронных силовых технологий, наряду с реструктуризацией и дерегулированием электроэнергетики, повысили экономику децентрализованного производства электроэнергии.

Технология, состоящая из энергетического оборудования в сочетании с термически активируемыми и/или потребляющими тепловую энергию компонентами, получила развитие под рубрикой СВЭТ. СВЭТ может снизить выбросы углерода и других веществ и значительно повысить эффективность использования тепловой энергии. СВЭТ вырабатывает как электрическую энергию, так и мощность на валу, а также полезную тепловую энергию на площадке или в окрестностях площадки АЭС, преобразуя до 80% топлива в полезную энергию. Более высокая тепловая эффективность означает меньшее количество топлива для удовлетворения потребности в энергии. Кроме того, местное производство электроэнергии снижает энергопотребление сети и обеспечивает лучшее качество электроэнергии и устойчивость (при аварийных ситуациях). На рис. 11.3 показано увеличение эффективности систем СВЭТ по сравнению с обычными, централизованными КПД электростанции, как на рисунках 11.1 и 11.2.

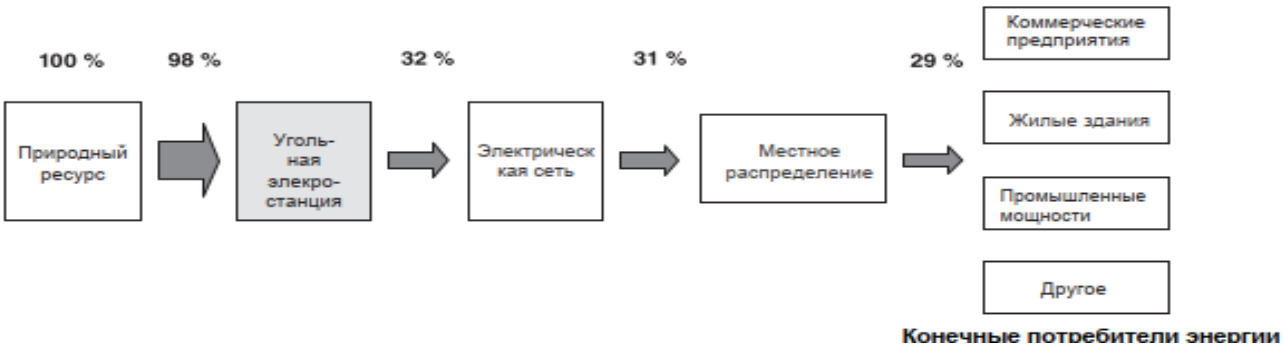


Рис. 11.1. Тепловая эффективность централизованного производства электроэнергии.

Успешная система СВЭТ требует как выработки электроэнергии/мощности на валу, так и тепловой энергии. Операция, в которой нет необходимости в том и другом, не выиграет от СВЭТ. СВЭТ особенно полезна для зданий или промышленных процессов, которые обычно используют электроэнергию и могут иметь термически активированные компоненты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха или требовать энергии теплового процесса.

СВЭТ стала приоритетным направлением для Министерства энергетики США (USDOE). Программа СВЭТ находится в Управлении по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии (EERE) USDOE. Партнерства EERE СВЭТ по оказанию технической помощи (CHAP TAP) продвигают работу СВЭТ и помогают конечным пользователям энергии внедрить системы СВЭТ, предоставляя анализ рыночных возможностей, обучение и пропаганду, а также техническую помощь. Контактная информация для семи региональных СВЭТ, а также подробная информация о программе находятся по ссылке http://energy.gov/eere/amo/chp-technical-assistance-partnerships-chp-taps. База данных DOE для систем СВЭТ для каждого штата доступна по адресу https://doe.icfwebservices.com/chpdb/.

Кроме того, Агентство по охране окружающей среды США (EPA) создало инициативу Партнерства по СВЭТ, которая направлена на содействие по внедрению технологий СВЭТ с привлечением государственных структур (национальных, государственных и местных), потребителей энергии, отрасли СВЭТ и других заинтересованных лиц в области чистой энергии. Публикация партнерства EPA СВЭТ Каталог технологий СВЭТ (Дарроу и соавт., 2015) дает хороший обзор. Объединенная ассоциация теплоэнергетики США (http://chpassociation.org/) также предоставляет полезную информацию. Книги по темам СВЭТ включают ASHRAE (2015), Бейт (2011), Бойс (2002), Хорлок (1997), Камм (1997), Крейтх и Уэст (1997) и Колановский (2000). Основы систем СВЭТ рассматриваются далее.

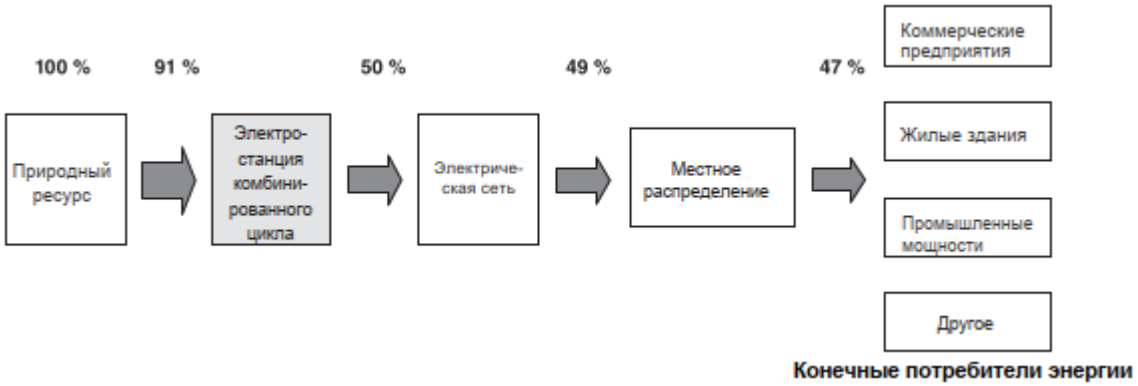


Рис. 11.2. Тепловая эффективность централизованного энергетического комбинированного цикла.

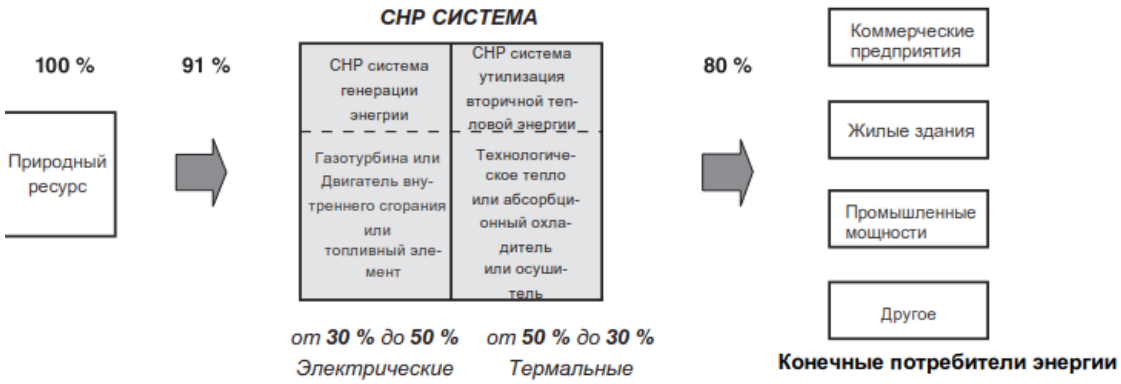


Рис. 11.3 Тепловая эффективность СВЭТ систем

11.2 Комбинированные системы выработки энергии и тепла: Основные принципы

Система СВЭТ сочетает в себе распределенную выработку электроэнергии с термически активированными компонентами для удовлетворения потребностей зданий в охлаждении, обогреве и электроэнергии или с устройствами рекуперации тепла (такими как парогенераторы с рекуперацией тепла, HRSG) для удовлетворения потребностей в энергии в процессе производства. Конкретные типы распределенной генерации энергии и термически активируемые технологии будут представлены и кратко обсуждены.

Ряд технологий коммерчески доступны для выработки электроэнергии или механического вала на площадке или в окрестностях площадки АЭС, где используется энергия. Основными категориями первичных двигателей для распределенной генерации (DG) являются турбины внутреннего сгорания (газовые), двигатели внутреннего сгорания и топливные элементы, хотя паровые турбины также могут использоваться в системах СВЭТ. Турбины внутреннего сгорания были рассмотрены в главе 5, а топливные элементы обсуждались в главе 10. Характеристики этих первичных двигателей для технологий DG сопоставлены в Таблице 11.1 из Каталога технологий СВЭТ (Дарроу и соавт., 2015). Дополнительная информация о затратах также доступна из Оценки затрат по возобновляемой энергии распределенного производства (NREL, 2013).

Эффективность выработки электроэнергии для турбинных систем внутреннего сгорания, работающих в режиме простого цикла (т.е. без рекуперации тепла в выхлопе турбины), составляет от 22 до 40%. Турбины внутреннего сгорания вырабатывают высококачественную тепловую энергию, которая может использоваться для выработки пара или горячей воды для тепловых применений, включая нагрев и охлаждение, или для получения энергии процесса. Промышленные газовые турбины представляют собой устоявшуюся технологию производства электроэнергии. Эти турбины также представляют собой мощное оборудование для производства электроэнергии. Промышленные газовые турбины могут обеспечить от 1 МВт до более 300 МВт электроэнергии. Микротурбины с электрической мощностью <1 МВт представляют собой малоёмкую часть энергогенерирующего оборудования, но обладают электрической эффективностью 22–28%. Универсальность источников топлива турбин позволяет применять их как в сельских, так и в городских районах.

Поршневой двигатель с четырехтактным двигателем внутреннего сгорания или дизельный двигатель часто используется в качестве первичного двигателя в системе СВЭТ.

Таблица 11.1 Сравнение технологий DG (EPA).

Технология	**Поршневой двигатель**	**Паротурбина**	**Газотурбина**	**Микротурбина**	**Топливная ячейка**
Электрическая эффективность (HHV)	27–41%	5 to >40%a)	24–36%	22–28%	30–63%
Общая эффективность СВЭТ (HHV)	77–80%	около 80%	66–71%	63–70%	55–80%
Эффективная электрическая эффективность	75–80%	75–77%	50–62%	49–57%	55–80%
Мощность (МВт)	0.005–10	0.5 до несколько сотен MW	0.5–300	0.03–1.0	200–2.8 коммерческий СВЭТ
Соотношение мощности к теплу	0.5–1.2	0.07–0.1	0.6–1.1	0.5–0.7	1–2
Частичная нагрузка	удовлетворительно	удовлетворительно	плохо	удовлетворител	хорошо
Стоимость с установкой СВЭТ (долл.США/кВтэ)	1500–2900	$670–$1100	1200–3300 (5–40 MW)	2500–4300	5000–6500
Нетопливные расходы на эксплуатацию и обслуживание (долл.США/кВтэ)	0.009–0.025	0.006–0.01	0.009–0.013	0.009–0.013	0.032–0.038
Доступность	96–98%	72–99%	93–96%	98–99%	>95%
Количество часов работы до капитального ремонта	30 000–60 000	>50 000	25 000–50 000	40 000–80 000	32 000–64 000
Время запуска	10 с	1 ч–1 день	10 мин–1 ч	60 с	3 ч–2 дня
Давление топлива (фунт/кв.дюйм)	1–75	n/a	100–500 (компрессор)	50–140 (компрессор)	0.5–45
Топливо	Природный газ, биогаз, сжиженный нефтяной газ, кислый газ, отходящий промышленный газ	Все	Природный газ, синтетический газ, наземный газ и мазут	Природный газ, кислый газ, жидкое топливо	Водород, природный газ, пропан, метанол
Потребление в целях тепловой мощности	Отопление помещений, горячая вода, охлаждение, пар LP	Технологический пар, центральное отопление, горячая вода, охлажденная вода	Тепло, горячая вода, пар LP – HP	Горячая вода, охладитель	Горячая вода, LP–HP
Плотность мощности (кВт/м^2)	35–50	>100	20–500	5–70	5–20
NO_x (фунт/106 БТЕ) (Не включая SCR)	Система на обогащенной смеси 0.013, трёхкомпонентный каталитический нейтрализатор. Система на обедненной смеси 0.17	газ 0.1–0.2, древесина 0.2–0.5, уголь 0.3–1.2	0.036–0.05	0.015–0.036	0.0025–0.0040
NOx (фт/МВт Нполезная мощность) (не включая SCR)	Система на обогащенной смеси 0.06. трёхкомпонентная каталитическая	газ 0.4–0.8, древесина 0.9–1.4, уголь 1.2–5.0	0.52–1.31	0.14–0.49	0.011–0.016

HHV: более высокая теплотворная способность; HP: высокое давление; LP: низкое давление; O & M: эксплуатация и обслуживание; СКВ: селективное каталитическое восстановление.

КПД мощности на нижнем конце предназначен для небольших турбин с противодавлением с бойлером и для больших паровых турбин со сверхкритической конденсацией для выработки электроэнергии на верхнем уровне

Двигатели внутреннего сгорания являются зрелой технологией, и применения поршневых двигателей хорошо известны и широко распространены. Двигатели могут использовать природный газ, пропан или дизельное топливо и поставляются с мощностью от 5 кВт до 10 МВт и обладают электрической эффективностью 27–41%. Поршневые двигатели, используемые для выработки электроэнергии, имеют низкие капитальные затраты, легкий запуск, проверенную надежность, хорошие характеристики отслеживания нагрузки и значительный потенциал рекуперации тепла. За последние несколько лет выхлопные катализаторы и улучшенная конструкция и управление сгоранием значительно сократили выбросы двигателя внутреннего сгорания. Тепловая энергия улавливается как выхлопными газами двигателя, так и системой охлаждения двигателя.

Топливные элементы вырабатывают электроэнергию в результате электрохимических реакций, обычно между водородом и кислородом, без процессов горения. Так же как и батарея, топливный элемент производит постоянный ток. Однако, как обсуждалось в главе 10, топливные элементы поставляются в полной комплектации, в которой батарея топливных элементов объединена с инвертором для преобразования постоянного тока в переменный ток и, при необходимости, с преобразователем для обеспечения обогащенного водородом топлива. Топливные элементы имеют самую высокую электрическую эффективность генерации и самые низкие выбросы среди всех первичных двигателей СВЭТ, но являются самыми дорогими в расчете на установленную киловаттную мощность среди любых первичных двигателей СВЭТ.

Помимо выработки электроэнергии на площадке, не менее важным фактором является сбор и потребление отбракованного тепла. Регенерация энергии от любого из первичных двигателей в системе СВЭТ осуществляется с помощью теплообменников. Теплообменники, используемые для регенерации отбракованного тепла от первичного двигателя СВЭТ, классифицируются в соответствии с обрабатываемыми парами жидкостей и температурой жидкостей, поступающих в теплообменники. Входными парами могут быть газ-газ, газ-жидкость или жидкость-жидкость, которые обычно связаны с применением отработанного тепла с высокой, средней и низкой температурой.

Газо-газовые теплообменники часто используются в качестве рекуператоров для предварительного нагрева воздуха для горения двигателей внутреннего сгорания или турбин внутреннего сгорания. Теплообменник с поперечным потоком газа, перпендикулярным пучку труб, содержащему воздух, называется рекуператором конвекции. Такие рекуператоры используются в низкотемпературных системах, таких как отопление помещений, осушительные системы или абсорбционные охладители с прямым сжиганием. Другие типы теплообменников, используемых для рекуперации отходящего тепла от газа к газу, включают в себя пластинчатые, тепловые трубы и роторные генераторы.

Газо-жидкостные теплообменники включают в себя устройства для рекуперации тепла от средней до высокой температуры, такие как HRSG, теплообменники с псевдоожиженным слоем и тепловые трубки, а также теплообменники с низкой и средней температурой, используемые в качестве экономайзеров или нагревателей жидкости. HRSG, также называемые котлами-утилизаторами, используются для выработки пара из первичного двигателя, как правило, выхлопного газа газовой турбины. HRSG очень важны в приложениях СВЭТ и будут рассмотрены в следующем параграфе. В теплообменнике с псевдоожиженным слоем вода или пар нагреваются потоком выхлопных газов (горячим), который течет по слою мелкодисперсных твердых частиц. Когда горячая жидкость достигнет критической скорости, частицы в слое будут плавать и действовать как жидкость, вызывая увеличение коэффициента теплопередачи. Теплообменники с псевдоожиженным слоем часто используются для обогрева помещения или горячей воды, подогрева воды котла и нагрева технологической жидкости. Тепловые трубы газ-жидкость аналогичны тем, которые используются в газ-газовых применениях.

Экономайзеры– это теплообменники с перекрестным потоком, в которых вода течет в отдельных трубках с горячими газами, перпендикулярными трубам. Экономайзеры часто используются с дымовыми газами котла для предварительного нагрева воды котла или для нагрева воды или других технологических жидкостей или для перегрева пара. Нагреватели жидкости представляют собой двухтрубные теплообменники, которые используют горячие газы для нагрева теплоносителя, который циркулирует по всей установке.

Теплообменники типа «жидкость-жидкость» обычно используются в промышленных целях, в которых используются первичные двигатели, использующие горячее масло или другие жидкие охлаждающие жидкости. Кожухотрубные теплообменники предназначены для рекуперации тепла этого типа.

HRSG часто используются в процессах, которые требуют пара для термически активированных компонентов или для использования промышленной энергии, и классифицируются как необогреваемый, частично обогреваемый или полностью обогреваемый. Необогреваемый HRSG использует только горячие выхлопные газы для генерации пара. HRSG, который использует канальную горелку выше по потоку для повышения температуры выхлопных газов, считается частично обогреваемым. Если отработанный газ используется в качестве предварительно нагретого воздуха для процесса сгорания, HRSG считается полностью обогреваемым.

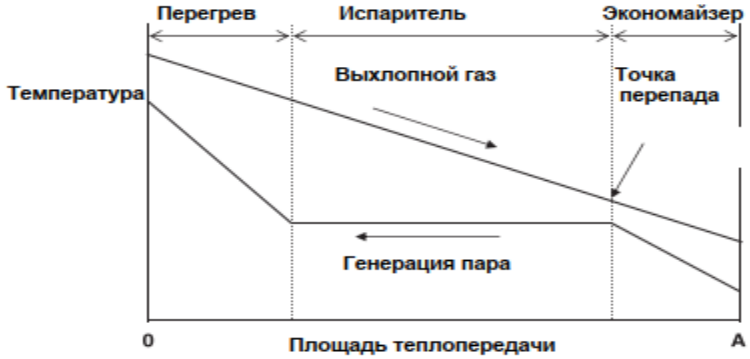


Рис. 11.4 Диаграмма температуры и площади HRSG.

На рис. 11.4 представлена диаграмма температуры и площади HRSG. Горячий выхлопной газ поступает при высокой температуре и охлаждается при прохождении через HRSG. Энергия, извлеченная из горячего газа, используется для нагрева, испарения и перегрева воды. Схема потока, показанная на диаграмме, является противотоком. HRSG обычно включает в себя секции, которые определены как экономайзер, испаритель и перегреватель. Вода нагревается до уровня насыщения низкотемпературным выхлопом при выходе из HRSG. В испарителе вода испаряется в насыщенный пар, а насыщенный пар перегревается высокотемпературным выхлопом при входе в перегреватель. Точка перепада, где вода начинает испаряться первой, представляет собой наименьшую разницу температур в HRSG и является ограничивающим фактором в его общей производительности. Распределение горячей и холодной температурной зоны особенно важно в HRSG, как показано на рис. 11.4. Неудовлетворительная конструкция такого устройства может привести к тому, что энтальпии горячего и холодного выхода могут сохранить энергии, но в области точки сужения HRSG локальная температура холодной жидкости может превышать локальную температуру горячей жидкости, что приводит ко второму нарушению закона и аннулированию ожидаемых тепловых характеристик HRSG. HRSG должен производить давление-температурное состояние необходимого пара. Чтобы избежать конденсации в HRSG, температура выхлопных газов на выходе должна быть выше температуры конденсации паров в выхлопных газах.

В большинстве установок используется воздушный демпфер или задвижка отвода для изменения расхода через теплообменник для поддержания определенной расчетной температуры горячей воды или определенной скорости образования пара. Схема типичной турбины сгорания, задвижка отвода и устройства HRSG представлены на рис. 11.5. Турбогенератор находится в звукоизолированном корпусе, в который подается воздух. Задвижка отвода ведет к блоку для выпуска ненужного выхлопного газа. Канальная горелка показана выше по потоку от HRSG. Пар из HRSG затем направляется в термически активированные устройства или для использования энергии процесса.

Термически активированные устройства используют тепловую энергию вместо электрической энергии для обеспечения отопления, охлаждения или контроля влажности в зданиях. Два основных термически активированных устройства, используемых в системах СВЭТ– это абсорбционные чиллеры и осушители воздуха.

Абсорбционные охладители используют тепло в качестве основного источника энергии для запуска абсорбционного холодильного цикла. Эти охладители не требуют большой электрической мощности (0,02 кВт/т) по сравнению с электрическими охладителями (0,47–0,88 кВт/т, в зависимости от типа электрического охладителя). Движущиеся части абсорбционных охладителей меньше по количеству и по размеру, чем у электрических охладителей. Эти охладители также безопасны для окружающей среды, поскольку в них используются нехлор-фтор-углеродные хладагенты.

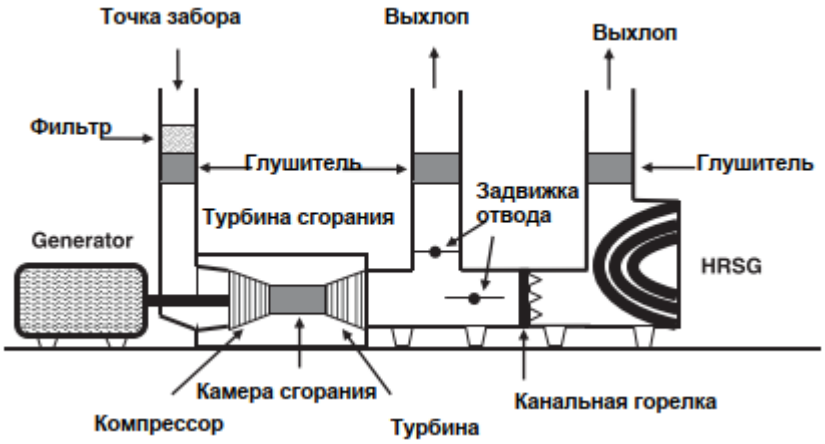


Рис. 11.5 Компоненты СВЭТ HRSG.

Имеющиеся на рынке модели абсорбционных охладителей способны работать на одном из следующих источников тепла: пар, горячая вода, выхлопные газы или прямое сгорание. Абсорбционные охладители, кроме тех, которые используют прямое сгорание, являются отличной альтернативой для обеспечения охлаждения в системе СВЭТ.

В продаже имеются два типа абсорбционных охладителей: однократные и многократные.

По сравнению с однократными охладителями абсорбционные охладители с несколькими эффектами стоят дороже (более высокие капитальные затраты), но более энергоэффективны и, следовательно, дешевле в эксплуатации (более низкие затраты энергии). Общая экономическая привлекательность каждого охладителя зависит от многих факторов, включая стоимость капитала и стоимость энергии.

Есть два отдельных аспекта кондиционирования пространства для комфортного охлаждения:

• понижение температуры воздуха (разумное охлаждение), и

• снижение влажности воздуха (скрытое охлаждение).

Уровень влажности должен оставаться ниже 60% относительной влажности, чтобы предотвратить рост плесени, бактерий и других вредных микроорганизмов в зданиях и предотвратить неблагоприятные последствия для здоровья. Обычные системы кондиционирования воздуха снижают температуру воздуха ниже температуры точки росы, так что влага в поступающем воздухе конденсируется снаружи охлаждающей спирали, через которую проходит воздух. Охлажденный и осушенный воздух направляется в кондиционируемое пространство. Снижение влажности воздуха за счет охлаждения часто требует понижения температуры воздуха ниже комфортного уровня и может потребовать повторного нагрева охлажденного осушенного воздуха, если требуется комфорт.

Осушители снижают влажность воздуха, используя твердые или жидкие осушители для удержания влаги. Осушители работают независимо от работы охладителя. В системах СВЭТ тепловая энергия от первичного двигателя используется для регенерации осушающего материала в этих осушителях. За счет снижения содержания влаги в воздухе осушители удовлетворяют скрытой нагрузке охлаждения и, таким образом, снижают нагрузку на охладители только до ощутимого охлаждения (снижения температуры). Действующие компоненты влагопоглотителя позволяют разделить функции чувствительного и скрытого охлаждения и контролировать их.

11.3 Комбинированные системы выработки энергии и тепла: Экономика и эксплуатация

Системы СВЭТ привлекательны по ряду причин, включая экономичность, тепловую эффективность, выбросы парниковых газов, качество электроэнергии и отказоустойчивость. Однако для того, чтобы СВЭТ функционировал хорошо, должны присутствовать следующие три атрибута:

1) потребление для производства электроэнергии;

2) потребление восстановленной тепловой энергии;

3) достаточная «искровая маржа».

Искровая маржа относится к разнице, обычно выражаемой в $ 12/10^6 БТЕ, между затратами на электроэнергию и первичное топливо, обычно природный газ. Принятый порог распространения искры для экономической целесообразности составляет $12/$10^6$ БТЕ; то есть, чем больше разброс искры превышает это значение, тем более экономически выгодным является СВЭТ. Пример 11.1 иллюстрирует, как можно рассчитать искровую маржу.

Пример 11.1

Какова искра, если электроэнергия стоит 0,12 долл. США/кВт-ч, а природный газ - 0,90 долл. США/ccf. (ccf: 100 кубических футов)

Решение: как указано в постановке задачи, плата за электроэнергию обычно оценивается как стоимость за киловатт-час, а стоимость природного газа выражается как стоимость за кубический фут. Еще одна распространенная единица выставления счетов за природный газ - на 1000 кубических футов. Содержание энергии в природном газе номинально составляет 100 000 БТЕ/куб или 1 000 000 БТЕ/куб. Таким образом:

Стоимость природного газа = $$\frac{\$0.90}{\text{ccf}} \times \frac{\text{ccf}}{100\,000\ \text{БТЕ}} \times \frac{10}{10} = \frac{\$9.00}{1\,000\,000\ \text{БТЕ}} = \$9.00/10^6\text{БТЕ}$$

Напомним из главы 1, что 1 кВтч = 3412 БТЕ. Тогда

Стоимость электроэнергии = $$\frac{\$0.12}{\text{кВч}} \times \frac{\text{кВч}}{3412\ \text{БТЕ}} \times \frac{10^6}{10^6} = \frac{\$35.17}{1\,000\,000\ \text{БТЕ}} = \$35.17/10^6$$

Таким образом, искровая маржа = $\$35.16/10^6$ БТЕ$- \$9.00/10^6$БТЕ $= \$26.16/10^6$

Следовательно, электроэнергия на $26.16/$10^6$ БТЕ дороже природного газа. Распределение искры такой величины (значительно превышающее $12/$10^6$ БТЕ) соответствует всем требованиям СВЭТ, если выполнены первые два условия.

Тем не менее, определение экономической целесообразности системы СВЭТ является более сложным, чем простой расчет распространения искры. Экономический анализ первого порядка выполнимости системы СВЭТ требует рассмотрения операционной стратегии объекта-кандидата. Рассмотрим пять наиболее распространенных операционных стратегий (обозначенных буквами от A до E), изображенных на рис. 11.6. На рисунке осями являются тепловая энергия и электроэнергия. Три пунктирные линии представляют характеристики первичного двигателя. Чем больше уклон, тем больше электроэнергии вырабатывается для данного количества восстановленной тепловой энергии. Из-за различий в потребностях в электрической и тепловой энергии положение A, которое иллюстрирует идеальное соответствие между тепловыми и электрическими требованиями, практически никогда не выполняется. Позиции B – E, однако, представляют разные, но реалистичные стратегии. Для позиции B потребность в электрической энергии удовлетворена, но восстановленная тепловая энергия больше, чем требуется. Если соседняя установка не может приобрести избыточную тепловую энергию, она должна быть выброшена в атмосферу, что сводит на нет экономический эффект от использования части восстановленной энергии. Положение C соответствует требованиям по тепловому режиму, но не соответствует электрическим требованиям. Электричество должно быть приобретено из сети. Условие C– это общая операционная стратегия для системы СВЭТ. Во многих случаях подключение к сети обеспечивает резервирование мощности для объекта. Для положения D электрическая нагрузка удовлетворяется, но тепловые потребности не удовлетворяются, поэтому необходимо обеспечить дополнительную тепловую энергию. Условие D может быть полезной операционной стратегией. Позиция E означает удовлетворение потребностей в тепловой энергии, но вырабатывает избыточную электроэнергию, которая должна быть продана. Если избыточная мощность не может быть продана по цене, достаточной для оплаты стоимости генерации, вариант E не является экономически оправданным и редко указывается.

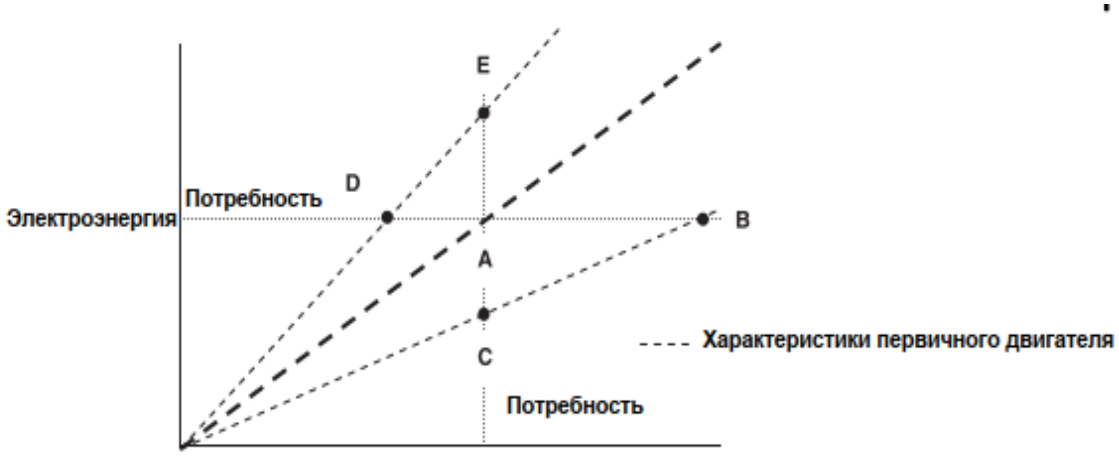


Рис. 11.6 Стратегия эксплуатации СВЭТ системы.

В таблицах 11.2 и 11.3 представлены счета за коммунальные услуги за год и структуры тарифов на коммунальные услуги для производственного объекта. Рассмотрим сначала счет за электричество (Таблица 11.2). Коммерческие и промышленные графики тарифов на электроэнергию обычно включают плату за энергию и потребление и могут включать такие элементы, как тарифы на коэффициент мощности и тарифы на время суток или время года. Счет за электроэнергию, показанный в таблице 11.2, содержит плату за энергию, спрос и коэффициент мощности, а также потребительские кредиты («Прочие расходы»). Электроэнергия выражается в киловатт-часах и тарифицируется с определенной скоростью. Потребность– это максимальная поддерживаемая (обычно в течение 15 или 30 минут) мощность, потребляемая из сети за расчетный период. После установки максимальное требование не сбрасывается до начала следующего расчетного периода. График тарифов, показанный в таблице, относительно прост; Графики ставок во многих случаях более сложны. Как правило, природный газ оплачивается только как плата за энергию. Обычные единицы выставления счетов за 100 или за 1000 кубических футов (как определено ранее).

Таблица 11.2 Пример счета за коммунальные услуги: счет за электричество и структура тарифов.

Месяц	Энергопотребление (кВтч)	Стоимость использования (долл. США)	Максимальная потребляемая мощность (кВтч)	Выставленный спрос (кВт)	Стоимость спроса ($)	Плата в зависимости от коэффициента мощности (долл. США)	Ппрочие сборы (долл. США)	Стоимость TSI (долл. США)	Общая стоимость (долл. США)
август	1 518 000	50 428	2 259	2 338	22 344	825	(4 641)	1 155	70 111
сент	1 550 400	51 504	2 283	2 352	22 596	721	(4 719)	1 173	71 275
окт	1 331 400	44 229	2 244	2 354	22 187	1 153	(4 252)	1 064	64 382
нояб	1 331 700	44 239	2 130	2 235	20 992	1 102	(4 177)	1 046	63 202
дек	1 400 400	46 521	2 085	2 130	20 521	466	(4 258)	1 063	64 314
янв	1 337 700	44 438	2 094	2 126	20 615	336	(4 122)	1 032	62 300
февр	1 299 900	43 183	2 115	2 151	20 835	375	(4 056)	1 017	61 353
март	1 274 400	42 336	2 079	2 091	20 458	121	(3 964)	994	59 945
апрель	1 498 200	49 770	2 289	2 289	22 659		0(4 568)	1 137	68 998
май	1 490 400	49 511	2 364	2 364	23 445		0(4 598)	1 145	69 503
июнь	1 617 300	53 727	2 439	2 439	24 231		0(4 917)	1 220	74 260
июль	1 400 100	46 511	2 394	2 394	23 759		0(4 424)	1 105	66 951
Всего	17 049 900	566 398	26 775	27 262	264 642	5 099	(52.696)	13 151	796 593

TSI: налог, плата за обслуживание и потребительский кредит. График тарифов на электроэнергию. Коэффициент потребления: 0,03322 кВтч; тариф по заявочной стоимости: 9,15/кВт для первой 1000 кВт, 10,48 для всех дополнительных киловатт; плата за обслуживание: 50,0/месяц; Налоговая ставка: 1,5%.

Таблица 11.3 Пример счета за коммунальные услуги: счет за газ и тарифы.

Месяц	Потребление газа (ccf)	Стоимость потребления ($)	Стоимость газа ($/ccf)	СтоимостьTSI ($)	Общая стоимость ($)
август	191 467	48 699	0.254	742	49 441
сент	163 219	36 252	0.222	552	36 804
окт	177 653	47 262	0.266	720	47 982
нояб	193 294	51 088	0.264	778	51 866
дек	193 791	53 686	0.277	818	54 503
янв	181 893	43 480	0.239	662	44 142
февр	168 669	40 632	0.241	619	41 251
март	192 318	43 080	0.224	656	43 736
апрель	187 298	47 046	0.251	716	47 763
май	193 764	60 660	0.313	924	61 584
июнь	190 402	54 399	0.286	828	55 227
июль	180 018	52 418	0.291	798	53 216
Всего	2 213 786	578 702	0.261	8 813	587 515

TSI: налог, плата за обслуживание и потребительский кредит.
Налоговая ставка: 1,5%.

График тарифов на электроэнергию. Коэффициент потребления: 0,03322 кВтч; тариф по заявочной стоимости: 9,15/кВт для первой 1000 кВт, 10,48 для всех дополнительных киловатт; плата за обслуживание: 50,0/месяц; («Прочие расходы»).

Графики использования электроэнергии и газа на ежемесячной основе часто выявляют важные тенденции в использовании энергии и являются начальным этапом анализа моделей потребления энергии. Рисунки 11.7 и 11.8 содержат графическое представление использования энергии из таблиц 11.2 и 11.3.



Рис. 11.7 Потребление электроэнергии из таблицы 11.2.



Рис. 11.8 Потребление природного газа из Таблицы 11.3.

Тенденции, показанные на рисунках 11.7 и 11.8, типичны для производственных оборудований с большим потреблением электроэнергии и природного газа для производства энергии. Природный газ используется практически на постоянной основе в течение всего года, за исключением зимних месяцев. Это значит, что только небольшой процент природного газа используется для отопления помещений; таким образом, большая часть природного газа используется для производственного процесса. Аналогично, почти постоянное ежемесячное потребление электроэнергии, с увеличением примерно на 20% летом, подразумевает, что большая часть электроэнергии также используется для производства, а не для кондиционирования пространства.

Другим показателем является коэффициент использования электроэнергии. Коэффициент использования – это процент времени, в течение данного расчетного периода, когда пиковая потребность (киловатты) должна использоваться для учета общего потребления энергии (киловатт-часы). Потребление энергии (в киловатт-часах), деленное на произведение максимальной потребляемой мощности (киловатт) и количества часов в расчетный период, дает коэффициент использования:

$$\text{Коэффициент потребления} = \frac{\text{Киловатт в час}}{\text{максимальное кол–во кВт*дни в расчеиной периоде*24 ч/день}} \qquad (11.1)$$

для расчета потребления и спроса, представленных в таблицах 11.2 и 11.3, месячный коэффициент потребления представлен на рис. 11.9.



Рис. 11.9 Коэффициент потребления на месяц

Как показано на рис. 11.9, коэффициент потребления варьируется от 0,8 до 0,95 и указывает на то, что в большей части времени устройство управляет оборудованием. В производственном сценарии процесс должен выполняться в три смены по 5-7 дней в неделю, чтобы достичь такого высокого

коэффициента потребления. Устройства с высоким коэффициентом потребления электроэнергии являются хорошими кандидатами для генерации на площадке, поскольку первичный двигатель/генератор большую часть времени будет работать в условиях пиковой нагрузки.

Пример 11.2
На основе трех атрибутов СВЭТ:
1) потребление для производства электроэнергии;
2) потребление восстановленной тепловой энергии;
3) достаточная «искровая маржа».
Является ли объект, чьи счета представлены в таблицах 11.2 и 11.3, кандидатом для дальнейшего изучения системы СВЭТ?

Решение: таблицы 11.2 и 11.3 и рисунки 11.7, 11.8 и 11.9 содержат информацию, полезную для анализа трех вопросов. Киловатт-час и на 100 куб.футов, используемых предприятием, безусловно, отвечают первым двум условиям. Искровая маржа рассчитывается позже. Средняя стоимость 100 кубических футов составляет $ 0,265, поэтому средняя стоимость за 10^6 БТЕ (BTU) составит

Стоимость природного газа $= \frac{\$0.265}{\text{ccf}} \times \frac{\text{ccf}}{100\,000\ \text{БТЕ}} \times \frac{10}{10} = \frac{\$2.65}{1\,000\,000\ \text{БТЕ}} = \$2.65/10^6$

Средняя стоимость 1 кВт-ч электроэнергии, включая спрос, плату за обслуживание и скидки, из таблицы 11.2

Стоимость на кВт/час = $\frac{\$796\,593}{17\,049\,900} = \$0.47/\ \text{кВтч}$

Таким образом

Стоимость электроэнергии = $\frac{\$0.047}{\text{кВтч}} \times \frac{\text{кВтч}}{3412\ \text{БТЕ}} \times \frac{10^6}{10^6} = \frac{\$14.58}{1\,000\,000\ \text{БТЕ}} = \$14.58/10^6$

$$= \$14.58/10^6\ \text{БТЕ} - \$2.65/10^6\text{БТЕ} = \$11.93/10^6\ \text{БТЕ}$$

Следовательно, искровая маржа

В пересчете на 10^6 БТЕ стоимость электроэнергии почти на 12 долларов больше стоимости природного газа. Эта величина искрового промежутка обычно считается положительным показателем для СВЭТ. Следовательно, все три атрибута удовлетворены, так что этот объект является кандидатом для дальнейшего исследования. Этот краткий анализ не подтверждает, что система СВЭТ является подходящей, но стоит дальнейшего исследования.

Если «краткий» анализ Примера 11.2 указывает только на то, что дальнейшее исследование уместно, что необходимо для следующего уровня технико-экономического обоснования? В разделе 11.4 рассматривается более сложная экономическая оценка пригодности системы СВЭТ.

11.4 Экономическая оценка пригодности комбинированных систем выработки энергии и тепла (СВЭТ)

Экономичность и выполнимость системы СВЭТ могут оцениваться на сеть с учетом ежегодных счетов за коммунальные услуги. В этом методе используется информация о потреблении энергии в сочетании с общепринятыми в отрасли показателями эффективности, как для традиционных компонентов, так и для компонентов СВЭТ, для оценки экономии, если таковая имеется, отталкиваясь от удовлетворения

потребностей в энергии с помощью системы СВЭТ. Приемлемые значения КПД компонентов и выработки электрической и тепловой энергии определяются следующим образом:

Традиционные	
Котел	η_{boiler} = 0:85
Центральная электростанция	η_{cpp} =0:35
Центральный охладитель	COP_{cc} =2:5
CHP	
Электричество (газовая турбина)	η_e = 0:30
Восстановленная тепловая энергия	η_r = 0:35−0:50
Абсорбционный охладитель	COP_{abc} □ 0:7−0:8

Приведем пример для всесторонней оценки пригодности данного процесса.

Пример 11.3
Выполнить оценку пригодности СВЭТ для счетов за коммунальные услуги, представленные в таблицах 11.2 и 11.3.
Решение: первым шагом в процедуре является установление режима работы (условия A – E на рис. 11.6) в соответствии с потреблением энергии. Соответствующий режим работы может быть получен путем вычисления отношения электрической энергии (выраженной в БТЕ) к энергии газа.

$$\text{Электроэнергия} = \text{потребление кВтч} \times 3412 \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}}$$
$$= 17\,049\,900\,\text{кВт ч} \times 3412 \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}}$$
$$= 58\,170 \times 10^6 \ \text{БТЕ}$$

И

$$\text{Энергия природного газа} = \text{потребление } 100\ \text{фут}^3 \times 100\,000 \ \frac{\text{БТЕ}}{\text{ccf}}$$
$$= 2\,213\,786\ \text{ccf} \times 100\,000 \ \frac{\text{БТЕ}}{\text{ccf}}$$
$$= 221\,400 \times 10^6 \ \text{БТЕ}$$

Тогда, соотношение электрической к газовой энергии становится:

$$\text{Соотношение энергии} = \frac{\text{Электроэнергия}}{\text{Природный газ}} = \frac{58\,170 \times 10^6}{221\,400 \times 10^6} = 0.263$$

Поскольку потребность в электроэнергии намного меньше потребности энергии газа, логическим выбором режима работы является случай D н 11.6. Режим D обеспечивает все необходимое электричество, но не соответствует тепловым требованиям. Природный газ, требуемый для газовой турбины для выработки требуемых киловатт-часов, может быть рассчитан путем деления электроэнергии, требуемой для газовой турбины для эффективной выработки электроэнергии η_e:

$$\text{Потребность природного газа} = \frac{\text{Потребность электроэнергии}}{\eta_e} = \frac{58\,170 \times 10^6\ \text{БТЕ}}{0.30} \frac{\text{ccf}}{100\,000\ \text{БТЕ}} = 1.939 \times 10^6\ \text{ccf}$$

Таким образом, газовая турбина, работающая с электрической эффективностью 30%, потребует 1,939 × 10^6 ccf для производства требуемых 17 049 900 кВт/ч. Тепловая энергия, извлекаемая из турбины – это природный газ, необходимый для эффективности восстановления η_r:

Восстановленная тепловая энергия = Восстановленный природный газ x η_e

= 1.939 x 106 ccf x 0.34 = 660 000 ccf

Однако для получения входного энергосодержания тепловой энергии, извлекаемой из котла, необходим КПД котла $\eta_{котел.}$:

$$\text{Тепловой эквивалент энергии} = \frac{\text{Восстановленная тепловая энергия}}{\eta_{котел}} = \frac{660\,000\,\text{ccf}}{0.85} = 776\,000\,\text{ccf}$$

Восстановленная тепловая энергия эквивалентна 776 000 ccf природного газа. Поскольку это количество значительно меньше требуемой тепловой энергии в 2 213 786 ccf, рекуперация тепловой энергии не превышает требуемой тепловой энергии. Рабочий режим D подтверждается в зависимости от использования коммунальных услуг в таблице 11.2. Общее требуемое потребление природного газа будет представлять собой природный газ, приобретаемый в настоящее время для удовлетворения потребностей в тепловой энергии, плюс дополнительный природный газ, необходимый для системы СВЭТ, за вычетом эквивалента тепловой энергии, извлеченного из выхлопа турбины. Для этого примера требуемый природный газ может быть высчитан таким образом,

Требуемый природный газ=В данный момент куплено+требуемый СВЭТ-эквивалент восстановленного=

$$= 2\,213\,786\,\text{ccf} + 1\,939\,000\,\text{ccf} - 776\,000\,\text{ccf} = 3.377 \times 10^6\,\text{ccf}$$

При средней стоимости $0.265/ccf и налоговой ставке 1,5% стоимость природного газа для работы установки с системой СВЭТ в режиме D будет

$$\text{Стоимость природного газа} = 3.377 \times 10^6\,\text{ccf} \times \frac{\$0.265}{\text{ccf}} \times 1.015 = \$908\,400$$

Из таблицы 11.1 разумная плата за эксплуатацию и обслуживание (O&M) газовой турбины составляет 1 ¢/кВт ч. Таким образом, стоимость O&M оценивается как

$$\text{Стоимость O\&M} = 17\,049\,900\,\text{кВт-ч} \times \frac{\$0.01}{\text{кВтч}} = \$170\,499$$

Общая стоимость эксплуатации системы СВЭТ представляет собой сумму стоимости природного газа и затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание:

$$\text{Общая стоимость} = \$908\,000 + \$170\,499 = \$1\,078\,499$$

Стоимость эксплуатации данной системы, электричества и природного газа, составляет 1 384 000 долларов. Таким образом, экономия при переходе на систему СВЭТ составит

$$\text{Экономия при СВЭТ} = \$1.384 \times 10^6 - \$1.078 \times 10^6 = \$306\,000$$

Эксплуатация системы СВЭТ с газовой турбиной позволит сэкономить 306 000 долларов в год по сравнению с существующей традиционной системой. Для режима работы D все требования к электроэнергии выполнены, и установка может быть отключена от сети. Тем не менее, из-за отсутствия надежного энергоснабжения установка не будет работать во время проверок системы СВЭТ или простоев, если не будут предоставлены резервные источники. Во многих случаях выбор будет сделан для поддержания подключения к сети, чтобы обеспечить непрерывную работу, если система СВЭТ не работает. Анализ затрат будет проводиться при условии отсутствия платы за подключение к сети.

Если турбина будет работать в режиме полной нагрузки, необходима турбина с электрической мощностью не менее 2439 кВт (максимальная потребность из таблицы 11.2). Номинальная турбина 2,5 МВт будет соответствовать существующим потребностям, но недостаточна для расширения. Ориентировочная стоимость за киловатт для установленной системы СВЭТ с газовой турбиной составляет 1200 долларов США, из таблицы 11.1. Система СВЭТ с газовой турбиной мощностью 2,5 МВт оценивается в 3 000 000 долларов США. Простой период окупаемости, основанный только на

стоимости турбины (без затрат на теплообменник), составит

$$\text{Простой период окупаемости} = \frac{\$3\,000\,000}{\$306\,000/\text{year}} = 9.8 \text{ лет}$$

Безусловно, это относительный показатель, так как вычисления производились без дополнительной информации об объекте, в том числе политик управления. В дополнение к экономике, рассмотренной в этом примере, другие факторы также будут влиять на решение о преобразовании в систему СВЭТ. Эти факторы включают, но не ограничиваются ими, качество электроэнергии, CO_2 подводы, «экологически чистые» политики компании и проблемы энергетической безопасности.

Предыдущий пример иллюстрирует подход первого порядка к оценке экономической целесообразности системы СВЭТ. Для систем, работающих в режиме С, будет использоваться аналогичная процедура, за исключением того, что электричество придется покупать в сети. Стоимость этой мощности будет определяться графиком тарифов на электроэнергию.

Пример 11.3 содержал подробное объяснение процедуры, использованной в процедуре оценки первого порядка, и результаты были получены «вручную». Более гибкий подход заключается в использовании вычислительной системы, такой как Mathcad, для выполнения вычислений. Пример 11.4 построен на основе подхода Mathcad к экономической оценке СВЭТ.

Пример 11.4

Определите экономию затрат и простой период окупаемости для установки, описанной в примере 11.3, если будет извлечено 50% энергии отработавших газов. По сути, это представляет собой максимальный уровень восстановления, который можно ожидать. Используйте Mathcad.

Решение: будем следовать той же процедуре, что и в примере 11.3, за исключением того, что восстановленная энергия ηr будет равна 0,50 вместо 0,34. Рабочий лист Mathcad содержится на рис. 11.10. Имена переменных в рабочей таблице аналогичны именам в примере 11.3, за исключением того, что вместо «природного газа» используется NG, а EE - электроэнергия. Если будет получено больше тепловой энергии, экономия увеличится до 403 400 долларов, а срок окупаемости снизится до 7,4 лет.

кВт := кВт ч ccf := 100·ft³

$\eta_e := 0.30$ $\eta_r := 0.50$ $\eta_{котла} := 0.85$

EEy := 17049900·кВт потребность (час) := 26775·kW NGy := 2213786·ccf

$UFy := \frac{EEy \cdot 12}{\text{потребность (час)} \cdot 8760}$ UFy = 0.872

При эффективности генерации 30% природный газ, необходимый для выработки электроэнергии,

$NGelecy := \frac{EEy \cdot ccf}{\eta_e \cdot 100000 \cdot BTU}$ NGelecy = 1.939×10^6 ccf $NGccfy := \frac{0.265}{ccf}$

$Erecy := NGelecy \cdot \frac{\eta_r}{\eta_{котел}}$ Erec = 1.141×10^6 ccf

Это режим D описательной части, для которой подается электричество. Требуемый природный газ равен старый плюс новый (выработка электроэнергии) минус восстановленная.

NGreqy: = NGy + NGelecy – Erecy NGreqy = 3.012×10^6·ccf NG – природный газ

NGcosty: = NGreqy·NGccfy·1.015 NGcosty = 8.102×10^5 Elec – электричество

OMcosty: = EEy·$\frac{0.01}{\text{kWh}}$ OMcosty = 1.705×10^5 OM- эксплуатация и обслуживание

CHPcosty: = NGcosty + OMcosty CHPcosty = 9.807×10^5 CHP - система CHP

ConvCost: = 796593 + 587515 ConvCost = 1.384×10^6 Conv cost - стоимость конверсии

CHPsavingy: = ConvCost – CHPcosty CHPsavingy = 4.034×10^5 Saving – экономия

TurbineCost: = $\frac{1200}{\text{kW}}$·2500·kW TurbineCost = 3×10^6 Turbine cost – стоимость турбины

Paybacky: = $\frac{\text{TurbineCost}}{\text{CHPsavingy}}$ Paybacky = 7.437 Payback – период окупаемости

Рис. 11.10 Решение в Mathcad (пример 11.4).

11.5 Критерии комбинированных систем выработки энергии и тепла, установленных Федеральной комиссией по регулированию в сфере энергетики и тепловой энергии

Процентная метрика, используемая на рисунках 11.1, 11.2 и 11.3, является тепловой эффективностью; однако электрический эквивалент БТЕ является более «полезным», чем тепловая

$$\eta_{\text{тепловая}} = \frac{P+Q}{F} \tag{11.2}$$

энергия БТЕ, особенно при низкой температуре. Чтобы учесть разницу в полезности электрического эквивалента БТЕ по сравнению с термическим БТЕ, Федеральная комиссия по регулированию в сфере энергетики и тепловой энергии (FERC) установила несколько модифицированных определений эффективности. Если F - вход энергии топлива, P - полезная выходная мощность (эквивалент электричества в БТЕs), а Q – связанная тепловая энергия, обычное определение теплового КПД для системы СВЭТ:

Чтобы признать идею о том, что электрический эквивалент БТЕ является более ценным, чем тепловое БТЕ, FERC на 50% дисконтирует связанную тепловую энергию и определяет модифицированный тепловой КПД как

$$\eta_{\text{FERC}} = \frac{P+(Q/2)}{F} \tag{11.3}$$

Эффективность использования топлива (FUE или η_{FU}), также называемая электрической эффективностью, выражает эффективность СВЭТ как отношение электрической мощности к чистому расходу топлива, где потребление топлива исключает ту часть топлива, которая производит полезную тепловую энергию и определяется следующим образом

$$\eta_{\text{FU}} = \frac{P}{F-(Q/\eta_Q)} \tag{11.4}$$

где η_Q - тепловой коэффициент выработки тепловой энергии; $\eta_Q \approx 0{,}8$ для котла.

Поскольку при рассмотрении системы СВЭТ целесообразна экономия топлива на СВЭТ по сравнению с отдельными операциями на электроэнергию и тепловую энергию, экономия S в виде дробной энергии получается

$$S = 1 - \frac{F}{(P/\eta_P)+(Q/\eta_Q)} \tag{11.5}$$

где знаменатель выражает топливо, необходимое для раздельного производства энергии и тепловой энергии, с ηP и ηQ - тепловая эффективность устройств мощности и тепловой энергии.

Пример 11.5 представляет подробности реализации различных определений для примера СВЭТ, рассмотренного ранее в этой главе.

Пример 11.5

Определите $\eta_{thermal}$, η_{FERC}, η_{FU}, и S для работы системы, указанной в примере 11.4.

По результату решения примера 11.4, система работает в режиме D, в котором вырабатывается все необходимое электричество, но восстановленной тепловой энергии недостаточно для удовлетворения потребностей в тепле. Для выработки 17,049x10^6 кВт-ч необходимое количество топлива, природного газа (η_e=0:3) составляет 1,939x10^6 куб.футов (ccf), а извлеченная тепловая энергия составляет 9.699x10^{10} БТЕ =9.699x10^5 ccf. Преобразование электроэнергии в киловатт-часах в эквивалент 100 кубических футов (для удобства):

$$17.049 \times 10^6 \text{ кВтч} \times 3412 \times \frac{3412}{\text{кВтч}} \times \frac{\text{ccf}}{100\,000 \text{ БТЕ}} = 5.818 \times 10^5 \text{ ccf}$$

Эти значения соответствуют P=5,818x10^5ccf, F=1,939x10^6ccf и Q=9,699x10^5ccf. Тепловая эффективность:

$$\eta_{\text{тепловая}} = \frac{P+Q}{F} = \frac{5.818 \times 10^5 \text{ ccf} + 9.699 \times 10^5 \text{ ccf}}{1.939 \times 10^6 \text{ ccf}} = 0.80$$

Этот результат не должен вызывать удивления, так как для η_e = 0,30 и η_r = 0,50 сумма равна 0,80 для анализа первого порядка. Однако рассмотрим η_{FERC}:

$$\eta_{FERC} = \frac{P+(Q/2)}{F} = \frac{5.818 \times 10^5 \text{ ccf} + \frac{1}{2} \times 9.699 \times 10^5 \text{ ccf}}{1.939 \times 10^6 \text{ ccf}} = 0.55$$

Как и ожидалось, η_{FERC} меньше, чем $\eta_{thermal}$; действительно, поскольку пример 11.4 представляет близкую к максимально реалистической производительности для системы СВЭТ, η_{FERC}=0,55 представляет близкую к максимальной эффективности FERC, которую может достичь система СВЭТ.

Эффективность использования топлива η_{FU} будет (η_Q = 0,85)

$$\eta_{FU} = \frac{P}{F-(Q/\eta_Q)} = 0.729$$

А экономия энергии S при η_e = 0,350 (в соответствии с центральной генерирующей установкой простого цикла) получается:

$$S = 1 - \frac{F}{(P/\eta_P)+(Q/\eta_Q)} = 0.308$$

Следовательно, использование СВЭТ приводит к экономии топлива (природного газа) на 30% по сравнению с обычной системой. СВЭТ предлагает тепловые и экономические преимущества, как показано в следующем примере.

11.6 Пример комбинированной системы выработки энергии и тепла

Баптистский медицинский центр в Миссисипи (MBMC) в Джексоне, штат Массачусетс, является хорошим примером системы СВЭТ, которая имеет долгую историю экономического успеха и надежности. Рис. 11.11 - фотография производственно-административного комплекса MBMC. MBMC – это больница с полным обслуживанием на 624 мест с медицинским персоналом в 500 человек и 3000 служащих. В 1990 году, стремясь сократить расходы на коммунальные услуги, больница исследовала возможность установки системы СВЭТ, которая в то время называлась системой когенерации. Энергетический профиль в 1990 году был следующим:

1) большая потребность в электричестве;
2) большая потребность в паре;
3) значительная разница в цене за БТЕ (искровая маржа) между электричеством и газом;

4) централизованная физическая установка; а также
5) небольшие ежедневные колебания в потреблении энергии



Рис. 11.11 Производственно-административный комплекс MBMC.

Таким образом, MBMC обладал всеми атрибутами, чтобы сделать СВЭТ экономически осуществимой. Результаты подробного инженерного исследования привели к следующим спецификациям и оценкам затрат для системы СВЭТ:
1) прогнозируемая экономия в размере 800 000 долл. США в год;
2) начальная стоимость системы составляет 4,2 миллиона долларов США;
3) простой срок окупаемости 6,3 года;
4) обеспечивает> 70% потребности в электроэнергии;
5) обеспечивает 95% необходимого пара; а также
6) обеспечивает 75% охлаждающей нагрузки (через абсорбционные охладители).

Схема системы представлена на рис. 11.12 и она аналогична схеме, представленной в рис. 11.5. Поскольку планировалось, что система сможет поставлять около 70% электроэнергии, объект был подключен к сети. Выхлоп турбины направляется на HRSG, который выпускает пар в двух абсорбционных охладителях и во время стерилизации.

Задвижка отвода (DV), управляемая HRSG, направляет выхлопной газ в HRSG или из перепускной трубы для поддержания необходимого давления пара. HRSG содержит канальную горелку, которая может работать в двух режимах: (1) с добавлением тепла до $5{,}8\times10^6$ БТЕ/ч для дополнения выхлопа турбины или (2) с прямой подачей до $41{,}5\times10^6$ БТЕ/ч, когда турбина не работает. Экономайзер использует оставшееся тепло для подогрева питательной воды котла и для добавления химикатов для обработки питательной воды.

Таблица 11.4 содержит подробное описание компонентов системы СВЭТ MBMC.

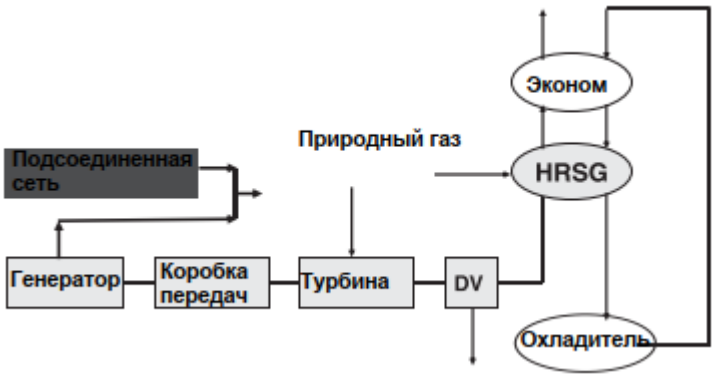


Рис. 11.12 Компоненты системы СВЭТ MBMC.

Система была запущена в 1992 году и используется по сей день. В таблице 11.5 представлены сводные данные об экономии и использовании за несколько лет эксплуатации СВЭТ.

Результаты, содержащиеся в таблице 11.5, демонстрируют ожидаемую экономию в первые годы эксплуатации. Система окупилась в течение 6 лет. В последующие годы экономия от системы была значительной. Однако одним неожиданным преимуществом стал опыт MBMC во время урагана Катрина. Этот ураган приблизился к Джексону и серьезно повредил электрическую сеть города.

Опыт MBMC во время Катрины показан на рис. 11.13. Примерно через 1 ч после того, как Катрина ударила по району, главная электросеть (MPG) вышла из строя. Распределительное устройство переключилось на альтернативную электрическую подачу, и городское давление воды упало до минимума. Пожарная служба Джексона разместила грузовик с насосом рядом с системой СВЭТ MBMC и обеспечивала водой на время чрезвычайной ситуации. MPG была восстановлена, но оказалась нестабильной. Через 5 часов после аварии было принято решение сбросить достаточную нагрузку, чтобы она могла полностью отключиться от сети и использовать систему СВЭТ в качестве единственного источника электроэнергии. Больничные лифты были переведены на резервный дизель-генератор, и использование магнитно-резонансной томографии было прекращено. MBMC работал в течение 52 часов на системе СВЭТ и был буквально островком света и комфорта во время чрезвычайной ситуации. Приблизительно через 57 часов после урагана «Катрина» MPG была восстановлена, и была начата нормальная работа. Во время этого непредвиденного события система СВЭТ продемонстрировала свои «изолированные» возможности и отказоустойчивость.

Таблица 11.4 Информация о компонентах системы СВЭТ MBMC

Компонент	**Описание**	**Производительность**
Турбина	Solar Centaur H	ISO 5600 л.с./4.3 МВт/13 800 В
		Природный газ
Контроллер	Allen Bradley PLC 5/20 микропроцессор	
Задвижка отвода		
HRSG	ABCO	30 000 фунтов/ч пара 125 фунтов на квадратный дюйм
	YorkParaflow с двойным эффектом	
		1250 тонны
Абсорбционный охладитель	двухкорпусной Trane	750 тонны
комплектное	Powell металлический с 4 отсеками	Синхронизация управления
распределительное устройство		2 с до вторичной сетки

Таблица 11.5 Ежегодный итог работы за несколько лет

Год	**Экономия электричества ($)**	**Стоимость природного газа ($)**	**Стоимость обслуживания ($)**	**Экономия ($)**
1994	1 250 000	402 000	159 000	686 000
1995	1 240 000	432 000	159 000	648 000
1996	1 400 000	468 000	163 000	770 000
Уклонение	от средней стоимости			701 000
2001	1 415 770	708 549	174 000	533 225
2002	1 587 074	776 950	174 000	636 123
2003	1 823 494	743 852	174 000	905 643
2004	2 022 926	972 401	174 000	876 524
Уклонение	от средней стоимости			737 879

Из-за проблем с поставками природного газа в Мексиканском заливе из-за Катрины цена на природный газ выросла примерно на $ 15/10^6 БТЕ после Катрины. При таком стечении обстоятельств электроэнергия, приобретаемая в сети, была дешевле, чем при использовании системы СВЭТ, поэтому MBMC использовал экономику, чтобы определить, будет ли использоваться сеть или генерируемая СВЭТ энергия в периоды чрезмерных затрат на природный газ. Как только цены на природный газ снизились с максимума после Катрины, нормальная работа СВЭТ была восстановлена. Однако MBMC

продолжает использовать свой экономический вариант, когда цены на природный газ превышают экономический максимум. Таким образом, система СВЭТ обеспечивает топливно-энергетическое разнообразие.

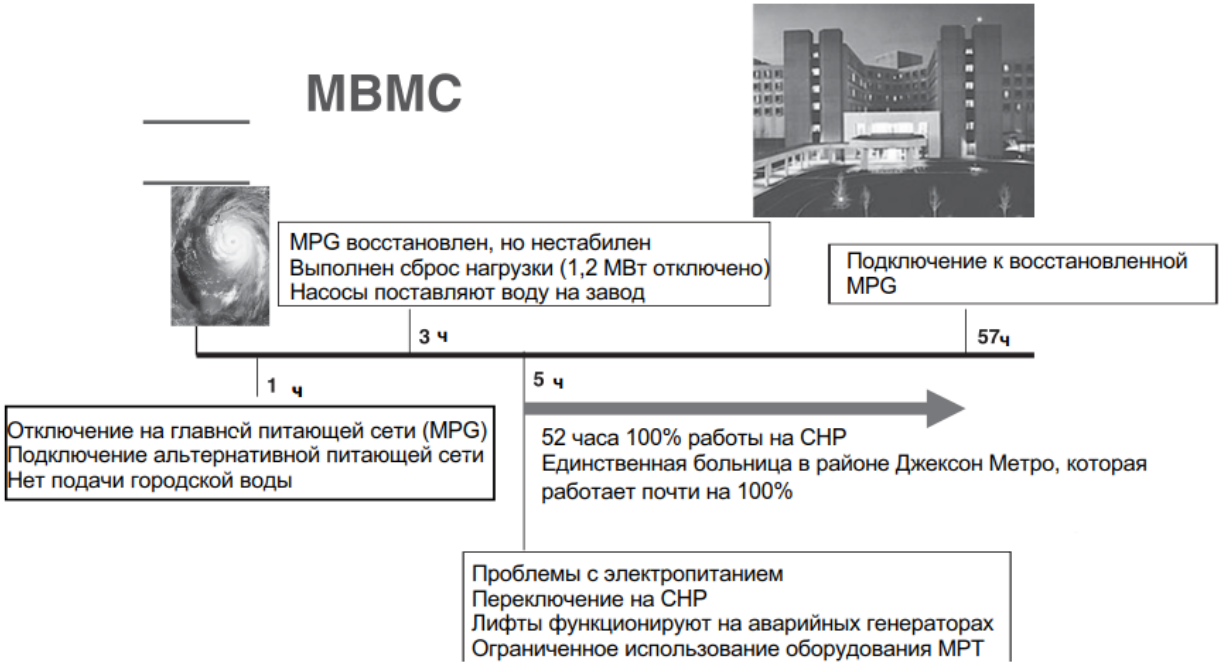


Рис. 11.13 Реакция системы MBMC на ураган Катрина.

Таблица 11.6. Детали и затраты на техническое обслуживание

Капитальный ремонт турбины	3.5 лет
Смена масла	По мере необходимости
Замена фильтра	3 месяца
Регулярные проверки	8 недель
Промежуточные проверки	6 мес Годовые проверки
-200 часов проверки в год	
Ежемесячный контракт на обслуживание	$14 500

Двумя ключами долгосрочного успешного функционирования системы MBMC СВЭТ были качественное обслуживание и опыт персонала. В таблице 11.6 приведены подробные сведения о процедурах технического обслуживания и стоимости по состоянию на лето 2007 года. Ежемесячная плата за обслуживание включает замену компонентов и плановые проверки. Персонал, работающий по контракту с Solar Turbines, предоставляет необходимые услуги на месте.

Уроки, извлеченные в ходе работы СВЭТ MBMC, можно обобщить следующим образом:
1) необходимость точного и последовательного мониторинга;
2) переключение на электросеть без штрафных санкций;
3) рассмотрение топливно-энергетических экономических альтернатив;
4) комплексная программа профилактического обслуживания;
5) экспертиза персонала электростанции.
Система СВЭТ при Баптистском медицинском центре в Миссисипи – **это** история успеха и пример того, насколько эффективными могут быть системы СВЭТ.

11.7 Заключение

СВЭТ – это новая версия старой парадигмы (когенерации), которая предлагает множество экономических, а также других эксплуатационных преимуществ. Помимо материалов, которые представлены здесь, можно получить значительно больше информации в сети Интернет. Есть основания полагать, что в ближайшие годы значение СВЭТ возрастет. СВЭТ предлагает улучшенную тепловую эффективность и является альтернативным потреблением существующих ресурсов ископаемого топлива.

Характеристики установленных систем СВЭТ в США по состоянию на апрель 2014 года были представлены EPA в Каталоге технологий СВЭТ (Darrow et al., 2015). Таблица 11.7 была сгенерирована из этих данных. Результаты интересные, с общей установленной мощностью 83 317 МВт в 4226 установках. Однако в процентном отношении, хотя 52% всех систем СВЭТ используют поршневые двигатели, их совокупная мощность (2288 МВт) составляет всего 2,7% от установленной мощности СВЭТ. Средняя мощность систем СВЭТ с поршневым двигателем составляет всего 1 МВт. Газовые турбины составляют 64% от установленной мощности, при этом средний размер установки составляет 80 МВт. Паровые турбины обеспечивают 32% мощности при среднем размере 36 МВт. Микротурбины и топливные элементы вместе обеспечивают только 0,2% установленной мощности при средней мощности менее 1 МВт. СВЭТ составляет около 7% от общей установленной электрической мощности в США, но около 14% установленной мощности предназначено для производства.

Министерство сельского хозяйства США поставило задачу увеличить мощность СВЭТ на 40 ГВт к 2020 году (USDOE и US EPA, 2012). Как показано на рис. 11.14, потенциал значительных дополнительных возможностей СВЭТ на производственной арене, безусловно, существует. Действительно, в последние несколько лет годовая установленная мощность СВЭТ в США составляла менее 1 ГВт в год (Палес и соавт., 2014). Общее мнение заключается в том, что реструктуризация графиков тарифов на коммунальные услуги и волатильность затрат на электроэнергию, особенно природного газа, были основными причинами небольшого увеличения установленной мощности.

Таблица 11.7 Характеристики установленных систем СВЭТ в США

Первичный двигатель	Количество	Процентная доля площадок	Мощность (МВт)	Средняя мощность (МВт)	Процентная доля мощности
Поршневой двигатель	2 194	51.9	2 288	1.0	2.7
Газовая турбина	667	15.8	53 320	80.0	64.0
Паровая турбина	734	17.4	26 741	36.0	32.1
Микротурбина	355	8.4	78	0.2	0.1
Топливная ячейка	155	3.7	84	0.5	0.1
Другой	121	2.9	806	6.7	1.0
Всего	4 226	100	83 317	19.7	100

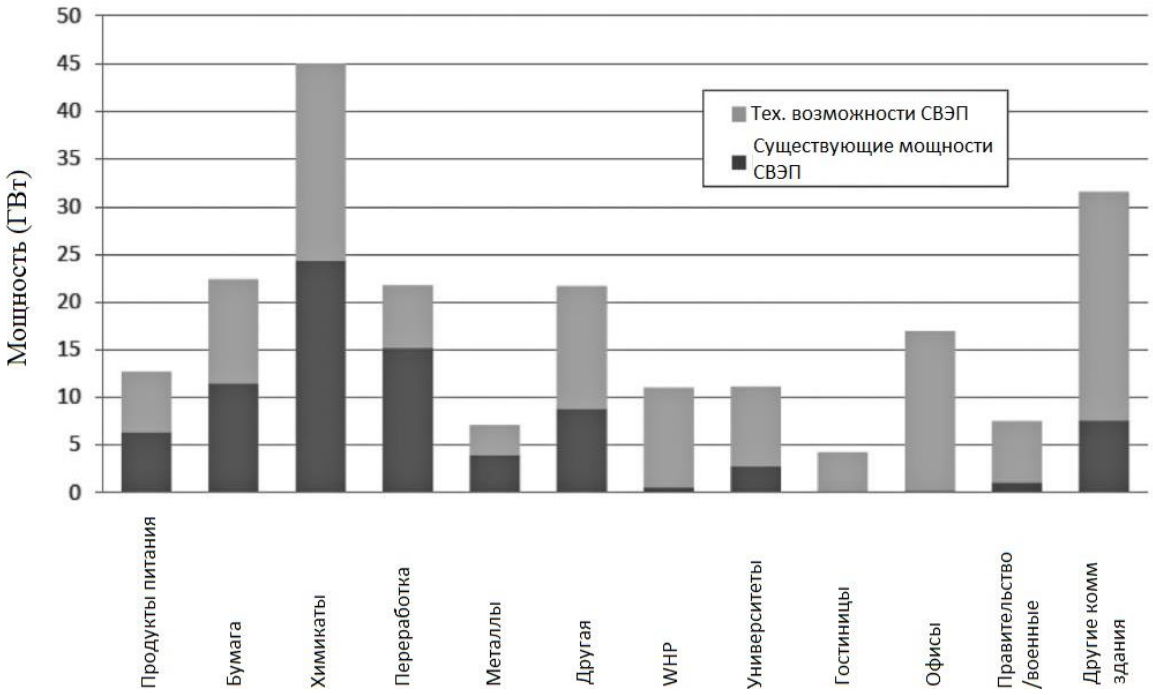


Рис. 11.14 Потенциал СВЭТ в производстве.
Источник: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/06/f17/СВЭТ% 20Deployment% 20Program.pdf.

Литература

ASHRAE (2015) Combined Heat and Power Design Guide. ASHRAE, Atlanta, GA. Beith, R. (2011) Small and Micro Combined Heat and Power Systems Advanced Design, Performance, Materials and Applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK.

Boyce, M.P. (2010) Handbook for Cogeneration and Combined Power Cycles, 2nd edn. ASME Press, New York.

Darrow, K., Tidball, R., Wang, J., and Hampson, A. (2015) Catalog of CBЭT Technologies. US Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/catalog_of_CBЭT_technologies.pdf (accessed October 21, 2016).

Horlock, J.H. (1997) Cogeneration: Combined Heat and Power. Krieger, Malabar, FL. Kamm, F. (1997) Heat and Power Thermodynamics. Delmar, Albany, NY.

Kehlhofer, R, Bachman, R., Nielsen, H., and Warner, J. (1999) Combined Cycle Gas and Steam Turbine Power Plants. PennWell, Tulsa, OK.

Kolanowski, B.F. (2000) Small-scale Cogeneration Handbook. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

Kreith, F. and West, R.E. (1997) CRC Handbook of Energy Efficiency, CRC Press, Boca Raton, FL.

NREL (2013) Distributed Generation Renewable Energy Estimate of Costs. http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html (accessed October 21, 2016).

Pales, A.F., Pielli, K., and Thornton, R. (2014) CBЭT/DHC Country Scorecard: United States. OECD/IEA, Paris http://www.iea.org/publications/insights/insightpublications/US_CountryScorecard_FINAL.pdf (accessed October 21, 2016).

Termuehler, H. (2001) 100 Years of Power Plant Development. ASME Press, New York.

USDOE and US EPA (2012) Combined Heat and Power: A Clean Energy Solution. US Department of Energy and US Environmental Protection Agency. http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/CBЭT_clean_energy_solution.pdf (accessed October 21, 2016).

12

Преобразование энергии биомассы

12.1 Введение

Биомасса определяется как любой материал биологического происхождения. Примерами могут служить зерновые и лесные продукты, а также остатки, связанные с зерновыми и лесными продуктами, а также животный жир и пищевые отходы.

В эпоху до двадцатого века (см. Рис. 1.4) древесину, биомассу, использовали в качестве основного топлива. Биомасса в виде твердого вещества имеет много недостатков по сравнению с жидкостями (такими как нефть) или газами (такими как природный газ). Целью многих процессов с использованием биомассы является преобразование твердого топлива в более полезные формы: газообразное или жидкое топливо. Биомассе уделяется большое внимание в средствах массовой информации и со стороны политических лидеров, как альтернативному источнику топлива, так и в качестве способа устранения зависимости США от импортируемых ископаемых видов топлива. Биомасса является привлекательной частью стратегии по снижению зависимости от импорта нефти из-зарубежа, поскольку она является внутренней, безопасной и распространенной. Книги, посвященные проблемам топлива из биомассы, включают книги Браун (2011), Карареда (2014), Драпчо и соавт. (2008) и Спейт (2008). Тем не менее, Крейтх и Уэст (2007) подчеркивают, что предоставление альтернативных источников топлива для транспорта не является долгосрочным решением проблемы зависимости от ископаемого топлива. В этой главе рассматриваются основные особенности процессов преобразования энергии биомассы.

Федеральные субсидии стали своего рода экономическим импульсом для топлива из биомассы. Оны были приняты для поддержки производства и использования топлива на основе биомассы, такого как этанол и биодизель, оба из которых обсуждаются в этой главе. Веб-сайт (http://www.afdc.energy.gov/laws/fed_summary), поддерживаемый Центром данных по альтернативным видам топлива Управления энергетической эффективности и возобновляемых источников энергии (EERE), предоставляет исчерпывающую подборку действующих федеральных законов и стимулов. На протяжении многих лет эти субсидии включали различные виды биотоплива и имели хаотическую историю истечения срока действия, продлений и ретроактивных продлений. Хорошим примером является налоговый кредит на этанол, который был введен более 30 лет назад и долгое время считался невосприимчивым к политическому давлению. Однако налоговый кредит на этанол был разрешен до 31 декабря 2011 года из-за растущего давления со стороны ряда организаций, убежденности в том, что расширение производства этанола из кукурузы привело к росту цен на продукты питания, и свидетельств того, что производство этанола развито. Например, объем акцизного налогового кредита на этанол составлял 0,51 долл. США за галлон чистого этанола (минимум 190 проб), смешанного с бензином, и был доступен тем, кто производил, продавал или использовал этанол в своей торговле или бизнесе. Квалифицированные производители или смесители биодизеля имеют право на налоговый кредит в размере 1 доллара США за галлон биодизеля (B100) или возобновляемого дизельного топлива, произведенного или использованного в процессе смешивания. Общая сумма кредитов, востребованных всеми производителями биодизеля, не может превышать годовой лимит налогового кредита на биодизель в размере 10 миллионов долларов США. Для получения данного кредита биодизель должен соответствовать спецификации ASTM D6751, а возобновляемое дизельное топливо определяется как возобновляемая, биоразлагаемая, неэфирная горючая жидкость, полученная из ресурсов биомассы, которая соответствует спецификации ASTM D975.

Сырье для биомассы (сырье) имеет значительные различия в химическом составе и структуре клеток. Эти особенности определяют продукты, которые могут быть получены из сырья биомассы, а также процессы и трудности в получении полезного топлива и других химических веществ из биомассы. Баунди и соавт. (2011) предоставляют всеобъемлющий обзор данных о биомассе из различных источников. Статистические данные и информация, которую они представляют, характеризуют биомассу от сырья до конечного использования.

Химические составы биомассы широко классифицируются как целлюлозная биомасса или крахмал/сахарная биомасса. Однако оба класса биомассы основаны на фотосинтезе с использованием солнечной энергии. Основной процесс фотосинтеза использует углекислый газ (CO_2) и воду (H_2O) для производства простых сахаров при наличии солнечной энергии, хлорофилла и других растительных ингредиентов. Характерная химическая реакция фотосинтеза для производства глюкозы ($C_6H_{12}O_6$)

$$6C\,O_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 - 480\ \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \qquad (12.1)$$

Подробный химический способ получения глюкозы, представленный уравнением 12.1, довольно сложен, но конечными продуктами являются глюкоза и кислород. Энергия поступает от Солнца, но, как указано в Таблице 1.3 и подтверждено Дешером (1994), в то время как эффективность локального преобразования может достигать нескольких процентных пунктов, глобальная эффективность фотосинтеза может составлять всего 0,3%. Растения используют сахар, полученный в результате реакций, например, представленной в уравнении 12.1, для производства множества химических веществ, необходимых для роста и жизненных процессов. Одним из главных преимуществ при продаже биомассы является потенциальное использование CO_2, парникового газа, для производства топлива (энергии) и кислорода.

Действительно, одна из главных достоинств биомассы заключается в том, что она может быть CO_2-нейтральной. Центральная концепция CO_2-нейтрального топлива из биомассы заключается в том, что CO_2, образующийся при сгорании, уравновешивается CO_2, включенным в процессе фотосинтеза в процессе роста. Получается, что CO_2, полученный в результате сбора и сжигания биомассы, полностью компенсируется ростом биомассы. Но, как указывает Шоберт (2014) и другие, этот баланс трудно достичь из-за множества причин, наиболее важными из которых являются потеря CO_2 в почве и образование CO_2 топливом, необходимым для возделывания, сбора урожая и обработки биомассы. Кроме того, временные рамки, необходимые для роста биомассы, могут составлять от нескольких лет до десятилетий, в зависимости от конкретной биомассы. Еще одна экологическая проблема, связанная с сжиганием биомассы, заключается в том, что в результате процесса сжигания образуются выбросы, которые могут содержать различные виды загрязняющих веществ, включая окись углерода (CO), оксиды азота и твердые частицы золы/сажи.

12.2 Доступность биомассы

Веб-сайт Министерства энергетики США (DOE) EERE (www.eere.energy.gov) содержит широкий спектр полезной информации, касающийся биомассы, и является хорошим источником дополнительной, общедоступной информации по темам, представленным в данном документе. Национальная лаборатория Ок-Риджа (ORLN) предоставляет отличный источник данных по энергии биомассы, периодически обновляемый; текущая версия - четвертое издание (Баунди и соавт., 2011).

Если следовать EERE ресурсы биомассы делятся следующим образом:

1) Сельскохозяйственные культуры - товарные продукты, такие как кукуруза, соя и пшеница, которые дают сахар и масла.

2) Остатки сельскохозяйственных культур - остатки (такие как стебли и листья) сельскохозяйственных культур, которые не собираются для коммерческого использования. Например, початок кукурузы – это стебли, листья, шелуха и початки кукурузы.

3) Травяные энергетические культуры - многолетние растения, которые собирают ежегодно после достижения зрелости. Это такие травы, как просо, мискантус, бамбук и овсяница.

4) Древесные энергетические культуры - лиственные деревья, собранные в течение 5–7 лет после посадки. Примерами являются тополь, ива, клен, вата и ликвидамбар.

5) Лесные остатки - биомасса, не заготовленная или удаленная во время лесозаготовок, и материалы, удаленные во время лесохозяйственных операций.

6) Водные культуры - водная биомасса, такая как водоросли.

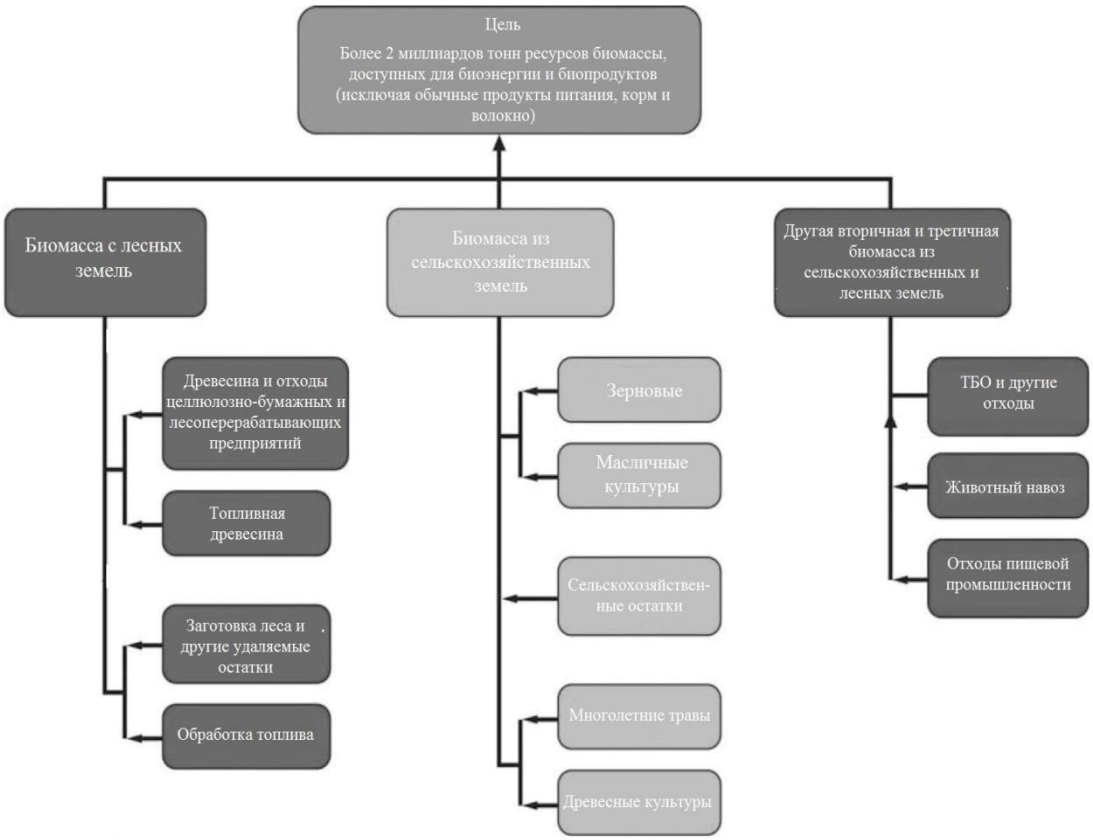
7) Технические культуры - культуры, разработанные для производства определенных химикатов или сырья, например Кенаф.

8) Отходы животного происхождения - отходы, полученные в результате сельскохозяйственных и перерабатывающих работ.

9) Муниципальные отходы - отходы жилого, коммерческого и промышленного секторов, которые содержат значительную биомассу с содержанием энергии.

На рис. 12.1 представлена разбивка источников биомассы. Источники включают биомассу с лесных и сельскохозяйственных угодий, а также вторичные источники от твердых бытовых отходов, навоза животных и остатков от переработки пищевых продуктов.

Большая часть США хорошо подходит для производства травяных и древесных энергетических культур в дополнение к сельскохозяйственным культурам. Рис. 12.2a иллюстрирует по регионам энергетические культуры, которые особенно подходят для этого региона. Таким образом, большая часть США, за исключением гор и пустынь на юго-западе, может производить сырье из биомассы. Рис. 12.2b показывает потенциал производства биомассы в США. На рис. 12.2 есть несколько сюрпризов. Производственный потенциал отслеживает модели сельскохозяйственного производства в США. На вопрос о доступности биомассы первоначально ответило исследование 2005 года, совместно спонсируемое министерством сельского хозяйства и энергетики США (Перлак и соавт., 2005). Этот отчет стал известен как «миллиардный отчет», потому что авторы пришли к выводу, что земельных ресурсов достаточно для поддержания бюджета биомассы в 1 миллиард тонн/год - достаточного количества биомассы для перемещения 30% ископаемого топлива, используемого для транспортировки.



ТБО – твердые бытовые отходы

Рис. 12.1 Источники биомассы.
Источник: https://public.ornl.gov/site/gallery/originals/Biomass_Analysis_for_t.jpg.

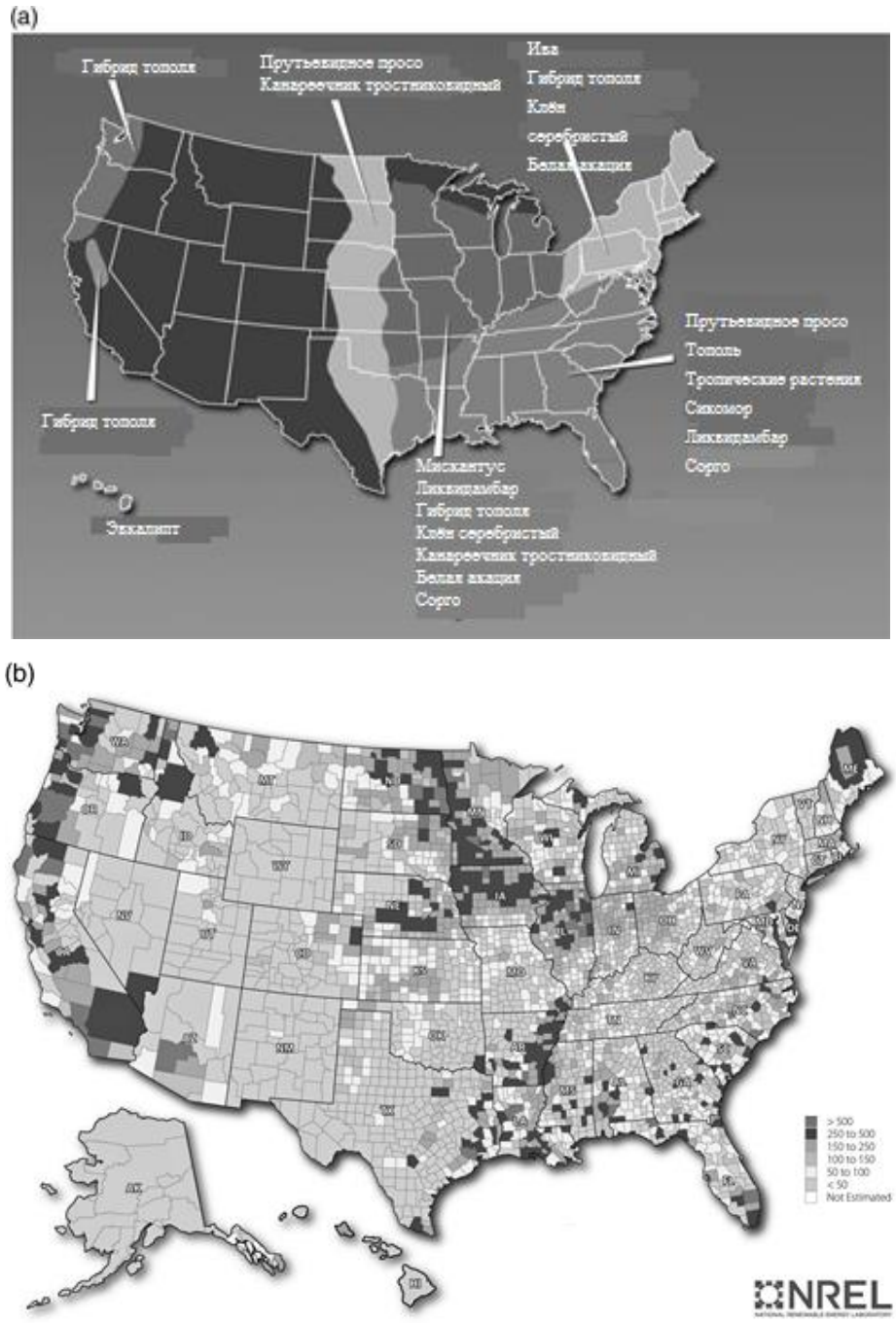


Рис. 12.2 Пригодность и потенциал энергетических культур биомассы. (а) Пригодность культур по регионам (ORNL 2000-00566A/abh).
Источник: http://web.ornl.gov/sci/ees/cbes/forums/Highlights%20of%2030%20years%20of%20Energy% 20Crop% 20Development.pdf. (б) Потенциал производства биомассы в США.
Источник: http://www.nrel.gov/gis/images/ biomass_2014/national_biomass_solid_total_2014-01.jpg.

Более того, Перлак и соавт. (2005) предполагают, что увеличение до более чем 1,3 миллиарда тонн в год возможно при относительно скромных изменениях в сельском и лесном хозяйстве. Они прогнозировали в общей сложности 1,366 млрд. тонн в год из 998 млн. тонн в год из сельскохозяйственных ресурсов и 368 млн. тонн в год из лесных ресурсов. В 2011 году Министерство энергетики выпустило обновление к «отчету о миллиардных тоннах», обновление США по миллиардам тонн: Поставка биомассы для биоэнергетики и биопродукции (Перлак и Стокс, 2011). Обновление является более полным и точным, чем версия 2005 года, и акцент смещен с стратегической оценки на всестороннюю оценку ресурсов. Тем не менее, выводы первоначальных и обновленных отчетов совпадают.

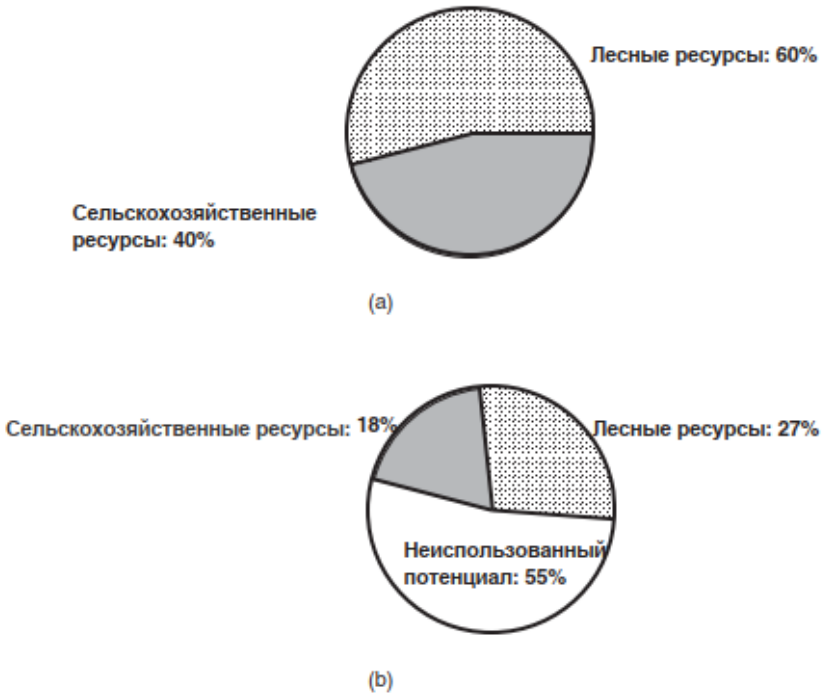


Рис. 12.3 Распределение источника сырья для биомассы: (a) использование биомассы в 2012 году; (b) использование и потенциал биомассы в 2012 году.

Обновленные данные подтверждают, что базовый прогноз на 1 млрд. тонн ресурсов биомассы к 2020 году остается в силе, а вариант с высокой урожайностью 2–4% может дать 1600 тонн к 2020 году.

Результаты данных в Книге данных по энергии биомассы (Баунди и соавт., 2011) были использованы для построения рис. 12.3. В 2012 году лесные ресурсы составляли 60% фактического использования, а оставшиеся 40% обеспечивались сельскохозяйственными ресурсами. Однако, как показано на рис. 12.3b, 55% ресурсов биомассы не были использованы.

12.3 Биомасса: Основные принципы

Основные продукты, представляющие интерес при переработке биомассы:

1) Жидкое топливо:
а) этанол - этиловый спирт для использования в качестве топлива;
б) метанол - метиловый спирт, образующийся в качестве побочного продукта газообразного топлива;
в) биодизельное топливо - химически модифицированные растительные масла, подходящие для дизельного топлива;
г) растительное масло - масла, содержащиеся в зернах и семенах;
д) пиролизное масло - жидкое топливо с теплотворной способностью 17–20 МДж/кг.
2) Газообразное топливо:
а) биогаз - смесь метана (CH_4) и CO_2, 55–70% CH_4 по объему;
б) генераторный газ - смесь легковоспламеняющихся газов, содержащие окись углерода (CO), водород (H_2), CH_4, азот (N_2), CO_2 и высшие гидраты;
в) синтез-газ - смесь CO и H_2.

Каждое из возможных видов топлива из биомассы будет рассмотрено в разделе 12.5.



Рис. 12.4 Платформы биомассы. *Источник*: http://www.nrel.gov/docs/gen/fy04/36831g.pdf.

Министерство энергетики США классифицирует сырье из биомассы для топлива или других продуктов применительно к платформе. Две основные платформы для биомассы и их взаимосвязи с сырьем, процессами и топливом/продуктами показаны на рис. 12.4. Основными платформами, представляющими интерес, являются сахарная (или биохимическая) и синтез-газ (термохимическая) платформы. Сырье для биомассы используется на обеих платформах, при этом основным продуктом являются топливо и химикаты. Тем не менее, для обеих платформ топливо может использоваться в комбинированных системах выработки энергии и тепла (СВЭТ). Системы СВЭТ обсуждаются в главе 11.

Биомасса и биомасса для конверсии топлива тесно связаны с химией. Для установления единой основы введены определения, перечисленные в таблицах 12.1 и 12.2.

Таблица 12.1 Химическая формула и молекулярная масса.

Химическая формула	Молекулярная масса **(Г/г-моль)**
Ацетон, C_3H_6O	58.08
Этан, C_2H_6	30.07
Этанол (этиловый спирт), C_2H_5OH	46.07
Этилен, C_2H_4	28.05
Глицерин, [a] $C_3H_5(OH)_3$	92.094
Изопропанол, C_3H_8O	60.09
Метан, CH_4	16.0425
Метанол (метиловый спирт), CH_3OH	32.04
Фенол (гидроксибензол), C_6H_5OH	94.11
Сахароза, $C_{12}H_{22}O_{11}$	342.30

a) Прозрачная, бесцветная, вязкая, сладкая на вкус жидкость, принадлежащая к семейству спиртовых органических соединений.

Таблица 12.2 Определения используемых терминов**.**

Ацетат	Искусственное текстильное волокно, произведенное из целлюлозы растительного вещества.
Зола	Порошкообразный остаток вещества, который остается после сжигания.
Углеводы	Соединения, которые включают сахара, крахмалы, целлюлозу и широкий спектр других клеточных продуктов. Название углеводы возникло потому, что многие из этих соединений имеют формулу $C_n (H_2O)_m$ (где m и n являются целыми числами), что, по-видимому, делает их «гидратом углерода», хотя позднее это описание оказалось неточным.
Целлюлоза	$(C_6H_{10}O_5)_x$, главная составляющая клеточных стенок растений.
Сложный эфир.	Любой класс органических соединений, которые вступают в реакцию с водой для образования спирта и органических или неорганических кислот.
Гемицеллюлоза	Комплексные углеводы, которые окружают волокна целлюлозы растительной клетки.
Гидролиз	Разрыв водородных связей в длинноцепочечных органических молекулах.
Лигнин	Комплексное кислородсодержащее органическое вещество, которое вместе с целлюлозой образует главный компонент древесины.
Белок	Любая группа азотистых органических соединений с высокой молекулярной массой, которые синтезируются растениями и животными, необходимы для жизненных процессов.
Крахмал	$(C_6H_{10}O_5)_n$, белый, гранулированный, органический химикат, который производится всеми зелеными растениями.
Сахар	Любое из многочисленных сладких, бесцветных, водорастворимых соединений, присутствующих в соке семян растений и молоке млекопитающих и составляющих простейшую группу углеводов.
Триглицериды	Сложные эфиры, в которых три молекулы одной или нескольких различных жирных кислот связаны со спиртом глицерином.

12.4 Биомасса: Характеристики

Три типа химических описаний используются для описания атрибутов биомассы: биохимический, технический и химический. Биохимический анализ описывает органическое соединение применительно к белкам, маслам, сахаров и волокон (лигноцеллюлоза). Для целлюлозных материалов расщепление лигноцеллюлозы на целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин имеет важное значение при разработке конкретных способов извлечения полезного топлива и других продуктов. При техническом анализе соединение разбивается на составляющие летучих веществ, золы и фиксированного углерода. Летучий материал – это фракция, которая может разлагаться под воздействием тепла (~ 400°C) в неокислительной среде. Химический анализ, как следует из его названия, позволяет получить компоненты, включая элементы (C, H, O, N, S и Cl), влагу и зольность. Все три вида анализов необходимы для понимания процессов биомассы. Таблица 12.3 иллюстрирует биохимический анализ некоторых распространенных видов сырья для биомассы. Исходные материалы делятся на те, которые основаны на пищевых продуктах, и те, которые основаны на лигноцеллюлозе. В таблице 12.4 показан технический анализ исходного сырья, а в таблице 12.5 представлены результаты химического анализа для большинства видов сырья, перечисленных в таблице 12.4. Широкий спектр жидкого и газообразного топлива может быть получен из биомассы. Топливо, полученное из биомассы, может использоваться непосредственно в некоторых двигателях внутреннего сгорания, может использоваться для получения энергии процесса или может быть далее переработано в более желательные виды топлива или химическое сырье. В разделе 12.5 рассматриваются характеристики некоторых видов топлива и продуктов на основе биомассы.

12.5 Виды топлива на основе биомассы и продукты

12.5.1 Этанол

Этанол (C_2H_5OH), также называемый этиловым или зерновым спиртом, является спиртом в «алкогольных» напитках и может использоваться в качестве топлива в модифицированных двигателях внутреннего сгорания. Номинальная теплотворная способность этанола в качестве топлива обычно указывается как 101 000 БТЕ/галлон, что составляет примерно три четверти от стоимости бензина (в объемном выражении). Таким образом, у транспортного средства, расход бензина которого составляет 24 мили/галлон, вероятно, расход этанола будет равен 18 милям/галлон.

Таблица 12.3 Биохимический состав исходного сырья биомассы (округленный до целых процентов).

	Протеин	Масло	Крахмал	Сахар	Волокно	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Лигнин	Другое
Продовольственный									
Кукуруза (зерно)	10	5	72	<1	12				
Пшеница (зерно)	14	<1	80	<1	5				
Артишок	<1	<1	<1	75	25				
Сахарный тростник	<1	<1	<1	50	50				
Сорго	<1	<1	<1	50	50				
Целлюлозный									
Багасса						35	25	20	20
Кукурузная солома						53	15	16	16
Початки кукурузы						32	44	13	11
Пшеничная солома						38	36	16	10
Древесные культуры						50	23	22	5
Травянистые культуры						45	30	25	10
Макулатура						76	13	11	0

Источник: по материалам Госвами и соавт. (2000).

Таблица 12.4. Технический анализ общего сырья биомассы.

Сырье	HHV (МДж / кг)	летучие (%)	зола (%)	кокс (%)
Люцерна	18.45	73	7	20
Белая акация	19.71	81	1	18
Дуб красильный	18.65	86	1	13
Кедр	20.56	87	~0	13
Початки кукурузы	18.77	80	1	19
Кукурузная солома	17.65	75	6	19
Кукурузное зерно	17.20	87	1	12
лжетцуга тиссолистная	20.37	87	~0	13
Сосна, желтая	20.02	83	~0	17
Тополь	19.38	82	1	16
красное дерево	20.72	80	~0	20
Рис, шелуха	16.14	65	18	17
Рис, солома	14.56	62	24	13
Суданская трава	17.39	73	9	19
Жом сахарного тростника	17.33	74	11	15
Просо	18.64	81	4	15
Пшеничная солома	17.51	71	9	20

Источник: адаптировано из Госвами и соавт. (2000). HHV: более высокая теплотворная способность. Проценты округлены до целых значений.

Таблица 12.5. Химический анализ общего сырья биомассы.

Источник: адаптировано из Госвами и соавт. (2000).

Проценты округлены до целых значений.

Сырье	C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl (%)	Зола (%)
Белая акация	5	6	4	1	—	—	1
Дуб красильный	4	6	4	—	—	—	1
Початки кукурузы	4 7	6	4 5	—	—	—	1
Кукурузная солома	4 4	6	4 3	1	—	1	6
Кукурузное зерно	4 4	6	4 7	1	—	—	1
Лжетцуга тиссолистная	5 1	6	4 3	—	—	—	—
Сосна, желтая	4 9	6	4 4	—	—	—	—
Тополь	4	6	4	—	—	—	1
красное дерево	5 1	6	4 3	—	—	—	—
Рис, шелуха	4	4	3	—	—	—	18
Рис, солома	3	4	3	1	—	—	25
Жом сахарного	4 5	5	4 0	—	—	—	10
Просо	4	6	4	1	—	—	—
Пшеничная солома	4 3	5	3 9	1	—	—	11

Этанол используется для улучшения октанового числа и характеристик выбросов бензина и обычно используется в качестве 10% -ной смеси в «газохоле», называемом E10 (10% этанол и 90% бензин). Самая высокая смесь, E85, содержит 85% этанола и используется в топливных транспортных средствах. Большая часть (около 90%) этанола в США производится путем ферментации кукурузы или других видов сырья из биомассы. Остальные, называемые синтетическим этанолом, производятся из этилена, побочного продукта нефтепереработки, и используются в основном в промышленности. Этилен является одним из наиболее производимых органических химических веществ и играет важную роль в качестве промышленного сырья. Однако экстенсивное производство этанола из этилена на нефтяной основе не уменьшит зависимость от импортируемых ископаемых видов топлива.

Исходное сырье для брожения при производстве этанола должно содержать высокий уровень сахара. Сахарный тростник, сахарная свекла и сорго содержат большое количество подходящих сахаров. Сахарная свекла является основой для производства топливного этанола в Бразилии. Различные углеводы (крахмалы, гемицеллюлоза и целлюлоза) также могут служить в качестве сырья, если углеводы могут быть расщеплены на сахара, способные подвергаться ферментации. Кукуруза с высоким содержанием крахмала уже более двух десятилетий является основой производства этанола в США. Целлюлоза и гемицеллюлоза могут быть превращены в ферментируемые сахарные соединения, но процесс сложнее, чем для крахмалов.

Этанол, полученный из зерен, таких как кукуруза, начинается в виде водинистой жижы. После того, как крахмалы превращаются в сахара, сахара сбраживаются в этанол. В процессе ферментации биореакторы, вырабатываемые дрожжами или другими микроорганизмами, разлагают сахар на этанол и CO_2. Для производства этанола из глюкозы, $C_6H_{12}O_6$, химическая реакция будет таковой

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2 \qquad (12.2)$$



После ферментации необходима дистилляция, чтобы отделить этанол от воды. Основные этапы показаны на рис. 12.5.

Пример 12.1
Сколько этанола можно получить из тонны сахарозы?

Решение: в результате брожения сахарозы, $C_{12}H_{22}O_{11}$, с водой можно получить этанол и CO_2; химическое уравнение

$$C_{12}H_{22}O_{11}+H_2O\rightarrow 4C_2H_5OH+4CO_2$$

Молекулярные массы (выраженные в килограммах на килограмм моль) C, H, O и OH вычисляются следующим образом:

$$C_{мм}12.01\frac{кг}{кг\text{-моль}},\quad H_{мм}=1.008\frac{кг}{кг\text{-моль}},\quad O_{мм}=16.00\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$
$$OH_{мм}=O_{мм}+H_{мм}=17.008\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

Сахароза (SUC) обладает молекулярной массой

$$SUC_{мм}=12C_{мм}+22H_{мм}+11O_{мм}=342.30\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

Амолекулярные массы воды (WAT), этанола (ETH) и диоксида углерода (CO_2)

$$WAT_{мм}=2H_{мм}+O_{мм}=18.016\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$
$$ETH_{мм}=2C_{мм}+5H_{мм}+OH_{мм}=46.068\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$
$$CO2_{мм}=C_{мм}+2O_{мм}=44.01\frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

Для получения 1 тонны сахарозы вода, необходимая для реакции, и образовавшийся этанол и диоксид углерода составят:

$$WAT=\frac{WAT_{мм}}{SUC_{мм}}\times 1тонн=0.053тонн=105.3фунт$$
$$ETH=\frac{4ETH_{мм}}{SUC_{мм}}\times 1тонн=0.538тонн=1077\ фунт$$
$$CO2=\frac{4CO2_{мм}}{SUC_{мм}}\times 1тонн=0.514тонн=1029фунт$$

Хотя зерно является основным сырьем для производства этанола в США, значительная замена бензина этанолом на основе зерна создает серьезные проблемы. Доступность является основным ограничением. Если бы вся кукуруза в США использовалась для производства этанола, полученный этанол заменил бы только около 10% бензина (Шоберт, 2014). Следовательно, для 100% замены бензина этанолом производство кукурузы должно увеличиться в 10 раз. Учитывая количество обрабатываемых земель в США, такое увеличение невозможно. Кроме того, широкое использование

кукурузного зерна для этанола будет означать, что основной продовольственный запас будет направлен на непродовольственное использование. Из-за этих ограничений этанол из кукурузы не может рассматриваться как решение проблемы зависимости от нефти. Тем не менее, использование другого сырья биомассы для производства этанола, особенно использование целлюлозного сырья, предлагает значительный долгосрочный потенциал. Действительно, Министерство энергетики США объявило об инициативе в области биотоплива с целью снижения стоимости этанола на основе целлюлозы. Из-за этого потенциала дальнейшее исследование целлюлозного этанола является оправданным.

Конверсия целлюлозной биомассы в этанол включает три основных полимера (целлюлозу, гемицеллюлозу и лигнин), которые составляют клеточные стенки растения. В зависимости от растения клеточная стенка обычно состоит из 35–50% целлюлозы, 20–25% гемицеллюлозы и 10–25% лигнина. Целлюлоза - самая распространенная биомасса на Земле (http://genomicscience.energy.gov/research /DOEUSDA/)! С биохимической точки зрения целлюлоза является линейным полимером остатков глюкозы. Гемицеллюлоза представляет собой разветвленный сахарный полимер, образованный в основном из пятиуглеродных сахаров (пентозу) с некоторыми шестиуглеродными сахарами (гексозой). Лигнин является сложным, сшитым полимером, который ковалентно связан с гемицеллюлозой. Эти три полимера придают прочность зрелым клеточным стенкам, и эта прочность является одной из причин того, почему биомассе целлюлозы трудно расщепиться на составляющие ее соединения сахара. Процесс расщепления целлюлозной биомассы с целью экстракции сахаров называется гидролизом. Долгосрочным традиционным процессом является кислотный гидролиз, но считается, что процесс биохимического гидролиза потенциально способен превращать целлюлозную биомассу в количествах, достаточных для замены значительного количества бензина этанолом.

Биохимический гидролиз целлюлозной биомассы является сложным процессом, требующим детального понимания роли различных ферментов в расщеплении клеточной структуры до сахаров. Веб-сайт http://www.doegenomestolife.org/biofuels/ и Химмель (2008) являются отличными источниками дополнительной информации и подробностей о целлюлозной биомассе. По сути, ферментативное биохимическое превращение целлюлозной биомассы состоит из трех этапов: (1) предварительная обработка, чтобы сделать сложные полимеры более доступными для ферментативного расщепления, (2) использование соответствующих ферментов для гидролиза полимеров клеточных стенок растений (целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин) в сахара и (3) ферментация для превращения сахаров в этанол. На рис. 12.6, взятом с веб-сайта Национальной лаборатории Ок-Риджа, представлена блок-схема для производства этанола из целлюлозной биомассы и показана относительная сложность процесса. На рис. 12.7 показано, как может выглядеть установка для целлюлозного этанола при вышеперечисленных трех этапах.

Проблемой, связанной с зерновым этанолом, является соотношение энергии на галлон этанола к энергии, необходимой для производства галлона этанола, - энергетический баланс. Если отношение больше единицы, то этанол экономит энергию; если отношение меньше единицы, то производство этанола потребляет больше энергии, чем доступно в конечном продукте. Неудивительно, что различные группы, агентства и отдельные лица находятся на разных сторонах вопроса. Например, Министерство энергетики США является активным сторонником того, что этанол действительно экономит энергию. Крейтх (2007) соглашается с тем, что отношение энергетического содержания этанола (более высокая теплотворная способность) к потребляемой энергии из невозобновляемых источников энергии составляет 1,25, но он является активным сторонником этанола на основе целлюлозы с соотношением около 5. Тидвел и Вейр (1986) также согласны с Крейтхом, особенно если топливо, используемое для дистилляции, является частью потока отходов. Шоберт (2014) признает, что энергетический баланс для этанола может быть отрицательным. Пиментал в серии документов, статей и интервью (например, Пиментал, 2003) утверждает, что для производства этанола требуется больше энергии, чем он дает. В отчете Министерства энергетики США за 2010 год (Шапоури и соавт., 2010), основанном на данных 2008 года по ряду предприятий по производству этанола, делается вывод о том, что энергетическое соотношение этанола (энергия из галлона этанола/энергия, необходимая для производства галлона этанола) значительно больше единицы в энергоэффективных установках.

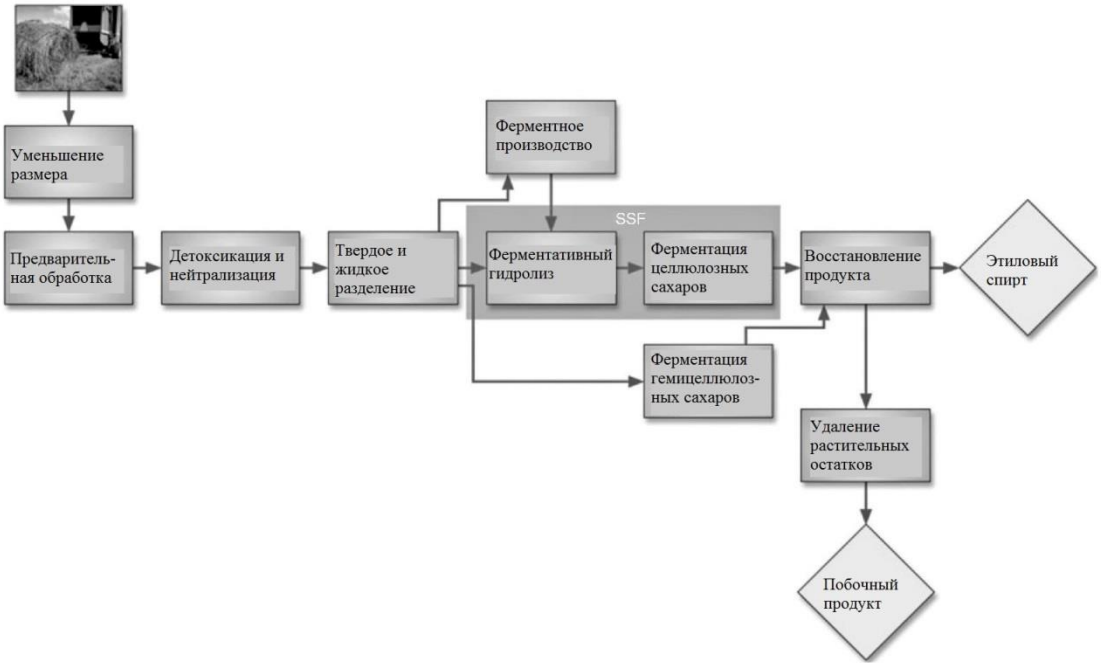


Рис. 12.6. Ферментативный биохимический процесс получения этанола из целлюлозной биомассы.
Источник: https://public. ornl.gov/site/gallery/originals/Traditional_Cellulosic.jpg

Утверждается, что производство этанола привело к существенному сокращению потребления энергии в 1990-х и эффективному соотношению производства и потребления в наши дни. Одним из главных преимуществ этанола на основе целлюлозы является то, что целлюлозный этанол требует гораздо меньше углеводородной энергии для выращивания, сбора урожая и производства. По сравнению с обычным бензином этанол производит меньше выбросов (NO_X, SO_X, сажа и CO_2).

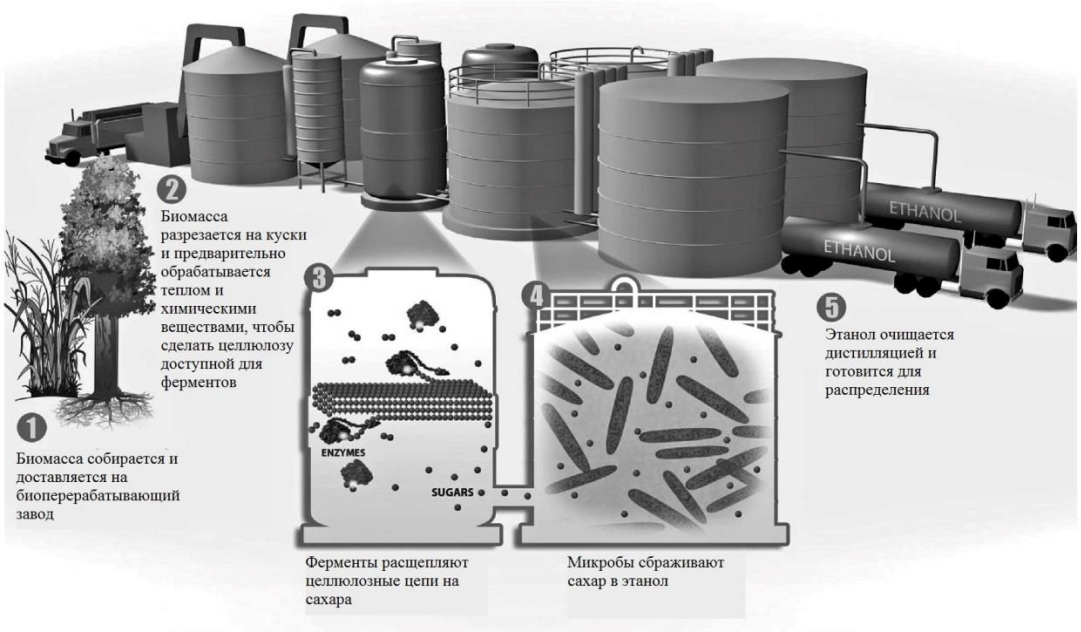


Рис. 12.7. Графическое представление установки по производству целлюлозной биомассы.
Источник: https://public.ornl.gov/site/gallery/detail.cfm?Id=252&topic=&citation=&general=&restsection

12.5.2 Метанол

Метанол (CH_3OH), также называемый древесным спиртом, может использоваться в качестве топлива в модифицированных двигателях внутреннего сгорания. Теплотворная способность метанола в качестве топлива номинально принимается равной 76 000 БТЕ/галлон, что составляет лишь около 58% от стоимости бензина (в объемном выражении). Таким образом, у транспортного средства, у которого расход бензина составляет 24 мили/галлон бензина, вероятно, будет расход метанола около 14 миль/галлон. Прямые метанольные топливные элементы (DMFC), которые используют метанол без обработки, обсуждались в главе 10.

Большая часть производимого в США метанола основана на природном газе в качестве сырья. Производство метанола из природного газа включает три химических процесса. Во-первых, природный газ (прежде всего CH_4) реагирует с паром с образованием синтез-газа (CO и H_2)

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \tag{12.3}$$

На втором этапе синтез-газ объединяется с CO_2 для изменения соотношения H_2 и CO

$$H_2 + CO_2 \rightarrow H_2O + CO \tag{12.4}$$

На третьей стадии процесса CO и вода в присутствии катализатора используются для производства метанола:

$$CO + 2H_2O \rightarrow CH_3OH \tag{12.5}$$

В то время как производство метанола из природного газа только увеличивает потребность в природном газе, важным наблюдением трехэтапного процесса является то, что только стадия 1, производство синтез-газа, включает природный газ. Синтез-газ также может быть получен из различных видов углеродистой биомассы, а также из угля. Таким образом, крупномасштабное производство метанола не должно зависеть от природного газа. Ввиду своей важности синтез-газ рассматривается в качестве отдельной темы в разделе 12.5.7.

Метанол имеет много преимуществ по сравнению с обычным бензином: температура пламени метанол-воздух ниже, чем у бензина, так что выработка NO_X будет снижаться; метанол не производит SOx, а также метанол будет ограничивать выбросы сажи и CO_2. Что касается недостатков, в дополнение к более низкой плотности энергии метанол представляет серьезную опасность для здоровья, если его проглотить, к тому же он растворяется в воде. Кроме того, поскольку метанол горит почти бесцветным пламенем, случайные возгорания могут быть трудно различимы.

12.5.3 Биодизель и растительное масло

По определению, биодизельное топливо является топливом, состоящим из алкиловых эфиров жирных кислот, и производится из сырья, такого как растительные масла или животные жиры. Это не особенно полезное определение для инженеров-нехимиков, поэтому необходимо дополнительное обсуждение. Из семян, орехов и других частей растения можно извлечь множество масел. Кроме того, переработанное растительное масло и животные жиры являются источниками биодизельного сырья. Примеры включают кукурузное масло, льняное масло, оливковое масло, соевое масло и подсолнечное масло. Хотя эти и подобные растительные масла можно использовать в качестве топлива в дизельных двигателях, прямое использование растительных масел в дизельных двигателях сокращает срок их службы и приводит к проблемам с техническим обслуживанием двигателя. Кроме того, растительные масла имеют более высокую вязкость (в 20 раз), чем дизельное топливо, и имеют более низкое цетановое число, что является показателем производительности. Шоберт (2014) утверждает, что ожидаемый межремонтный пробег двигателя 10 000 часов может быть сокращен до 600 часов при работе на подсолнечном масле или до 100 часов при работе на льняном масле. Однако, если растительное масло реагирует с метанолом, полученный продукт метилового эфира является универсальным биодизельным топливом. Общая химическая реакция

триглицерид +метанол→ метиловый эфир + глицерин
(растительное масло) (12.6)

Конкретный пример слегка упрощенной композиции с оливковым маслом, представленной Шоберт (2014)

$$(C_{17}H_{33}CO_2)3C_3H_5+3CH_3OH\rightarrow 3C_{17}H_{33}CO_2CH_3 + C_3H_5(OH)_3 \quad (12.7)$$

где $C_{17}H_{33}CO_2$ - жирно-кислотный компонент оливкового масла. Эта химическая процедура называется переэтерификацией. Полученный метиловый эфир представляет собой биодизельное топливо, которое обладает характеристиками, намного более близкими к характеристикам обычного дизельного топлива, чем исходное растительное масло. Как указывают ван Герпен и соавт. (2004), 100 фунтов масла и 10 фунтов метанола, введенных в реакцию переэтерификации, дадут около 100 фунтов биодизеля и 10 фунтов глицерина.

Пример 12.2

Убедитесь, что реакция переэтерификации оливкового масла соответствует утверждению ван Герпен и соавт. (2004) о биодизельном топливе.

Решение: уравнение 12.7 представляет реакцию. Молекулярные массы для C, H, O и OH приведены в решении примера 12.1.

Компонент жирной кислоты $(C_{17}H_{33}CO_2)_3$ оливкового масла имеет молекулярную массу

$$FA_{MM} = 3(17C_{MM} + 33H_{MM} + C_{MM} + 2O_{MM}) = 844.332 \frac{кг}{кг\text{-}моль}$$

Молекулярная масса оливкового масла:

$$PO_{MM} = FA_{MM} + 3C_{MM} + 5H_{MM} = 885.402 \frac{кг}{кг\text{-}моль}$$

Молекулярные массы метанола (MET), биодизеля (BD) и глицерина (GLY)

$$MET_{MM} = 3(C_{MM} + 3H_{MM} + OH_{MM}) = 96.126 \frac{кг}{кг\text{-}моль}$$

$$BD_{MM} = FA_{MM} + 3(C_{MM} + 3H_{MM}) = 889.434 \frac{кг}{кг\text{-}моль}$$

$$GLY_{MM} = 3C_{MM} + 5H_{MM} + 3OH_{MM} = 92.094 \frac{кг}{кг\text{-}моль}$$

Сколько нужно метанола и сколько образуется биодизеля и глицерина для производства 100 фунтов исходного сырья оливкового масла

$$MET = \frac{MET}{PO} \times 100 фунты 10.85 \text{ фунт}$$

$$BD = \frac{BD}{PO} \times 100 \text{ фунты} 100.45 \text{ фунт}$$

$$GLY = \frac{GLY}{PO} \times 100 \text{ фунты} 10.40 \text{ фунт}$$

Таким образом, утверждение в значительной степени верно. Более того, поскольку большинство растительных масел имеют одинаковые (большие) молекулярные массы и поскольку процесс переэтерификации включает изменения нескольких атомов, обобщение ван Джерпен и соавт. (2004), вероятно, будет подходящим практическим правилом для большинства реакций переэтерификации биодизеля.

Биодизель имеет вязкость, сравнимую с вязкостью обычного дизельного топлива и цетанового числа около 50. Кроме того, опыт эксплуатации биодизеля предполагает, что биодизель обеспечивает гораздо более длительный период между капитальными ремонтами, чем работа с растительными маслами. Он также горит чище, чем обычное дизельное топливо, и значительно снижает выбросы CO,

несгоревших и ароматических углеводородов, а также сульфатов и твердых частиц. Биодизель совместим с большинством технологий контроля выбросов. Смеси до 20% биодизеля с обычным топливом могут использоваться без каких-либо модификаций двигателя или инфраструктуры (хранение и распределение). Как и в случае с этанолом, смеси биодизеля помечены буквой B, за которой следует процент биодизеля; B20, обычно используемая смесь, состоит из 20% биодизеля. B5, B10 и B20 являются обычными биодизельными смесями. Тайсон и соавт. (2004) подсчитали, что существует достаточное сырье для производства биомассы, чтобы поставлять 1,9 миллиарда баррелей биодизеля, что составляет около 5% от использования обычного дизельного топлива на дороге. Биодизель, который классифицируется как топливо, должен производиться в соответствии с ASTM D6751. Необработанное растительное масло не соответствует спецификациям биодизеля и не является легальным моторным топливом (www.eere.energy.gov/RE/bio_fuels.html).
Три основных процесса производства биодизеля:

1) катализируемая основанием переэтерификация;
2) катализируемая кислотой прямая переэтерификация;
3) превращение масла в его жирные кислоты, а затем в биодизельное топливо.

Катализируемая основанием трансэтерификация является наиболее распространенной и обладает следующими преимуществами:

1) Процесс происходит при низкой температуре и давлении.
2) Эффективность конверсии высокая (98%).
3) Процесс включает в себя минимальные побочные реакции.
4) Преобразование в биодизель является прямым без промежуточных соединений.
5) Никаких специальных материалов в реакторе не требуется.

Поскольку биодизель может быть изготовлен из широкого спектра растительных масел и животных жиров, физические свойства биодизеля имеют некоторые различия. Общепринятые значения (http://biodiesel.org/docs/using-hotline/nrel-processing-and-use.pdf?Sfvrsn=4) представлены в таблице 12.6.

12.5.4 Жидкие продукты пиролиза

Пиролиз определяется как термическое разложение органических соединений в отсутствие кислорода. Древесный уголь является простым примером пиролиза, который происходит, когда древесина нагревается до температуры около 250°C, а влага и летучие продукты отгоняются под воздействием тепла. Полученный продукт имеет очень высокое содержание углерода. Пиролиз является эндотермической реакцией, которая приводит к разложению твердого топлива на различные газы, органические пары и жидкости. В противоположность этому, сгорание является экзотермической реакцией, которая включает быстрое окисление топлива с большим выделением тепла.

Таблица 12.6 Характеристики биодизельного топлива.

Удельный вес	0.87–0.89
Цитановое число	48–65
Более высокая теплотворная способность (БТЕ / галлон)	127 042

Поток продукта от пиролиза зависит от скорости и продолжительности нагревания. При добыче нефти с использованием быстрого пиролиза исходное сырье из целлюлозной биомассы измельчается до мелкой мощности, которая нагревается в течение короткого периода времени (<0,5 с) до 400–600°C, а затем быстро гасится. Быстрое охлаждение необходимо для предотвращения разложения жидкостей с высокой молекулярной массой на газы с низкой молекулярной массой. Жидкости от быстрых процессов пиролиза имеют низкую вязкость и имеют темно-коричневый цвет. Пиролизные жидкости представляют собой сложные кислородсодержащие смеси углеводородов, которые содержат

значительное количество воды. Такие жидкости очень нестабильны и очень коррозийны (низкий pH). Из-за коррозионной природы очень трудно хранить пиролизную жидкость, а высокое содержание кислорода и воды делает ее несовместимой с обычным углеводородным топливом. Следовательно, желательна конверсия пиролизной жидкости в более традиционные углеводородные топлива, хотя пиролизные жидкости могут использоваться вместо тяжелых топливных масел, таких как бункер С.

12.5.5 Биогаз

Биогаз представляет собой смесь CH_4 и CO_2, обычно 50–80% CH_4 и 50–20% CO_2 по объему, со следами H_2, CO и N_2. Международное энергетическое агентство предлагает компактный анализ производства и использования биогаза (IEA Bioenergy, 2005). Биогаз является конечным продуктом анаэробного сбраживания органических отходов, таких как навоз и пищевые отходы. Анаэробное сбраживание – это разложение таких отходов на газообразное топливо под действием бактерий в бескислородной среде. Подробное изложение тем анаэробного пищеварения предложено Chynoweth and Isaacson (2004). Биогаз отличается от природного газа тем, что природный газ состоит из более чем 70% CH_4, а остальные составляющие представляют собой другие углеводороды. Биогаз также называют болотным газом, попутным газом или газом для варки. Хотя биологические процессы, которые приводят к биогазу, являются относительно сложными, анаэробные системы обработки относительно просты. Биогаз производится поэтапно различными типами бактерий, которые разрушают сложные органические соединения. Следующие четыре стадии, связанные с функцией бактерий, образуют общепринятый путь от органических отходов к биогазу: (1) гидролитические бактерии расщепляют отходы на сахара и аминокислоты; (2) ферментативные бактерии превращают сахара и аминокислоты в органические кислоты; (3) ацидогенные бактерии превращают органические кислоты в H_2, CO_2 и ацетат; и (4) метаногенные (CH_4-образующие) бактерии производят биогаз из уксусной кислоты, H_2 и CO_2.

Анаэробная обработка происходит в герметичной камере, называемой варочным котлом. Дайджесты могут работать в пакетном режиме или в непрерывном режиме. Непрерывные варочные котлы производят устойчивый поток биогаза и обычно связаны с крупномасштабной работой. Процесс обработки чувствителен к температуре; требуется температура не менее 68°F, но возможны температуры до 150°F. Чем выше температура, тем короче время процесса и меньше объем варочного котла, но высокотемпературные варочные котлы сложнее в эксплуатации и обслуживании и требуют тщательного контроля. Бойл (2004) утверждает, что типовой анаэробный реактор может производить 200–400 $м^3$ биогаза с содержанием CH_4 50–75% на тонну сырья. Типовой анаэробный варочный котел состоит из резервуара для предварительного смешивания, сосуда для варочного котла, системы, в которой используется биогаз, и средства для распространения или распределения сброженных сточных вод. На рис. 12.8 представлена схема типового серийного анаэробного реактора. Во многих случаях «система» представляет собой двигатель-генераторную установку. Пунктирная линия от системы до варочного котла представляет собой поток энергии, направляемый из системы в варочный котел для поддержания температуры варочного котла.

Агентство сельского хозяйства и развития сельских районов Альберты (Канада) активно участвует в продвижении анаэробных реакторов для сельскохозяйственных отходов. Рис. 12.9, взятый с веб-сайта агентства, является примером анаэробной системы варочного котла, которая использует навоз и обеспечивает возможность использования биогаза на месте в когенерационной установке, а также для перехода на природный газ для соединения трубопровода. Кроме того, предоставляются концентрированные питательные вещества и вода из стоков. CO_2 и вода должны быть удалены, оставляя в основном CH_4, если биогаз должен быть переработан до природного газа и подан в трубопровод.

Агентство по охране окружающей среды США оказывает помощь в решении вопросов, связанных с загрязнением земель; подробности доступны на https://www.epa.gov/lmop. На заводе по переработке отходов Тилламук (http://www.potb.org/hooley-digester/), расположенном в Тилламуке, штат Орегон, используется навоз из обширных молочных ферм, которые поддерживают знаменитую сыроварню Тилламук в этом районе. TillamookFacility имеет два 400 000 галлоновых варочныхо котлов для производства биогаза, который используется для работы двух подключенных к сети генераторов мощностью 200 кВт/с. приводом от двигателя.

12.5.6 Энергетический газ

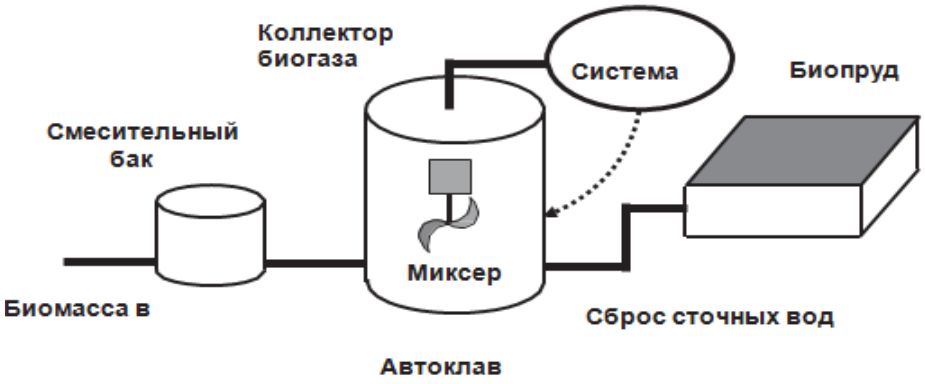


Рис. 12.8 Схема анаэробного биорекатора

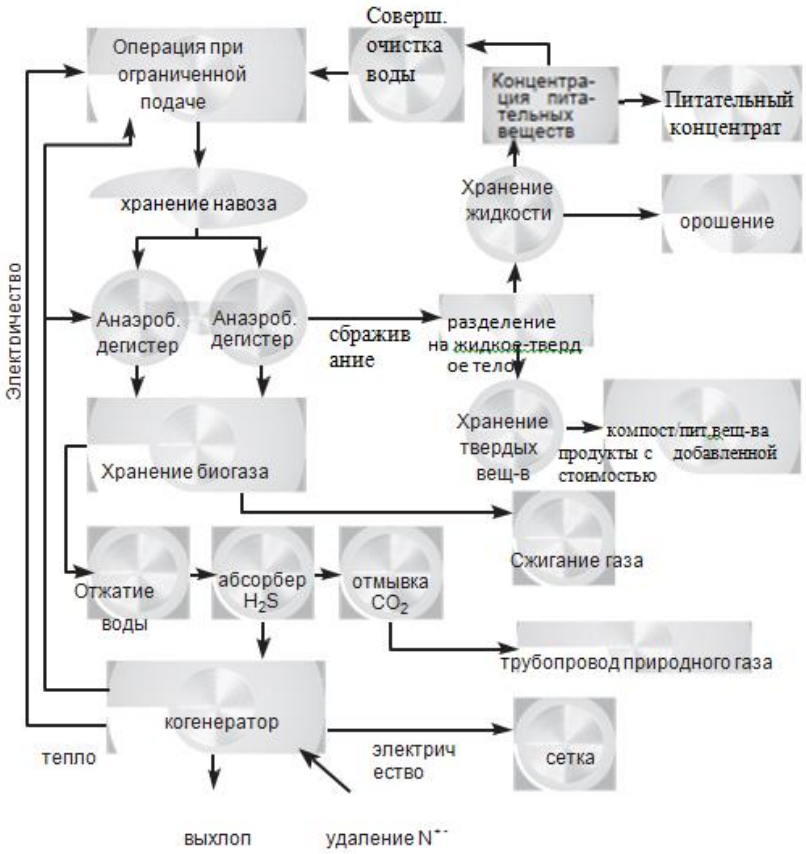


Рис. 12.9 Схема анаэробного реактора с различными продуктами (Агентство сельского хозяйства и развития сельских районов Альберты).
Источник: http://www1.agric.gov.ab.ca/$Department/deptdocs.nsf/all/agdex13088/$FILE/400_28-2.pdf.

Таблица 12.7 Вариации состава энергетического газа.

H_2 (объем.%)	9–31
CO (объем.%)	14–48
CO_2 (объем.%)	20–0
CH_4 (объем.%)	7–21
N_2 (объем.%)	50–0
Теплотворная способность (HHV, Мдж/м³)	5.4–17.4

Источник: Goswami et al. (2000).

Энергетический газ представляет собой смесь легковоспламеняющихся газов от низкого до среднего уровня по британской тепловой единице, содержащих CO, H_2, CH_4, N_2 и высшие гидраты, и производится из газификации древесины или угля. Энергетический газ можно сжигать напрямую или использовать в качестве сырья для жидкого топлива. Преобразование биомассы в генераторный газ часто называют термической газификацией. Термическая газификация – это частичное окисление твердого топлива, такого как твердая биомасса, при повышенных температурах в смесь легковоспламеняющихся газов, которая называется генераторным газом. Как указывает Бойль (2004), все процессы газификации включают взаимодействие пара и кислорода с твердым сырьем. Энергетический газ содержит различные доли H_2, CO, CH_4 и CO_2, а также меньшее количество высших гидратов; Конкретные химические составляющие определяются температурой, до которой нагревается биомасса, составом сырья биомассы и схемой газификации. Таблица 12.7 показывает изменяющийся состав генераторного газа.

Браун (2011) представляет компактное, ясное описание технологий термохимической биомассы, включая газификацию. Он описывает термическую газификацию как многоступенчатый процесс, включающий нагрев и сушку, пиролиз, твердофазные реакции, которые потребляют уголь, и газофазные реакции, которые определяют конечный состав генераторного газа. При температуре около 100 ° C влага удаляется при нагревании и сушке. Другие авторы (например, Госвами и др., 2000) рассматривают термическую газификацию как комбинацию горения и пиролиза. (Различие между сгоранием и пиролизом обсуждалось ранее в разделе 12.5.4.) Поскольку пиролиз является эндотермическим процессом, для продолжения пиролиза требуется энергия, а сгорание (посредством добавления кислорода или воздуха в газификатор) происходит только в том объеме, который необходим для производства энергии для пиролиза. При температуре около 400°C биомасса начинает распадаться на газы, пары и жидкости. Остается только полукокс, пористое твердое вещество, содержащее углерод и золу. Некоторое представление о процентном составе продуктов пиролиза можно получить из непосредственного анализа исходного сырья биомассы (см. Таблицу 12.4). Содержание летучих веществ примерно равно выходу пиролиза, а процентное содержание углерода и золы примерно равно полукоксу. При температуре около 700 °C уголь начинает вступать в реакцию с любым кислородом, а также с CO_2 и водяным паром, образуя дополнительные легковоспламеняющиеся газы. Газификация включает в себя ряд различных химических реакций. В таблице 12.8 представлена сводка важных реакций, связанных с газификацией биомассы.

Таблица 12.8. Реакции газификации

Название	Химическая реакция	Комментарий
Углерод-вода	$C + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO$	эндотермический→
конверсия водяного газа	$CO + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO_2$	
гидрирование	$C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$	
Углерод-кислород	$2C + O_2 \leftrightarrow 2CO$	
реакция Будуара	$C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$	
метанирование	$CO + 3H_2 \leftrightarrow H_2O + CH_4$	экзатермический→

Источник: Госвами и соавт. (2000) и Тестер и соавт. (2005).

Стрелки в реакциях таблицы 12.8 показывают, что реакции газификации могут протекать в любом направлении в зависимости от топлива, кислорода и пара, добавляемых в газификатор, а также от температуры и давления. Низкие температуры и высокое давление способствуют образованию CH_4, тогда как высокие температуры и низкое давление способствуют образованию H_2 и CO.

В дополнение к энергетическому газу в выходных потоках газификатора, вероятно, будут присутствовать гудроны (вязкие, жидкие высокомолекулярные соединения) и твердые частицы. Таким образом, большинство газификаторов включают процессы очистки газа. Термодинамическая эффективность газификаторов широко варьируется в зависимости от типа и условий эксплуатации. Газификаторы, которые могут собирать более 90% химической энергии сырья биомассы, возможны, но являются дорогостоящими. Большинство газификаторов собирают от 70 до 80% доступной энергии в сырье.

12.5.7 Синтетический газ

Синтетический газ или синтез-газ представляет собой смесь CO и H_2 и может быть получен в процессе газификации с использованием кислорода, а не воздуха. Потребность в кислороде для производства синтез-газа составляет около трети кислорода, необходимого для полного сгорания. Синтез-газ назван так потому, что, помимо того, что он является полезным топливом с высокой энергией, он также может быть использован в качестве сырья для синтеза многих полезных химических веществ. Химия производства и использования синтез-газа из фракций природного газа, угля и тяжелой нефти известна уже более века. Рейес и соавт. (2003) представляют исторический взгляд на производство синтез-газа из небиомассовых источников и рассматривают технологические достижения в производстве синтез-газа из традиционного сырья. В последние годы производству сингаза из ресурсов биомассы уделялось большое внимание как по меньшей мере частичному решению энергетических потребностей многих стран, включая США. Спатх и Дайтон (2003) оценивают потенциал сингаза, полученного из биомассы, в США, а Кобб (2007) включает в себя обследование объектов газификации биомассы в США. Национальная лаборатория энергетических технологий предоставляет базу данных газификационных установок в США по адресу: http://www.netl.doe.gov/research/coal/energy-systems/gasification/gasiification-plant-database Уорлей и Йель (2012) кратко описывают оборудование, его общее расположение, рабочие характеристики и серьезность эксплуатации для каждой технологии газификации.

Синтез-газ используется в процессе Фишера-Тропша для производства широкого спектра углеводородных продуктов, как правило, в жидкой форме. Документы, относящиеся к истории и развитию процесса Фишера-Тропша, архивируются в электронном виде на сайте www.fscher-tropsch.org. Этот веб-сайт необычен, но его существование указывает на важность процесса в химическом машиностроении углеводородов. Учебник Де Клерк (2011) был хорошо принят как книга, посвященная деталям процесса Фишера-Тропша. Синтез Фишера-Тропша происходит при низкой температуре (200–240°C) или высокой температуре (300–350°C), когда железо или кобальт служат катализатором в реакторах, работающих при давлениях в диапазоне от 10 до 40 атм (Спат и Дайтон, 2003). Наиболее распространенные углеводороды, синтезированные с использованием процесса Фишера-Тропша, перечислены в таблице 12.9. В первой реакции, приведенной в таблице 12.9, $-CH_2$ - указывает на разновидности метила, которые могут служить инициаторами роста цепи путем последовательного добавления $-CH_2$. В зависимости от соотношения CO и H_2, в результате синтеза Фишера-Тропша может быть получен широкий спектр углеводородов. Парафины являются алкановыми углеводородами и имеют общую химическую формулу C_nH_{2n+2}. Если $20 < n < 40$ парафины являются твердыми и восковыми, как следует из названия. Октан, C_8H_{18}, является примером парафина. Олефины являются алкеновыми углеводородами; Примером является пропен, C_3H_6. Двумя характеристиками таких синтезов являются (1) неизбежное получение широкого спектра углеводородных продуктов и (2) выделение значительного количества тепла от экзотермических реакций синтеза. Распределение продуктов определяется температурой, давлением, отношением CO/H_2 и катализатором (тип и состав). Продукты, полученные в процессе Фишера-Тропша, должны, как правило, подвергаться процедурам модернизации, которые приводят к разделению, концентрации и адаптации продуктов. Процедуры модернизации обычно включают дальнейшие химические реакции.

Таблица 12.9. Примеры синтеза Фишера-Тропша

Реакция	Продукт
$CO + 2H_2 \longrightarrow -CH_2- + H_2O$	Метил
$CO + 3H_2 \longrightarrow CH_4 + H_2O$	CH_4
$nCO + (2n+1)H_2 \longrightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$	парафины
$nCO + 2nH_2 \longrightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$	олефины
$nCO + 2nH_2 \longrightarrow C_nH_{2n+1}OH + (n-1)H_2O$	спирт

Источник: Спатх и Дайтон (2003).

Необходимо провести анализ книг по Фишеру-Тропша для получения дополнительной информации. Для синтез-газа из биомассы Спатх и Дайтон (2003) является наилучшим справочным материалом.

Пример 12.3

Для 1 кг CO рассчитайте требуемый водород и продукты, произведенные для CH_4, этанол, октан и пропен для синтеза Фишера-Тропша.

Решение: молекулярные массы CO, H_2, CH_4, H_2O, этанола, октана и пропена следующие:

$$CO = 28.01 \frac{кг}{кг\text{-моль}} \qquad H2 = 2.016 \frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

$$CH4 = 16.042 \frac{кг}{кг\text{-моль}} \qquad H2O = 18.016 \frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

$$ETHANOL = 46.068 \frac{кг}{кг\text{-моль}} \qquad OCTANE = 114.224 \frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

$$PROPENE = 42.078 \frac{кг}{кг\text{-моль}}$$

Реакция CH_4 $\quad CO+3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$

Сколько требуется H_2 и сколько образуется CH_4 и H_2O при получении 1 кг CO

$$H_2 = \frac{3 \times H2_{мм}}{CO_{мм}} \times 1\,кг = 0.216кг \qquad CH_4 = \frac{CH4_{мм}}{CO_{мм}} \times 1\,кг = 0.573\,кг$$

$$H_2O = \frac{H2O_{мм}}{CO_{мм}} \times 1кг = 0.643кг$$

Для этанола (C_2H_5OH), спирта, можно использовать общую реакцию спирта из таблицы 12.9 где n = 2:

$$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n+1}OH + (n-1)H_2O$$

Сколько требуется H_2 и сколько образуется этанола и H_2O при получении 1 кг CO

$$H_2 = \frac{4 \times H2_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1кг = 0.144^{кг} \qquad этанол = \frac{этанол_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1кг = 0.822\,кг$$

$$H_2O = \frac{H2O_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1_{кг} = 0.322\,кг$$

Для метанола (CH_3OH), также спирта, требуется общая реакция спирта где n=1. Вода не производится. Для 1 кг CO требуется H_2 и образуются метанол и H_2O.

$$H_2 = \frac{4 \times H2_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1кг = 0.144^{кг} \qquad метанол = \frac{метанол_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1кг = 0.822\,кг$$

$$H_2O = \frac{H2O_{мм}}{2 \times CO_{мм}} \times 1_{кг} = 0.322\,кг$$

Для октана (C_8H_{18}) используется общая парафиновая реакция где n = 8:

$$nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

Сколько требуется H_2 и сколько образуется октана и H_2O при получении 1 кг CO

$$H_2 = \frac{17 \times H2_{мм}}{8 \times CO_{мм}} \times 1_{кг} = 0.153\,кг \qquad октан = \frac{октан_{мм}}{8 \times CO_{мм}} \times 1\,кг = 0.51\,кг$$

$$H_2O = \frac{8 \times H2O_{мм}}{8 \times CO_{мм}} \times 1\,кг = 0.643кг$$

Для пропена (C_3H_6) используется общая олефиновая реакция где n = 3:

$$nCO + 2nH_2 \rightarrow C_nH_{2n} + nH_2O$$

Сколько требуется H_2 и сколько образуется пропена и H_2O при получении 1 кг CO

$$H_2 = \frac{6 \times H2_{мм}}{3 \times CO_{мм}} \times 1кг = 0.144\,кг \qquad пропен = \frac{пропен}{3 \times CO_{мм}} \times 1_{кг} = 0.501\,кг$$

$$H_2O = \frac{3 \times H2O_{мм}}{3 \times CO_{мм}} \times 1\,кг = 0.643кг$$

Обобщенные данные по реагентам и продуктам для каждой из реакций представлены в таблице 12.10. Разнообразие возможных продуктов Фишера-Тропша иллюстрируется этими результатами. Отношение CO к H_2 одинаково для некоторых реакций, но продукты разные. Продукты различны для

реакций с различными соотношениями CO и H_2 - отсюда первая характеристика синтеза Фишера-Тропша, связанная с неизбежным образованием широкого спектра углеводородных продуктов.

Хотя это не совсем процесс с использованием сырья биомассы, предложение Уриг и соавт. (2007) использует CO_2 от электростанций, работающих на ископаемом топливе, в сочетании с водородом из неископаемых источников топлива и процессом Фишера-Тропша для производства синтетического топлива для автомобилей. В этом процессе сырьем являются CO_2 и вода; электролиз используется для производства водорода из воды. «Обратная» реакция конверсии водяного газа (таблица 12.8) используется для производства CO из CO_2 и воды, после чего следует реакция Фишера-Тропша с получением CH_2 - основного строительного блока для углеводородных синтетических топлив.

Таблица 12.10. Обобщение данных реакций синтеза Фишера-Тропша для примера 12.3.

Реакция	CO (кг)	H_2 (кг)	H_2O (кг)	Продукт (кг)
Метан (CH_4)	1	0.216	0.643	0.573
Этанол (C_2H_5OH)	1	0.144	0.322	0.822
Метанол (CH_3OH)	1	0.144	0.0	1.144
Октан (C_8H_{18})	1	0.153	0.643	0.510
Пропен(C_3H_6)	1	0.144	0.643	0.501

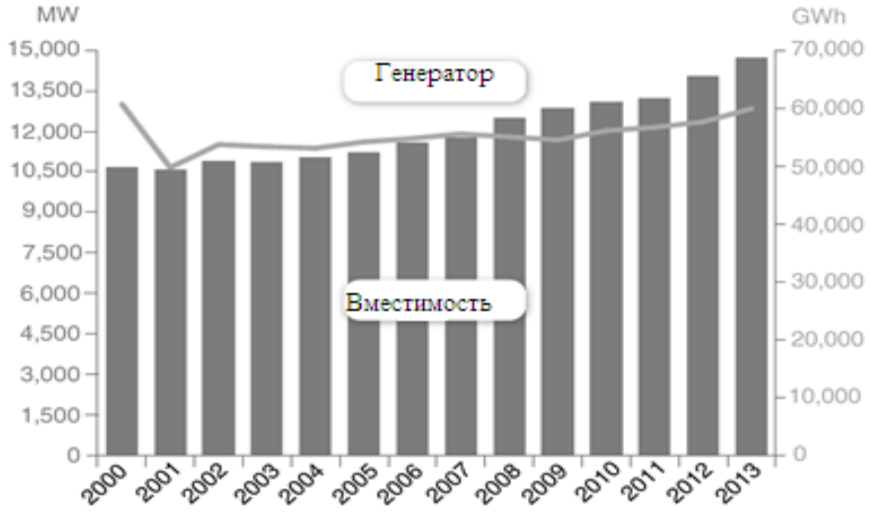


Рис. 12.10. Установленная мощность и частота выработки биоэнергетики (2000–2013 гг.). *Источник*: Эстерли и Гельман(2014).

12.5.8 Биоэнергетика и статистика использования биотоплив

Книга данных по возобновляемым источникам энергии 2013 года (Эстерли и Гельман 2014) содержит некоторые интересные данные о биоэнергетике и биотопливе за 2013 год. Данные по биоэнергетике будут рассмотрены в первую очередь. В «Книге данных» обобщены три важных факта 2013 года: (1) производство электроэнергии из биоэнергии составляет 11% всей возобновляемой энергии, производимой в США, (2) производство электроэнергии из биоэнергии происходит главным образом из древесины и сельскохозяйственных отходов, которые сжигаются в качестве топлива в промышленном секторе и (3) установленная биоэнергетическая мощность росла с ежегодным приростом 3,8% с 2007 по 2013 год. На рис. 12.10 показана годовая выработка в гигаватт-часах и установленная мегаваттная мощность с 2000 по 2013 год. Рост установленной мощности устойчивый, если не впечатляющий.

Статистика по этанолу и биодизелю будет рассмотрена далее. Что касается этанола, в Книге данных NREL (Эстерли и Гельман, 2014) представлены следующие основные моменты 2013 года: (1) производство этанола составило 13 300×10^6 галлонов, (2) в период с 2000 по 2013 год производство

этанола на основе кукурузы увеличилось в 8 раз, (3) США произвели 57% этанола в мире (Бразилия произвела 27%), и (4) первая коммерческая целлюлозная фабрика в США начала свою работу. Основные показатели 2013 года по биодизелю: (1) производство биодизеля в США составило $1,8\times10^9$ галлонов (рост на 63% по сравнению с 2012 годом) или 360 раз больше, чем производство биодизеля в 2000 году, (2) США лидируют в мире по производству биодизеля и (3) производство биодизеля в мире увеличилось на 17% по сравнению с 2012 годом. Полезным подходом является отображение цен на этанол и производства наряду с ценами и производством биодизеля. Такая схема представлена в Таблице 12.11; как для этанола, так и для биодизеля цены указаны в «эквиваленте бензин-галлон», поскольку теплотворная способность этанола и биодизеля на галлон отличается от бензина. Использование бензиновой галлоновой эквивалентной основы учитывает различия в значениях нагрева. На энергетической основе и этанол, и биодизель стоят дороже, чем бензин. В последние годы на основе бензинового эквивалента биодизель незначительно дешевле этанола. В 2013 году было произведено в семь раз больше этанола, чем биодизеля.

12.6 Бытовые твердые отходы

Из-за высокого процентного содержания органических материалов твердые бытовые отходы (ТБО) часто классифицируются как источник сырья для биомассы. ТБО – это мусор или мусор, который обычно выбрасывается из домашних хозяйств и не включает промышленные, опасные или строительные отходы. Агентство по охране окружающей среды (АООС) ежегодно собирает информацию о ТБО, которая касается образования, состава и утилизации ТБО. До 2015 года ежегодные сборники были озаглавлены «Производство, переработка и утилизация твердых бытовых отходов в США: факты и цифры»; в 2015 году серия была переименована в «Продвижение устойчивого управления материалами: факты и цифры». Кроме того, исторические данные по ТБО представлены в отчетах, чтобы можно было определить тенденции. Большая часть первой части этого раздела была взята из книги «Совершенствование устойчивого управления материалами: факты и цифры 2013» (АООС, 2015). Рассмотрим следующую статистику.

Таблица 12.11 Производство и стоимость этанола и биодизеля.

		Этанол		Биодизель	
	Цена на бензин[a] ($/гал)	цена[b] ($/гал)	Производство (10^6 гал/год)	цена[b] ($/гал)	Общее произ.в США (10^6 гал)
2000	1.56	2.16	1 622		
2001	1.50	2.38	1 765	1.80	5
2002	1.38	1.97	2 140	1.70	15
2003	1.54	2.27	2 810	1.80	20
2004	1.76	2.86	3 404	2.20	25
2005	2.07	3.40	3 904	3.40	75
2006	2.27	2.98	4 884	3.30	250
2007	2.76	3.39	6 521	3.40	450
2008	1.86	2.56	9 309	2.68	700
2009	2.65	3.36	10 938	3.28	545
2010	3.08	3.89	13 298	3.59	315
2011	3.37	4.44	13 929	3.88	1 100
2012	3.29	4.48	13 218	4.04	1 100
2013	3.34	4.29	13 300	3.92	1 800

а) Средняя розничная цена.
б) Бензин в галлонах в эквиваленте.
$ - доллар США

На рис. 12.11 представлены общие ТБО США (в миллионах тонн), генерируемые в год, и выработка на душу населения (фунтов на человека в день) с 1960 по 2013 год. За 53 года, представленные на рис. 12.11, общий коэффициент выработки ТБО увеличился на 188 в то время как население увеличилось на 73%! На душу населения прирост составил 64%. Единственный положительный комментарий, который можно сделать в отношении информации на рис., заключается в том, что с 2000 года уровень

выработки на душу населения немного снизился до 4,40 фунтов/(человеко-день). Рис. 12.11 довольно драматично иллюстрирует характер «утилизации» экономики США.

Уместны два вопроса: (1) Каков состав ТБО? (2) Что происходит с ТБО? Рис. 12.12 представляет собой круговую диаграмму, показывающую состав ТБО за 2013 год. Агентство по охране окружающей среды определяет ТБО как состоящее из дворовой отделки, дерева, пластмасс, металлов, стекла, бумаги, пищевых отходов, резины/кожи/текстиля и других. Бумага в количестве 27% (по весу) является безусловно самой крупной категорией, за которой следуют пищевые отходы, дворовые отделки и пластмассы, каждая из которых составляет 12–14%. Остальные категории составляют от 5 до 9%. Пластмассы, стекло и металлы не являются компонентами биомассы в ТБО. Далее в этом разделе состав биомассы в сравнении с небиомассовым составом ТБО рассматривается более подробно.

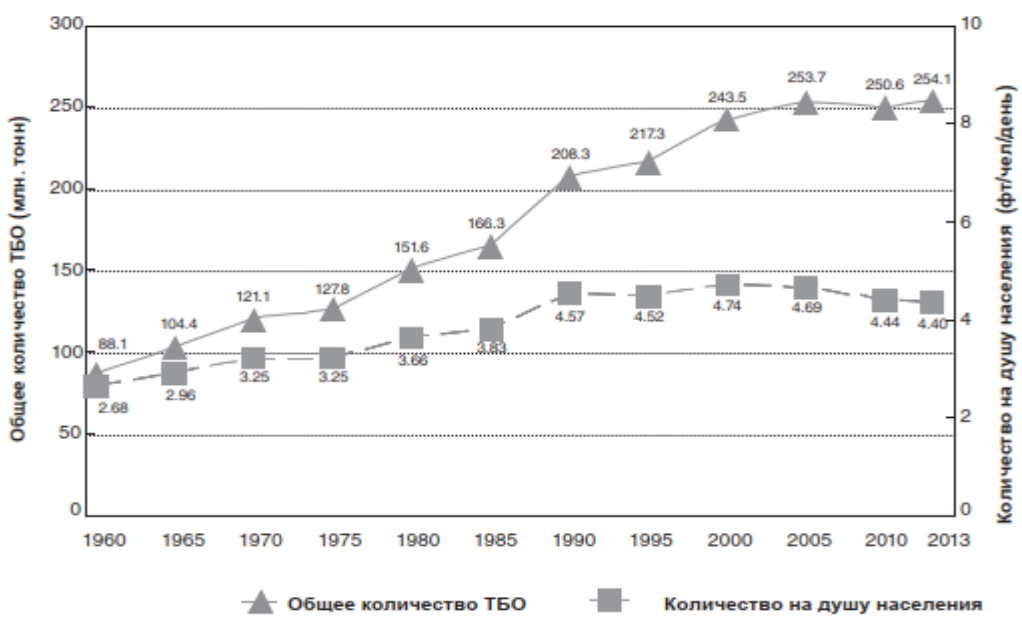


Рис. 12.11. Общее количество ТБО и выработка на душу населения с 1960 по 2013 год.
Источник: http://www.epa.gov/epawaste/ nonhaz /unicipal/index.htm.

В таблице 12.12 с результатами, выраженными в миллионах тонн, рассматривается второй вопрос: что происходит с ТБО? Агентство по охране окружающей среды собирает информацию о ТБО, извлеченных для переработки, восстановленных для компостирования, сжигаемых с утилизацией энергии и сброшенных на полигоны. Хорошая новость заключается в том, что, хотя с 2000 года скорость выработки практически не изменилась, объем вылова для повторного использования, общий объем компостирования и количество извлеченных материалов возросли. ТБО, сжигаемые на установках, производящих энергию, несколько увеличились с 1990 года, что отражает растущую стоимость таких установок, более строгие требования к выбросам и увеличение сложностей при получении разрешений.



Рис. 12.12 состав ТБО в 2013. *Источник*: http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/index.htm

Таблица 12.12. Производство, восстановление, компостирование, сжигание с рекуперацией энергии и выбросы ТБО (в миллионах тонн) с 1960 по 2013 год.

Вид деятельности	1960	1970	1980	1990	2000	2005	2009	2011	2012	2013
Выработка	88.1	121.1	151.6	208.3	243.5	253.7	244.6	250.5	251.0	254.1
Восстановление для вторичной переработки	5.6	8.0	14.5	29.0	53.0	59.2	61.9	66.4	65.3	64.7
Восстановление для компостинга[a]	незначительно[b]	незначительно[b]	незначительно[b]	4.2	16.5	20.6	20.7	20.6	21.3	22.4
Общее кол-во восстановленных материалов	5.6	8.0	14.5	33.2	69.5	79.8	82.6	87.0	86.6	87.2
Утилизированные материалы после восстановления	82.5	113.0	137.1	175.0	174.0	173.9	162.0	163.5	164.4	167.0
Сжигание с рекуперацией энергии[c]	0.0	0.4	2.7	29.7	33.7	31.6	29.0	31.8	32.2	32.7
Закапывание отходов, вывоз на свалку[d]	82.5	112.6	134.4	145.3	140.3	142.3	133.0	131.7	132.2	134.3

источник: www.epa.gov.

a) Компостирование сорняков, пищевых отходов и других органических материалов ТБО. Не включает компостирование на заднем дворе.

b) Немного менее 5000 тонн или 0,05%.

c) Включает сжигание ТБО в форме массового сжигания или топлива, полученного из отходов, и сжигание с рекуперацией энергии из материалов, разделенных по источнику, в ТБО (например, деревянные подлоны, топливо из шин).

d) Выбрасывает после восстановления минус сгорание с восстановлением энергии. Выбросы включают сгорание без рекуперации энергии. Детали могут быть не добавлены к итоговым данным из-за округления.

В то время как закапывание отходов долгое время считалось хорошим решением проблемы утилизации ТБО, оно имеет ряд трудностей, таких как доступность, размещение, стоимость, транспортировка, выработка и вместимость. Количество доступных земельных участков в США сократилось с 7924 в 1988 году до 1967 в 2000 году и до 1908 в 2013 году (EPA, 2015). Одним из способов уменьшения объема мусора является сжигание ТБО при высоких температурах. Сжигание уменьшает объем ТБО до 10–12% от первоначального, что позволяет существующим земляным угодьям функционировать дольше.

Обсуждение сосредоточено на объектах, которые сжигают ТБО и производят полезную энергию на объектах преобразования отходов в энергию (WTE). Такие объекты используют энергию от ТБО для производства пара, который используется в системах централизованного теплоснабжения и охлаждения, или для питания генератора для выработки электроэнергии для сети. В 2013 году Агентство по охране окружающей среды определило 86 СЭТ в США с пропускной способностью 95 953 т/день. В Справочнике по отходам и энергии от ERC 2016 года (Майклз и Шианг, 2016 г.) содержится список и характеристики всех установок WTE в США, а также обширная статистическая информация, касающаяся технологий WTE. Многие из развитых стран более широко используют ТБО,

чем США. Например, в большинстве стран западной Европы имеются широкие возможности и программы WTE. Интернет является отличным источником подробной информации об объектах WTE. Основной целью установки WTE является сокращение объема твердых отходов с минимальным вредным воздействием на окружающую среду. Захваченная энергия является вторичной, но важной, особенно как точка продажи для местных органов власти, занимающихся как утилизацией твердых отходов, так и проблемами с энергией.

Объекты WTE широко классифицируются как системы массового сжигания или системы получения отработанного топлива (RDF). Установки массового сжигания WTE сжигают, с избытком воздуха, ТБО в полученном виде и обычно имеют только одну камеру сгорания. Движущаяся наклонная решетка используется для обеспечения того, чтобы ТБО хорошо смешались с воздухом; Решетка также обеспечивает путь для попадания золы в систему сбора золы. Для систем RDF ТБО обрабатываются до более однородной смеси, чем полученные ТБО для системы массового сжигания. WTE с массовым сжиганием являются наиболее распространенными, при этом ТБО используются так же, как и другие виды топлива из биомассы в технологиях прямого сжигания. Механическая обработка для RDF может включать измельчение, а также гранулирование и удаление металлов и других громоздких предметов. RDF могут использоваться в качестве основного топлива или сочетаться с ископаемым топливом в обычных бытовых котлах.

Совет по восстановлению энергии (ERC) (http://energyrecoverycouncil.org/page/21/) – это национальная организация, представляющая компании и местные органы власти, занимающиеся вопросами переработки отходов в энергию. ERC, созданная в 1991 году как Институт восстановления ресурсов, действовала в качестве Объединенной ассоциации по утилизации отходов до 2008 года, когда она стала ERC. В Справочнике ERC 2016 года по объектам переработки отходов в энергию (Майклз и Шианг, 2016 г.) представлен всесторонний обзор деятельности по переработке отходов в США. В Справочник ERC за 2016 год включены сведения о каждом WTE в США, список членов WTE (владельцы/операторы, муниципальные члены и ассоциированные члены), показатели производительности WTE (суточная пропускная способность ТБО, мощность генерации, характеристики и количество объектов WTE, а также отходы) для производства энергии). В Справочнике ERC за 2016 год перечислены 77 установок WTE с пропускной способностью ТБО в 2014 году около 30×10^6 тонн, из которой было получено 14×10^6 МВт-ч. Кроме того, предоставляется ежегодная пропускная способность ТБО и выработка электроэнергии с 2001 по 2014 год. В долгосрочной перспективе тонна ТБО вырабатывает почти 500 кВт/ч. Из 77 установок WTE 60 являются массовыми, 13 - RDF, а 4 - модульными. В независимой оценке Стрингфеллоу (2014) приходит к выводу, что стоимость оборудования для массового сжигания и RDF WTE колеблется от 7000 до 10 000 долларов США за установленный киловатт.

Комплекс WTE в коммунальном хозяйстве округа Пинеллас (Флорида) является примером установки, которая сжигает ТБО и использует энергию для выработки электроэнергии, которая подается в сеть. Информация доступна по адресу http://www.pinellascounty.org/solidwaste/wte.htm, а также в учебнике Майклз и Шианг (2016).

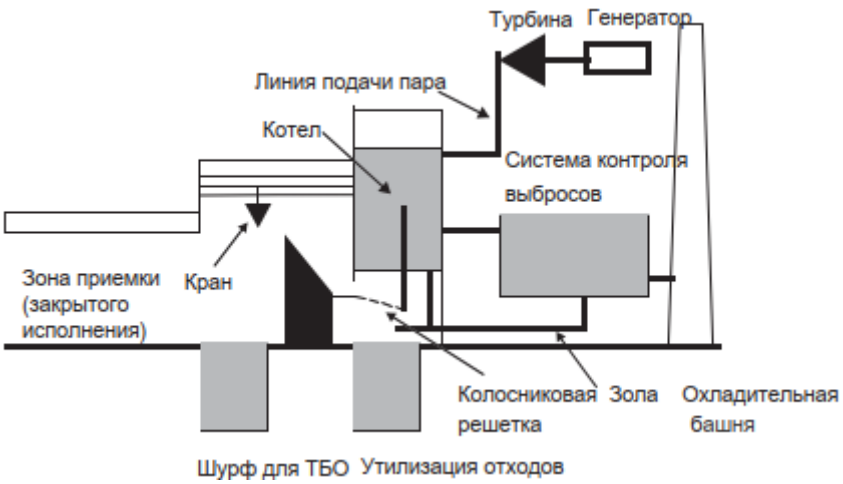


Рис. 12.13 Схема процесса обработки ТБО.

На рис. 12.13 показана схема, иллюстрирующая основные характеристики оборудования обработки ТБО. ТБО доставляют на объект на грузовиках и сбрасывают в приемную яму. Кран подает ТБО в секцию сгорания котла; зола падает через решетку для сжигания и направляется для последующей обработки. Пар вырабатывается в котле и направляется на турбогенератор, подключенный к сети. Янг (2010) дает обзор муниципальных технологий твердого WTE с некоторым акцентом на сжигание плазмы.

Завод WTE в округе Пинеллас перерабатывает около 1 млн. тонн в год, хотя мощность составляет 3150 тонн ТБО в день. Номинальная мощность составляет 75 МВт, из которых 60 МВт направляется в электрическую сеть, а 15 МВт используется для внутренних нужд. WTE округа Пинеллас использует современные технологии контроля загрязнения, чтобы обеспечить соответствие выбросов стандартам EPA. Металлы в золе, образующиеся в результате сжигания ТБО, извлекаются и продаются для переработки. Оставшийся пепел, после разделения по размерам, используется для прикрытия, заполнения внутренних берм и проезжей части. Оборудование WTE довольно сложное, и здесь представлен только краткий обзор; однако Крейтх и Уэст (1997) подробно описывают большинство аспектов технологии WTE. Многие органы местного самоуправления, располагающие оборудованием WTE, имеют веб-сайты со статистикой и подробностями работы. Многие из этих веб-сайтов содержат техническую информацию и опыт работы; тем не менее, немалое количество веб-сайтов сообщают подробности судебных разбирательств, связанных с удалением твердых отходов или встречными исками отдельных лиц или групп интересов граждан. Объекты WTE, таким образом, вызывают некоторые противоречия.

Многие государственные и федеральные программы классифицируют производные ТБО как возобновляемые, что делает ТБО частью стандартной программы по возобновляемому портфелю. Федеральный закон об энергетической политике 2005 года прямо включает электроэнергию, произведенную из ТБО, как форму возобновляемой энергии, которая отвечает федеральным требованиям по закупке возобновляемой энергии. Хотя ТБО в основном состоят из возобновляемых ресурсов, таких как продукты питания, бумага и изделия из древесины, сюда также включаются невозобновляемые материалы, такие как шины и пластмассы. Управление энергетической информации (EIA) разработало процедуру классификации ТБО в составе биогенного или небиогенного материала. Формальные определения этих терминов для EPA (Глоссарий EPA доступен на www.epa.gov):

Биогенный: производится биологическими процессами живых организмов. (Примечание: в OBOC термин «биогенный» используется только для обозначения органического неископаемого материала биологического происхождения.)

Небиомассовые (небиогенные) отходы: материал небиологического происхождения, являющийся побочным продуктом или выброшенным продуктом. «Небиомассовые отходы» включают твердые бытовые отходы из небиогенных источников, таких как пластмассы и топливо, полученное из шин.

В зависимости от государственных и федеральных правил, кредит на использование возобновляемых источников энергии для использования ТБО может быть распределен на основе биогенного и небиогенного вклада. В таблице 12.13 представлена временная история ТБО с точки зрения содержания биогенной и небиогенной энергии.

Тенденция, показанная в Таблице 12.13 и на рис. 12.14, заключается в уменьшении биогенного содержания ТБО и увеличении небиогенного содержания в указанные годы. Действительно, к 2010 году содержание биогенных и небиогенных отходов было равным. Поскольку небиогенный материал обычно имеет более высокую теплотворную способность, чем биогенная часть, содержание энергии на тонну также увеличивается со временем. Теплотворная способность ТБО важна для определения производительности установки WTE. В 2011 году EIA сообщила, что средняя теплотворная способность ТБО составляет $11{,}1\times10^6$ БТЕ/т (http://www.Eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=8010), что близко к значению 2005 года из таблицы. 12,13.

Пример 12.4

Используя среднее значение 500 кВт/ч от Майклз и Шианг (2016), определите электрическую эффективность, используя значение EIA $11{,}1\times10^6$ БТЕ/т (http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.Cfm?Id=8010) для ТБО в 2011 году. Если 50% ТБО должно было использоваться в WTE, оцените мощность базовой нагрузки, которая может быть подана в электрическую сеть.

Таблица 12.13. Биогенное и небиогенное теплосодержание ТБО с 1989 по 2005 гг.

		Доля общей энергии ТБО	
Год	Теплосодержание (10^6 бте/т)	Биогенная	Небиогенная
1989	10.08	0.67	0.33
1990	10.21	0.66	0.34
1991	10.40	0.65	0.35
1992	10.61	0.64	0.36
1993	10.94	0.64	0.36
1994	11.15	0.63	0.37
1995	11.11	0.62	0.38
1996	10.94	0.61	0.39
1997	11.17	0.60	0.40
1998	11.06	0.60	0.40
1999	10.95	0.60	0.40
2000	11.33	0.58	0.42
2001	11.21	0.57	0.43
2002	11.19	0.56	0.44
2003	11.17	0.55	0.45
2004	11.45	0.55	0.45
2005	11.73	0.56	0.44

Источник: https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/historical/msw.pdf.

Годы, выделенные жирным шрифтом, являются годами сбора данных EPA. Невыделенные жирным шрифтом года, были линейно интерполированы на уровне группы материалов тех между соседними выделенными жирным шрифтом годами.

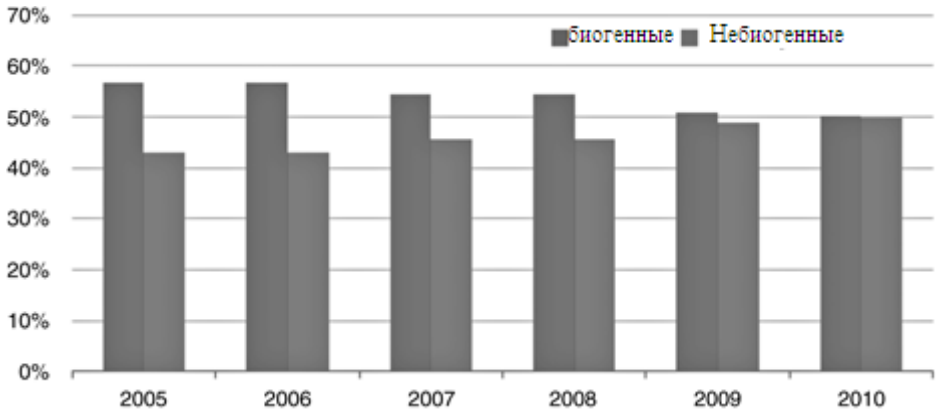


Рис. 12.14 Биогенное и небиогенное содержание ТБО с 2005 по 2010 год.
Источник: http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?Id = 8010.

Решение: если 500 кВ ч (среднее значение ERC) может быть подано в сеть, то электрическая эффективность будет

$$\eta = \frac{500\ \text{кВтч/т} * 341\ \text{Бте/кВтч}}{11.1 * 10^6\ \text{Бте/т}} = 0.15$$

Таким образом, WTE может собирать и поставлять в сеть около 15% энергосодержания средней MSW. Если это кажется небольшим, то необходимо учитывать, что объем ТБО был дополнительно сокращен на 88–90% в WTE, и что большая часть оставшейся золы может иметь другое предназначение.

Электроэнергия, которая может быть выработана при использовании 50% ТБО в США в 2013 году,

может быть оценена с использованием информации ERC.

$$E_{\text{выработанная}} = 0.5 \times 254.1 \times 10^6 \text{ тонн} \times 500 \frac{\text{кВт ч}}{\text{тонн}} = 6.35 \times 10^{10} \text{ кВт ч}$$

Единственная жизнеспособная стратегия использования ТБО – это питание базовой сети от электрической сети. Для ситуации с базовой нагрузкой общее количество произведенных киловатт-часов будет постоянным по отношению ко времени. Так как в году есть 8760 ч, поставляемая мощность оценивается как

$$\text{Мощность} = \frac{6.35 \times 10^{10} \text{ кВт ч}}{8760 \text{ ч}} = 7.25 \times 10^6 \text{ кВт} = 7200 \text{ МВт}$$

При равномерном использовании в качестве базовой нагрузки для энергосистемы, 50% ТБО могут обеспечить почти 7200 МВт базовой мощности в энергосистеме.

Оценки, сделанные в примере 12.4, содержат значительные неопределенности, поскольку они основаны на «среднем» энергосодержании, ожидаемом сборе электроэнергии и ежегодных данных. Тем не менее, электрическая эффективность, генерируемые киловатт-часы и средняя доступная мощность являются разумными оценками первого порядка.

Кроуфорд (2013) приводит некоторые интересные сравнения и статистические данные о деятельности WTE. В США 54% ТБО закапываются, 33% перерабатываются, а 13% используются в WTE. В Дании, для сравнения, 7% засыпаны землей, 69% перерабатываются, а 24% используются в WTE. Во многих случаях WTE были отвергнуты как менее популярные, чтобы их можно было рассмотреть, но Кроуфорд отмечает, что новые технологии позволили решить многие экологические проблемы, но получить информацию о них сложно. Одно из интересных замечаний, сделанных им, заключается в том, что с тех пор, как Нью-Йорк отказался от WTE, они отправляли 10 000 тонн в день из города по цене 100 долларов США за тонну стоимостью более 300 миллионов долларов США в год!

Таблица 12.14 Резюме по биомассе (разработано в рамках программы по биомассе в Орегоне).

Технология	Тип конверсии	Основное сырье для биомассы	Произведенная энергия или топливо
Прямое сгорание	Термохимический	Древесина С.-х. отходы MSW	Тепло Пар Электричество
Газификация	Термохимический	Древесина С.-х. отходы MSW	Энерг.газ
Пиролиз	Термохимический	Древесина С.-х. отходы MSW	Синтетическое топливо (биосырье) Уголь
Анаэробная обработка	Биохимический (анаэробн)	Навоз, с-х отходы свалка/сточные воды	Метан
Выработка этанола	Биохимический (аэробный)	Сахар или крахмал Древесные отходы Жмых	Этанол
Производство биодизеля	Химический	Масло семян Отработанное Растительное масло Животные жиры	Биодизель Метанол
Производство метанола	Термохимический	Древесина С-х отходы MSW	

12.7 Заключение

Как и во многих альтернативных источниках энергии, содержание энергии и потенциал для биомассы ошеломляют, но технические и экономические проблемы также являются серьезными. В таблице 12.14 представлена удобная сводка технологий, процессов, сырья и конечных целей использования биомассы. Биомасса, безусловно, станет более важным источником энергии в США. Перспективы широкого использования сырья биомассы для топлива и химикатов обобщены в цитате Тестера и др (2005):

«В качестве сырья мы можем рассматривать биомассу как почти «универсальное сырье», используемое для выработки энергии и получения более чем достаточно энергоемких видов топлива и химикатов. На фоне своей универсальности и возобновляемости, является ли биомасса тогда лучшим решением» для создания экологически чистой планеты? … но сначала необходимо решить множество задач, чтобы вывести биомассу за пределы ее нынешнего 5% вклада в составе потребности в энергии развитых стран.

Литература

Boundy, B., Diegel, S., Wright, L., and Davis, S. (2011) Biomass Energy Data Book: Edition 4. ORNL/TM-2011-446. ONRL, Oak Ridge, TN. http://info.ornl.gov/sites/publications/Files/Pub33120.pdf (accessed October 24, 2016).

Boyle, G. (ed.) (2013) Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 3rd edn. Oxford University Press, Oxford.

Brown, R.C. (2011) Thermochemical Processing of Biomass: Conversion into Fuels, Chemicals and Power. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Carareda, S. (2014) Introduction to Biomass Energy Conversions. CRC Press, Boca Raton, FL. Chynoweth, D.P. and Isaacson, R.E. (eds) (2004) Anaerobic Digestion of Biomass. Springer-Verlag, New York.

Cobb, J.T. (2007) Production of synthesis gas by biomass gasification. In Proceedings of the 2007 Spring National AIChE Meeting, Houston, TX.

Crawford, M. (2013) Turning trash into treasure. Mechanical Engineering, (May): 43–47. Decher, R. (1994) Energy Conversion. Oxford University Press, New York.

De Klerk, A. (2011) Fischer–Tropsch Refining. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Drapcho, C., Nghiem, J., and Walker, T. (2008) Biofuels Engineering Process Technology. McGraw- Hill, New York.

EPA (2015) Advancing Sustainable Materials Management: Facts and Figures 2013. US Environmental Protection Agency. https://www.epa.gov/smm/advancing-sustainable-materials-management-facts-and-figures-report (accessed October 24, 2016).

Esterly, S. and Gelman, R. (2014) 2013 Renewable Energy Data Book, Haas, K. (ed.). DOE/GO- 102014-4491. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62580.pdf (accessed October 20, 2016).

Goswami, Y., Kreith, F., and Kreider, J.F. (2000) Principles of Solar Engineering, 2nd edn. Taylor and Francis, New York.

Himmel, M. (ed.) (2008) Biomass Recalcitrance: Deconstructing the Plant Cell Wall for Bioenergy. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ.

IEA Bioenergy (2005). Biogas Production and Utilisation. T37:2005-01. http://www.cti2000.it/Bionett/BioG-2005010%20IEA%20T37%20biogas%20brochure.pdf (accessed October 24, 2016).

Kreith, F. (2007) Cellulosic ethanol: answer to the biofuels challenges? Solar Today, 21 (3): 42. Kreith, F. and West, R. (1997) CRC Handbook of Energy Efficiency. CRC Press, Boca Raton, FL.

Kreith, F. and West, R. (2007) The road not yet taken: to end our dependence on rapidly dwindling oil supplies, switching to hybrid vehicles and ethanol fuel from corn simply isn’t enough. Mechanical Engineering, 129 (4): 24.

Michaels, T. and Shiang, I. (2016) 2016 ERC Directory of Waste-to-Energy Facilities. Energy Recovery Council. http://energyrecoverycouncil.org/wp-content/uploads/2016/06/ERC-2016- directory.pdf (accessed November 15, 2016).

Perlack. R.D. and Stokes, B.J. (leads) (2011) U.S. Billion-Ton Update: Biomass Supply for a Bioenergy and Bioproducts Industry. DOE/EE-0363. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. http://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/billion_ton_update.pdf (accessed October 24, 2016).

Perlack, R.D., Wright, L.L., Turhollow, A.F., et al. (2005) Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. DOE/GO- 102005-2136,

ORNL/TM-2005/66. https://www1.eere.energy.gov/bioenergy/pdfs/final_billionton_vision_report2.pdf (accessed October 24, 2016).

Pimentel, D. (2003) Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. Natural Resources Research, 12 (2): 127–134.

Reyes, S.C., Sinfelt, J.H., and Feeley, J.S. (2003) Evolution of processes for synthesis gas production: recent developments in an old technology. Industrial and Engineering Chemistry Research, 42: 1588–1597.

Schobert, H.H. (2014) Energy and Society, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL.

Shapouri, H., Gallagher, P.W., Nefstead, W., et al. (2010) 2008 Energy Balance for the Corn-ethanol Industry. Department of Agriculture, Agricultural Economic Report Number 846, June.

Spath, P.L. and Dayton, D.C. (2003) Preliminary Screening – Technical and Economic Assessment of Synthesis Gas to Fuels and Chemicals with Emphasis on the Potential for Biomass-Derived Syngas. NREL/TP-510-34929. NREL, Golden, CO. http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34929.pdf (accessed October 24, 2016).

Speight, J. (2008) Synthetic Fuels Handbook: Properties, Process, and Performance. McGraw-Hill, New York.

Stringfellow, T. (2014) An Independent engineering evaluation of waste-to-energy technologies. Renewable Energy World, 17. (1). http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/01/an- independent-engineering-evaluation-of-waste-to-energy-technologies.html (accessed November 15, 2016).

Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., et al. (2005) Sustainable Energy. MIT Press, Cambridge, MA.

Tidwell, J.W. and Weir, A.D. (1986) Renewable Energy Resources. Taylor & Francis, New York.

Tyson, K.S., Bozell, J., Wallace, R., et al. (2004) Biomass oil analysis: research needs and recommendations. NREL/TP-510-34796. NREL, Golden CO.

Uhrig, R.E., Schultz, K.R., and Bogart, S.L. (2007) Implementing the “hydrogen economy” with synfuels. The BENT of Tau Beta Pi, XCVII (3): 18–22.

Van Gerpen, J., Shanks, B., Pruszko, R., et al. (2004) Biodiesel production technology. NREL/SR- 510-36244. NREL, Golden, CO.

Worley, M. and Yale, J. (2012) Biomass Gasification Technology Assessment: Consolidated Report.

NREL/SR-5100-57085. http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/57085.pdf (accessed October 24, 2016).

Young, G.C. (2010) Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: Economic, Technical, and Renewable Comparisons. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Дополнительная литература:

Haynie, D.T. (2008) Biological Thermodynamics, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge. Klass, D.L. (1998) Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals. Academic Press, San Diego, CA.

Kruger, P. (2006) Alternative Energy Resources: The Quest for Sustainable Energy. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.

Van Loo, S., and Koppejan, J. (2008) The Handbook of Biomass, Combustion, & Co-firing. Earthscan, London

13

Геотермальная энергия

13.1 Введение

Геотермальная энергия представляет собой энергию из недр Земли. Традиционно геотермальная энергия всегда рассматривалась с точки зрения добычи энергии, источники которой находятся глубоко под землей. В последние годы стало обычным явлением применение геотермальных тепловых насосов (GSHP), которые используют грунт в качестве резервуара; для получения дополнительной информации см. www.geokiss.com и раздел 13.5. На рис. 13.1 приводится убедительное утверждение о распространенности геотермальной энергии. Но добыча этой энергии создает проблемы, как в отношении доступности, так и технологий добычи. Одна из целей этой главы – понять проблемы, связанные с геотермальными энергетическими системами.

Геологическое строение Земли является хорошей отправной точкой для изучения геотермальной энергии. Рассмотрим вид структуры Земли в разрезе, как схематически показано на рис. 13.2. В центре находится расплавленное внутреннее ядро, окруженное внешним ядром. Внутренняя мантия окружает внешнее ядро. Литосфера представляет собой тонкую жесткую кору, которая служит самой дальней от центра внешней мантией. Литосфера разбита на тектонические плиты – двенадцать больших и несколько меньших. Эти плиты движутся относительно друг друга под действием гравитационных и конвективных сил в мантии. Этот геологический процесс, известный как тектоника плит, создает линии разломов там, где плиты встречаются, и вызывает вулканическую и сейсмическую активность. На рис. 13.3 показаны основные плиты и их границы. Там, где плиты раздвигаются, поднимаются слои расплавленной породы (магмы), что приводит к вулканической активности. Процесс столкновения плит, когда одна плита обычно движется под другой, называется субдукцией. В зоне субдукции температура достигает достаточно высоких значений для того, чтобы расплавить горную породу, при этом происходящее землетрясение и вулканическая активность являются обычным явлением. Большая часть геотермальной энергии недоступна на больших глубинах, но вдоль границ плит геотермальная активность наблюдается достаточно близко к поверхности, чтобы быть доступной. На рис. 13.3 показаны активные геотермальные зоны. На веб-сайте Геологической службы США (USGS) http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/dynamic.html представлено подробное описание взаимосвязи между тектоникой плит и вулканической активностью. Не удивительно, что активные геотермальные зоны – это регионы с наибольшей геотермальной энергетической активностью.

В разделе 13.2 анализируются оценочные геотермальные энергетические ресурсы, а также дается представление о процедурах, целесообразных для добычи геотермальной энергии.

13.2 Геотермальные ресурсы

Как видно из рисунка 13.1, геотермальные ресурсы обширны, но реальные проблемы заключаются в доступности и технологиях добычи. Исследователи Гупта и Рой (2007) дают современную оценку геотермальным ресурсам и перспективам геотермальной энергии для Земли. Грин и Никс (Green and Nix) (2006) представляют аналогичную оценку для США. В исследованиях Крюгера (Kruger) (1976) содержится более раннее обсуждение о геотермальной энергии, а в работе Мок и соавт. (Mock et al.) (1997) геотермальная энергия рассматривается в качестве экологически устойчивого ресурса. Способы добычи энергии для получения геотермальной энергии сильно различаются и зависят от местной геологии.

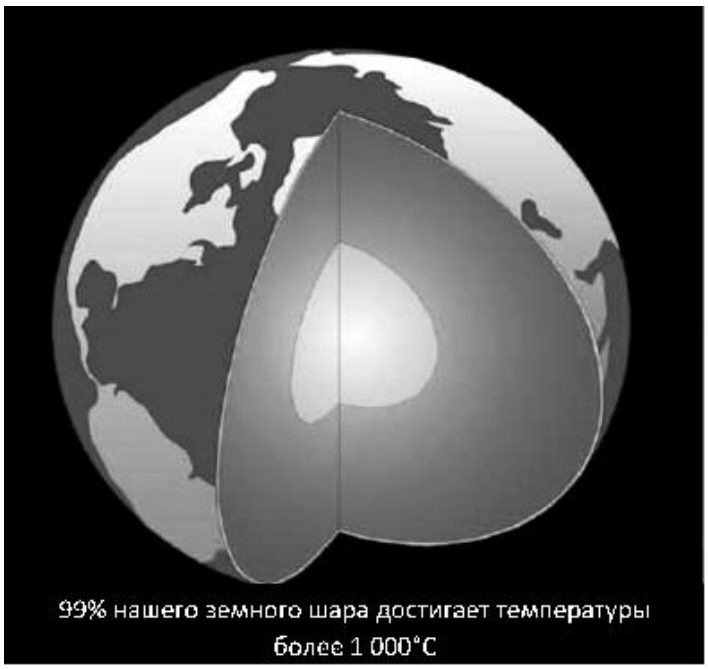


Рис. 13.1 Фактоид о геотермальной энергии.
Источник: Харинг Гео Проект (Haring Geo Project).

По своим теплофизическим и композиционным характеристикам геотермальные ресурсы различаются следующим образом:

1) Гидротермальная или геогидротермальная;
2) энергия, находящаяся под большим давлением внутри земли;
3) магма;
4) усовершенствованные геотермальные системы (EGS) – некогда, сухая, нагретая порода (HDR).

Для разных классов геотермальных ресурсов требуются разные стратегии добычи энергии. Однако прежде чем исследовать стратегии добычи энергии, мы рассмотрим общие характеристики каждого класса.

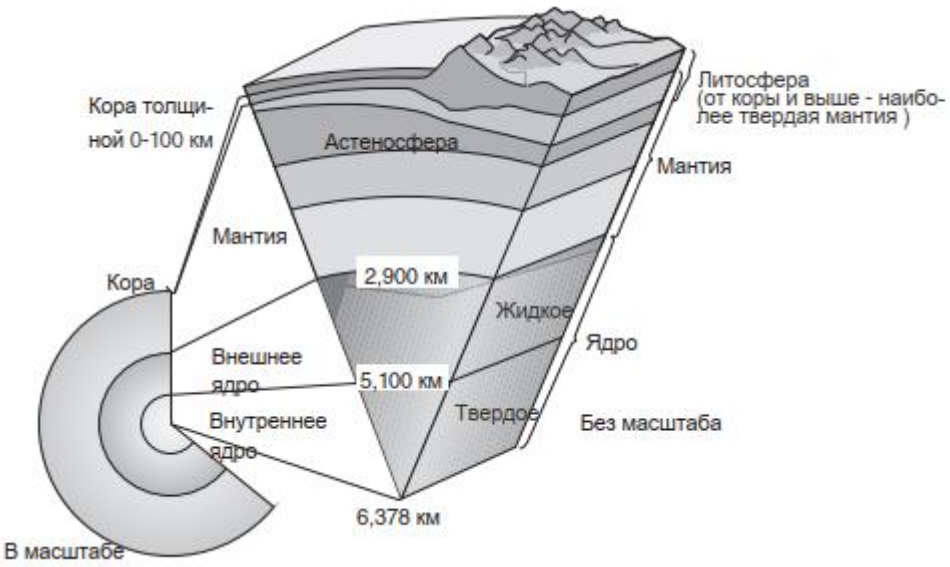


Рис. 13.2 Схема Земли. Источник: http://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/inside.html.

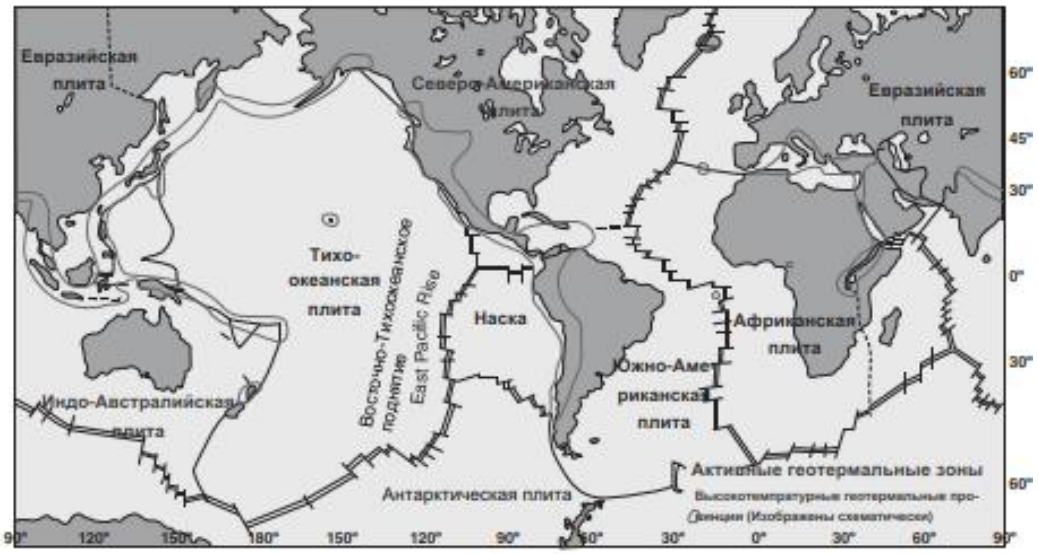


Рис. 13.3 Основные тектонические плиты и геотермальные зоны.
Источник: Даффилд и Сасс (2003:5).

«Гидротермальным» называется состояние, при котором вода нагревается и/или испаряется в результате прямого контакта с горячей пористой породой. Пористая или проницаемая порода на гидротермальном участке содержит породы с низкой проницаемостью. Вода, обеспечиваемая водоносными горизонтами, стекает через пористую породу, нагревается и, возможно, испаряется (образуя пар), и сбрасывается на поверхность. Гидротермальные системы, которые производят пар, помечены как системы с преобладанием пара, а гидротермальные системы, которые производят горячую воду или смесь горячей воды и пара, называются системами с преобладанием воды. Энергию из гидротермальных источников можно добыть сравнительно легко. Многие существующие геотермальные электростанции связаны с гидротермальными системами. Но формации с гидротермальными характеристиками редки, а гидротермальные ресурсы являются наиболее ограниченными из четырех категорий.

Ресурсы в зоне аномально высокого пластового давления связаны с заполненными осадком резервуарами, которые содержат горячую воду, удерживаемую под давлением, намного превышающим гидростатическое давление. Жидкости, содержащиеся в системах с избыточным давлением, находятся в диапазоне температур 150–18 °C и могут находиться под давлением до 600 бар (~9000 фунтов на квадратный дюйм). Во многих системах с аномально высоким пластовым давлением горячая вода может содержать метан в виде раствора, а также очень высокие уровни растворенных твердых веществ – до 100 000 част./млн. Эти солевые растворы обладают высокой коррозионной активностью и сложны в обращении.

Магма, расплавленная порода, содержится в слоях на доступных глубинах под действующими вулканами. Температура магмы обычно превышает 650°C, что делает магму привлекательной с точки зрения ресурса. Хотя плотность энергии расплавленной породы довольно велика, предлагаемые способы добычи энергии магмы в лучшем случае являются гипотетическими.

Сухая нагретая порода (СНП – HDR), подходящая в качестве геотермального ресурса, характеризуется температурой, превышающей 200°C, но, как следует из названия, практически не имеет содержания естественных жидкостей. Недавно системы СНП (HDR) были названы усовершенствованными геотермальными системами (УГС – EGS), и Министерство энергетики США приняло классификацию систем УГС (EGS). Основная идея для добычи энергии из ресурсов УГС заключается в нагнетании воды под давлением для разрушения породы и использования пара, образующегося из нагнетаемой воды, чтобы привести в действие турбину для выработки электроэнергии.

В таблице 13.1 представлены оценки доступных геотермальных ресурсов с точки зрения вышеупомянутых классификаций. Значения в таблице являются оценками по порядку величины и перечислены в порядке возрастания доступности геотермальных ресурсов:

Таблица 13.1 Оценка геотермальных ресурсов.

Классификация ресурсов	**Геотермальные ресурсы (1000 септильонов)**	
	США	**Мир**
Гидротермальные	10	130
В зоне аномально высокого давления	170	540
Магма	1 000	5 000
УГС (ранее СНП)	30 000	105 000

Источник: адаптировано из Тестер и соавт (2005).

гидротермальных, из зоны аномально высокого пластового давления, магматических и УГС (СНП). Топливно-энергетический комплекс США составляет около 100 квадриллионов (См. Главу 1), а в мире около 400 квадриллионов. Таким образом, при нынешних показателях использования, добыча гидротермальных ресурсов в США может длиться около 100 лет, но другие классификации геотермальных ресурсов предлагают практически неограниченное количество энергии. Проблема, конечно, в том, как добыть и использовать все эти ресурсы.

Полезность геотермальной энергии тесно связана с температурой геотермального ресурса. Удобным графиком для отображения применений геотермальной энергии и структур системы в зависимости от температуры является диаграмма Линдаля (рис. 13.4), названная в честь Бальдура Линдаля, пионера в развитии геотермальной энергии.



Рис. 13.4 Диаграмма геотермальной энергии Линдаля.

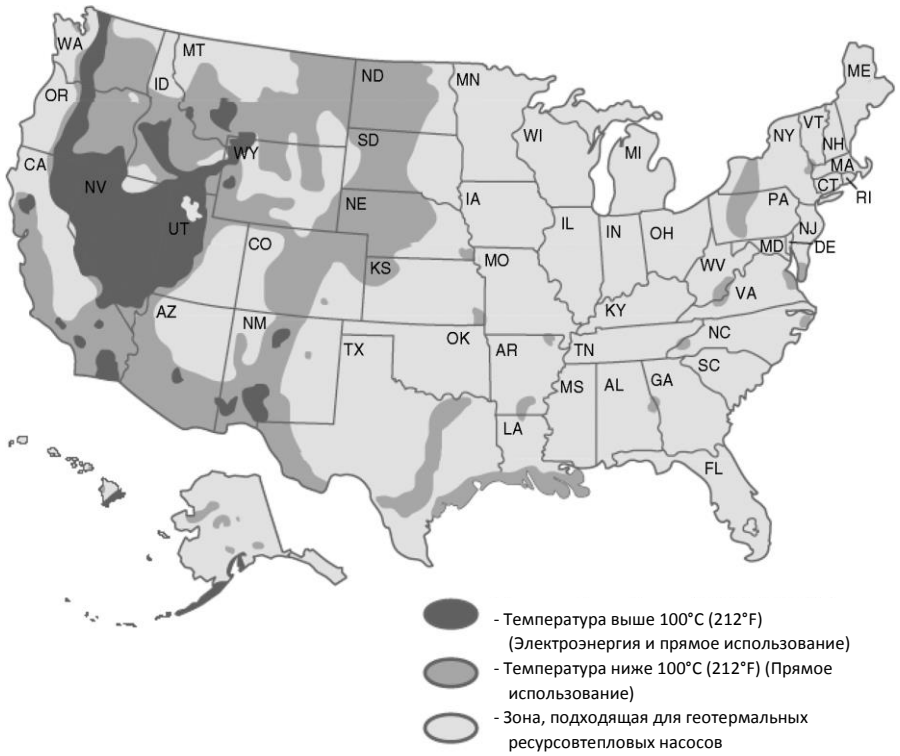


Рис. 13.5 Регионы США с доступными геотермальными ресурсами
Источник Геотермальный центр

В 2008 году Геологическая служба США (ГССШ – USGS) завершила оценку геотермальной энергии в США (USGS, 2008). Потенциал выработки электроэнергии из выявленных геотермальных ресурсов составляет 9057 МВт. Предполагаемый потенциал производства электроэнергии из неоткрытых геотермальных ресурсов составляет дополнительно 30 033 МВт. Тем не менее, по оценкам, 517 800 МВт можно было бы получить за счет внедрения передовых технологий для добычи высокотемпературных горных формаций с низкой проницаемостью. Это огромная мощность производства электроэнергии, учитывая, что 1000 ГВт (1 000 000 МВт) превышает номинальную мощность электрических сетей США. Для использования такого объема геотермальной энергии, потребовалось бы значительное изменение в развитии инфраструктуры и технологий.

На рис. 13.5 показаны регионы США с доступными геотермальными ресурсами. На этом рисунке геотермальные ресурсы выражены в аспекте возможностей конечного использования. Ресурсы температурой выше 100°C потенциально могут быть использованы для выработки электроэнергии, в то время как ресурсы ниже 100°C могут применяться для прямого использования тепловой энергии – в соответствии с диаграммой Линдаля (рис. 13.4). Большая часть этих геотермальных ресурсов расположена в горных и прибрежных районах на западе, которые в целом соответствуют активным геотермальным зонам на рис. 13.3. Как кратко упомянуто в разделе 13.1, тепловые насосы, использующие теплоту грунта (GSHP) также считаются потребителями геотермальной энергии – хотя и при низких температурах с небольшим (в метрах, а не километрах) доступом. Вся континентальная часть США предлагает возможность использования геотермальной энергии для насосов GSHP.

На рис. 13.6 Национальная лаборатория возобновляемой энергии (НЛВЭ – NREL) представила несколько иную точку зрения. На этом рис. проиллюстрированы глубоко расширенные ресурсы УГС (EGS), а также указаны местоположения установленных гидротермальных участков. Рисунки, в основном, совпадают, но на рис. 13.6 показана большая доступность УГС (EGS).

Различные классификации геотермальных ресурсов требуют разных технологий добычи. Далее представлены подробные данные геотермальных систем.

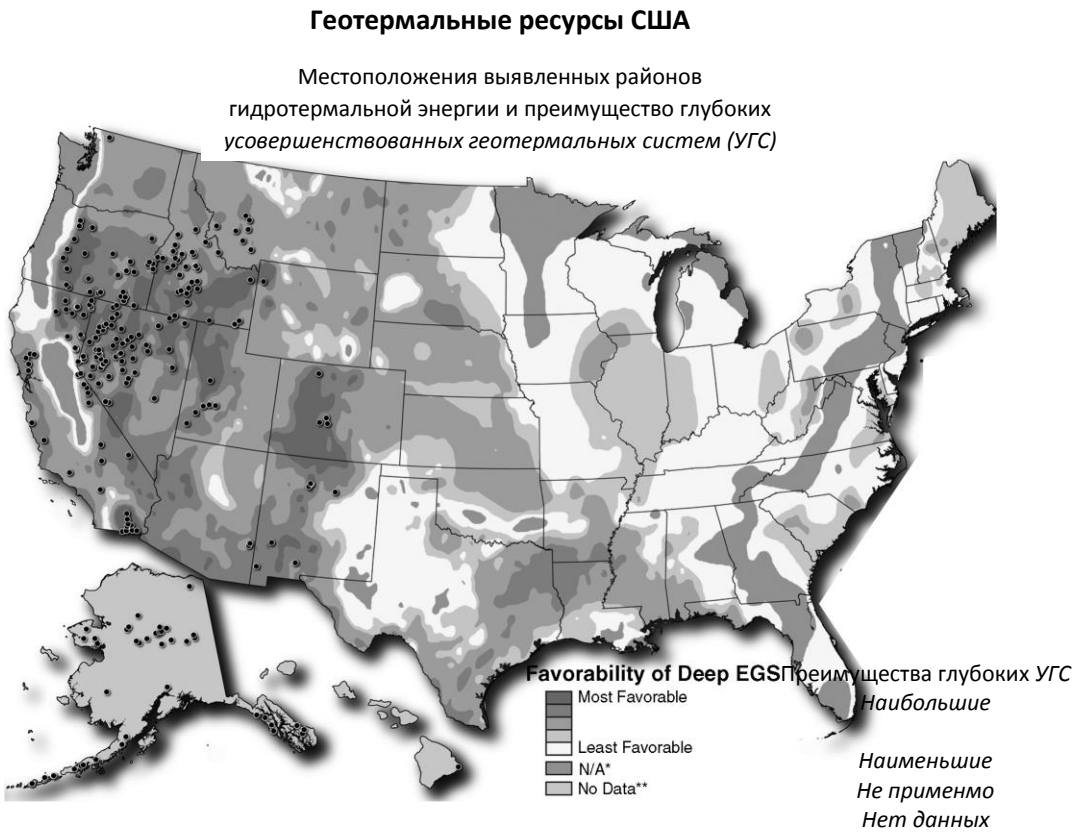


Рис. 13.6 Геотермальные ресурсы NREL (Национальной лаборатории возобновляемых источников энергии) в США. Источник: http://www.nrel.gov/gis/images/geothermal_resource2009-final.jpg.

13.3 Геотермальные энергетические системы

Различные системные конфигурации были предложены и исследованы в соответствии с различными классификациями для добычи геотермальных энергетических ресурсов. Автор книг о геотермальной энергетике Ronald Di Pippo (2012) представляет конструктивную презентацию и тематические исследования по геотермальной энергии и рекомендует прочитать об инженерных аспектах геотермальной энергии.

Далее будут подробно рассмотрены несколько геотермальных систем.

13.3.1 Гидротермальная энергетика

Гидротермальные источники имеют либо горячую воду, либо пар и являются самыми легкими геотермальными источниками для добычи энергии. Растворенные в воде твердые вещества, механические примеси, а также неконденсирующиеся газы являются проблемами, с которыми обычно сталкиваются при добыче большинства геотермальных ресурсов. Механические примеси обычно удаляются центробежными сепараторами в устье скважины, но фильтры устанавливаются в систему для обеспечения удаления твердых частиц. В некоторых местах наблюдается большое количество неконденсирующихся газов, которые создают много проблем для геотермальных систем. Во влажных условиях многие неконденсирующиеся газы образуют кислоты, что требует использования нержавеющей стали или других дорогих материалов. Кроме того, при попадании в атмосферу эти газы очень опасны для окружающей среды. Гидротермальные источники обычно рассматривают с точки зрения преобладания паров или жидкостей.

Гидротермальные источники с преобладанием паров являются наиболее подходящими для производства электроэнергии, однако они являются редчайшим источником геотермальной энергии. Как следует из названия, пар является доступным ресурсом в системах с преобладанием паров. Для систем с преобладанием паров требуется пар температуры >175°C (Кучер, 2000).

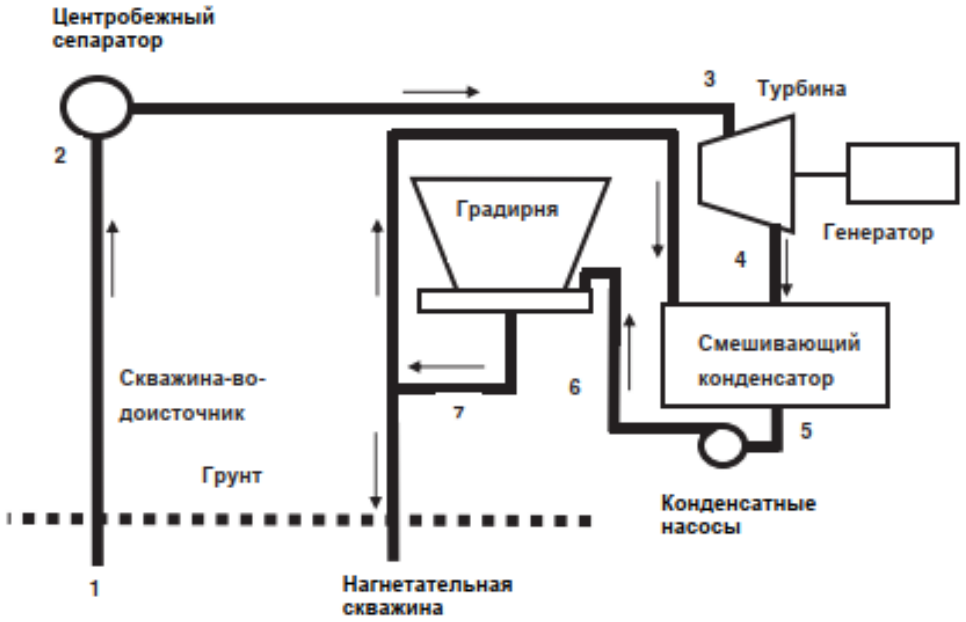


Рис. 13.7 Схема геотермальной системы с преобладанием пара

Условия на поверхности редко превышают 205°C и 8 бар (Эль-Вакиль, 1984). На рис. 13.7 представлена схема системы с преобладанием пара. Пар из скважины проходит через центробежный сепаратор и поступает в турбину. После выхода из турбины пар конденсируется, охлаждается в градирне и закачивается обратно. На рис. процессы перехода пара в термодинамические состояния обозначены под цифрами 1–7. На рис. 13.8 показан путеводитель процесса на диаграмме T – s. В состоянии 1 – насыщенный пар (пар) в забое скважины. Затем пар проходит через центробежный сепаратор (состояние 2) для удаления твердых частиц и поступает в турбину (состояние 3) в виде перегретого пара. Процессы 1–2 и 2–3 являются по существу изоэнтальпическими процессами с постоянной энтальпией (дросселированием). В турбине происходит некоторая конденсация, и смесь переходит в состояние 4. Состояние 4 представляет собой состояние выхода, если процесс расширения турбины был изоэнтропическим. Состояние 5 – это выход пара из конденсатора, а состояние 6 – это состояние после действия насоса для откачки конденсата в градирне. Затем в состоянии 7 образовавшаяся жидкость покидает градирню и либо повторно закачивается, либо используется в смешивающем конденсаторе. Подробности термодинамики систем с преобладанием пара представлены в примере 13.1.

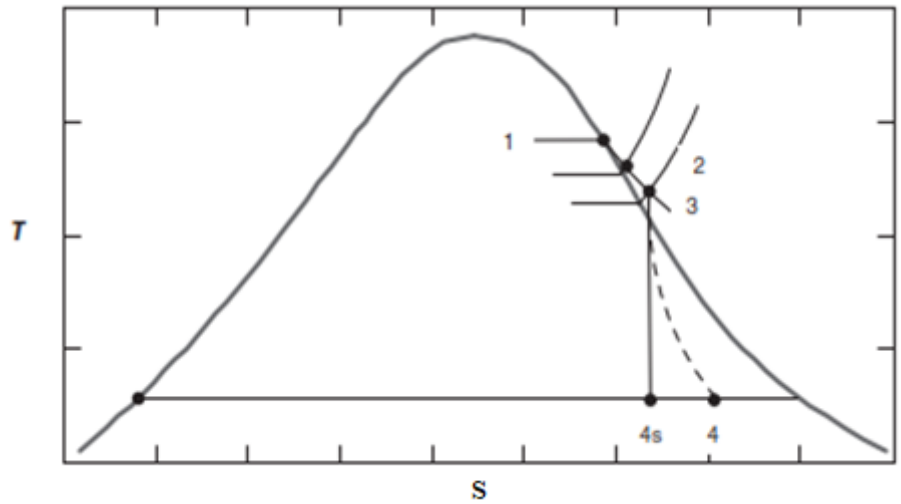


Рис. 13.8 Диаграмма зависимости T–s для систем с преобладанием пара.

Пример 13.1

Геотермальные системы с преобладанием пара снабжаются насыщенным паром при давлении 3 МПа. Пар поступает в турбину под давлением 0,5 МПа и выходит под давлением 15 кПа. Изоэнтропический коэффициент полезного действия турбины составляет 82%, а электрогенератора - 90%. Проанализируйте производительность системы (тепловую эффективность и скорость нагрева) при обратной закачке в градирню. Каким должен быть расход пара для выработки электроэнергии мощностью 10 МВт?

Решение: насыщенный пар под давлением 3 МПа обладает следующими свойствами:

$$h_1 = 2804.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}_{\text{и}} \quad T_1 = 233.9 \ \text{K}$$

Процессы перехода из состояния 1 в состояние 3 являются постоянной энтальпией, таким образом

$$h_1 = h_2 = h_3$$

как показано на рис. 13.8, процесс перехода постоянной энтальпии из состояния 1 в состояние 3 приводит к образованию перенасыщенного пара. Под давлением 0,5 МПа (Tsat=151.9°C) и h_3 = 2804:2 кДж = кг, остальные изучаемые свойства имеют вид:

$$T_3 = 176.7 \ ^\circ\text{C} \ \text{и} \quad s_3 = 6.945 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}$$

при температуре перегрева 25 °C. Путеводитель по процессу 3–4s имеет изоэнтропический характер, таким образом

$$s_{4s} = s_3 = 6.945 \frac{\text{кДж}}{\text{кг K}} \qquad P_4 = 15 \ \text{кПа}$$

в состоянии 3 в области перегрева и 4s «под куполом». Под давлением15 кПа:

$$s_f = 0.7549 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}, \qquad s_{fg} = 7.2536 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}, \qquad h_f = 225.94 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}; \qquad h_{fg} = 2373.1 \frac{\text{кг}}{\text{кДж}}$$

Качество в состоянии 4s можно выразить как:

$$s_{4s} = 6.945 \frac{\text{кДж}}{\text{кг K}} = 0.7549 \frac{\text{кДж}}{\text{кг K}} + x \times 7.2536 \frac{\text{кДж}}{\text{кг K}}$$

$$x = 0.853$$

И по установленному качеству вычисляют энтальпию:

$$h_{4s} = 225.94 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.853 \times 2373.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 2251 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Тогда извлеченная идеальная (изоэнтропическая) работа приобретает следующий вид:

$$W_{\text{идеал}} = h_3 - h_{4s} = 2804.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 2251 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 553 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

при этом, фактическая работа ($W_{факт}$) будет равна:

$$W_{\text{факт}} = \eta_e W_{\text{идеал}} = 0.82 \times 553 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 454 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

При температуре 20 °C (принятой за температуру окружающей среды) ($T_{окр}$), энтальпия жидкости будет равна:

$$h_{\text{окр.ср}} = 83.96 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Тепловой КПД производства электроэнергии ($\eta_{термал}$) – это электрическая энергия ($n_{элек}$), произведенная на килограмм, деленная на доступную энергию жидкости (от скважины до окружающей среды ($h_{окр}$):

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{\eta_{\text{электр}} W_{\text{факт}}}{h_1 - h_{\text{окр.ср}}} = \frac{0.9 \cdot 454 \text{кДж/кг}}{2804.2 \text{кДж/кг} - 83.96 \text{кДж/кг}} = 0.15$$

Получив которую, можно вычислить скорость нагрева, БТЕ на кВт час.

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{3412}{\eta_{\text{тепл}}} \frac{\text{Бте}}{\text{кВт ч}} = 22\,730 \frac{\text{Бте}}{\text{кВт ч}}$$

Поскольку тепловой КПД настолько мал, скорость нагрева значительно выше, чем скорость, связанная с первичными источниками энергии, рассмотренными в главе 12.

Массовый расход пара , необходимого для производства электроэнергии мощностью 10 МВт, составляет в кг/с:

$$\dot{m}_{\text{пар}} = \frac{10 \text{МВт}}{\eta_{\text{электр}} W} = \frac{10 \text{МВт}}{0.9 \times 454 \text{кДж/кг}} = 24.5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Тепловой КПД лишь на 15% не включает потери и требования к перекачке. Действительно, принятый тепловой КПД геотермальных систем с преобладанием паров составляет около 10%. Одним из последствий низкого теплового КПД является то, что массовый расход и размеры потока системы должны быть большими, чтобы вырабатывать значительную мощность.

Геотермальные ресурсы с преобладанием жидкости являются более многочисленными, чем источники с преобладанием пара. В системах с преобладанием жидкости вода доступна при температуре 150–315 °C. Если давление снижается, то вода будет превращаться в двухфазную смесь относительно низкого качества – отсюда и название «с преобладанием жидкости». При системах с преобладанием жидкости возможны три конфигурации системы: зольная, бинарная и общая. Каждая будет рассмотрена по очереди.

В системах быстрого испарения горячий рассол из геотермальной скважины выводится на поверхность, где давление снижается, а часть жидкости сбрасывается в пар. Пар расширяется через турбину для производства электричества, а жидкость повторно вводится через другой ствол скважины. Схема системы с преобладанием быстро вскипающей жидкости представлена на рис. 13.9, а диаграмма T-s процесса представлена на рис. 13.10.

Вода из ствола скважины подается в состоянии 1 и поступает в сепаратор очистки в состоянии 2 после изоэнтальпического процесса. В сепараторе очистки пар в состоянии 3g направляется в турбину, а жидкость в состоянии 3f закачивается обратно. В турбине пар в состоянии 3g расширяется до состояния 4. Процесс изоэнтропического расширения до состояния 4 также показан на рис. 13.10. Смесь конденсируется в смешивающем конденсаторе до состояния 5,6. Часть конденсата вводится обратно, а часть направляется в градирню и впоследствии используется в смешивающем конденсаторе в качестве охлаждающей жидкости. Одним из недостатков системы быстрого вскипания является то, что рассол (состояние 3f), который содержит значительную энергию, вводится повторно. Энергия извлекается только из паровой фазы. В примере 13.2 изложена задача, касающаяся геотермальных систем с преобладанием быстро вскипающей жидкости.

Пример 13.2

Геотермальная электростанция снабжается водой при температуре забоя скважины 225°C и давлении 8 МПа. Поток жидкости поступает в сепаратор очистки, функционирующий при давлении 40 кПа. Давление на выходе турбины составляет 10 кПа. Полный КПД турбины составляет 0,83. Рассчитайте тепловой КПД, скорость нагрева и массовый расход пара и воды, необходимые для мощности 10 МВт.

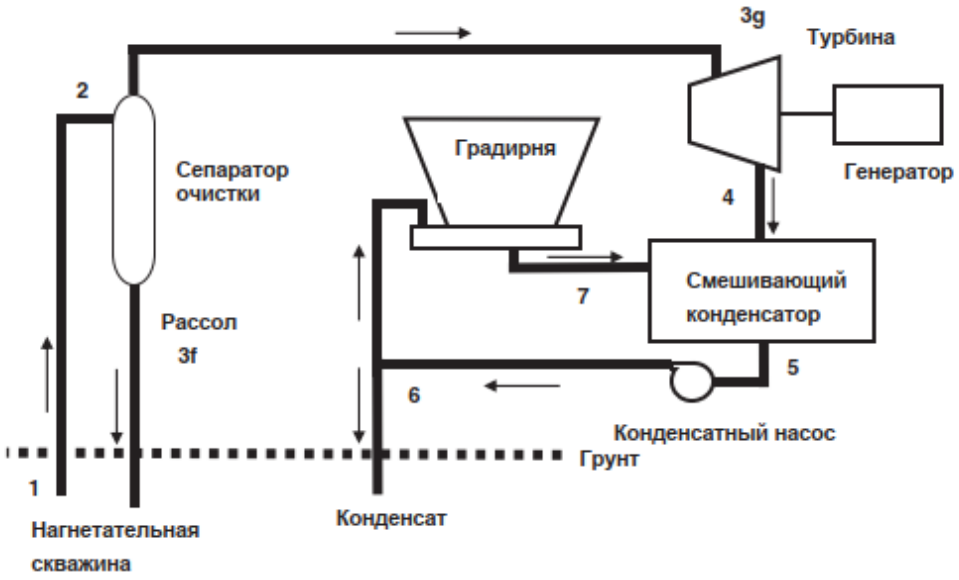


Рис. 13.9 Схема геотермальной системы с преобладанием быстро вскипающей жидкости.

Решение: свойства для этого примера рассчитаны с использованием промышленного состава IAPWS 1997 для термодинамических свойств воды и пара (Пальмер и соавт., 2004). При давлении 8 МПа и температуре 225°C жидкость с забоя скважины обладает энтальпией

$$h_1 = 968.18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

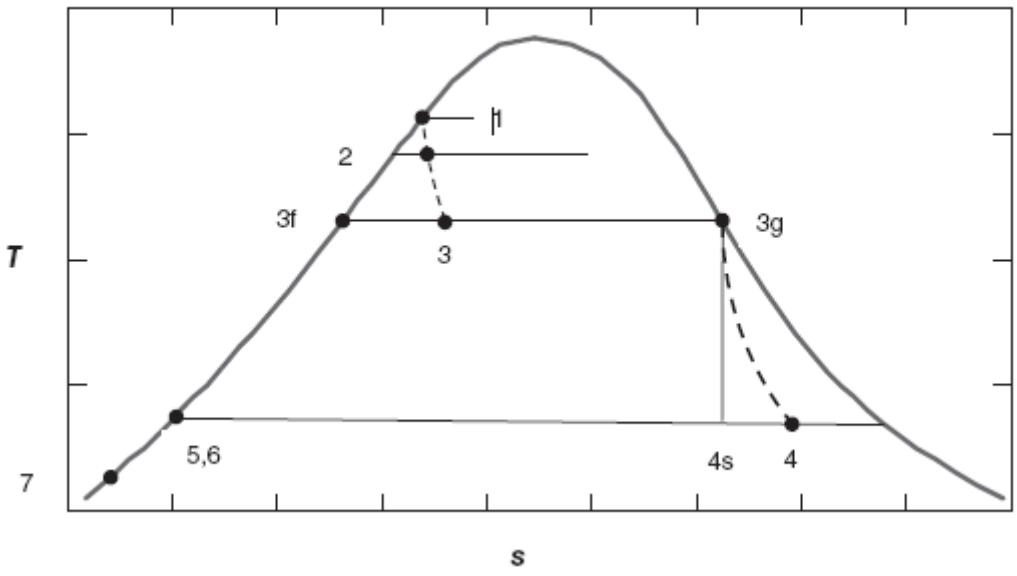


Рис. 13.10 Диаграмма зависимости *T*–*s* для систем с преобладанием быстро вскипающей жидкости.

Процессы перехода из состояния 1 в состояние 3 являются изоэнтальпическими, таким образом

$$h_1 = h_2 = h_3$$

Как показано на рис. 13.10, изоэнтальпический процесс с постоянной энтальпией перехода из состояния 1 в состояние 3 приводит к смеси жидкости и пара. При давлении 40 кПа:

$$h_f = 317.62 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_{fg} = 2318.5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_g = 2636.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad s_g = 7.667 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Качество можно определить в состоянии 3 следующим образом

$$h_3 = 968.18\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 317.62\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + x \times 2318.5\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$x = 0.281$$

Поскольку только пар (x 1) поступает в турбину, h3g 2636:1 к Дж = кг К и s3g 7:667 к Дж = кг К. На выходе турбины, P410 кПа, и остальные свойства, представляющие интерес

$$s_f = 0.6492\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}, \quad s_{fg} = 7.4998\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}, \quad h_f = 191.81\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_{fg} = 2392.1\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изоэнтропический процесс, 3–4s, имеет s3g = s4s 7:667 к Дж = кг К, с тем, чтобы качество в состоянии 4s стало

$$s_{4s} = 7.667\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} = 0.6492\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} + x \times 7.4998\frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

$$x = 0.936$$

И энтальпия в состоянии 4s

$$h_{4s} = 191.81\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.936 \times 2392.1\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 2431\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Идеальный (изоэнтропический) извлеченный продукт становится

$$W_{\text{идеал}} = h_{3g} - h_{4s} = 2636\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 2431\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 205\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

А фактический продукт

$$W_{\text{факт}} = \eta_e W_{\text{идеал}} = 0.83 \times 205\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 170\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

При температуре 20 °C, энтальпия жидкости равняется **h amb** 83:91 к Дж = кг.

Массовый расход пара, необходимый для выработки электроэнергии мощностью 10 МВт

$$\dot{m}_{\text{факт}} = \frac{10\,\text{MW}}{W_{\text{пар}}} = \frac{10\,\text{MW}}{170\text{кДж/кг}} = 58.69\frac{\text{кг}}{\text{s}}$$

И вода, которая потребуется из геотермальной скважины

$$\dot{m}_{\text{вода}} = \frac{\dot{m}_{\text{пар}}}{x} = \frac{58.670\frac{\text{кг}}{\text{с}}}{0.281} = 209.2\frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Из-за низкого качества рабочей жидкости в сепараторе пара требуемый массовый расход воды из геотермальной скважины является большим для количества произведенной энергии.

Тепловой КПД выработки электроэнергии – это вырабатываемая электрическая энергия на килограмм пара, деленная на доступную энергию (энтальпию) жидкости (соответствующей температуре окружающей среды):

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{W_{\text{факт}}}{h_1 - h_{\text{окр.ср.}}} = \frac{170\ \text{кДж/кг}}{968.18\ \text{кДж/кг} - 83.91\ \text{кДж/кг}} = 0.193$$

Получив которую можно вычислить скорость нагрева (heat rate) следующим образом:

$$\text{Скорость нагрева} = \frac{3412}{\eta_{\text{тепл}}} \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВтч}} = 17\,710 \frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт ч}}$$

По сравнению с большинством других систем, рассмотренных в учебнике, скорость нагрева довольно велика, поскольку тепловой КПД низкий. Однако тепловой коэффициент полезного действия, рассчитанный только с использованием пара, не учитывает энергию закачиваемой воды. Тепловой КПД «забоя скважины» при производстве электроэнергии – это электрическая энергия, производимая паром, деленная на доступную энергию (энтальпию) жидкости, извлеченной из забоя скважины:

$$\eta_{\text{забой скважины}} = \frac{\dot{m}_{\text{пар}}\ W_{\text{факт}}}{\dot{m}_{\text{вода}}\ (h_1 - h_{\text{окр.ср}})} = \frac{xW_{\text{факт}}}{h_1 - h_1} = x\eta_{\text{тепл}} = 0.281 \times 0.193 = 0.054$$

Как и в случае теплового КПД, коэффициент полезного действия, основанный на расходе воды в забое скважины, не учитывает потери и энергию вспомогательного оборудования, необходимого для эксплуатации установки. Таким образом, в системе сепаратора очистки выработка электроэнергии на килограмм добываемой воды из забоя скважины является довольно низкой.

Как показано в примере 13.2, геотермальная система с преобладанием быстро вскипающей жидкости имеет низкий КПД забоя скважины, так как много энергии повторно вводится обратно на площадку. Предложенное решение представляет собой концепцию общего расхода для систем с преобладанием жидкости, в которых турбина заменяется расширителем смешанного потока, который извлекает энергию из парожидкостной смеси, что позволяет расширить общий поток устья скважины до величины давления в конденсаторе. Предлагаемая схема и диаграмма T – s представлена на рисунках 13.11 и 13.12:

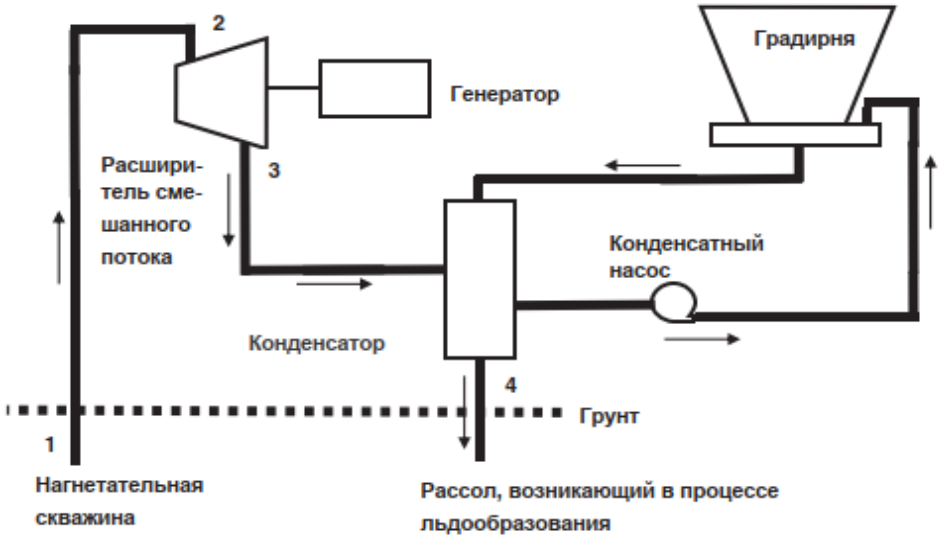


Рис. 13.11 Схема геотермальной системы с преобладанием жидкости полного потока.

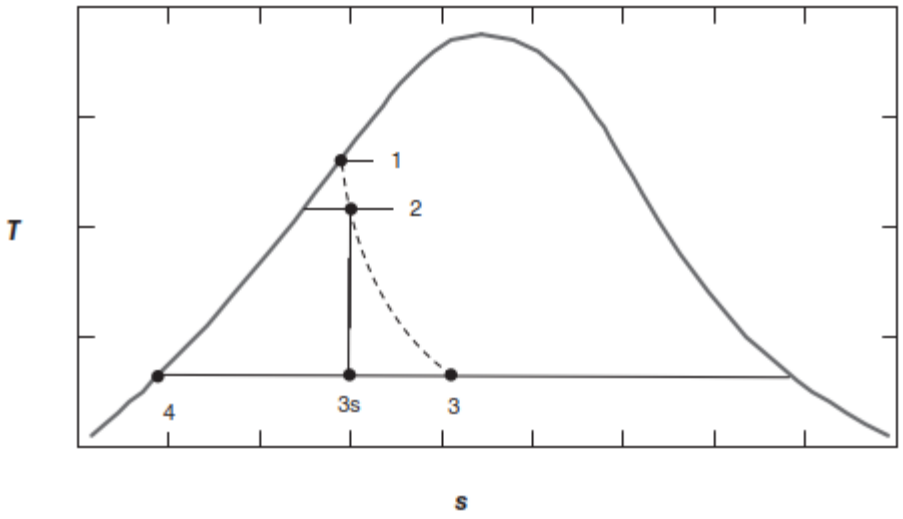


Рис. 13.12 Диаграмма T–s для систем с преобладанием жидкости общего потока.

Вместо прохождения процесса быстрого вскипания, жидкость из скважины - водоисточника поступает в расширитель смешанного потока в состоянии 2 и выходит из расширителя в состоянии 3. Вся жидкость из скважины направляется в расширитель. В принципе, процесс прост; однако большинство геотермальных жидкостей содержат значительные концентрации коррозийных твердых веществ и растворенных газов, и проектирование турбин, расширяющихся от почти насыщенной жидкости до двухфазного потока, является сложной задачей. Действительно, изучение литературы показывает большой интерес к расширителям смешанного потока для геотермальной эксплуатации в 1970-х и 1980-х годах, после чего интерес к ним снизился, а в настоящее время наблюдается повышенный интерес. Изоэнтропические КПД для расширителей со смешанным потоком не должны быть такими высокими, как для обычных однофазных рабочих жидкостных турбин. Di Pippo (2012) приходит к заключению, что для соответствующих условий для систем однократного испарения и общим потоком расширитель смешанного потока, чтобы быть конкурентоспособным, должен обладать изоэнтропическим КПД около 50%. Пример 13.3 является разновидностью примера 13.2, но речь в нем об использовании расширителя смешанного потока.

Пример 13.3

Рассмотрим геотермальную систему с полным потоком, использующую те же условия в забое

скважины, что и в примере 13.2. Жидкость поступает в расширитель в виде насыщенной жидкости и сливается при давлении 10 кПа. Определите тепловой КПД, скорость нагрева и расход для системы мощностью 10 МВт, если расширитель со смешанным потоком обладает изоэнтропическим КПД 0,50.

Решение: термодинамические свойства для этого примера взяты из учебника под авторством Ценгель и Болес (Ценгел и Болес) (1998). Для заданных условий состояние 2 является насыщенным состоянием; следовательно, на рис. 13.12 состояния 1 и 2 происходят на линии насыщения и являются одинаковыми. Давление насыщения для температуры насыщения 225 °C составляет 2,548 МПа. Таким образом, в состоянии 2

$$h_f = 966.78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}/^\circ\text{К}} \quad h_{fg} = 1836.5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}/^\circ\text{К}} \quad s_{f2} = 2.5639 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}/\ ^\circ\text{К}}, \quad s_{fg2} = 3.6863 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}/\ ^\circ\text{К}}$$

Процесс 2-3s является изоэнтропическим, таким образом

$$s_{3s} = s_{f2} = 2.5369 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\ ^\circ\text{К}}$$

Смесь на выходе расширителя при 10кПа. Соответствующие свойства для состояния 3

$$s_f = 0.6493 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad s_{fg} = 7.5009 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad h_f = 191.83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \quad h_{fg} = 2392.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Качество на выходе расширителя становится

$$s_{3s} = 2.5369 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 0.6493 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + x \times 7.5009 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$
$$x = 0.255$$

И энтальпия в состоянии 3 s

$$h_{3s} = 191.83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.255 \times 2392.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 802.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Идеальный (изоэнтропический) извлеченный продукт становится

$$W_{\text{идеал}} = h_2 - h_{3s} = 966.78 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} 802.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 164.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

И фактическая работа

$$W_{\text{факт}} = \eta_e W_{\text{идеал}} = 0.50 \times 164.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 82.1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

При температуре 20 °C, энтальпия жидкости равняется h amb 83:96 к Дж = кг.
Массовый расход, требуемый для производства энергии мощностью 10 МВт, равен

$$\dot{m} = \frac{10\ \text{МВт}}{W_{\text{факт}}} = \frac{10\,\text{МВт}}{82.1\ \text{кДж/кг}} = 121.8\frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Тепловой КПД производства электроэнергии – это произведенная электрическая энергия, деленная на доступную энергию (энтальпию) из скважины:

$$\eta_{\text{тепл}} = \frac{W_{\text{факт}}}{h_2 - h_{\text{окр.ср}}} = \frac{82.1\ \text{кДж/кг}}{967\ \text{кДж/кг} - 83.96\ \text{кДж/кг}} = 0.093$$

Получив которую, можно вычислить скорость нагрева (heat rate):

$$\text{скорость нагрева} = \frac{3412\ \text{БТЕ}}{\eta_{\text{тепл}}\ \text{кВт}} = 36\,690\frac{\text{БТЕ}}{\text{кВт}}$$

Скорость нагрева выше, чем для системы быстрого вскипания, но скорость массового расхода значительно снижается, так как вся извлеченная жидкость проходит через расширитель смешанного потока. Этот пример сглаживает многие проблемы, связанные со смешанным расширителем потока для геотермальной системы общего потока, но он иллюстрирует, почему такая схема выгодна и привлекательна.

Другой распространенной системой для геотермальных применений с преобладанием жидкости является бинарная система. Ряд существующих геотермальных электростанций используют такие системы. Схема, иллюстрирующая важные компоненты бинарной системы с преобладанием жидкости, представлена на рис. 13.13.

В бинарной геотермальной системе участвуют две жидкости: горячий рассол из геотермальной скважины и рабочая жидкость (обычно углеводород), которая циркулирует в закрытой части системы, которая включает турбину, конденсатор и теплообменники. В бинарной системе горячий рассол для скважины подает горячую жидкость в теплообменник, в котором органическая жидкость подвергается испарению. Проходя через турбину, органический пар расширяется и конденсируется в конденсаторе и, следовательно, находится в замкнутой системе. Градирня используется в качестве холодной среды в конденсаторе. Строго говоря, единственными геотермальными компонентами бинарной системы являются процесс подачи/повторного нагнетания скважины и теплообменника. Рабочие жидкости, используемые в бинарных геотермальных системах, включают пропан (C_3H_8), изобутен (2-метилпропан, C_4H_{10}), изопентан (2-метилбутан, C_5H_{12}) и воду-аммиак. Все рабочие жидкости имеют точки кипения ниже, чем у воды. Бинарные системы имеют преимущества по сравнению с системами с преобладанием быстро закипающей жидкости, и не последним из которых является то, что только теплообменник и компоненты для транспортировки горячего рассола подвергаются воздействию обычно жестких и агрессивных рассолов.

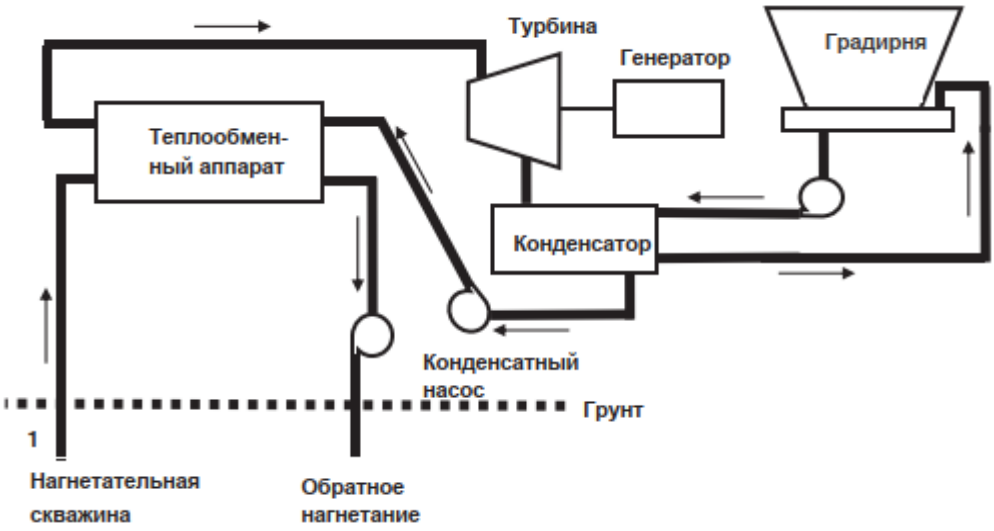


Рис. 13.13 Схема бинарной геотермальной системы с преобладанием жидкости.

13.3.2 Газ зон геодавлений

Ресурсы, находящиеся в зонах аномально высокого пластового давления, могут находиться под давлением до 1000 бар (15 000 фунтов на кв. дюйм), при давлениях, которые намного выше (в 2 раза), чем гидростатические, и находятся в диапазоне температур 150–180°C. В США основное местонахождение таких ресурсов находится в регионе побережья Мексиканского залива в штатах Техас и Луизиана. На рис. 13.14 в заштрихованных регионах показано расположение ресурсов, находящихся под геодавлением. Участки зон геодавлений имеют глубину 2000–9000 м. Общие черты многих ресурсов, находящихся под геодавлением, включают высокое содержание растворенного метана и высокий уровень растворенных твердых веществ – до 100 000 ч/млн. Рассол из зон геодавлений обычно содержит 30–80 фут³/баррель метана. Действительно, Smil (2003) оценивает, что глобальные ресурсы солевого газа из зон геодавлений могут быть более чем в 100 раз больше текущих доказанных запасов природного газа, и что регион Мексиканского залива может содержать больше метана солевого газа, чем текущие запасы природного газа.



Рис. 13.14 Местоположения ресурсов зон геодавлений.

Такие рассольные растворы обладают высокой коррозионной активностью и сложны в обращении. Большинство предлагаемых схем добычи ресурсов, находящихся под избыточным давлением, включают в себя извлечение энергии и метана. Сочетание глубины и содержания рассола в зонах с избыточным давлением делает добычу энергии и метана из этого ресурса трудным и капиталоемким. За последние годы было выполнено несколько технико-экономических обоснований систем с избыточным давлением, некоторые из них с экономическими составляющими, однако от которых, за исключением экспериментальных исследований, пришлось отказаться в связи с техническими проблемами и высокой стоимостью.

13.3.3 Магма

Магма – это расплавленная порода (температура которой обычно превышает 650°C), которая содержится в бассейнах на 3–10 км ниже действующих вулканов и в других геологических формациях. Хотя плотность энергии расплавленной породы велика и предполагаемые ресурсы весьма значительны (см. Таблицу 13.1), методы добычи энергии магмы в лучшем случае являются гипотетическими. Наиболее упоминаемыми исследованиями по извлечению энергии магмы были те, что спонсировались Национальной лабораторией Сандиа в 1980-х годах. Исследования в работах ученых Dunn (1987) и Boehm *at al*. (1989) являются прекрасными результатами усилий лаборатории Сандиа. Хорошей новостью является то, что, помимо производства энергии, высокая температура и давление, связанные с бассейнами магмы, также производят желаемое газообразное топливо, такое как водород, окись углерода и метан. Плохая новость заключается в высокой температуре окружающей среды и высокой концентрации агрессивных газов и твердых веществ, которые усугубляют проблемы совместимости и долговечности материалов.

При температуре 600°C оксид железа вступает в реакцию с водой, образуя водород в соответствии с формулой

$$2FeO + H_2O \rightarrow 2FeO_{1.5} + H_2 \tag{13.1}$$

Количество производимого водорода может быть увеличено путем введения биомассы в закачиваемую воду. В химическом процессе, похожем на газификацию, образуются значительные количества окиси углерода, углекислого газа и метана, а также пара и водорода.

На рис. 13.15 представлен эскиз того, как может появиться электростанция, работающая на магме. Кроме использования пара, выработанного для производства электроэнергии, также будет извлекаться газообразное топливо. Как показано на рисунке, бассейны магмы довольно большие, один бассейн магмы может обеспечивать энергией и топливом в течение многих лет. Хотя потенциал велик, технологические проблемы также бесконечны, и общий консенсус заключается в том, что нам еще очень далеко до электростанций/топливных установок, работающих на глубоко расположенной в недрах магме. Недавно произошедшие два события вызвали крайний интерес к энергии магмы:

(1) картирование очень большого магматического бассейна под Йеллоустонским национальным парком; (2) имевшая место в Исландии случайная генерация электроэнергии с использованием неглубоко расположенной магмы. Оба эти события обсуждаются в следующем параграфе.

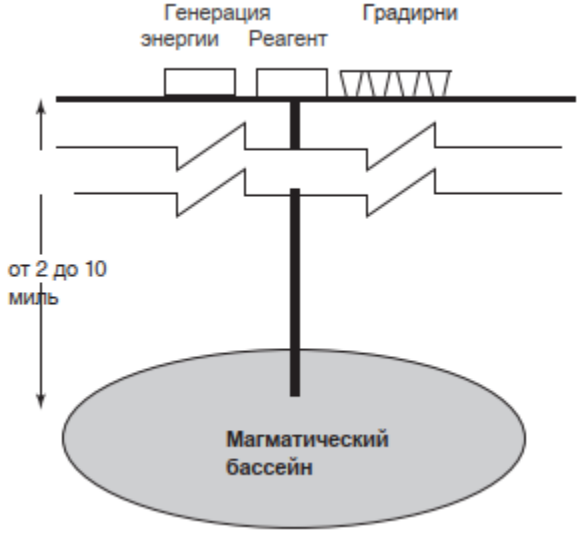


Рис. 13.15 Визуальное отображение электростанции, работающей на магме

В Университете Юты группа исследователей Хаунг и соавт. (2015) определили и нанесли на карту огромный бассейн лавы (магмы) под Йеллоустонским национальным парком. Структура магмы включает два сегмента: 1) верхняя мелкая «китообразная» магматическая камера, ориентированная хвостом к поверхности, глубиной 2–10 км, с мелким концом, состоящим из гидротермальных жидкостей, 2) и нижняя камера с более глубоким концом, состоящим из магмы. Объем этой верхней

камеры оценивается примерно в 10 000 км³ (в 2,5 раза больше объема Большого каньона). Магма губчатая и примерно на 9% состоит из жидкой фазы. Более глубоко расположенная камера находится на глубине 20–50–60 км ниже поверхности и соединена с верхней камерой. Объем нижней камеры составляет около 45 000 км³ (в 11,2 раза больше объема Большого каньона) и находится в состоянии около 2% жидкой фазы. Событие исключительного по силе извержения магмы было бы катастрофическим с климатологической точки зрения, но исследователи Университета Юты оценивают эти шансы в 1 на 700 000 в год. В 2009 году в рамках Исландского проекта глубокого бурения (IDDP) (Elders et al., 2014) в поисках обычной геотермальной энергии на глубине 2,1 км был обнаружен бассейн магмы. В скважину зацементировали стальной корпус, перфорированный в нижней части. Для выработки электроэнергии мощностью около 36 кВт использовался пар при температуре более 450°C из магмы. Это достижение является важной вехой, поскольку оно с успехом показало, что контролируемым образом, хоть и из мелкого, а не из глубокого бассейна магмы, можно извлечь энергию и использовать для выработки электричества. В конечном итоге участок добычи был закрыт из-за отказа оборудования. Исландия стремится к дальнейшему производству электроэнергии из магмы.

13.3.4 Увеличение выхода геотермальных систем

Предлагаемые технологии добычи энергии для систем УГС (или СНП) включают закачку воды в ресурс, циркуляцию воды через породу в качестве механизма захвата энергии и подачу нагретой воды на поверхность для использования. Из-за низкой теплопроводности породы необходимы большие площади поверхности, чтобы извлечь существенное количество энергии. Таким образом, главная проблема в системах УГС (EGS) состоит в том, как в горячей породе достичь больших площадей поверхности, необходимых для эффективной добычи тепловой энергии. Большинство предлагаемых способов использования ресурса УГС предусматривает гидравлический разрыв пласта путем нагнетания воды в пласты под очень высоким давлением (200 атм). В системах УГС с достаточной площадью поверхности можно использовать методы, разработанные для повышения отдачи нефти. Чтобы узнать интересные новости из истории УГС, поищите в интернете тему «Project Plow share».

Для объектов УГС требуются нагнетательные и эксплуатационные скважины. Предлагаемая схема для участка УГС представлена на рис. 13.16. На рис. показаны раздробленные горячие породы, а также нагнетательные и эксплуатационные скважины. Эль-Вакил (1984) сделал сообщение об исследовании, проведенном в Лос-Аламосской национальной лаборатории, в котором говорится, что вода будет закачиваться при абсолютном давлении 1600 фунт/кв.дюйм и температуре 65°C и извлекаться при абсолютном давлении 2000 фунт/кв.дюйм и температуре 280°C. В 2008 году Министерство энергетики США завершило 8-месячную оценку технологических разработок, необходимых для того, чтобы УГС стала коммерчески жизнеспособной. Результаты доступны в программе геотермальных технологий (2008). Требования к технологии каротажа включают выбор и характеристику участка добычи, создание пластового резервуара, разработку поля скважины, эксплуатацию системы, а также технологии бурения и преобразования энергии. Как и с некоторыми другими геотермальными ресурсами, экономичное и безопасное внедрение УГС потребует значительного усовершенствования и капитала.

13.4 Примеры геотермальных систем

В предыдущих разделах этой главы мы рассмотрели различные аспекты геотермальных энергетических систем, поэтому приведем несколько примеров. В 2012 году в США мощность производства геотермальной электроэнергии составила 3792 МВт (Esterly and Gelman, 2014; Matek, 2014), при этом штаты Калифорния, Невада, Юта, Орегон и Айдахо получали значительное количество энергии из геотермальных ресурсов. В книге автора Матека (2014) содержится список и некоторые детали геотермальных электростанций и проектов в США. В своей работе Ланд и соавт. (2005) представили (хотя и несколько устаревшую) подробную подборку способов использования геотермальной энергии в США. Геотермальные установки в США на сухом паре (гидротермальные), бинарные или жидкие (некоторые двукратного испарения).



Рис. 13.16 Схема электростанции УГС Источник: Дюфилд и Сасс (2003: 22).

Геотермальная зона гейзеров к северу от Сан-Франциско содержит 17 геотермальных электростанций, работающих на сухом паре. На рис. 13.17 представлена фотография гидротермальной электростанции Большие гейзеры (BigGeysers) мощностью 75 МВт. Объект эксплуатируется с 1980 года.

Электростанции под названием Mammoth Pacific (Мамонт Пасифик) в горах Сьерра-Невада используют рассол из Горячих источников Casa Diablo. Тихоокеанский мамонт I, показанный на рис. 13.18, был построен в 1984 году. Он производит 10 МВт электроэнергии и является бинарной геотермальной установкой.

На рис. 13.19 показана геотермальная электростанция двукратного испарения мощностью 85 МВт, расположенная на перекрестке Косо, штат Калифорния. В геотермальной электростанции двукратного испарения жидкость, выходящая из сепаратора очистки, откачивается для получения пара низкого давления, который может использоваться второй турбиной низкого давления или впрыскиваться на соответствующей ступени основной турбины. Геотермальная электростанция двукратного испарения Navy I действует с 1987 года.

Геотермальная энергия демонстрирует медленный, но устойчивый рост экономики в США. В таблице 13.2 показан рост установленной мощности, а также количество гигаватт-часов, произведенных с 2000 по 2013 год. За этот период рост составил 12%, хотя за шесть из этих лет рост составил ноль или менее 1%. США лидируют в мире по установленной геотермальной мощности (3,8 ГВт), затем следуют Филиппины с мощностью 1,9 ГВт, Индонезия с 1,3 ГВт и Мексика с 1 ГВт.



Рис. 13.17 Одна из гидротермальных электростанций Больших Гейзеров (NREL 17270). Источник: http://images.nrel.gov/viewphoto.php?imageId=6318101.

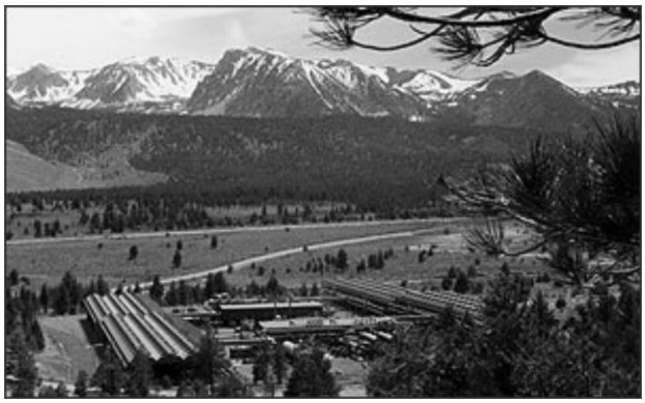


Рис. 13.18 Бинарная геотермальная электростанция Mammoth Pacific I. Источник: EERE.

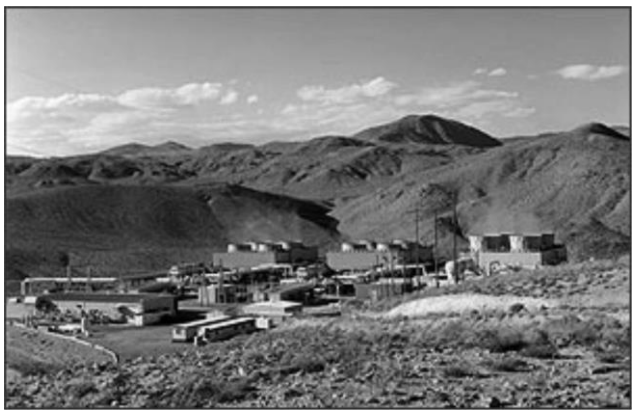


Рис. 13.19 Геотермальная электростанция двукратного испарения Navy I (NREL 07667). *Источник:* http://images.nrel.gov/viewphoto.php?imageId=6312443.

Таблица 13.2 Рост добычи геотермальной энергии в США.

	Генерация геотермального электричества в США		
	Генерация (ГВт ч)	Мощность (МВт)	Годовое увеличение мощности(%)
2000	14 093	2798	2.2
2001	13 741	2798	0.0
2002	14 491	2798	0.0
2003	14 424	2798	0.0
2004	14 811	2798	0.0
2005	14 692	2828	1.1
2006	14 568	2831	0.1
2007	14 637	2936	3.7
2008	14 840	3039	3.5
2009	15 009	3085	1.5
2010	15 219	3100	0.5
2011	15 316	3238	4.4
2012	15 562	3385	4.5
2013[a]	16 517	3792[a]	12.0[a]

Источник: Эстерли и Гельман (2014).

a) Увеличение мощности в 2013 году частично связано с переходом источников данных от Ассоциации геотермальной энергии к Управлению энергетической информации, которые по-разному рассчитывают мощность.

В этой главе основное внимание уделено геотермальным энергетическим системам, использующим пар и/или горячий рассол для производства электроэнергии. Как упоминалось в разделе 13.1, геотермальные тепловые насосы или GSHP также могут считаться потребителями геотермальной энергии. В следующем разделе речь идет о насосах GSHP.

13.5 Геотермальные тепловые насосы

Насосы GSHP или геотермальные почвенные тепловые насосы используют грунт (почву) для отвода тепла летом и в качестве источника тепла зимой. Обычные тепловые насосы отводят тепло в атмосферу летом и извлекают энергию из атмосферы зимой. На глубине несколько футов ниже поверхности, температура грунта сохраняется почти постоянной на протяжении всего года. Если земля используется в качестве источника тепла/стока тепла для теплового насоса, то производительность теплового насоса улучшается по сравнению с тепловым насосом, использующим атмосферу в качестве источника тепла/стока тепла. КПД цикла Карно – это максимально возможный тепловой КПД для тепловой машины, работающей между двумя температурами и производящей работу, которая определяется следующим образом где

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_{\text{Н}} - T_{\text{С}}}{T_{\text{Н}}} \tag{13.2}$$

$T_{\text{Н}}$ и $T_{\text{С}}$ – значения абсолютной температуры резервуаров высокой и низкой температуры соответственно. Холодильные машины, кондиционеры и тепловые насосы работают на тепловом индукторном двигателе по реверсивному циклу, передавая энергию из резервуара низкой температуры в резервуар высокой температуры путем выполнения дополнительной работы. Для тепловых машин, работающих по реверсивному циклу, коэффициент полезного действия (КПД) является обычным

критерием для определения производительности.

Для теплового насоса желаемым результатом энергии является добавление тепла в горячий резервуар, а КПД определяется как тепло, добавляемое в резервуар высокой температуры, деленное на требуемую рабочую нагрузку. КПД теплового насоса Карно рассчитывается следующим образом

$$\text{КПД теплового насоса} = \frac{\text{добавленное тепло к резервуару высокой температуры}}{\text{Затраченная работа}} = \frac{T_H}{T_H - T_C} \qquad (13.3)$$

Аналогичным образом, КПД холодильных машин Карно или кондиционеров определяется теплом, отводимым из резервуара низкой температуры, деленным на рабочую нагрузку:

$$\text{КПД холодильной машины} = \frac{\text{отведенное тепло из резервуара низкой температуры}}{\text{Затраченная работа}} = \frac{T_L}{T_H - T_C} \qquad (13.4)$$

Причиной разницей является желаемый результат: добавление тепла для теплового насоса и отвод тепла для холодильных машин. Два КПД соотносятся как

$$\text{КПД теплового насоса} = \text{КПД холодильной машины} + 1$$

Поскольку КПД холодильной машины всегда имеет положительное значение, КПД теплового насоса всегда больше единицы. Хотя фактический тепловой насос значительно отличается от машины Карно с задним ходом, термодинамические значения уравнений 13.3 и 13.5 для теплового насоса действительны, а именно, чем меньше разница температур между резервуарами высокой и низкой температуры, тем выше КПД.

Зимой тепло извлекается из земли, а не из воздуха, так что T_C – это температура земли, а не температуры наружного воздуха, что значительно увеличивает КПД теплового насоса. Обычные (использующие теплоту воздуха) тепловые насосы имеют значения КПД около 3, в то время как насосы GSHP имеют значения КПД, приближающиеся к 4. Летом тепло отводится в землю, а не наружу, так что КПД холодильной машины увеличивается. Таким образом, использование земли в качестве источника/стока эффективно для насосов GSHP. На рис. 13.20 представлена общая конфигурация насосов GSHP.

Теплообменник передает энергию между хладагентом компрессора и землей через циркуляционный насос в контуре заземления.

Земля может использоваться в качестве стока тепла/источника тепла для насосов GSHP в нескольких различных конфигурациях:

(а) замкнутый контур, горизонтальный, (б) замкнутый контур, вертикальный, (в) замкнутый контур, озеро/ пруд и (г) разомкнутый контур. На рис. 13.21 представлен пример конфигурации.

Горизонтальный замкнутый контур является наиболее распространенной конфигурацией для жилых помещений (рис. 13.21a). Трубы расположены в форме винтовой катушки и погружены в траншею шириной 2 фута на глубину 4–6 футов. Недостатком этого метода является количество почвы, которая должна быть перемещена или нарушена в целостности. Вертикальные схемы с замкнутым контуром (рис. 13.21b) довольно распространены на государственных/коммерческих/ промышленных объектах и становятся все более распространенными для жилых домов. В вертикальных системах сверлятся отверстия диаметром 4 дюйма и глубиной 100–400 футов на расстоянии около 20 футов. В каждом вертикальном отверстии две трубы в самом низу соединены так, чтобы образовать U-образную форму. Трубы соответственно связаны и соединены с тепловым насосом в кондиционируемом пространстве здания. Если имеется водоем, например озеро или большой пруд, то воду можно использовать в качестве источника/стока тепла, как показано на рис. 13.21c. Снова используется винтовое устройство или пружинка, но труба должна быть обмотана спиралью как минимум на 8 футов под поверхность для защиты от замерзания. Наконец, может быть использована система с разомкнутым контуром, как на рис. 13.21d. Вода из скважины или пруда циркулирует через насосы GSHP, а затем возвращается в землю через скважину для искусственного пополнения подземных вод. Производить сброс строго в соответствии с местными нормами и правилами разгрузки подземных вод.

Поскольку температура грунта является важным фактором для насосов GSHP, некоторые дискуссии

оправданы. В зависимости от местоположения, на глубине 6 футов почти постоянная температура колеблется от 45 до 75°F. На рис. 13.22 проиллюстрировано «среднегодовое» распределение температуры грунта в США. Неудивительно, что температура грунта сравнительно точно согласуется с обозначениями «градусо-суток отопительного сезона», представленными на рис. 8.6, то есть, чем меньше дни прогрева, тем выше температура грунта.

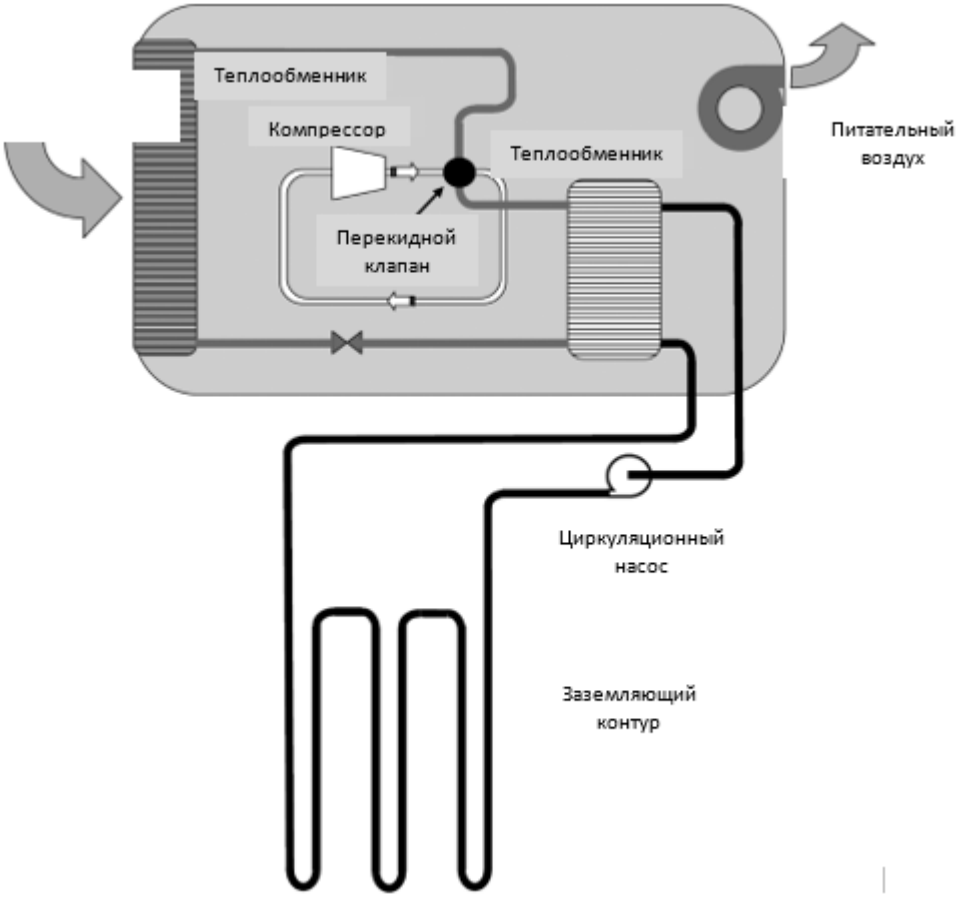


Рис. 13.20 Схема системы насосов GSHP.

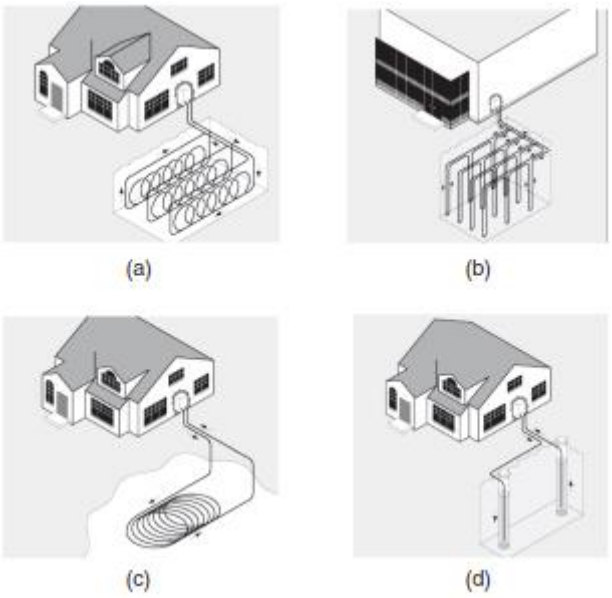


Рис. 13.21 Конфигурация заземляющего контура насосов GSHP: (a) замкнутый контур, горизонтальный; (b) замкнутый контур, вертикальный; (c) замкнутый контур, озеро/ пруд; (d) разомкнутый контур. Источник: EERE

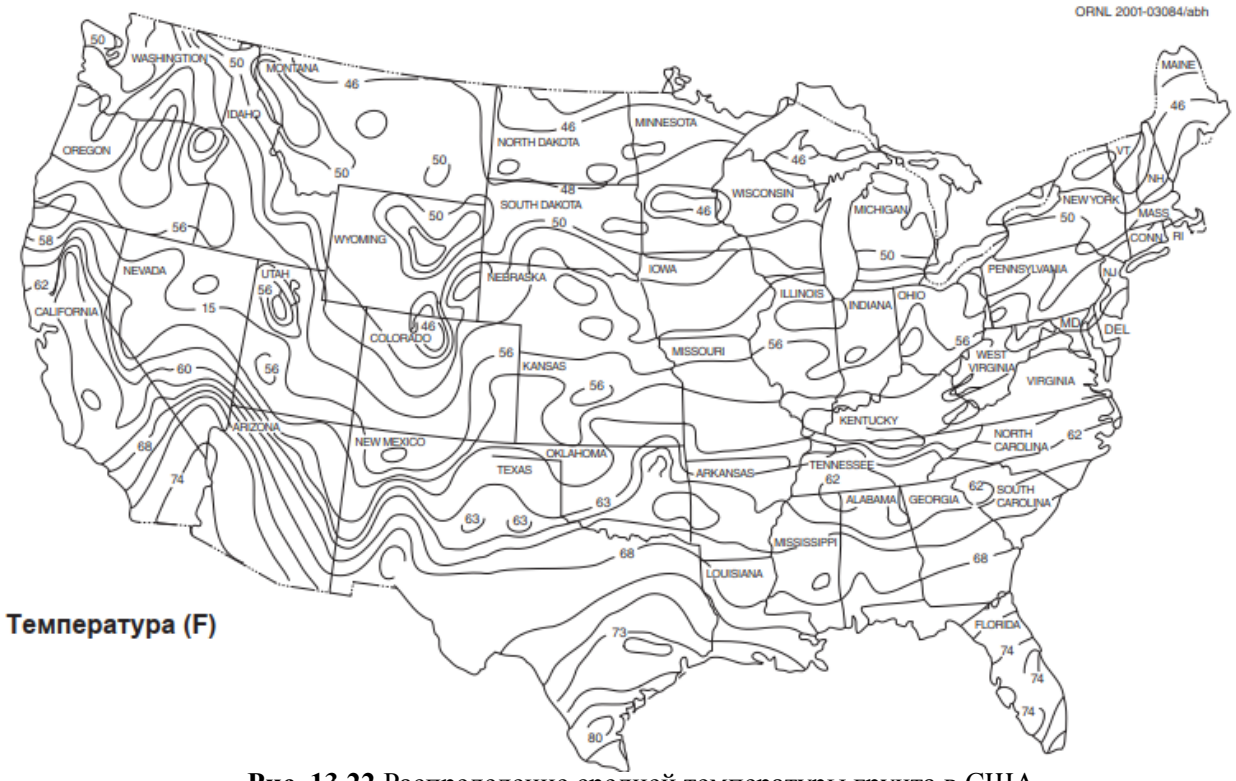


Рис. 13.22 Распределение средней температуры грунта в США.
Источник: Национальная лаборатория Ок-Ридж.

Таблица 13.3 Энергия для охлаждения, нагрева и горячей воды для хозяйственных нужд для насосов GSHP и обычных систем.

Система	Энергия (кВтч)		
	Аталанта	Спокан	Портленд
Воздушный тепловой насос	4 925	16 458	11 299
Воздушный тепловой насос с регулируемым приводом	12 159	13 850	9 111
GSHP стандартный	9 455	9 163	7 354
GSHP с высоким кпд	8 098		

В качестве теплоносителя используются жидкости с ингибитором коррозии с антифризом. Общая рекомендация заключается в том, чтобы использовать антифриз, достаточный для защиты до 10°F ниже минимальной ожидаемой температуры. Эти жидкости должны быть биоразложимыми, нетоксичными и обладать относительно низкой вязкостью. Двумя наиболее часто используемыми жидкостями являются этилен или пропиленгликоль или смесь спирта и воды. Метил, этил или изопропиловые спирты использовались в применении насосов GSHP. Биоингибированная вода может использоваться в климатических условиях, где замерзание не является проблемой.

Жилые системы могут быть оснащены «пароохладителем» для нагрева горячей воды для хозяйственных нужд. Летом тепло перегрева, которое берется из дома и отводится в контур заземления, используется для нагрева воды. Зимой пароохладитель может снизить затраты на нагрев воды примерно вполовину, при этом обычный водонагреватель будет удовлетворять остальным потребностям в горячей воде.

Очевидно, что системы насосов GSHP стоят дороже, чем обычные системы. Тогда возникает вопрос, сколько энергии можно сэкономить, используя насос GSHP. Исследования Министерства энергетики США показывают, что примерно 70% энергии, используемой в системе GSHP, поступает из земли. Агентство по охране окружающей среды США в настоящее время определяет GSHP как продукт, имеющий рейтинг Energy Star ®. В своем труде Рафферти (Рафферти, 2001) сообщает о результатах использования энергии Кавано в трех различных климатических условиях в одном и том же здании. Результаты суммированы в таблице 13.3. Были изучены четыре системы: воздушный тепловой насос, воздушный тепловой насос с регулируемой скоростью, стандартный насос GSHP и

насос GSHP с высоким КПД. Представлено общее количество киловатт-часов для охлаждения, отопления и горячего водоснабжения для хозяйственных нужд. Экономия для вариантов систем GSHP значительна по сравнению с любой обычной системой. Системы GSHP демонстрируют значительную экономию электроэнергии.

Общая практическая стоимость систем GSHP составляет 2500 долларов за тонну. Эта цена примерно вдвое превышает стоимость обычной системы, связанной с местом жительства. Таким образом, экономия энергии и возможные льготы, предлагаемые коммунальными предприятиями, делают GSHP экономически привлекательными с разумным сроком окупаемости. На веб-сайте www.geokiss.com содержится обширная информация о GSHP и рекомендации для получения дополнительной информации.

Насосы GSHP также широко используются в коммерческих, промышленных и государственных зданиях, где они предлагают ту же экономию и преимущества, что и для жилых домов. Подробности, информацию и тематические исследования можно получить в Министерстве энергетики США (http://energy.gov/search/site/ground%20source%20heat%20pumps) от Консорциума геотермальных тепловых насосов (www.geoexchange.org) и в Международной ассоциации почвенных тепловых насосов (www.igshpa.okstate.edu).

13.6 Заключение

В этой главе геотермальная энергия рассматривается, в первую очередь, как источник тепла для выработки электроэнергии, а также для использования в системах GSHP. На рис. 13.23 приведена соответствующая сводка применений геотермальной энергии в США. По существу вся страна пригодна для использования насосов GSHP, и в большей части страны геотермальная энергия может применяться для отопления.

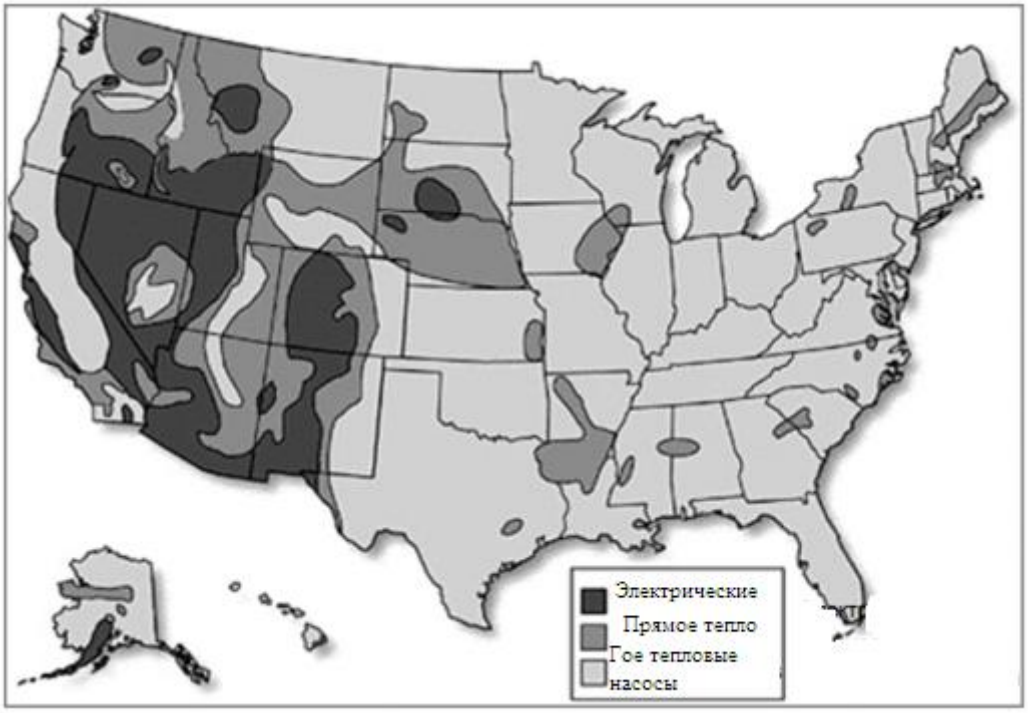


Рис. 13.23 Итоговая сводка по применению геотермальной энергии для США. Источник: https://web.archive.org/web/20150907183014/http://www1.eere.energy.gov/tribalenergy/guide/geothermal_resources.html.

Регионы, в которых температура геотермальных ресурсов полезна для выработки электроэнергии, ограничены, но все еще удивительно велики. Как и во многих источниках энергии, рассмотренных в этом учебнике, геотермальная энергия имеет большой потенциал, но необходимо решить проблемы исследований и разработок, и потребуется значительный капитал для полной реализации этого потенциала.

Литература

Boehm, R.F., Borg, D.L., and Ortega, A. (1987) Modeling of a magma energy geothermal open cycle power plant. Journal of Energy Resources Technology, 111 (4): 239–245.

Cengel, Y.A. and Boles, M.A. (2015) Thermodynamics, 8th edn. McGraw-Hill, New York. DiPippo, R. (2012) Geothermal Power Plants: Principles, Applications and Case Studies, 3rd edn. Elsevier, Oxford.

Duffield, W.A. and Sass, J.H. (2003) Geothermal Energy – Clean Power from the Earth's Heat. USGS Circular 1249. US Geological Survey, Reston, VA. http://pubs.usgs.gov/circ/2004/c1249/c1249.pdf (accessed October 25, 2016).

Dunn, J.C. (1987) Status of the magma energy project. SAND 87–2560C. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.

Elders, W.A., Fridleifsson, G.O., and Pálsson, B. (eds), (2014) Iceland Deep Drilling Project: the first well, IDDP-1, drilled into magma. Geothermics, 49: 1–128.

El-Wakil, M.M. (1984) Powerplant Technology. McGraw-Hill, New York.

Esterly, S. and Gelman, R. (2014) 2013 Renewable Energy Data Book, Haas, K. (ed.). DOE/GO- 102014-4491. http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62580.pdf (accessed October 20, 2016).

Matek, B. (2014) 2014 Annual U.S. & Global Geothermal Power Production Report. Geothermal Energy Association. http://geo-energy.org/events/2014%20Annual%20US%20&%20Global%20Geothermal%20Power%20Production%20Report%20Final.pdf (accessed October 25, 2016).

Geothermal Technologies Program (2008) An Evaluation of Enhanced Geothermal Systems Technology. US Department of Energy. https://www1.eere.energy.gov/geothermal/pdfs/evaluation_egs_tech_2008.pdf (accessed October 25, 2016).

Green, B.D. and Nix, R.G. (2006) Geothermal – The Energy Under Our Feet: Geothermal Resource Estimates for the United States. NREL/TP-840-40665. NREL, Golden, CO.

Gupta, H. and Roy, H. (2007) Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century. Elsevier, Amsterdam.

Huang, H.-H., Lin, F.-C., Schmandt, B., et al. (2015) The Yellowstone magmatic system from the mantle plume to the upper crust, Science, 348 (6236): 773–776.

Kruger, P. (1976) Geothermal energy. Annual Review of Energy, **1**: 159–180.

Kutscher, C.F. (2000) The Status and Future of Geothermal Electric Power. NREL/CP-550-28204. NREL, Golden, CO.

Lund, J.W., Bloomquist, R.G., Boyd, T.L., and Renner, J. (2005) The United States of America country update. In Proceedings of the World Geothermal Congress, 2005, Anatalya, Turkey.

Mock, J.E., Tester, J.W., and Wright, P.M. (1997) Geothermal energy from the Earth: its potential impact as an environmentally sustainable resource. Annual Review of Energy and the Environment, **22**: 305–356.

Palmer, D.A., Fernandez-Prini, R., and Harvey, A.H. (eds), (2004) Aqueous Systems at Elevated Temperatures and Pressures. Elsevier, Amsterdam.

Rafferty, K. (2001) An Information Survival Kit for the Prospective Geothermal Heat Pump Owner. Geo-Heat Institute, Kalmath Falls, OR.

Smil, V. (2003) Energy at the Crossroads: Global Perspectives and Uncertainties. MIT Press, Boston, MA.

Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., et al. (2012) Sustainable Energy, 2nd edn. MIT Press, Cambridge, MA.

USGS (2008) Assessment of Moderate- and High-Temperature Geothermal Resources of the United States. USGS Fact Sheet 2008–3082. US Geological Survey, Reston, VA. http://pubs.usgs.gov/fs/2008/3082/pdf/fs2008-3082.pdf (accessed October 25, 2016).

Дополнительная литература

На следующих веб-сайтах содержится информация по темам о геотермальной энергии.
http://energy.gov/search/site/ground%20source%20heat%20pumpswww.energyquest.ca.gov
http://www.oit.edu/orec/geo-heat-centerwww.geothermal.org
www.geo-energy.orgwww.geokiss.com
http://www.smu.edu/dedman/academics/programs/geothermallab

14

Энергия океана

14.1 Введение

Океаны содержат огромное количество тепловой и механической энергии. Тепловая энергия исходит от массы и температуры океанов, а механическая энергия-от волн и приливных действий океанов. Океаны можно рассматривать как очень большой солнечный тепловой коллектор. Солнечное излучение падает на поверхность, где поглощается солнечная энергия и нагревается поверхностный слой воды. На протяжении многих лет был внесен ряд предложений по сбору энергии в результате разницы температур между нагретой солнцем поверхностью и глубоководной водой океана – общая концепция, называемая преобразованием тепловой энергии океана (OTEC). Действия волн, течений и приливов давно представляют интерес, и были предложены различные системы, построены и/или эксплуатируются для сбора волновой, текущей и приливной энергии. Приливная энергия часто разделяется на энергию, собираемую приливным притоком-оттоком из захваченного объема через турбину, и энергию, собираемую путем использования кинетической энергии волн и токов, – эта технология называется Морской и гидрокинетической (МГК). В этой главе будут рассмотрены концепции преобразования тепловой энергии океана, приливных, морских и Гидрокинетических процессов для сбора энергии океана.

14.2 Преобразование тепловой энергии океана

Солнечное излучение, падающее на поверхность океанов, нагревает слой воды у поверхности, но глубокие океанские конвективные течения переносят более холодную воду на более низкие глубины экваториальных областей. В обычный день поглощается энергетический эквивалент 250 миллиардов баррелей нефти (http://www1.eere.energy.gov/education/pdfs/ocean_power.pdf)! Конечным результатом является температурная стратификация с горячей поверхностной водой и более холодной водой на глубинах более 1 км. Температура поверхности может превышать 27°C, а температура на глубине более 1 км может достигать 4°C. Таким образом, между поверхностью и глубокой водой может существовать разность температур 23°C или более. Если поверхность рассматривается как горячий резервуар, а глубокая вода - как холодный резервуар, то тепловая машина может извлечь полезную работу. Системы преобразования тепловой энергии океана используют эту разницу температур для получения полезной работы. В зависимости от конфигурации системы преобразования тепловой энергии океана, могут также возникнуть другие полезные продукты и процессы. Эвери и Берл (1997) и Эвери и Ву (1994) проводят дополнительное обсуждение сбора энергии преобразования тепловой энергии океана.

Как показано, разница температур является важной метрикой в определении осуществимости системы преобразования тепловой энергии океана. Как правило, системы преобразования тепловой энергии океана считаются экономически целесообразными, если разница температур между поверхностью и глубиной превышает 20°C. На рис. 14.1 показано распределение перепадов температур между поверхностью и глубиной (1 км) в океанах. Регион западной экваториальной части Тихого океана имеет большую площадь с перепадами температур более 24°C. Большая часть океана между ± 20° широты и экватором обладает разностью температур от поверхности до глубины 20–24°C.

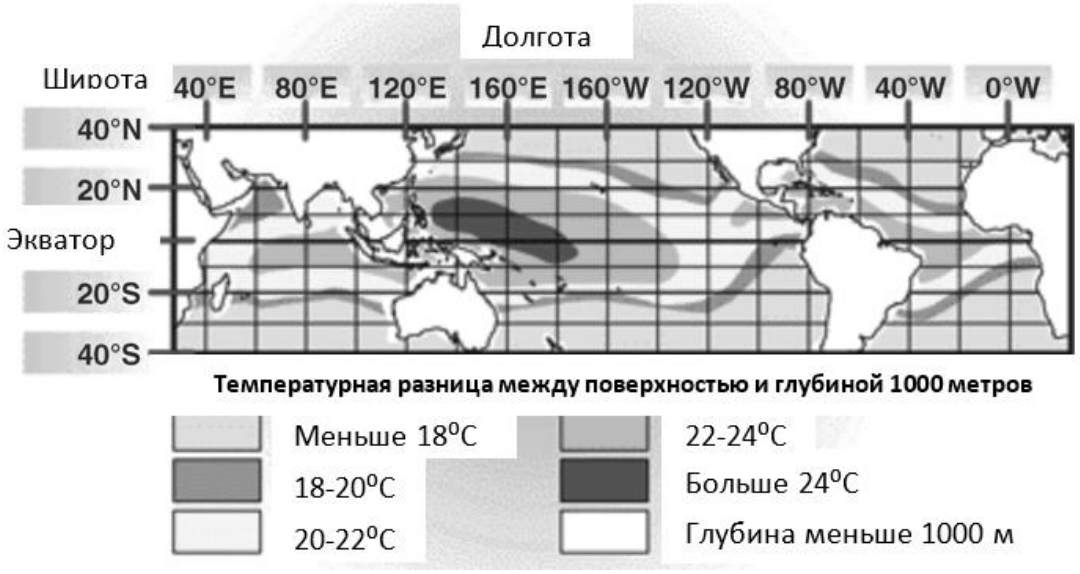


Рис. 14.1 Распределение разности температур между поверхностью и глубиной 1 км. Источник: Министерство энергетики США

Однако большая часть областей преобразования тепловой энергии океана находится в середине океана и/или далеко от населенных пунктов и мест с высоким энергопотреблением. Термодинамический принцип, рассмотренные далее, также ограничивают возможности систем преобразования тепловой энергии океана.

Поскольку система преобразования тепловой энергии океана по существу является тепловым двигателем, цикл Карно представляет собой верхнюю границу тепловой эффективности. Рассмотрим тепловую эффективность системы преобразования тепловой энергии океана, работающей при температуре поверхности 27° С и перепадом температуры 20 ° С. Цикл Карно можно вычислить как

$$\eta_{\text{Карно}} = \frac{T_{\text{Н}} - T_{\text{низкая}}}{T_{\text{высокая}}} = \frac{\Delta T}{T_{\text{высокая}}} = \frac{20\ \text{K}}{(27+273)\ \text{K}} = 0.067 \qquad (14.1)$$

Следовательно, максимально возможная эффективность составляет всего 6.7%. В действительности эффективность, прогнозируемая или получаемая для большинства объектов преобразования тепловой энергии океана, составляет около 3%.Последствия такой низкой эффективности, по крайней мере, это: 1) высокие расходы потока и большие компоненты необходимы для значительной добычи энергии, и 2) экономика преобразования тепловой энергии океана очень чувствительна к необратимости и потерям в компонентах. Системы преобразования тепловой энергии океана с высокими расходами и большими размерами компонентов приводят к очень большим капитальным затратам на строительство и эксплуатацию. Если потери занижены, система преобразования тепловой энергии океана может быть подвержена дефициту экономики или может потребовать больше энергии для работы, чем извлекается. Эти реалии в значительной степени ограничивают исследования в области преобразования тепловой энергии океана и ограничивают наличие средств для строительства и эксплуатации систем преобразования тепловой энергии океана. Однако по мере роста цен на энергоносители и того, как наличие энергии становится все более политической проблемой, преобразование тепловой энергии океана будет представлять собой более привлекательную возможность. Конфигурации преобразования тепловой энергии океана обычно классифицируются как системы с открытым или закрытым потоком. Каждый будет рассмотрен по очереди.

14.2.1 Системы преобразования тепловой энергии океана с открытым циклом

Системы преобразования тепловой энергии океана открытым циклом работают по циклу Клода. Открытый цикл OTEC показана на рис. 14.2. Теплая вода с поверхности (состояние 1) поступает в испаритель низкого давления. Вакуумный насос поддерживает низкое давление в испарителе, где теплая поверхностная вода вспыхивает в низкокачественную смесь. Выпускается теплая жидкость, и пар направляется в турбину. Затем энергия экстрагируется в турбину, а полученная парожидкостная смесь выводится в состояние 3. Холодная вода в состоянии 5 используется для конденсации смеси из турбины в конденсаторе прямого контакта. Состояние 4 — это состояние на выходе конденсатора. Из-за низкого качества смеси в испарителе большая часть теплой поверхностной воды, поступающей в испаритель, сбрасывается.

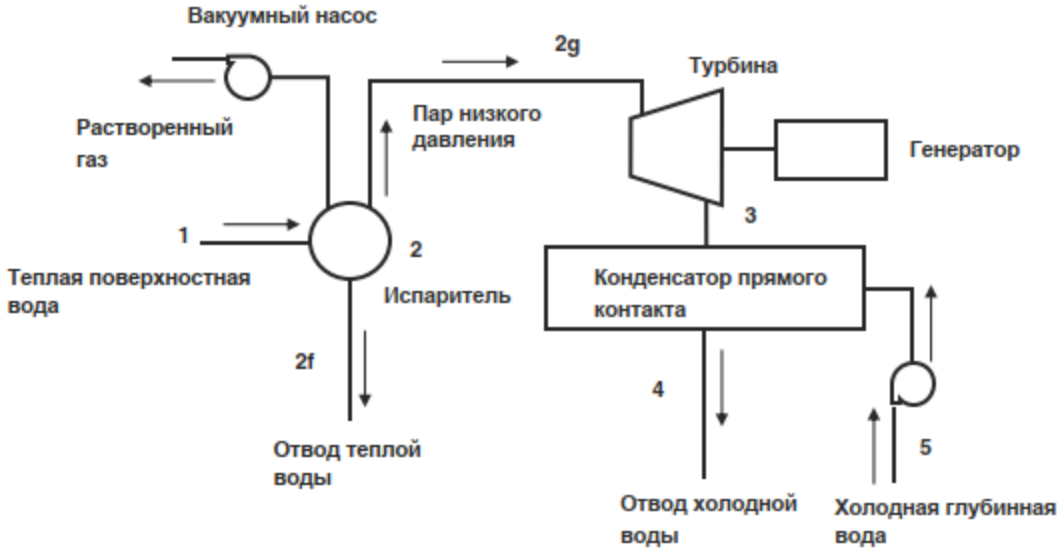


Рис. 14.2 Конфигурация открытой (цикл Клода) системы преобразования тепловой энергии океана.

Диаграмма T – s, соответствующая схеме на рис. 14.2, представлена на рис. 14.3. Теплая вода поступает в испаритель в состоянии 1 и сбрасывается в состояние 2 с 2f жидким состоянием и 2g парообразным состоянием. Теплая жидкость выпускается, и пар (качество равно 1) поступает в турбину при 2g и выходит в состоянии 3 в виде смеси. Состояние 3s представляет состояние выхода, если процесс турбины был изоэнтропическим. В конденсаторе прямого контакта используется холодная вода в состоянии 5. Конденсатор воды выходит из состояния 4. Поскольку качество в состоянии 2 низкое, а качество в состоянии 3 близко к единице, скорость потока массы через турбину значительно отличается от расхода теплой воды и потребления холодной воды. В примере 14.1 рассматриваются показатели эффективности системы преобразования тепловой энергии открытого океана.

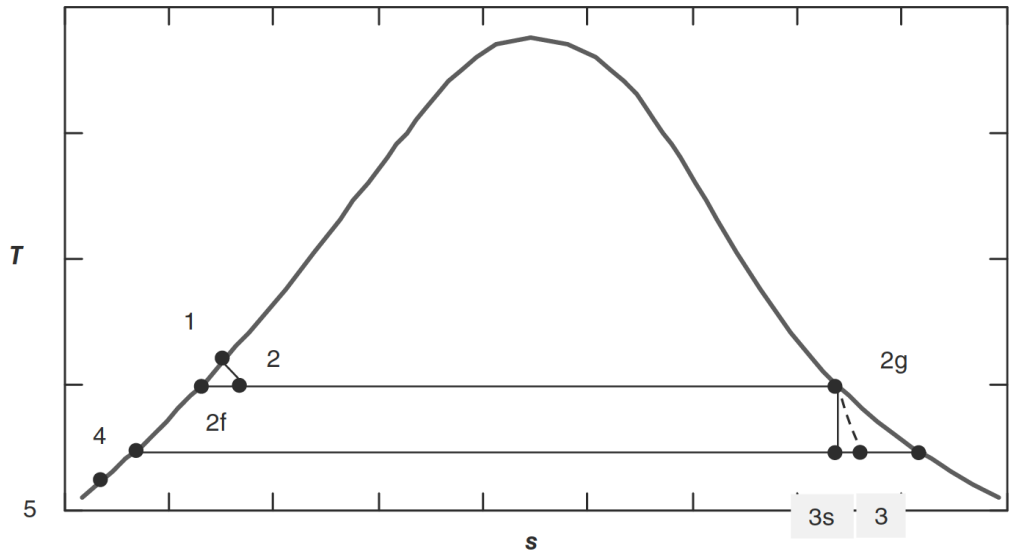


Рис. 14.3 Диаграмма T - s для системы преобразования тепловой энергии океана открытого цикла.

Пример 14.1

Система преобразования тепловой энергии океана открытого цикла работает с теплой поверхностной водой на 27°C и поверхностной конденсаторной водой 13°C из глубокой холодной воды на 11°C. Давление испарителя составляет 0,0317 бар, что соответствует температуре насыщения 25°C; соответственно давление и температура конденсатора-0,017 бар и 15°C. Эффективность турбины составляет 0,80. Если турбина должна извлекать 100 кВт, определите эффективность системы и скорость потока теплой воды, холодной воды и массы турбины.

Решение: свойства для этого примера были рассчитаны с использованием промышленной Формулы IAPWS 1997 для термодинамических свойств воды и пара (Палмер и соавт., 2004). На 27°C, теплая поверхностная вода обладает энтальпией

$$h_1 = 113.19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Процесс от состояний 1 до 2 является постоянной энтальпией, так что

$$h_1 = h_2 = 113.19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Как показано на рис. 14.3, постоянный процесс энтальпии от состояний 1 до 2 приводит к смеси жидкости и пара. При 25°C

$$h_f = 104.83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \qquad h_{fg} = 2441.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \qquad h_g = 2546.72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \qquad s_g = 8.5573 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$

Качество в состоянии 2 можно найти как

$$h_2 = 113.19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 104.83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + x_2 \times 2441.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$x_2 = 0.003\,424$$

Поскольку в турбину поступает только пар (X=1), h_{3g}=2546:72 кДж/кг и s_{3g}=8.5573 кДж/(кг*K). На выходе турбины, T_4=15°C, и остальные свойства интереса

$$s_f = 0.2245 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}, \qquad s_{fg} = 8.5565 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}, \qquad h_f = 62.98 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}, \qquad h_{fg} = 2465.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изоэнтропический процесс, 2g-3s, имеет $s_2=s_{3s}$=8,5573 (кДж*К) так что качество в состоянии 3s становится

$$s_{3s} = 8.5573 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} = 0.22454 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}} + x \times 8.5565 \frac{\text{кДж}}{\text{кг К}}$$
$$x = 0.974$$

и энтальпия в состоянии 3s-это

$$h_{3s} = 62.98 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.974 \times 2465.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 2464 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Идеальная (изоэнтропийная) извлеченная работа может быть рассчитана как

$$W_{\text{идеальная}} = h_{2g} - h_{3s} = 2546.72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 2464 \frac{\text{КДж}}{\text{кг}} = 82.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

и фактическая работа

$$W_{\text{факт}} = \eta_e W_{\text{идеальная}} = 0.80 \times 82.6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 66.08 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Энтальпия в состоянии 3, таким образом

$$h_3 = h_{2g} - W_{\text{факт}} = 2546.72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 66.08 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 2481 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Стоимость турбины массовый расход, необходимый для извлечения 100 кВт от турбины

$$\dot{m}_{\text{турбина}} = \frac{100 \text{ кВт}}{W_{\text{факт}}} = \frac{100 \text{ кВт}}{66.08 \text{ кДж/кг}} = 1.513 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Тепловая эффективность системы – это энергия, произведенная на килограмм потока турбины, деленная на разницу энтальпии между паром, поступающим в систему и выходящим из конденсатора:

$$\eta_{\text{тепловая}} = \frac{W_{\text{факт}}}{h_3 - h_4} = \frac{W_{\text{факт}}}{h_3 - h_{3f}} = \frac{66.08 \text{ кДж/кг}}{2481 \text{кдж/кг} - 62.98 \text{кДж/кг}} = 0.027$$

Требуемая скорость потока теплой воды – это скорость потока массы турбины, деленная на качество в состоянии 2:

$$\dot{m}_{\text{теплая вода}} = \frac{\dot{m}_{\text{турбина}}}{x_2} = \frac{1.513}{0.003\,424} \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 442.03 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

В конденсаторе прямого контакта холодная вода в состоянии 5 (13°C) используется для конденсации пара в состоянии 3. В состоянии 5 энтальпия равна h_5 = 54:60 кДж/кг. Энергетический баланс дает

$$\dot{m}_{\text{турбина}}(h_3 - h_4) = \dot{m}_{\text{холодная вода}}(h_4 - h_5)$$

Скорость потока массы холодной воды становится

$$\dot{m}_{\text{холодная вода}} = \dot{m}_{\text{турбина}} \frac{h_3 - h_4}{h_4 - h_5} = 1.513 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \frac{2481 \text{ кДж/кг} - 62.98 \text{ кДж/кг}}{62.98 \text{ кДж/кг} - 54.60 \text{ кДж/кг}} = 436.596 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Низкое качество испарителя приводит к большой скорости потока теплой воды по сравнению со скоростью потока турбины, а качество, близкое к единице на выходе турбины, приводит к высокой скорости потока холодной воды.

Эффективность и расход, представленные в примере 14.1, являются реалистичными для систем преобразования тепловой энергии океана и частично объясняют термодинамические трудности систем преобразования тепловой энергии открытого океана. Высокий удельный объем рабочей жидкости турбины, 43,40 $м^3$/кг для примера 14.1, поразительно отличается от объема современных паровых электростанций - 0,021 $м^3$/кг. Таким образом, проверенная технология паровых турбин обычно не применима к турбинам преобразования тепловой энергии океана открытого цикла. Эль-Вакил (1984) обсуждает требования к турбинам и трудности для применения в системах преобразования тепловой энергии океана открытого цикла. В исследовании 1979 года Вестингауз (http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1981-2595), турбина диаметром 43,6 м, работающая при 200 об/мин, была предложена для системы преобразования тепловой энергии океана мощностью 100 МВт.

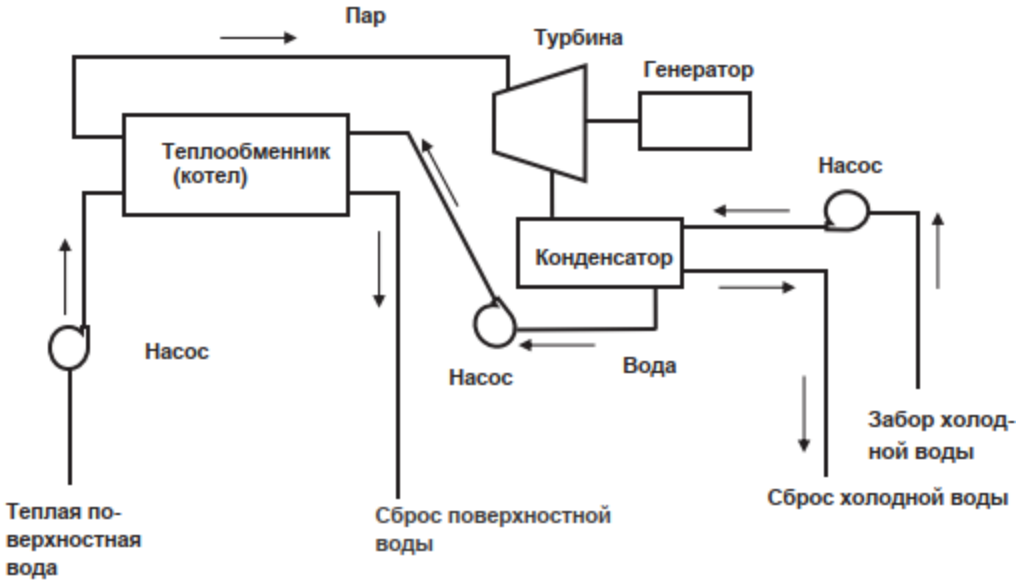


Рис. 14.4 Конфигурация замкнутой (цикл Андерсона) системы преобразования тепловой энергии океана.

14.2.2 Системы преобразования тепловой энергии океана с закрытым циклом

Одним из способов избежать проблем с турбинами в системах преобразования тепловой энергии океана является использование бинарной системы с рабочей жидкостью, отличной от воды. Были предложены замкнутые системы преобразования тепловой энергии океана (цикл Андерсона) с использованием рабочих жидкостей, таких как аммиак и пропан. На рис. 14.4 представлена схема бинарной системы преобразования тепловой энергии океана замкнутого цикла. Теплые поверхностные воды обеспечивает энергию для испарения рабочей жидкости, которая направляется в турбину. После выхода из турбины, холодная вода используется для конденсации рабочей жидкости.

Пример 14.2

Система преобразования тепловой энергии океана с замкнутым циклом использует пропан в качестве рабочей жидкости. Теплая поверхностная вода поступает в испаритель и покидает его при 28 и 25°C соответственно. Холодная вода поступает в конденсатор и покидает его при 5 и 8°C соответственно. Температура испарения пропана составляет 22°C, а температура конденсации составляет 11°C. Мощность станции составляет 125 МВт, а КПД турбины - 0,90. Общий коэффициент теплопередачи как для испарителя, так и для конденсатора составляет 1400 Вт/($м^2$*К). Определите скорость потока пропана, площадь поверхности испарителя и конденсатора, скорость потока массы теплой и холодной воды и общую тепловую эффективность.

Решение: свойства пропана были получены от Перри и Чилтон (1973). Испаритель работает при 22°C, а конденсатор-при 11°C. В таблице 14.1 показаны свойства насыщения при этих температурах.

Таблица 14.1 Свойства пропана при 22°C и 11°C.

T (°C)	P (кПа)	h_f (кДж/кг)	h_{fg} (кДж/кг)	h_g (кДж/кг)	s_f (кДж/кг К)	s_{fg} ((кДж/кг К)	s_g (кДж/кг К)
11	649.9	546.2	361.7	907.9	4.359	1.273	5.633
22	877.4	573.8	344.4	918.2	4.456	1.165	5.621

В испарителе теплая жидкость испаряет пропан до насыщенного пара при 22°C. пар поступает в турбину при 22°C с h_g= 918,2 кДж/кг и s_g=5,621 кДж/кг. На выходе из турбины температура пропана составляет 11°C, а для изоэнтропийного расширения через турбину энтропия парожидкостной смеси на выходе составит 5,621 кДж/(кг*К). Качество на выходе турбины для изоэнтропического расширения становится

$$s_{\substack{\text{Выход}\\ \text{турбины}}} = 5.621\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 4.359\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + x \times 1.273\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$
$$x = 0.991$$

и энтальпия для изоэнтропийного расширения

$$h_{\text{изоэнтроп}} = 546.2\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 0.991 \times 361.7\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 904.5\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Изоэнтропическая работа – это изменение энтальпии на турбине:

$$W_{\text{идеальная}} = h_{\text{вход}} - h_{\text{выход}} = 918.2\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 904.5\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 13.7\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

и фактическая работа

$$W_{\text{факт}} = \eta_{\text{турбина}} W_{\text{идеальная}} = 0.9 \times 13.7\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 12.31\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Таким образом, энтальпия на выходе из турбины

$$h_{\text{выход}} = h_{\text{вход}} - W_{\text{факт}} = 918.2\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 12.31\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} = 905.9\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Массовый расход пропана можно рассчитать как

$$\dot{m}_{\text{пропан}} = \frac{\text{Мощность извлеченная}}{W_{\text{факт}}} = \frac{125\ \text{МВт}}{12.31\ \text{кДж/кг}} = 10150\frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Пропан поступает в испаритель в виде насыщенной жидкости при 11°C и выходит из испарителя в виде насыщенного пара при 22°C.Требуемая энергия таким образом

$$\dot{Q}_{\text{испаритель}} = \dot{m}_{\text{пропан}}\left\{h[(22°\text{C})_g - h(11°\text{C})_f]\right\}$$
$$= 10150\frac{\text{кг}}{\text{с}} \times \left(918.2\frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 546.2\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 3.78 \times 10^6\ \text{кВт}$$

Поскольку большая часть передачи энергии требуется для изменения фазы, которое происходит при 22 ° C, логарифмическая разница средней температуры (LMTD) для испарителя становится

$$\text{LMTD}_{\text{исп}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{(28^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}) - (25^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{28^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}}{25^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}}\right)} = \frac{6^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{6^\circ\text{C}}{3^\circ\text{C}}\right)} = 4.33^\circ\text{C}$$

Для теплообменника:

$$\dot{Q}_{\text{исп}} = UA_{\text{исп}} \times \text{LMTD}_{\text{исп}}$$

из которой площадь поверхности испарителя может быть рассчитана как

$$A_{\text{исп}} = \frac{\dot{Q}_{\text{исп}}}{U \times \text{LMTD}_{\text{исп}}} = \frac{3.78 \times 10^6 \text{ кВт}}{1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\ ^\circ\text{C}) \times 4.33^\circ\text{C}} = 6.234 \times 10^5 \text{ м}^2$$

Соответственно энтальпии насыщенной жидкой воды при 28 и 25°C составляют 117,35 кДж/кг и 104,81 кДж/кг. Энергетический баланс после этого производит скорость потока массы теплой воды:

$$\dot{m}_{\text{теплая вода}} = \frac{\dot{Q}_{\text{исп}}}{h(28^\circ\text{C})_f - h(25^\circ\text{C})_f} = \frac{3.78 \times 10^6 \text{ кВт}}{117.35 \text{ кДж/кг} - 104.81 \text{ кДж/кг}} = 3.01 \times 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Пропан поступает в конденсатор в виде смеси при 11°C и выходит из конденсатора в виде насыщенной жидкости при 11°C. Таким образом, энергия, необходимая для конденсации пара

$$\dot{Q}_{\text{конденсатор}} = \dot{m}_{\text{пропан}} [h_{\text{выпор}} - h(11^\circ\text{C})] = 10150 \frac{\text{кг}}{\text{с}} \left(905.9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 546.2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}\right) = 3.65 \times 10^6 \text{ кВт}$$

логарифм средней разницы температур для конденсатора становится

$$\text{LMTD}_{\text{конденсатор}} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{(11^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C}) - (11^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{11^\circ\text{C} - 5^\circ\text{C}}{11^\circ\text{C} - 8^\circ\text{C}}\right)} = \frac{6^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{6^\circ\text{C}}{3^\circ\text{C}}\right)} = 4.33^\circ\text{C}$$

Для конденсатора:

$$\dot{Q}_{\text{конденсатор}} = UA_{\text{конденсатор}} \times \text{LMTD}_{\text{конденсатор}}$$

из которой площадь поверхности конденсатора может быть рассчитана как

$$A_{\text{конд}} = \frac{\dot{Q}_{\text{конденсатор}}}{U \times \text{LMTD}_{\text{конд}}} = \frac{3.65 \times 10^6 \text{ kW}}{1400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\ ^\circ\text{C}) \times 4.33^\circ\text{C}} = 6.03 \times 10^5 \text{ м}^2$$

Соответственно энтальпии насыщенной жидкой воды при 8 и 5°C составляют 21,05 кДж/кг и 33,55 кДж/кг.

$$\dot{m}_{\text{холодная вода}} = \frac{\dot{Q}_{\text{конденсатор}}}{h(8^\circ\text{C})_f - h(5^\circ\text{C})_f} = \frac{3.65 \times 10^6 \text{ кВт}}{33.55 \text{ кДж/кг} - 21.05 \text{ кДж/кг}} = 2.92 \times 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Тепловая эффективность – это выходная мощность турбины, деленная на энергию, передаваемую в испарителе:

$$\eta_{\text{тепловая}} = \frac{}{\dot{Q}_{\text{исп}}} = \frac{125\ \text{МВт}}{3.78 \times 10^{6}\ \text{кВт}} = 0.033$$

Как и следовало ожидать, из-за небольших перепадов температур, связанных с этой системой преобразования тепловой энергии океана в замкнутом цикле, тепловая эффективность является низкой. Термодинамические недостатки небольших перепадов температур в тепловых двигателях являются реальными для обеих конфигураций преобразования тепловой энергии океана. Хотя в замкнутом цикле нет проблемы с доступностью (или пригодностью) турбины системы преобразования тепловой энергии океана открытого цикла, для замкнутого цикла требуются очень большие теплообменники. Площадь поверхности, необходимая для испарителя и конденсатора, превышает 600 000 м^2!

14.2.3 Гибридные системы преобразования тепловой энергии океана

Гибридная система преобразования тепловой энергии в океане обладает особенностями как системы преобразования тепловой энергии в открытом, так и в замкнутом циклах. В гибридной системе преобразования тепловой энергии океана теплая поверхностная вода сбрасывается в пар в процессе, аналогичном конфигурации преобразования тепловой энергии океана в открытом цикле. Затем пар используется для испарения рабочей жидкости, обычно аммиака, в замкнутом контуре, содержащем турбину. Опресненная вода обеспечивается путем конденсации пара.

14.2.4 Продукт систем преобразования тепловой энергии океана

В дополнение к производству электроэнергии, системы преобразования тепловой энергии океана могут обеспечить полезные выходы, такие как:

1) Опресненная вода. Конденсация пара, как в предлагаемых гибридных системах преобразования тепловой энергии океана, может обеспечить питьевую воду.
2) питательные вещества для применения марикультуры. Поток холодной воды для системы преобразования тепловой энергии океана содержит
богатые питательные вещества (и относительно свободные от патогенных микроорганизмов), которые можно использовать в коммерческих марикультурных приложениях.
3) Кондиционирование воздуха в зданиях и умеренная температура охлаждения. Поток холодной воды (5°C или 41°F) может использоваться в сочетании с теплообменниками для обеспечения кондиционированного воздуха для охлаждения или охлажденной воды для умеренных температур охлаждения.
4) добыча полезных ископаемых. Поскольку системы преобразования тепловой энергии океана обладают большим расходом, добыча минералов, растворенных в океанской воде, была предложена в качестве дополнительного применения преобразования тепловой энергии океана.

14.2.5 Оценка систем преобразования тепловой энергии океана

Примеры 14.1 и 14.2 демонстрируют проблемы размера/эффективности, связанные с системами преобразования тепловой энергии океана. Действительно, за исключением нескольких экспериментальных установок, не было построено и эксплуатируется ни одного коммерческого объекта по преобразованию тепловой энергии океана. На сегодняшний день наибольшим успехом пользуется пилотный завод на Гавайях, работавший с 1993 по 1998 год (Вега, 2002). В учреждении изготавливали полезную мощность 103 кВт, 255 кВт валового добытую власть. Теплая поверхностная вода была 26°C, а холодная глубокая - 6°C. Вега (2002) представляет современную оценку

преобразования тепловой энергии океана и вносит ряд предложений относительно будущего развития преобразования тепловой энергии океана.

С 1970-х годов был предложен ряд крупных систем преобразования тепловой энергии океана, и некоторые из них достигли стадии детального проектирования. Большинство из этих систем довольно велики и должны быть пришвартованы в глубоких водах океана. Рис. 14.5, концептуальный эскиз того, как могла бы появиться большая установка по преобразованию тепловой энергии в океане, был представлен в 1976 году проектом TRW в Кейтон (1981). Интересной особенностью конструкции TRW является то, что вытесненная морская вода используется для обеспечения тяги в стратегии динамического позиционирования, которая помогает объекту удерживать станцию (положение и выравнивание). Дополнительные представления концепций OTEC эпохи 1970-х представлены Рудигер и Смит (1977), Бейкер (2006), и Такахаси (2000).

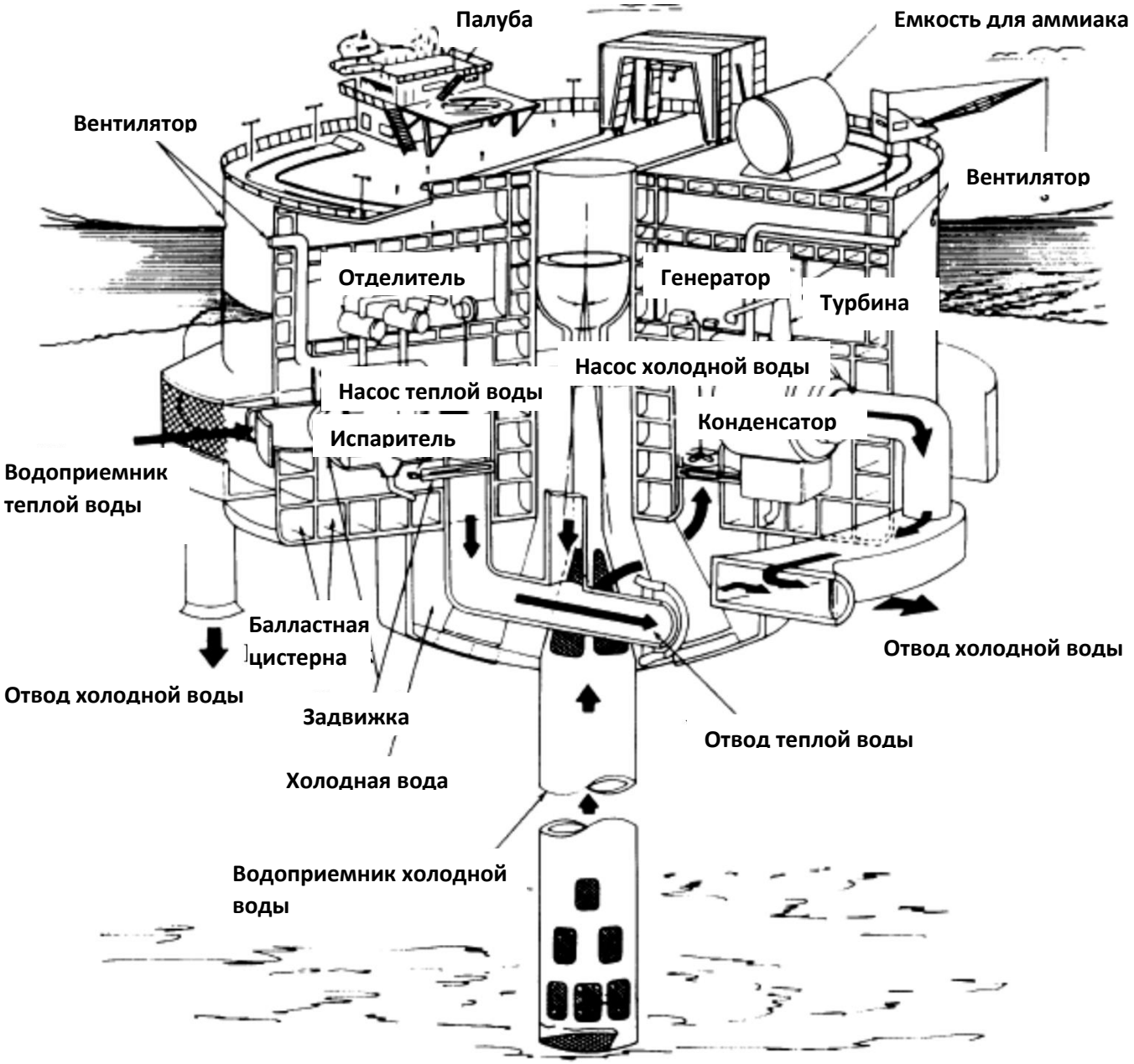


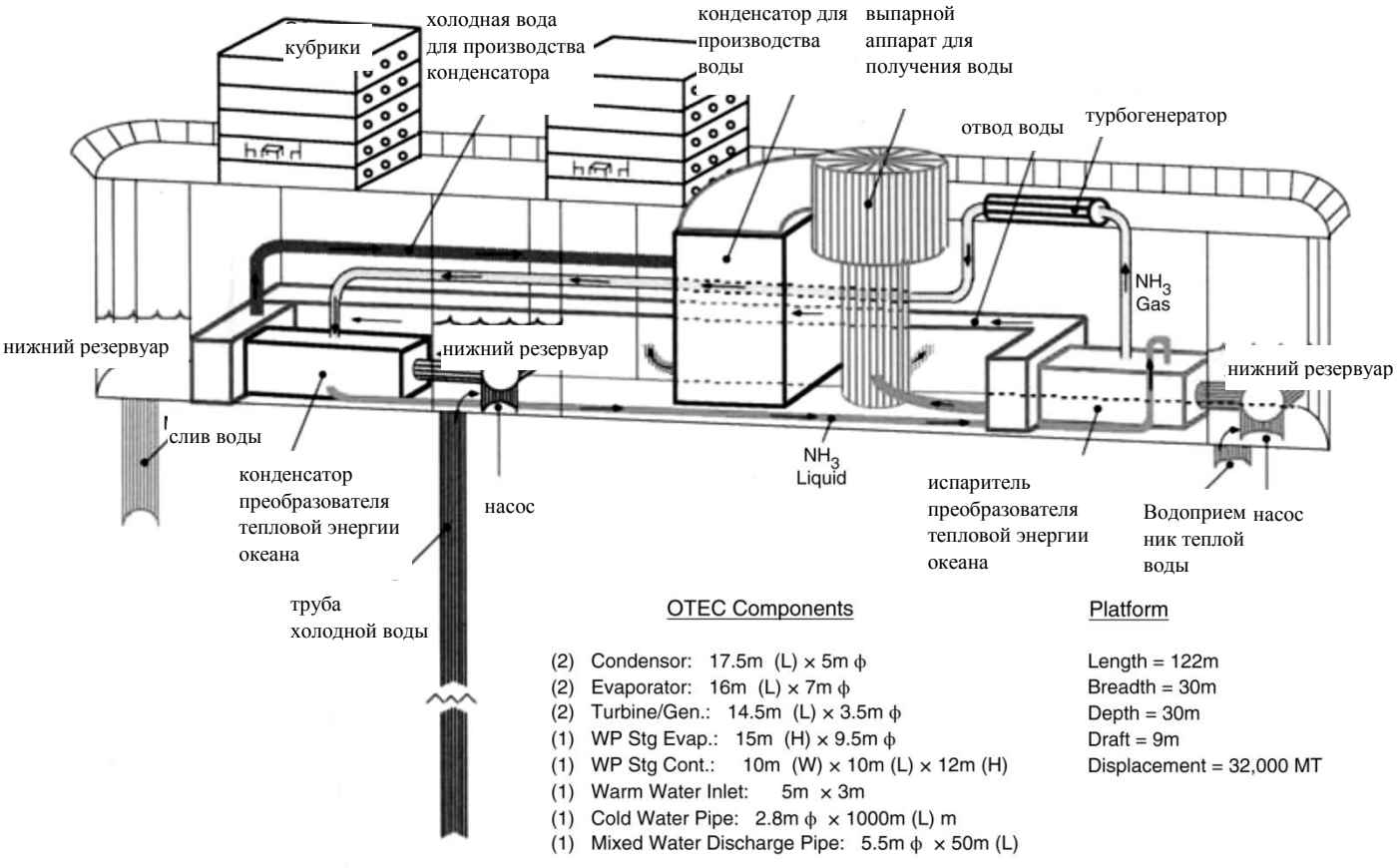
Рис. 14.5 Предлагаемая установка преобразования тепловой энергии океана Источник: Кейтон (1981).

В течение многих лет Министерство энергетики США (USDOE) не поддерживало значительных исследований конверсии тепловой энергии океана, но в последние годы оно изменилось, и USDOE возобновило свою поддержку конверсии тепловой энергии океана. Веб-сайт USDOE по преобразованию тепловой энергии в океане: http://energy.gov/eere/energybasics/articles/ocean-energy-

technology-basics. Совместно с Национальным управлением океанических и атмосферных исследований в Университете Нью-Гемпшира в 2009 году состоялся семинар, посвященный оценке технической готовности технологий преобразования тепловой энергии океана, необходимых для коммерциализации (Исследовательский центр реагирования на побережье, 2010). Семинар был явно адресован (1) платформе, (2) швартовке, (3) интерфейсу, (4) теплообменнику, (5) турбине, (6) кабелю и (7) трубе. Группам, состоящим из технических экспертов, было поручено определить необходимые технологические достижения, необходимые для осуществления преобразования тепловой энергии океана.

Области, особенно подходящие для начальных применений системы преобразования тепловой энергии океана, включают малые островные государства в южной части Тихого океана, американские территории (такие как Гуам) в Тихом океане и штат Гавайи. Все эти места используют дизельные генераторы для электричества и имеют проблемы с питьевой водой.

Предлагались корабли для конверсии тепловой энергии в океан (например, Вега, 2002). Эти океанские суда будут содержать системы преобразования тепловой энергии океана и будут медленно перемещаться в благоприятных для преобразования тепловой энергии океана регионах для сбора энергии и минералов. Электроэнергия из собранной энергии будет использоваться для производства на борту и для производства топлива (такого как водород). на рис. 14.6 от Вега (2002) представлена схема предлагаемой пилотной установки с электрической мощностью 5 МВт.



Компоненты преобразования тепловой энергии океана (OTEC)

(2) Конденсатор 17,5 (Д) х 5 м
(2) Испаритель 16(Д) х 7 м
(2) Турбогенератор 14,5 (Д) х 3.5 м
(1) выпарной аппарат для производства воды 15 (Д) х 9.5 м
(1) конденсатор для производства воды 10м (Ш) х 10 м(Д)х 12 м(В)
(1) подвод теплой воды 5 м х 3 м
(1) впуск холодной воды 2.8 м х 1000 м (Д)5м
(1) сливная труба для смешанной воды 5.5 (Д) х 50 м(Д)

Платформа
Длина=122 м
Ширина=30 м
Глубина=30 м
Уклон =9 м
Водоизмещение =32 000Т

Рис. 14.6 Предлагаемая схема преобразователя тепловой энергии океана (OTEC) мощностью 5 МВт Источник: Вега (2002).

В 2012 году Министерство энергетики США (USDOE) профинансировало и опубликовало комплексную оценку потенциала мирового производства электроэнергии для преобразования тепловой энергии океана, проведенную компанией Lockheed Martin. Проект визуализации тепловой энергии океана (ВТЭО) (Аскари и соавт., 2012) сосредоточены на максимальной практически извлекаемой энергии (MPEE) из тепловых ресурсов океана. Они определили максимальную практически извлекаемую энергию как устойчивую и технически осуществимую, использующую самые современные технологии использования энергии океана. В ходе анализа использовались подробные океанические и климатологические данные и подтвержденная номинальная система преобразования тепловой энергии океана мощностью 100 МВт для оценки максимальной практически извлекаемой энергии. Используемая система преобразования тепловой энергии океана представляет собой обычный одноступенчатый замкнутый цикл, аналогичный циклу в примере 14.2, за исключением того, что в качестве рабочей жидкости используется аммиак. В докладе содержится подробное разъяснение используемой методологии, а также подробное изложение результатов. В исключительных экономических зонах, представляющих интерес для США, расчетная годовая средняя чистая мощность преобразования тепловой энергии океана составила 529 ГВт при предполагаемой выработке 4636 ТВ*ч/год. Средняя годовая чистая мощность - это среднее значение летних и зимних значений. Следующие девять стран имеют совокупную среднегодовую мощность 1019 ГВт с 8923 ТВт*ч/год выработки электроэнергии. Общая глобальная оценка составляет 55 000 ТВт*ч/год! Таким образом, с точки зрения мощности и энергии глобальный потенциал преобразования тепловой энергии океана довольно велик. Экономика не рассматривалась в исследовании, только максимальная практически извлекаемая энергия.

Для получения емкости, упомянутой в предыдущем пункте, Аскари и соавт. (2012) разработал модель, позволяющую использовать тепловые ресурсы океана для оценки электрической мощности. Они разработали, используя данные существующих испытательных установок по преобразованию тепловой энергии океана и экспериментальных установок, модель для номинальной установки по преобразованию тепловой энергии океана мощностью 100 МВт. Разработка и проверка модели подробно описаны в отчете. Тем не менее, мы будем использовать модель для определения и понимания взаимосвязи между температурной разницей (поверхность-глубина), глубиной глубокой температуры и выходной мощностью, что позволяет проводить параметрические исследования. Исходные условия модели приведены в таблице 14.2.

В исследовании по визуализации тепловой извлекаемой энергии в океане чистая выходная мощность выражалась как разница между общей извлеченной энергией и фиксированными и переменными потерями:

$$\text{Мощность}_{\text{чист}} = \text{Мощность}_{\text{сушки}} - \text{Потери}_{\text{фикс}} - \text{Потери} \qquad (14.2)$$

Таблица 14.2 Базовые значения системы преобразования тепловой энергии океана 100 МВт в океане.

Температура поверхностной (теплой) воды T_S (°C)	25.7
Расход теплой воды (кг/с)	460 000
Глубокая (холодная) температура воды T_D (°C)	4.1
Расход холодной воды (кг/с)	366 000
Глубина трубы холодной воды d (м)	1000
Массовый расход аммиака (кг/с)	4060
Эффективность турбины (%)	86
Эффективность насоса аммиака (%)	75
Эффективность насоса морской воды (%)	80
Эффективность генератора (%)	97.5
Испаритель *UA* (МВт/°C)	1410
Конденсатор *UA* (МВт/°C)	1350

Соотношение суммарной мощности ($\text{Мощность}_{\text{сумм}}$) получено с использованием значений, приведенных в таблице 14.2, и

$$\text{Мощность}_{\text{сумм}} = 13.89\Delta T - 149.71 \tag{14.3}$$

где мощность выражена в мегаваттах, а ΔT – это разница температур в градусах Цельсия. Постоянные потери ($\text{Потери}_{\text{фикс}}$) состоят из потерь мощности на входе холодной воды, потери при перекачке конденсатора и распределения, аммиака и составляют 42,7 МВт. Переменная потеря Lossvariable представляет собой сумму потерь на трение в трубе и статического напора и является функцией глубины трубы, разности температур и температуры поверхности. Переменная Lossvariable детально разработана в отчете по визуализации тепловой извлекаемой энергии в океане и имеет вид

$$\begin{aligned}\text{Потери}_{\text{перем}} &= 0.0038d + 4.488d(5.234\times10^{-10}d^3 - 1.378\times10^{-6}d^2 + 1.313\times10^{-3}d \\ &\quad - 0.6541)\left[\frac{-0.00599T_S^2 + 0.031T_S + 1025}{-0.00599(T_S-\Delta T)^2 + 0.031(T_S-\Delta T) + 1025} - 1\right]\end{aligned} \tag{14.4}$$

где значение $\text{Потери}_{\text{перем}}$ выражено в мегаваттах, а d- это глубина в метрах, и температура выражена в градусах Цельсия.

Пример 14.3

Определите $\text{Мощность}_{\text{сумм}}$, $\text{Мощность}_{\text{чист}}$ и $\text{Потери}_{\text{перем}}$ для базовых значений в таблице 14.2.

Решение: Mathcad используется для решения, результаты которого показаны на рис. 14.7. Значения TS, TD и глубины d являются входными. Валовая мощность составляет 150,3 МВт. Для упрощения расчетов переменных потерь определены две функции, которые используются для вычисления значения переменных потерь 2,718 МВт. Полезная мощность составляет 104,9 МВт.Таким образом, для базового случая потери (фиксированные и переменные) составляют 45,4 МВт или 30% от извлеченной мощности. Переменные потери нелинейны с длиной; например, если глубина в этом примере была изменена до 500 м, переменные потери становятся 1,924 МВт, что соответствует уменьшению на 30% переменных потерь при изменении глубины на 50%. Интерактивный инструмент визуализации доступен для просмотра результатов исследования визуализации тепловой извлекаемой

энергии океана. Подробности доступны в Аскари и соавт. (2012). До сих пор в этой главе было рассмотрено преобразование тепловой энергии океана, но также возможен сбор энергии океана из приливов и волн. В разделах 14.3 и 14.4 исследуются эти понятия.

C:= K Задаем °C как K (для удобства)

Входные значения T_S, T_D и d

$$T_S := 25.7 \cdot C \qquad T_D := 4.1 \cdot C \qquad \Delta T := T_S - T_D \qquad \Delta T = 21.6K \qquad d := 1000 \cdot m$$

Вычисляем извлеченную валовую мощность,

$$\text{Мощность}_{\text{сухи}} := \left(13.89 \cdot \frac{\Delta T}{C} - 149.71\right) \text{МВт} \qquad \text{Мощность}_{\text{сухи}} = 150.314 \cdot \text{МВт}$$

Получаем значения фиксированного убытка

$$\text{Потери}_{\text{фикс}} := 42.7 \text{ МВт}$$

Определяем функции для переменных потерь

$$LVT1\left(d, T_S, \Delta T\right) := \frac{-0.00599 T_S^{\,2} + 0.031 \cdot T_S + 1025}{-0.00599\left(T_S - \Delta T\right)^2 + 0.031 \cdot \left(T_S - \Delta T\right) + 1025} - 1$$

$$LVT2(d) := 0.0038 \cdot d + 4.488 \cdot d \cdot \left(5.234 \cdot 10^{-10} \cdot d^3 - 1.378 \cdot 10^{-6} \cdot d^2 + 1.313 \cdot 10^{-3} \cdot d - 0.6541\right)$$

Вычисляем переменные потери, используя определенные функции

$$\text{Потери}_{\text{перем}} := \left(LVT2\left(\frac{d}{m}\right) \cdot LVT1\left(\frac{d}{m}, \frac{T_S}{C}, \frac{\Delta T}{C}\right)\right) \text{МВт} \qquad \text{Потери}_{\text{перем}} = 2.718 \cdot \text{МВт}$$

Получаем объем выработанной энергии

$$\text{Мощность}_{\text{чист}} \quad \text{Мощность}_{\text{сухи}} - \text{Потери}_{\text{фикс}} - \text{Потери}_{\text{перем}} \qquad \text{Мощность}_{\text{чист}} = 104{,}896 \text{ МВт}$$

$$\text{ОбщПотери} := \text{Потери} + \text{Потери} \qquad = 45{,}418 \text{ МВт}$$

$$\frac{\text{ОбщПотери}}{\text{Мощность}_{\text{перем}}} = 30{,}216 \%$$

Рис. 14.7 Решение Mathcad для примера 14.3.

14.3 Энергия приливов и отливов

Приливная энергия использует приливы и отливы, чтобы косвенно генерировать электричество. В принципе, сбор энергии от приливов похож на гидроэлектростанцию. Во время прилива резервуар заряжается, а во время отлива резервуар разряжается. Как в процессе зарядки, так и в процессе разрядки турбина может использоваться для выработки электроэнергии, как и в других гидроэлектростанциях. Тем не менее, временные аспекты приливов добавляют другие соображения. Самая простая система приливов и отливов называется системой генерации приливов и использует устье, обычно называемое заграждением, через устье реки. Ворота шлюза открываются и закрываются, чтобы регулировать поток в и из резервуара. Двухсторонние приливные энергетические системы производят электричество с подачей в и из резервуарано являются более сложными и дорогостоящими, чем генерация в одном направлении, поскольку турбина и опорная конструкция должны быть более надежными и сложными.

Приливы и отливы периодичны, но не постоянны так как приливы управляются Луной и, в некоторой степени, Солнцем. Приливы описаны в зависимости от их графика и диапазона. Диапазон

представляет собой перепад высот между приливом и отливом, а график включает время возникновения приливов и отливов.

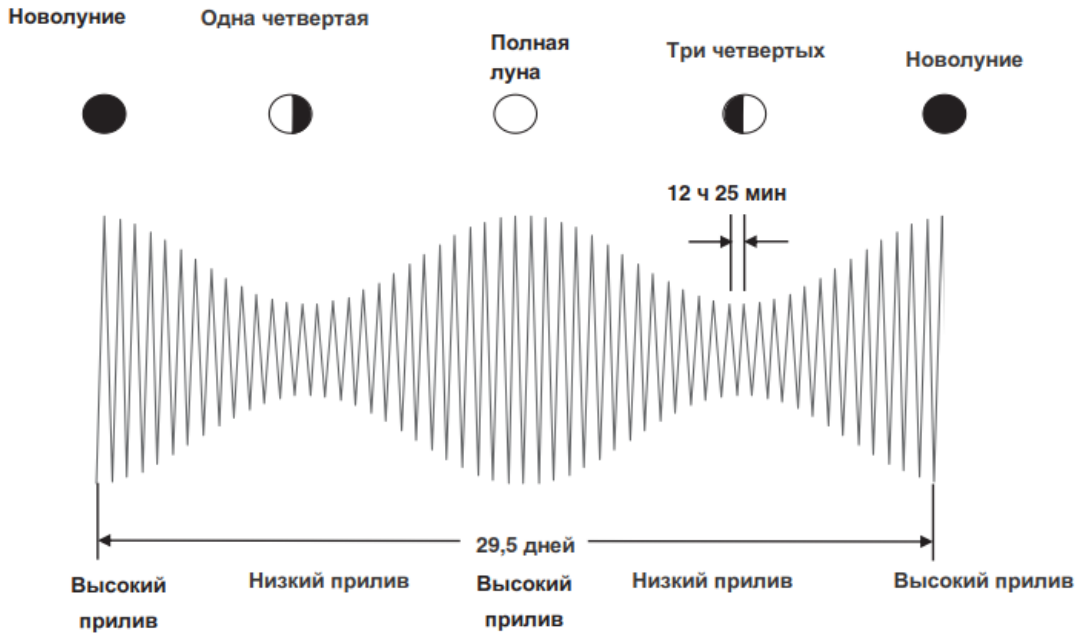


Рис. 14.8 Типовые периоды приливов за месяц.

«Лунный месяц» равен 29,5 дням, поэтому лунный день составляет 24 часа 50 минут. В течение лунного дня приливы поднимаются и опускаются дважды - таким образом, приливный цикл составляет 12 ч 25 мин. Это означает, что приливы и отливы происходят не в одно и то же время каждый день, но прогрессируют 25 минут за цикл или 50 минут за лунный день. Кроме того, диапазон не является постоянным, а изменяется в течение лунного месяца, причем максимальный диапазон наблюдается во время новой и полной луны, а минимальный диапазон - в первой и третьей четвертях. В данном месте средние диапазоны сложны, но предсказуемы. Максимальный диапазон называется высоким приливом, а минимальный диапазон – приливным. Графическое представление, такое как рис. 14.8, является хорошим способом подробно понять приливные движения. На рисунке показаны суточный периодический цикл, месячные периодические периоды, вариации приливного диапазона и взаимосвязь фаз луны с высоким и нестационарным приливами.

Наблюдение о том, что приливы и отливы происходят в разное время в разные дни и что диапазон колеблется от дня к дню (от высокого до низкого к высокому приливу), означает, что стратегии управления для максимизации выгод от приливной энергии (как правило, вырабатываемой энергии) более сложны, чем стратегии для гидроэлектростанций. Рассмотрение того, как распределить время генерации на основе диапазона приливов для данного дня, влияет на размер (мощность) турбины и общую производительность системы. Типичное расположение приливного бассейна для выработки энергии показано на рис. 14.9. Разница в высоте из-за приливного диапазона определяет энергию, запасенную в бассейне. Энергия, запасенная в дифференциальном элементе высотой dh, расположенном над отливом низкого уровня, равна

$$\mathrm{d}W = g\,\mathrm{d}m\,h \tag{14.5}$$

где dm-масса в дифференциальный элемент и dm=ρA dh , где A-горизонтальная область, таким образом

$$\mathrm{d}W = g\rho A h\,\mathrm{d}h \tag{14.6}$$

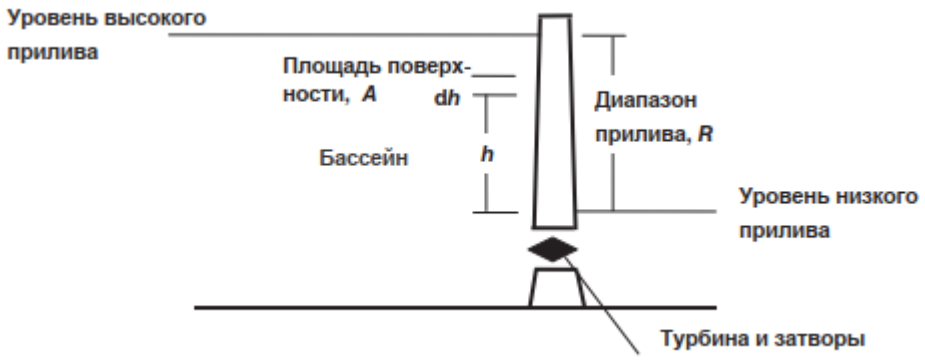


Рис. 14.9 Схема приливного бассейна.

Тогда для приливного бассейна

$$W = \int_0^R \mathrm{d}W = \int_0^R g\rho A\, h\, \mathrm{d}h \tag{14.7}$$

A является ощутимо постоянным, если изменение площади поверхности с возвышением в приливном бассейне мало.

$$W = \frac{1}{2} g\rho A R^2 \tag{14.8}$$

уравнение 14.8 показывает, что доступная энергия в приливном бассейне, привязанная к элементу прилива, пропорциональна площади поверхности и квадрату приливного диапазона. Следовательно, приливный диапазон является важным показателем при оценке потенциала приливной энергии.

Энергия, указанная в уравнении 14.8, основана на данных прилива; следовательно, энергия достижима только тогда, когда она сбрасывается в этот элемент. Это наблюдение поднимает вопрос о том, как можно использовать систему приливной энергии, чтобы максимизировать полезность собранной энергии. Рассмотрим условия, показанные на рис. 14.9; а именно, приливный бассейн на его максимальной высоте и уровень прилива на минимуме. Если бы весь приливный бассейн был быстро разряжен, то достижимая энергия была бы максимальной; однако, если бы бассейн постепенно разряжался, то приливные отливы увеличивались бы, а высота приливов уменьшалась бы, а доступная энергия уменьшалась бы. Таким образом, два протокола связаны со стратегиями приливного разряда: (1) простой приливной бассейн, в котором разряд быстрый и выполняются условия уравнения 14.8; и (2) модулированный простой приливной бассейн, в котором поток изменяется с течением времени и энергия, восстановленная уменьшается от максимума. Хотя протокол 2 дает меньше энергии, чем протокол 1, протокол 2 имеет серьезные преимущества. Протокол 2 требует меньших турбин и приводит к более равномерному уровню мощности, применяемому к сети или для местного использования. Протокол 1 приводит к большим "всплескам" электроэнергии, которые происходят при высоких и низких приливах.

Эль-Вакиль (1984) исследует протокол 2, как показано на рис. 14.10, который взят из его книги. Указан одиночный периодический цикл с периодом 6.2083 ч. Генерация начинается в момент времени t_1, когда разность высот между бассейном и приливом достаточна для эффективной генерации и останавливается в момент времени t2, когда разность высот становится слишком малой для эффективной генерации. Определение времени зависит от объекта, но чтобы уменьшить «остроту» генерации, время генерации должно составлять значительную часть приливного цикла.

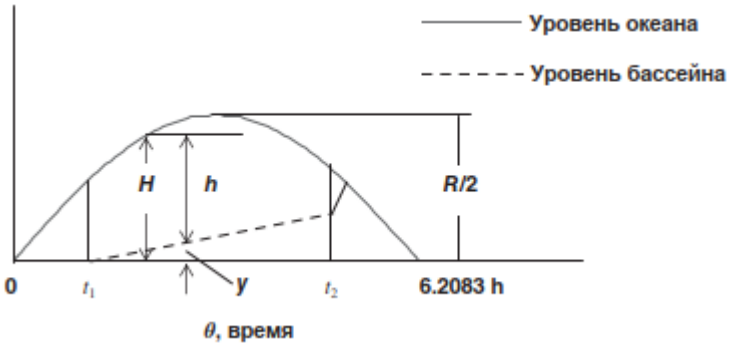


Рис. 14.10 Номенклатура для модулированной приливной системы с одним бассейном.

Во время генерации ворота в бассейн управляются таким образом, что бассейн заполняется линейно со временем, как показано пунктирной линией на рис. 14.10. Прилив представлен синусоидальной функцией:

$$H = \frac{R}{2}\sin\left(\frac{\pi t}{6.2083\ \text{h}}\right) \tag{14.9}$$

и глубина бассейна как линейная функция времени:

$$y = aR(t - t_1) \tag{14.10}$$

где a управляет наклоном заполнения приливного бассейна, а R-приливным диапазоном. В течение приливного цикла Эль-Вакил определил энергию, доступную для сбора урожая, как

$$W = g\rho AR^2\left\{0.988a\left[\cos\left(\frac{\pi t_1}{6.2083}\right) - \cos\left(\frac{\pi t_2}{6.2083}\right)\right] - \frac{a^2}{2}(t_2^2 - t_1^2)\right\} \tag{14.11}$$

Пример 14.4 отвечает на вопрос о том, насколько протокол 2 уменьшает энергию.

Пример 14.4

Исследуйте, как влияет собранная энергия, имеющаяся в протоколе 1 и протоколе 2, на квадратный километр площади поверхности, если приливный диапазон составляет 12 м, а равен 0.0625 h^{-1}, а энергия собирается между t_1=1 ч и t_2=4 ч.

Решение, номинальная плотность морской воды 1025 кг/$м^3$. Для протокола 1 уравнение 14.8 представляет доступную энергию и имеет значение представленный ниже

$$W_1 = \frac{1}{2}g\rho AR^2 = \frac{1}{2}\times 9.807\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\times 1025\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\times 1\,\text{км}^2\times(12\,\text{м})^2 = 201040\ \text{кВт}$$

Уравнение 14.11 представляет доступность энергии с модулированным потоком и выглядит как

$$\begin{aligned} W_2 &= g\rho AR^2\left\{0.988a\left[\cos\left(\frac{\pi t_1}{6.2083}\right) - \cos\left(\frac{\pi t_2}{6.2083}\right)\right] - \frac{a^2}{2}(t_2^2 - t_1^2)\right\} \\ &= 9.807\frac{\text{м}}{\text{с}^2}\times 1025\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\times 1\,\text{км}^2\times(12\,\text{м})^2 \\ &\quad\times\left\{0.988\,\text{h}\times 0.0625\,\text{h}^{-1}\left[\cos\left(\frac{\pi\times 1\,\text{h}}{6.2083\,\text{h}}\right) - \cos\left(\frac{\pi\times 4\,\text{h}}{6.2083\,\text{h}}\right)\right] - \frac{(0.0625\,\text{h}^{-1})^2}{2}\left[(4\,\text{h})^2 - (1\,\text{h})^2\right]\right\} \\ &= 20811\ \text{кВт} \end{aligned}$$

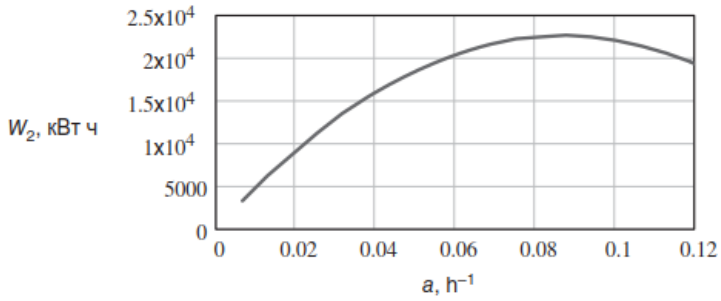


Рис. 14.11. Доступность энергии как функция a.

Таким образом, модулированный поток, протокол 2, может производить лишь около одной десятой той энергии, которую может производить протокол 1. Это резкое снижение энергии, доступной для сбора урожая, но собранная энергия распределяется в течение периода времени 4 ч вместо очень короткого генерирующего интервала, а требуемый размер турбины (выходная мощность) значительно меньше. Основной переменной управления в модулированном сценарии является значение a. Следовательно, законный вопрос заключается в том, как доступность сбора энергии зависит от a? Если расчет для W2 повторяется для диапазона значений a и результаты отображаются на рис. 14.11 результаты. По мере увеличения, а на малую величину энергообеспеченность увеличивается, достигает максимума, а затем постепенно уменьшается. Значение для максимальное наличие энергии близко 0.09 h^{-1}, и значение a=0:0625 h-1 предписанное в постановка задачи приводит к почти максимально возможному восстановлению энергии.

В примере 14.4 и в уравнениях 14.8 и 14.11 собранная энергия – это просто энергия, извлеченная из потока, а не чистая выработка энергии приливной системы. Эффективность турбины, а также потери в системе должны учитываться для получения чистого выпуска. Эль-Вакиль (1984) предполагает, что общая эффективность может составлять всего 30%.

Уравнения 14.8 и 14.11 имеют R2 в главном выражении, демонстрируя важность приливного диапазона в определении потенциала сбора энергии для приливных систем. Приливные системы привлекательны в регионах, где приливная зона высока, а прибрежная геометрия позволяет создавать приливные бассейны с большой площадью поверхности. Горлов (2001) приводит список регионов с высокими приливными диапазонами, из которых адаптирована таблица 14.3. Места с большими диапазонами приливов ограничены по количеству, и общие доступные приливные ресурсы очень ограничены по сравнению с большинством альтернативных источников энергии, рассмотренных в этом учебнике.

В таблице 14.3 представлен список мест с большими диапазонами приливов. По состоянию на 2015 год только пять приливов системы были в рабочем состоянии; однако, некоторые из них находятся на стадии планирования/строительства.

Таблица 14.3 Местоположения с большими приливными диапазонами.

Местоположение	**Страна**	**Приливный диапазон R** (м)
залив Фанди	Канада	16.2
Устье Реки Северн	Великобритания	15.4
Порт Гранвиль	Франция	14.0
Ла-Ранс	Франция	13.5
Пуэрто-Рико-Гальегос	Аргентина	13.3
Мезенский залив	Россия	10.0
Охотское море	Россия	13.4

Таблица 14.4 Существующие объекты приливной энергии.

Местоположение	Страна	Мощность (МВт)	Площадь бассейна (км^2)	Средний прилив (м)
Аннаполис	Канада	20.0	15.0	6.4
Цзянсы	Китай	3.9	1.4	5.1
Кислая Губа	Россия	1.2	1.1	2.3
Река Ранс	Франция	240.0	22.0	8.6
Озеро Сихва	Южная Корея	254.0	30.0	5.6

В таблице 14.4 содержится подробная информация о пяти действующих приливных системах. Только два из них река-Ранс и озеро Сихва-производят большое количество электроэнергии и занимают значительные площади поверхности. Планируемые/строящиеся приливные системы включают остров Ганхва (Южная Корея) мощностью 812 МВт и Инчхон (Южная Корея) мощностью 1320 МВт.

Приливная электростанция Ля Ранс, расположенная недалеко от Сен-Мишеля в Бретани (де ЛаЛеу, 2009), является, безусловно, наиболее ярким примером таких сооружений. Ля Ранс начал функционировать в 1967 году, и он работал без каких-либо серьезных поломок и ежегодно генерирует более 600×10^6 кВт-ч. На объекте установлено 24 турбины мощностью по 10 МВт каждая. Плотина, заграждение, имеет длину 750 м и высоту 13 м, и, как указано в таблице 14.4, бассейн имеет площадь 22 км^2. Ля Ранс проработал более 160 000 часов и произвел экономически конкурентоспособную электроэнергию. Компания Électricité de France провела капитальный ремонт всего оборудования, включая установку трех новых турбин в год, пока все оригиналы не были заменены.

Приливная электростанция Сихва (Шмид, 2005 г.) мощностью 254 МВт больше, чем Ля Ранс. На установке используется 10 ламповых турбин, каждая мощностью 10 МВт, и используется разность высот между приливом и водохранилищем для выработки 260 МВт электроэнергии. Сихва вырабатывает энергию в одном направлении, от океана до озера Сихва, и ежегодно циркулирует до 60 миллиардов тонн морской воды.

Помимо высоких капитальных затрат, приливные энергетические системы вызывают значительные экологические и экологические вопросы. Воздействие на местную территорию является специфическим и трудно поддается количественной оценке. Эти воздействия включают воздействие на водную и береговую экосистемы, засорение и проблемы с качеством воды.

14.4 Морская и гидрокинетическая энергия

Последняя тема, рассмотренная в этой главе в «старой» терминологии, – это волновая энергия, но сейчас она называется морской и гидрокинетической (МГК) энергией. Источником энергии по-прежнему являются токи и волны. Океанские волны вызваны ветром, который является косвенным эффектом неравномерного солнечного нагрева, и движением Земли. Как и в случае других альтернативных источников энергии, количество доступной энергии огромно, но методы сбора энергии все еще находятся в стадии разработки. Маккормик (2007) и Круз (2008) - хорошие представления. на рис. 14.12 от Трешер (2014) показана оценка приливного течения, энергии и мощности волн для США. Доступная мощность указана в мегаваттах, а собранная энергия - в тераватт-часах в год. Мощность для Аляски разделена на 47 МВт и 437 МВт.

Даже умеренное волновое движение обладает плотностью энергии, превышающей плотность падающей солнечной энергии. Однако, прежде чем исследовать энергетическое содержание волн, рассмотрим обычное описание бегущей волны:

$$y = a\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\tau}t\right) \tag{14.12}$$

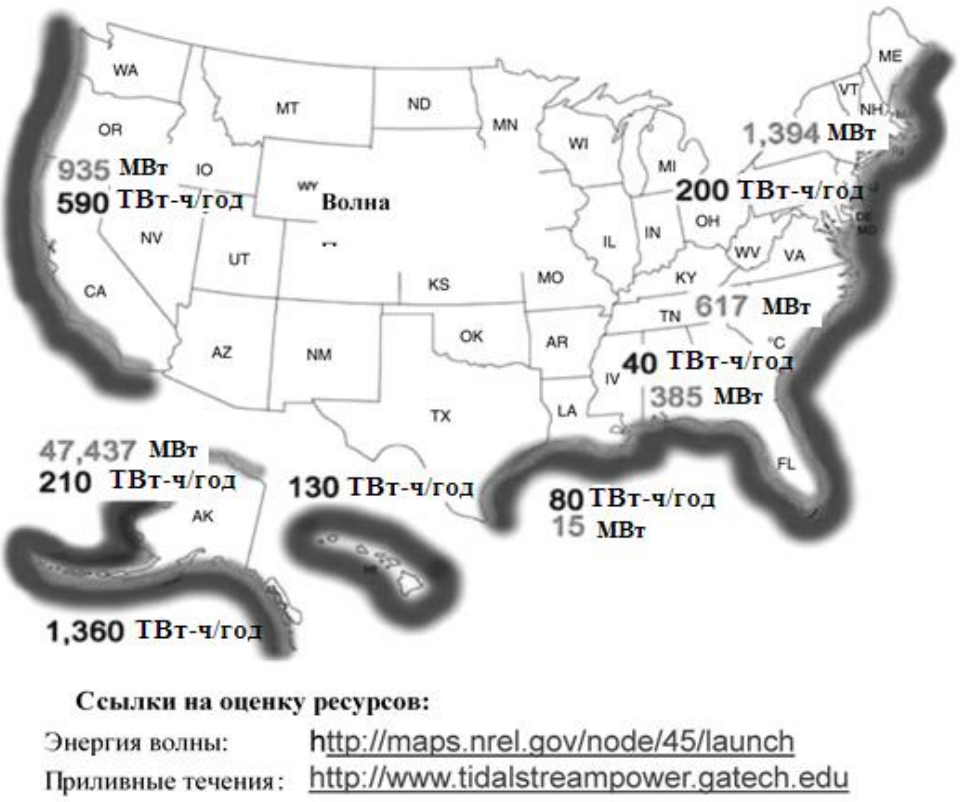


Рис. 14.12. Расчетные приливные течения и энергетические ресурсы волн в США. Источник: Трешер (2014).

где А-амплитуда, λ-длина волны, τ-период; y-высота над средним уровнем моря, t-время, x-горизонтальная координата. Номенклатура бегущих волн представлена на рис. 14.13. Длина волны λ, расстояние полного цикла в направлении x и вершина волны a показаны на рисунке. Так как волна периодическая, то при t=τ форма волны идентична форме при t=0.

Хотя движение волны происходит в направлении x, со скоростьюс=λ/τ, движение воды не совпадает с движением волны. Вода вращается на месте с эллиптической траекторией в плоскости распространения волны (Эль-Вакиль, 1984).

Полная энергия волны – это сумма потенциальной и кинетической энергий (Эль Вакиль, 1984). Плотность потенциальной энергии на единицу площади равна

$$\frac{PE}{A} = \frac{1}{4}\rho a^2 g \qquad (14.13)$$

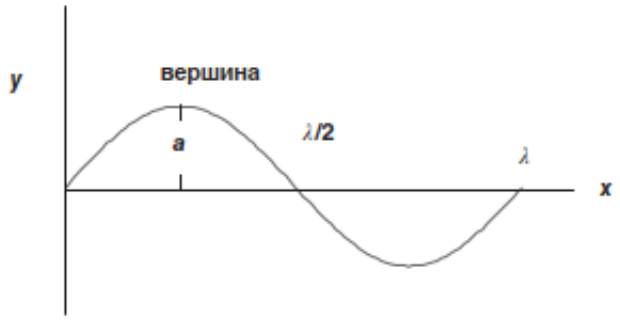


Рис. 14.13 Номенклатура бегущей волны.

и плотность кинетической энергии на единицу площади также

$$\frac{\text{KE}}{A} = \frac{1}{4}\rho a^2 g \tag{14.14}$$

Таким образом полная энергия является суммой потенциальной и кинетической или

$$\frac{\text{TE}}{A} = \frac{1}{2}\rho a^2 g \tag{14.15}$$

Плотность мощности – это плотность энергии, умноженная на частоту f:

$$\frac{\text{PD}}{A} = \frac{1}{2}\rho f a^2 g \tag{14.16}$$

Эль-Вакиль (1984) приближает соотношение между длиной волны и периодом океанской волны, чтобы τ в секундах

$$\lambda = 1.56\tau^2_{\text{м}} = 5.12\tau^2 \quad \text{фут} \tag{14.17}$$

Пример 14.5 иллюстрирует, как использовать предыдущие определения.

Пример 14.5 Океанская волна длиной 2 м имеет период 5 с. Найти длину волны, скорость волны, а также плотность энергии и мощности для этой волны.

Решение: при высоте волны 2 м амплитуда составляет половину высоты волны, или 1 м. Соотношение между периодом и длиной волны обеспечивается уравнением 14.17, и длина волны становится

$$\lambda = 1.56\,\tau^2_{\text{м}} = 1.56\left(\frac{5_{\text{с}}}{\text{с}}\right)^2 = 39\ \text{м}$$

Скорость волны рассчитывается как

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \frac{39\,\text{м}}{5\,\text{с}} = 7.8\frac{\text{м}}{\text{с}}$$

и частота является обратной величиной периода, или

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{5} = 0.2\frac{1}{\text{с}}$$

Плотность полной энергии (TE) и мощности (PD) вычисляют уравнениями 14.15 и 14.16 соответственно:

$$\frac{\text{TE}}{A} = \frac{1}{2}\rho a^2 g = \frac{1}{2}\times 1025\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\times(1\text{м})^2\times 9.807\frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 5030\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$$

и

$$\frac{\text{PD}}{A} = \frac{1}{2}\rho a^2 f g = \frac{1}{2}\times 1025\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}\times(1\text{м})^2\times 0.2\frac{1}{\text{с}}\times 9.807\frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 1005\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

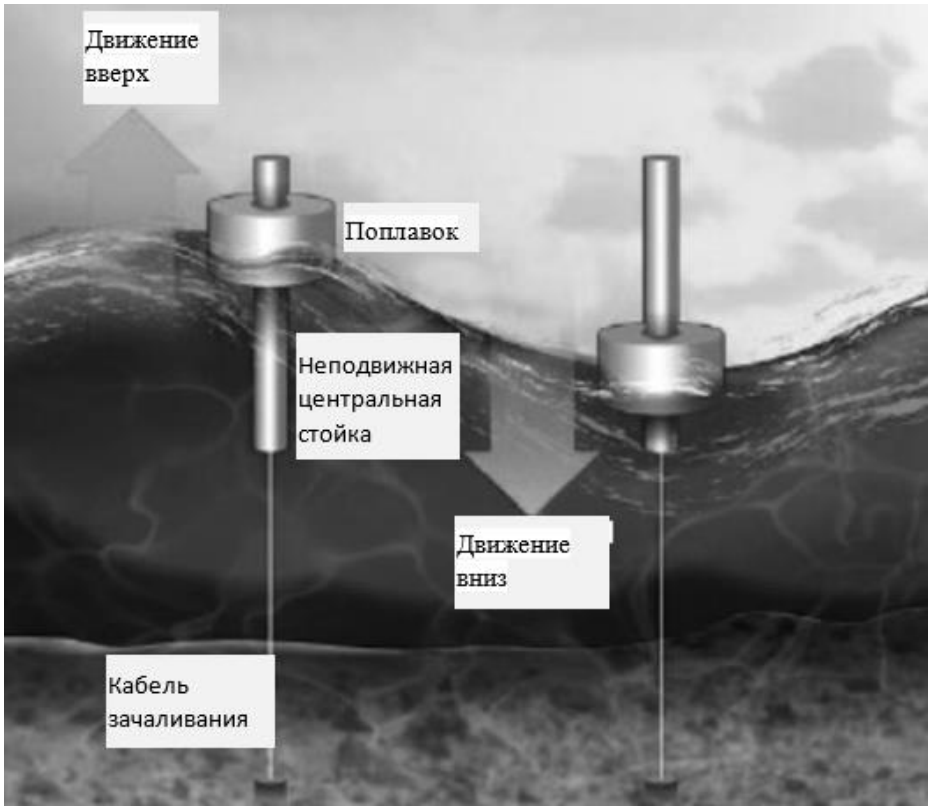


Рис. 14.14 Схема точечного поглотителя
Источник: Трешер (2014).

Для этих волновых условий плотность мощности 1005 Вт/м^2 высока - больше, чем солнечное излучение, поглощаемое водой или падающее на поверхность воды.

Пример 14.5 иллюстрирует, что волна обладает большей плотностью мощности, чем может быть поглощена океаном. Учитывая размеры океанов и волновые условия, существующие в любой данный момент времени, энергия, получаемая от волн, огромна. (1) Как можно получить энергию волн? (2) Почему морские и гидрокинетические энергетические устройства не широко используются?

Большинство предлагаемых и демонстрируемых морских и гидрокинетических машин собирают скорее кинетическую, чем тепловую энергию. Морские и гидрокинетические устройства часто группируются как (1) точечные поглотители, (2) аттенюаторы, (3) колеблющиеся водяные столбы или (4) устройства для перекрытия. Каждая категория будет рассмотрена.

1)Точечные амортизаторы. Точечные поглотители собирают энергию в одной точке, используя вертикальное движение волн (со всех сторон) для повышения давления морской воды (или другой рабочей жидкости), которая приводит в движение турбину. На рис. 14.14 представлена схема системы точечных абсорберов. Система привязана к морскому дну, и плавучий движется вверх и вниз по стационарному центру лонжерона. Примером является

PowerBuoy® от Ocean Power Technologies, который был развернут на нескольких испытательных площадках. На рис. 14.15 показана часть над поверхностью. В 2014 году Ocean Power Technologies сосредоточила свои усилия в области исследований, разработок и маркетинга на небольшом автономном PowerBuoy, который в основном использовался для представления океанографических данных.



Рис. 14.15 Надземная часть точечного абсорбера PowerBuoy.
Источник: http://images.nrel.gov/viewphoto.php?ImageID = 6471938.

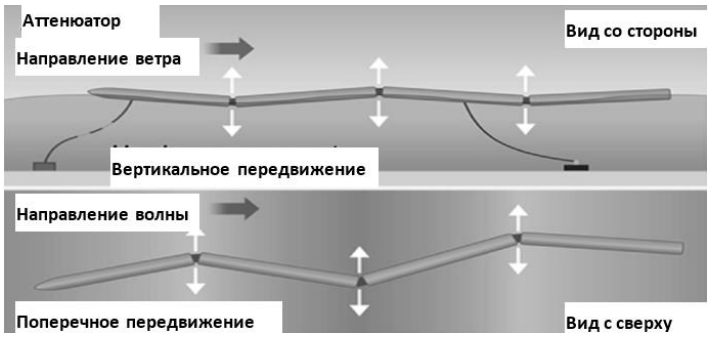


Рис. 14.16 Схема аттенюатора.
Источник: Трешер (2014).

2)Аттенюаторы – это длинные шарнирные плавучие устройства, которые выровнены параллельно направлению волны. Шарнирные соединения содержат механизмы поршень-цилиндр, относительные движения которых создают давление в гидравлической жидкости, которая приводит в движение двигатель, соединенный с генератором. На рис. 14.16 показано, как движение волны и ветер приводят к возникновению шарнирных сочленений. Хороший пример устройства аттенюатора был применен Pelamis Wave Power, ранее Ocean Power Delivery, несколько лет назад. К сожалению, компания объявила о банкротстве в 2014 году. Тем не менее, устройство Pelamis, полупогружная, шарнирная система, состоящая из цилиндрических секций, соединенных шарнирными соединениями, является примером аттенюатора. Волновое движение приводит в движение гидравлические цилиндры, которые прокачивают жидкость высокого давления через гидравлические моторы, которые приводят в движение электрические генераторы. Питание подается через отрывной кабель на берег. Несколько приборов можно соединить для того чтобы сформировать ферму волн-энергии. Pelamis P-750 имеет длину 140 м, диаметр 3,5 м и мощность 750 кВт. Технические характеристики P-750 приведены в таблице 14.5. Pelamis P-750 производит среднегодовое значение 25-40% от номинальной мощности. Рис. 14.17-фотография П-750. Артикулированная природа конструкции возможно главная характеристика.
3)Колеблющиеся водяные столбы. В колеблющемся столбе воды волны заставляют уровень морской воды внутри ограниченного контейнера, камеры, перемещаться вверх и вниз. На рис. 14.18 показаны рабочие характеристики устройства с колеблющимся водяным столбом. Наклонная сторона камеры является доминирующей особенностью. Когда уровень воды поднимается, воздух, задержанный в камере, проталкивается через турбину, которая извлекает энергию для приведения в действие электрического генератора.

Таблица 14.5 Технические характеристики P-750.

Общая длина	150 м
Диаметр	3,5 м
Водоизмещение	700 т (метрическая тонна = 1000 кг)
Нос длиной	5 м, опущенный конус
Отбор мощности	Три силовых преобразователя Гидравлические цилиндры (2 в вертикальном перемещении, 2 в боковом перемещении)
Скорость плунжера	0–0,2 м/с
Рабочее давление	100–350 бар
Преобразование мощности	Два двигателя с переменным рабочим объемом
Генератор	Два 157 кВА/125 кВт
Скорость	1500 об/мин
Мощность	750 кВт
Энергия	2,7 ГВтч/год
Мощность волны	Номинальная 55 кВт/м

Источник: брошюра Pelamis.



Рис. 14.17 Шарнирные преобразователь энергии волны Pelamis P-750. Источник: Pelamis.

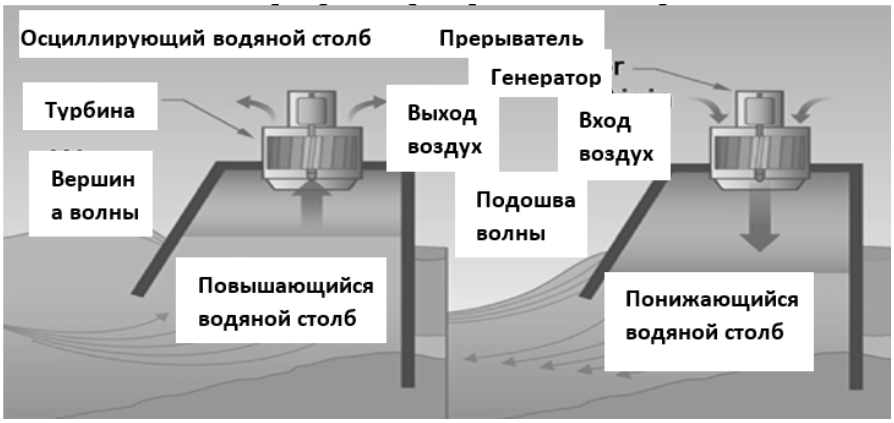


Рис. 14.18. Работа осциллирующего водяного столба. *Источник:* Трешер (2014).

Когда уровень воды поднимается, воздух, задержанный в камере, проталкивается через турбину, которая извлекает энергию для приведения в действие электрического генератора. Когда волна отступает, воздух входит в камеру через турбину, снова извлекая энергию. Процесс повторяется со следующей волной. Чтобы собирать значительную энергию, волновые машины должны быть большими, и их должно быть много. Например, Wavegen ®, компания Voithand Siemens, установила первую промышленную волновую энергетическую установку, подключенную к сети, у побережья западной Шотландии. На установке используется система наклонных колеблющихся водяных столбиков, которая служит испытательным стендом для полномасштабной проверки и разработки компонентов.

4) Переливные устройства. Переливное устройство - это резервуар, который заполняется волнами,

разбивающимися о его стенки. В виду того, что свободная поверхность внутри резервуара над уровнем моря вне резервуара, жидкость внутри резервуара пропускает через турбину в море – производя электричество в процессе. На рис. 14.19 показаны важные особенности устройства для перегрузки.

Другие конфигурации для извлечения энергии из волн также находятся на рассмотрении. Эти четыре наиболее распространенные. Веб-поиск даст несколько «хитов», если будут введены морские и гидрокинетические энергетические устройства. Устройства волновой энергии активно разрабатываются государственными органами и частными компаниями; вероятны значительные технологические достижения.

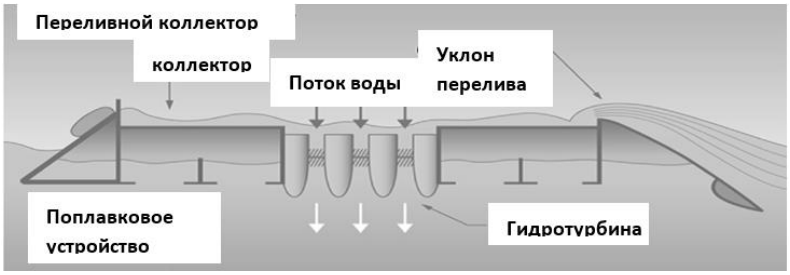


Рис. 14.19 Характеристики переливного устройства.
Источник: Трешер (2014).

14.4.1 Динамические устройства

В разделе 14.3 рассматривается приливная энергия с использованием заграждений. Но приливная энергия также содержится в приливных течениях в системах без заграждения. Турбины, помещенные в приливные течения с заметной плотностью мощности (и кинетической энергией), также могут собирать энергию из приливных течений. В общей морской и гидрокинетической энергетической номенклатуре эти машины называются вращающимися устройствами. Принцип работы такой же, как и для ветряных турбин (см. Главу 4). Однако, поскольку плотность воды почти на два порядка больше плотности воздуха, скорость приливного тока не должна быть почти такой же большой, как скорость ветра для той же плотности мощности, $pV^3/2$.

$$\frac{1}{2}\rho_{\text{вода}} V^3_{\text{вода}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{воз}} V^3_{\text{воз}} \tag{14.18}$$

где ρ water-плотность морской воды. Вода становится для той же плотности мощности

$$V_{\text{вода}} = \sqrt[3]{\frac{\rho_{\text{воздух}}}{\rho_{\text{вода}}}} V_{\text{воздух}} \tag{14.19}$$

Если плотность двух жидкостей взята при разумной температуре со скоростью ветра 10 м/с (эффективной для большинства ветровых турбин), то

$$V_{\text{вода}} = \sqrt[3]{\frac{1.204_{\text{кг}}/\text{м}^3}{1027\,\text{кг}/\text{м}^3}} \times 10\frac{\text{м}}{\text{с}} = 1.05\frac{\text{м}}{\text{с}} \tag{14.20}$$

Таким образом, скорость приливного тока 1,05 м/с содержит ту же плотность мощности, что и скорость ветра 10 м/с.

Широкий диапазон конфигураций турбины был предложен для пользы в приливных течениях. Веб-поиск будет генерировать большое количество просмотров для турбин приливного тока. Вращательные устройства, используемые в приливных течениях, концептуально аналогичны ветровым турбинам, что позволило ускорить разработку и приемку вращающихся устройств для применения на водной основе. Хотя по мере появления новых разработок конфигурация вращающегося устройства может меняться, наиболее распространенной является турбина с вертикальной осью, как показано на

рис. 14.20.

В последние несколько лет устройства и технологии приливного течения вызывают все больший интерес. Приливная электростанция Джиндо Ульдолмок в Южной Корее была введена в эксплуатацию в 2009 году и расширена до 90 МВт в 2013 году. Скорость пролива воды в проливе Ульдолмок превышает 6,5 м/с! В Шотландии приливная ферма, когда она будет завершена, будет иметь 269 турбин по 1,5 МВт каждая. Первый этап, 90 МВт, планируется завершить в 2020 году.

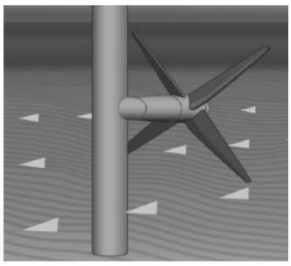


Рис. 14.20. Иллюстрация динамического устройства с вертикальной осью (турбина).
Источник: Трешер (2014).

Таблица 14.6. Оценка теоретических и технических потенциалов морской и гидрокинетической энергии.

Источник	Энергетический потенциал (ТВтч/год	
	Теоретические	Технические
Волны	1594–2640	898–1229
Приливные потоки	445	222–334
Океанские течения	200	45–163
Речные течения	1381	120

База данных по морским и гидрокинетическим технологиям в OpenEI (http://en.openei.org/wiki/Marine_and_Hydrokinetic_Technology_Database) особенно полезна для морской и гидрокинетической энергии, поскольку содержит доступную для поиска, довольно полную базу данных по морской и гидрокинетической энергии. На сайте EERE (http://energy.gov/sites/prod/files/2015/01/f19/MHK_DBsystems1pager.pdf) представлена информация о базах данных и системах морской и гидрокинетической энергии. Трешер (2014) также представляет несколько устройств и установок для волновой энергии и на странице 25 представляет в табличной форме, на уровне страны, статус развития энергии океана. Более ранний Обзор технологий по энергетике океана (EERE, 2009) по-прежнему содержит полезную информацию. Экспертный обзор Водно-энергетической программы 2014 года (EERE, 2014) на 791 странице является, пожалуй, самым исчерпывающим обзором гидроэнергетических технологий, потребностей и оценок, которые когда-либо проводились. Финансирование USDOE для морской и гидрокинетической энергии выросло с нулевого финансирования в 2007 году до 42 миллионов долларов в 2014 году с общим объемом финансирования в 2007–2014 годах около 200 миллионов долларов. Краткое изложение роли Министерства энергетики в морской гидрокинетике из Управления по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии (2014):

Устанавливайте жизнеспособность зарождающейся индустрии морской и гидрокинетической энергетики для привлечения частных инвестиций. Максимизируйте обмен знаниями и поддерживайте технологии устройств, которые могут ускорить и развить отрасль в целом. Выполняйте исследования и изучайте меры по снижению рисков перед внедрением в производство.

Министерство сельского хозяйства США по адресу http://energy.gov/eere/water/marine-and-hydrokinetic-resource-assessment-and-characterization предоставляет сводную информацию о потенциале морской и гидрокинетической энергии для США. В таблице 14.6 приведена теоретическая энергия, доступная в тераватт-часах в год, а также энергия, которая может быть получена с

технической точки зрения. Рассматриваются четыре категории: (1) волны, (2) приливные потоки, (3) океанские течения и (4) речные течения. Поскольку в США используется около 4000 ТВт-ч электроэнергии в год, потенциальные ресурсы, доступные от морских и гидрокинетических энергетических устройств, не являются тривиальными и могут, если они будут разработаны, обеспечить не менее 10% годового потребления электроэнергии. Тем не менее, значительные технические проблемы, а также проблемы развития инфраструктуры присутствуют, чтобы реализовать потенциал морской и гидрокинетической энергии.

14.5 Заключение

В этой главе были рассмотрены вопросы преобразования тепловой энергии океана, приливной, морской и гидрокинетической энергии. В частности, энергетический потенциал огромен для преобразования тепловой энергии в океане, но технические, эксплуатационные и финансовые проблемы устрашают. Устройства, использующие энергию океана, должны справляться с большими размерами, высокими капитальными затратами, агрессивными средами, а также с неопределенными и суровыми погодными условиями. Однако этот потенциал присутствует, и, поскольку проблемы с парниковым газом и изменением климата, а также неопределенность в затратах на энергию продолжают вызывать обеспокоенность, все больше ресурсов направляется на энергию океана, как минимум, в качестве части энергетического решения.

Литература

Ascari, M., Hanson, H.P., Rauchenstein, L., и соавт. (2012) Ocean Thermal Extraction Visualization. http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/1055457.pdf (accessed October 2, 2016). Avery, W.H. and Berl, W.G. (1997) Solar energy from tropical oceans. Issues in Science and Technology, XIV. (2). http://issues.org/14-2/avery-2/ (accessed October 25, 2016).

Avery, W.H. and Wu, C. (1994) Renewable Energy from the Ocean: A Guide to OTEC. Oxford University Press, New York.

Baker, J.B. (2006) Energy from the sea. Technology Review, 109 (3): 96.

Coastal Response Research Center (2010) Technical Readiness of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC) University of New Hampshire, Durham, NH. http://coast.noaa.gov/czm/ media/otec_nov09_tech.pdf (accessed October 25, 2016).

Cruz, J. (ed.) (2008) Ocean Wave Energy. Springer-Verlag, Berlin.

De LaLeu, V. (2009) La Rance Tidal Power Plant 40-year operation feedback – lessons learnt. In BHA Annual Conference, Liverpool, UK, October. http://www.british-hydro.org/downloads/La% 20Rance-BHA-Oct%202009.pdf (accessed October 25, 2016).

EERE (2009) Ocean Energy Technology Overview. DOE/G0-102009-2823, July. http://large.stanford. edu/courses/2013/ph240/lim2/docs/44200.pdf (accessed October 25, 2016).

EERE (2014) 2014 Water Power Program Peer Review. PR-5A00-61854. http://energy.gov/sites/ prod/files/2014/09/f18/00_mhk_peer_review_presentations_2014_0.pdf (accessed October 25, 2016).

El-Wakil, M.M. (1984) Powerplant Technology. McGraw-Hill, New York.

Gorlov, A.M. (2001) Tidal energy. In Encyclopedia of Ocean Sciences, J.H. Steele, K.K. Turekian, and S.A. Thorpe (eds). Elsevier, pp. 2955–2960.

Kayton, M. (1981) Steady-state and dynamic performance of an OTEC plant. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100 (3): 1148–1153.

McCormick, M.E. (2007) Ocean Wave Energy Conversion. Dover Publications, Mineola, NY. Palmer, D.A., Fernandez-Prini, R., and Harvey, A.H. (2004) Aqueous Systems at Elevated

Temperatures and Pressures: Physical Chemistry in Water, Steam and Hydrothermal Solutions. Academic Press, New York.

Perry, R.H. and Chilton, C.H. (1973) Chemical Engineer's Handbook, 5th edn. McGraw-Hill, New York.

Rudiger, C.E. and Smith, L.O. (1977) OTEC – an emerging program of significance to the marine community. In Proceedings of the 3rd Oceans '77 Annual Combined Conference, Los Angeles, October, vol. 2, pp. 41C-1–41C-7.

Schmid, H. (2005) Sihwa in the mix. Power Engineering International, **13**. (9). http://www. powerengineeringint.com/articles/print/volume-13/issue-9/renewable-energy-review/tidal- power/sihwa-in-the-mix.html (accessed October 25, 2016).

Takahashi, M.M. (2000) DOW: Deep Ocean Water as Our Next Natural Resource. Terra Scientific Publishing Co., Tokyo.

Thresher, R. (2014) Ocean wave energy technology. In BOEM Offshore Renewable Energy Workshops, Sacramento, CA, July. http://www.boem.gov/NREL-Ocean-Wave-Energy- Technology/ (accessed October 25, 2016).

Vega, L.A. (2002) Ocean thermal energy conversion primer. Marine Technology Society Journal,

6 (4): 25–35. http://www.uprm.edu/aceer/pdfs/MTSOTECPublished.pdf (accessed October 25, 2016).

15

Ядерная энергия

15.1 Введение

Для США использование ядерной энергии является спорным вопросом более чем для одного поколения и оставался противоречивым до инцидента на острове Три Майл в 1979 году, в тот период юридические барьеры и маневры фактически препятствовали дополнительному проникновению в электроэнергетическую отрасль. После инцидента на острове Три Майлз, строительство новой АЭС в США практически прекратилось. На международном уровне атомная энергетика получила более широкое признание: Западная Европа и Япония производят большую часть своего электричества из ядерной энергии. Ненадлежащим образом выбранный проект и эксплуатационные процедуры явились результатом Чернобыльской катастрофы 1986 года в бывшем СССР, таким образом, вопросы безопасности ядерной энергетики еще больше усугубились. Однако из-за растущей обеспокоенности в отношении изменения климата, вызванного парниковыми газами, а также в связи с обеспечением энергетической независимости, использование ядерной энергии получило активное обсуждение в США, и впервые почти за 30 лет перешло в строительство новых атомных электростанций. Затем, в 2011 году, произошла катастрофа с шестью реакторами после цунами, вызванного землетрясением на японской атомной электростанции Фукусима-дайити. Реакция в мировом масштабе была быстрой и разрушительной, а благоприятные перспективы для ядерной энергетики значительно сократили свой темп реализации. Однако через несколько лет после Фукусимы перспективы расширения использования ядерной энергии становятся более позитивными, поскольку в настоящее время осуществляется строительство или планирование атомных электростанций.

Интересный график производства ядерной энергии предоставлен Всемирной ядерной ассоциацией (WNA) на веб-сайте (www.world-nuclear.org) и воспроизведен в виде рис. 15.1. В 2013 году показатели по генерации атомной энергии составили примерно 2300 ТВтч/год. В 2014 году за счет атомной энергии было получено около 19% (Таблица 1.2) электроэнергии в США. Даже после моратория на строительство атомных электростанций в США, выработка электроэнергии с помощью атомной энергии является значительной. Во всех отношениях, ядерная энергия важна и необходима для производства электроэнергии и вряд ли ее можно назвать альтернативной энергией в общепринятом смысле этого слова. Тем не менее, вопрос использования ядерной энергии был включен в этот учебник с учетом той важной роли, которую играет атомная энергетика в настоящее время, а также растущего интереса к ядерной энергии, даже после Фукусимы, особенно в Китае, Индии и России, что предвещает собой то, что ядерная энергия, по всем предположениям, приобретет большую, нежели чем меньшую значимость. В США реализуется строительство и планирование новых атомных станций, и в действительности многие в электроэнергетике считают, что значимость ядерной энергии для нашего века только возрастет. Как WNA (www.world-nuclear.org), так и Международное агентство по атомной энергии (IAEA, www.iaea.org) являются сторонниками развития ядерной энергии и ими предоставляются списки как действующих и остановленных, так и строящихся ядерных реакторов. В настоящее время в эксплуатации находятся 438 ядерных реактора, а еще 67 находятся на стадии строительства. Комиссия по ядерному регулированию США (NRC, www.nrc.gov) является правительственным агентством США, которому поручено осуществлять надзор за всеми аспектами в сфере ядерной энергетики. В 2015 году NRC заявили, что в США эксплуатируется 99 реакторов. Международный журнал по ядерной технике и технологиям «Nuclear Engineering International» (NEI, www.nrc.gov) – ежемесячное печатное издание, публикует тематические и технические статьи о гражданской атомной энергетике (http://www.neimagazine.com/). NEI также публикует ежегодный «Международный справочник по ядерной технике».

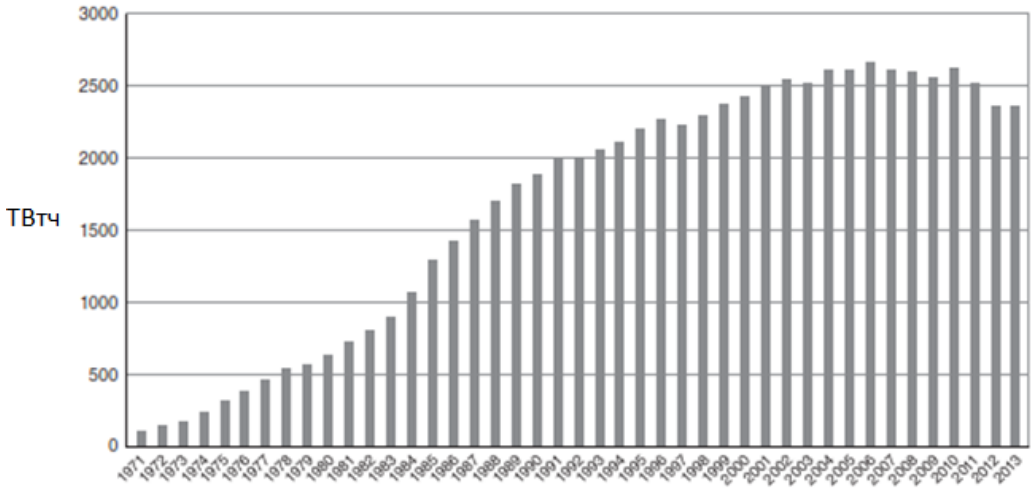


Рис. 15.1. Производство ядерной энергии в мире. Источник: http://www.world-nuclear.org/info/Current-and- Future-Generation/Nuclear-Power-in-the-World-Today/

В этой главе рассматриваются фундаментальные знания и основы атомной энергии, различные конфигурации атомных электростанций, а также возможные и технические проблемы производства термоядерной энергии.

15.2 Основы ядерной энергии

Атом состоит из тяжелого положительно заряженного ядра с гораздо более легкими электронами, вращающихся на орбитах вокруг ядра (см. Главу 9). Ядро состоит из электрически нейтральных нейтронов и положительно заряженных протонов. Заряд на протоне равен, но противоположен заряду на электроне. Поскольку атом электрически нейтрален, число протонов равно числу электронов. Три первичные субатомные частицы – это электрон, нейтрон и протон. Масса этих частиц, выраженная в атомных единицах массы, или а.е.м. (1 а.е.м.=1.660 539 x 10^{-27} кг) равна (Шультис и Фоу, 2008):

• масса нейтрона, m_n=1,008 665 а.е.м.

• масса протона, m_p =1,007 276 а.е.м.

• масса электрона, m_e =0,000 5486 а.е.м.

Протон и нейтрон, частицы, составляющие ядро, называются нуклонами. Условно обозначенное число протонов в ядре определяет атомный номер Z элемента, а сумма нейтронов и протонов в ядре определяет массовое число A. Обычное обозначение атома X элемента выражают в виде ${}^{A}_{Z}\mathrm{X}$, при котором атомный номер и массовое число легко отслеживаются. Большая часть атомной массы заключено в ядре. Изотопы элемента имеют одинаковое количество протонов, но разное количество нейтронов и, следовательно, разные массовые числа. Например, уран имеет три общих изотопа: ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$, ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ и ${}^{234}_{92}\mathrm{U}$. В этом протоколе «обычный» водород встречается как ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$, и так как ядро водорода содержит один протон и не содержит нейтроны, ${}^{1}_{1}\mathrm{H}$ он также является протоном. Ядро дейтерия содержит протон и нейтрон и встречается как ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$ и иногда записывается как ${}^{2}_{1}\mathrm{D}$. Ядро гелия содержит по паре нейтронов и протонов, и выражается как ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Поскольку масса электрона довольно мала по сравнению с массой нейтрона или протона, электрон зачастую представлен как ${}^{0}_{-1}\mathrm{e}$. Нейтрон, который не несет заряда, затем становится ${}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

В химической реакции участвуют целые атомы, как в реакции гидрогенизации

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \qquad (15.1)$$

В этой реакции атомы углерода и водорода объединяются, образуя метан, но атомы сохраняют свою идентичность; и как представляется, количество атомов углерода и водорода с левой (вступающая в

реакцию частица) и с правой (продукт) стороны уравнения должно быть одинаковым. В ядерной реакции ядро вступающей в реакцию частицы не обнаруживается в продукте, но присутствуют другие ядра или другие изотопы реагирующей частицы. Рассмотрим ядерную реакцию с участием элементов A, B, C и D:

$$ {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{A} + {}^{A_2}_{Z_2}\mathrm{B} \rightarrow {}^{A_3}_{Z_3}\mathrm{C} + {}^{A_4}_{Z_4}\mathrm{D} \tag{15.2} $$

Для сохранения массового числа и атомного номера (протонов) необходимо следующее условие:

$$ A_1 + A_2 = A_3 + A_4 \quad \text{и} \quad Z_1 + Z_2 = Z_3 + Z_4 \tag{15.3} $$

Примером может служить обычный алюминий, улавливающий в своем ядре ядро гелия ${}^{4}_{2}\mathrm{He}$. Ядро алюминия при присоединении ядра гелия становится нестабильным и расщепляется.

$$ {}^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} \tag{15.4} $$

Результатом ядерной реакции является кремний и протон (ядро водорода). Суммы массовых чисел (31) и атомных чисел (15) одинаковы с обеих сторон уравнения.

Каждый изотоп каждого элемента имеет удельную массу, которая зависит от массового числа и атомного номера. Атомная единица массы определена как одна двенадцатая масса нейтрального атома в основном состоянии ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$. Все остальные изотопы отнесены к этому стандарту. Атомные единицы массы всех 3200 изотопов приведены в таблицах атомной массы. Таблицы атомной массы доступны в учебниках по ядерной технике или ядерной физике и нескольких веб-сайтах; http://Physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl является особенно полезным сайтом. В этой главе используется таблица атомных масс, представленная у Шультис и Фо (2008). Из этой таблицы использована атомная масса следующих элементов:

- масса ${}^{27}_{13}\mathrm{Al} = 26.981\,538$ а.е.м.
- масса ${}^{4}_{2}\mathrm{He} = 4.002\,603$ а.е.м.
- масса ${}^{30}_{14}\mathrm{Si} = 29.973\,770$ а.е.м.
- масса ${}^{1}_{1}\mathrm{H} = 1.007\,825$ а.е.м.

Для ядерной реакции из уравнения 15.4 следует масса частиц, вступающих в реакцию:
26,981 538 а.е.м. + 4,002 603 а.е.м. =30,984 141 а.е.м.
и масса продукта:
29,973 770 а.е.м. + 1,007 825 а.е.м. = 30,981 595 а.е.м.
Масса не сохранена! Масса продукта меньше массы реагирующих частиц. Разница:Δm =-0,002 546 а.е.м., представляет массу, преобразованную в энергию через знаменитое выражение Эйнштейна

$$ \Delta E = \Delta m c^2 \tag{15.5} $$

где c – скорость света, 3×10^8 м/с. Таким образом, энергия равна:

$$ \begin{aligned} \Delta E = \Delta m c^2 &= -0.002\,546 \text{ а.е.м} \times \left(3\times10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = -2.2914\times10^{14} \text{ а.е.м.} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \\ &= -2.2914\times10^{14} \text{ а.е.м} \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2} \times \frac{1.660\,539\times10^{-27} \text{ кг}}{\text{а.е.м}} \times \frac{\text{N с}^2}{\text{кг м}} \times \frac{\text{J}}{\text{N м}} \\ &= -3.8053\times10^{-13} \text{ J} \times \frac{\text{эВ}}{1.602\,176\times10^{-19} \text{ J}} \times \frac{\text{МэВ}}{10^6 \text{ эВ}} = -2{,}375 \text{ МэВ} \end{aligned} \tag{15.6} $$

Таким образом, в результате ядерной реакции, представленной уравнением 15.4, будет получено 2,375 МэВ энергии путем преобразования массы в энергию. Если бы была исследована энергия, полученная в результате химической реакции, полученная энергия была бы на порядок меньше, отсюда и проявляется интерес к ядерным реакциям в качестве источника энергии.

Когда Z протоны и (A – Z) нейтроны объединяются, чтобы образовать ядро, излучается энергия. Эта энергия, называемая энергией связи, происходит от преобразования некоторой массы нейтронов и протонов. Масса получающегося в результате ядра уменьшается от массы отдельных нейтронов и протонов на массу, эквивалентную (уравнение 15.5) энергии связи.

Три типа ядерных реакций являются значимыми для получения энергии: расщепление, синтез и радиоактивность. Каждый будет рассмотрен по очереди. Во-вторых, «тяжелый» элемент (один с высоким атомным номером) расщепляется на два или более легких ядра; при их слиянии образуется более тяжелое ядро. Радиоактивность возникает, когда изотоп самопроизвольно подвергается распаду или расщеплению с образованием другого ядра, обычно путем испускания одной или нескольких более мелких частиц. В настоящее время все крупные коммерческие ядерные реакторы используют реакцию распада, поэтому в этой главе рассматривается именно этот процесс.

Эль-Вакиль (1984) отмечают, что нейтроны являются единственными частицами, которые могут быть практически использованы в реакторе, использующего реакцию распада, при этом расщеплению нейтронами подвержено лишь несколько изотопов: $^{235}_{92}\mathrm{U}$, $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$, $^{233}_{92}\mathrm{U}$, $^{238}_{92}\mathrm{U}$, $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ и $^{240}_{94}\mathrm{Pu}$. Нуклеиды, которые подвергаются распаду, когда нейтрон поглощается ядром, называются расщепляемым материалом. Рассмотрим две реакции расщепления с участием $^{235}_{92}\mathrm{U}$:

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}\mathrm{n}$$
$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} + {}^{97}_{36}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}\mathrm{n} \qquad (15.7)$$

В результате этих реакций образуются два ядра, отличных от урана, и испускаются два нейтрона. Если реакция устойчива, то нейтронов должно быть испущено больше, чем поглощено. Примером 15.1 рассматривается высвобождение энергии в результате первых ядерных реакций, приведенных в уравнении 15.7.

Пример 15.1Вычислите энергию, полученную в результате ядерной реакциии

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{140}_{54}\mathrm{Xe} + {}^{94}_{38}\mathrm{Sr} + 2{}^{1}_{0}\mathrm{n}.$$

Решение: в таблицах атомной массы (Шультис и Фо, 2008) приведены значения единиц атомной массы для вступающих в реакцию частиц и продуктов:

- масса $^{235}_{92}\mathrm{U} = 235.043\,923$ а.е.м
- масса $^{1}_{0}\mathrm{n} = 1.008\,665$ а.е.м.
- масса $^{140}_{54}\mathrm{Xe} = 139.921\,640$ а.е.м.
- масса $^{94}_{36}\mathrm{Sr} = 93.915\,360$ а.е.м.

Масса вступающих в реакцию частиц и продуктов

Вступающие в реакцию частицы =235,043 923 а.е.м. + 1,008 665 а.е.м. =236,053 а.е.м.

Продукты=39,921 640 а.е.м. + 93,915 360 а.е.м. + 2 x 1,008 665 а.е.м. = 235,854 а.е.м.

Изменение массы

$$\Delta m = 235{,}854 \text{ а.е.м.} - 236{,}053 \text{ а.е.м.} = -0{,}198 \text{ а.е.м.}$$

И высвобождаемая энергия

$$\Delta E = \Delta mc^2 = -0.198 \text{ а.е.м} \times \left(3 \times 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = -2.963 \times 10^{-11} \text{ Дж} = -184.93 \text{ МэВ}$$

Нуклеиды, которые сами по себе не являются расщепляемыми, но могут быть преобразованы в делящиеся нуклеиды путем поглощения нейтрона, называются воспроизводящими. Например, когда $^{238}_{92}\mathrm{U}$ нерасщепляемый изотоп поглощает нейтрон, он становится $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$: воспроизводящим изотопом.

Для синтеза два или более легких ядра объединяются, чтобы сформировать более тяжелое ядро. Такие реакции возможны только в том случае, если ядра обладают достаточной кинетической энергией для преодоления сил отталкивания и способны достигать друг друга. Эта тема будет подробно рассмотрена в разделе 15.4. Получаем характерную реакцию синтеза и высвобождаемую энергию следующим образом:

$$^{2}_{1}\mathrm{H} + ^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow ^{3}_{1}\mathrm{H} + ^{1}_{1}\mathrm{H} + 4.03\ \text{МэВ} \tag{15.8}$$

Как и при реакции распада, высвобождение энергии в реакции синтеза происходит в результате преобразования массы в энергию.

Радиоактивность – это спонтанный распад ядра, происходящий при испускании одной или нескольких мелких частиц; это – третья из рассматриваемых ядерных реакций. Ключевым словом в этом определении является «спонтанный», поскольку, в отличие от реакций распада и синтеза, нестабильность ядра радиоактивного изотопа представляет собой причинно-следственную связь. Изотопы, происходящие естественным образом, стабильны в большинстве элементов, но элементы с атомными номерами более 84 не имеют стабильных изотопов, и несколько изотопов элементов с атомными номерами менее 84 также нестабильны. Изотопы, производимые искусственно в ускорителях частиц и ядерных реакторах, все нестабильны и номера выражаются в тысячах. Время, необходимое для распада одного нестабильного ядра, является неопределенным, но среди большой когорты тех же нестабильных ядер существует статистическая вероятность того, что определенная доля распадется в течение заданного времени. Если N – это количество радиоактивных изотопов, присутствующих на момент времени t, тогда скорость распада пропорциональна N.
Математически это выражается как

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = -\lambda N \tag{15.9}$$

где λ – постоянная распада. Уравнение 15.9 является переменным делимым; если N_0 изотопов, присутствуют в момент времени $t = 0$, то

$$\int_{N_o}^{N} \frac{\mathrm{d}N}{N} = -\int_{0}^{t} \lambda\, \mathrm{d}t \quad \text{или} \quad \ln\frac{N}{N_o} = -\lambda t \quad \text{или} \quad \frac{N}{N_o} = \text{эксп}(-\lambda t) \tag{15.10}$$

Распад, таким образом, экспоненциальный во времени. Важным показателем радиоактивного распада является период полураспада. По определению, период полураспада – это время, необходимое для распада половины радиоактивных ядер. Используя уравнение 15.10, период полураспада может быть выражен как

$$\frac{N_o/2}{N} = \text{эксп}\,(-\lambda t_{1/2}) \quad \text{или} \quad t_{1/2} = \frac{\ln(1/2)}{-\lambda} = \frac{0.693\,15}{\lambda} \quad \text{или } \lambda = \frac{0.693\,15}{t_{1/2}} \tag{15.11}$$

Уравнение 15.10 может быть приведено как

$$\frac{N}{N_o} = \text{эксп}\left(-0.693\,15\,\frac{t}{t_{1/2}}\right) \tag{15.12}$$

Уравнение 15.12 представлено на рис. 15.2; абсцисса – это $t/t_{1/2}$ (полураспад), количество периодов полураспада. Экспоненциальный распад происходит быстро, так, что в чуть более трех периодах полураспада число ядер сокращается до 10%; в 10 периодах полураспада число ядер сокращается менее чем до 0,1%.

Периоды полураспада разных изотопов отличаются множественными порядками величин. Например, период полураспада $^{212}_{84}Po$ составляет всего 0.298×10^{-6} s, тогда как период полураспада $^{238}_{92}U$ составляет $4{,}51 \times 10^{9}$ лет. Большинство учебников по ядерной технике содержат сокращенные таблицы радионуклидов, которые включают период полураспада и другие полезные данные. Тем не менее, ряд веб-сайтов предоставляют обширные списки; http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nucSearch.asp особенно удобен для пользователей и является частичной реализацией содержания восьмого издания *Таблицы изотопов* (Файерстоун и Ширли, 1999).

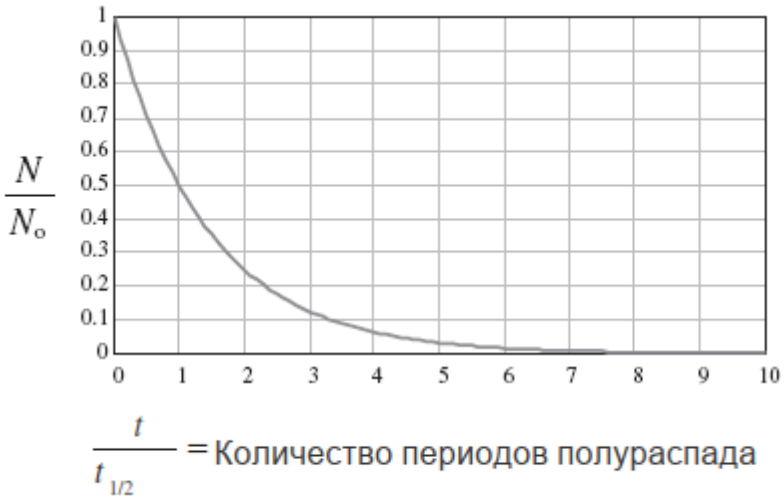


Рис. 15.2 Экспоненциальный распад как функция периодов полураспада.

Шультис и Фо (2008) определяют четыре механизма, которые приводят к распаду естественного (не искусственного) изотопа: альфа-распад, бета-распад, позитронный распад и гамма-распад. Рассмотрим каждый из четырех.

1) *Альфа-распад*. Альфа (α) частица является ядром атома гелия и записывается как $^{4}_{2}He$. Альфа-распад происходит при выбросе альфа-частицы. Пример

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He \tag{15.13}$$

При альфа-распаде Z уменьшается на 2 и A на 4; в реакции уравнения 15.13 Ra является исходным элементом, а Rn – дочерним. Альфа-частицы теряют свою кинетическую энергию на ионизацию вещества, через которое они проходят. Большая часть энергии рассеивается вблизи излучающего ядра. Альфа-частицы обладают ограниченной проникающей способностью: несколько сантиметров в воздухе и проходят более короткое расстояние (около толщины листа бумаги) в твердых телах. Если не попадают альфа-излучатели, они представляют небольшой риск для здоровья.

2) *Бета-распад*. Бета (β) распад — это превращение нейтрона в ядре в протон и электрон, что приводит к эмиссии электрона для поддержания баланс заряда ядра. Таким образом, бета-частицы являются электронами, $^{0}_{-1}e^{-1}$. Пример бета-распада приведен ниже:

$$^{214}_{82}Pb \rightarrow {}^{214}_{83}Bi + {}^{0}_{-1}e^{-1} + \nu \tag{15.14}$$

где ν представляет нейтрино, небольшую нейтрально заряженную частицу, которая несет около 5% энергии реакции. Во многих случаях нейтрино в уравнении 15.14 игнорируется. Бета-частица обладает большей проникающей способностью, чем альфа-частица. При бета-распаде атомное число увеличивается однократно, а массовое число остается неизменным.

3) *Распад позитрона*. При распаде позитрона ядро нестабильно из-за избытка протонов, и протон превращается в нейтрон за счет испускания позитрона, субатомной частицы с массой электрона, но с положительным зарядом; символ ${}^{0}_{+1}e^{+1}$. Примером приведен ниже:

$$ {}^{22}_{11}\mathrm{Na} \rightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + {}^{0}_{+1}e^{+1} + \nu \qquad (15.15) $$

Как и в случае бета-распада, испускается также нейтрино. Вскоре после испускания позитрон захватит электрон, и масса пары позитрон-электрон будет полностью преобразована в энергию, в результате чего два фотона продвигаются в противоположных направлениях и каждый несет энергию 0,511 МэВ.

4) *Гамма-распад*. Гамма-излучение – это электромагнитное излучение с очень короткими длинами волн и очень высокими частотами, что подразумевает значительное содержание энергии. Как показано в таблице 6.1, гамма-лучи имеют длину волны λ менее 10^{-4} мкм. Гамма-распад не меняет ни массового числа, ни атомного номера, но представляет собой снижение уровня энергии ядра. При гамма-распаде из ядра испускается высокоэнергетический фотон. Гамма-лучи обладают гораздо большей проникающей способностью, чем альфа- или бета-частицы, и внешнее воздействие γ-лучей крайне опасно.

Пример 15.2

Радиоактивный изотоп ${}^{135}_{53}\mathrm{I}$ распадается под влиянием бета-излучения в ${}^{135}_{54}\mathrm{Xe}$. Определите необходимое время для уменьшения количества атомов ${}^{135}_{53}\mathrm{I}$ на 90%.

Решение: из таблицы изотопов (Файерстоун и Ширли, 1999) период полураспада ^{135}I равен 6,57 ч. Если количество нуклидов должно быть уменьшено на 90%, то останется только 10% от исходного количества, или

$$ \frac{N}{N_o} = 0.10 $$

Из чего следует, что

$$ \frac{N}{N_o} = 0.1 = \text{эксп}\left(-0.693\,15\frac{t}{t_{1/2}}\right) = \text{эксп}\left(-0.693\,15\frac{t}{6.57\ \text{ч}}\right) $$

Находя решение для *t*, получаем

$$ t = -\frac{t_{1/2}}{0.693\,15}\ln\left(\frac{N}{N_o}\right) = -\frac{6.57\ \text{ч}}{0.693\,15}\ln(0.1) = 21.82\ \text{ч} $$

15.3 Атомная энергетика

В контексте этого учебника обсуждение вопроса атомной энергетики ограничивается выработкой электроэнергии. Тем не менее, США имеют долгую и богатую историю использования атомной энергии для судовых операций, включая двигательные установки и распределение электроэнергии на борту. Военно-морской флот проектирует, строит, эксплуатирует и выводит из эксплуатации ядерные реакторы, поддерживая удивительные показатели безопасности и эксплуатационные характеристики, таким образом, являясь значительным хранилищем опыта ядерной энергетики США. В этом разделе будут рассмотрены ядерные реакторы, используемые для выработки электроэнергии.

Во всем мире по состоянию на 2015 год 438 атомных электростанций с генерирующей мощностью 376 000 МВт (376 ГВт) находились в промышленной эксплуатации (IAEA, 2015). ВМС США приводит список действующих внутри страны ядерных энергоблоков по ссылке: http://www.nrc.gov/reactors/operating/list-power-reactor-units.html. Кроме того, несколько сотен ядерных реакторов используются на военных кораблях разных стран. Общее эмпирическое правило

заключается в том, что выделение 1 г урана дает энергетический эквивалент 10 тонн нефти. Обзор ядерных реакторов, таким образом, уместен.

В любом обсуждении ядерных реакторов концепция нейтронной экономики является центральной. В разделе 15.2 рассмотрено несколько аспектов реакций деления, включая энергию, выделяемую такими реакциями. Фундаментальная идея ядерного реактора заключается в обеспечении радиоактивного топлива в окружающей среде таким образом, чтобы ядерные реакции могли протекать безопасным и надежным образом для выработки электроэнергии. Чтобы это произошло, должно быть произведено достаточно нейтронов, чтобы выдержать контролируемые ядерные реакции, достаточные для обеспечения требуемой мощности. Уран, например, является общим топливом для многих реакторов и будет делиться различными способами, что приводит к вариации продуктов деления. Общая ядерная реакция для большой когорты из $^{235}_{92}$U атомов приведет к «средней» реакции (Мюррей, 1961)

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{236}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}\mathrm{FF} + {}^{A2}_{Z_2}\mathrm{FF} + 2.43\,{}^{1}_{0}\mathrm{n} \tag{15.16}$$

Пример 15.3

Сколько потребуется $^{235}_{92}$U для производства 1 МВт в день, если средний выход энергии составляет 200 МэВ на деление и эффективность преобразования электроэнергии составляет 35%?

Решение: поскольку выход энергии за деление составляет 200 МэВ, число делений (процесс распада) в секунду для получения 1 МВт можно рассчитать, как

$$1\ \text{МВ} = 1\,000\,000\ \text{В} = 1\,000\,000\ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \times \frac{\text{МэВ}}{1.602 \times 10^{-13}\ \text{Дж}} \times \frac{\text{деления}}{200\ \text{МэВ}} = 3.121 \times 10^{16}\ \frac{\text{деления}}{\text{с}}$$

Масса одного атома $^{235}_{92}$U может быть рассчитана, поскольку 235 г $^{235}_{92}$U содержит $6{,}023\times10^{23}$ атомов/г-моль; так:

$$m_{\text{atom}} = \frac{235\ \text{г-моль}}{6.023 \times 10^{23}\ \text{атом-моль}} = 3.902 \times 10^{-22}\ \frac{\text{г}}{\text{атом}}$$

Количество урана, необходимое для производства 1 МВт энергии в день, затем становится

$$1\ \text{МВ день} = 3.212 \times 10^{16}\ \frac{\text{деления}}{\text{с}} \times \frac{86\,400\ \text{с}}{\text{день}} \times \frac{3.902 \times 10^{-22}\ \text{г}}{\text{атом}} \times \frac{1\ \text{атом}}{\text{деление}} = 1.083\ \frac{\text{г}}{\text{день}}$$

Шультис и Фо (2008) отмечают, что около 15% нейтронов, поглощаемых $^{235}_{92}$U, приводят к чему-то другому нежели, чем к распаду. Таким образом, масса в день для производства 1 МВт в день при эффективности преобразования электроэнергии 35% составит:

$$m_{\text{U}} = 1.083\ \frac{\text{г}}{\text{день}} \times \frac{1}{0.85 \times 0.35} = 3.640\ \frac{\text{г}}{\text{день}}$$

Следовательно, в день потребляется 3,64 г $^{235}_{92}$U для производства 1 МВт в день (24 000 кВт ч). Большинство нейтронов, возникающих в результате реакций, указанных в уравнении 15.16, являются быстрыми нейтронами, что указывает на большие кинетические энергии (~ 2 МэВ) и, следовательно, на высокие скорости. Быстрому нейтрону трудно поглощать ядро $^{235}_{92}$U, и без поглощения не будет инициирована другая ядерная реакция. Медленный (или тепловой) нейтрон имеет большую вероятность поглощения, чем быстрый нейтрон. Тепловой нейтрон — это тот, который находится в тепловом равновесии с окружающей средой. Таким образом, быстрые нейтроны необходимо замедлить, чтобы они превратились в тепловые нейтроны, чтобы увеличить свои возможности захвата, чтобы можно было поддерживать ядерные реакции. Говорят, что быстрые нейтроны, которые замедляются, рассеиваются. Материал в ядерном реакторе, который используется для замедления или термизации быстрых нейтронов, называется замедлителем. Замедлитель должен иметь маленькие ядра

с высоким рассеянием нейтронов и низкий потенциал поглощения (или захвата) нейтронов. Материалы, которые соответствуют этим спецификациям, включают легкую воду (содержащую ^{1}H), тяжелую воду (содержащую дейтерий, ^{2}H), графит (C) и бериллий (Be или BeO). Материал замедлителя также играет роль в топливной потребности ядерного реактора.

При добыче и переработке природный уран состоит из 99,2% $^{235}_{92}U$ и 0,7% $^{235}_{92}U$. Если замедлителем будут графит или тяжелая вода, тогда в качестве топлива можно использовать природный уран. Однако если легкая вода является замедлителем, тогда количество 235U в топливе должно быть увеличено с 0,7% до 3,5–5%. Обогащение урана является дорогостоящим и энергоемким процессом; Шультис и Фо (2008) обсуждают процедуры обогащения.

Экономия нейтронов также является фактором управления реактором. Для стационарного режима работы реактора увеличение производства нейтронов приводит к увеличению скорости деления и выхода мощности. Если производство нейтронов будет продолжать расти, ядро реактора в конечном итоге расплавится. Чтобы изменить уровень мощности реактора, производство нейтронов должно изменяться (увеличиваться или уменьшаться) до тех пор, пока не будет достигнут необходимый новый уровень мощности. Производство нейтронов в реакторе может быть изменено с помощью регулирующих стержней или химических компенсаторов. Регулирующие стержни изготовлены из материалов, которые поглощают нейтроны и таким образом уменьшают количество нейтронов, которые могут поглощаться делящимися ядрами. Регулирующие стержни могут быть перемещены внутрь или наружу, чтобы повлиять на экономию нейтронов. Материалы, которые поглощают нейтроны, включают бор, кадмий и индий. Химический компенсатор включает использование растворимого поглотителя нейтронов, обычно бора, в теплоносителе реактора. Химические компенасторы обеспечивают промежуточный контроль времени и помогают уменьшить движение регулирующих стержней.

Регулирующие стержни или химические компенсаторы изменяют производство нейтронов от одного поколения к другому. Эффективный коэффициент размножения нейтронов k_{eff} определяется как отношение нейтронов, произведенных в одном поколении распада к следующему поколению распада:

$$k\ \text{эфф} = \frac{\text{нейтроны,произведенные в поколении } n+1}{\text{нейтроны,произведенные в поколении } n} = \frac{n\ n+1}{n\ n} \qquad (15.17)$$

где n – количество нейтронов. Поскольку $k_{эфф} = 1$ представляет собой установившейся режим работы, избыток $k_{эфф}$ используется для определения реакционной способности ρ:

$$\rho = \frac{k\ \text{эфф}-1}{k\ \text{эфф}} \qquad (15.17)$$

Если n_n – это нейтроны, произведенные в поколении n, а n_{n+1} - нейтроны, рожденные в поколении n+1, то $n_{n+1} = k_{эфф} * n_n$ и $\Delta n = n_{n+1} - n_n = n_n(k_{эфф} - 1)$. Если время между последовательными поколениями составляет $t_{средн}$, то (Мюррей, 1961; Соренсен, 1983)

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{n(k_{эфф} - 1)}{t_{средн}} = \frac{n\rho k_{эфф}}{t_{средн}} \qquad (15.19)$$

Интегрирование уравнения 15.19 с n при t 0.

$$\ln \frac{n}{n_o} = \frac{\rho k_{эфф}}{t_{средн}} t \quad \text{или} \quad n = n_o \text{эксп}\left(\frac{\rho k_{эфф}}{t_{средн}} t\right) \qquad (15.20)$$

Следовательно, число нейтронов испытывает экспоненциальный рост со временем. Пример 15.4 показывает, как может увеличиться быстрая мощность в ядерном реакторе с $k_{eff} > 1$

Пример 15.4

При t=0 в реакторе, $k_{эфф}$ =1,001 с $t_{средн}$ 0,0001 с. Насколько увеличится мощность при t=1с?

Решение: при $k_{эфф}$ =1,001 реакционность равна

$$\rho = \frac{k_{эфф} - 1}{k_{эфф}} = \frac{1.001 - 1}{1.001} = 0.000\,999$$

Соотношение произведенных нейтронов равна n/n_0:

$$\frac{n}{n_o} = \text{эксп}\left(\frac{\rho k_{эфф}}{t_{средн}}\, t\right) = \text{эксп}\left(\frac{0.000\,999 \times 1.001}{0.0001\ \text{s}} \times 1\ \text{с}\right) = 22\,024$$

За 1 секунду число нейтронов увеличивается на показатель, равный 22 024, и поскольку мощность пропорциональна числу нейтронов, мощность увеличивается на тот же показатель. При таком небольшом коэффициенте увеличения нейтронов увеличение мощности за одну секунду удивительно велико, и подразумевается, что в этих условиях управление практически невозможно. Однако управление возможно при запаздывающих нейтронах. Запаздывающие нейтроны образуются в результате радиоактивного распада некоторых продуктов при делении $^{235}_{92}$U. Из ≈2,43 нейтронов, образующихся в реакции деления в уравнении 15.16, около 0,65% происходит от распада продуктов деления, таких как Br и I. Время испускания запаздывающих нейтронов продолжительное по сравнению с обычным временем цикла деления. Конечным результатом является то, что $t_{средн}$ намного продолжительней, чем для 99,35% нейтронов, выпущенных во время реакции, быстрых нейтронов. Мюррей (1961) утверждает, что средняя продолжительность жизни запаздывающего нейтрона составляет 12,7 с. Вместо $t_{средн}$=0,0001 сек. для быстрых нейтронов, когда запаздывающие нейтроны рассматриваются совместно с быстрыми нейтронами $t_{средн}$ ≈0,1 с. Для примера 15.4, если $t_{средн}$=0,1 с, через 1 с отношение произведенных нейтронов составит 1,01, что довольно сильно отличается от 22024 для $t_{средн}$ =0,0001 с, и получаем более рациональное число для управления ядерным реактором.

Как и во многих энергетических системах, разные конфигурации ядерных реакторов имеют разные преимущества и недостатки, и по разным причинам одна конфигурация предпочтительнее другой. Конфигурации ядерного реактора основаны на следующем: (1) топливо, (2) замедлитель, (3) охлаждающая жидкость, (4) регулирующие стержни, (5) стоимость и (6) защитная оболочка. В таблице 15.1 представлена сводная информация о наиболее распространенных конфигурациях реактора. Существенные особенности каждого типа будут рассмотрены далее. Веб-сайт NRC (http://www.nrc.gov/reactors/power.html), Гепо (1979), Вестон (1992) и Фэй и Голомб (2002) содержат различные схемы и пояснения для различных реакторов. Типы и являются хорошими источниками для качественной информации о ядерных реакторах и подсистемах.

Таблица 15.1 Типы и характеристики ядерных реакторов.

Типы	**Номер**	**Мощность (ГВт)**	**Топливо**	**Охлаждающий агент**	**Замедлитель**
Вода под давлением (ВПД)	277	257	Обогащенный UO_2	Вода	Вода
Кипящая вода (КВ))	80	75	Обогащенный UO_2	Вода	Вода
Тяжелая вода под давлением (ТВПД) «CANDU»	40	25	Природный UO_2	Тяжелая вода	Тяжелая вода
Газоохлаждаемый	15	8	Природный U, обогащенный UO_2	CO_2	Графит
Легкий водный графит	15	10	Обогащенный UO_2	Вода	Графит
Быстрые нейтроны (БН)	1	1	PuO_2, UO_2	Жидкий натрий	Не используется

Источник: IAEA (2015 г.) и WNA (2015 г.).

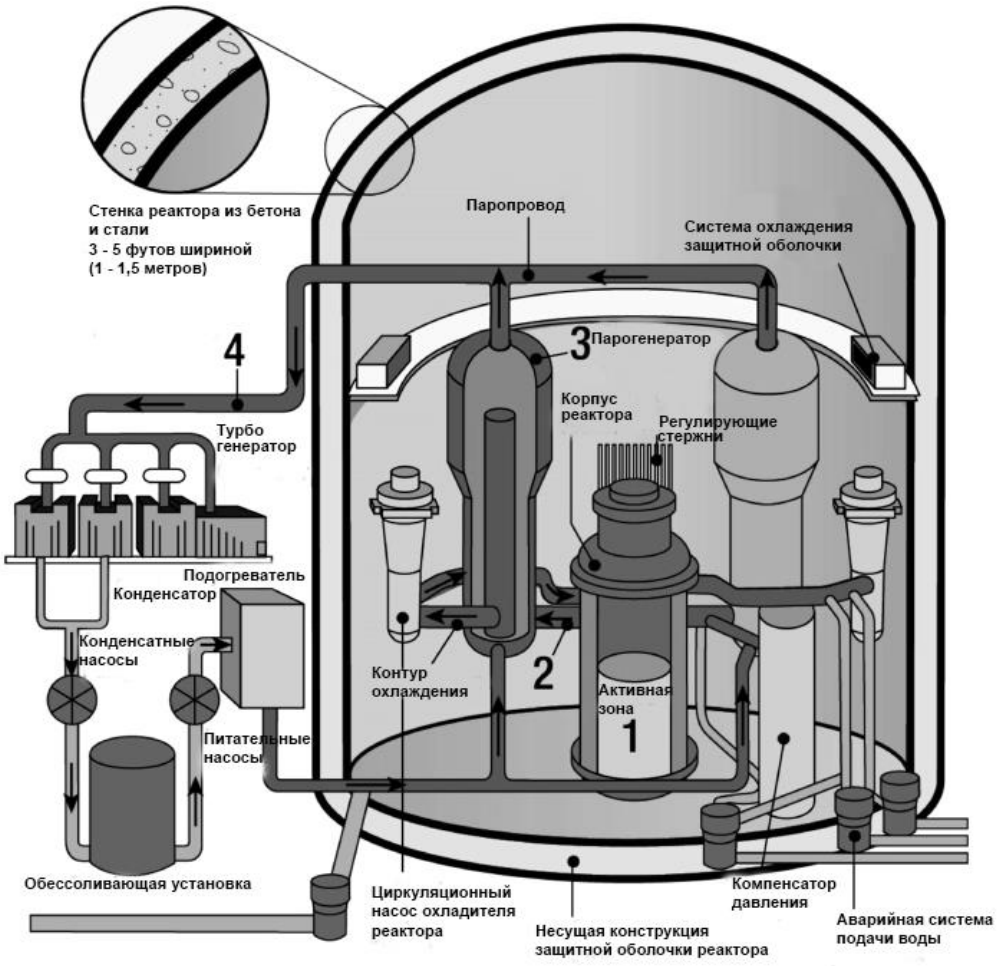


Рис. 15.3. Схема PWR, где 1 – активная зона, 2 – контур водяного охлаждения под давлением, 3 – парогенератор, 4 – тубогенератор. *Источник:* Комиссия по ядерному регулированию США (http://www.nrc.gov/ реакторы/pwrs.html).

1) *Реактор, охлаждаемый водой под давлением* (PWR). Такие типы реакторов составляют наибольшее количество, по расчетам их 278 (www.euronuclear.org) для коммерческой мощности и около 200 находится в эксплуатации в качестве морских силовых установок. Упрощенная схема PWR приведена на рис. 15.3, где показаны защитная оболочка и реакторная емкость. Концепция PWR заключается в том, что в корпусе реактора повышается давление до достаточно высокого давления, так что охлаждающая жидкость (и замедлитель) поддерживается в жидком состоянии. Как правило, PWR работают при температуре около 300–325°C и находятся под давлением до 15 или 16 МПа. Активная зона реактора расположена в нижней части корпуса реактора. В дополнение к высокому рабочему давлению корпуса реактора, основной особенностью PWR является пара петель жидкости. Контур охлаждающей жидкости высокого давления циркулирует в активной зоне реактора и в парогенераторе. В парогенераторе горячая жидкость высокого давления используется для приготовления пара под давлением намного ниже (6 МПа) по сравнению с контуром теплоносителя реактора, который циркулирует за пределами защитной оболочки к турбине и генератору. Пар, выходящий из турбины, конденсируется в градирне и возвращается в парогенератор. Поскольку пар, подводимый к турбине, не подвергается воздействию активной зоны реактора, турбина не нуждается в экранировании.

Westinghouse, Babcock и Wilcox, а также Combustion Engineering являются разработчиками многих существующих систем PWR. После того, как эти реакторы были построены, Westinghouse и Combustion Engineering объединили свои ядерные активы с активами British Nuclear Fuels Limited, чтобы создать Westinghouse BNFL. Французско-немецкая фирма Framatome ANP приобрела большую часть ядерной технологии Babcock и Wilcox.

2) *Реактор с кипящей водой* (BWR). Это второй по популярности тип реактора. Упрощенная схема BWR представлена на рис. 15.4. На схеме показаны защитная оболочка и реакторная емкость. BWR отличается от PWR несколькими важными особенностями: (1) давление в корпусе реактора намного ниже (7 МПа), поскольку пар является желаемой жидкостью; (2) BWR по существу содержит только одну жидкостную петлю; и (3) пар генерируется в корпусе реактора и направляется к турбине, проходя через внешнюю поверхность защитной конструкции. BWR работают при температуре около 285°C. Детали корпуса реактора General Electric BRW/6 представлены на рис. 15.5. Пароводяная смесь покидает верхнюю часть активной зоны и поступает в сепаратор, где капли воды удаляются, а пар направляется в турбину. Узел пароотделителя находится в верхней части сосуда. Любой пар, остающийся после выхода из турбины, конденсируется, и жидкость возвращается в корпус реактора. Рециркуляционные насосы позволяют изменять скорость потока охлаждающей жидкости в активной зоне, чтобы изменять выходную мощность реактора.

Сравнение рисунков 15.3 и 15.5 иллюстрирует значительные различия между PWR и сосудом BWR. Пар (испаренный теплоноситель) в BWR радиоактивен, так как он находится в прямом контакте с активной зоной реактора; таким образом, турбина и трубопровод должны быть экранированы. 3) *Тяжеловодный ядерный реактор* (PHWR). Ряд (15 в 2015 году) PHWR в настоящее время используются. Как следует из названия, в качестве замедлителя используется тяжелая вода. Температура реактора PHWR составляет около 290 ° C. Наиболее распространенный тип называется CANDU по названию страны происхождения: Канада. PHWR предлагает следующие преимущества по сравнению с PWR и BWR: (1) поскольку тяжелая вода используется в качестве замедлителя, урановое топливо не нужно обогащать; (2) они могут быть заправлены без отключения; и (3) они не так дороги в строительстве и эксплуатации, как некоторые типы реакторов. Схема PHWR представлена на рис. 15.6. Корпус реактора часто называют «каландр». Тип PHWR имеет много общих характеристик с PWR. Однако требуется большое количество тяжелой воды, а тяжелая вода – это дорогостоящий носитель. Но поскольку урановое топливо не нужно обогащать, стоимость топлива ниже. Вопросом, вызывающим обеспокоенность, является тот факт, что отработанное топливо содержит $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$, изотоп, который может быть использован в ядерном оружии.

4) *Газоохлаждаемый реактор* (GCR). Для этого типа реакторов используется диоксид углерода в качестве охлаждающего агента и графит в качестве замедлителя. GCR позволяет использовать природный уран в качестве топлива. Схема GCR представлена на рис. 15.7. Углекислый газ является эффективным охлаждающим агентом и не поглощает нейтроны. CO_2 достигает температуры 650°C в активной зоне реактора. Газ не является хорошим замедлителем, поэтому используется графит. Графит не требует больших затрат, относительно широко доступен и обладает хорошими высокотемпературными свойствами.

К вопросам, вызывающим обеспокоенность в сфере использования ядерной энергии, традиционно относят безопасность, распространение ядерного оружия и удаление ядерных отходов. Дорф (2001) рассматривает вопросы, связанные с ядерной энергетикой. Возможно, к доминирующим вопросам, касающимся ядерной энергетики, можно отнести радиоактивные отходы и безопасность.

Обработка/хранение/утилизация радиоактивных отходов ядерных энергетических реакторов (и военных программ) являются вопросом, вызывающим серьезную обеспокоенность в США на протяжении многих десятилетий. Ядерное топливо, извлеченное из энергетического реактора, показывает высокие уровни радиационной активности, так как отработанное топливо содержит продукты радиоактивного распада и другие нейтрон-активированные изотопы. Извлеченное топливо, как правило, в виде стрежней, хранят на участке установки реактора в защищенных бассейнах или в осушенных цилиндрах. Постоянное хранение в хранилище ядерных отходов является долгосрочной целью, но в США назначение и лицензирование долгосрочного ядерного хранилища является политически «эмоциональным» вопросом.

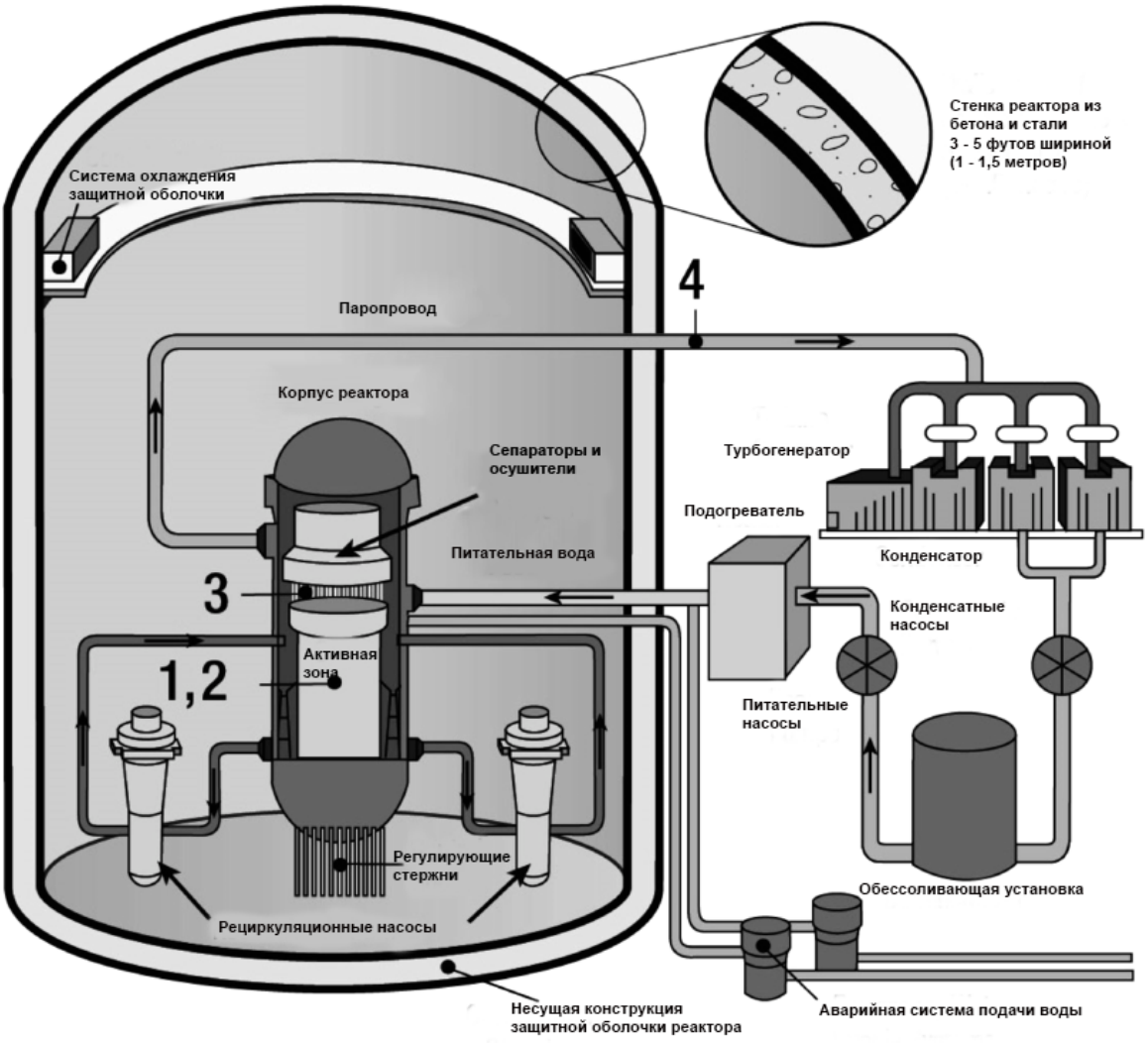
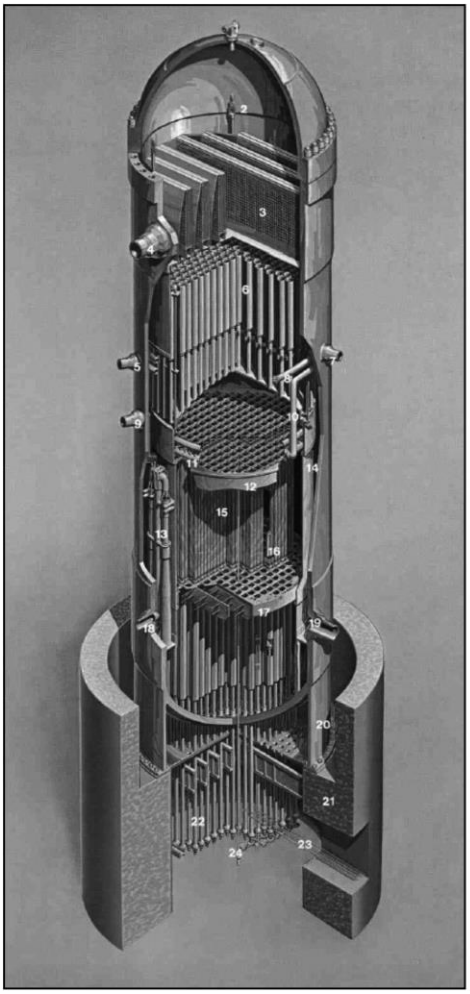


Рис. 15.4 Схема BWR, где 1 – активная зона, 2 – пароводяная смесь из активной зоны, 3 – влагоотделитель, 4 – турбогенератор. *Источник*: Комиссия по ядерному регулированию США (http://www.nrc.gov/reactors/bwrs.html).



BWR/6

СБОРКА РЕАКТОРА

1. Вентилятор и верхний распылитель
2. Паросушитель проушины
3. Сборка паросушителя
4. Паровыпускное отверстие
5. Входная часть вспрыска в активную зону
6. Узел сепаратора пара
7. Входная часть питательной воды
8. Распылитель питательной воды
9. Насос системы впрыска теплоносителя низкого давления
10. Линия спрыска в активную зону
11. Распылитель спрыска в активную зону
12. Верхняя проводка
13. Конструкция струйного насоса
14. Кожух активной зоны
15. Топливные узлы сборки
16. Управляющая пластина
17. Пластина с сердечником
18. Входная часть струйного насоса/циркулирующей воды
19. Выходная часть циркулирующей воды
20. Цилиндр опорной конструкции
21. Защитная стена
22. Приводы регулирующих стержней
23. Гидравлические трубопроводы
24. Монитор внутризонного потока нейтронов

GENERAL ELECTRIC

Рис. 15.5 Компоненты реактора BWR. *Источник*: Дженерал Электрик.

В 1985 году Конгресс санкционировал использование могильника радиоактивных отходов «Юкка-Маунтин» в качестве участка для долгосрочного хранения, который находится в 130 км к северу от штата Лос Вега, Невада, и повторно подтвердил использование в 2002 году. Тем не менее, с 2008 года произошла серия невероятных событий вокруг этого участка. В 2011 года, было прекращено федеральное финансирование по согласованию Министра энергетики. Счетная палата США констатировала, что прекращение произошло по политическим, не техническим причинам, либо причинам, связанных с небезопасностью. После этого Министерство энергетики созвали комиссию по выдаче рекомендаций о хранилище. Заключительный отчет комиссии вышел в свет в январе 2012 года; в отчете была выражена срочность в отношении финансирования участка хранилища. Более того, комиссией рекомендовано, чтобы будущие планы по сооружениям хранилищ составляла независимая организация (с прямым доступом к фонду ядерных отходов), которая не является предметом политического и финансового контроля, подобно контролю, осуществляемому со стороны Министерства энергетики США! Одним из вопросов, связанным с отработанным топливом является то, что в США запрещена повторная переработка; в других странах отработанное топливо подлежит повторной переработке и восстановленный уран отправляется обратно на обогащение и повторное применение, что существенно снижает объем и период полураспада ядерных отходов отработанного топлива. Одним из методов долгосрочного хранения радиоактивных отходов является смешение отходов с размельченным стеклом, и стеклянную смесь отверждают. Скорость выщелачивания сформированных таких методом канистр составляет лишь около 0,1% (в пересчете на объем) за 10 000 лет, что считается экологически безопасным.

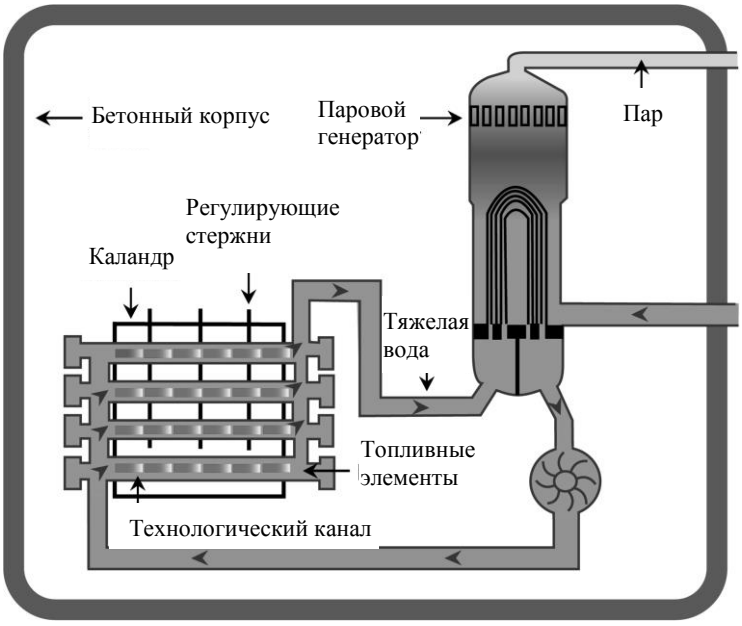


Рис. 15.6. Схема PHWR. *Источник*: Всемирная ядерная ассоциация (http://world-nuclear.org/Gallery/?GalleryId=4455%20&ImageId=36525).

Несмотря на то, что Three Mile Island (Три Майл Айленд) получили большую негативную огласку и привели к невероятно дорогостоящим методам очистки, в атмосферу было выпущено очень мало радиации, и какие-либо вопросы в отношении общественного здравоохранения никогда не поднимались. Катастрофы в Чернобыле и Фукусиме, между тем, привели к значительным выбросам в атмосферу и заслуживают изучения.

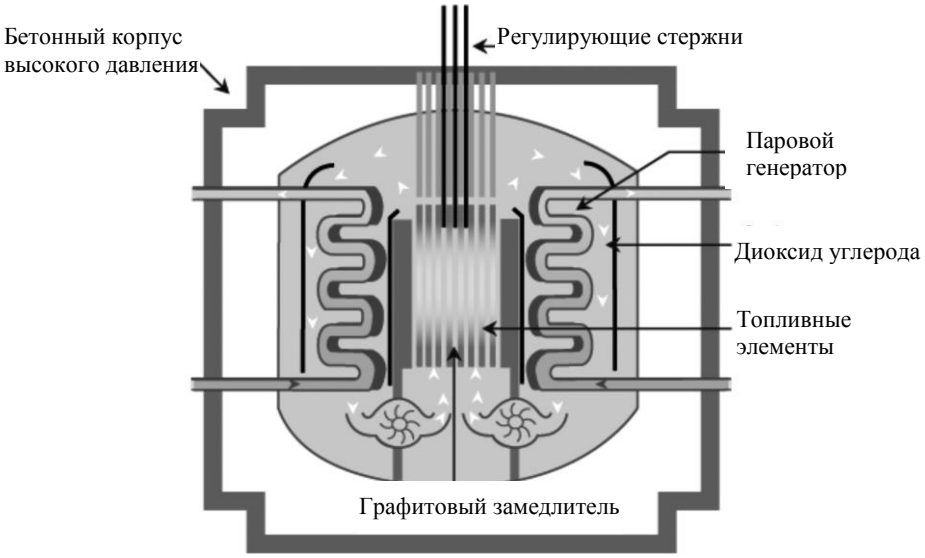


Рис. 15.7 Схема GCR. *Источник*: Всемирная ядерная ассоциация

15.3.1 Чернобыль

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 году печально известна как катастрофа для людей, так и окружающей среды. Причины Чернобыля служат напоминанием о том, как *нельзя* делать. Подробности предоставлены в Дойч и Лестер (2004) и на веб-сайтах www.world-nuclear.org/info/chernobyl/inf07.html и https://www.iaea.org/newscenter/focus/chernobyl. Местоположение Чернобыля указано на рис. 15.8.

Реактор представлял собой легководно-графитовый реактор, тип которого широко использовался в странах бывшего СССР. Общее мнение заключается в том, что авария стала результатом некорректной

конструкции реактора в сочетании с серьезными ошибками оператора в работе системы, характеризующейся минимальной подготовкой, отсутствием культуры безопасности и изоляцией времен холодной войны. Чернобыльский реактор представлял собой реактор мощностью 1000 МВт типа РБМК (реактор большой мощности канальный), с системой «кипение-вода-охлаждение», в качестве замедлителя использовался графит, а сам реактор интенсивно использовался как «рабочая лошадка» в рамках ядерной программы СССР. Схема ядерного реактора РБМК показана на рис. 15.9. РБМК 1000 использует уран, обогащенный до 2% $^{235}_{92}$U. Обогащенный уран помещают в 1700 отдельных напорных цилиндров, каждый длиной примерно 7 м, через которые проходит поток охлаждающей воды и генерируется пар.

Поскольку графит является замедлителем, чрезмерное кипение уменьшает охлаждение (и поглощение нейтронов охлаждающим агентом), не препятствуя поглощению нейтронов, поскольку замедлитель остается неизменным при чрезмерном кипении. Такое поведение с положительной обратной связью, называют «положительным коэффициентом пустотности», что представляет собой одну из проблем для ядерных реакторов типа РБМК; происходит следующий эффект: при низких уровнях мощности увеличение пара приводит к увеличению реактивности. Обычные BWR имеют отрицательный коэффициент пустотности: снижение реакционной способности с увеличением кипения, так как вода также является замедлителем в BWR.

В дополнении к присущим проблемам, связанных с положительным пустотным коэффициентом реактивности, Чернобыльская авария произошла в процессе проведения испытания системы безопасности. В части этого испытания поток охлаждающей воды, протекающей через активную зону, был прерван, в результате чего реакционная способность ρ составила больше единицы. Мощность начала расти и, по оценкам, достигла 100-кратной номинальной полной мощности в течение 4 секунд! Быстрое увеличение мощности означало, что для установки регулирующих стержней было недостаточно времени. В любом случае, к 4 секундам невероятный скачок мощности разрушил топливные каналы, активно блокируя любое дальнейшее введение регулирующих стержней. Затем топливо перегревается, расплавляется и фрагментируется. Когда пар вступил в контакт с раздробленным топливом, произошел паровой взрыв, который буквально поднял верхнюю плиту реактора весом 1000 тонн.



Рис. 15.8 Место расположения Чернобыля. *Источник*: Всемирная ядерная ассоциация (www.world-nuclear.org/ info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Chernobyl-Accident/).

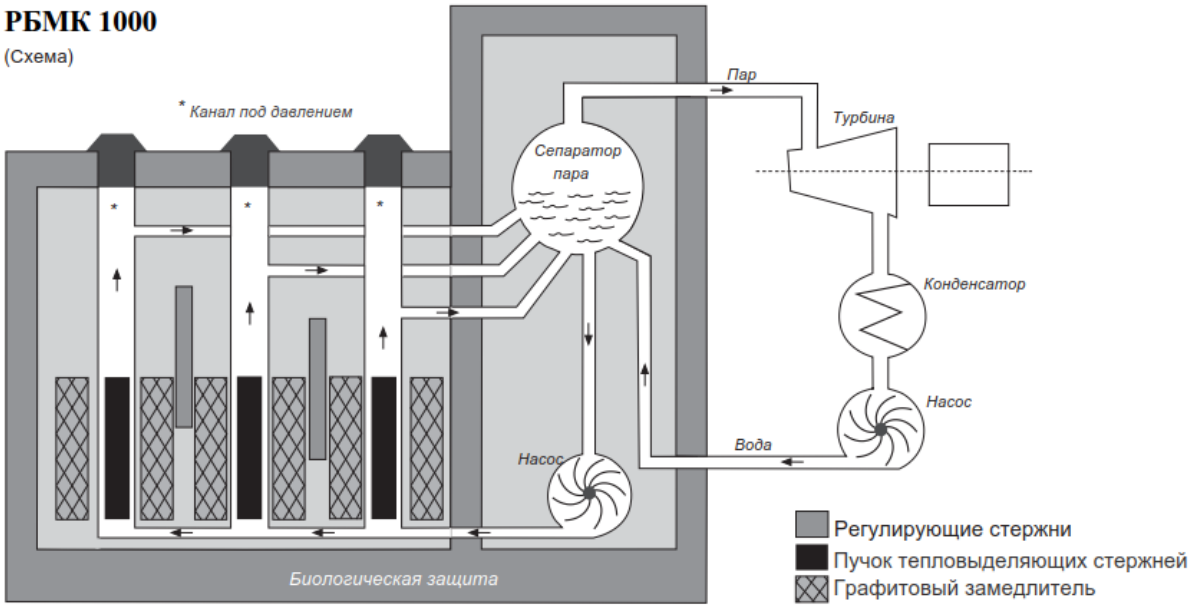


Рис. 15.9 Схема реактора РБМК.
Источник: https://www.oecd-nea.org/rp/chernobyl/chernobyl-figure2.pdf.

В отличие от большинства типов реакторов (в основном используемых в западных странах) реактор РБМК не был окружен герметизирующим куполом, поэтому, когда произошел взрыв, и поднялась верхняя крышка, вскрылась активная зона реактора. Водород, образующийся в результате реакций между паром, топливом и графитом, затем вызвал второй взрыв, который привел к выбросу значительного количества радиоактивного материала в атмосферу. Ситуацию усугубило возгорание графита, при этом процесс распада продолжался, производя дополнительное тепло и выбрасывая в атмосферу еще больше радиоактивного материала. Работники бригады чрезвычайного реагирования, которые пытались стабилизировать ситуацию и отвести огонь, в итоге умерли от радиационного отравления. На рис. 15.10 показано текущее состояние реактора в Чернобыле. Около 5000 тонн бора, доломита, песка, глины и свинца было сброшено вертолетом на горящую активную зону, чтобы контролировать горение и ограничить выброс радиоактивных материалов в атмосферу.

Неблагоприятных последствий, связанных с чернобыльской катастрофой, было множество. По данным зафиксировано, что более 50 смертельных случаев были напрямую связаны с катастрофой. Минимум 5% радиации из активной зоны просочилось в атмосферу. Ядерную программу СССР не отменил, но строительство новых РБМК реакторов было прекращено, и существующие РБМК реакторы переоборудованы до безопасного состояния. Безопасность и подготовка персонала, работающего с ядерным реактором, приобрели значимость в странах бывшего СССР. Некоторые соседние города были навсегда эвакуированы, и долгосрочные последствия для здоровья большого числа граждан по-прежнему вызывают серьезную обеспокоенность. Действительно, по некоторым ранним оценкам, число погибших достигает десятки тысяч (Дойч и Лестер, 2004). Однако более поздние исследования показали, что долгосрочные проблемы со здоровьем, связанные с радиацией, не настолько приближены к значительным, как это указывалось более ранними прогнозами (www.world-nuclear.org).

15.3.2 Фукусима-1

Череда событий и последствий ядерной катастрофы на японской АЭС «Фукусима-дайити», произошедшей на шести реакторах, хорошо известны и задокументированы, и, возможно, «раздуты» несколькими организациями и средствами массовой информации.

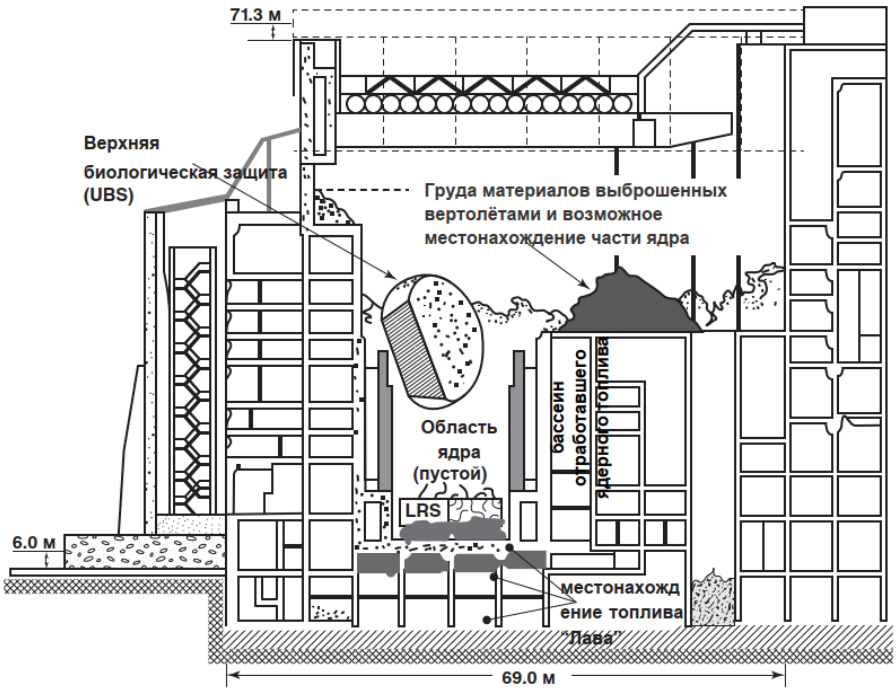


Рис. 15.10 Чернобыльский реактор после аварии. *Источник:* http://chernobylfoundation.org/chernobyl/.

Согласованные объяснения и последовательности можно найти на сайте WNA (http://www.world-nuclear.org/info/Safety-and-Security/Safety-of-Plants/Fukushima-Accident/), IAEA (https://www .iaea.org/newscenter/focus/fukushima), Агентство по ядерной энергетике Организации экономического сотрудничества и развития (http://www.oecd-nea.org/press/press-kits/fukushima.html) и Хейс (http://www.academia.edu/1708583/Fukushima_and_the_Politics_of_Nuclear_Energy). NRC США разработал ряд исследований, связанных с этим событием и извлеченными уроками. Информация в следующем абзаце была обобщена для этих веб-сайтов.

11 марта 2011 года в Японии произошло землетрясение магнитудой 9,0 (в центре города в 130 км от берега города Сендай в префектуре Мияги), которое вызвало цунами, поразившее АЭС Фукусима-дайити, с высотой волны не менее 14 м. Высота морской стены Фукусимы составляла 5,7 м. Землетрясение и цунами привели к гибели большого количества людей и значительному повреждению имущества на восточном побережье Японии. Из шести реакторов на установке три (блоки 1, 2 и 3) работали, а три (блоки 4, 5 и 6) остановлены на техническое обслуживание.

Цунами разрушило первичные и вторичные источники электропитания, поэтому измерительные приборы, освещение или циркуляционные насосы охлаждающей жидкости были отключены. К счастью, в момент обнаружения землетрясения, регулирующие стержни были вставлены в блоки 1, 2 и 3. Активная зона реактора и находящиеся на хранении стержни отработанного топлива продолжали генерировать тепло, которое нельзя было отвести. Давление в защитных сооружениях в конечном итоге стало настолько высоким, что их выбросило наружу с радиоактивным газом. Выброс радиации составил около 10% от выброса в Чернобыле, высвобождены основные изотопы $^{131}_{53}$ I (период полураспада 8,04 дня), $^{137}_{55}$ Cs (период полураспада 30 лет) и $^{134}_{55}$ Cs (период полураспада 2,06 года).

Радиоактивный выброс достиг максимума 15 сентября, в основном из блока 2. Свидетельства указывают на разрушение активной зоны в блоках 1, 2 и 3, что также привело к загрязнению окружающей среды. Через 1-3 дня после стихийного бедствия в блоках 1 и 3 произошли взрывы водорода. Пожарные насосы с морской водой использовались через 1-3 дня после цунами в попытке

охладить установку. Внешнее электроснабжение было восстановлено через 11–15 дней после события, а охлаждение пресной водой было доступно через 14–15 дней после этого. Были заказаны обязательные эвакуации (свыше 100 000 человек), а потребление пищи из пострадавших районов было запрещено. Хотя проблемы со здоровьем, непосредственно связанные с радиацией, были небольшими, число смертей среди эвакуированных было вызвано стрессом и другими причинами. В целом Япония пережила ядерный кризис в Фукусиме легче, чем СССР с Чернобылем. Что же касается последствий Фукусимы?

К лету 2011 года все японские атомные электростанции были обесточены, и правящая политическая партия открыто отказалась от ядерной энергетики, которая представляла собой частичное решение в отношении энергетических потребностей Японии. Тем не менее, на следующих выборах эта партия была окончательно побеждена, и новое правительство оперативно приняло решение о возобновлении использования ядерной энергии в части решения для энергетической системы Японии. Прогнозируемый процент ядерной электроэнергии Японии ниже оценок, выполненных до аварии на Фукусиме, тем не менее, ядерную энергию закрепили в качестве части базисного решения для энергической системы Японии. Многие из существующих атомных электростанций в Японии либо эксплуатируются, либо будут введены в эксплуатацию согласно плану, при этом некоторые из более ранних (и маломощных) будут выведены из эксплуатации. Кроме того, на стадии строительства или планирования находится несколько атомных электростанций усовершенствованной конструкции. Первоначальная мировая реакция включала ряд стран, которые приняли решили исключить ядерную энергетику. В разделе 15.3.3 рассматриваются последние разработки коммерческих ядерных реакторов.

15.3.3. Атомная энергетика двадцать первого века

Удобная концепция, которая помогает понять эволюцию энергетических ядерных реакторов, состоит в том, чтобы ссылаться на технологические инновации в терминах «поколений реакторов». Отличный отчет представлен Голдбергом и Роснером (2011). Идентифицированы четыре поколения, охватывающие период времени с 1950 года до примерно 2030 года. Характерными особенностями и характеристиками каждого поколения являются следующие:

Поколение I. Энергетические реакторы, положившие начало коммерческой ядерной энергетике в 1950-х и 1960-х годах. Это поколение реакторов, как правило, работало на уровнях мощности, которые рассматриваются как подтверждение концепции. Хорошо известным примером является Реактор Shippingport, находившийся в эксплуатации с 1957 по 1982 год. Все реакторы поколения I были выведены из эксплуатации.

Поколение II. Это поколение реакторов спроектировано сцелью стать экономичным и надежным, со сроком службы более 40 лет, и представлено реакторами PWR, CANDU и BWR. Реакторы поколения II начали работать в конце 1960-х годов и составляют основную часть коммерческой эксплуатации в настоящее время.

Большинство реакторов этого поколения (на Западе) изготовлены компаниями Westinghouse, General Electric или AREVA. Реакторы второго поколения модернизированы и изменены, особенно в Корее и Китае. Срок эксплуатации многих действующих реакторов поколения II значительно превышает 40 лет. Реакторы этого поколения производят значительное количество отработанного топлива, которое требует длительного хранения в хранилищах или повторную переработку высокоактивных отходов. Опыт Фукусимы, несомненно, повлияет на будущее развитие ядерных реакторов.

Поколение III. Эти реакторы были разработаны на основе реакторов поколения II с усовершенствованиями в топливной технологии, тепловой эффективности, методах строительства и стандартизированных конструкциях. Ожидается, что срок службы реакторов поколения III превысит 60 лет, сюда относятся реакторы AP-600 компании Westinghouse, усовершенствованный BWR (ABWR) компании General Electric, Enhanced CANDU 6 компании Atomic Energy of Canada Limited и System 80+ компании Combustion Engineering. В США эксплуатируют реакторы поколения III, но реактор General Electric – Hitachi ABWR построен в Японии всего за 4 года!

Поколение III +. Это поколение реакторов представляет собой важные эволюционные разработки реакторов поколения III и предлагает значительные улучшения безопасности посредством пассивных функций, которые предусматривают использование естественной конвекции и не требуют вмешательства оператора. Ряд реакторов поколения III + находятся в стадии разработки; Частичный

список включает AP1000 (на основе AP600), экономически упрощенный BWR (ESBWR), основанный на ABWR и PWR (на базе System 80+) с усовершенствованным дизайном. «План развития технологий ядерно-энергетических систем поколения IV» (Консультативный комитет по исследованиям в области ядерной энергии Министерства энергетики США и Международный форум «IV поколение», 2002 г.) издан довольно давно, но он все еще часто упоминается в качестве источника информации о развитии и будущих направлениях ядерной энергетики. Рис. 15.11 взят из вышеупомянутого документа, на нем точно воспроизведена история и ожидания в отношении технологических достижений в ядерной энергетике.

NRC США, Администрация энергетической информации и WNA предоставляют данные о достижениях в технологии ядерных реакторов и периодически обновляют информацию о количестве, типе и состоянии новых ядерных энергетических установок. Компиляция NRC ориентирована на США и доступна по ссылке http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/apr1400.html. WNA содержит аналогичную информацию, за исключением всемирной базы, и доступна по ссылке: http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx. IAEA также публикует обширную информацию о ядерной энергетике. Таблица 15.2 была взята из этих источников и содержит соответствующую информацию о современных ядерных энергетических реакторах (особенно в США).

Статус новых ядерных технологий и строительства новых электростанций подробно рассматривается в NRC США, IAEA и WNA. NRC рассматривают в основном деятельность в США, при этом остальные охватывают весь мир. В 2015 году в WNA было заявлено, что 467 ядерных энергетических реакторов находятся в эксплуатации по всему миру, 67 строятся, 166 планируются и 322 предлагаются. С учетом всего из предложенного и планируемого к строительству, ядерная генерирующая мощность будет составлять 1000 ГВт, по сравнению с получаемой на сегодня и составляющей 379 ГВт. Большинство предлагаемых и планируемых реакторов находятся в Китае, Индии и России. Однако, вопрос о том, сколько из запланированного и предложенного будет фактически построено, является чисто теоретическим.

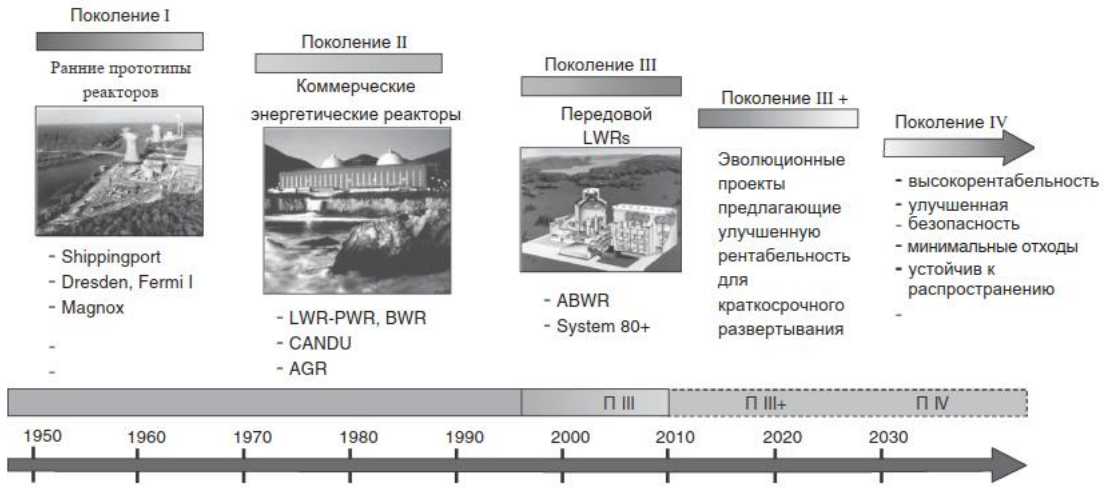


Рис. 15.11 Данные временного графика международного форума по ядерным реакторам IV поколения, посвященный будущим разработкам требований к ядерным реакторам.
Источник: Консультативный комитет по исследованиям в области ядерной энергии Министерства энергетики США и Международный форум «IV поколение» (2002 год).

Таблица 15.2 Статус по выбранным новым конструкциям ядерных реакторов.

Название	Производитель	Мощность (МВт)	Тип	Дата сертификации или статус
Поколение III				
ABWR	General Electric	14	BWR	1997 2010 запрос на возобновление
AP600	Westinghouse	600	PWR	1999
System 80+	Westinghouse	1300+	PWR	1997
Поколение				
AP1000	Westinghouse	10	PWR	2005 2011 пересмотр
ESBWR	GE-Hitachi	15	BWR	2014
US EPR	AREVA NP	17	PWR	Приостановлен 2015
US-APWR	Mitsubishi	17	PWR	Ожидается 2016
APR1400	Korea Electric	14	PWR	Инициирован 2014
EC6	Candu Energy	750	PHWR	2013 (Канада)
ATMEA I	AREVA/Mitsubi	11	PWR	2012 (Франция)
WER-TO1	Atomenergoproe	13	PWR	2015 приложение
Hualong I	China General	11 50	PWR	Используется (Китай)

В США 5 реакторов находятся в стадии строительства, 5 находятся в стадии планирования, и 17 предлагаются; все они должны быть реализованы, дополнительная мощность 38 ГВт будет добавлена к существующей (2015) 99 ГВт ядерной мощности. Из пяти строящихся – четыре AP1000, другие ESBWR. Из 17 предложенных: десять – AP1000, 2 – EPR, 1 – ESBWR и 4 – ABWR.

В дополнение к реакторам поколения III + и поколения IV большое внимание уделяется малым легководным реакторам (LWR), также называемые малыми модульными реакторами (SMR). SMR определены как реакторы с выходной мощностью 300 МВт или менее и предназначены для изготовления с использованием заводских модульных технологий производства, чтобы обеспечить экономию за счет масштаба производства и сократить сроки строительства. Конструктивные характеристики для SMR включают высокий уровень пассивных функций безопасности (для неисправностей). Многие должны быть размещены ниже уровня земли, обеспечивая высокую устойчивость к террористическим угрозам. SMR, использующие воду в качестве замедлителя, в основном используют <5% обогащенного урана и имеют интервалы дозаправки не менее 6 лет. Действительно, SMR предлагают более продолжительные межзаправочные циклы (время между заправками), чем более крупные, традиционные конструкции. По технологии они похожи на большинство энергетических и морских реакторов.

SMR могут быть использованы для выработки электроэнергии (в изолированных районах) или для производства высокотемпературной тепловой энергии, хотя некоторые коммунальные предприятия исследуют использование LWR в своих мощностях. Зачастую, SMR рассматриваются как дополняющие крупные ядерные энергоблоки, предоставляя коммунальным предприятиям больше возможностей для электростанций за счет (1) снижения капитальных затрат и проектных рисков, (2) совершенствования технологии пассивной безопасности и (3) обеспечения замены для стареющих электростанций, производящих ископаемое топливо.

Таблица 15.3 Статус выбранных SMR.

Название	Изготовитель	Мощность (МВт)	Тип	Дата сертификации или статус
NuScale	NuScale Power	150	PWR	На расмотрении
B&W mPower	mPower LLC	180	PWR	На расмотрении
SMR-160	Holtec	160	PWR	На расмотрении
Westinghouse		225	PWR	На расмотрении
SMART	KAERI	100	PWR	Лицензируется
KLT-40S	OKBM (Россия)	2 × 32	PWR	Используется (ледоколы)

В Таблице 15.3, взятой из материалов вебсайтов NRC и WNA, приведено описание действий, выполняемых по малым модульным реакторам (SMR). WNA (http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx) содержит обсуждение SMR и расширенный список текущих/предлагаемых действий SMR, а также сводку развернутых единиц. IAEA (2014) представляет подробное описание SMR из многих стран. Растущая активность и интерес к атомным электростанциям, использующих процесс распада, отражены в книгах. Уайт (2005) и Свит (2006) высказываются в пользу ядерной энергетики, которая является альтернативным источником генерации электроэнергии на ископаемом топливе, тогда как Шультис и Фо (2008) и ЛаМарш и Баратта (2001) это – издательства, выпускающие классические учебники по ядерной технике.

Адамс (2005) предоставляет ясную, документированную оценку использования энергии распада в устойчивый сценарий и приходит к выводу, что энергия расщепления сможет обеспечить большую долю энергии в мире в течение многих лет. Он рекомендует использовать реакторы с высокой конверсией, в которых производство природных изотопов превышает потребление природных изотопов (ядерные реакторы-размножители), а также переработку отработавшего и «дожигания» ядерного топлива. Если большинство тяжелых изотопов можно будет перерабатывать, то большая часть оставшихся радиоактивных отходов будет распадаться до радиоактивного уровня меньше, чем исходная руда через 300 лет. Адамс отмечает, что для реализации экологически безопасного сценария с минимальными отходами необходимо решить значительные технические и политические задачи.

15.4 Термоядерная энергия

Энергия термоядерного синтеза давно рассматривается как панацея в разрезе мировых энергетических проблем, и в течение длительного периода времени много сил и исследований было посвящено изучению термоядерной энергии. Ряд книг (Хармс и соавт., 2000; Фридберг, 2007; МакКракен и Стотт, 2012) и исследовательские проекты демонстрируют оптимизм по поводу возможной силы синтеза. Таким образом, здесь будет уместным выполнить краткий обзор процесса синтеза.

Термоядерный синтез кратко упомянут в разделе 15.2 в виде одной из трех категорий ядерных реакций, и уравнение 15.8 приведено в качестве примера реакции синтеза. В действительности, первичным источником энергии, генерируемой солнцем, является синтез обычного водорода ${}_{1}^{1}\mathrm{H}$ в соединении с гелием ${}_{2}^{4}\mathrm{He}$, происходящий в результате нескольких реакций, которые можно обобщенно представить в виде реакции,

$$4\,{}_{1}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + 2\,{}_{+1}^{0}\mathrm{e} + 2\gamma + 2\nu \qquad (15.21)$$

проистекающей при температуре солнечного ядра 15×10^{6} К.

Несколько реакций можно рассматривать в качестве возможных для получения энергии в термоядерных реакторах. Наиболее вероятные реакции и показатели выделения энергии при этих реакциях можно обобщенно представить как

$$
\begin{aligned}
&{}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 4.03\ \text{МэВ}\\
&{}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 3.27\ \text{МэВ}\\
&{}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} + 17.59\ \text{МэВ}\\
&{}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{1}\mathrm{H} + 18.35\ \text{МэВ}\\
&{}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2{}^{1}_{0}\mathrm{n} + 11.33\ \text{МэВ}
\end{aligned}
\tag{15.22}
$$

В результате реакций синтеза, приведенных в уравнении 15.22, происходит высвобождение энергии. Энергия выделяется за счет разности масс, вступающих в реакцию частиц и продуктов, также как и при реакциях ядерного распада. Рассмотрим пример, который основан на второй из реакций, перечисленных в уравнении 15.22.

Пример 15.5

Вычислите энергию, полученную в результате реакции синтеза ${}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$.

Решение: в таблицах атомных масс (Шультис и Фо, 2008) приведены значения единиц атомной массы вступающих в реакцию синтеза частиц и продуктов:

- масса ${}^{2}_{1}\mathrm{H} = 2.014\,102$ а.е.м.
- масса ${}^{1}_{0}\mathrm{n} = 1.008\,665$ а.е.м.
- масса ${}^{3}_{2}\mathrm{He} = 3.016\,029$ а.е.м.

Масса вступающих в реакцию синтеза веществ и продуктов:

$$\text{Вступающие в реакцию частицы} = 2 \times 2.014\,102\ \text{а.е.м} = 4.028\,204\ \text{а.е.м.}$$

$$\text{Продукты} = 3.016\,029\ \text{а.е.м.} + 1.008\,665\ \text{а.е.м.} = 4.024\,695\ \text{а.е.м.}$$

Изменение массы равно:

$$\Delta m = 4.024\,695\ \text{а.е.м.} - 4.028\,204\ \text{а.е.м.} = -0.003\,51\ \text{а.е.м.}$$

И высвобождаемая энергия составляет:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = -0.003\,51\ \text{а.е.м} \times \left(3 \times 10^{8}\,\frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2 = -5.246 \times 10^{-13}\ \text{J} = -3.274\ \text{МэВ}$$

Реакции синтеза обладают большими преимуществами по сравнению с реакциями распада, так как не требуют использования радиоактивных изотопов с высоким массовым числом в качестве топлива и не производят радиоактивных продуктов (таким образом, облегчая проблему хранения и переработки отработанного топлива). Более того, как видно по реакциям синтеза, приведенных в уравнении 15.22, «топливом» являются дейтерий (${}^{2}_{1}$ H), тритий (${}^{3}_{1}$ H): изотопы водорода, в ядрах которых удерживается два и три протона соответственно. При индивидуальном распаде атома ${}^{235}_{92}$ U высвобождается больше энергии (~ 200 МэВ), чем в результате одной реакции синтеза (3–18 МэВ), тем не менее в массовом выражении показатель высвобождения энергии (синтез к распаду) составляет примерно семь к одному (Соренсен, 1983). Аргументы в пользу реакции синтеза, в сравнении с реакцией распада, и в пользу реакции распада, в сравнении с химической реакцией (реакция горение) конструктивно обобщены на веб-сайте Лаборатории плазменной физики Принстона (www.pppl.gov), из которого приведена таблица 15.4. В таблице 15.4 приведены требования к топливу для электростанции мощностью 1000 МВт,

работающей непрерывно в течение года на угле (черный или бурый), ядерных (распад) и термоядерных (синтез) установках. В то время как потребление топлива угольной электростанцией измеряется в миллионах тонн, потребление топлива атомными реакторами – в тоннах, а потребление топлива термоядерным реактором – в килограммах!

Таблица 15.4 Расход топлива для различных типов электростанций.

Типы энергетических установок	**Количество используемого топлива**
Угольная электростанция	4.4×10^6 т (метрическая тонна) черный уголь
Угольная электростанция	10.8×10^6 т бурый уголь
Ядерная	1.3 т $^{235}_{92}$U
Термоядерная	150 кг дейтерия и 500 кг лития

Потребность в дейтерии для термоядерного топлива не представляет собой проблему, поскольку примерно 1 часть из 5000 морской воды – это дейтерий. Поскольку в океанической воде содержится около 1015 тонн дейтерия, запас дейтерия для получения реакции синтеза практически не ограничен. Потребность в литии представляет собой проблему, но, по сравнению с другими источниками энергии (уголь и уран), запасы лития имеются в изобилии.

Почему же тогда, при всех возможностях, термоядерная энергия не реализуется? Требованиям к синтезу довольно сложно соответствовать и поддерживать. Любая из реакций синтеза, приведенных в уравнении 15.22, требует, чтобы отдельные ядра топлива собрались вместе с последующим соединением. Но все ядра, будучи положительно заряженными, будут отталкивать друг друга, если кинетическая энергия каждого ядра не будет достаточно высокой для преодоления кулоновской силы отталкивания. Для получения реакции синтеза каждое ядро должно развить очень высокую скорость, и для повышения кинетических характеристик необходима очень высокая температура, начиная со среднего показателя (Шультис и Фо 2008)

$$E_{\text{avg}} = kT \tag{15.23}$$

В зависимости от реакции синтеза, значения E_{avg} должны составлять от нескольких до нескольких сотен килоэлектронвольт, за счет чего возможно обеспечить преодоление кулоновской силы и, чтобы ядро топлива смогло перейти в положение готовности к синтезу. Получаемый диапазон температур составляет $(10–300)\times10^6$ К. При таких повышенных температурах вступающие в реакцию частицы ионизируются, и все электроны отрываются от своих орбит вращения вокруг ядра, в результате чего продуцируется плазма. Плазма состоит из электронов и положительно заряженных ядер. Основные проблемы для работы термоядерного реактора усугубляются троекратно следующими факторами: (1) как получить необходимые высокие температуры (в основном разрешаем), (2) как удержать горячую плазму (в процессе рассмотрения) и (3) как достигнуть требуемой плотности плазмы, чтобы произошел синтез (в процессе рассмотрения).

Среди реакций синтеза, перечисленных в уравнении 15.22, наибольший интерес вызывает реакция синтеза дейтерия-трития:

$$^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n} + 17.59\ \text{МэВ} \tag{15.24}$$

Индивидуальное высвобождение энергии в пересчете на одну реакцию синтеза велико (17,59 МэВ). Минимальная температура, необходимая для реакции синтеза дейтерий-тритий, составляет 45×10^6 К; тем не менее, общепринятая температура для термоядерной энергетической установки с синтезом дейтерия-трития составляет около 100×10^6 К. Для реакции синтеза дейтерий-дейтерий, сопровождаемой выделением лишь 4,03 МэВ энергии, необходима температура 500×10^6 К; этот показатель в пять раз выше, чем при реакции синтеза дейтерий-тритий. Поскольку период полураспада трития $^3_1$H составляет всего лишь 12,33 года, в природе ни один из таких видов не встречается. Таким образом, часть проблемы, которая стоит перед работой термоядерного реактора, использующим реакцию дейтерий-тритий, состоит в обеспечении трития. Положительным является тот факт, что

тритий относительно легко получить путем захвата нейтронов литием. Реакции распада двух изотопов лития приведены ниже:

$$
\begin{aligned}
&{}^{6}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + 4.78\ \text{МэВ} \\
&{}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{3}_{1}\mathrm{H} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} - 2.47\ \text{МэВ}
\end{aligned}
\qquad (15.25)
$$

Но как удерживать плазму при температуре 100×10^6 К? Предлагается и расширенно изучается два метода: (1) магнитное удержание и (2) инерционное удержание. Поскольку электроны и ионы являются заряженными частицами, плазма может удерживаться под влиянием магнитного поля. В процессе магнитного удержания, создаваемое магнитное поле заставляет частицы двигаться по спиральной траектории. Таким образом, заряженные частицы удерживаются в плазме магнитным полем и не ударяются о стенки термоядерного реактора. Инерционное удержание основано на использовании высокоэнергетических лазеров, чтобы инициировать испарение, ионизацию и реакцию термоядерного синтеза в течение короткого промежутка времени ($\sim10^{-10}$с), таким образом, топливо не расширяется и, следовательно, удерживается в состоянии покоя. Проводятся расширенные исследования с целью изучения этих двух методов, но магнитное удержание является наиболее перспективным из них. Более 70 лет получение электроэнергии путем синтеза является мечтой, но технические проблемы устрашают. Тем не менее, достигнут значительный прогресс в получении термоядерного синтеза, но предстоит еще много работы, прежде чем термоядерная электростанция воплотится в реальность.

Какую форму может иметь термоядерная электростанция? На рис. 15.12 изображена схема термоядерной электростанции. Термоядерный реактор имеет тороидальную форму, требование, диктуемое магнитным удержанием и спиральной траекторией, по которой должны двигаться ядра заряженных частиц. В исследовательских проектах термоядерного синтеза тороидальные термоядерные камеры называют токамаками. Токамак Лаборатории плазменной физики Принстона и Объединенный европейский токамак (ДЖЭТ) являются, пожалуй, наиболее известными среди исследовательских термоядерных установок, хотя токамаки используют для исследований термоядерного синтеза в нескольких странах мира.

Нейтроны (14 МэВ) поглощаются в литийсодержащем размножающем боковом экране, который окружает камеру синтеза. Захват нейтрона ядром лития приводит к ядерным реакциям распада, которые генерируют (или размножают) тритий, – необходимое топливо (см. уравнение 15.25). Тритий отделяется и вводится обратно в термоядерный реактор для использования в качестве топлива. Как видно на рис. 15.12, термоядерная электростанция гораздо больше задействована, нежели чем ядерная. Если должна произойти реакция синтеза дейтерий-тритий, то для того, чтобы получить тритий, в размножающий боковой экран необходимо будет ввести литий. Несгоревшие дейтерий, тритий и гелий извлекают из реактора; гелий, представляющий коммерческую ценность, удаляют и выпускают в продажу, при этом дейтерий и тритий вводят обратно. Энергия извлекается из камеры реактора и используется для выработки электроэнергии.

Но здесь возникает уместный вопрос: «Когда термоядерная энергия станет реальностью?» Наиболее реалистичный ответ (и вероятный) предоставлен в отчете плана развития, опубликованном EUROfusion (EFDA: Европейское Соглашение по исследованию термоядерного синтеза, 2012).

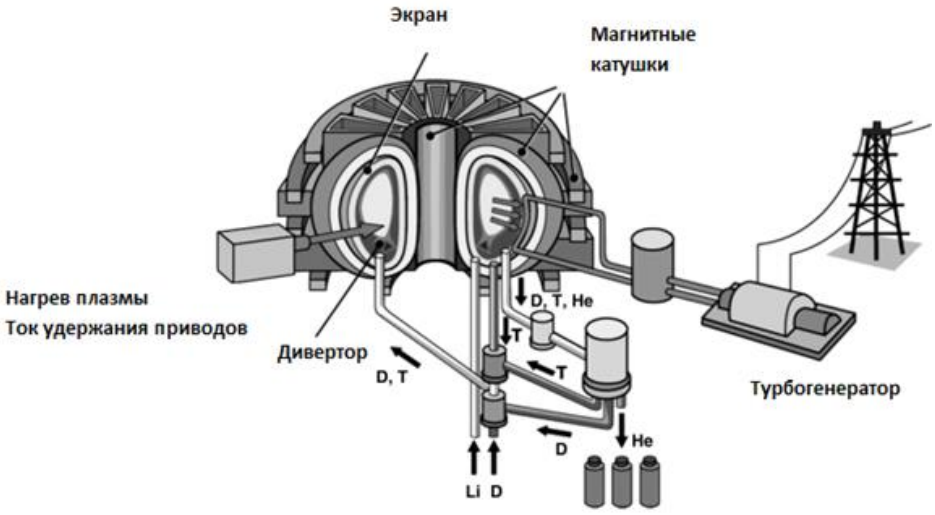


Рис. 15.12 Схема электростанции, работящей на энергии синтеза ядер.
Источник: Муассонье и соавт. (2005).

Плановые показатели, необходимые для достижения выработки электроэнергии на уровне нескольких сотен МВт к 2050 году, подробно изложены в отчете. Коммерческое производство электроэнергии с помощью синтеза получит широкое распространение вслед за этим периодом. В отчете плана развития достаточно открыто говорится о технических проблемах, которые требуют разрешения, а также о возможности возникновения непредвиденных проблем, которые могут задержать коммерческую реализацию, и представлена реалистичная оценка необходимой технологии для коммерциализации термоядерной энергии. Международная программа по разработке экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР), которая входит в часть программы, реализуемой EUROfusion, предусматривает использование токамака следующего поколения (обсуждается в следующем параграфе) для решения технических вопросов в сфере генерации термоядерной энергии. Оценка процесса синтеза ИТЭР (с сайта www.iter.org)

По результатам исследования в области синтеза ключевые характеристики термоядерной плазмы увеличены в 10 млн. раз за 50 лет; сегодня результаты исследования показывают, что осталось увеличить показатель менее чем 10-кратно, чтобы изготовить активную зону термоядерной установки.

Несмотря на то, что другие организации и страны работают над реализацией термоядерной энергии, EUROfusion, пожалуй, является лидером. EUROfusion создана как организация, в результате подписания Европейского Соглашения по исследованию термоядерного синтеза (EFDA). EFDA, ныне EUROfusion, контролирует разработку установки ДЖЭТ и несет ответственность за строительство ИТЭР – экспериментального токамака следующего поколения.

В настоящее время ДЖЭТ является одним из крупнейших действующих токамаков и в течение 20 лет удерживала первенство в качестве мировой передовой машины-токамак. В 1997 году была успешно выведена на пиковую мощность 16 МВт, при этом мощность 10 МВт удерживалась в течение 0,5 с (Вессон, 2000). Самым значительным исследовательским проектом в области термоядерного синтеза в течение следующих несколько десятков лет будет являться программа ИТЭР – совместный проект, финансируемый множеством стран, включая США и Европу. Проект ИТЭР (www.iter.org) ставит своей целью разработку оборудования, методов и процедур, необходимых для коммерческого производства термоядерной энергии, и рассматривается как, пожалуй, последний шаг перед коммерческой реализацией термоядерной энергии. В частности, цели ИТЭР заключаются в разработке режимов работы плазмы и в разработке методов управления отходящим теплом плазмы. Второй аспект связан с определением площади стенки токамака, подвергаемой наибольшему воздействию тепла и потоку частиц: дивертора. Исследования ИТЭР будут включать разработки такой конфигурации дивертора, при которой будут снижены тепловые нагрузки. В частности, цели ИТЭР предусматривают четыре аспекта (https://www.euro-fusion.org/): (1) генерация количества энергии на уровне больше потребляемой; (2) удерживание ядерной плазмы до 8 мин; (3) технологии тестов, необходимых для термоядерных энергетических установок; и (4) испытания и разработка концепции размножения трития из экрана, окружающего плазму. На рис. 15.13 изображен разрез в одинаковом масштабе камер

термоядерных реакторов ДЖЭТ и ИТЭР. Термоядерный реактор ИТЭР находится на этапе строительства в г. Кадараш, Франция. Участие и вклад США в программу ИТЭР подробно описаны на сайтах www.science.energy.gov, https://burningplasma.org/ и www.usiter.org.

За программой ИТЭР последует программа создания ДЭМО (демонстрационный термоядерный реактор), также, реализуемой под руководством EUROfusion, которая рассматривается как последний шаг перед коммерциализацией термоядерной энергии. Выдержка из заявления EUROfusion о ДЭМО:

Основные требования к ДЭМО заключаются в его способности генерировать несколько сот мегаватт чистой электроэнергии для электросети и работать на замкнутом топливном цикле (т.е. производить и сжигать тритий в замкнутом цикле). Перед тем, как слетать выбор в отношении концептуального проекта реактора ДЭМО, необходимо рассмотреть ряд еще нерешенных технологических задач и вопросы физического встраивания. Каждый из этих вопросов сопровождается весьма сильной взаимозависимостью…

Когда термоядерная энергия станет реальностью, мировая энергетическая экономика кардинально изменится. Но даже если исключить непредвиденные технические проблемы, термоядерная энергия вряд ли станет реальностью еще примерно в течение 50 лет. Таким образом, концепции, приведенные в этой книге, сохранят свою значимость на протяжении многих лет, возможно, даже и после того, как термоядерная энергия станет реальностью.

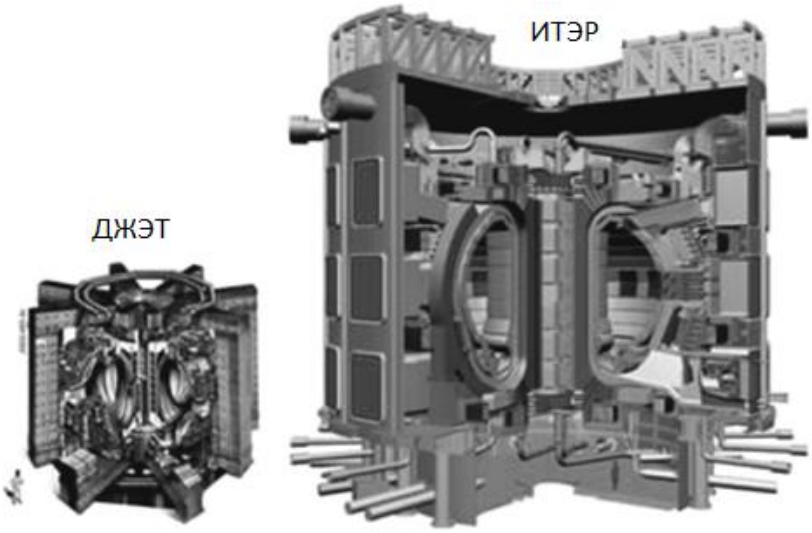


Рис. 15.13. Разрез камер реакторов ДЖЭТ и ИТЭР.

15.5 Заключение

Электроэнергия, производимая ядерными энергетическими установками, представляет собой значительный процент генерируемой электроэнергии. Ядерные технологии являются относительно зрелыми, но вопросы небезопасности, распространении ядерного оружия и долговременного захоронения радиоактивных отходов, а также в целом созданного неблагоприятного политического климата омрачают будущее атомной энергетики. Тем не менее, проблемы энергетической безопасности и выбросов парниковых газов послужили стимулом для возобновления рассмотрения вопроса о строительстве новых атомных энергетических установок, и многие представители электроэнергетической промышленности считают, что ядерная энергетика будет приобретать все большее значение и признание в ближайшие несколько десятилетий.

Термоядерная энергия представляет собой путь решения мирового энергетического кризиса и предлагает множество преимуществ, как по сравнению с ядерной энергией, так и с традиционным топливом, используемых для генерации электроэнергии и получения энергии. Тем не менее, технические проблемы устрашают, и даже по самым оптимистичным взглядам, бытующим в сообществе термоядерного синтеза, предполагается, что коммерчески «разработанной» термоядерная генерация энергии станет лишь к 2050 году.

Литература

Adams, M.L. (2005) Sustainable energy from nuclear fission power. The Bridge, 32. (4). https:// www.nae.edu/Publications/Bridge/ExpandingFrontiersofEngineering7308/SustainableEnergyfromNuclearFis sionPower.aspx (accessed October 27, 2016).

Maisonnier, D., Cook, I., Sardain, P., et al. (2005) A Conceptual Study of Commercial Fusion PowerPlants. EFDA-RP-RE-5.0, European Fusion Development Agreement. https://www.euro-fusion .org/wpcms/wp-content/uploads/2012/01/PPCS_overall_report_final.pdf (accessed October 27, 2016).

Deutch, J.M. and Lester, R.K. (2004) Making Technology Work: Applications in Energy and the Environment. Cambridge University Press, Cambridge.

Dorf, R.C. (2001) Technology, Humans, and Society: Toward a Sustainable World. Academic Press, San Diego, CA.

El-Wakil, M.M. (1984) Powerplant Technology. McGraw-Hill, New York.

FDA (2012) Fusion Electricity: A Roadmap to the Realisation of Fusion Energy. European Fusion Development Agreement. https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf (accessed October 27, 2016).

Fay, J.A. and Golomb, D.S. (2012) Energy and the Environment, 2nd edn. Oxford University Press,Oxford.

Firestone, R.V. and Shirley, V.S. (eds) (1999) Table of Isotopes. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Freidberg, J.P. (2007) Plasma Physics and Fusion Energy. Cambridge University Press, Cambridge. Goldberg, S.M. and Rosner, R. (2011) Nuclear Reactors: Generation to Generation. American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, MA. https://www.amacad.org/pdfs/nuclearReactors .pdf (accessed October 27, 2016).

Harms, A.A., Kingdon, D.R., and Schoepf, K.F. (2000) Principles of Fusion Energy. World Scientific Publishing, Singapore.

IAEA (2014) Advances in Small Modular Reactor Technology Development. International Atomic Energy Agency, Vienna. https://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/SMR/files/IAEA_SMR_Booklet_ 2014.pdf (accessed October 27, 2016).

IAEA (2015) Nuclear Power Reactors in the World. International Atomic Energy Agency, Vienna.http://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/rds2-35web-85937611.pdf (accessed October 27, 2016).

LaMarsh, J.R. and Baratta, A.J. (2001) Introduction to Nuclear Engineering, 3rd edn. Addison-Wesley, New York.

McCracken, G. and Stott, P. (2012) Fusion: The Energy of the Universe, 2nd edn. Elsevier, Amsterdam.

Murray, R.L. (1961) Introduction to Nuclear Engineering, 2nd edn. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Nero, A.V. (1979) A Guidebook to Nuclear Reactors. University of California Press, Berkeley, CA. Shultis, J.K. and Faw, R.E. (2008) Fundamentals of Nuclear Science and Engineering, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL.

Sorensen, H.A. (1983) Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Sweet, W. (2008) Kicking the Habit: Global Warming and the Case for Renewable and Nuclear Energy. Columbia University Press, New York.

US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum (2002) A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems. https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/genivroadmap2002.pdf (accessed October 27, 2016).

Wesson, J. (2000) The Science of JET. JET Joint Undertaking, Abingdon, UK. http://www .euro-fusionscipub.org/archives/jet-archive/the-science-of-jet (accessed October 27, 2016).

Weston, K.C. (1992) Energy Conversion. West, St. Paul, MN.

White, R.S. (2005) Energy for the Public: The Case for Increased Nuclear Fission Energy. Santa Barbara, CA.

WNA (2015) Nuclear Power Reactor Characteristics Pocket Guide. World Nuclear Association. http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Nuclear_Information/ Pocket%20Guide%20Reactors.pdf (accessed October 27, 2016).

16

Транспорт: гибридные автотранспортные средства и электромобили

16.1 Альтернативное использование энергии для автотранспортных средств вместо двигателей внутреннего сгорания

Рис. 1.10 представляет собой критическую точку использования энергии в США в 2014 году. Автотранспорт занимает 28% энергии, используемой в США, это больше, чем энергия, которой пользуются в жилищно-бытовом и промышленном хозяйстве. На рис. 16.1 представлена разбивка грузовые автомобили приходится 80% используемой энергии автотранспортом в США за 2014 год. Авиация занимает дополнительные 7% и имеет свои особые потребности и стандарты. Морские суда и корабли, поезда и автобусы, применяемые в военных целях, топливо передаваемые по трубопроводу, а также смазочные материалы покрывают все остальное. Таким образом, легковые автомобили, грузовые автомобили и мотоциклы представляют собой огромный потенциал для существенной экономии используемой энергии. В данном разделе рассматривается вопрос как реализовать такой потенциал.

На протяжении большей части двадцатого века двигатели внутреннего сгорания (ДВС) были доминирующим источником энергии для автотранспортных средств. Так как развитие автомобилестроения началось в конце девятнадцатого века, то изучались несколько видов источников энергии, включая пар и электричество, в том числе и ДВС. За неимением в то время технологий массового производства и массового потребления автотранспорта паровые двигатели того времени были слишком громоздкими, а электрические двигатели имели проблемы с емкостями для аккумулирования и контроля. В этой борьбе «победил» ДВС, поскольку имелась достаточная возможность поставлять углеводородное топливо высокой плотностью энергии в пределах определенной местности, а также еще благодаря и тому, что технология ДВС достаточно быстро дозрела для вытеснения других вариантов развития в этом направлении. Труд Д. Кирша, изданный в 2000 году (Kirsch (2000), содержит интересные дискуссии по поводу того, как использование электромобилей могло изменить ход развития, если бы обстоятельства того времени изменились. Однако, эксплуатационные характеристики ДВС и ограничения цикла КПД Карно тепловых двигателей ограничивали их суммарную эксплуатационную характеристику. Во времена наличия дешевого газа и отсутствия острого внимания к выбросу парниковых газов не было значительных экономических и экологических средств стимулирования для развития альтернативных источников энергии для потребности автотранспорта. Но, в 1970-х начались изменения, и в течение ряда лет рассматривались серьезные альтернативы ДВС. Труды Эхшани и соавт. (2010), Фухс (2009), и Ми и соавт. (2011) являются хорошими примерами этому и посвящены гибридному виду транспорта и электромобилям. Также, существуют несколько веб-сайтов, которые содержат полезную информацию, хотя нужно обращать особое внимание на точность указываемой информации. Для начала лучше всего рассмотреть, какие характеристики ДВС, помимо ограничения Карно, приводят к неэффективности. На рис. 16.2 представлен идеальный крутящий момент и функциональные формы мощности источника энергии автотранспортного средства. Ось абсцисс является скоростью двигателя. Для того, чтобы двигатель работал в наилучшем своем проявлении и производительности, идеальным исполнением является наличие постоянной мощности в широком диапазоне скоростей двигателя. Крутящий момент далее превращается в убывающую функцию скорости (и почти гиперболичен в сочетании со скоростью). Во избежание скольжения колес на дороге и дабы обеспечить мощность необходимую для ускорения транспортного средства, преодоления подъема, а также буксировки, при низких скоростях, крутящий момент должен быть постоянным.

На рис. 16.3 представлен стандартный крутящий момент и проявление мощности двигателя внутреннего сгорания. Не совсем гармонируют здесь идеальные кривые и кривые рабочих

характеристик ДВС. Из-за таких несоответствий автотранспорт с ДВС имеет трансмиссию с различными передаточными числами и по большей степени эксплуатируются продолжительное время с высоким удельным потреблением топлива.

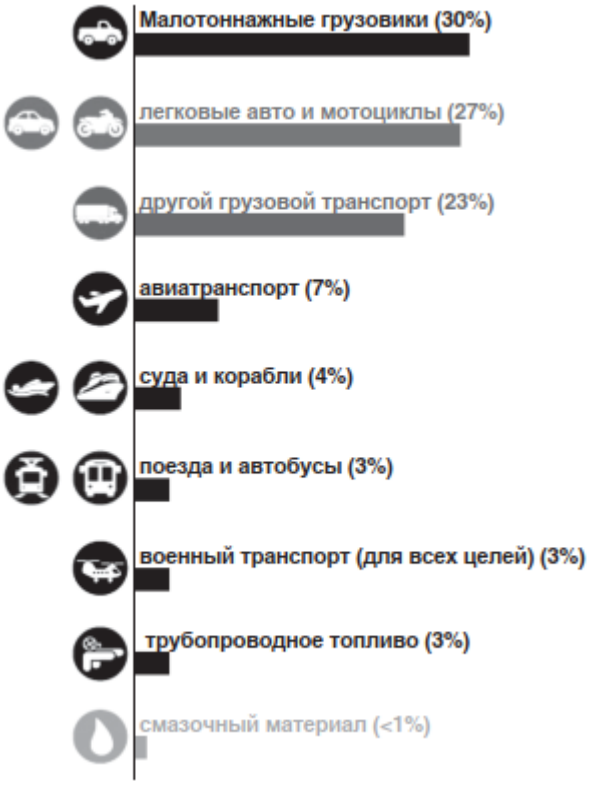


Рис. 16.1 Использование энергии для автотранспорта за 2014г. по типам.
Источник: http://www.eia.gov/Energyexplained/? page=us_energy_transportation#tab2.

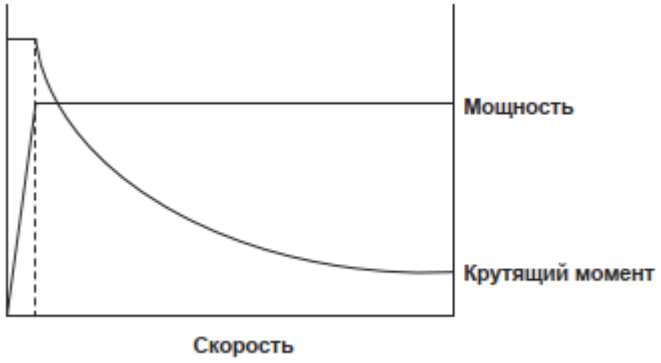


Рис. 16.2 Соотношение оптимальной мощности и крутящего момента источника питания автомобиля



Рис. 16.3 Параметры мощности и крутящего момента ДВС



Рис. 16.4 Параметры мощности и крутящего момента электромобиля

Необходимо учесть, что параметры мощности и крутящего момента электрического двигателя, как представлено на рис. 16.4. Мощность электрического двигателя и параметры крутящего момента в качестве функции скорости двигателя имитируют те идеальные характеристики, что указаны на рис. 16.2. Крутящий момент и мощность электрического двигателя в достаточной мере соответствуют идеальному крутящему моменту и мощности. До достижения основной скорости электрические двигатели обеспечивают постоянный крутящий момент; после достижения основной скорости мощность стабильна и происходит снижение скорости крутящего момента почти до гиперболической наряду с частотой вращения двигателя – близкой к идеальной. В связи с тем, что характеристики электрического двигателя соответствуют идеальным, то и нет необходимости в трансмиссии (коробке передач).

Принимая во внимание размышления в предыдущих параграфах, из этого вытекают три тактических момента в качестве потенциального улучшения общего КПД автотранспортных средств: (1) замена двигателя на нетепловой двигатель с характеристиками схожими с идеальным, (2) смена двигателя и использование только электрического двигателя, и (3) комбинирование наилучших качеств ДВС и электрического двигателя в гибридной системе. Каждый из этих подходов будет рассмотрен в Разделе 16.2, но для начала нужно отметить дополнительные факторы.

Гибридный электромобиль определяется как транспорт, который состоит из ДВС и электрического двигателя, а также в зависимости от системной конфигурации (см. Раздел 16.2), может эксплуатироваться на любом из этих двух или вместе взятых двигателях. В гибридном варианте ДВС уменьшен в размере, чем традиционный вариант автотранспорта (только ДВС) в таком порядке, что позволяет эксплуатировать ДВС близко к точке с наибольшим КПД и быть дооснащенным, как это требуется для электрического двигателя. Пробег в милях на галлон израсходованного топлива гибридного варианта (mpg) выше, если сравнивать с пробегом традиционного автотранспорта. Следуя самому Фус (2009), традиционный автотранспорт с используемым M пробегом миль за год и расходом бензина (в милях за галлон) MPGC требует GC галлонов в год

$$G_C = \frac{M}{\text{Миль/галлон}_C} \tag{16.1}$$

Гибридный вариант с расходом бензина MPG_H требует G_H галлонов в год:

$$G_H = \frac{M}{\text{Миль/галлон}_H} \tag{16.2}$$

Если f является относительным увеличением в милях за галлон гибридным вариантом, то

$$\text{Миль}_{\text{галлон}\ H} = \text{МГ}_{\ C}(1+f) \tag{16.3}$$

А сэкономленные GS в галлонах в год с применением гибридного варианта составляет

$$\begin{aligned} G_S &= G_C - G_H = \frac{M}{\text{MPG}_C} - \frac{M}{\text{MPG}_H} = M\frac{\text{MPG}_H - \text{MPG}_C}{\text{MPG}_C \times \text{MPG}_H} \\ &= M\frac{\text{MPG}_C(1+f) - \text{MPG}_C}{\text{MPG}_C \times \text{MPG}_C \times (1+f)} = M\frac{\text{MPG}_C \times f}{\text{MPG}_C^2 \times (1+f)} \\ &= \frac{M}{\text{MPG}_C}\frac{f}{1+f} \end{aligned} \tag{16.4}$$

Рассмотрим пример, используя стандартные условия для кроссовера или грузового автомобиля на легковом шасси (пикапа), а также малого транспортного средства с экономичным расходом топлива.

Пример 16.1

Кроссовер или грузовой автомобиль на легковом шасси (пикапа) имеет расход бензина 20 миль/гал, а а малое, транспортное средство с экономичным расходом топлива имеет расход бензина имеет расход бензина 32 миль/гал. Пробег и того и другого автомобиля составляет 15 000 миль в год. В случае если, гибридная версия имеет f=0:2%, то сколько экономится галлонов бензина в год? Сколько составит пробег в милях на галлон каждого гибридного транспорта?

Решение: для кроссовера

$$(G_S)_{\text{SUV}} = \frac{M}{\text{MPG}_C}\frac{f}{1+f} = \frac{15\,000\ \text{миль}\ /\ \text{год}}{20\ \text{mpg}}\frac{0.2}{1+0.2} = 125\ \frac{\text{галл.}}{\text{год}}$$

и для малых, а также транспортных средств с экономичным расходом топлива имеется формула -

$$(G_S)_{\text{SmallEE}} = \frac{M}{\text{MPG}_C}\frac{f}{1+f} = \frac{15\,000\ \text{миль}\ /\ \text{год}}{32\ \text{mpg}}\frac{0.2}{1+0.2} = 78\ \frac{\text{галл.}}{\text{год}}$$

И то и другое решение указывают на одинаковый процент экономии топлива, но поскольку пробег кроссовера в милях на галлон израсходованного топлива ниже, то кроссовер экономит больше, чем малое транспортное средство с экономичным расходом топлива. Пробег в милях на галлон израсходованного топлива гибридных версий двух транспортных средств составляет:

$$\begin{aligned} (\text{MPG}_H)_{\text{SUV}} &= (1+f)(\text{MPG}_C)_{\text{SUV}} = (1+0.2) \times 20\ \text{mpg} = 24\ \text{mpg} \\ (\text{MPG}_H)_{\text{SmallEE}} &= (1+f)(\text{MPG}_C)_{\text{SmallEEE}} = (1+0.2) \times 32\ \text{mpg} = 38.4\ \text{mpg} \end{aligned}$$

Данный простой пример указывает на то, что f =0:2, средняя гибридная модификация (см. Раздел 16.2) по сравнению с традиционным видом транспорта, может привести к существенной экономии топлива. В Разделе 16.2 рассматриваются характеристики гибридного автотранспорта и электромобиля.

16.2 Гибридные автотранспортные средства и электромобили

Управление энергетической информации США (EIA) дает определение гибридному автотранспорту с электрическим двигателем и автотранспорту с электродвигателем; нижеприводимые определения были модифицированы из версий Управления Энергетической Информации США.

- *Гибридный автотранспорт с электрическим двигателем. Электрический автотранспорт, который (1) работает исключительно за счет электричества, но содержит в себе двигатель внутреннего сгорания, что производит дополнительное электричество или (2) имеет электрическую систему и систему внутреннего сгорания, а также может работать в той и иной системе.*

- *Автотранспорт с электрическим двигателем. Автотранспорт, работающий на электрическом двигателе, который получает ток от перезаряжаемых аккумуляторных батарей или других источников электричества.*

Технология ДВС зрелая и широко распространенная технология, которая обладает исключительно устойчивым ростом в области КПД благодаря внедрению технологических инноваций. Гибридные автотранспортные средства и электромобили являются более сложными, чем автономные автотранспортные средства с ДВС. В зависимости от конфигурации гибридные автотранспортные средства и электромобили могут оснащаться ДВС, большими ёмкостями аккумуляторных батарей, генераторами электродвигателей, устройствами регенеративного торможения, бесчисленным количеством энергосберегающих систем, систем аккумулирования энергии, а также уличными электрическими зарядными устройствами с разъемами питания. Специфической особенностью гибридных автотранспортных средств и электромобилей является степень и сложность систем управления, необходимых для мониторинга, контроля и обнаружения неисправностей всех параметров. Возросшее количество компонентов, а также протоколов управления, необходимых для гибридных автотранспортных средств и электромобилей означает, что первоначальных издержек имеется больше, вопросы технического обслуживания более варьируемы и сложны, а расходы на замену деталей высоки (и возможно, что придется чаще заменять детали).

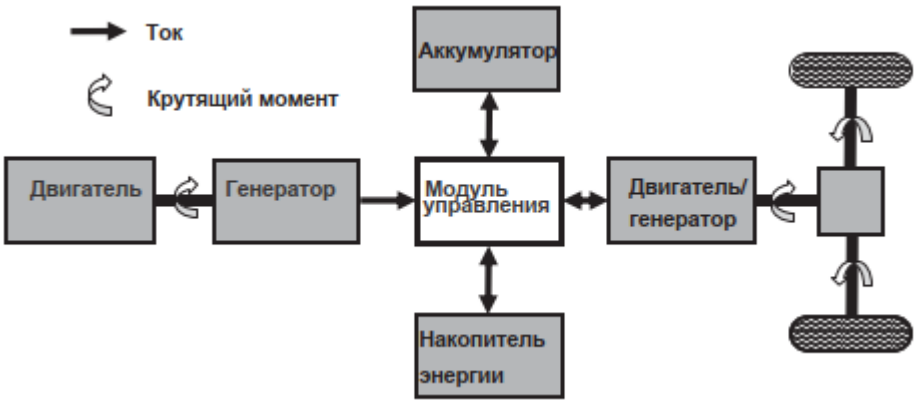


Рис. 16.5 Схема исполнения гибридного автотранспорта

Рассмотрим для начала гибридный автотранспорт с электрическим двигателем. Гибридный автотранспорт включает в себя ДВС (или топливный элемент) с устройством аккумулирования электрической энергии, как правило аккумулятор, но также можно использовать конденсатор или маховик. В труде Фухс (2009 года) особенно хорошо дискутируются многие аспекты гибридного автотранспорта. Характеристикой гибридных видов автотранспорта является возможность аккумулирования некоторой энергии, используемой при ускорении хода автотранспорта с применением регенеративного торможения, тем самым трансформируя кинетическую энергию в электрическую, используя «двигатель» в качестве генератора. В дополнение к особенности по регенеративному торможению, гибридные виды автотранспорта часто отличаются экономией топлива, как выключением двигателя во время остановок, движением только в электрическом режиме, уменьшенным размером двигателей, а также запуском автотранспорта электродвигателем, поскольку

ДВС имеет низкий изначальный крутящий момент. Принципы проектирования и эксплуатации гибридных видов автотранспорта с электродвигателями имеют следующие положения:

1) По возможности эксплуатировать только электродвигатель (минимум выбросов и топлива).

2) При необходимости использовать только ДВС, если возможно, и только в случае оптимальной точки КПД (минимум расход топлива).

Гибридные системы могут быть сконфигурированы как последовательные, параллельные, либо комбинированные; жизненно важным компонентом в гибридной системе является интерфейс управления между двигателем и электрическим приводом, что позволяет поддерживать эффективную эксплуатацию.

Принципиальная схема стандартных систем последовательного включения приведена в Рис. 16.5. Система последовательного включения размещает ДВС и электродвигатель последовательно приводным механизмом. Необходимы дополнительные элементы для выработки электричества, зарядки батарей, обеспечения несметного количества функций управления, а также сохранения восстановленной энергии от опций как регенеративное торможение. Данные функции в схематичном порядке представлены на рис. 16.5; на специфических видах автотранспорта могут быть отличия в последовательности, размещении, и взаимодействии. В серийных видах гибридного автотранспорта ДВС приводит в движение генератор, нежели вал привода колеса; электродвигатель является единственным средством приведения колес в движение. Из-за того, что электродвигатель напрямую подсоединен с валом привода колес и как правило удачно гармонирует относительно электропитания, крутящего момента и скорости, нет необходимости оснащении коробкой передач. Генератор обеспечивает питанием для зарядки батареи, а также питание для электродвигателя. Если есть необходимость в ускорении или преодолении подъема, то двигатель получает электричество как от генератора, так и от батареи. При регенеративном торможении двигатель действует как генератор с восстанавливаемой энергией, которое питает либо батарею, либо другое устройство аккумулирования энергии. Модуль управления, включая электронику, является неотъемлемой частью любого вида гибридного автотранспорта и наиболее сложен, чем модуль традиционных видов автотранспорта. Чем сложнее варианты эксплуатации гибридных видов автотранспорта, тем сложнее модули управления. Шевроле Вольт (Chevrolet Volt) является по существу серийным гибридным видом автотранспорта, как и почти все дизель-электрические локомотивы.

Еще одним общим типом гибридного вида автотранспорта является параллельный гибрид. На рис. 16.6 представлена схема стандартной гибридной системы параллельного гибрида. Основная особенность параллельного гибрида то, что электродвигатель и ДВС соединены с валом привода колес. Такие же элементы системы присутствуют в последовательных гибридах, включая функции управления, но взаимосвязь различается.

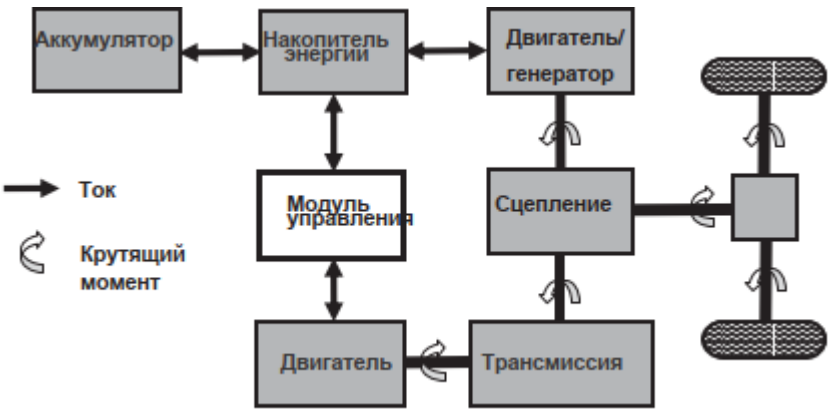


Рис. 16.6 Схема исполнения параллельно гибридных систем

Двигатель и большой генератор часто комбинируются в единый блок. Батарея может быть перезаряжена, когда генерируемая мощность ДВС превысит необходимый уровень для движения автотранспорта и во время регенеративного торможения. Большинство параллельных гибридов имеют механическую связь между ДВС и электродвигателем, и отсутствует возможность перезарядки батареи

при неподвижном состоянии автотранспорта. Только когда используется электродвигатель или при регенеративном торможении, ДВС либо не работает, либо заглушен. Гибкость параллельных видов гибридного автотранспорта позволяет иметь следующие рабочие режимы:

1) Вождение в городском режиме – только электродвигатель.
2) Движение в дороге, низкая скорость – только ДВС.
3) Движение в дороге, высокая скорость или ускорение – ДВС плюс электродвигатель параллельно.
4) Перезарядка батареи – если выходная мощность ДВС выше, чем требуется для скорости автотранспорта, то излишек мощности можно использовать для перезарядки батареи.
5) Регенеративное торможение – при замедлении скорости или торможении мотор действует как генератор и аккумулирует кинетическую энергию.

Гибридные виды Honda Accord и Civic являются параллельными видами гибридного автотранспорта, однако из-за слабых показателей продажи 2015 год оказался последним годом производства гибридного вида Civic. А в 2016 году гибридный вид Honda Accord был полностью пересмотрен.

Наиболее распространенными являются комбинированные и параллельные гибридные виды чем последовательные или параллельные гибридные виды автотранспорта, которые называются такой гибрид как с трансмиссией с разветвлением потоков мощности. На рис. 16.7 приведена схема комбинированного гибрида.

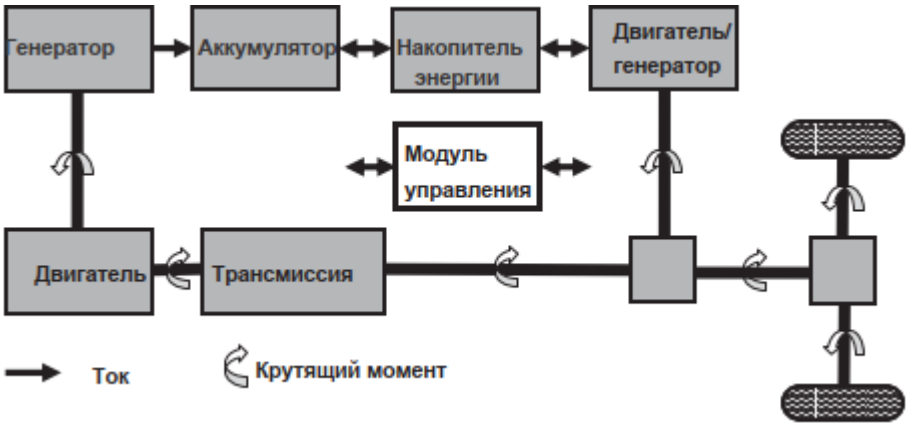


Рис. 16.7 Схемное описание комбинированно-последовательных и параллельных (или с разветвленным потоком мощности) гибридов

Как можно было ожидать, комбинированные гибридные типы имеют как последовательные, так и параллельные системы конструкции. Наиболее существенной особенностью комбинированного типа является то, что и ДВС и электродвигатель имеют прямое соединение с валом привода колес. На рис. 16.7 соединения блока «Модуля Управления» не показаны, во избежание непонимания в схеме. Из-за повышенной сложности комбинированных гибридных видов автотранспорта, система более дорогая и протоколы управления более сложны, чем в параллельных гибридных видах. Такое устройство действенно отсекает подачу питания от ДВС от мощности необходимой для движения автотранспорта. Комбинированный гибридный автотранспорт использует меньший, более эффективный ДВС, поскольку электродвигатель может непосредственно напрямую способствовать, когда понадобится больше пускового момента. Toyoda Prius II, самый продаваемый гибрид в США (см. Раздел 16.3), является комбинированным последовательно-параллельным гибридным автотранспортом.

В то время как конфигурации последовательных, параллельных и комбинированных гибридных видов автотранспорта применяются для разделения между характеристиками гибридов, концепция гибридности или гибридизации также используется для разделения характеристик гибридов. Гибридность определяется как соотношение полной мощности электродвигателей, разделенной на количество электродвигателей и мощности ДВС:

$$H = \frac{\text{Мощность всех электродвигателей}}{\text{Мощность всех электродвигателей} + \text{Мощность ДВС}} \quad (16.5)$$

Доминантное значение уравнения (16.5) не обязательно является полной имеющейся в отношении гибридных автотранспортов, поскольку максимальная мощность электродвигателя и ДВС могут не соответствовать той же скорости автотранспорта. Малое значение H соответствует “средней” гибридности, в то время как значение близкое к 0.50 описано как “полная” гибридность. Значение H ˆ 1 означает, что автотранспорт имеет только электродвигатель (без ДВС). H 0:75 означает большую электрическую мощность по сравнению с мощностью ДВС с большой (и тяжелой) батареей.

Пример 16.2

Используя информацию веб-сайта Toyota по марке Pruis, можно оценить гибридность Toyota Prius.

Решение: соответствующая веб-страница - http://www.toyota.com/prius/features/mechanical_ performance/1223/1225/1227/1229, согласно чему спецификация двигателя ДВС, объемом 1.8 л. 4-цилиндрами DOHC (двойной верхний распределительный вал) 16-клапанный с изменяемыми фазами газораспределения; 73 кВт, 5200 об/мин
Электродвигатель имеет синхронный двигатель переменного тока с постоянным магнитом; 60кВт Гибридность -

$$H = \frac{\text{Мощность всех электродвигателей}}{\text{Мощность всех электродвигателей} + \text{Мощность ДВС}} = \frac{60 \text{ кВт}}{60 \text{ кВт} + 73 \text{ кВт}} = 0.45$$

И поэтому неудивительно, что Toyota Prius считается полным гибридом.

Гибридность является полной H=0 для традиционного автотранспорта до H=1 для автотранспорта с электродвигателем. Рис. 16.8 точно определяет природу такой непрерывности. “Средний” гибрид с преобладанием ДВС, в то время как в “полных” гибридах ДВС и электродвигателях выходные мощности сбалансированы. Гибридность значительно больше, чем показатель 0.5 является стандартным как “автомобиль с гибридной силовой установкой” (PHEV), что означает, что мощность ДВС намного меньше чем мощность электродвигателя. При увеличении гибридности с H=0.5, используется как правило последовательная конфигурация; при снижении гибридности с H=0.5, используется параллельная конфигурация. “Высота” затемненных треугольников показывает относительные величины доли регулирования в получаемой энергии от ДВС и электродвигателя. Рис. 16.8 полезен не только для определения гибридных конфигураций, но и для внедрения концепций PHEV и электромобилей.

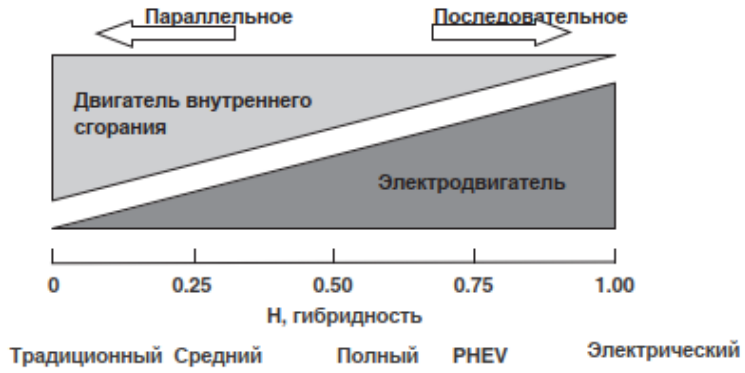


Рис. 16.8 Непрерывность гибридности

Автотранспорт с электродвигателем должен содержать бортовой источник электричества, стандартную батарею или топливный элемент, а также электродвигатель (или двигатели). Принципиальная схема электромобиля с батареей представлена на рис. 16.9. Хотя батарея и представлена на рисунке, аккумулятор может быть заменен на другое устройство аккумулирования

энергии, такие как маховик или блок конденсаторов. Как и гибриды, сложность функции управления определяется особенностями, применяемыми для восстановления энергии. Необходимо иметь внешний источник энергии для перезарядки устройства аккумулирования энергии. Привлекательным элементом электромобиля может быть то, что внешнее питание может быть обеспечено несколькими источниками, включая возобновляемые источники, такие как энергия ветра и солнечная энергия. Марка Nissan Leaf, с более чем 150 000 единицами, проданными к концу 2015 года, является самым продаваемым в мире автомобилем с электродвигателем. Leaf состоит из 80кВт электродвигателя и батареей в 24кВт/ч. Часто отмечается электромобиль, с милями пробега на эквиваленте галлона топлива, 1 галлон=33,7 кВт-ч (mpge), на базе с внешним источником подачи энергии; Пробег в милях на эквиваленте галлона топлива Leaf составляет 126 миль. Центр Анализа по Изучению Альтернативных Топлив Министерства Энергетики США (AFDC) на конец 2015 года составил список из 43 имеющихся в США автомобилей с электродвигателем. Также, вместе с большинством малолитражных автомобилей, в этот список внесены некоторые виды автобусов и малотоннажных грузовиков. В Справочнике Данных (Transportation Energy Data Book) (Дэвис и соавт., 2015) содержится конкретный перечень специальных моделей, вместе с их отличительными чертами, по каждому из производителей.

Автомобиль с гибридной силовой установкой (т.н. PHEV) является последней категорией на рис. 16.8. PHEV часто называется еще т.н. расширителем диапазона, поскольку основным назначением его является расширение диапазона автомобилей с электродвигателем. PHEV является последовательным гибридом, который имеет т.н. значение гибридности более чем 0.5, с 0.75 или вероятно большего значения. На рис. 16.5 представлено соединение для внешней зарядки, соответствующее принципиальной схеме PHEV. Поскольку значения H больше, то мощность ДВС меньше по сравнению с мощностью батареи. Согласно Фухс (2009)



Рис. 16.9 Схема описания электромобиля

выделяет отношение (уравнение (16.6)) между гибридностью H, диапазоном только батареи Ro, и расширенным диапазоном Re:

$$R_e = \frac{R_o}{H} \tag{16.6}$$

Увеличение в диапазоне, Re - Ro, может быть выражено как

$$\Delta R = R_e - R_o = R_o \frac{1-H}{H} \tag{16.7}$$

Рассмотрим пример.

Пример 16.3

PHEV состоит из электродвигателя 110кВт и ДВС 55кВт. Если пробег на не бензиновом двигателе составляет 35 миль, можно составить расчет расширенного диапазона при использовании ДВС.

Решение: гибридность:

$$H = \frac{110\ \text{кВт}}{110\ \text{кВт} + 55\ \text{кВт}} = 0.67$$

и расширенный диапазон, а также увеличение диапазона составляет

$$R_e = \frac{R_o}{H} = \frac{35\ \text{миль}}{0.67} = 52\ \text{миль}$$

$$\Delta R = R_o \frac{1-H}{H} = 35\ \text{миль} \times \frac{1-0.67}{0.67} = 17\ \text{миль}$$

Следует с осторожностью относиться к интерпретации данного результата. Это увеличение за одну поездку на пройденное расстояние, указывающее дополнительно пройденное расстояние суммированием ДВС на зарядке одной батареи. На многих рекламах PHEV отмечается прохождение нескольких сотен миль с интервалом повторных заполнений топливного бака, однако количество миль, пройденное с интервалом заправки топливного бака, составляет множество поездок. Центр Анализа по Изучению Альтернативных Топлив Министерства Энергетики США (AFDC) на конец 2015 года составил список из 24 типов авто PHEV имеющихся в США; все они являются легковыми машинами. Также, в Справочнике Данных (Transportation Energy Data Book) (Дэвис и соавт., 2015) содержится конкретный список специальных моделей, вместе с их отличительными чертами, по каждому из производителей.

Согласно традиционному определению гибридный вид автотранспорта является одним из тех, что использует более чем одну форму встроенного источника энергии для движения. На основании вышеизложенного автомобиль на топливных элементах может быть гибридным, поскольку электричество может обеспечить двигатель как от топливного элемента, так и батареи. Однако, автомобиль на топливных элементах всегда является автомобилем на электродвигателях. На рис. 16.10 представлена модификация Рис. 16.5 (конфигурация последовательного ДВС) электромобиля с топливным элементом. Так как топливный элемент производит электричество, то потенциально подразумевается, что все гибриды с топливным элементом используют конфигурации последовательности с генератором ДВС заменяемый топливным элементом. Вопрос с автомобилями с топливными элементами состоит в наличие водородных заправочных станций, поэтому автомобили с топливными элементами целесообразно применять в регионах, где существует инфраструктура водородных заправочных станций. За 2015 год по всей США имелись 50 водородных заправочных станций; большинство находится в Калифорнии. Топливный элемент с протонообменной мембраной (см. Раздел 10), по всей вероятности, является типом топливного элемента, используемого в таких видах автомобилей. Из-за ограниченного количества водорода, затрат, надежности, а также других вопросов, отсутствия серийного производства, количество традиционных автомобилей на топливных элементах и гибридных видов автомобилей незначительно мало. На конец 2015 года Центр Анализа AFDC составил список из 12 автомобилей на топливных элементах. В списке также имеются несколько автобусов, грузовых и легковых автомобилей.

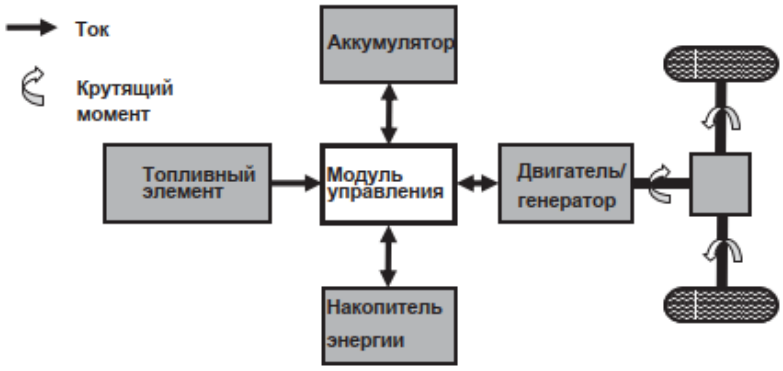


Рис. 16.10 Схема системы электромобиля с топливным элементом

16.3 Гибридные автотранспортные средства и электромобили: прошлое, настоящее и будущее

Двигатель внутреннего сгорания являлся широко распространенной формой тяги для большинства дорожных транспортных средств на протяжении многих десятилетий. Однако, из-за беспокойства по вопросам в области энергетики, экологии, а также рационального использования природных ресурсов, за последние несколько десятилетий отдельные граждане, корпорации, а также правительственные ведомства (на местном, государственном и федеральном уровне) все больше стали выступать за альтернативные виды транспорта вместо ДВС. Личные убеждения людей, политика корпораций и политика правительств, а также меры государственного поощрения повлекли за собой существенное, всё увеличивающееся, проникновение на рынок транспортных средств, работающих на альтернативном виде топлива. Ниже давайте рассмотрим данный тренд. В Transportation Energy Data Book (Дэвис и соавт., 2015) содержатся данные, сведенные в таблицу, показывающие историю продаж гибридных видов автотранспорта и электромобилей, и сравнение их с продажей традиционных видов автотранспорта. В таблице 16.1, из Дэвис и соавт. (2015), представлены данные в приемлемой форме. Таблица рассматривает лишь «легкие» виды автотранспорта; Согласно Управлению Энергетической Информации США, легким видом автотранспорта считается автотранспорт с массой менее чем 8500 фунтов. Начавшийся в 1999 году общий тренд продаж на гибридные автомобили и автомобили с аккумуляторными батареями увеличивался, хотя в течение нескольких лет были и спады (2008–2011 гг. и 2014г.). Спад продаж гибридных авто с 2008 по 2011 годы был связан с развитием экономики в то время; спад в 2014 году вероятно был из-за падения цен на топливо (см. Раздел 17). Продажи автомобилей с аккумуляторными батареями монотонно увеличивались.

Таблица 16.1 История продаж гибридных авто и авто с аккумуляторными батареями[a]

	Продажи авто (в тыс.)			**Доля всего легкового транспорта (%)**	
Календарный год	**Гибриды**	**Подзаряжаемые**	**Все легковые авто**	**Гибриды**	**Подзаряжаемые**
1999	0.0	0.0	16 711	0.0	0.0
2000	9.4	0.0	17 164	0.1	0.0
2001	20.3	0.0	16 950	0.1	0.0
2002	36.0	0.0	16 675	0.2	0.0
2003	47.6	0.0	16 494	0.3	0.0
2004	84.2	0.0	16 737	0.5	0.0
2005	205.9	0.0	16 774	1.2	0.0
2006	251.9	0.0	16 336	1.5	0.0
2007	351.1	0.0	15 867	2.2	0.0
2008	315.8	0.0	13 015	2.4	0.0
2009	290.3	0.0	10 236	2.8	0.0
2010	274.6	0.3	11 394	2.4	0.0
2011	266.5	17.8	12 539	2.1	0.1
2012	434.6	53.2	14 219	3.1	0.4
2013	495.5	97.1	15 278	3.2	0.6
2014	452.2	118.9	16 171	2.8	0.7

а) Продажи авто с аккумуляторными батареями включают только сертифицированные для шоссейного пользования. Из этого списка исключены малые электрокары и электродвигатели пригородного использования.
Источник: Дэвис и соавт. (2014: 6–9)

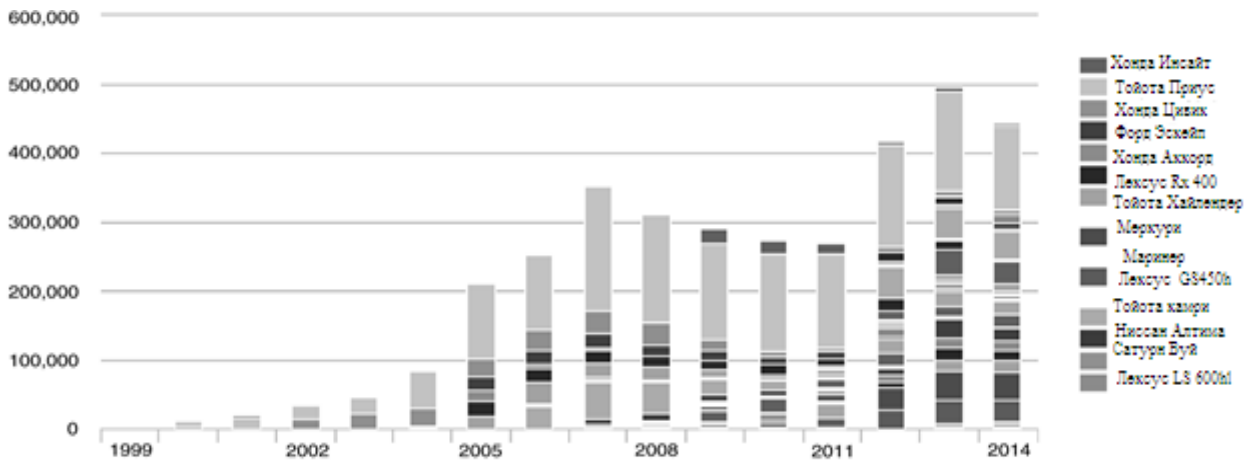


Рис. 16.11 История продаж гибридных авто и информация об их производителях. Источник: http://www.afdc.energy.gov/data/10301.

AFDC (http://www.afdc.energy.gov/data/) представляет исчерпывающие данные о всех аспектах альтернативных видов топлива, включая информацию о гибридных авто и электромобилях. Одним интересным аспектом является то, что AFDC составил информацию о продажах гибридных авто и электромобилей с детальным разбором по производителям. Рис. 16.11 иллюстрирует историю продаж гибридных видов авто по производителям. Некоторые позиции вызывают интерес по цифрам: (1) общее количество существенно соответствует данным, указанным в табл. 16.1, (2) Toyota Prius, который является постоянным хитом продаж, со значительной разницей каждый год, а также (3) огромное и всевозрастающее количество производителей, предлагающее гибридные виды автотранспорта.

На рис. 16.12 представлена, в принципе та же информация по автомобилям с аккумуляторными батареями, как указано на рис. 16.9 с гибридными авто. Количество проданных электромобилей с аккумуляторными батареями в сущности по порядку возрастания ниже чем гибридные виды автотранспорта, однако в годовом исчислении, в тренде по продажам авто с аккумуляторными батареями прослеживается с гибридными авто. С 2010 года возросло количество производителей, предлагающих электромобили с аккумуляторными батареями, но в отличие от продаж гибридных авто, ни одна из компаний не доминировала так, как гибридное авто Toyota Prius.

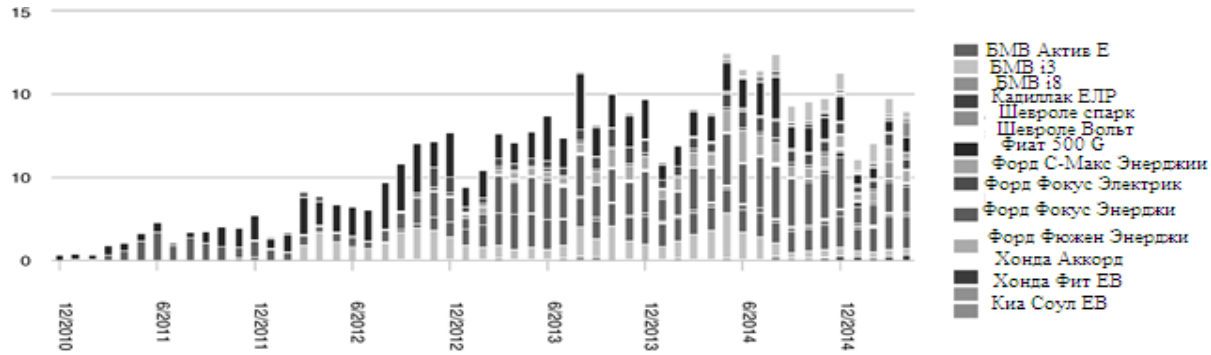


Рис. 16.12 Объем реализации электромобилей с аккумуляторными батареями и их производители. Источник: http://www.afdc.energy.gov/data/ 10567.

На веб-странице AFDC и Transportation Energy Data Book (Дэвис и соавт., 2015), можно узнать наиболее полный список моделей индивидуальных гибридных авто и электромобилей. Однако, веб-страница AFDC представляет интерактивные особенности, которые выделяют имеющуюся информацию. В следующем параграфе рассмотрим некоторые особенности этой веб-страницы.

Одной из интерактивных особенностей веб-страницы AFDC является возможность по категориям специфически выделять производителей и модели. Для поиска информации по специфическим видам автотранспорта можно пройти по ссылке на веб-страницу AFDC

http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_availability.html. Можно выбрать либо «Гибридный электромобиль», «Гибридный электрический транспорт с подзарядкой от сети», «Все электрические транспортные средства» или «Приводной электрический транспорт» можно открыть определенную страницу, содержащую список вариантов топлив и технологий, класса и типов, а также раскрывающее меню по “Manufacturer-Light Duty” а также “Manufacturer-Med & Heavy Duty.” Нижеследующая информация представляет варианты топлив и технологий, а также варианты по классам и типам:

Топливо/технология	**Класс/тип**
Все виды топлива	Все классы /типы
Биодизель (B20)	Седан/универсал
Этанол (E85)	Грузовое авто
Водородное топливо	Кроссовер
Сжиженный природный газ	Микроавтобус
Сжатый природный газ	Малотоннажный грузовик
СПГ-био	Спецавто/кабина с шасси
Пропан	Подметальная машина
Электричество	Мусоровоз
Гибрид с электричеством	Трактор (тягач)
Электрический гибрид	Маршрутный автобус
Гибрид-гидравлика	Междугородний автобус
СПГ-гибрид	Школьный автобус

Отмечены интересные варианты, в результате чего указаны виды автотранспорта, которые в итоге отвечают требованиям, затем представлены фото и краткое описание отличительных черт каждого из выбранных авто. К примеру, если выбираете «Гибридный электромобиль с аккумуляторной батареей» в качестве варианта топливо и технология и выбираете «Все классы и типы» из вариантов Класс и тип, тогда вернетесь к ссылке с 24 автотранспортами, которые имеются и соответствуют выбранной критерии. Для информации по Chevrolet Volt появится следующие данные:

Chevrolet Volt (2015)

Гибридный электромобиль с аккумуляторной батареей

Седан/универсал

Экономия топлива: 98 Mpge в смешанном городском электрическом цикле

Сертификат выбросов: Tier 2 Bin 3, LEV III **Двигатель** SULEV30**:** 1.4л. I4, 111 кВт электродвигатель

Коробка: Автомат

Каждый автомобиль снабжен фотографией в печатных изданиях фирмы. Как указано на рис. 16.9 и 16.10, выпуск гибридных авто и электромобилей в промышленном масштабе постоянно меняется, так что часто обновляемая веб-страница является ценным источником информации о транспортных средствах, работающих на альтернативных видах топлива.

Каково будущее гибридных авто и электромобилей? В 2012 году Минэнерго США инициировало программу использования электромобилей т.н. «EV Everywhere», предприняты усилия поддержки для роста применения авто с аккумуляторными батареями с целью достижения США к 2020 году в качестве флагмана и первой страной, производящей электромобили, которые могут быть доступны, как и традиционные виды автотранспорта в 2012 году.



Рис. 16.13 Динамика стоимости аккумуляторов PHEV и ЭМ и плотности энергии.
Источник: Howell (2014г.)

Подробно детали можно посмотреть пройдя по ссылке EV Everywhere на веб-странице http://energy.gov/eere/eveverywhere/about-ev-everywhere и в труде «EV Everywhere Grand Challenge Road to Success» (DOE, 2014). Исследования в труде EV Everywhere фокусируют внимание на перспективных видах батарей, системах электроприводов, а также легковесных материалах со следующими целями:

1) Снижение массы авто – снижение массы авто до примерно 30% (включая кузов, шасси, интерьер, и компоненты электроприводов).

2) Система электроприводов – снижение стоимости с $30/кВт в 2012 году до $8/кВт к 2020 году (1.4 кВт/кг, 4кВт/л, и КПД 95%).

3) Батарея – снижение стоимости с $500/кВт-ч в 2012 году до $125/кВт-ч в 2020 году (250 Вт-ч/кг, 400 Вт-ч/л, и 2кВт/кг).

Хранение и извлечение электрической энергии является экономически трудновыполнимым делом; на самом деле хранение и извлечение киловатт-часа электроэнергии является одной из наиболее дорогих стремлений в области разработки энергетики. См. Рассуждения о батареях в Разделе 9.4 с дополнительной информацией относительно вопросов хранения и извлечения электроэнергии. В EV Everywhere цели по батареям выглядят ошеломляюще; тем не менее, в этом направлении достигнут значительный прогресс. Рис. 16.13, взятый из обзора EERE по программе разработки перспективных батарей в 2014 году (Хоуэлл, 2014), представляет достигнутый прогресс в области стоимости и плотности энергии. Символы представляют различные размеры и мощности (с 14кВтч, PHEV, по 40 кВтч, EV) батарей, которые находятся в стадии разработки, стоимость определяется приблизительно из расчета 100 000 комплектов батарей производства в год.

Экономические расчеты по авто с аккумуляторными батареями и электромобилям определяются почти целиком стоимостью батарей, основными и заменяемыми. Плотность энергии аккумулирования батареи низкая, что означает, что необходима большая сеть батареи (и большей емкости) для хранения существенного количества электрической энергии. У батарей также ограниченный ресурс относительно циклов разрядки и перезарядки, поэтому требуется проведение замены батарей. По заключению Мюллера (2012), в то время как полные гибридные виды авто выгодны с экономической точки зрения, то совершенно полные электромобили таковыми не являются. На самом деле, этим Мюллер предполагает, что издержки на покупку и замену батареи, в расчете на одну милю пробега превышают стоимость, а также в расчете на одну милю пробега, необходимого электричества для перезарядки батареи. Расчеты Мюллера могли быть и преувеличены, но результаты говорят об одном: издержки на хранение батарей стимулируют экономические сдвиги насчет электромобилей.

Ежегодный Обзор Управления Энергетической Информации США за 2015г. (EIA, 2015) рассматривает сценарии развития и прогноз на будущее использование энергии и вероятность появления совершенных технологий.

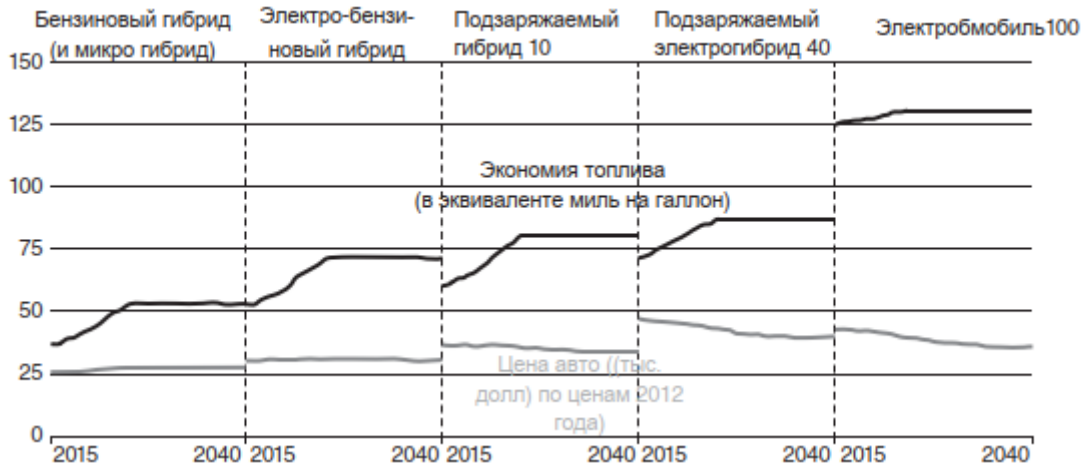


Рис. 16.14 Прогнозные данные Управления Энергетической Информации США по гибридным и автомобилям с гибридными силовыми установками до 2040г.
Источник: Управление Энергетической Информации США (2015).

Одной из рассматриваемых тем является гибридные виды авто и электромобили. Стоимость автомобиля и экономия топлива представлены на рис. 16.14 с 2015 по 2040 годы по пяти видам разных авто с альтернативными видами топлива. Гибридное авто на бензине является умеренным видом гибридного авто с мощностью ДВС более чем у авто с электродвигателем, в то время как гибридное авто на электрическом и бензиновом двигателе является полностью гибридным авто. Гибридные авто с подзарядкой от электросети как PHEV10 и PHEV40 являются видами автотранспорта диапазоном пробега 10 миль и 40 миль соответственно, а пробег электромобиля (EV100) составляет 100 миль. Планируется, что все пять различных видов автотранспорта будут усовершенствованы для экономии топлива (выраженные в милях на галлон топлива) с 2015 года примерно по 2025 год, когда значения в милях за галлон топлива по существу прочно войдет в обиход. Ожидается, что электромобиль EV100 будет менее подвержен усовершенствованию в области экономии топлива. В авто с аккумуляторными батареями будут улучшены показатели экономии топлива, поскольку будут увеличены показатели пробега в электрическом режиме, с пробегом EV100 более чем 125 миль/гал (эквивалентно). Стоимость авто с бензин-электрическим и электро-бензиновым типами предполагает демонстрацию лишь умеренного повышения (при неизменном курсе доллара США) с 2015г. по 2040г. Ожидается, что стоимость автомобилей с аккумуляторными батареями (PHEV10, PHEV40, и электромобили) будет дороже чем авто без аккумуляторных батарей, однако снизится с 2015г. по 2040г. Также, предполагается, что стоимость PHEV40 будет дороже, чем PHEV10, главным образом из-за необходимости большей батареи для PHEV40. Ожидается, что стоимость EV10 будет несколько ниже, чем PHEV40 в течение изученного времени; даже несмотря на необходимость в большей батарее, EV100 не имеет ДВС, упрощены требования к управлению.

Однако, Управление Энергетической Информации США отмечает, что топливо-экономичные технологии поспособствуют автопроизводителям удовлетворять требованиям по стандартам на пробег в милях на один галлон и выбросы автомобилями, которые преимущественно работают на бензиновом двигателе. Несмотря на прогнозы снижения цен на некоторые виды автотранспорта с электродвигателями, не улучшается ситуация с их относительной рентабельностью. Управление Энергетической Информации США подтверждает, что причины покупки авто могут различаться, но не всегда из-за развития экономики, поскольку более широкий рынок реализации потребует более приемлемые виды использования топлив. Согласно прогнозов Управления Энергетической Информации США до 2040 года (используя историю и или более вероятно прогнозируемое развитие цен на топливо), рентабельность полностью гибридных видов авто и срок окупаемости составит 13 лет, срок окупаемости PHEV10 составит 27 лет, PHEV40 46 лет, а EV100 составит 19 лет. Однако, при

условии существенного повышения цен на бензин с 2015г. по 2040г., срок окупаемости сократится, и экономика гибридных видов авто и авто с аккумуляторными батареями существенно улучшится. Подробные данные приведены в EIA (2015: 11).

Учитывая предшествующие пояснения на основе инициатив EV Everywhere и прогнозов Управления Энергетической Информации США, что делать с оставшимися гибридными видами авто и электромобилями? Мюллер (2012) приводит очень весомый аргумент в пользу полностью гибридных видов авто, однако считает, что автомобили с аккумуляторными батареями и электромобили нецелесообразны с экономической и возможно экологической точек зрения. Он отмечает, что на данный момент использование бензина в США автомобилями способствуют лишь около 1/40 °C повышению температуры, и если Управления Энергетической Информации США прогнозирует 60% случай увеличения количества автомобилей, то за следующие 50 лет повышение температуры составит лишь 1/25 °C, возможно ниже, чем если будут приняты более ужесточенные меры по пробегу авто. В результате замена бензина по экологическим причинам является малозначительным. Более того, если авто с аккумуляторными батареями и электромобили используют электроэнергию, генерируемую ископаемым топливом, то любое суммарное снижение выбросов и парниковых газов сведется к нулю.

Прентис (2015), приходит к некоторым другим заключениям, чем Мюллер (2012), и возражает, что из-за изменений инфраструктуры и большей зависимости от возобновляемых источников (ветер, солнце и особенно биомасса), США могли бы достичь устойчивую экономику в области энергетики с меньшей зависимостью от нефти. Prentiss подтверждает важность и сложность аккумулирования энергии, но считает, что технологии позволят разрешить вопросы аккумулирования энергии. Это утверждение дает ей возможность выбора электромобиля в качестве авто для персонального перемещения, а гибридные виды авто могут использоваться в качестве транспорта для перемещения в городском режиме.

Большинство всех производителей автомобилей готовятся к будущему, которое будет тесно связано с развитием гибридных видов авто и электромобилей. К примеру, компания Форд анонсировала в декабре 2015 года, что компания инвестировала $4.5 млрд. в разработку электрифицированных транспортных средств (гибриды и электромобили). Подробности по ссылке на веб-странице компании Форд (https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2015/12/10/ford-investing-4-5-billion-in-electrified-vehicle-solutions.html). Ключевые элементы включают следующие сведения: (1) $4.5 млрд. инвестиций к 2020 году, (2) разработка новой модели электромобиля Ford Focus с пробегом на расстояние 100 миль и 30 минутной перезарядкой (80%), (3) дополнительное включение к 2020 году 13 новых электрифицированных авто к их портфелю продукции, а также (4) расширение присутствия их электрифицированных транспортных средств на международном рынке. Форд также объявил, что также в программу разработки электрифицированных силовых агрегатов будут привлечены 120 новых инженеров. Другие основные производители автомобилей в США и в мире также анонсировали аналогичные планы и существенно инвестируют в разработку гибридных авто и электромобилей.

16.4 Заключение

В этом разделе были рассмотрены и разобраны гибридные виды автотранспорта и электромобили. Даже на конец 2016 года ситуация с вытеснением автотранспорта на бензиновом двигателе автомобилями с гибридными силовыми установками и электромобилями все еще остается неопределенной. Т.н. инициатива EV Everywhere имеет свою приоритетную цель по развитию технологии, которая могла бы привести к экономической конкурентоспособности автомобилей с гибридными силовыми установками и электромобилей с теми же автомобилями с бензиновыми двигателями. А эта задача не из легких. Вероятно, количество автомобилей с полной гибридной силовой установкой в дальнейшем будет расти и завоевывать рынки. Таким образом, прогнозируемые цены и наличие бензина, а также предписания на государственном уровне, определят глубину проникновения на рынки гибридных видов авто, и в особенности автомобилей с гибридными силовыми установками и автономных электромобилей.

Литература:

Davis, S.C., Diegel, S.W., and Boundy, R.G. (2015) Transportation Energy Data Book, Edition 34. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN. http://cta.ornl.gov/data/index.shtml (accessed October 26, 2016).

DOE (2014) EV Everywhere Grand Challenge: Road to Success. DOE/EE-1024. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/eveverywhere_road_to_success.pdf (accessed October 26, 2016).

Ehsani, M., Gao, Y., and Elmadi, A. (2010) Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles Fundamentals, Theory, and Design, 2nd edn. CRC Press, Boca Raton, FL

EIA (2015) Annual Energy Outlook 2015 with Projections to 2040. DOE/EIA-0383(2015). http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf (accessed October 26, 2016).

Fuhs, A.E. (2009) Hybrid Vehicles and the Future of Personal Transportation. CRC Press, Boca Raton, FL.

Howell, D. (2014) Overview of the DOE Advanced Battery R&D Program. http://energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/battery_rd_amr_plenary_june_2014_final.pdf (accessed October 26, 2016).

Kirsch, D.A. (2000) The Electric Vehicle and the Burden of History. Rutgers University Press, Piscataway, NJ.

Mi, C., Abul Masrur, M., and Gao, D.W. (2011) Hybrid Electric Vehicles Principle and Applications with Practical Perspectives. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Muller, R.A. (2012) Energy for Future Presidents: The Science behind the Headlines. Norton, New York.

Prentiss, M. (2015) Energy Revolution: the Physics and the Promise of Efficient Technology. Harvard University Press, Cambridge, MA.

17.

Технология гидроразрыва: нефть, природный газ и новая реальность

17.1. Введение

Управление энергетической информации США (EIA) определяет гидроразрыв пласта (http://www.eia.gov/tools/glossary/index.cfm?id=H) как «гидроразрыв пласта на глубине под давлением жидкости. Гидравлический разрыв пласта на глубине достигается путем закачки воды в скважину при очень высоком давлении».

В нефтегазовой промышленности, гидравлический разрыв пласта обычно называется термином «fracing» (гидроразрыв). В средствах массовой информации гидроразрыв пласта обычно называется «fracking» и, как правило, обозначает все этапы, связанные с усиленным или стимулированным извлечением нефти/газа, которые включают гидравлический разрыв пласта. Практика гидравлического разрыва породила значительное количество противоречий, и стороны «за» и «против» яростно и эмоционально защищают свои позиции. Многие в нефтегазовой отрасли считают фрекинг (fracking) уничижительным термином и предпочитают фракционирование для этапа гидравлического разрыва пласта, стимулирующего пласты. Книги и газеты часто избегают противоречий, просто используя термин «разрыв пласта». В книге Ахмеда и Михана (2012), в одном из наиболее уважаемых учебников по разработке пластов, в указателе нет ни термина «fracing», ни «fracking», и авторы обычно используют термин «гидравлический разрыв» – хотя в некоторых случаях (не в указателе) используется термин «frac».

Когда летом 2009 года было написано предисловие к первому изданию этого учебника, розничные цены на газ (87 октанов) доходили до 4,00 долл. США за галлон. Как было указано, весной 2016 года розничные цены на газ были дешевле на 2 долл. США за галлон. Что повлияло на такое непредвиденное падение цен? Кратким ответом будет усиленная добыча нефти/газа с использованием гидравлического разрыва пласта и выявление значительных ресурсов природного газа, в том числе доступных в результате разрыва пласта, в США. Рис. 17.1 и 17.2 иллюстрируют, как гидроразрыв привел к выявлению действительных запасов сырой нефти и природного газа, значительно больше того, что ожидалось в конце двадцатого века. В 2013 году действительные запасы нефти были близки к действительным запасам 1973 года. Что касается природного газа, то в 2013 году действительные запасы были на 40% выше, чем в 1973 году. Веббер (2013) обсуждает недавнее резкое увеличение действительных запасов, а также методы повышения нефте- и газоотдачи пласта и приходит к выводу о сближении рыночных сил, государственной политики и технологических инноваций для получения неожиданных результатов. В действительности, возможно, с оптимистичным взглядом на запасы ископаемого топлива, BP (British Petroleum) недавно заявила, что в мире вряд ли скоро кончится нефть (Reuters, 2015). Целью данной главы является изучение обстоятельств, которые привели к дополнительным действующим запасам, пониманию, что такое гидроразрыв пласта при стимулированной добыче нефти и природного газа, и определение возможных энергетических перспектив.

17.2 Нетрадиционная нефть и газ

Данный раздел начинается с нескольких определений, используемых в нефтяной и газовой промышленности. Нижеуказанные определения были адаптированы из глоссария OBOC (http://www.eia.gov/tools/glossary/index.cfm):

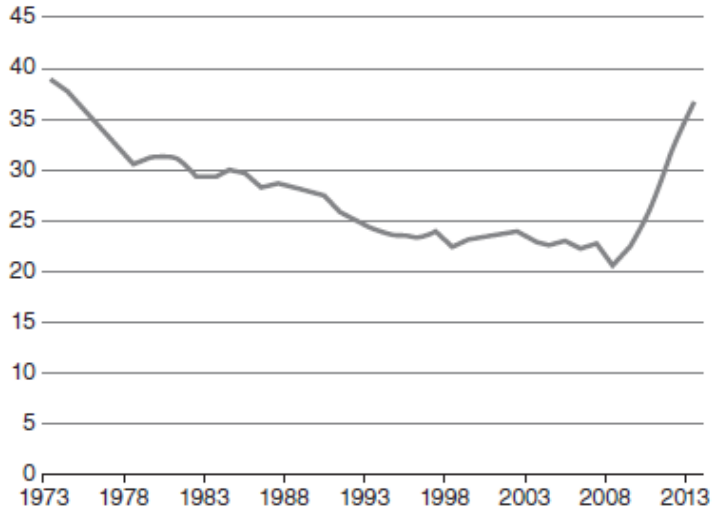


Рис.17.1. История действующих запасов нефти в США (10^9 баррелей).
Источник: http://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserves/.

- *Традиционная нефть и природный газ.* Сырая нефть и природный газ добываются скважиной, пробуренной в геологический пласт, в котором пластовые и жидкостные характеристики позволяют нефти и природному газу легко течь в ствол скважины.
- *Нетрадиционная нефть и газ.* Общий термин для нефти и природного газа, которые производится средствами, не соответствующими критериям обычной добычи. В литературе часто встречается термин «UOG» и обозначает нетрадиционную нефть и газ. Примечание: то, что в любой момент времени квалифицируется как «нетрадиционное», представляет собой сложную интерактивную функцию характеристик ресурса, доступных технологий разведки и добычи, текущей экономической среды, а также масштаба, частоты и продолжительности добычи из ресурса.
- *Месторождение.* Скопления нефти и газа, имеющие сходные геологические, географические и временные свойства, такие как исходная порода, путь движения, время, механизм захвата и тип углеводородов. Месторождение часто используется для обозначения мест накопления природного газа – сланцевое месторождение природного газа.

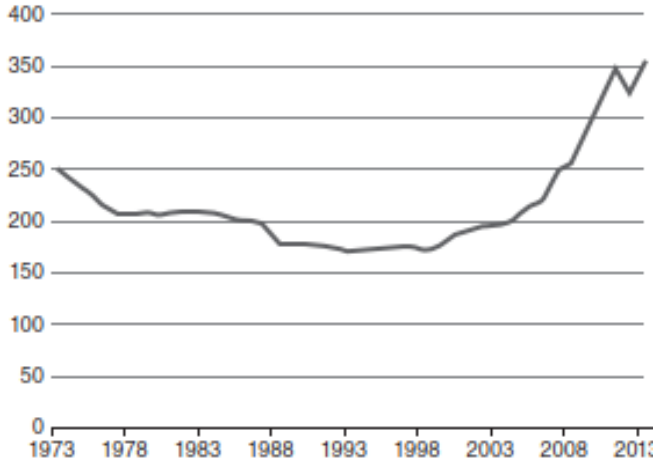


Рис.17.2. История США по разведке запасов природного газа (1012 кубических футов).
Источник: http://www.eia.gov/naturalgas/crudeoilreserved/.



Рис.17.3. Иллюстрации традиционного и нетрадиционного газа.
Источник: http://www.eia.gov/oil_gas/natural_gas/special/ngresources/ngresources.html.

• *Нефть из плотных пластов.* Нефть, добываемая из нефтеносных пластов с низкой проницаемостью, которые необходимо гидравлически разрывать для получения нефти по коммерческим ставкам. Сланцевая нефть – это разновидность трудноизвлекаемой нефти.

Рис.17.3 помогает понять различия между традиционной и нетрадиционной нефтью и газом. Традиционная извлекается путем бурения в геологических формациях, которые имеют достаточно большую степень проницаемости, где газ может быть добыт традиционными методами. Нетрадиционный газ добывается из пластов с очень низкой проницаемостью путем гидроразрыва пласта и добычи с использованием нетрадиционных технологий. Раздел 17.3 исследует нетрадиционный гидроразрыв пласта. Газ, добываемый традиционными способами и не связанный со слабопроницаемым пластом, как в верхнем левом углу рис. 17.3, называется традиционным, природным газом чисто газовой залежи, не содержащей нефть. В зависимости от геологической структуры, как в средней левой части рис. 17.3, газ может быть извлечен с использованием традиционных методов из участков с высокой проницаемостью из иного пласта с низкой проницаемостью (например, сланца); такой газ называют традиционным, нефтяным промысловым газом, чтобы отличать его от традиционного природного газа чисто газовой залежи.

Несмотря на то, что сланцевые залежи не нужны для добычи нетрадиционной нефти/газа, ожидается, что большая часть таких добыч будет происходить в сланцевых пластах. Наличие сланцевых залежей, вероятно, определит потенциал для добычи нетрадиционной нефти/газа с использованием гидравлического разрыва пласта. Рис.17.4 иллюстрирует распространенность сланцевых залежей в континентальной части США и показывает текущие, а также предполагаемые местоположения, пригодные для гидравлического разрыва пласта. Добыча природного газа из различных сланцевых залежей, показанная на рис. 17.4, в США с 2000 года, обобщена на рис. 17.5. Увеличение добычи сланцевого газа с 2000 года удивительно и является причиной увеличения добычи природного газа в США.

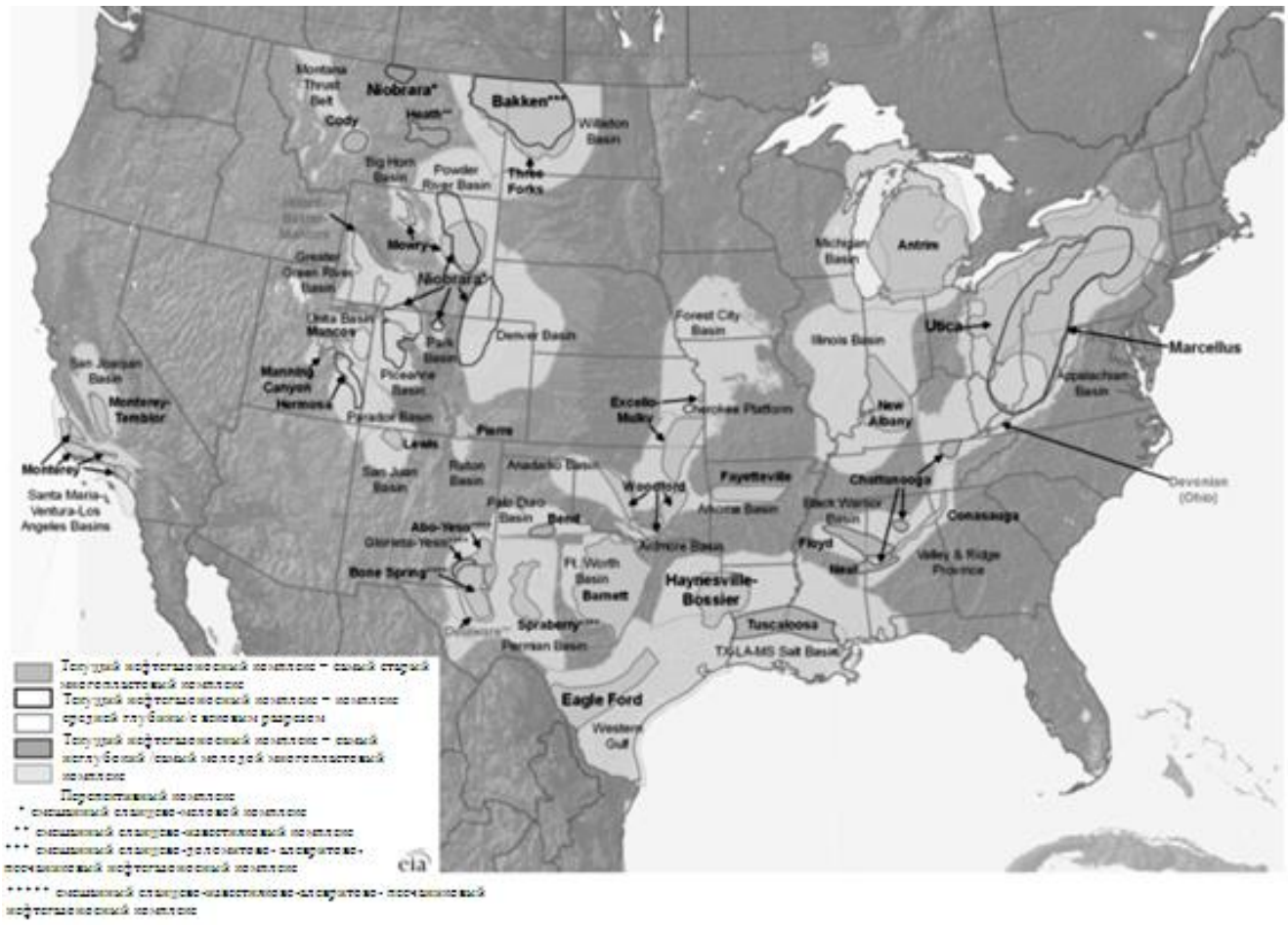


Рис.17.4. Сланцевые месторождения в континентальной части США.
Источник: http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=20852.

Сланцевые месторождения в мире, включая США, выделены на рис. 17.6. Оценки доказанных запасов нефти и газа из плотных пластов довольно высокие, и такие запасы в основном отвечают за неожиданные перспективы запасов ископаемого топлива. Далее мы рассмотрим концепции разработки пласта и рассмотрим гидравлический разрыв пласта.

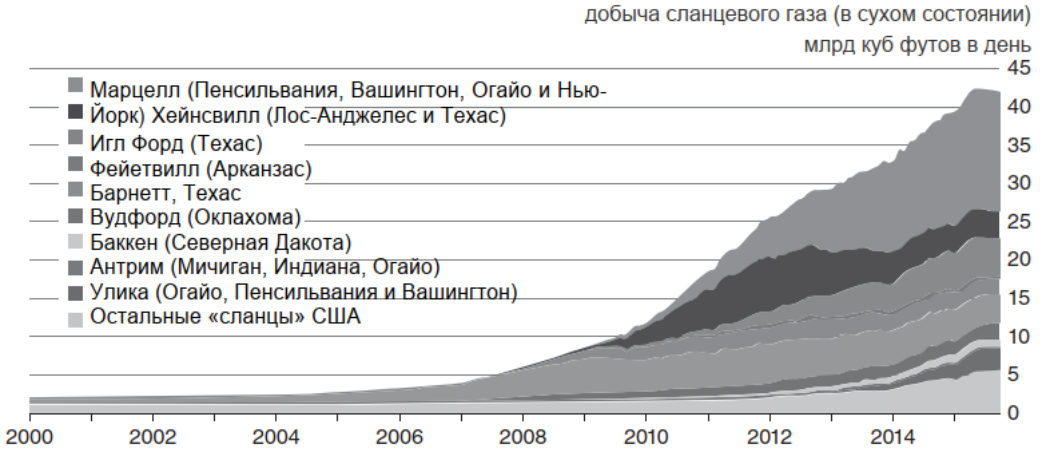


Рис. 17.5. История добычи сланцевого газа в США.
Источник: http://www.eia.gov/energy_in_brief/article/shale_in_the_united_states.cfm.

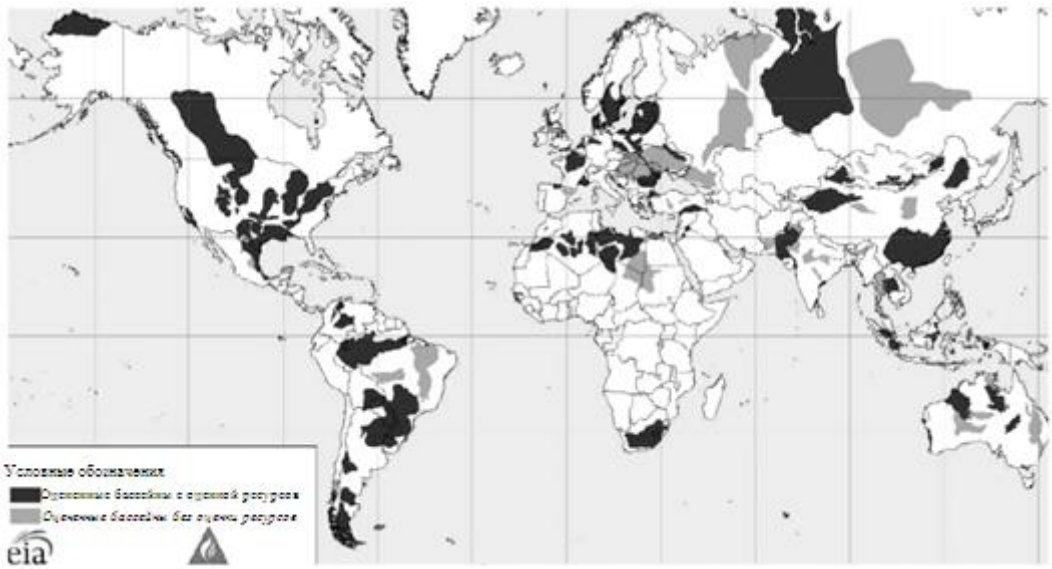


Рис.17.6. Сланцевые месторождения в мире. *Источник*: ОВОС (2013: 5).

17.3 Концепции технологии нефтеотдачи

Прежде чем обсуждать гидроразрыв пласта, необходимы несколько важных особенностей разработки пласта. Разработка пластов стала очень сложной, очень технической и очень эффективной, особенно в сочетании с технологиями горизонтального бурения и гидроразрыва пласта. Имеется множество отличных учебников по разработке пластов, а также ряд веб-сайтов. Часто даются ссылки на Ахмеда и Михана (2012), а также и Экономидес и соавт.. (2013); изучение любого из них подтвердит сложность разработки пласта. Поскольку большая часть добычи нефти и газа связана с пористыми геологическими образованиями, хорошим началом будет утверждение Дарси (в 1856 году), часто называемое законом Дарси в отношении потока через пористые среды:

$$Q = -A\frac{k}{\mu}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} \qquad (17.1)$$

где Q – объемная скорость потока, A – площадь поперечного сечения потока, k – проницаемость, μ – вязкость и dp/dx – перепад давления. Уравнение (17.1) справедливо для ламинарного, стационарного, несжимаемого и однородного течения в пористой среде. На рис. 17.7 показана взаимосвязь между переменными и условным обозначением в декартовой системе координат.

Однородность размеров требует, чтобы единицы проницаемости были *квадратом длины*; единицей измерения в системе СИ по проницаемости является квадратный метр, но более практичной является дарси. По определению, дарси – это проницаемость, которая приводит к объемной скорости потока 1 $см^3$ на площади 1 $см^2$ с перепадом давления 1 атм/см и вязкостью 1 сП. *Миллидарси* (мд) (1 д =1000 мд) – это обычно используемая единица измерения проницаемости, особенно в нефтегазовой промышленности, а коэффициент пересчета из единиц СИ в дарси составляет 1 д =9,869 х $10^{-13}м^2$. Интересно, что множественное число дарси – это «дарси». «Руководство по сланцевому газу» (Энергетический институт, 2015) содержит убедительный обзор значений проницаемости, связанных с гидроразрывом пласта. Рис.17.8 адаптирован из их подхода. Проницаемость может быть как высокой – от 100 000 дней для гравия, так и низкой – до 0,0001 мкм для гранита. Скорость потока, предсказанная законом Дарси (уравнение (17.1)), прямо пропорциональна проницаемости k. Переход от воспроизведения в 1,0 мд к воспроизведению в 0,01 мд означает, что скорость потока снижается на 99%. Таким образом, нам необходим гидроразрыв пласта в случаях месторождений с низкой проницаемостью.

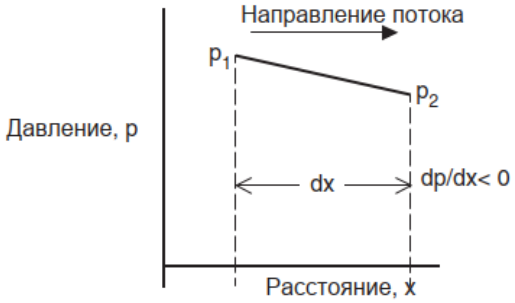


Рис.17.7. Толкование закона Дарси

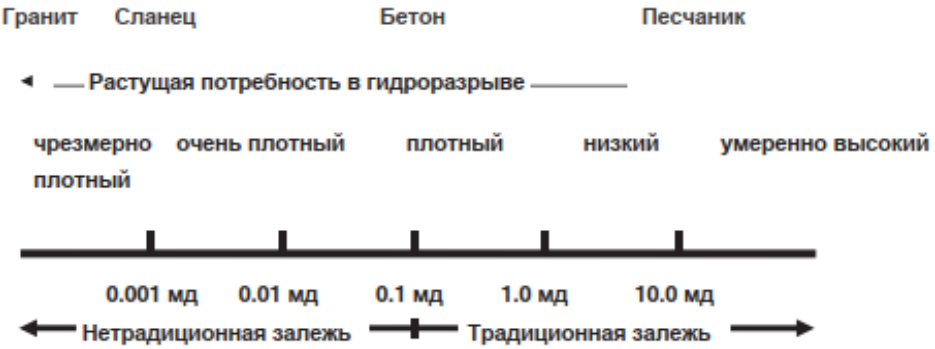


Рис.17.8 Шкала относительной проницаемости.

Разработка месторождений – сложная тема. Ахмед и Михан (2012) классифицируют сложность потоков пласта, рассматривая четыре атрибута: (1) типы потоков, (2) режимы потоков, (3) геометрия пласта и (4) фазы жидкости. Каждый атрибут дополнительно подразделяется следующим образом:

1) Типы жидкостей в пласте
   a) несжимаемая
   b) слегка сжимаемый
   c) сжимаемый
2) Режимы потока
   a) устойчивое состояние
   b) неустойчивое состояние
   c) псевдоустройчивое
3) Геометрия пласта
   a) радиальные потоки
   b) линейные потоки
   c) сферические и полусферические потоки
4) Количество жидкостей в пласте
   a) однофазный
   b) двухфазный
   c) трехфазный.

В работах Ахмеда и Михана (2012) и Экономидес и соавт.. (2013), несколько сотен страниц посвящены деталям прошлого применительно к разработке месторождений. Эти детали выходят далеко за рамки этой книги; однако изучение двух примеров полезно как для понимания некоторых потоков, так и для обсуждения единиц, обычно используемых в нефтегазовой промышленности.

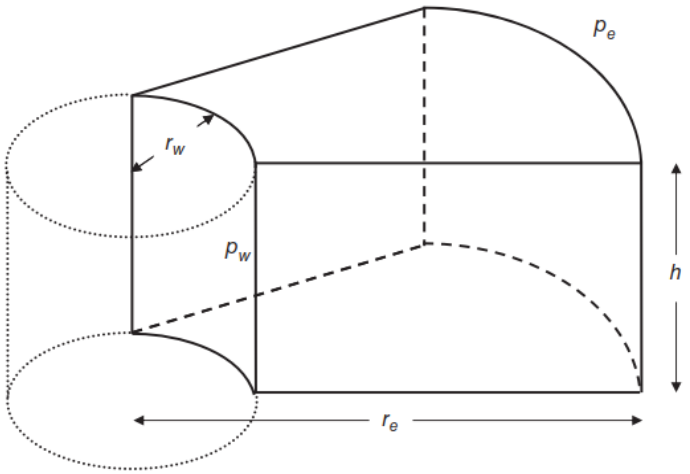


Рис.17.9 Геометрические переменные для сценария радиального потока.

Рассмотрим радиальный поток несжимаемой жидкости; геометрия показана на рис. 17.9. Ахмед и Михан (2012), начиная с закона Дарси, разрабатывают следующее выражение для объемной скорости потока для радиального потока несжимаемой жидкости:

$$Q_o = \frac{0.007\,080\,kh}{\mu_o B_o} \frac{p_e - p_w}{\ln(r_e/r_w)} \tag{17.2}$$

где 0,007 080 необходимо для согласования «полевых единиц» с обычными единицами. Переменные в уравнении (17.2) с соответствующими единицами поля являются следующими:

Q_o Скорость потока нефти (STB/день – баррель в стандарнтых услоиях стоимостью 42 галлона США, жидкий)

B_o Коэффициент нефтеобразования (баррель/ в стандарнтых услоиях) – отношение объема нефти в условиях залежи к объему на поверхности (резервуар).

k проницаемость (мд)

μ_o вязкость нефти (сП)

h толщина пласта (футы)

p_e давление на границе области дренажа (фунт/кв.дюйм)

p_w давление в стволе скважины (фунт/кв.дюйм)

r_e радиус зоны дренирования (фут)

r_w радиус ствола скважины (фут).

Радиус дренирования r_eопределяется площадью A скважины:

$$r_e = \sqrt{\frac{43\,560A}{\pi}} \tag{17.3}$$

где A - расстояние между колодцами в акрах. Пример является целесообразным.

Пример 17.1

Нефтяная скважина обладает следующими свойствами:

k = 100 мдч h=15 футов μ_o =2,5 сП A = 50 акров

B_o =1,25 баррелей встанд.условиях p_e = 2500 фунт/кв. дюйм p_w =3дюйма= 0,25 фут

p_w = 1800 фунт/кв. дюйм

Установим скорость нефти.

Решение: радиус дренирования рассчитывается следующим образом:

$$r_e = \sqrt{\frac{43\,560A}{\pi}} = \sqrt{\frac{43\,560 \times 50}{\pi}} = 832.6 \text{ ft}$$

Расчетная скорость потока:

$$Q_o = \frac{0.007\,080kh}{\mu_o B_o}\frac{(p_e - p_w)}{\ln(r_e/r_w)} = \frac{0.007\,080 \times 100 \times 15}{2.5 \times 1.25} \times \frac{2500 - 1800}{\ln(0.25/832.6)}$$
$$= 294.3 \frac{\text{Баррель в стадартн.условиях}}{\text{день}}$$

Значения, используемые в этом примере, являются типичными для пластовых условий и представляют разумные результаты. Особо следует отметить использование «полевых единиц» в выражениях.

Пример 17.1 представляет условия, типовые для добычи нефти. Но также интерес представляет извлечение газа. Объемная скорость потока газа для радиального потока сжимаемой жидкости с использованием «метода квадрата давления» разработана на основе закона Дарси в работе Ахмеда и Михана (2012) и выглядит следующим образом:

$$Q = \frac{kh}{1422T(\mu_g Z)_{\text{Ср}}}\frac{p_e^2 - p_w^2}{\ln(r_e/r_w)} \qquad (17.4)$$

где цифра 1422 необходима для согласования «полевых единиц» с обычными единицами. Переменные в уравнении (17.4) с соответствующими полевыми единицами следующие:

Q_o Скорость потока газа (млн станд.куб.фут/день)

k проницаемость (мд)

h толщина пласта (футы)

p_e давление на границе области дренажа (фунт/кв.дюйм)

p_w давление в стволе скважины (фунт/кв.дюйм)

μ_s вязкость газа (сП)

Z коэффициент сжимаемости газа (безразмерный)

T температура (°R)

r_e радиус зоны дренирования (фут)

r_w радиус ствола скважины (фут).

Z - коэффициент сжимаемости, который необходим для расчета высоких давлений в уравнении состояния, $p=Z\rho RT$. Переменная $(\mu_g Z)_{avg}$ оценивается при среднем давлении, определяемом $\overline{p} = [(p_w^2 + p_e^2)/2]^{1/2}$; отсюда обозначение метода возведения в квадрат.

Пример 17.2, принятый из работы Ахмеда и Михана (2012), представлен, чтобы проиллюстрировать использование уравнения (17.4) в типовом расчете пласта с использованием полевых единиц и дать представление о численности участвующих величин.

Пример 17.2

Оценим скорость потока из газового пласта со следующими характеристиками:

k = 65 мд h= 15 фут T = 600 °R

r_e = 1000 фут $p_{e=}$ 4400 фунт/кв.дюйм r_w =3 дюйм =0,25 фут

p_w=3600 фунт/кв.дюйм

Ахмед и Михан (2012) предоставляют характеристики коэффициента вязкости и сжимаемости для пластового газа при 600°R; см. таблицу 17.1.

Таблица 17.1 Коэффициент вязкости и сжимаемости.

p(фунт/кв.дюйм)	мк(сП)	Z
0	0.01270	1.000
400	0.01286	0.937
800	0.01390	0.882
1200	0.01530	0.832
1600	0.01680	0.794
2000	0.01840	0.770
2400	0.02010	0.763
2800	0.02170	0.775
3200	0.02340	0.797
3600	0.02500	0.827
4000	0.02660	0.860
4400	0.02831	0.896

Решение: среднее давление

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{p_w^2 + p_e^2}{2}} = \sqrt{\frac{(3600_{\text{фунт}})^2 + (4400_{\text{фунт}})^2}{2}} = 4020 \text{ фунт/кв. дюйм}$$

Произведение $(\mu_g Z)_{avg}$ при 4020 фунт/кв. Дюйм определяют путем интерполяции значений μ и Z из таблицы 17.1. При 4020 фунт/кв.дюйм, 0,0260 67 сП и Z 0,08618, так что

$$(\mu_g Z)_{\text{средн}} = 0.026\,67 \text{ cP} \times 0.8618 = 0.022\,98 \text{ сП}$$

Расчет расхода

$$Q = \frac{kh}{1422T(\mu_g Z)_{\text{средн}}} \frac{p_e^2 - p_w^2}{\ln(r_e/r_w)} = \frac{65 \times 15}{1422 \times 600 \times 0.02298} \times \frac{4400^2 - 3600^2}{\ln(1000/0.25)}$$

$$= 38\,372 \frac{\text{Млн.ст.куб.фут}}{\text{день}}$$

Подход на основе квадрата давления, представленный в уравнении (17.2), обычно считается точным для давлений менее 2000 фунтов на квадратный дюйм, но результаты этого примера находятся в пределах примерно 2% от гораздо более сложного точного решения. По уравнению (17.2) и (17.4) это хорошо видно. Ряд наблюдений уместен для примеров 17.1 и 17.2: 1) единицы отдельных величин не

учитываются при расчете, поскольку величины «0,007 080» и «1422» косвенно предусмотрены единицами поля; 2) единицами для всех величин должны быть полевые единицы, соответствующие исходной разработке; 3) величины могут быть большими; 4) должна быть доступна важная информация (например, μ, Z, k, B_o), специфичная для заданного объекта; и 5) предположения важны.

На рис. 17.8 проницаемость 100 мд и 65 мд считалась бы «большой» и соответствовала бы пластам, для которых были бы уместны обычные процедуры извлечения. Однако в примере 17.2, если бы проницаемость была 0,065 мд, в тысячу раз меньше, то добыча из такого плотного пласта составила бы лишь 38 млн станд.куб.фут/день (все остальные параметры были бы одинаковыми), число, столь малое, чтобы быть экономически неосуществимым. Гидравлический разрыв пласта был бы необходим для экономичного извлечения газа из такого плотного пласта.

17.4 Добыча нефти и газа из непроницаемых нефтегазоносных комплексов пород

Гидроразрыв пласта - только часть причины, по которой извлечение нефти/газа из плотных комплексов стало экономически целесообразным. Веббер (2013) определил технологические инновации, рыночные силы и государственную политику как компоненты недавнего увеличения добычи нефти и газа и доказанных запасов. Возможно, самое важное технологическое новшество было сделано нефтяниками Джордж П. Митчел (Кроуфорд, 2013) в 1980-х годах, когда он объединил две существующие технологии, горизонтальное бурение и гидроразрыв пласта, чтобы сделать добычу нефти и газа экономически осуществимой из плотных комплексов пород. Важность горизонтального бурения обусловлено тем, что вместо бурения нескольких скважин в относительно неглубоком комплексе, которое будет «окупаемым», горизонтальное бурение позволяет пробурить одну скважину, а нескольким горизонтальным стволам расшириться на тысячи футов, открывая гораздо большую добычу для нефти и добычи газа из одной скважины. Гидроразрыв пласта был разработан вскоре после Второй мировой войны как метод «стимулирования» добычи нефти из обычных нефтяных пластов. Обычно при гидроразрыве вода (с некоторыми добавками) закачивается при давлениях, достаточно высоких для разрыва нефтеносных пластов, что приводит к дополнительной добыче. Как сочетание горизонтального бурения и гидроразрыва приводит к образованию нефти/газа из плотных комплексов?

Ряд правительственных учреждений, компаний и ассоциаций обсуждают этапы или последовательности, необходимые для добычи нефти/газа из плотных условий. Институт энергетики (2015), NETL (2011), Тюркот и соавт. (2014), Кроуфорд (2013), Грейвз (2012) и Белл (2013), а также ряд веб-сайтов провели консультации при разработке последующего обсуждения. Различные источники упоминаются в разных источниках, но все они охватывают одни и те же процедуры, только с некоторыми процедурами на разных этапах. Шесть этапов являются общими; Шестиэтапная процедура добычи нефти/газа из плотных комплексов включает в себя:

1) строительство скважины
2) горизонтальное бурение
3) заканчивание скважины и стимуляция
4) проверка потока
5) долгосрочная добыча
6) завершение и освоение проекта.

Каждая из этих тем будет обсуждаться. На рис. 17.10 представлена иллюстрация с важными особенностями, связанными с типичной скважиной с гидравлическим разрывом и горизонтальным следом в плотном геологическом пласте.

Начиная с верхней части рисунка, представляющего поверхность, заметны указатели частной и муниципальной водяных скважин, обозначаемых аббревиатурой «USDW» (подземный источник питьевой воды). USDW должен содержать менее 10 000 мг/л растворенных твердых веществ. Начальная вертикальная скважина проиллюстрирована и переходит в горизонтальную скважину в интересующем месторождении. Разделяющая поверхность и горизонтальное отверстие представляют собой несколько геологических слоев (простирающихся на глубину многих тысяч футов), многие из которых имеют очень низкую проницаемость, которая эффективно блокирует любой поток жидкостей

из комплекса на поверхность. В стволе скважины вблизи поверхности зацементированные на месте стальные обсадные трубы выравнивают ствол скважины и предотвращают какое-либо движение жидкостей для гидроразрыва, загрязняющие USDW. Ствол скважины также облицован стальными обсадными колоннами. Горизонтальный сегмент ствола скважины иллюстрирует результаты гидравлического разрыва пласта, показывая трещины в сланцевом комплексе на этом фото.

1) *Строительство скважин.* Площадка скважины требует около 5 акров и подъездной дороги, которая, вероятно, будет иметь большой трафик. Скважина пробурена поэтапно, каждый диаметр меньше и

2) глубже предыдущего, образуя бурильную колонну.

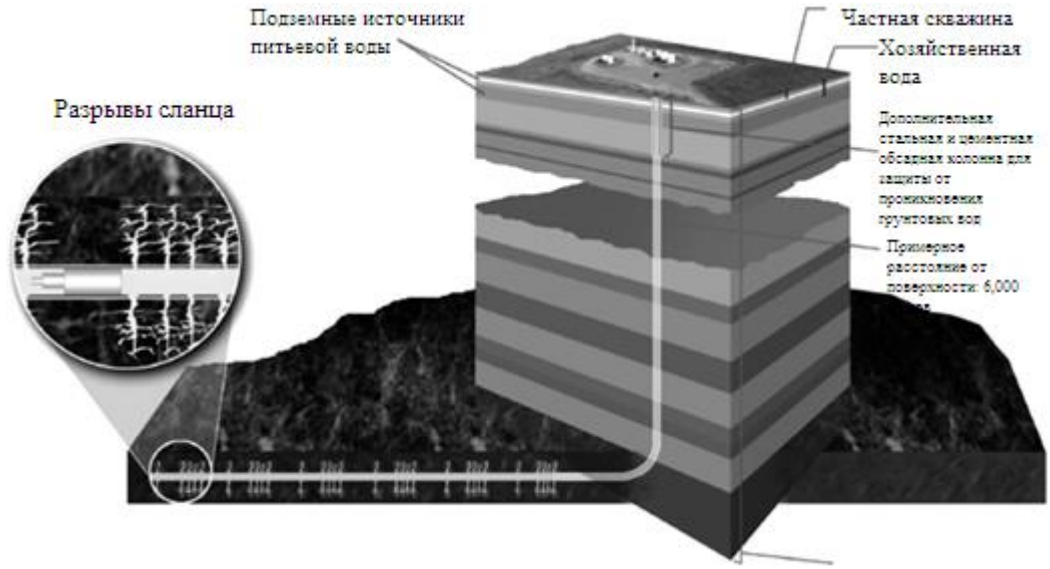


Рис. 17.10 Особенности, связанные с типичной скважиной с гидравлическим разрывом и горизонтальным следом**.** *Источник: NETL (2011)*

В процессе бурения буровой «раствор» циркулирует через бурильную колонну обратно на поверхность; грязь переносит буровой шлам обратно на поверхность и охлаждает буровое долото. На каждом этапе обсадная колонна, проходящая к месту бурения, состоит из стальной трубы, подвешенной к устью скважины. Цемент закачивается в корпус для формирования защитного барьера, и проверяется целостность барьера. Части ствола скважины вблизи поверхности могут иметь два или более слоев цементных и стальных оболочек. На рис. 17.11 показана общая схема трехслойного устройства. Промежуточные кожухи могут простираться на несколько тысяч футов от поверхности. Корпус и цемент обеспечивают барьер, предотвращающий загрязнение буровых растворов USDW и других источников воды.

2) *Горизонтальное бурение*. Как показано на рис. 17.10, при приближении к комплексу бурение направляется от вертикали к горизонтали, когда ствол скважины входит в комплекс. Хотя резкие повороты возможны, они усугубляют проблемы бурения, поэтому постепенные повороты являются обычным явлением. После установки в горизонтальное положение и входа в «залежную» часть месторождения, ствол скважины может опуститься на несколько тысяч футов - как правило, намного длиннее глубины самой скважины. Длина по горизонтали в комплексе определяет потенциал извлечения нефти или газа. В зависимости от геологии, одна поверхностная скважина может иметь два или более горизонтальных ствола, проходящих в разных направлениях. Использование нескольких горизонтальных стволов из одного устья скважины сводит к минимуму площадь поверхности.

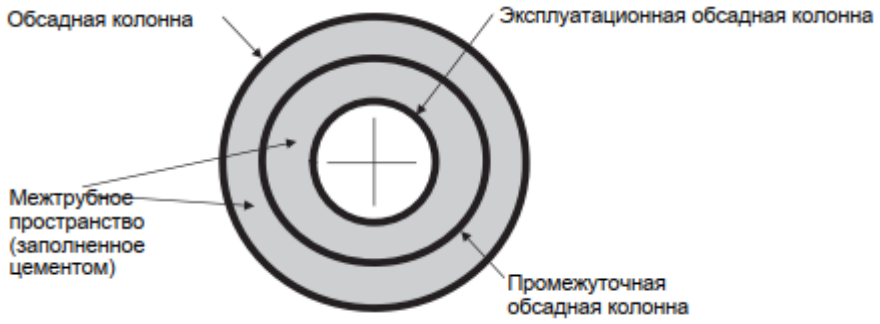


Рис.17.11. Скважина с несколькими обсадными колоннами.

3) *Заканчивание скважины и стимуляция (нефтяного) пласта*. Этот этап начинается со ствола скважины и включает гидроразрыв пласта для достижения потока нефти/газа из плотного комплекса. Начиная с конца горизонтального ствола скважины, сегменты «призабойного участка» ствола изолируются на стадии разрушения, причем каждая ступень содержит множество перфорационных кластеров. В течение одной стадии, как правило, корпус перфорируется в каждом месте скопления за счет зарядов взрывчатых веществ в «перфораторе» до тех пор, все скопления не будут перфорированы. Эта фаза называется «система интенсификации добычи с установкой мостовой пробки в зоне перфорации» и представляет собой двойной процесс перфорации обсадной колонны и забивания ствола скважины до тех пор, пока весь сегмент не будет готов к притоку жидкости. Процесс «интенсификации добычи с установкой мостовой пробки в зоне перфорации» переходит на следующую стадию разрушения, где он повторяется на следующих кластерах. Когда процесс пробки и перфорации завершен для стадии, начинается гидравлический разрыв пласта. Перфоратор убирается с участка, мусор вымывается и начинается гидравлический разрыв. Эта последовательность повторяется для каждого этапа, пока интересующий сектор не будет завершен. Гидравлический разрыв пласта включает в себя перекачивание под высоким давлением (тысячи фунтов на квадратный дюйм) серии жидкостей для гидроразрыва, каждая из которых разработана для выполнения конкретной задачи в процессе гидроразрыва. Жидкость для гидроразрыва, как правило, вода с добавками, прокачивается через перфорации обсадной колонны, вызывая трещины, которые создают один или несколько трещин, которые распространяются в окружающую породу. Разрыв может распространяться на сотни футов, пока не прекратится откачка под высоким давлением.

Несколько жидкостей последовательно используются для подготовки и разрушения породы. Каждый по существу представляет собой разбавленную смесь воды с конкретными добавками. Точные смеси и добавки варьируются в зависимости от характеристик сайта. Первой используемой жидкостью часто является уксус, разбавленная смесь соляной кислоты, используемая для очистки цементного мусора из ствола скважины и растворения минералов из открытых трещин вблизи ствола скважины. За этим часто следует смесь воды с низкой вязкостью, называемая «скользкой водой». Традиционный гидроразрыв пласта использует относительно низкие скорости потока жидкостей с высокой вязкостью; тем не менее, большая скорость потока скользкой воды стала нормой для многих применений гидроразрыва. Для получения гидроразрыва пород как в традиционном, так и в пластическом гидроразрыве пласта необходимо высокое давление. Однако, когда происходит разрыв пласта и давление снижается при подготовке к добыче нефти/газа, трещины часто разрушаются, что делает разрыв менее эффективным. Чтобы избежать этого, после начального гидроразрыва жидкости для гидроразрыва содержат твердые «проппанты», которые «подпирают» трещины. Проппантами обычно являются сферические мелкозернистые песочные или керамические материалы одинакового размера. Материал проппанта смешивается с водой и другими добавками и вводится в трещиноватую породу. Нагрузка на проппант в воде варьируется в зависимости от характеристик трещиноватой породы. В дополнение к расклинивающим жидкостям жидкости гидравлического разрыва могут также содержать биоциды (для контроля роста бактерий), ингибиторы образования отложений (для контроля осаждения минералов), стабилизирующие железо вещества (для поддержания соединений железа в растворимой форме) и ингибиторы коррозии (для защиты стен колонн). После завершения гидравлического разрыва, чтобы вытолкнуть излишки проппанта из ствола скважины и подготовить стадию разрыва к добыче

используется пресная вода. Сланцевые скважины могут иметь до 25 стадий разрыва. Поскольку на каждом этапе может потребоваться до 500 000 галлонов воды; один сектор может потребовать более 10 000 000 гал. Когда процесс гидроразрыва завершен, часть воды вытекает из скважины и может быть переработана после обработки для удаления вредных соединений.

Решения о деталях стимуляции скважин, стадиях и переломах или жидкостях не принимаются произвольно. Большинство компаний имеют хорошо отлаженные процедуры для определения того, какие решения следует принять для максимизации соотношения прибыли и стоимости. Аджайи и соавт. (2013) и Кроуфорд (2013) дают интересное представление об усилиях и уровне сложности деталей стимуляции скважины. Кроуфорд (2013) указывает на то, что в Хэллибёртон, одной из крупнейших компаний, занимающихся операциями по гидроразрыву пласта, есть ряд технических экспертов уровня PhD, занимающихся принятием решений и совершенствованием методов, гарантирующих, что каждая скважина с гидравлическим разрывом возвращает свой максимальный экономический потенциал. В содержательной статье Аджайи и соавт. (2013) описывают усилия компании Шлюмбергер (еще одна крупная компания, занимающаяся гидроразрывом), направленной на оптимизацию распределения ступеней и перфорационных кластеров для получения максимальной прибыли. Они ссылаются на компьютерную программу, «Mangrove Completion Advisor», которая была значительно улучшена в распределении этапов и кластеров. Сложность месторождения, подвергающегося гидроразрыву, лучше всего описана цитатой из Аджайи и соавт. (2013):

«Рост гидравлического разрыва зависит от структуры породы и геомеханических свойств пласта, существующей сети разломов и преобладающих величин напряжений на месте, а также от анизотропии».

Подход заключается не только в том, чтобы пробить дыру и пробки и перфорировать, но и в том, чтобы понять процесс завершения и использовать преимущества от этого понимания. Подготовка объекта сложна, со многими различными необходимыми функциями. На рис. 17.12 представлен чертеж типичного участка во время процедуры разрушения. Устье скважины занимает центральное положение; вокруг устья скважины расположены насосы, необходимые для процесса гидроразрыва, смеситель для жидкостей гидроразрыва и контрольный фургон. Предусмотрен склад для хранения жидкости, проппанта и любых используемых добавок. Рис.17.12 был нарисован художником Джо Линдли, Министерство энергетики США. Он нарисовал несколько линейных чертежей, иллюстрирующих различные процедуры улучшенной добычи нефти (EOR), и был активен в последней части двадцатого века: они доступны на веб-сайте NETL по адресу http://netl.doe.gov/research/oil-and-gas/enhanced-oil-recovery/eor-process-drawings. Несмотря на то, что на рис. 17.12 показано, что гидроразрыв пласта происходит по вертикали, в отличие от более распространенной в настоящее время горизонтали, детали и взаимосвязи компонентов на поверхности все еще действительны. На рис. 17.13 представлена фотография участка с несколькими устьями скважин. Очевидно закупоривание, но фотография в основном соответствует схеме на рис. 17.12.

Интересен вопрос, сколько времени занимает процесс бурения, забивки и перфорации, а также подготовки скважины к добыче? Общий ответ заключается в том, что для типичной скважины может потребоваться 3 или 4 недели для подготовки площадки, 4–6 недель для бурения, 5–10 дней для гидравлического разрыва пласта и 2 или 3 недели для заканчивания после разрыва.

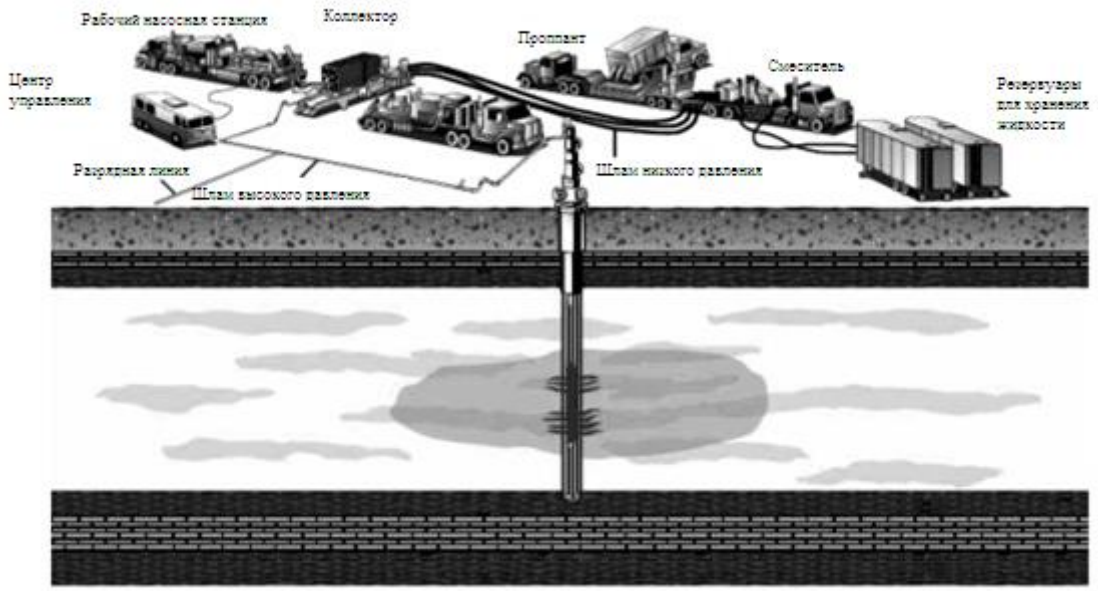


Рис.17.12. Участок скважины во время процедуры ГРП
Источник: http://netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/enhanced%20oil%20recovery/other/colhf.pdf.



Рис.17.13 Фотография участка ГРП с двумя устьями скважины. *Источник*: NETL (2011).

4) *Измерение притока*. Как и следовало ожидать, как только скважина будет готова к добыче, необходимо провести испытания потока для проверки скорости потока и характеристик продукта. Временный разделительный сосуд используется для определения характеристик и скоростей потока добытого газа/нефти, а также жидкости для гидроразрыва, которая течет обратно в скважину. Извлеченная нефть доставляется на нефтеперерабатывающий завод для дальнейшей переработки, а природный газ либо добывается, либо сжигается, в зависимости от назначения скважины.
5) *Долгосрочная добыча*. После завершения измерения притока, начинается добыча и продолжается до тех пор, пока экономика благоприятна. Во многих случаях (Грейвз, 2012) начальная скорость восстановления значительно снижается через несколько лет до 10–20% от начальной скорости восстановления. Но скважина может производить 10–20% от входной добычи в течение ряда лет. Отраслевые ожидания рассчитаны на производственный цикл до 20 лет. Некоторые скважины могут быть повторно стимулированы примерно через 5 лет для увеличения добычи.
6) *Отключение и восстановление.* Когда добыча снижается до неэкономического уровня и если рестимуляция не оправдана, участок закрывается, и земля возвращается к условиям, близким к предварительному бурению.

Выше было предоставлено введение в процессы по извлечению нефти/газа в плотных сланцевых комплексах. Как описывалось в Разделе 17.1, несмотря на то, что использование гидравлического разрыва пласта в труднодоступных местах является неоспоримым экономическим успехом,

экологические проблемы и другие проблемы привели к тому, что процесс стал довольно спорным. Интернет содержит множество за и против веб-сайтов и статей. Проблемы включают: (1) жидкости для гидроразрыва и другие загрязняющие вещества, попадающие в водоснабжение; (2) разрыв пласта в геологических объектах, приводящий к повышенной сейсмической активности; (3) вода, необходимая для гидроразрыва пласта, возможно, до 10 миллионов галлонов на скважину, что приводит к нехватке воды; и (4) перегруженность местной инфраструктуры. Существуют также другие проблемы, но они часто упоминаются и достойны внимания. Каждый будет изучен отдельно.

1) *Жидкости для гидроразрыва и другие загрязняющие вещества, попадающие в водоснабжение.* На Агентство по охране окружающей среды США возложена ответственность за оценку этого вопроса. Проект отчета издан в июне 2015 года (EPA, 2015). Следующая цитата была взята из резюме этого отчета:

«Благодаря этой оценке на национальном уровне мы определили потенциальные механизмы, с помощью которых гидроразрыв пласта может повлиять на ресурсы питьевой воды. Наземные механизмы могут влиять на ресурсы поверхностных и подземных вод и включать отбор воды в определенные моменты времени или в местах с низким уровнем доступности воды, разливы жидкости гидравлического разрыва и химикатов или добываемой воды, а также несоответствующую очистку и сброс сточных вод гидроразрыва. Подземные механизмы включают перемещение жидкостей и газов через добывающую скважину в подземные источники питьевой воды и перемещение жидкостей и газов из зоны разлома в эти ресурсы через пути в подземных горных породах. Мы не нашли доказательств того, что эти механизмы привели к широко распространенному системному воздействию на ресурсы питьевой воды в Соединенных Штатах… Количество выявленных случаев воздействия на ресурсы питьевой воды невелико по сравнению с количеством скважин с гидроразрывом.

2) *ГРП в геологических разрезах, приводящих к повышенной сейсмической активности*. ГРП, несомненно, приводит к увеличению сейсмической активности; однако, фактически все они классифицируются как микросейсмические события, значения шкалы Рихтера менее -1, и их нельзя обнаружить на поверхности. Тюркот и соавт. (2015) изучили эту проблему и пришли к выводу, что большинство микросейсмических событий, вызванных гидроразрывом, находятся в диапазоне от -3 до -2 по шкале Рихтера. Кроме того, они оценили вероятность возникновения сейсмического явления по шкале Рихтера 4 как 10^{-15} до 10^{-9}.

3) *Вода, необходимая для гидроразрыва пласта, возможно, до 10 миллионов галлонов на скважину, что вызывает дефицит воды*. Несмотря на то, что вода, используемая в гидроразрыве, имеет большое значение, общее количество воды, используемой для гидроразрыва, является небольшим по сравнению с использованием воды для других целей. Проект отчета EPA (2015) содержит убедительную оценку:

Вода является основным компонентом практически всех операций ГРП. Как правило, она составляет почти 90% или более от объема жидкости, закачиваемой в скважину, и каждая скважина с гидравлическим разрывом требует от тысячи до миллионов галлонов воды. В целом, в результате работ по гидроразрыву в Соединенных Штатах в 2011 и 2012 годах в среднем потреблялось 44 миллиарда галлонов воды в год, согласно анализу EPA… Несмотря на то, что это указывает на потребление менее 1% от общей годовой нормы потребления и использования воды в этом масштабе, водозабор может потенциально повлиять на количество и качество ресурсов питьевой воды в более локальных масштабах.

Потенциал воздействия на запасы питьевой воды в результате забора воды из гидроразрыва наиболее высок в районах с относительно высоким водопотреблением для гидроразрыва и низкой водообеспеченностью. Южный и западный Техас – это два места, где использование воды для гидроразрыва, низкая доступность воды, засуха и зависимость от снижения уровня грунтовых вод могут повлиять на количество ресурсов питьевой воды. Любые воздействия могут быть реализованы локально в этих районах…

Потенциал воздействия на количество питьевой воды из-за использования воды для гидроразрыва пласта, как представляется, ниже - но не устранен - в других районах Соединенных Штатов. Будущие проблемы могут возникнуть, если гидроразрыв пласта значительно возрастает в районах с низкой водообеспеченностью или во времена нехватки воды. Теста (2013) приводит примеры проблем с

наличием воды в Техасе с гидравлическим разрывом и представляет интересные примеры того, как местные жители оценивают EOR.

4) *Перегруз местной инфраструктуры*. Обширная деятельность EOR в области может сокрушить местные и государственные правительственные услуги. Город Уиллистон в Северной Дакоте, часто упоминается как современный быстро растущий город из-за деятельности EOR в сланцевом месторождении Баккен. Любой, кто проезжает через город, видит повсеместные свидетельства последствий повышенной активности EOR. Опыт Уиллистона даже был темой Смитсоновского канала. Для типичных участков скважины необходимо 18-колесных грузовиков на двухполосных дорогах, рассчитанных для сельской местности. Не только затрагиваются проблемы дорог, но и усугубляются проблемы безопасности.

Также упоминаются другие вопросы и проблемы в связи с деятельностью EOR в регионе. По сути, вопросы и проблемы, связанные с деятельностью EOR, не решены. Окончательные заключения и сопутствующие нормативные положения могут оказать существенное влияние на деятельность EOR в США. Но это все еще нерешенный вопрос в любом случае.

17.5 Новая реальность

Ежегодно OBOC предоставляет Ежегодный энергетический прогноз (AEO), который делает прогнозы энергопотребления и производства на 25 лет, рассматривая шесть сценариев: 1) контрольный пример, 2) низкий экономический рост, 3) высокий экономический рост 4) низкая цена на нефть, 5) высокая цена на нефть и 6) высокий нефтегазовый ресурс. В таблице 17.2 приведены шесть сценариев. Рекомендуемый вариант AEO 2015 (EIA, 2015) содержит обзор ожидаемого будущего энергии в США с 2015 по 2040 год. На рис. 17.14 представлены проекты рекомендуемых вариантов, а также история энергии с 1980 по 2013 гг.

Таблица 17.2 Случаи AEO EIA.

Действие	ВВП (%)	Сырая нефть ($/баррель)	Восстановление ресурсов
Ссылка	2.4	До 141 в 2040	
Низкий рост	1.8	До 141 в 2040	
Высокий рост	2.9	До 141 в 2040	
Низкая цена на нефть	2.4	До 76 в 2040	
Высокие цены на нефть	2.4	До 252 в 2040	
Высокие нефтегазовые ресурсы	2.4		На 50% выше, чем в эталонном случае

ВВП: валовой внутренний продукт.

а) 2013 долларов.

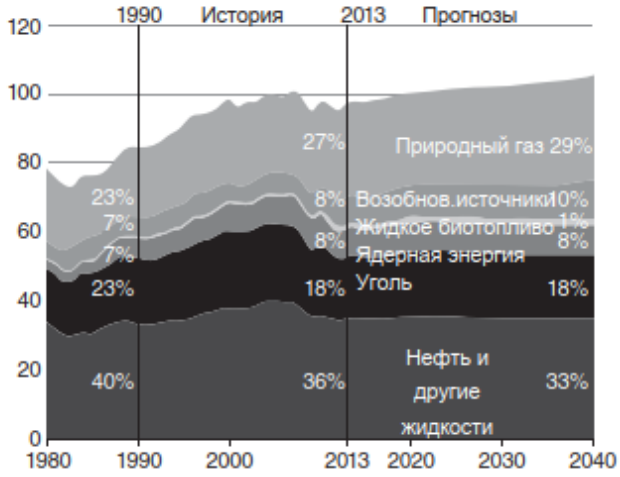


Рис.17.14 Потребление первичной энергии (в квадратах) по видам топлива с 2013 по 2040 год (контрольный пример). *Источник:* OBOC (2015).

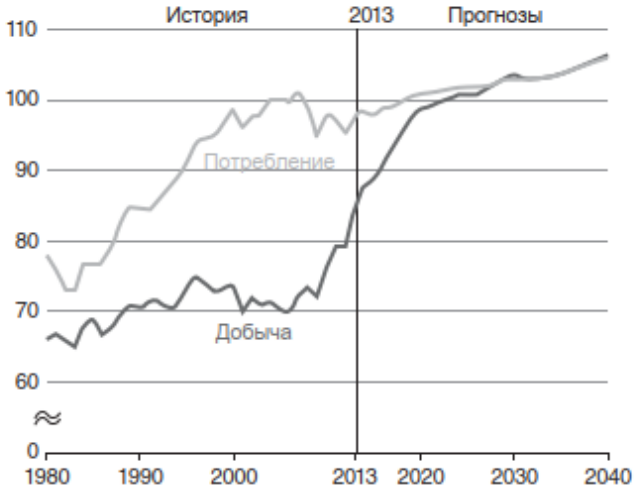


Рис.17.15. Эталонный пример общего производства и потребления энергии (в квадратах) 1980–2040 гг. (Контрольный пример) *Источник*: OBOC (2015).

Энергопотребление представлено в квадратах. Фактические данные об использовании энергии соответствуют деталям в главе 1. Возможно, наиболее примечательными аспектами прогнозов энергии являются отсутствие значительных изменений в общем потреблении или составляющих компонентах. Общее расчетное потребление энергии увеличится с чуть менее 100 квадроциклов до чуть более 100 квадроциклов к 2040 г., а процентные вклады сместятся максимум на 3%.

Основной проблемой в США была зависимость от импорта нефти и ее влияние на экономические и политические вопросы. Рис.17.15 иллюстрирует фактическое (история, 1980–2013 гг.) и прогнозируемое производство и потребление (до 2040 г.) для эталонного случая. С середины 1980-х до 2005 года разница между потреблением и производством увеличилась; однако с 2005 года этот разрыв сужается. Для эталонного случая потребление и добыча станут равными примерно к 2030 году с небольшой разницей между этими двумя показателями к 2020 году. Учитывая, что разрыв между потреблением и добычей к 2013 году сократился примерно до 10 квад/год, было замечено влияние усиленной добычи нефти и природного газа в США.

Рисунки 17.14 и 17.15 приведены для базового случая, возможно, наиболее вероятного сценария, но хаотическая история «энергии» учит нас тому, что непредвиденные события могут оказать существенное влияние на стоимость и доступность энергии. Другие пять случаев в EIA AEO рассматривают альтернативные энергетические сценарии. Поскольку чистый импорт энергии представляет собой разницу между потреблением и добычей, история и прогнозы чистого импорта

энергии для шести случаев являются эффективным показателем важности шести различных энергетических сценариев. На рис. 17.16 показаны существенные различия между потреблением энергии и производством для различных рассмотренных случаев. «Историческая» часть рисунка однозначно демонстрирует влияние увеличения добычи нефти и газа с 2005 года. За исключением случая с низкой ценой на нефть, прогнозируется, что импорт будет продолжать снижаться до 2040 года. Если за этим последуют случаи с высокой ценой на нефть или высокой ценой на нефтегазовые ресурсы, США станет страной, экспортирующей энергоресурсы, что значительно отличается от зависимости в 1980-х годах от импорта иностранных энергоносителей.

Рис.17.17 содержит аналогичную информацию об импорте природного газа (10^{12} кубических футов) для четырех случаев (эталонный случай, низкая цена на нефть, высокая цена на нефть, высокие нефтегазовые ресурсы). Во всех четырех случаях импорт природного газа сократится до 2040 года. Действительно, во всех рассмотренных случаях к 2015–2020 годам США станут страной-экспортером природного газа! Рис.17.18, который иллюстрирует добычу природного газа в США, является дополнением к рисунку 17.17.

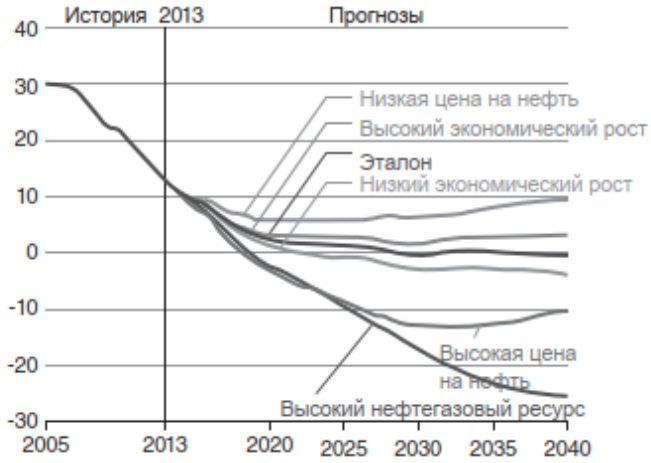


Рис.17.16 История и прогнозы импорта энергоносителей (квадр) для шести рассмотренных случаев. *Источник:* ОВОС (2015).

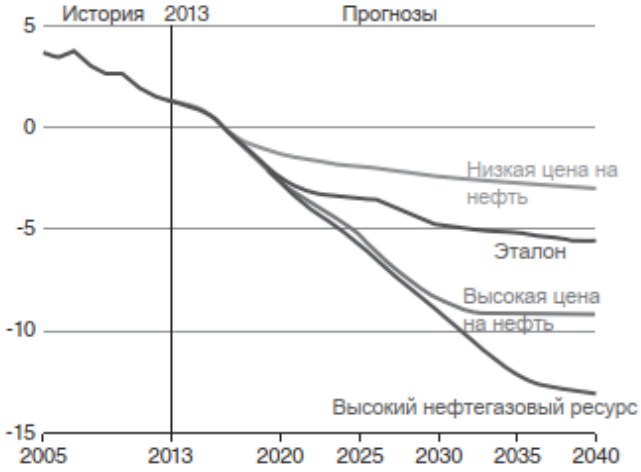


Рис.17.17 Импорт природного газа (10^{12} кубических футов) для четырех случаев. *Источник:* ОВОС (2015).



Рис.17.18 Добыча природного газа в США (1012 кубических футов) для четырех случаев. *Источник*: OBOC (2015)

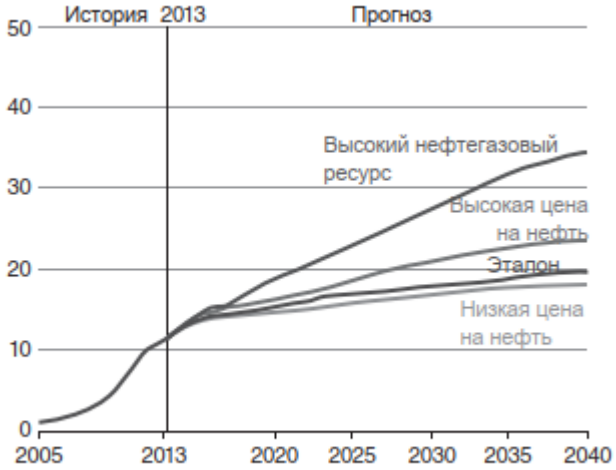


Рис.17.19 Добыча сланцевого газа в США (10^{12} кубических футов) для четырех случаев. *Источник:* OBOC (2015).

С 2005 по 2013 год добыча природного газа в США увеличилась на 35%. Рост добычи был обусловлен освоением ресурсов сланцевого газа. В исходном случае, согласно прогнозам, добыча сланцевого природного газа к 2040 году возрастет почти на 59%. Природный газ является привлекательным источником энергии, поскольку по сравнению со многими другими видами топлива он имеет относительно более низкую выработку CO_2 и более низкую стоимость на миллион Британская термоблок. На рис. 17.19 представлена история и прогнозы добычи сланцевого газа. Сравнение рисунков 17.18 и 17.19 показывает, что большая часть будущей добычи связана со сланцевым газом. Как видно из рисунка 17.20, с 2005 года стоимость природного газа на миллион британских тепловых единиц снизилась почти на две трети. Прогнозы стоимости одного миллиона британских тепловых единиц для четырех случаев с 2013 по 2040 год показывают умеренный рост цен, за исключением случая высокой цены на нефть, и даже в этом случае в долларах 2013 года цена на природный газ не достигает уровня 2005 года примерно до 2035 года. Как и в главе 1, использование долларов, выраженных в единичном году (2013 год для EIA AEO 2015), неявно учитывает инфляцию с учетом постоянных или цепочечных долларов. В случае с высокими запасами нефти и газа цена в долларах 2013 года остается почти до 2040 года



Рис.17.20 Стоимость природного газа в США (2013 долл. США/млн. БТЕ) для четырех случаев.
Источник: ОВОС (2015).

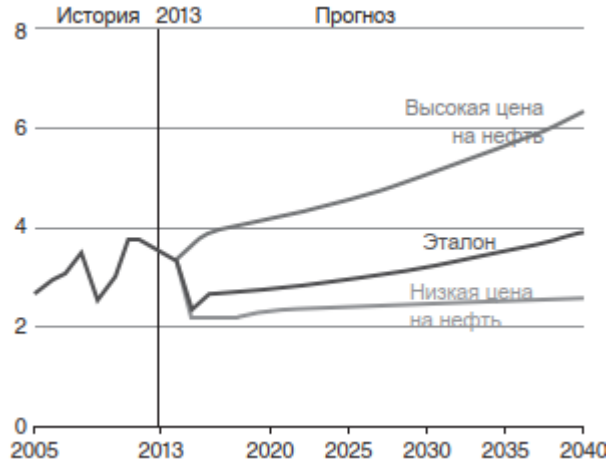


Рис.17.21 История и прогнозы цен на автомобильный бензин (2013 долл./галлон).
Источник: ОВОС (2015).

Недавнее (с 2012 года) снижение цен на автомобильный бензин было драматичным, о чем свидетельствует рис.17.21. Для базового случая цены на бензин (в долларах 2013 года) не достигают значения 2010 года до 2037 года, а в случае низких цен на нефть цены за галлон (в долларах 2013 года) остаются ниже уровня 2013 года. Случай высокой цены на нефть монотонно увеличивается. Что касается эталонных случаев и случаев низкой цены на нефть, США, как и в 1980-х годах, предоставляется еще один шанс использовать технологии и меры по сохранению для смягчения будущих энергетических «кризисов». Возможно, результаты будут лучше, чем раньше. Непрерывное значение нефти от попыток гидроразрыва («плотная» нефть) показано на рис. 17.22. Добыча плотной нефти увеличилась с 2005 года и в настоящее время составляет около 5 миллионов баррелей в день. В ОВОС прогнозируется существенный постоянный вклад вязкой нефти в результате гидравлического разрыва пласта, при этом добыча эталонного пласта достигнет плато примерно к 2020 году. Глубокий нефтегазовый пласт монотонно увеличивается к 2040 году.

Несмотря на то, что уголь является богатым ресурсом в США, политика, общественное восприятие и экономика контроля выбросов существенно повлияли на добычу угля с 2005 года. На рис. 17.23 представлена история и прогнозы добычи угля для шести случаев. За исключением случая с высокими запасами нефти и газа, добыча угля в других случаях, по прогнозам, восстановится. Действительно, в случае высокой цены на нефть добыча угля может значительно превысить уровень 2005 года к 2035 году.

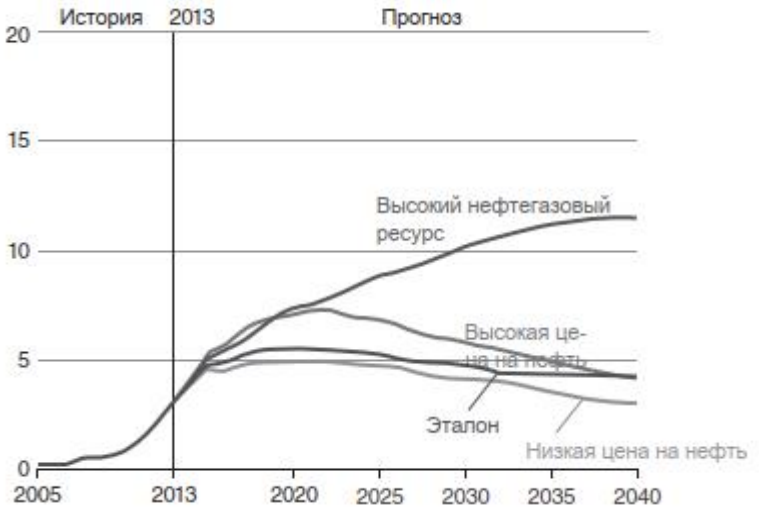


Рис.17.22. Добыча нефти в США в плотных условиях (10^6 баррелей в день) для четырех случаев. *Источник:* OBOC (2015).

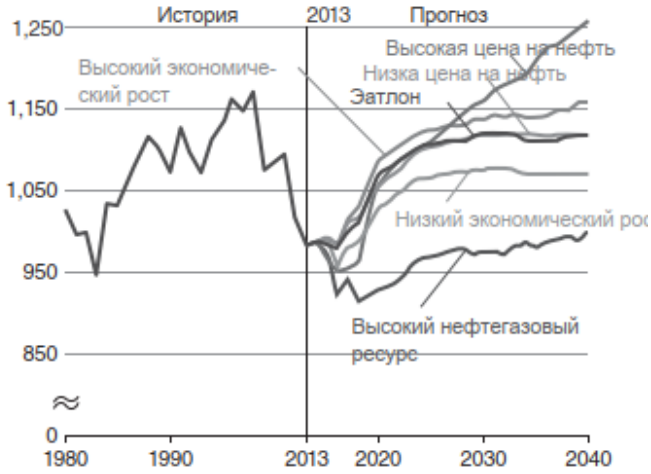


Рис.17.23 История и прогнозы добычи угля (10^6 коротких тонн) для шести рассмотренных случаев. *Источник:* EIA (2015).

На рис. 1.16, диаграмма потока угля в США (2014 г.), показано, что 92% угля используется для выработки электроэнергии. С учетом проблем с выбросами угля, увеличения запасов природного газа и увеличения добычи нефти и газа, какое сочетание источников топлива будет вероятным в будущем? Рисунки 17.24 и 17.25 помогают ответить на этот вопрос. Историческая часть рисунка 17.24, базовый случай, соответствует деталям, представленным в главе 1. Прогнозируется, что с 2013 по 2040 год производство электроэнергии увеличится примерно на 40% для базового случая; доля угля уменьшается с 39% до 34%, ядерная - на 3%, возобновляемая энергия увеличивается на 5%, а природный газ - на 4%. Ни одно из предсказаний по эталонному случаю не поразительно. На рис. 17.25 рассматривается разбивка видов топлива для выработки электроэнергии в 2013 году и прогнозируется в 2040 году. За исключением гидроэлектростанций, выработка электроэнергии из других возобновляемых источников, как ожидается, увеличится - суммы зависят от конкретных сценариев использования.

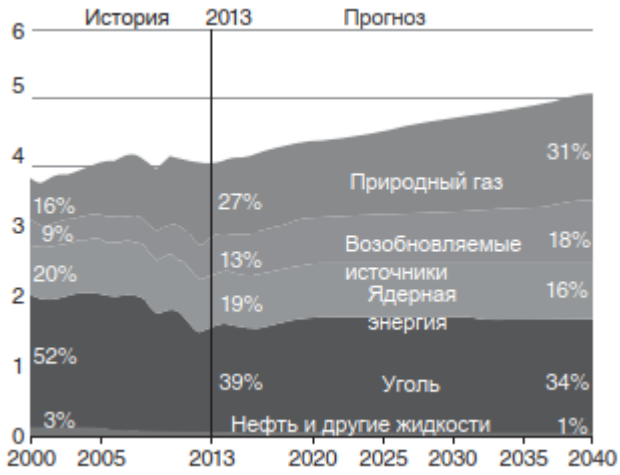


Рис.17.24 Производство электроэнергии (1012 кВт · ч) по видам топлива с 2013 по 2040 год (контрольный пример). *Источник:* OBOC (2015).

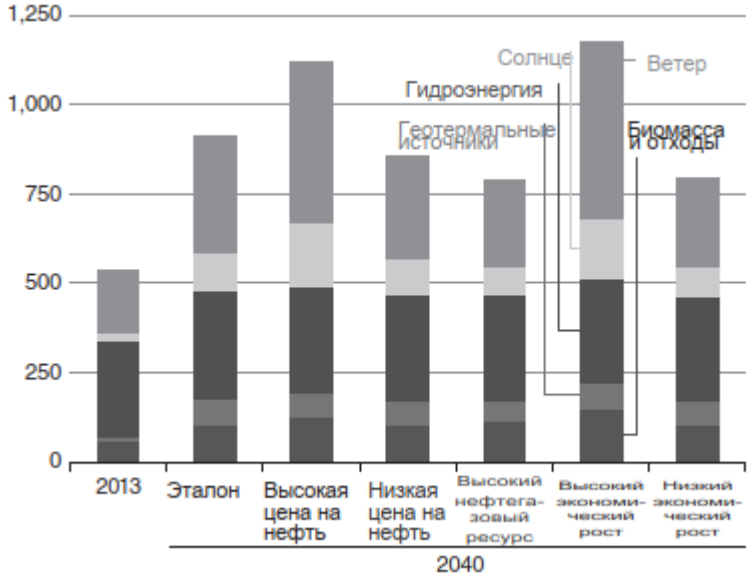


Рис. 17.25 Генерация возобновляемой энергии (10^9 кВтч) для шести случаев за период с 2013 по 2040 годы. *Источник:* EIA(2015)

Прогнозируемая цена на электроэнергию (2013 центов за киловатт-час) с 2013 по 2040 год представлена на рис. 17.26 для шести случаев. Ожидается, что к 2040 году высокие затраты на электроэнергию в случае нефтегазовых ресурсов будут почти постоянными, в то время как в других пяти случаях рост цен будет варьироваться. Но даже в случае высокой цены на нефть увеличение за киловатт-час составляет всего от 10¢ до 13¢. Следовательно, в пересчете на доллары 2013 года электроэнергия не будет резко расти в цене.

Как показано на рис. 17.24, в 2013 году ископаемое топливо обеспечивало 67% энергии, используемой для производства электроэнергии. К 2040 году для эталонного случая доля электроэнергии, вырабатываемой ископаемым топливом, по прогнозам, составит 66%, а снижение составит всего 1%. Однако, поскольку ожидается, что потребление электроэнергии увеличится примерно на 20% с 2013 по 2040 год, количество ископаемого топлива, используемого для производства электроэнергии, значительно возрастет. Таким образом, выбросы продуктов сгорания ископаемого топлива, связанные с выработкой электроэнергии, также соответственно возрастут, если не будут приняты меры по сокращению/улавливанию/контролю выбросов. В конце 2016 года National Academies выпустила доклад «Сила изменений» (The Power of Change), в котором были определены результаты и даны рекомендации в трех приоритетных категориях: всеобъемлющие, ключевые и другие (Национальные академии наук, инженерии и медицины, 2016). В первую категорию

(всеобъемлющие) входят две рекомендации, которые важнее всех остальных. Также включены 10 ключевых рекомендаций и восемь ключевых результатов. Двенадцать дополнительных рекомендаций сделаны в категории «другие». Результаты и рекомендации представлены в разделе «Резюме» отчета и подробно обсуждаются в оставшейся части отчета. По сути, в «Силах перемен» найдены рекомендации и рекомендации по экономическим, правовым, законодательным и технологическим вопросам, решение которых значительно увеличит производство «чистого» электричества.

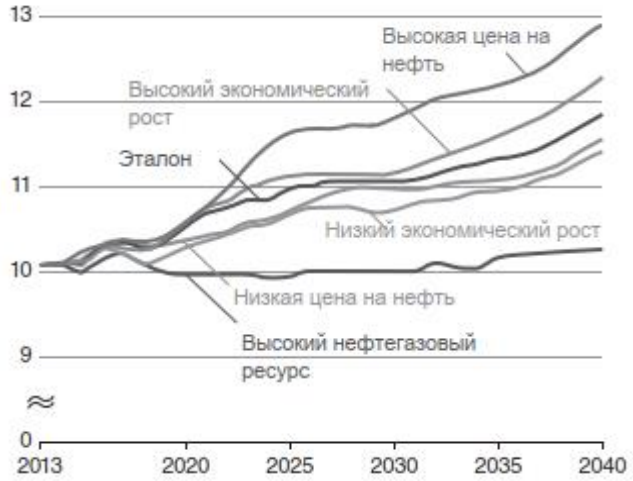


Рис.17.26 Средняя розничная цена на электроэнергию (2013 долл. США/кВтч) для шести случаев. *Источник:* OBOC (2015).

В этом разделе рассматривалось будущее энергии, прогнозируемое OBOC с 2013 по 2040 год. Воздействие гидравлического разрыва пласта и увеличение запасов природного газа являются значительными и рассматриваются с точки зрения шести случаев (сценариев), описанных в начале раздела. Из-за увеличения добычи нефти и природного газа энергетическое будущее США заметно отличается от того, что можно было ожидать в конце двадцатого века.

17.6 Заключение

Однако, несмотря на то, что гидроразрыв пласта ослабил некоторые энергетические проблемы, многие проблемы, задачи и волнения все еще существуют. Ископаемое топливо по-прежнему является конечным невозобновляемым ресурсом, сжигание которого все еще производит CO_2, парниковый газ. Следовательно, темы этого учебника очень актуальны для будущего. *Выявление дополнительных ресурсов ископаемого топлива, по существу, предоставило больше времени для поиска, реализации и разработки других, более устойчивых и более благоприятных для парниковых газов энергетических ресурсов.*

Литература

Ahmed, T. and Meehan, D.N. (2012) Advanced Reservoir Management and Engineering, 2nd edn. Elsevier, Waltham. MA.

Ajayi, B., Aso, I.I., Terr, I.J., Jr. et al. (2013) Stimulation design for unconventional resources. Oilfield Review, 25 (2): 34–46.

Bell, T. (2013) 'There's gas in them tharshales!" Shale gas recovery 101. The Bent of Tau Beta Pi, (Summer): 22–27 61.

Crawford, M. (2013) Fracturing rock to unlock new oil. Mechanical Engineering, 135 (12): 24–29. Economides, M.J., Hill, A.D., Ehlig-Economides, C., and Zhu, D. (2013) Petroleum Production Systems, 2nd edn.Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.

EIA (2013) Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries outside the United States. http://www.eia.gov/analysis/studies/ worldshalegas/archive/2013/pdf/fullreport_2013.pdf (accessed October 27, 2016).

EIA (2015) Annual Energy Outlook 2015 with Projections to 2040.DOE/EIA-0383(2015).www.eia. gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2015).pdf (accessed October 26, 2016).

Energy Institute (2015) A Guide to Shale Gas. Energy Institute, London.

EPA (2015) Assessment of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas on Drinking Water Resources. EPA/600/R-15/047a. www.epa.gov/hfstudy (accessed October 27, 2016).

Graves, J. (2012) Fracking: America's Alternative Energy Revolution. Safe Harbor International Publishing, Ventura, CA.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2016) The Power of Change: Innovation for Development and Deployment of Increasingly Clean Electric Power Technologies. The National Academies Press, Washington, DC. https://www.nap.edu/catalog/ 21712/the-power-of-change-innovation-for-development-and-deployment-of (accessed November 2, 2016).

NETL (2011) Shale Gas: Applying Technology to Solve America's Energy Challenges. National Energy Technology Laboratory. http://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/ Shale_Gas_March_2011.pdf (Accessed October 27, 2016).

Reuters (2015) The Earth is not running out of oil and gas, BP says. The Telegraph, November 2. http://www.telegraph.co.uk/finance/newsbysector/energy/oilandgas/11971280/The-Earth-is-not- running-out-of-oil-and-gas-BP-says.html (accessed October 27, 2016).

Testa, B.M. (2013) Home on the shales. Mechanical Engineering, 135 (12): 30–35.

Turcotte, D.L., Moores, E.M., and Rundle, J.B. (2014) Super fracking. Physics Today, 67 (8): 34–39. Webber, M.E. (2013) Lessons from the shale revolution. Mechanical Engineering, 135 (10): 20.

Дополнительная литература

Hefley, W.E. andWang, Y. (eds.) (2015) Economics of Unconventional Shale Gas Development.Springer, NewYork.

Holloway, M.D. and Rudd, O. (2013) Fracking: The Operations and Environmental Consequences of Hydraulic Fracking. Scrivener Publishing/John Wiley & Sons, Inc., Salem, MA/Hoboken, NJ

Приложение A

Копия от Госвами. И., КрейтФ.,иКрайдер, Дж.Ф.(2000) Правила гелиотехнки, Второе издание. Тэйлор и Фрэнсис, Нью-Йорк.

© 2017John Wiley& Sons, Ltd. Опубликованов 2017 годуJohnWiley&Sons, Ltd.Веб-сайт:www.wiley.com\go\Hodge\AESystemsandApplications2E

Таблица А.1 Положение солнца и солнечное излучение на широте 24° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							14	24	34	44	90
Янв 21	7	5	4.8	65.6	71	10	17	21	25	28	31
	8	4	16.9	58.3	239	83	110	126	137	145	127
	9	3	27.9	48.8	288	151	188	207	221	228	176
	10	2	37.2	36.1	308	204	246	268	282	287	207
	11	1	43.6	19.6	317	237	283	306	319	324	226
	12		46.0	0.0	320	249	296	319	332	336	232
	Ежедневные показатели поверхности				2766	1622	1984	2174	2300	2360	1766
Фев 21	7	5	9.3	74.6	158	35	44	49	53	56	46
	8	4	22.3	67.2	263	116	135	145	150	151	102
	9	3	34.4	57.6	298	187	213	225	230	228	141
	10	2	45.1	44.2	314	241	273	286	291	287	168
	11	1	53.0	25.0	321	276	310	324	328	323	185
	12		56.0	25.0	324	288	323	337	341	335	191
	Ежедневные показатели поверхности				3036	1998	2276	2396	2436	2424	1476
Март 21	7	5	13.7	83.3	194	60	63	64	62	59	27
	8	4	27. 2	76.8	267	141	150	152	149	142	64
	9	3	40.2	67.9	295	212	226	229	225	214	95
	10	2	52.3	54.8	309	266	285	288	283	270	120
	11	1	61.9	33.4	315	300	322	326	320	305	133
	12		66.0	0.00	317	312	334	339	333	317	140
	Ежедневные показатели поверхности				3078	2270	2428	2456	2412	2298	1022
Апр 21	6	6	4.7	100.6	40	7	5	4	4	3	2
	7	5	18.3	94.9	203	83	77	70	62	51	10
	8	4	32.0	89.0	256	160	157	149	137	122	16
	9	3	45.6	81.9	280	227	227	220	206	186	46
	10	2	59.0	71.8	292	278	282	275	259	237	61
	11	1	71.1	51.6	298	310	316	309	293	269	74
	12		77.6	0.0	299	321	328	321	305	280	79
	Ежедневные показатели поверхности				3036	2454	2458	2374	2228	2016	488
Май 21	6	6	8.0	108.4	86	22	15	10	9	9	5
	7	5	21.2	103.2	203	98	85	73	59	44	12
	8	4	34.6	98.5	248	171	159	145	127	106	15
	9	3	48.3	93.6	269	233	224	210	190	165	16
	10	2	62.0	87.7	280	281	275	261	239	211	22
	11	1	75.5	76.9	286	311	307	293	270	240	34
	12		86.0	0.0	288	322	317	304	281	250	37
	Ежедневные показатели поверхности				3032	2556	2447	2286	2072	1800	246
Июнь 21	6	6	9.3	111.6	97	29	20	12	12	11	7
	7	5	22.3	106.8	201	103	87	73	58	41	13
	8	4	35.5	102.6	242	173	158	142	122	99	16
	9	3	49.0	98.7	263	234	221	204	182	155	18
	10	2	62.6	95.0	274	280	269	253	229	199	18
	11	1	76.3	90.8	279	309	300	283	259	227	19
	12		89.4	0.0	281	319	310	294	269	236	22
	Ежедневные показатели поверхности				2994	2574	2422	2230	1992	1700	204

Таблица A.1 *(Продолжение)*

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							14	24	34	44	90
Июль 21	6	6	8.2	109.0	81	23	16	11	10	9	6
	7	5	21.4	103.8	195	98	85	73	59	44	13
	8	4	34.8	99.2	239	169	157	143	125	104	16
	9	3	48.4	94.5	261	231	221	207	187	161	18
	10	2	62.1	89.0	272	278	270	256	235	206	21
	11	1	75.7	79.2	278	307	302	287	265	235	32
	12		86.6	0.0	280	317	312	298	275	245	36
	Ежедневные показатели поверхности				2931	2526	2412	2250	2036	1766	246
Авг 21	6	6	5.0	101.3	35	7	5	4	4	4	2
	7	5	18.5	95.6	186	82	76	69	60	50	11
	8	4	32.2	89.7	241	158	154	146	134	118	16
	9	3	45.9	82.9	265	223	222	214	200	181	39
	10	2	59.3	73.0	278	273	275	268	252	230	58
	11	1	71.6	53.2	284	304	309	301	285	261	71
	12		78.3	0.0	286	315	320	313	296	272	75
	Ежедневные показатели поверхности				2864	2408	2402	2316	2168	1958	470
Сен 21	7	5	13.7	83.8	173	57	60	60	59	56	26
	8	4	27.2	76.8	248	136	144	146	143	136	62
	9	3	40.2	67.9	278	205	218	221	217	206	93
	10	2	52.3	54.8	292	258	275	278	273	261	116
	11	1	61.9	33.4	299	291	311	315	309	295	131
	12		66.0	0.0	301	302	323	327	321	306	136
	Ежедневные показатели поверхности				2878	2194	2342	2366	2322	2212	992
Окт 21	7	5	9.1	74.1	138	32	40	45	48	50	42
	8	4	22.0	66.7	247	111	129	139	144	145	99
	9	3	34.1	57.1	284	180	206	217	223	221	138
	10	2	44.7	43.8	301	234	265	277	282	279	165
	11	1	52.5	24.7	309	268	301	315	319	314	182
	12		55.5	0.0	311	279	314	328	332	327	188
	Ежедневные показатели поверхности				2868	1928	2198	2314	2364	2346	1442
Нояб 21	7	5	4.9	65.8	67	10	16	20	24	27	29
	8	4	17.0	58.4	232	82	108	123	135	142	124
	9	3	28.0	48.9	282	150	186	205	217	224	172
	10	2	37.3	36.3	303	203	244	265	278	283	204
	11	1	43.8	19.7	312	236	280	302	316	320	222
	12		46.2	0.0	315	247	293	315	328	332	228
	Ежедневные показатели поверхности				2706	1610	1962	2146	2268	2324	1730
Дек 21	7	5	3.2	62.6	30	3	7	9	11	12	14
	8	4	14.9	55.3	225	71	99	116	129	139	130
	9	3	25.5	46.0	281	137	176	198	214	223	184
	10	2	34.3	33.7	304	189	234	258	275	283	217
	11	1	40.4	18.2	314	221	270	295	312	320	236
	12		42.6	0.0	317	232	282	308	325	332	243
	Ежедневные показатели поверхности				2624	1474	1852	2058	2204	2286	1808

Таблица А.2 Положение солнца и солнечное излучение на широте 32° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							22	32	42	52	90
Янв 21	7	5	1.4	65.2	1	0	0	0	0	1	1
	8	4	12.5	56.5	203	56	93	106	116	123	115
	9	3	22.5	46.0	269	118	175	193	206	212	181
	10	2	30.6	33.1	295	167	235	256	269	274	221
	11	1	36.1	17.5	306	198	273	295	308	312	245
	12		38.0	0.0	310	209	285	308	321	324	253
	Ежедневные показатели поверхности				2458	1288	1839	2008	2118	2166	1779
Фев 21	7	5	7.1	73.5	121	22	34	37	40	42	38
	8	4	19.0	64.4	247	95	127	136	140	141	108
	9	3	29.9	53.4	288	161	206	217	222	220	158
	10	2	39.1	39.4	306	212	266	278	283	279	193
	11	1	45.6	21.4	315	244	304	317	321	315	214
	12		48.0	0.0	317	255	316	330	334	328	222
	Ежедневные показатели поверхности				2872	1724	2188	2300	2345	2322	1644
Март 21	7	5	12.7	81.9	185	54	60	60	59	56	32
	8	4	25.1	73.0	260	129	146	147	144	137	78
	9	3	36.8	62.1	290	194	222	224	220	209	119
	10	2	47.3	47.5	304	245	280	283	278	265	150
	11	1	55.0	26.8	311	277	317	321	315	300	170
	12		58.0	0.0	313	287	329	333	327	312	177
	Ежедневные показатели поверхности				3012	2084	2378	2403	2358	2246	1276
Апр 21	6	6	6.1	99.9	66	14	9	6	6	5	3
	7	5	18.8	92.2	206	86	78	71	62	51	10
	8	4	31.5	84.0	255	158	156	148	136	120	35
	9	3	43.9	74.2	278	220	225	217	203	183	68
	10	2	55.7	60.3	290	267	279	272	256	234	95
	11	1	65.4	37.5	295	297	313	306	290	265	112
	12		69.6	0.0	297	307	325	318	301	276	118
	Ежедневные показатели поверхности				3076	2390	2444	2356	2206	1994	764
Май 21	6	6	10.4	107.2	119	36	21	13	13	12	7
	7	5	22.8	100.1	211	107	88	75	60	44	13
	8	4	35.4	92.9	250	175	159	145	127	105	15
	9	3	48.1	84.7	269	233	223	209	188	163	33
	10	2	60.6	73.3	280	277	273	259	237	208	56
	11	1	72.0	51.9	285	305	305	290	268	237	72
	12		78.0	0.0	286	315	315	301	278	247	77
	Ежедневные показатели поверхности				3112	2582	2454	2284	2064	1788	469
Июнь 21	6	6	12.2	110.2	131	45	26	16	15	14	9
	7	5	24.3	103.4	210	115	91	76	59	41	14
	8	4	36.9	96.8	245	180	159	143	122	99	16
	9	3	49.6	89.4	264	236	221	204	181	153	19
	10	2	62.2	79.7	274	279	268	251	227	197	41
	11	1	74.2	60.9	279	306	299	282	257	224	56
	12		81.5	0.0	280	315	309	292	267	234	60
	Ежедневные показатели поверхности				3084	2634	2436	2234	1990	1690	370

Таблица А.2 *(Продолжение)*

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							22	32	42	52	90
Июль 21	6	6	10.7	107.7	113	37	22	14	13	12	8
	7	5	23.1	100.6	203	107	87	75	60	44	14
	8	4	35.7	93.6	241	174	158	143	125	104	16
	9	3	48.4	85.5	261	231	220	205	185	159	31
	10	2	60.9	74.3	271	274	269	254	232	204	54
	11	1	72.4	53.3	277	302	300	285	262	232	69
	12		78.6	0.0	279	311	310	296	273	242	74
	Ежедневные показатели поверхности				3012	2558	2422	2250	2030	1754	458
Авг 21	6	6	6.5	100.5	59	14	9	7	6	6	4
	7	5	19.1	92.8	190	85	77	69	60	50	12
	8	4	31.8	84.7	240	156	152	144	132	116	33
	9	3	44.3	75.0	263	216	220	212	197	178	65
	10	2	56.1	61.3	276	262	272	264	249	226	91
	11	1	66.0	38.4	282	292	305	298	281	257	107
	12		70.3	0.0	284	302	317	309	292	268	113
	Ежедневные показатели поверхности				2902	2352	2388	2296	2144	1934	736
Сен 21	7	5	12.7	81.9	163	51	56	56	55	52	30
	8	4	25.1	73.0	240	124	140	141	138	131	75
	9	3	36.8	62.1	272	188	213	215	211	201	114
	10	2	47.3	47.5	287	237	270	273	268	255	145
	11	1	55.0	26.8	294	268	306	309	303	289	164
	12		58.0	0.0	296	278	318	321	315	300	171
	Ежедневные показатели поверхности				2808	2014	2288	2308	2264	2154	1226
Окт 21	7	5	6.8	73.1	99	19	29	32	34	36	32
	8	4	18.7	64.0	229	90	120	128	133	134	104
	9	3	29.5	53.0	273	155	198	208	213	212	153
	10	2	38.7	39.1	293	204	257	269	273	270	188
	11	1	45.1	21.1	302	236	294	307	311	306	209
	12		47.5	0.0	304	247	306	320	324	318	217
	Ежедневные показатели поверхности				2696	1654	2100	2208	2252	2232	1588
Нояб 21	7	5	1.5	65.4	2	0	0	0	1	1	1
	8	4	12.7	56.6	196	55	91	104	113	119	111
	9	3	22.6	46.1	263	118	173	190	202	208	176
	10	2	30.8	33.2	289	166	233	252	265	270	217
	11	1	36.2	17.6	301	197	270	291	303	307	241
	12		38.2	0.0	304	207	282	304	316	320	249
	Ежедневные показатели поверхности				2406	1280	1816	1980	1084	2130	1742
Дек 21	8	4	10.3	53.8	176	41	77	90	101	108	107
	9	3	19.8	43.6	257	102	161	180	195	204	183
	10	2	27.6	31.2	288	150	221	244	259	267	226
	11	1	32.7	16.4	301	180	258	282	298	305	251
	12		34.6	0.0	304	190	271	295	311	318	259
	Ежедневные показатели поверхности				2348	1136	1704	1888	2016	1086	1794

Таблица А.3 Положение солнца и солнечное излучение на широте 40° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							30	40	50	60	90
Янв 21	8	4	8.1	55.3	142	28	65	74	81	85	84
	9	3	16.8	44.0	239	83	155	171	182	187	171
	10	2	23.8	30.9	274	127	218	237	249	254	223
	11	1	28.4	16.0	289	154	257	277	290	293	253
	12		30.0	0.0	294	164	270	291	303	306	263
	Ежедневные показатели поверхности				2182	948	1660	1810	1906	1944	1726
Фев 21	7	5	4.8	72.7	69	10	19	21	23	24	22
	8	4	15.4	62.2	224	73	114	122	126	127	107
	9	3	25.0	50.2	274	132	195	205	209	208	167
	10	2	32.8	35.9	295	178	256	267	271	267	210
	11	1	38.1	18.9	305	206	293	306	310	304	236
	12		40.0	0.0	308	216	306	319	323	317	245
	Ежедневные показатели поверхности				2640	1414	2060	2162	2202	2176	1730
Март 21	7	5	11.4	80.2	171	46	55	55	54	51	35
	8	4	22.5	69.6	250	114	140	141	138	131	89
	9	3	32.8	57.3	282	173	215	217	213	202	138
	10	2	41.6	41.9	297	218	273	276	271	258	176
	11	1	47.7	22.6	305	247	310	313	307	293	200
	12		50.0	0.0	307	257	322	326	320	305	208
	Ежедневные показатели поверхности				2916	1852	2308	2330	2284	2174	1484
Апр 21	6	6	7.4	98.9	89	20	11	8	7	7	4
	7	5	18.9	89.5	206	87	77	70	61	50	12
	8	4	30.3	79.3	252	152	153	145	133	117	53
	9	3	41.3	67.2	274	207	221	213	199	179	93
	10	2	51.2	51.4	286	250	275	267	252	229	126
	11	1	58.7	29.2	292	277	308	301	285	260	147
	12		61.6	0.0	293	287	320	313	296	271	154
	Ежедневные показатели поверхности				3092	2274	2412	2320	2168	1956	1022
Май 21	5	7	1.9	114.7	1	0	0	0	0	0	0
	6	6	12.7	105.6	144	49	25	15	14	13	9
	7	5	24.0	96.6	216	214	89	76	60	44	13
	8	4	35.4	87.2	250	175	158	144	125	104	25
	9	3	46.8	876.0	267	227	221	206	186	160	60
	10	2	57.5	60.9	277	267	270	255	233	205	89
	11	1	66.2	37.1	283	293	301	287	264	234	108
	12		70.0	0.0	284	301	312	297	274	243	114
	Ежедневные показатели поверхности				3160	2552	2442	2264	2040	1760	724
Июнь 21	5	7	4.2	117.3	22	4	3	3	2	2	1
	6	6	14.8	108.4	155	60	30	18	17	16	10
	7	5	26.0	99.7	216	123	92	77	59	41	14
	8	4	37.4	90.7	246	182	159	142	121	97	16
	9	3	48.8	80.2	263	233	219	202	179	151	47
	10	2	59.8	65.8	272	272	266	248	224	194	74
	11	1	69.2	41.9	277	296	296	278	253	221	92
	12		73.5	0.0	279	304	306	289	263	230	98
	Ежедневные показатели поверхности				3180	2648	2434	2224	1974	1670	610

Таблица А.3 *(Продолжение)*

Дата		Время суток	Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							14	24	34	44	90
	5	7	02.3	115.2	2	0	0	0	0	0	0
	6	6	13.1	106.1	138	50	26	17	15	14	9
июл.21	7	5	24.3	97.2	208	114	89	75	60	44	14
	8	4	35.8	87.8	241	174	157	142	124	102	24
	9	3	47.2	76.7	259	225	218	203	182	157	58
	10	2	57.9	61.7	269	265	266	251	229	200	86
	11	1	66.7	37.9	275	290	296	281	258	228	104
	12		70.6	0.0	276	298	307	292	269	238	111
	Ежедневные показатели поверхности				3062	2534	2409	2230	2006	1728	702
	6	6	07.9	99.5	81	21	12	9	8	7	5
	7	5	19.3	90.9	191	87	76	69	60	49	12
	8	4	30.7	79.9	237	150	150	141	129	113	50
авг.21	9	3	41.8	67.9	260	205	216	207	193	173	89
	10	2	51.7	52.1	272	246	267	259	244	221	120
	11	1	59.3	29.7	278	273	300	292	276	252	140
	12		62.3	0.0	280	282	311	303	287	262	147
	Ежедневные показатели поверхности				2916	2244	2354	2258	2104	1894	978
	7	5	11.4	80.2	149	43	51	51	49	47	32
	8	4	22.5	69.6	230	109	133	134	131	124	84
	9	3	32.8	57.3	263	167	206	208	203	193	132
сен.21	10	2	41.6	41.9	280	211	262	265	260	247	168
	11	1	47.7	22.6	287	239	298	301	295	281	192
	12		50.0	0.0	290	249	310	313	307	292	200
	Ежедневные показатели поверхности				2708	1788	2210	2228	2182	2074	1416
	7	5	04.5	72.3	48	7	14	15	17	17	16
	8	4	15.0	61.9	204	68	106	Н3	117	118	100
	9	3	24.5	49.8	257	126	185	195	200	198	160
окт.21	10	2	32.4	35.6	280	170	245	257	261	257	203
	11	1	37.6	18.7	291	199	283	295	299	294	229
	12		39.5	0.0	294	208	295	308	312	306	238
	Ежедневные показатели поверхности				2454	1348	1962	2060	2098	2074	1654
	8	4	08.2	55.4	136	28	63	72	78	82	81
	9	3	17.0	44.1	232	82	152	167	178	183	167
ноя.21	10	2	24.0	31.0	268	126	215	233	245	249	219
	11	1	28.5	16.1	283	153	254	273	285	288	248
	12		30.2	0.0	288	163	267	287	298	301	258
	Ежедневные показатели поверхности				2128	942	1636	1778	1870	1908	1686
	8	4	05.5	53.0	89	14	39	45	50	54	56
	9	3	14.0	41.9	217	65	135	152	164	171	163
дек.21	10	2	20.,	29.4	261	107	200	221	235	242	221
	11	1	25.0	15.2	280	134	239	262	276	283	252
	12		26.6	0.0	285	143	253	275	290	296	263
	Ежедневные показатели поверхности				1978	782	1480	1634	1740	1796	1646

Таблица А.4 Положение солнца и солнечное излучение на широте 48° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							38	48	58	68	90
Янв 21	8	4	3.5	54.6	37	4	17	19	21	22	22
	9	3	11.0	42.6	185	46	120	132	140	145	139
	10	2	16.9	29.4	239	83	190	206	216	220	206
	11	1	20.7	15.	261	107	231	249	260	263	243
	12		22.0	0.0	267	115	245	264	275	278	255
	Ежедневные показатели поверхности				1710	596	1360	1478	1550	1578	1478
Фев 21	7	5	2.4	72.2	12	1	3	4	4	4	4
	8	4	11.6	60.5	188	49	95	102	105	106	96
	9	3	19.7	47.7	251	100	178	187	191	190	167
	10	2	26.2	33.3	278	139	240	251	255	251	217
	11	1	30.5	17.2	290	165	278	290	294	288	247
	12		32.0	0.0	293	173	291	304	307	301	258
	Ежедневные показатели поверхности				2330	1080	1880	1972	2024	1978	1720
Март 21	7	5	10.0	78.7	153	37	49	49	47	45	35
	8	4	19.5	66.8	236	96	131	132	129	122	96
	9	3	28.2	53.4	270	147	205	207	203	193	152
	10	2	35.4	37.8	287	187	263	266	261	248	195
	11	1	40.3	19.8	295	212	300	303	297	283	223
	12		42.0	0.0	298	220	312	315	309	294	232
	Ежедневные показатели поверхности				2780	1578	2208	2228	2182	2074	1632
Апр 21	6	6	8.6	97.8	108	27	13	9	8	7	5
	7	5	18.6	86.7	205	85	76	69	59	48	21
	8	4	28.5	74.9	247	142	149	141	129	113	69
	9	3	37.8	61.2	268	191	216	208	194	174	115
	10	2	45.8	44.6	280	228	268	260	245	223	152
	11	1	51.5	24.0	286	252	301	294	278	254	177
	12		53.6	0.0	288	260	313	305	289	264	185
	Ежедневные показатели поверхности				3076	2106	2358	2266	2114	1902	1262
Май 21	5	7	5.2	114.3	41	9	4	4	4	3	2
	6	6	14.7	103.7	162	61	27	16	15	13	10
	7	5	24.6	93.0	219	118	89	75	60	43	13
	8	4	34.7	81.6	248	171	156	142	123	101	45
	9	3	44.3	68.3	264	217	217	202	182	156	86
	10	2	53.0	51.3	274	252	265	251	229	200	120
	11	1	59.5	28.6	279	274	296	281	258	228	141
	12		62.0	0.0	280	281	306	292	269	238	149
	Ежедневные показатели поверхности				3254	2482	2418	2234	2010	1728	982
Июнь 21	5	7	7.9	116.5	77	21	9	9	8	7	5
	6	6	17.2	106.2	172	74	33	19	18	16	12
	7	5	27.0	95.8	220	129	93	77	59	39	15
	8	4	37.1	84.6	246	181	157	140	119	95	35
	9	3	46.9	71.6	261	225	216	198	175	147	74
	10	2	55.8	54.8	269	259	262	244	220	189	105
	11	1	62.7	31.2	274	280	291	273	248	216	126
	12		65.5	0.0	275	287	301	283	258	225	133
	Ежедневные показатели поверхности				3312	2626	2420	2204	1950	1644	874

Таблица А.4 *(Продолжение)*

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							38	48	58	68	90
Июль 21	5	7	5.7	114.7	43	10	5	5	4	4	3
	6	6	15.2	104.1	156	62	28	18	16	15	11
	7	5	25.1	93.5	211	118	89	75	59	42	14
	8	4	35.1	82.1	240	171	154	140	121	99	43
	9	3	44.8	68.8	256	215	214	199	178	153	83
	10	2	53.5	51.9	266	250	261	246	224	195	116
	11	1	60.1	29.0	271	272	291	276	253	223	137
	12		62.6	0.0	272	279	301	286	263	232	144
	Ежедневные показатели поверхности				3158	2474	2386	2200	1974	1694	956
Авг 21	6	6	9.1	98.3	99	28	14	10	9	8	6
	7	5	19.1	87.2	190	85	75	67	58	47	20
	8	4	29.0	75.4	232	141	145	137	125	109	65
	9	3	38.4	61.8	254	189	210	201	187	168	110
	10	2	46.4	45.1	266	225	260	252	237	214	146
	11	1	52.2	24.3	272	248	293	285	268	244	169
	12		54.3	0.0	274	256	304	296	279	255	177
	Ежедневные показатели поверхности				2898	2086	2300	2200	2046	1836	1208
Сен 21	7	5	10.0	78.7	131	35	44	44	43	40	31
	8	4	19.5	66.8	215	92	124	124	121	115	90
	9	3	28.2	53.4	251	142	196	197	193	183	143
	10	2	35.4	37.8	269	181	251	254	248	236	185
	11	1	40.3	19.8	278	205	287	289	284	269	212
	12		42.0	0.0	280	213	299	302	296	281	221
	Ежедневные показатели поверхности				2568	1522	2102	2118	2070	1966	1546
Окт 21	7	5	2.0	71.9	4	0	1	1	1	1	1
	8	4	11.2	60.2	165	44	86	91	95	95	87
	9	3	19.3	47.4	233	94	167	176	180	178	157
	10	2	25.7	33.1	262	133	228	239	242	239	207
	11	1	30.0	17.1	274	157	266	277	281	276	237
	12		31.5	0.0	278	166	279	291	294	288	247
	Ежедневные показатели поверхности				2154	1022	1774	1860	1890	1866	1626
Нояб 21	8	4	3.6	54.7	36	5	17	19	21	22	22
	9	3	11.2	42.7	179	46	117	129	137	141	135

	10	2	17.1	29.5	233	83	186	202	212	215	201
	11	1	20.9	15.1	255	107	227	245	255	258	238
	12		22.2	0.0	261	115	241	259	270	272	250
	Ежедневные показатели поверхности				1668	596	1336	1448	1518	1544	1442
Дек 21	9	3	8.0	40.9	140	27	87	98	105	110	109
	10	2	13.6	28.2	214	63	164	180	192	197	190
	11	1	17.3	14.4	242	86	207	226	239	244	231
	12		18.6	0.0	250	94	222	241	254	260	244
	Ежедневные показатели поверхности				1444	446	1136	1250	1326	1364	1304

Таблица А.4 Положение солнца и солнечное излучение на широте 56° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							46	56	66	76	90
Янв 21	9	3	5.0	41.8	78	11	50	55	59	60	60
	10	2	9.9	28.5	170	39	135	146	154	156	153
	11	1	12.9	14.5	207	58	183	197	206	208	201
	12		14.0	0.0	217	65	198	214	222	225	217
	Ежедневные показатели поверхности				1126	282	934	1010	1058	1074	1044
Фев 21	8	4	7.6	59.4	129	25	65	69	72	72	69
	9	3	14.2	45.9	214	65	151	159	162	161	151
	10	2	19.4	31.5	250	98	215	225	228	224	208
	11	1	22.8	16.1	266	119	254	265	268	263	243
	12		24.0	0.0	270	126	268	279	282	276	255
	Ежедневные показатели поверхности				1986	740	1640	1716	1742	1716	1598
Март 21	7	5	8.3	77.5	128	28	40	40	39	37	32
	8	4	16.2	64.4	215	75	119	120	117	111	97
	9	3	23.3	50.3	253	118	192	193	189	180	154
	10	2	29.0	34.9	272	151	249	251	246	234	205
	11	1	32.7	17.9	282	172	285	288	282	268	236
	12		34.0	0.0	284	179	297	300	294	280	246
	Ежедневные показатели поверхности				2586	1268	2066	2084	2040	1938	1700
Апр 21	5	7	1.4	108.8	0	0	0	0	0	0	0
	6	6	9.6	96.5	122	32	14	9	8	7	6
	7	5	18.0	84.1	201	81	73	66	57	46	29
	8	4	26.1	70.9	239	129	143	135	123	108	82
	9	3	33.6	56.3	260	169	208	200	186	167	133
	10	2	39.9	39.7	272	201	259	251	236	214	174
	11	1	44.1	20.7	278	220	292	284	268	245	200
	12		45.6	0.0	280	227	303	295	279	255	209
	Ежедневные показатели поверхности				3024	1892	2282	2186	2038	1830	1458
Май 21	4	8	1.2	125.5	0	0	0	0	0	0	0
	5	7	8.5	113.4	93	25	10	9	8	7	6
	6	6	16.5	101.5	175	71	28	17	15	13	11
	7	5	24.8	89.3	219	119	88	74	58	41	16
	8	4	33.1	76.3	244	163	153	138	119	98	63
	9	3	40.9	61.6	259	201	212	197	176	151	109
	10	2	47.6	44.2	268	231	259	244	222	194	146
	11	1	52.3	23.4	273	249	288	274	251	222	170
	12		54.0	0.0	275	255	299	284	261	231	178
	Ежедневные показатели поверхности				3340	2374	2374	2188	1962	1682	1218
Июнь 21	4	8	4.2	127.2	21	4	2	2	2	2	1
	5	7	11.4	115.3	122	40	14	13	11	10	8
	6	6	19.3	103.6	185	86	34	19	17	15	12
	7	5	27.6	91.7	222	132	92	76	57	38	15
	8	4	35.9	78.8	243	175	154	137	116	92	55
	9	3	43.8	64.1	257	212	211	193	170	143	98
	10	2	50.7	46.4	265	240	255	238	214	184	133
	11	1	55.6	24.9	269	258	284	267	242	210	156
	12		57.5	0.0	271	264	294	276	251	219	164
	Ежедневные показатели поверхности				3438	2526	2388	2166	1910	1606	1120

Таблица А.5 *(Продолжение)*

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							46	56	66	76	90
Июль 21	4	8	1.7	125.8	0	0	0	0	0	0	0
	5	7	9.0	113.7	91	27	11	10	9	8	6
	6	6	17.0	101.9	169	72	30	18	16	14	12
	7	5	25.3	89.7	212	119	88	74	58	41	15
	8	4	33.6	76.7	237	163	151	136	117	96	61
	9	3	41.4	62.0	252	201	208	193	173	147	106
	10	2	48.2	44.6	261	230	254	239	217	189	142
	11	1	52.9	23.7	265	248	283	268	245	216	165
	12		54.6	0.0	267	254	293	278	255	225	173
	Ежедневные показатели поверхности				3240	2372	2342	2152	1926	1646	1186
Авг 21	5	7	2.0	109.2	1	0	0	0	0	0	0
	6	6	10.2	97.0	112	34	16	11	10	9	7
	7	5	18.5	84.5	187	82	73	65	56	45	28
	8	4	26.7	71.3	225	128	140	131	119	104	78
	9	3	34.3	56.7	246	168	202	193	179	160	126
	10	2	40.5	40.0	258	199	251	242	227	206	166
	11	1	44.8	20.9	264	218	282	274	258	235	191
	12		46.3	0.0	266	225	293	285	269	245	200
	Ежедневные показатели поверхности				2850	1884	2218	2118	1966	1760	1392
Сен 21	7	5	8.3	77.5	107	25	36	36	34	32	28
	8	4	16.2	64.4	194	72	111	111	108	102	89
	9	3	23.3	50.3	233	114	181	182	178	168	147
	10	2	29.0	34.9	253	146	236	237	232	221	193
	11	1	32.7	17.9	263	166	271	273	267	254	223
	12		34.0	0.0	266	173	283	285	279	265	233
	Ежедневные показатели поверхности				2368	1220	1950	1962	1918	1820	1594
Окт 21	8	4	7.1	59.1	104	20	53	57	59	59	57
	9	3	13.8	45.7	193	60	138	145	148	147	138
	10	2	19.0	31.3	231	92	201	210	213	210	195
	11	1	22.3	16.0	248	112	240	250	253	248	230
	12		23.5	0.0	253	119	253	263	266	261	241
	Ежедневные показатели поверхности				1804	688	1516	1586	1612	1588	1480
	9	3	5.2	41.9	76	12	49	54	57	59	58

Нояб 21	10	2	10.0	28.5	165	39	132	143	149	152	148
	11	1	13.1	14.5	201	58	179	193	201	203	196
	12		14.2	0.0	211	65	194	209	217	219	211
	Ежедневные показатели поверхности				1094	284	914	986	1032	1046	1016
Дек 21	9	3	1.9	40.5	5	0	3	4	4	4	4
	10	2	6.6	27.5	113	19	86	95	101	104	103
	11	1	9.5	13.9	166	37	141	154	163	167	164
	12		10.6	0.0	180	43	159	173	182	186	182
	Ежедневные показатели поверхности				748	156	620	678	716	734	722

Таблица А.6 Положение солнца и солнечное излучение на широте 64° с.ш.

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							54	64	74	84	90
Янв 21	10	2	2.8	28.1	22	2	17	19	20	20	20
	11	1	5.2	14.1	81	12	72	77	80	81	81
	12		6.0	0.0	100	16	91	98	102	103	103
	Ежедневные показатели поверхности				306	45	268	290	302	306	304
Фев 21	8	4	3.4	58.7	35	4	17	19	19	19	19
	9	3	8.6	44.8	147	31	103	108	111	110	107
	10	2	12.6	30.3	199	55	170	178	181	178	173
	11	1	15.1	15.3	222	71	212	220	223	219	213
	12		16.0	0.0	228	77	225	235	237	232	226
	Ежедневные показатели поверхности				1432	400	1230	1286	1302	1282	1252
Март 21	7	5	6.5	76.5	95	18	30	29	29	27	25
	8	4	20.7	62.6	185	54	101	102	99	94	89
	9	3	18.1	48.1	227	87	171	172	169	160	153
	10	2	22.3	32.7	249	112	227	229	224	213	203
	11	1	25.1	16.6	260	129	262	265	259	246	235
	12		26.0	0.0	263	134	274	277	271	258	246
	Ежедневные показатели поверхности				2296	932	1856	1870	1830	1736	1656
Апр 21	5	7	4.0	108.5	27	5	2	2	2	1	1
	6	6	10.4	95.1	133	37	15	9	8	7	6
	7	5	17.0	81.6	194	76	70	63	54	43	37
	8	4	23.3	67.5	228	112	136	128	116	102	91
	9	3	29.0	52.3	248	144	197	189	176	158	145
	10	2	33.5	36.0	260	169	246	239	224	203	188
	11	1	36.5	18.4	266	184	278	270	255	233	216
	12		97.6	0.0	268	190	289	281	266	243	225
	Ежедневные показатели поверхности				2982	1644	2176	2082	1936	1736	1594
Май 21	4	8	5.8	125.1	51	11	5	4	4	3	3
	5	7	11.6	112.1	132	42	13	11	10	9	8
	6	6	17.9	99.1	185	79	29	16	14	12	11
	7	5	24.5	85.7	218	117	86	72	56	39	28
	8	4	30.9	71.5	239	152	148	133	115	94	80
	9	3	36.8	56.1	252	182	204	190	170	145	128
	10	2	41.6	38.9	261	205	249	235	213	186	167
	11	1	44.9	20.1	265	219	278	264	242	213	193

	12		46.0	0.0	267	224	228	274	251	222	201
	Ежедневные показатели поверхности				3470	2236	2312	2124	1898	1624	1436
Июнь 21	3	9	4.2	139.4	21	4	2	2	2	2	1
	4	8	9.0	126.4	93	27	10	9	8	7	6
	5	7	14.7	113.6	154	60	16	15	13	11	10
	6	6	21.0	100.8	194	96	34	19	17	14	13
	7	5	27.5	87.5	221	132	91	74	55	36	23
	8	4	34.0	73.3	239	166	150	133	112	88	73
	9	3	39.9	57.8	251	195	204	187	164	137	119
	10	2	44.9	40.4	258	217	247	230	206	177	157
	11	1	48.3	20.9	262	231	275	258	233	202	181
	12		49.5	0.0	263	235	284	267	242	211	189
	Ежедневные показатели поверхности				3650	2488	2342	2118	1862	1558	1356

Таблица А.6 *(Продолжение)*

Дата	Время суток		Положение солнца		БТЕ/ч и общая изоляция на поверхности						
	До полудня	После полудня	Абс. высота	Азимут	Обычная	Гориз.	Угол наклона на юг с горизонтом				
							54	64	74	84	90
Июль 21	4	8	6.4	125.3	53	13	6	5	5	4	4
	5	7	12.1	112.4	128	44	14	13	11	10	9
	6	6	18.4	99.4	179	81	30	17	16	13	12
	7	5	25.0	86.0	211	118	86	72	56	38	28
	8	4	31.4	71.8	231	152	146	131	113	91	77
	9	3	37.3	56.3	245	182	201	186	166	141	124
	10	2	42.2	39.2	253	204	245	230	208	181	162
	11	1	45.4	20.2	257	218	273	258	236	207	187
	12		46.6	0.0	259	223	282	267	245	216	195
	Ежедневные показатели поверхности				3372	2248	2280	2090	1864	1588	1400
Авг 21	5	7	4.6	108.8	29	6	3	3	2	2	2
	6	6	11.0	95.5	123	39	16	11	10	8	7
	7	5	17.6	81.9	181	77	69	61	52	42	35
	8	4	23.9	67.8	214	113	132	123	112	97	87
	9	3	29.6	52.6	234	144	190	182	169	150	138
	10	2	34.2	36.2	246	168	237	229	215	194	179
	11	1	37.2	18.5	252	183	268	260	244	222	205
	12		38.3	0.0	254	188	278	270	255	232	215
	Ежедневные показатели поверхности				2808	1646	2108	1008	1860	1662	1522
Сен 21	7	5	6.5	76.5	77	16	25	25	24	23	21
	8	4	12.7	72.6	163	51	92	92	90	85	81
	9	3	18.1	48.1	206	83	159	159	156	147	141
	10	2	22.3	32.7	229	108	212	213	209	198	189
	11	1	25.1	16.6	240	124	246	248	243	230	220
	12		26.0	0.0	244	129	258	260	254	241	230
	Ежедневные показатели поверхности				2074	892	1726	1736	1696	1608	1532
Окт 21	8	4	3.0	58.5	17	2	9	9	10	10	10
	9	3	8.1	44.6	122	26	86	91	93	92	90
	10	2	12.1	30.2	176	50	152	159	161	159	155
	11	1	14.6	15.2	201	65	193	201	203	200	195
	12		15.5	0.0	208	71	207	215	217	213	208
	Ежедневные показатели поверхности				1238	358	1088	1136	1152	1134	1106
	10	2	3.0	28.1	23	3	18	20	21	21	21

Нояб 21	11	1	5.4	14.2	79	12	70	76	79	80	79
	12		6.2	0.0	97	17	89	96	100	101	100
	Ежедневные показатели поверхности				302	46	266	286	298	302	300
Дек 21	11	1	1.8	13.7	4	0	3	4	4	4	4
	12		2.6	0.0	16	2	14	15	16	17	17
	Ежедневные показатели поверхности				24	2	20	22	24	24	24

Приложение B

Копия от Госвами, И., Крейт, Ф., и Крайдер, Дж.Ф. (2000) Правила гелиотехнки, Второе издание. Тэйлор и Фрэнсис, Нью-Йорк.

Таблица B.1 Обозначение и характеристики для 94 ссылочных пассивных систем.

(a) Характеристики комплексной системы	
Свойства кладки	
теплопроводность (k)	
ярус солнечного поглощения	**0.5 БТЕ/ч/фт/°F**
все остальные кладки	**1.0 БТЕ/ч/фт/°F**
плотность (Q)	150 фунт/фт^3
Удельная теплоемкость (c)	**0.2 БТЕ/фунт/°F**
инфракрасное излучение нормальной поверхности	0.9
инфракрасное излучение селективной поверхности	0.1
Коэффициент поглощения солнечного излучения	
водяной экран	1.0
кладка, стена Тромба	1.0
прямой нагрев и солнечное поглощение	0.8
солнечное поглощение: емкость с водой	0.9
легковесная общая стена смежных зданий	0.7
другие легковесные поверхности	0.3
Свойства остекления	
характеристика прпускания	**рассеянный**
ориентация	**на юг**
индекс преломления	**1.526**
коэффициент погашения	**0.5 дюйм$^{-1}$**
толщина каждого стекла	**одна восьмая дюйма**
разрыв между стеклами	**полдюйма**
площадь излучения	0.9
Допустимые пределы	
комнатная температура	**от 65 до 75°F**
температура солнечного поглощения	**от 45 до 95° F**
внутреннее тепловыделение	0

Альтернативные энергетические системы и их применение. Б. К. Ходж.
© 2017 John Wiley & Sons, Ltd. Опубликованов 2017 годуJohnWiley&Sons, Ltd.
Веб-сайт: www.wiley.com\go\Hodge\AESystemsandApplications2E

Таблица B.1 *(Продолжение)*

(a) Характеристики комплексной системы

Термоциркуляционные клапаны (при использовании)	
площадь вскрытия/ площадь проектированной поверхности (сумма верхних и нижних клапанов)	0.06
высота между клапанами	8 фт
обратный поток	нет
Ночная изоляция (при использовании)	
тепловое сопротивление	R9
на месте, в светлое время суток	с 17:30 до 7:30
Допущения солнечной радиации	
затенение	нет
коэффициент диффузного отражения от земли	0.3

(b) Виды системы прямого нагрева (DG, от англ. Direct-gain)

Обозначение	Тепловая емкость* (в БТЕ/фт^2/°F	Плотность массы* (дюймы)	Соотношение массы к площади остекления	№ остекления	Ночная изоляция
A1	30	2	6	2	нет
A2	30	2	6	3	нет
A3	30	2	6	2	да
B1	45	6	3	2	нет
B2	45	6	3	3	нет
B3	45	6	3	2	да
Cl	60	4	6	2	нет
C2	60	4	6	3	нет
C3	60	4	6	2	да

(c) Типы вентилируемых стен Тромба (TW, от англ. Trombe-Wall)

Обозначение	Тепловая емкость* (БТЕ/фут^2/°F)	Плотность массы* (дюймы)	pck (**БТЕ^2/ч/фут^4/°F^2**)	№ остекления	Поверхность стены	Ночная изоляция
A1	15	6	30	2	нормальная	нет
A2	22.5	9	30	2	нормальная	нет
A3	30	12	30	2	нормальная	нет
A4	45	18	30	2	нормальная	нет
B1	15	6	15	2	нормальная	нет
B2	22.5	9	15	2	нормальная	нет
B3	30	12	15	2	нормальная	нет
B4	45	18	15	2	нормальная	нет
Cl	15	6	7.5	2	нормальная	нет
C2	22.5	9	7.5	2	нормальная	нет
C3	30	12	7.5	2	нормальная	нет
C4	45	18	7.5	2	нормальная	нет

Таблица B.1 *(Продолжение)*

(c) Типы вентилируемых стен Тромба (TW, от англ. Trombe-Wall)

D1	30	12	30	1	нормальная	нет
D2	30	12	30	3	нормальная	нет
D3	30	12	30	1	нормальная	да
D4	30	12	30	2	нормальная	да
D5	30	12	30	3	нормальная	да
El	30	12	30	1	селективная	нет
E2	30	12	30	2	селективная	нет
E3	30	12	30	1	селективная	да
E4	30	12	30	2	селективная	да

(d) Типы невентилируемых стен Тромба (TW, от англ. Trombe-Wall)

Обозначение	Тепловая емкость* (БТЕ/фут^2/°F)	Плотность массы* (дюймы)	pck (**БТЕ^2/ч/фут^4/°F^2**)	№ остекления	Поверхность стены	Ночная изоляция
FI	15	6	30	2	нормальная	нет
F2	22.5	9	30	2	нормальная	нет
F3	30	12	30	2	нормальная	нет
F4	45	18	30	2	нормальная	нет
G1	15	6	15	2	нормальная	нет
G2	22.5	9	15	2	нормальная	нет
G3	30	12	15	2	нормальная	нет
G4	45	18	15	2	нормальная	нет
HI	15	6	7.5	2	нормальная	нет
H2	22.5	9	7.5	2	нормальная	нет
H3	30	12	7.5	2	нормальная	нет
H4	45	18	7.5	2	нормальная	нет
11	30	12	30	1	нормальная	нет
12	30	12	30	3	нормальная	нет
13	30	12	30	1	нормальная	да
14	30	12	30	2	нормальная	да
15	30	12	30	3	нормальная	да
J1	30	12	30	1	селективная	нет
J2	30	12	30	2	селективная	нет
J3	30	12	30	1	селективная	да
J4	30	12	30	2	селективная	да

(e) Типы систем водяного экрана (WW, от англ. waterwall)

Обозначение	Тепловая емкость* (БТЕ/фут^2/°F)	Плотность массы* (дюймы)	№ остекления	Поверхность стены	Ночная изоляция
A1	15.6	3	2	нормальная	нет
A2	31.2	6	2	нормальная	нет
A3	46.8	9	2	нормальная	нет
A4	62.4	12	2	нормальная	нет

Таблица В.1 *(Продолжение)*

(e) Типы систем водяного экрана (WW, от англ. waterwall)

A5	93.6	18	2	нормальная	нет
A6	124.8	24	2	нормальная	нет
B1	46.8	9	1	нормальная	нет
B2	46.8	9	3	нормальная	нет
B3	46.8	9	1	нормальная	да
B4	46.8	9	2	нормальная	да
B5	46.8	9	3	нормальная	да
Cl	46.8	9	1	селективная	нет
C2	46.8	9	2	селективная	нет
C3	46.8	9	1	селективная	да
C4	46.8	9	2	селективная	да

(f) Типы систем солнечного поглощения (SS, от англ. sunspace)

Обозначение	Тип	Угол наклона (градусы)	Общая стена	Торцевая стена	Ночная изоляция
A1	прилежащий	50	кладка	матовая	нет
A2	прилежащий	50	кладка	матовая	да
A3	прилежащий	50	кладка	застекленная	нет
A4	прилежащий	50	кладка	застекленная	да
A5	прилежащий	50	теплоизолированная	матовая	нет
A6	прилежащий	50	теплоизолированная	матовая	да
A7	прилежащий	50	теплоизолированная	застекленная	нет
A8	прилежащий	50	теплоизолированная	застекленная	да
B1	прилежащий	90/30	кладка	матовая	нет
B2	прилежащий	90/30	кладка	матовая	да
B3	прилежащий	90/30	кладка	застекленная	нет
B4	прилежащий	90/30	кладка	застекленная	да
B5	прилежащий	90/30	теплоизолированная	матовая	нет
B6	прилежащий	90/30	теплоизолированная	матовая	да
B7	прилежащий	90/30	теплоизолированная	застекленная	нет
B8	прилежащий	90/30	теплоизолированная	застекленная	да
Cl	полузакрытый	90	кладка	обычная	нет
C2	полузакрытый	90	кладка	обычная	да
C3	полузакрытый	90	теплоизолированная	обычная	нет
C4	полузакрытый	90	теплоизолированная	обычная	да
D1	полузакрытый	50	кладка	обычная	нет
D2	полузакрытый	50	кладка	обычная	да
D3	полузакрытый	50	теплоизолированная	обычная	нет
D4	полузакрытый	50	теплоизолированная	обычная	да
El	полузакрытый	90/30	кладка	обычная	нет
E2	полузакрытый	90/30	кладка	обычная	да
E3	полузакрытый	90/30	теплоизолированная	обычная	нет
E4	полузакрытый	90/30	теплоизолированная	обычная	да

Таблица B.2 Таблица коэффициентов нагрузки в Санта Марии, Калифорния

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Санта Мария, Калифорния									3053 DD
WWA1	1776	240	119	73	50	35	25	18	12
WWA2	617	259	154	103	74	54	39	28	19
WW A3	523	261	164	114	82	61	45	33	22
WWA4	482	260	169	119	87	65	48	35	24
WWA5	461	263	175	125	92	69	52	38	26
WWA6	447	263	177	128	95	72	54	40	27
WWB1	556	220	128	85	60	43	32	23	15
WWB2	462	256	168	119	88	66	49	36	25
WWB3	542	315	211	151	112	85	64	47	32
WW B4	455	283	197	144	109	83	63	47	32
WWB5	414	263	184	136	103	79	60	45	31
WWC1	569	330	221	159	118	89	67	49	33
WW C2	478	288	197	143	107	81	61	45	31
WWC3	483	318	228	170	130	100	77	57	40
WW C4	426	280	200	149	114	88	68	51	35
TWA1	1515	227	113	70	48	34	24	17	11
TWA2	625	234	134	89	63	46	33	24	16
TW A3	508	231	140	95	68	50	37	27	18
TWA4	431	217	137	95	69	51	38	28	19
TWB1	859	212	112	71	49	35	25	18	12
TWB2	502	209	124	83	59	43	32	23	15
TWB3	438	201	123	84	60	44	33	24	16
TWB4	400	184	112	76	55	40	30	22	14
TW Cl	568	188	105	69	48	35	25	18	12
TWC2	435	178	105	70	50	36	27	19	13
TW C3	413	165	97	64	46	33	25	18	12
TWC4	426	146	82	54	38	27	20	14	10
TWD1	403	170	101	67	48	35	25	18	12
TWD2	488	242	152	105	76	57	42	31	21
TWD3	509	271	175	123	90	67	50	36	25
TW D4	464	266	177	127	94	71	53	39	27
TWD5	425	250	169	122	91	69	52	38	26
TW El	581	309	199	140	102	76	57	42	28
TWE2	512	283	186	132	97	73	55	40	27
TWE3	537	328	225	164	123	94	71	53	36
TWE4	466	287	199	145	109	83	63	47	32
TW FI	713	198	107	68	47	34	25	18	12
TW F2	455	199	120	81	58	42	31	22	15
TWF3	378	190	120	83	60	45	33	24	16
TWF4	311	169	110	77	57	42	32	23	16
TWG1	450	170	98	65	46	33	24	17	12
TWG2	331	163	102	70	51	38	28	20	14
TWG3	278	147	94	66	48	36	27	20	13
TWG4	222	120	78	55	40	30	22	16	11
TW HI	295	137	84	57	41	30	22	16	11
TW H2	226	118	75	52	38	28	21	15	10
TW H3	187	99	64	44	33	24	18	13	9

Таблица В.2*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH4	143	75	48	33	24	18	14	10	7
TW11	318	144	88	59	42	31	23	16	11
TW12	377	203	132	93	68	51	38	28	19
TW 13	404	226	149	106	78	58	44	32	22
TW 14	387	230	156	113	84	64	48	36	24
TW 15	370	226	155	113	85	65	49	36	25
TWJ1	483	271	179	127	94	71	53	39	26
TWJ2	422	246	165	119	88	67	50	37	25
TWJ3	446	283	199	146	111	85	65	48	33
TWJ4	400	254	178	132	100	77	58	43	30
DGA1	392	188	117	79	55	38	26	16	7
DGA2	389	190	121	85	61	45	32	22	14
DG A3	443	220	142	102	77	58	44	31	19
DGB1	384	191	122	86	64	48	35	24	13
DG B2	394	196	127	91	69	53	40	29	19
DGB3	445	222	145	105	80	62	49	37	25
DG Cl	451	225	146	104	78	61	47	34	21
DGC2	453	226	148	106	80	63	49	37	25
DGC3	509	254	167	121	92	73	58	45	31
SSA1	1171	396	220	142	98	69	49	34	22
SSA2	1028	468	283	190	135	98	71	50	33
SS A3	1174	380	209	133	91	64	45	31	20
SSA4	1077	481	289	193	136	98	71	50	32
SSA5	1896	400	204	127	86	60	42	29	18
SSA6	1030	468	283	190	135	97	71	50	32
SS A7	2199	359	178	109	72	50	35	24	15
SS A8	1089	478	285	190	133	96	69	48	31
SSB1	802	298	170	111	77	55	40	28	18
SS B2	785	366	224	152	108	79	57	41	27
SS B3	770	287	163	106	74	52	37	26	17
SS B4	790	368	224	152	108	78	57	40	26
SS B5	1022	271	144	91	62	44	31	22	14
SS B6	750	356	219	149	106	77	56	40	26
SS B7	937	242	127	80	54	38	27	19	12
SSB8	750	352	215	146	103	75	55	39	25
SSC1	481	232	144	99	71	52	39	28	19
SS C2	482	262	170	120	88	66	49	36	24
SS C3	487	185	107	71	50	36	27	19	13
SS C4	473	235	147	102	74	55	41	30	20
SSD1	1107	477	282	188	132	95	68	48	31
SS D2	928	511	332	232	169	125	92	66	43
SS D3	1353	449	248	160	110	78	56	39	25
SS D4	946	500	319	222	160	117	86	61	40
SS El	838	378	227	153	108	78	56	40	26
SS E2	766	419	272	190	138	102	75	54	36
SS E3	973	322	178	115	79	56	40	28	18
SSE4	780	393	247	170	122	89	65	47	31

Таблица B.3 Таблица коэффициентов нагрузки в Альбукерке, Нью-Мексико

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Альбукерке, Нью-Мексико									4292 DD
WWA1	1052	130	62	38	25	18	13	9	6
WWA2	354	144	84	56	39	29	21	15	10
WW A3	300	146	90	62	45	33	24	18	12
WWA4	276	146	93	65	47	35	26	19	13
WWA5	264	148	97	69	50	38	28	21	14
WWA6	256	148	99	70	52	39	30	22	15
WWB1	293	111	63	41	28	20	15	11	7
WWB2	270	147	96	67	49	37	28	20	14
WWB3	314	179	119	84	62	47	35	26	18
WWB4	275	169	116	85	64	49	37	28	19
WWB5	252	159	110	81	61	47	36	27	19
WWC1	333	190	126	89	66	50	38	28	19
WWC2	287	171	115	83	62	47	36	27	18
WWC3	293	191	136	101	77	59	46	34	24
WWC4	264	172	122	91	69	54	41	31	22
TWA1	900	124	60	37	25	17	12	9	6
TWA2	361	130	73	48	33	24	18	13	8
TW A3	293	129	77	52	37	27	20	15	10
TWA4	249	123	76	52	38	28	21	15	10
TWB1	502	117	60	38	26	18	13	9	6
TWB2	291	118	68	45	32	23	17	12	8
TWB3	254	114	68	46	33	24	18	13	9
TWB4	233	104	63	42	30	22	16	12	8
TW Cl	332	106	58	37	26	19	14	10	6
TWC2	255	101	58	39	27	20	15	11	7
TWC3	243	94	54	36	25	18	13	10	7
TWC4	254	84	46	30	21	15	11	8	5
TWD1	213	86	50	33	23	17	12	9	6
TWD2	287	139	86	59	43	32	24	17	12
TWD3	294	153	97	68	49	37	27	20	14
TWD4	281	158	104	74	55	41	31	23	16
TWD5	260	151	101	73	54	41	31	23	16
TW El	339	177	113	78	57	43	32	23	16
TWE2	308	168	109	77	56	42	32	23	16
TWE3	323	195	133	96	72	55	42	31	21
TWE4	287	175	120	88	66	50	38	28	20
TW FI	409	108	57	36	24	17	13	9	6
TWF2	260	110	65	43	31	22	17	12	8
TWF3	216	106	66	45	33	24	10	13	9
TWF4	178	95	61	42	31	23	17	13	9
TWG1	256	93	53	34	24	17	13	9	6
TWG2	189	91	56	38	27	20	15	11	7
TWG3	159	82	52	36	26	20	15	11	7
TWG4	128	68	43	30	22	16	12	9	6
TW HI	168	76	45	31	22	16	12	9	6
TWH2	130	66	41	29	21	15	11	8	6

Таблица В.3*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH3	108	56	35	25	8	13	10	7	5
TWH4	83	42	27	19	13	10	7	5	4
TW11	166	73	43	29	20	15	11	8	5
TW12	221	117	75	52	30	28	21	16	11
TW 13	234	128	83	59	43	32	24	10	12
TW 14	234	137	92	66	49	37	28	21	14
TW 15	226	136	93	67	50	38	29	22	15
TWJ1	282	156	102	72	53	40	30	22	15
TWJ2	254	146	97	69	51	39	29	22	15
TWJ3	269	169	118	86	65	50	38	29	20
TWJ4	247	155	106	80	60	46	35	26	18
DGA1	211	97	57	36	22	13	5	—	—
DGA2	227	107	67	46	32	23	16	10	5
DG A3	274	131	83	59	44	34	25	18	10
DGB1	210	97	60	42	30	21	13	6	—
DGB2	232	110	69	49	37	28	21	14	8
DGB3	277	134	85	61	47	37	28	21	14
DG Cl	253	120	74	53	39	30	22	14	—
DG C2	271	130	82	59	45	35	26	19	12
DG C3	318	155	96	71	54	43	34	26	18
SSA1	591	187	101	64	44	31	22	16	10
SS A2	531	232	137	92	65	47	34	25	16
SS A3	566	170	90	56	38	27	19	13	8
SSA4	537	230	135	89	63	45	33	23	15
SSA5	980	187	92	56	37	26	18	13	8
SSA6	529	231	136	91	64	47	34	24	16
SS A7	1103	158	74	44	29	20	14	10	6
SSA8	540	226	131	87	61	44	32	23	15
SSB1	403	141	78	50	35	25	18	13	8
SS B2	412	186	111	75	53	39	28	20	14
SS B3	372	130	71	46	31	22	16	11	7
SS B4	403	181	106	72	51	37	27	20	13
SS B5	518	127	65	40	27	19	13	9	6
SS B6	390	179	106	73	52	38	28	20	13
SS B7	457	108	54	33	22	16	11	8	5
SS B8	379	171	102	69	49	35	26	19	12
SSC1	270	126	77	52	37	27	20	15	10
SS C2	282	150	97	68	49	37	28	20	14
SS C3	276	101	57	37	26	19	14	10	7
SS C4	277	135	83	57	41	31	23	17	11
SSD1	548	225	130	85	59	43	31	22	14
SS D2	474	253	162	113	82	61	45	33	22
SS D3	683	212	113	72	49	35	25	17	11
SSD4	484	248	156	107	77	57	42	30	20
SS El	410	176	103	68	48	35	25	18	12
SS E2	390	208	133	92	67	50	37	27	18
SS E3	487	151	80	51	35	25	18	12	8
SSE4	400	195	120	82	59	43	32	23	15

Таблица B.4 Таблица коэффициентов нагрузки в Нашвилл, Теннесси

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Нашвилл, Теннесси									3696 DD
WWA1	588	60	24	13	8	5	3	2	1
WWA2	192	70	38	23	15	11	7	5	3
WWA3	161	72	42	27	18	13	9	6	4
WWA4	148	72	43	29	20	14	10	7	5
WWA5	141	74	46	31	22	16	11	8	5
WWA6	137	74	47	32	22	16	12	8	5
WWB1	135	41	19	10	6	3	2	—	—
WWB2	152	78	48	33	23	17	12	9	6
WWB3	179	97	61	42	30	22	16	12	8
WWB4	164	97	65	46	34	25	19	14	9
WWB5	153	93	63	45	33	25	19	14	9
WWC1	193	105	67	46	33	24	18	13	8
WWC2	169	97	63	44	32	24	18	13	8
WWC3	181	115	79	58	43	33	25	18	12
WWC4	164	104	72	53	39	30	23	17	11
TWA1	509	59	25	13	8	5	3	2	1
TWA2	199	64	33	20	13	9	6	4	3
TW A3	160	65	36	23	15	11	8	5	3
TWA4	136	62	36	23	16	11	8	6	4
TWB1	282	57	26	15	9	6	4	3	2
TWB2	161	59	32	20	13	9	6	4	3
TWB3	141	58	32	21	14	10	7	5	3
TWB4	131	54	30	19	13	9	7	5	3
TW Cl	188	53	27	16	10	7	5	3	2
TWC2	144	52	28	18	12	8	6	4	2
TWC3	139	49	27	17	11	8	5	4	2
TWC4	149	45	23	14	9	7	5	3	2
TWD1	99	33	16	9	5	3	2	1	—
TWD2	164	75	44	29	20	14	10	7	5
TWD3	167	82	49	33	23	17	12	8	5
TWD4	168	91	58	40	29	21	15	11	7
TWD5	160	89	58	40	29	22	16	12	8
TW El	198	98	59	40	28	20	15	10	7
TWE2	182	95	59	40	29	21	15	11	7
TWE3	197	115	76	54	39	29	22	16	11
TWE4	178	105	70	50	37	27	20	15	10
TW FI	221	50	23	13	8	5	4	2	1
TWF2	139	53	29	18	12	8	6	4	2
TWF3	116	52	30	19	13	9	7	5	3
TWF4	96	47	28	19	13	9	7	5	3
TWG1	137	44	22	13	9	6	4	3	2
TWG2	101	44	25	16	11	8	5	4	2
TWG3	86	41	24	16	11	8	6	4	2
TWG4	69	34	21	14	10	7	5	3	2
TW HI	89	36	20	13	8	6	4	3	2
TWH2	69	33	19	12	9	6	4	3	2
TWH3	59	28	17	11	8	5	4	3	2

Таблица В.4*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH4	46	22	13	9	6	4	3	2	1
TW11	74	26	13	7	4	2	1	—	—
TW12	125	62	38	25	18	13	9	7	4
TW 13	133	69	43	29	20	15	11	8	5
TW 14	139	78	51	35	26	19	14	10	7
TW 15	137	80	53	37	27	20	15	11	7
TWJ1	164	86	54	36	26	19	14	10	6
TWJ2	150	82	53	36	26	19	14	10	7
TWJ3	165	101	68	49	36	27	20	15	10
TWJ4	153	93	63	46	34	25	19	14	10
DGA1	98	34	—	—	—	—	—	—	—
DGA2	130	55	31	19	11	6	—	—	—
DG A3	173	78	47	32	23	16	11	7	2
DGB1	100	36	17	—	—	—	—	—	—
DG B2	134	58	33	22	15	10	6	—	—
DGB3	177	81	49	33	24	18	14	10	6
DG Cl	131	52	28	17	9	—	—	—	—
DG C2	161	71	42	28	20	14	10	6	—
DG C3	205	94	57	39	29	22	17	12	8
SSA1	351	100	50	29	19	13	9	6	4
SSA2	328	135	76	49	33	24	17	12	8
SS A3	330	87	41	24	15	10	6	4	2
SSA4	331	133	74	47	32	22	16	11	7
SSA5	595	98	43	24	15	10	7	4	2
SSA6	324	132	75	48	32	23	16	11	7
SSA7	668	79	32	17	10	6	4	2	1
SSA8	330	129	71	45	30	21	15	10	6
SSB1	236	74	38	23	15	10	7	5	3
SS B2	258	110	63	41	28	20	14	10	6
SS B3	212	65	32	19	12	8	5	3	2
SS B4	251	105	60	39	27	19	13	9	6
SS B5	307	65	30	17	10	7	4	3	2
SS B6	241	104	60	39	27	19	14	10	6
SS B7	264	52	23	12	7	5	3	2	—
SS B8	233	98	56	36	25	17	12	9	5
SSC1	141	60	33	21	14	10	7	5	3
SS C2	161	81	50	33	23	17	12	9	6
SS C3	149	48	25	15	10	7	4	3	2
SS C4	160	73	43	28	19	14	10	7	5
SSD1	317	119	64	39	26	18	13	8	5
SS D2	287	147	90	61	43	31	23	16	10
SS D3	405	113	55	33	21	14	10	6	4
SSD4	295	144	87	58	40	29	21	15	10
SS El	229	89	48	29	19	13	9	6	4
SS E2	233	118	72	48	34	24	18	12	8
SS E3	283	77	37	22	14	9	6	4	2
SSE4	242	111	65	43	29	21	15	11	7

Таблица B.5 Таблица коэффициентов нагрузки в Медфорде, Орегон

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Медфорд, Орегон									4930 DD
WWA1	708	64	24	11	—	—	—	—	—
WWA2	212	73	38	22	13	7	3	—	—
WW A3	174	75	41	25	16	9	5	2	—
WWA4	158	74	43	27	17	11	6	3	1
WWA5	149	75	45	29	19	12	7	4	2
WWA6	144	75	46	30	20	13	8	4	2
WWB1	154	43	16	—	—	—	—	—	—
WWB2	162	80	48	31	21	14	9	6	3
WWB3	190	100	62	41	28	19	13	8	5
WW B4	171	99	65	45	32	23	16	11	7
WWB5	160	95	63	45	32	23	17	12	7
WWC1	205	108	67	45	31	21	15	10	6
WWC2	178	99	63	43	30	22	15	10	6
WW C3	189	117	80	57	42	31	23	16	10
WWC4	170	106	72	52	38	28	21	15	9
TWA1	607	63	25	12	5	—	—	—	_
TWA2	222	68	33	19	11	6	2	—	—
TW A3	175	67	36	21	13	8	4	2	—
TWA4	147	64	36	22	14	9	5	3	1
TWB1	327	61	27	14	7	3	—	—	—
TWB2	178	62	32	19	12	7	4	2	—
TWB3	154	60	33	20	12	8	4	2	1
TWB4	143	56	31	19	12	8	5	2	1
TW Cl	212	56	27	15	9	5	2	—	—
TWC2	159	55	28	17	11	7	4	2	—
TWC3	154	52	27	16	10	6	4	2	1
TWC4	167	48	24	14	9	5	3	2	—
TWD1	112	34	14	—	—	—	—	—	—
TWD2	177	77	44	28	18	12	8	5	3
TWD3	180	85	50	32	21	14	9	6	3
TWD4	177	93	58	39	27	19	13	9	5
TWD5	168	92	58	40	28	20	14	10	6
TW El	213	101	60	39	26	18	12	8	4
TWE2	194	98	59	39	27	19	13	9	5
TWE3	208	118	77	53	38	27	20	13	8
TWE4	186	108	71	49	36	26	19	13	8
TW FI	256	53	23	12	5	—	—	—	—
TWF2	153	56	29	17	10	5	2	—	—
TWF3	125	54	30	18	11	7	3	1	—
TWF4	102	48	28	18	11	7	4	2	1
TWG1	153	46	22	12	7	—	—	—	—
TWG2	109	46	25	15	9	5	3	1	—
TWG3	92	42	24	15	9	6	3	2	—
TWG4	74	35	20	13	8	5	3	2	—
TW HI	97	38	20	12	7	4	1	—	—
TWH2	75	34	19	12	7	5	3	1	—

Таблица B.5*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH3	63	29	17	10	7	4	3	1	
TWH4	49	23	13	8	5	3	2	1	—
TW11	83	27	10	—	—	—	—	—	—
TW12	133	64	38	24	16	11	7	4	2
TW 13	142	71	43	28	19	13	9	5	3
TW 14	146	80	51	35	25	17	12	8	5
TW 15	144	82	53	37	26	19	13	9	6
TWJ1	175	89	54	36	24	17	11	7	4
TWJ2	158	85	53	36	25	18	12	8	5
TWJ3	173	103	69	48	35	26	18	13	8
TWJ4	160	96	64	45	33	24	17	12	8
DGA1	110	35	—	—	—	—	—	—	—
DGA2	142	58	32	18	9	—	—	—	—
DG A3	187	82	48	32	22	15	9	5	—
DGB1	110	40	15	—	—	—	—	—	—
DGB2	146	61	35	21	13	7	—	—	—
DGB3	193	84	51	34	24	17	12	7	3
DG Cl	144	57	29	13	—	—	—	—	—
DG C2	177	75	44	28	19	12	6	—	—
DGC3	224	98	60	41	29	21	14	10	5
SSA1	415	110	51	28	16	9	4	2	—
SSA2	372	146	79	48	31	21	14	8	5
SS A3	397	96	42	21	10	—	—	—	—
SSA4	379	144	76	46	29	19	12	7	4
SSA5	732	111	45	23	12	5	—	—	—
SSA6	368	143	77	47	30	20	13	8	4
SSA7	846	90	33	14	—	—	—	—	—
SS A8	379	140	73	44	27	17	11	6	3
SSB1	274	81	38	21	12	6	3	—	—
SS B2	288	117	65	40	26	18	12	7	4
SS B3	249	71	33	17	8	—	—	—	—
SS B4	282	113	62	38	25	16	11	7	4
SS B5	368	72	30	15	7	—	—	—	—
SS B6	269	111	62	30	25	17	11	7	4
SS B7	323	58	23	10	—	—	—	—	—
SS B8	262	106	57	35	23	15	9	6	3
SSC1	153	62	33	19	11	5	—	—	—
SS C2	172	83	50	32	22	15	10	6	3
SS C3	166	51	24	13	7	3	—	—	—
SS C4	173	76	43	27	18	12	8	5	3
SSD1	367	129	65	37	22	13	7	3	1
SS D2	318	156	92	60	40	27	18	12	7
SS D3	480	124	57	31	18	10	5	2	—
SSD4	328	153	89	57	38	26	17	11	6
SS El	262	95	48	27	15	7	—	—	—
SS E2	257	124	73	47	31	21	14	9	5
SS E3	334	84	38	20	10	4	—	—	—
SSE4	269	118	67	42	27	18	12	7	4

Таблица B.6 Таблица коэффициентов нагрузки в Бостоне, Массачусетс

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Бостон, Массачусетс									5621 DD
WWA1	368	28	9	—	—	—	—	—	—
WWA2	119	41	20	12	7	5	3	2	—
WW A3	101	43	24	15	10	6	4	3	1
WWA4	93	44	26	16	11	7	5	3	2
WWA5	89	45	27	18	12	8	6	4	2
WWA6	87	46	28	19	13	9	6	4	3
WWB1	59	—	—	—	—	—	—	—	—
WW B2	103	52	31	21	15	10	7	5	3
WWB3	123	66	41	28	20	14	10	7	5
WWB4	118	70	46	33	24	18	13	9	6
WWB5	113	69	46	33	25	18	14	10	7
WWC1	135	72	46	31	22	16	12	8	5
WWC2	121	68	44	31	22	16	12	9	6
WW C3	136	86	60	44	33	25	19	14	9
WWC4	124	78	54	40	30	23	17	12	8
TWA1	324	30	11	4	—	—	—	—	—
TWA2	126	37	18	10	6	4	2	1	—
TW A3	102	39	21	13	8	5	3	2	1
TWA4	88	38	22	14	9	6	4	3	2
TWB1	180	32	13	7	4	2	—	—	—
TWB2	104	36	19	11	7	5	3	2	1
TWB3	92	36	19	12	8	5	3	2	1
TWB4	86	34	19	12	8	5	4	2	1
TW Cl	122	32	15	9	5	3	2	1	—
TWC2	95	33	17	10	7	4	3	2	1
TWC3	93	31	16	10	6	4	3	2	1
TWC4	102	29	15	9	6	4	3	2	1
TWD1	45	—	—	—	—	—	—	—	—
TWD2	112	49	28	18	12	9	6	4	3
TWD3	113	54	32	21	15	10	7	5	3
TWD4	121	64	41	28	20	15	11	8	5
TWD5	118	66	42	30	21	16	12	8	6
TW El	138	67	40	27	18	13	9	7	4
TWE2	130	66	41	28	20	14	10	7	5
TWE3	146	84	56	39	29	21	16	11	8
TWE4	133	78	52	37	27	20	15	11	7
TW FI	134	25	10	4	—	—	—	—	—
TWF2	86	30	16	9	5	3	2	1	—
TWF3	72	31	17	11	7	4	3	2	1
TWF4	61	29	17	11	7	5	3	2	1
TWG1	83	24	11	6	3	2	—	—	—
TWG2	63	26	14	9	5	4	2	1	—
TWG3	54	25	14	9	6	4	3	2	1
TWG4	45	21	12	8	5	4	3	2	1
TW HI	54	21	11	6	4	2	1	—	—
TWH2	44	20	11	7	5	3	2	1	—
TWH3	38	17	10	6	4	3	2	1	—

Таблица В.6*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH4	30	14	8	5	3	2	2	1	_
TW11	30	—	—	—	—	—	—	—	—
TW12	84	41	24	16	11	8	6	4	2
TW 13	91	46	28	19	13	9	7	5	3
TW 14	100	56	36	25	18	13	10	7	5
TW 15	101	58	38	27	20	15	11	8	5
TWJ1	114	59	37	25	17	12	9	6	4
TWJ2	107	58	37	25	18	13	10	7	4
TWJ3	123	75	51	36	27	20	15	11	7
TWJ4	115	70	47	34	25	19	14	10	7
DGA1	43	—	—	—	—	—	—	—	—
DGA2	85	34	18	9	—	—	—	—	—
DG A3	125	56	33	22	16	11	7	4	—
DGB1	44	—	—	—	—	—	—	—	—
DGB2	87	36	20	12	7	—	—	—	—
DGB3	129	58	35	24	17	13	9	6	3
DG Cl	71	23	—	—	—	—	—	—	—
DG C2	109	47	27	17	12	8	4	—	—
DG C3	151	68	41	28	21	16	12	8	5
SSA1	230	61	29	16	10	6	4	2	1
SSA2	231	93	52	33	22	15	11	7	5
SS A3	205	48	20	10	4	—	—	—	—
SSA4	229	90	49	31	20	14	9	6	4
SSA5	389	58	23	11	6	3	—	—	—
SSA6	226	91	50	32	21	15	10	7	4
SSA7	420	40	12	—	—	—	—	—	—
SSA8	226	86	46	28	19	12	8	6	3
SSB1	151	44	21	12	7	4	2	1	—
SS B2	183	77	43	28	19	13	9	6	4
SS B3	129	36	16	8	3	—	—	—	—
SS B4	176	73	41	26	17	12	8	6	4
SS B5	193	36	15	7	3	—	—	—	—
SS B6	169	72	41	26	18	12	9	6	4
SS B7	157	25	7	—	—	—	—	—	—
SS B8	160	66	37	23	16	11	7	5	3
SSC1	84	33	17	10	6	4	2	1	—
SS C2	110	54	33	22	15	11	8	5	3
SS C3	91	26	12	7	4	2	—	—	—
SS C4	109	48	28	18	12	9	6	4	3
SSD1	206	73	38	22	14	9	5	3	2
SS D2	203	103	63	42	29	21	15	10	6
SS D3	264	69	32	18	10	6	4	2	1
SSD4	208	100	60	39	27	19	14	9	6
SS El	140	51	25	14	8	4	2	—	—
SS E2	161	80	48	32	22	15	11	7	5
SS E3	177	44	19	10	5	2	—	—	—
SSE4	166	75	43	28	19	13	9	6	4
TWH4	30	14	8	5	3	2	2	1	_

Таблица B.7 Таблица коэффициентов нагрузки в Мадиосне, Висконсин

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
Мадиосн, Висконсин									7730 DD
WWA1	**278**	—	—	—	—	—	—	—	—
WWA2	91	27	12	—	—	—	—	—	—
WW A3	77	30	15	8	3	—	—	—	—
WWA4	72	32	17	10	5	—	—	—	—
WWA5	69	33	19	11	7	4	—	—	—
WWA6	67	34	19	12	7	4	2	—	—
WWB1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WWB2	84	41	24	15	10	7	5	3	2
WWB3	102	53	32	21	15	10	7	5	3
WWB4	101	59	39	27	19	14	10	7	5
WWB5	98	59	39	28	20	15	11	8	5
WWC1	113	59	37	25	17	12	8	6	3
WWC2	103	57	37	25	18	13	9	6	4
WWC3	119	75	51	37	28	21	15	11	7
WWC4	109	68	47	34	25	19	14	10	7
TWA1	249	16	—	—	—	—	—	—	—
TWA2	97	26	11	4	—	—	—	—	—
TW A3	79	28	13	7	3	—	—	—	—
TWA4	69	28	15	9	5	3	—	—	—
TWB1	139	20	5	—	—	—	—	—	—
TWB2	81	26	12	6	3	—	—	—	—
TWB3	72	27	13	7	4	2	—	—	—
TWB4	69	26	13	8	5	3	1	—	—
TW Cl	96	23	10	4	—	—	—	—	—
TWC2	76	25	12	7	4	2	—	—	—
TWC3	75	24	12	7	4	2	1	—	—
TWC4	84	23	11	6	4	2	1	—	—
TWD1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TWD2	91	39	22	13	9	6	4	2	1
TWD3	93	43	25	16	10	7	5	3	1
TWD4	103	54	34	23	16	12	8	6	4'
TWD5	102	56	36	25	18	13	10	7	4
TW El	115	54	32	21	14	10	7	4	3
TWE2	110	55	34	22	16	11	8	5	3
TWE3	126	72	47	33	24	18	13	9	6
TWE4	116	68	45	32	23	17	13	9	6
TW FI	99	13	—	—	—	—	—	—	—
TWF2	65	20	8	—	—	—	—	—	—
TWF3	55	22	11	5	—	—	—	—	—
TWF4	47	21	11	7	4	2	—	—	—
TWG1	61	14	—	—	—	—	—	—	—
TWG2	47	18	8	4	—	—	—	—	—
TWG3	42	18	9	5	3	—	—	—	—
TWG4	35	16	9	5	3	2	—	—	—
TW HI	41	13	6	—	—	—	—	—	—
TWH2	34	14	7	4	2	—	—	—	—

Таблица В.7*(Продолжение)*

SSF	.10	.20	.30	.40	.50	.60	.70	.80	.90
TWH3	29	13	7	4	2	1	—	—	—
TWH4	24	10	6	3	2	1	—	—	—
TW11	—	—	—	—	—	—	—	—	—
TW12	68	32	18	12	8	5	3	2	1
TW 13	75	37	22	14	10	7	4	3	2
TW 14	85	47	30	21	15	11	8	5	3
TW 15	87	50	33	23	16	12	9	6	4
TWJ1	95	48	29	19	13	9	6	4	3
TWJ2	91	48	30	21	14	10	7	5	3
TWJ3	106	65	43	31	23	17	12	9	6
TWJ4	100	61	41	29	21	16	12	9	6
DGA1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DGA2	68	25	11	—		—	—	—	—
DG A3	109	47	28	18	12	8	5	—	—
DGB1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
DGB2	70	27	14	6	—	—	—	—	—
DGB3	114	50	30	20	14	10	7	4	—
DG Cl	47	—	—	—	—	—	—	—	—
DGC2	91	37	21	13	7	—	—	—	—
DGC3	133	59	35	24	17	13	9	6	3
SSA1	192	47	20	9	3	—	—	—	—
SSA2	200	78	42	26	17	12	8	5	3
SS A3	166	32	—	—	—	—	—	—	—
SSA4	197	74	39	23	15	10	6	4	2
SSA5	329	42	13	—	—	—	—	—	—
SSA6	195	75	40	25	16	11	7	5	3
SSA7	349	22	—	—	—	—	—	—	—
SSA8	192	69	36	21	13	8	5	3	2
SSB1	122	32	13	5	—	—	—	—	—
SS B2	158	64	36	22	15	10	7	5	3
SS B3	100	22	—	—	—	—	—	—	—
SS B4	150	60	33	29	13	9	6	4	2
SS B5	156	24	—	—	—	—	—	—	—
SS B6	145	59	33	20	13	9	6	4	2
SS B7	122	—	—	—	—	—	—	—	—
SS B8	136	54	29	18	11	7	5	3	2
SSC1	61	20	7	—	—	—	—	—	—
SS C2	90	43	25	16	11	*1*	5	3	2
SS C3	67	16	- —	—	—	—	—	—	—
SSC4	90	38	22	13	9	6	4	2	1
SSD1	169	56	26	13	6	—	—	—	—
SS D2	175	86	51	34	23	16	11	7	5
SS D3	221	52	21	10	—	—	—	—	—
SSD4	179	84	49	32	21	15	10	7	4
SS El	108	34	12	—	—	—	—	—	—
SS E2	135	65	38	24	16	11	7	5	3
SS E3	141	29	8	—	—	—	—	—	—
SSE4	140	61	34	21	14	9	6	4	2

Алфавитный указатель

А

абсорбционные охдадители, 252, 266
автомобили с аккумуляторными батареями (PEHV), 367
автомобили, 375
активные, 143
альфа-распад, 338
Американская Ассоциация Ветроэнергетики, 83
Американская многолопастная модель, 70
анализ активного диска, 67, 68
Анализ активного диска, 67, 68 массовый расход, 66
анализ воздуха, 94
анализ турбомашины, 23–28
анаэробная переработка, 264
анаэробная переработка, 264, 278
анаэробный биореактор, различными средствами, 265
Английский инжиниринг и британские гравитационные системы единиц, 1
анизотропия, 389
анод, 205
антикоррозионные жидкости, 304
Ассоциация солнечной энергетики (SEIA), 166
Научно-исследовательского центра солнечной энергии, (SERF) 172
атомная реакция, 335
атомная теория, 183
атомная энергия, 333
атомная энергия, 339, 340
Атомная энергия, 351
атомный номер, 335
аттенюатор, 328
аттенюаторы, 327, 328
аэроснимок, 38
АЭС Фукусима-дайити, 349, 350

Б

база данных морских и гидрокинетических технологий, 331
батарея, 373
без отслеживания, 146, 147
бета-распад, 338
биогаз, 253, 264
биологические системы
биомасса (продолжение)
биомасса, 249
биореактор Tillamook, 264, 265
биохимический гидролиз, 259
биохимический состав, 256 характеристики, 253
биоэнергетика и статистика биотоплива, 270 электричество, 270
бор, 349
британская тепловая единица (БТЕ), 1

В

в продаже, 105, 106
в сравнении с природным газом, 264
в США, 285
валентная зона, 183
вариации цикла, 104

величина 115
ветровая турбина, коммерческая, 83–88
ветрогенератор Vestas V52 мощностью 850 кВт, 84
ветрогенератор с вертикальной осью (VAWT), 63, 65
ветрогенератор с горизонтальной осью (HAWT), 63, 64
ветродвигатель, 63, 64, 70
ветряные системы Vestas V52, 85, 86
ветряные системы Vestas, 83
вид, 38
внутренний, 184
внутренняя добыча нефти, 17
водоносные пласты, 283
водород, 349
водородно-кислородный топливный элемент, 205
воздух для горения, 229
воздух и сгорание, 95
воздушный цикл Брайтона по стандарту холодного воздуха, 95, 96
возмещаемая стоимость покупки, 373
возобновляемые источники энергии, 166
возобновляемые источники энергии, 63
возобновляемые ресурсы, 375
возобновляемый дизель, 249
восстановление, 377
вращающиеся устройства, 330
Всемирная ядерная ассоциация (WNA), 333
второй закон термодинамики, 19
вулканы, 281, 283
выбросы, 361
выделение энергии, 355
выработка атомной электроэнергии по всему миру, 334
высоковольтное электричество, 225
высокое энергопотребление на душу населения, 3
выход LMS100, как функция температуры на входе, 110
выходная мощность и эффективность для C30, 112
выше Полярного круга, 138

Г

газовая турбина, 35
газовая турбина, анализ цикла, 93, 96.
гамма-распад, 338
гелиостаты, 143, 144
гелиотехника 115
генераторный газ, 265
генерирование, 225, 397, 398
генерирование, 285
геологическая структура, 281
геометрические отношения Земля-Солнце, 127
геометрические переменные для случаев радиального потока, 383
геотермальная сводка, 305
геотермальная энергия, 281, 282
геотермальная энергия, 285
геотермальные зоны, 283
геотермальные примеры, 297–300
геотермальные ресурсы, 281–286
гибкость, разрешающая режимы работы, 366
гибрид, 374
гибридизация, 367
гибридная система, 199

гибридность, 367
гибридные автомобили, 371
гибридные виды Honda Accord, 366
гибридные рабочие параметры, 365
гибридные системы преобразования тепловой энергии океана, 315
гибридные системы, 363, 365
гибридный электромобиль, 363, 364
гидравлический разрыв пласта, 377
гидроксид калия, 213
гидроразрыв, 377, 379, 380, 385, 389,
гидротермальные системы, 283
гидротермальный, 286–288
гидроэлектростанция 35
гидроэлектростанция Итайпу
главный коэффициент, 45
глина, 349
Ежегодный энергетический прогноз (AEO), 392
горизонтальное бурение, 381
горизонтальное бурение, 387
горючее, 374, 375
градусо-сутки, 173
градусо-сутки отопительного периода, 173, 174
графит, 344, 348, 349
ГЭС Итайпу, 36
Д
Данные временного графика международного форума по ядерным реакторам IV поколения, 352
данные Всемирного банка за 1992 г., 3
данные Всемирного банка за 2012–13 гг, 3
данные геотермальной заявки для США, 305
данные о погоде, 152–159, 163
данные, 75
Дарье, 63
двигатели внутреннего сгорания (ДВС), 361
движение Земли вокруг Солнца, 127
деление, 336, 349
делящийся материал, 336
день по юлианскому календарю (JDN), 129
десорбция, 212
детали реактора, 346 схема, 345
диаграмма нефтяного потока (млн баррелей в день) за 2014 год, 12
диаграмма потока природного газа (триллион кубических футов) за 2014 г, 14
диаграмма потока угля (миллионов коротких тонн) за 2014 г, 15
диаграмма потока электроэнергии (квадриллион БТЕ) за 2014 г, 16
диаграмма температуры и площади HRSG, 230
диаграмма энергетического потока (квадриллион БТЕ) за 2014 год, 8
диаграммы P – v и T – s газовой турбины Брайтона, 94
диаметр ротора, 65
длительное хранение, 346
для GSHP и обычных систем, 304
для ICE, 362
для коммерческой генерации энергии, 63 схема и номенклатура, 67
для электродвигателя, 363
для электростанций, 106
дневное освещение, 172, 178–180
добыча нефти и газа из трудных условий, 386
добыча нефти и газа, 379
добыча нефти и природного газа в США, 393

добыча нефти и природного газа, 393
добыча полезных ископаемых, 315
добыча природного газа, 394
добыча сланцевого газа в США, история, 380
добыча сланцевого газа, 395
добыча трудноизвлекаемой нефти, 396
Финансирование Министерство энергетики США (USDOE) для морской и гидрокинетической энергии , 331
доказанные запасы нефти, история, 378
доказанные запасы природного газа, история, 378
долгосрочное производство, 390
долгосрочное производство, 390
доломит, 349
доля компании на рынке ветротурбинных установок, 90
доля солнечной энергии (SSF), 175
доступность, 223
доступность, 250
Е, Ё
емкость, прирост, 201, 202
естественное освещение, 178
Ж
жидкий, 160
З
завод, 333
задержанные нейтроны, 342
закаленный, 170
заканчивание и освоение скважины, 388–390
Закон Дарси, 381
закрытие, 223
закупоривание, 389
затраты на природный газ, 395
защита, 172
землетрясения, 281, 350
Земля
зона глубинных вод под большим давлением, 295, 296
зона проводимости, 183
И
и другие загрязнители, попадающие в водоснабжение, 390
и производство биодизеля, 271
и режимы, 116
и угловая высота Солнца, 128
идеально калорийный газ, 94 турбины Capstone, 110
идеальное соотношение мощности и крутящего момента, 362
из разных промыслов, история, 380
излучаемая мощность, 116
излучательная мощность полусферы, 123
излучение окружающей зоны полушария, 122
изотермический топливный элемент, 208
импорт природного газа, 393
импорт энергии, история и прогнозы для случаев, 394
импорт энергоносителей с 1975 г 6
импорт, 5
Индекс человеческого развития (HDI: ИЧР)
ИЧР (Индекс Человеческого Развития), как мера измерения уровня жизни, 1
интенсивность излучения, 122
ионы, 205
ископаемое топливо, 250, 375, 398, 399

искусственное освещение, 178
искусственное цунами, 333
использование угля, 5
использование электричества, 236
использование энергии в конечной точке, 7
использование энергии во всем мире, 17–19
использование энергии конечными потребителями в 2014 г, 9–10
испытание с расходом, 390
историческая перспектива использования энергии, 4–7
историческое использование энергии (1775–2012), 5
история и прогнозы 397
история продаж гибридных авто и авто с аккумуляторными батареями, 370
история продаж и производителей, 371 гидравлический анализ, 39–44
история продаж и производители, 371
источники альтернативной энергии, 1, 23, 333
источники возобновляемой энергии, 63 ресурсы, 72–78
источники, 249
К
катастрофа с ядерными реакторами, 348
категории, 211
катод, 205
качество электроэнергии, 225
кинетическая энергия, 340, 356 кинетическая энергия, скорость, 69
Реактор с кипящей водой (BWR), 344
классификации, 23
классификация сложности расхода слива, 382
классы энерговыделения, 72
колеблющиеся водяные столбы, 327–329
колеблющиеся водяные столбы, 328
Колесо Пельтона с шестью соплами, 49
количественные характеристики, 172–175
комбинированная выработка тепла и электроэнергии (CHP - combined heat and power), 93, 225
комбинированная последовательная и параллельная (или разделенная по мощности) гибридная схема, 366
комбинированный цикл центральной мощности, 226
Комиссия по ядерному регулированию США, 333
коммерческая фотография колеса Пелтона, 48
компоненты HRSG, сандартные, 231
Компоненты гондолы HAWT, 79
компоненты освещения, 179
компоненты пассивной солнечной системы, 169
компоненты энергосистемы
компоненты, 190–196
компрессоры, 23
конвективный рекуператор, 229
конверсионные процессы, 249
кондиционеры для зданий и умеренно-температурного охлаждения, 315
конечное потребление энергии нефти, 11
континуум, 368
контрольный объём, 24
контрольный пакет, 367
контуры заземления, 302
конфигурации атомного реактора, 342
конфигурации, 160
конфигурации, 308
конфигурация, 143
концентрационная поляризация, 212

концентрация, 144, 145, 165
концентрация, 144, 145, 165
концепции, 381
косвенная выгода, 170, 171
котлы-утилизаторы, 229
коэффициент мощности, 44
коэффициент мощности, 69, 70
Коэффициент мощности, 78, 82
коэффициент напряжения, 44
коэффициент отвода тепла (FR), 150
коэффициент отвода тепла (FR), 150 эксплуатационные характеристики, 150
Коэффициент потока, 44
коэффициент производительности (COP - coefficient of performance), 300, 301
коэффициент пропускания излучения, 124, 125
кпд Карно, 20, 300, 308
крахмальная/ сахарная биомасса, 249
крупнейшее водохранилище, 35
Крутящий момент, 25
крутящий момент, 363
крутящий момент, 363
кулоновская сила отталкивания, 356 С30
кулоновская сила, 356
курсовой угол Солнца, 129
Л
лесная и обычная гидроэлектростанция, 7
Линдальная диаграмма, 284 системы, 286
линия на 21 день каждого месяца для Мичиганского государственного университета, 134
линия, на 21 июня для Мичиганского государственного университета, 128
литосфера, 281
личный транспорт, 375
лопатка турбины, 56
М
магма, 296, 297
максимум, 73
мансардные окна, 179
масло без присадок, 378
масса пассивного накопителя тепла, 169
массивы, 172, 183, 196, 198, 200
массовое число 335
массовый расход, 25
массовый расход, 95
Международный журнал по ядерной технике и технологиям(NEI), 333
местоположение, 348
метан, 264
метаногенные (CH4-образующие) бактерии, 264
метанол, 261
метод f-диаграммы, 165
метод балансировки давления, 385
метод второго уровня, 177, 178
метод первого уровня, 176, 177
метод эффективной апертуры, 179
миллионы баррелей в день (MMBD), 11
минимум, 73
мировой рост (1997–2014 гг.), в установленной ветроэнергетической мощности, 91
Государственного университета Миссисипи (Mississippi State University или MSU), 127
момент импульса, 24
монооксид углерода (CO), 207, 214, 216, 250,253, 296

морская и гидрокинетическая (МНК) энергия,
морские применения, 107
мощность ветра, 88
мощность ветра, 88
мощность против скорости ветра, 87
мощность против скорости ветра, 88
мощность сварки, 354, 355, 358
мощность традиционных энергетических источников, 225
мощность, 363
мощность, установленные мегаватты, 222
Н
на основе топлива, и продукты, 255 биодизель/ растительное масло, 261
наземные тепловые насосы (GSHPs), 281, 300–304
накопитель энергии, 172
накопленная энергия, 205
наличие, 220
направление лопасти ротора, 32
напряжение и эффективность элемента, как функция температуры элемента, 212
насос, 26
База данных Национальной солнечной радиации (NSRDB), 137, 155
Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии (NREL) Министерства энергетики, 137
Национальная лаборатория возобновляемых источников энергии (NREL), 63, 137, 285
неблагоприятные последствия, 349 катастрофа, 333
нейтронная экономика, 341
нейтроны, 336, 340
неполированный, 144, 145
неполированный, 144, 145
непосредственное соединение, 197
нетепловой двигатель, 363
нефтегазопродуктовая линейка, 107
нехлорфторуглеродные хладагенты, 230
низковольтные распределительные системы, 225
номенклатура бегущей волны, 325
номинальная производительность, 110
ночные спутниковые фотографии, 4
нуклеиды, 336
О
область видимой части спектра, 119
облегченный режим работы производителя, 372
облучение, 124
обнаружение, 350
обособленная выгода, 170
образование, 341
образование, 395
образования, 207
обращение с радиоактивными отходами/ хранение/ захоронение, 344
общая расчетная энергия, 393
общая тепловая эффективность выработки электроэнергии, 13
общая тепловая эффективность, 225
общая энергия, 326
объемный расход, для радиального потока несжимаемой жидкости, 383
обычные процедуры восстановления, 385
обычный газ, 379
ограничение Карно, 361
окислитель, 205
оксиды азота, 250

ометаемая площадь лопастей, 65
омическая поляризация, 212
онлайн калькулятор PVWatts, 194
оператор Маткад (Mathcad), 158
операции, 329
описания конечного использования, 153
 описания конечного использования, 153
определение, 23
определенное соотношение скорости, 46
опресненная вода, 315
Организация Европейского Соглашения по исследованию термоядерного синтеза (EFDA), 358
Организация экономического сотрудничества и развития Агентства по атомной энергии, 350
осевой импульс, 69
осевой поток, 24
основные концепции, 169–172
основные концепции, 64–72
основные принципы, 63
основы радиационного теплообмена, 122
основы теории, 253
 основы, 148–152
основы, 148–152
основы, 183–190
основы, 205–207
основы, 207–213
основы, 334–336
особенности Doosan PureCell Model 400, 221 бурение, 389
особенности и характеристики генерации, 351
особенности турбины, 44–48
остекление, 170, 178
осушители воздуха, 231
от 2013 до 2040, 392
откачка воды, 377
отключение и восстановление, 390
отключение и восстановление, 390
относительная влажность, 231
отношение турбины к определенной скорости, 46
отражательная способность, 124, 125 топливные системы, полученные из отходов, 274
отраженное облучение
отслеживание, 146, 147
отслеживание, 146, 147
охлаждающая жидкость, 344
охлаждающие градусо-сутки (CDD), 173 градусо-сутки отопительного периода (HDD), 173
охлаждающие градусо-сутки (CDD), 173, 174
охлаждение отводом явного тепла, 231
оценка приливного течения в США и энергетических ресурсов волн, 325
оценка процесса синтеза ИТЭР, 358
оценка, 284
оценка, 315–318

П

пар, 35
пар, 361
параболические желоба, 143, 144
параллельно-гибридный автомобиль, 366
параметры безразмерного анализа, 44
парниковый газ, 250, 375
пароохладитель, 304
партнерская программа по тонкопленочным технологиям, 186

пассивная солнечная энергия
пассивное здание, 173
пассивное солнечное отопление, конфигурации, 170
первичное топливо, 249
первичные компоненты, 93
перегруженность местной инфраструктуры, 391
переменная энергия, 393
переменный ток (AC), 206
переработка, первичные продукты, 253 сырьевые материалы, 249
период полураспада, 338
перфорирование, 389
песок, 349
пилообразные крыши, 179
пиролизные жидкости, 261
питательные вещества для марикультуры, 315
пищевые отходы, 249
плазма, 356
пластинчатый солнечный коллектор, 143, 144, 166
плоская плита, 144, 145
плоская плита, 144, 145
плоский солнечный коллектор, 143, 144, 166
Плотина Гувера, 35
Плотина Три ущелья, 38–39
плотины гидроэлектростанции, 35–39
плотность тока, 212
плотность энергии, 361
плотность энергии, 373
по регионам с 1988 по 2013 год 19
повседневные работы и расход энергии, 2
поглощающая способность, излучательная способность и соотношение для выбранных поверхностей, 127
подключаемый электромобиль, 371, 372, 375
Поколение I, 351
Поколение III, 351
Поколение IIII, 351, 352
Поколение IIII+., 352
Поколение IIV, ядерно-энергетические системы, план технологических разработок, 352
полупроводники
поляризация активации, 212
пористый, 144, 145
пористый, 144, 145
поршневые двигатели, 229
постащики, 112
постоянная Стефана – Больцмана, 116
потенциал в производстве, 246
потенциал для рекуперации тепла, 104
потери, 211
потери, как функция плотности тока, 213
поток энергии, 149
поток энергии, 149
потребление киловатт-часов на душу населения, 2
потребление первичной энергии по видам топлива
потребление энергии на доллар валового внутреннего продукта (ВВП), 6–7
потребление энергии на душу населения против ВНП на душу населения
потребление энергии на душу населения, 6
поэтапное устройство с осевым потоком, 27
предел Бетца, 70

преобразование тепловой энергии океана (OTEC), 307
преобразователь энергии шарнирной волны, 329
приливная энергия, 319–322
применение, 143
применение, 197
применение, 285
применение, 361
применимые области, 308
примеры ветряных турбин, 66
Принстонская лаборатория физики плазмы, 355
природный газ, 207, 377
прогноз роста гидроэнергетики до 2040 г, 57
прогнозируемая цена, 397
прогнозы Управления Энергетической Информации США, 374
Международная программа по разработке экспериментального термоядерного реактора (ИТЭР), 358
Программа по охране окружающей среды Агентства по охране окружающей среды США, 264
программные средства моделирования, 180
прогресс, 373
продажа, 167
продажи, 371
проектные показатели Управления энергетической информации США 2040, 374
проекты, 353
проекции энергии, 393
производители, 375
производительность солнечных элементов, влияние, 190
производится поэтапно, различными типами бактерий, 264
производство возобновляемой электроэнергии, 398
производство из зерна, 258
производство угля, 396
производство электроэнергии из фотоэлектрических систем, 201
производство электроэнергии, 107
производство, 194
производство, 379
промышленные газовые турбины, 227
проницаемость водоема, 386
против коэффициента скорости различных конфигураций ветряных турбин, 69, 70
протонообменная мембрана топливного элемента, 213
процедура f-диаграммы, 173, 177
процедуры повышения нефтеотдачи (EOR), 389, 391
процент источника энергии в производстве электроэнергии, 17
процентное соотношение возобновляемых источников энергии в 2014 г, 10
процентный вклад возобновляемых источников энергии, 7
процесс теплопередачи, 208
процесс Фишера – Тропша, 267
процессы расширения, 99
процессы сжатия, 97
прямая выгода, 170
путь движения солнца, 126
путь жидкости, основанный на, 23
путь преобразования энергии, 20 эффективность энергии, 20

Р

работа ветровой турбины, 78–83
рабочая кривая, 361
рабочие характеристики, 150
рабочий лист Маткад, 120 плотность энергии, 116 функция излучения, 117
радиальный поток несжимаемой жидкости, геометрия, 382
радиальный поток, 24

радиус ротора, 70
развитие/ маркетинг компании, 220
развитые страны
разграничение ресурсов биомассы, 250 сырье, 256
различные возобновляемые источники энергии с 2000 года, вклад, 11
разработка месторождений, 381
разработка с применением Маткад, 131, 132
разрез LM2500, 109
разрез LM2500/LMS100, 109
разрывающая жидкость
распад позитрона, 338
расположение ветряных турбин, 84
расположение гидротехнических затворов, 40
распределение Вейбулла, 74, 75, 76
распределение Планка, 116
распределение плотности энергии ветра, 72
распределение ресурсов, 253
распределение средней температуры грунта, 303
распределенная энергетика (DG), 227
рассеяние Рэлея, 121
расход топлива для различных типов силовых установок, 356
расходное испытание, 390
реактор после катастрофы, 350
реактор с газовым охлаждением (GCR), 344
реактор, 364, 365
реакторы с водой под давлением (PWR), 343
реакции газификации, 266
реакции, 336, 356
реакция гидрирования, 335
реакция дейтерий-тритий, 356
реакция сдвига фаз "вода-газ", 207
реакция, 27
режимы работы, 93
режимы управления скоростью турбины, 80
резервуар с низкой проницаемостью, 379
резервы, 377, 380
результаты обработки данных, 139, 140
результаты, выходы, 315
рекомендуемые пассивные системы, обозначение и характеристики, 415
рекомендуемый вариант общего производства и потребления энергии 1980–2040 гг. 393
рекуператор, 104
рекуператор, 112
решение в Mathcad (Маткад), 77
рост, 389
ротор Савониуса, 63
Руководство по проектированию всего здания (WBDG), 180
С
с интеркулером и двухступенчатой компрессией, 105
с регенератором, 105
сайты Национальной метеорологической службы, 138
сбор энергии, 322
сверхмощные газовые турбины, 108
свободная энергия Гиббса, 208
сводные прогнозы HydroPower Vision по гидроэнергетике в период с 2016 по 2050гг, 58
семейство турбин внутреннего сгорания, 106, 107 для нефтегазовой промышленности, 106
сертификаты коллектора OG-100, 152
сертификация системы OG-300, 153

сетка подключения, 200
силовые электронные технологии, 225
синтез-газ, 267
система сгорания, 205
система электропривода, 373
системы CHP, 226
системы преобразования тепловой энергии в закрытом океане, 312
системы преобразования тепловой энергии открытого океана, 308, 309
системы, 227
системы, 307
склонение Солнца, 128
скоростная характеристика, 79
скоростные компоненты, схема, 25
скорость ветра, 70
скорость нагрева LMS100 STIG в зависимости от температуры на входе, 111
скорость нагрева, 105
скорость приливного течения, 330
скрытое охлаждение, 231
сланцевые месторождения в мире 381
сливная труба, 319
Геологическая служба США (ГССШ – USGS), 281
случаи, 394
см. также
смешанный поток, 24
снижение массы автомобиля, 373
солнечная батарея, 183
солнечная жидкостная отопительная система, отношения 161
солнечная постоянная, 120
солнечная радиация, 115, 155
Солнечная рейтинговая и сертификационная корпорация (SRCC), 152, 154
солнечная фракция, 161, 164
солнечная энергия инсоляции, 157
солнечная энергия, 115, 143, 152
солнечное время, 130
солнечное излучение поглощено, 148
солнечное излучение, 169, 172, 183, 186, 189, 194
солнечное поглощение, 170, 171
солнечное положение и значения инсоляции для 24°Северной широты, 402
солнечные тепловые применения, 143, 159–165,160
солнечные тепловые системы, 165, 166
солнечные турбины, 106
солнечный коллектор, 143
солнечный потенциал, 139
солнечный потенциал, для США, 139
солнечный поток, 120
состав, 281
составляющие затрат на производство электроэнергии из различных источников энергии, 36
спектральная плотность мощности излучения для выбранных температур поверхности, 117
спектральная полусферическая излучательная способность, 122
спектрально-направленная излучательная способность, 122
спецификации, 328
сплав дейтерий-тритий, 356
способность к поглощению, 124
сравнение ветроэнергетических мощностей ЕС, 2012, 91
среднегодовые ветровые ресурсы США, 73 ветряные ЭС
среднеквадратическая скорость (куб), 76
средний и тяжелый режим работы производителя, 372

средняя розничная цена на электроэнергию с нефтегазовых ресурсов, 398
средняя скорость, 75
средняя температура грунта, распределение в США, 303
стадия добычи нефти/газа, 386
стандартные долготы для часовых поясов США, 130
статистика, 36
статистика, 39
стена Тромба, 170
стоимость топлива в реальных (1982–1984) долларах, 17
стоимость электромобиля и плотность энергии, 373
стоимость энергии, 201
стоимость, 199
стоимость, 395
страна-экспортер энергии, 393
строительство скважин, 386
структура, 282
схема гибридной системы, 365
схема гребня разделителя с треугольниками скорости, 49
схема колеса Пельтона, 47
схема параллельной гибридной системы, 366
схема радиальной турбомашины, 30
схема серии анаэробного реактора, 265
схема системы электромобилей, 369
схема системы, 302
схема установки WTE, 275
схема установки, 357
схема, 206
схема, 327
схема, 347
схема, 347
схема, 368
схема, 93, 94
схематическое расположение плотины, 40
США (продолжение)
сырая нефть, 377
Т
таблица коэффициентов нагрузки, 419–430
табуляция, 118
твердооксидный топливный элемент (ТОТЭ), 213
твердооксидный топливный элемент, 213
твердые бытовые отходы (ТБО), 270
тектоническая плита,, 281, 283
температура магмы, 283
температура холостого хода, 173
температуры, 281
теория полупроводников, 183
тепловая энергия, 208, 225
тепловая эффективность
тепловая эффективность системы, 225
тепловая эффективность, 105
тепловая эффективность, 19
тепловое излучение, 115
тепловое уравнение состояния, 208
тепловое уравнение состояния, 94 коммерческая энергия, 361
тепловое, конфигурации, 143
тепловой двигатель
тепловой КПД , 95, 96

тепловые солнечные коллекторы, конфигурации, 143
теплообменники, 229
теплота испарения, 211
теплотворная способность отобранных видов топлива, 101
термическая газификация, 266
термодинамика, 209
термоядерный реактор ДЖЭТ и ИТЭР, 359
технические характеристики Capstone C30, 111
технологии, 381
технологии, сравнение, 228
технология МГК, 331
технология, 169
технология, 307
технология, 361
типы и характеристики 342
типы электролитических топливных элементов
толкование закона Дарси, 381
топливные элементы с расплавленным карбонатным электролитом (ТЭРКЭ), 213
топливные элементы, 205, 213–220
топливный элемент на основе протонообменной мембраны (ТЭПМ), 213, 370
топливный элемент с расплавленным карбонатом, 213
топливо – окислитель – электролиты, 205
топливо на природном газе, 207
топливосберегающие технологии, 374
точечные поглотители, 327
точечный поглотитель PowerBuoy, 327
точечный поглотитель, 327
трансмиссия с разветвлением потоков мощности, 366
требуемая вода, миллион галлонов на скважину, приводящее к нехватке воды, 391
треугольник скорости, 26
трещиноватость в пределах геологических пластов, приводящая к повышенной сейсмической активности, 391
трудноизвлекаемая нефть и газ, 377–379 необычный технологический приём, 379
трудноизвлекаемая нефть, 379
турбина Каплана, 47, 55
турбина Фрэнсиса, 47
турбины Voith Hydro Francis с 1960 года, размер 54
турбины авиационного сгорания, 107
турбины внутреннего сгорания GE Power, 108
тяжеловодный ядерный реактор (PHWR), 344
У
уборочные устройства, 63
углеводородное топливо, 361
углекислый газ (CO2), 19, 120, 207, 215, 216,
угловая высота Солнца, 129
угловая скорость, 23
угол склонения, как функция от порядкового дня, 129
уголь, 261
удельная мощность, 82, 83
удельная теплоёмкость, 94
улучшенная добыча нефти
Управление по энергоэффективности и возобновляемым источникам энергии Министерства энергетики, 58
Управление энергетической информации США (EIA) 4, 364
Управление энергетической информации США (EIA) определяет гидроразрыв пласта, 377
Управление энергетической информации, 166
уравнение Бернулли, 68

уравнение времени, 130
уравнение Нернста, 209
уравнение сохранения энергии, 40
уравнение Хааланда, 41
уравнение Хоттеля – Вилье – Блисса, 151
уравнение Эйлера для турбины (или насоса), 26
уровень жизни, 1
ускорение автомобиля, 361
усовершенствованными геотермальными системами (УГС – EGS), 283
усовершенствованные геотермальные системы, 297
установка, 54, 55
установленная ветроэнергетическая мощность (МВт), 88, 89, 90
установленная мощность стационарного топливного элемента, 223
установленные мегаватты, 222
устройства перелива, 327, 329
устройство вращения вертикальной оси, 330
устройство на фотоэлементах, 143
устройство прямого вытеснения, 23
участок с двумя устьями, 390
участок скважины при проведении гидравлического разрыва пласта, 389
Ф
Фактоид, 282
федеральные налоговые льготы на производство электроэнергии, 88
феномен незаходящего Солнца, 134
финансирование, 331
фосфорно-кислотный топливный элемент (ФКТЭ), 213
фосфорно-кислотный топливный элемент, 213
фотоэлектрические системы, 183, 196–200
фотоэлектрические системы, затраты на ватт, 201
фотоэлектрические элементы, 185, 188, 206
фотоэлектрический материал, 184
фотоэлектрический модуль BP 3160, 193
фундаментальный принцип, 24
функциональное использование, 196
функция PowerDenCon, 81
функция устройства перелива, 329
Х
характеристика, 122
характеристика, 282
характеристика, 363
характеристики аккумуляторов, 198
характеристики мощности и крутящего момента
характеристики черного поглотителя, 115
характеристики, 121
химическая реакция фотосинтеза, 250
химическая энергия, 205
химический состав, 249
хранение, 374
Ц
целлюлозная биомасса, 249
целлюлозная биомасса, 260
целлюлозный этанол, 259
цена автомобиля, 374
цена на нефть, 396
Центр Анализа по Изучению Альтернативных Топлив Министерства Энергетики США (AFDC), 368
центральная энергетика, 226
цены на автомобильный бензин, история и прогнозы,396

цены, 396
цикл Брайтона, 93
циклы разрядки-перезарядки, 373
цунами, 333, 350, 351
Ч
частота вращения ротора, 70
через гидроразрыв пласта, 4
Чернобыль
чертеж вида сверху плотины Гувера, 37
число Рейнольдса, 41
чистое электричество, 399
чистый импорт энергии, 393
Ш
шкала относительной проницаемости, 382
щелочной топливный элемент (AFC), 213
щелочной топливный элемент, 213
Э
экзотермическая реакция, 207
экологически чистая электроэнергия, 223
экономика и эксплуатация системы, 231 основы системы, 225
экономика устойчивой энергетики, 375
экономика, 308
экономическая оценка, 236–240
экономия топлива, 374
экономия энергии, 7
экспорт энергии, 5
экспорт, 5
электрическая энергия, 207
электрический бензиновый гибрид, 374
электричество, 333, 361
электробензиновые типы, 374
электродвигатель, 365, 367
электроды, 205
электромагнитный континуум, 115, 116
электромобили, 370, 382, 383
электроны, 205
электросеть, 196, 225
электротранспортное средство, 361, 372, 374, 375
электрохимическая обработка, 214
электрохимические реакции, 205, 215
электрохимия, 213
электрохимия, 215
электроэнергия, 225
элемент стека, 206
элементы компьютерного ПО, 180
эмиссионные характеристики, 122
эндотермическая реакция, 207
энергетика на душу населения в менее развитых странах, 1
энергетические единицы, 1
энергетические проблемы, 4
энергетический кризис, конец 70-ых, 3
энергии на душу населения, 1
энергия GE 1.5мВт, 84, 85
энергия ветра, 63
энергия ветра, 7
энергия для охлаждения, отопления и горячего водоснабжения
энергия свободного электрона, 184

энергия связи, 336
энергия теплового процесса, 226
энергия транспортировки, 361, 362
энергия, 183
энергоблоки, 1
энерговыделение, 72, 326
энергопотребление в 2014 г, 7–17
энергопотребление, 236
энергопотребление, 5
энзимный биохимический процесс для производства этанола из целлюлозной биомассы, 260
энтальпия, 95, 289–292, 294, 310, 311, 313
этанол, 249
этанол, 255
этапы функционирования, 264
эффективность (ηc), 149, 166
эффективность (ηc), 149, 166
эффективность выбранных компонентов, 20, 21
эффективность изэнтропического сжатия, 96
эффективность коллектора, 152
эффективность энергии, 20
эффективность, 187
эффективность, 205
Я
ядерная программа СССР, 349
ядерной энергией, 333
ядерные отходы, 344
Ядерный реактор RBMK, 348, 349
Японские АЭС, 351
ясная оценка 166
Ясная оценка, 166

AFC. см. щелочной топливный элемент (AFC - alkaline fuel cell)
Alberta (Канада) Агентство сельскохозяйственного развития и развития сельских районов, 264
Bergey 10 кВт, Excel, 85, 86, 87
CDD см. охлаждающие градусо-сутки (CDD - cooling degree-days)
CHP. См. комбинированная выработка тепла и электроэнергии (CHP - combined heat and power)
CO. См. монооксидуглерода (CO - carbon monoxide)
Ср Глауэрт, 70
DC. См. постоянный ток (DC)
DEMO программа (Демонстрационный термоядерный энергетический реактор), 358
DG. См. распределенная энергетика (DG) постоянный ток (DC), 205
DOE оценки теоретических и технических потенциалов энергии МГК, 331
Energy-10, 180
EnergyPlus, 180
GE энергия, 107
HAWT. см. ветрогенератор с горизонтальной осью (HAWT)
HDD. см. градусо-сутки отопительного периода (HDD)
JDN. см. день по юлианскому календарю (JDN)
LM2500 мощность и скорость нагрева, 109
MCFC см. топливные элементы с расплавленным карбонатным электролитом (MCFC),
MSU. См. Миссисипский государственный университет (MSU)
MSW. См. твердые бытовые отходы (ТБО) (MSW)
NREL. См. Национальная лаборатория возобновляемой энергии (NREL)
NSRDB. См. Национальная база данных солнечной радиации (NSRDB)
n-типа, 184
OTEC. См. преобразование тепловой энергии океана (OTEC)
Pelamis P-750, 328

PEMFC. см. протонообменная мембрана топливного элемента (PEMFC)
PhotoWatt, 191
p-типа, 184
SEIA. см. Ассоциация солнечной энергетики
SERF. см. Научно-исследовательского центра солнечной энергии, (SERF)
SI система, 1
SOFC см. твёрдооксидный топливный элемент (SOFC),
SSF. см. доля солнечной экономии
T – s диаграмма, 104
VAWT. см. ветрогенератор с вертикальной осью (VAWT)
WBDG. см. Руководство по проектированию всего здания (WBDG)

32°Северной широты, 404
40°Северной широты, 406
48° Северной широты, 408
56° Северной широты, 410
64° Северной широты, 41