

ЭНЕРГИЯНЫ ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫНА ЖӘНЕ ІЛЕСПЕ ӨНІМДЕРГЕ ТҰРАҚТЫ ТҮРЛЕНДІРУ

АШОК РАО, PH.D. докторы

*Калифорния университетінің энергия және энергетиканы жетілдіру бағдарламасы
АҚШ, Калифорния штаты, Ирвайн қ*

John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, **New Jersey баспасы жариялаған**

Бір уақытта Канадада жарияланды

Осы жарияланымды 1976 жылғы Авторлық құқық туралы заңның 107 немесе 108-бөлімдерінде көзделген жағдайларды қоспағанда, Баспаның алдын ала жазбаша рұқсатынсыз немесе Авторлық құқықтарды тексеру жөніндегі орталықтан (Copyright Clearance Center, Inc., 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, (978) 750-8400, факс. (978) 750-4470 не www.copyright.com веб-сайты арқылы) қайта басу үшін алдын ала қаламақы төлеу арқылы алынған тиісті жазбаша рұқсатсыз электрондық, механикалық қайта шығаруға, фотокөшірме жасауға, жазбаларды орындауға, сканерлеу нысанында және басқа да қайта шығару тәсілдері арқылы таратуға, іздестіру жүйесінде сақтауға, қайта басуға жол берілмейді. Рұқсат алу үшін баспаға сұрау салуларды John Wiley & Sons, Inc, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, мекен-жайы бойынша орналасқан Рұқсат беру бөліміне (тел (201) 748-6011, факс (201) 748-6008) жіберу керек немесе <http://www.wiley.com/go/permissions> сілтемесі бойынша онлайн жолдауға болады.

Жауапкершілік шегі / кепілдіктен бас тарту: осы кітапты әзірлеу үшін өзінің бар күш-жігерін жұмсай отырып, баспа және автор осы кітап мазмұнының дәлдігі мен толықтығына қатысты қандай да бір мәлімдемелерді немесе кепілдіктерді ұсынбайды, атап айтқанда, белгілі бір мақсатқа жарамдылық кепілдігін қоса алғанда, барлық тұспалданған кепілдіктерден бас тартады. Сатылымдағы жазбаша материалдар немесе сауда өкілдері қандай да бір кепілдіктер қалыптастырмайды не кепілдікті ұзартпайды. Кітапта қамтылған ұсыныстар мен стратегиялар сіздің жағдайыңызды қарастырмауы мүмкін. Қажет болған жағдайда кәсіби кеңес алу үшін маманға жүгіну қажет. Баспа және автор түсірілмеген пайда немесе басқа да коммерциялық шығындар үшін, соның ішінде ерекше, кездейсоқ, кейінгі және басқа да шығындар үшін жауап бермейді.

Басқа өнімдер мен қызметтер туралы **негізгі ақпаратты клиенттермен жұмыс істеу** бөлімінен алуға болады: АҚШ-та (800) 762-2974 телефон нөмірі бойынша, АҚШ-тан тыс (317) 572-3993 немесе (317) 572-4002 факс нөмірі бойынша.

"Wiley" баспасы түрлі баспа және электронды форматтардағы жарияланымдарды жүзеге асырады. Баспа нұсқасындағы кейбір материалдар электрондық басылымдарға енгізілмеген болуы мүмкін. "Wiley" баспасының өнімдері туралы толық ақпаратты мына сайттан таба аласыз: www.wiley.com

АҚШ Конгресі Кітапханасының библиографиялық жазбасы қолданылды.

Америка Құрама Штаттарында басылып шығарылды

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

2015

wiley.com

Мазмұны

Алғы сөз	xii
Кітап туралы	ix
Автор туралы	x
1. Энегретикалық жүйелерге кіріспе	1
1.1. Энергия көздері және ресурстардың бөлінуі	2
1.1.1. Қазба отын	2
1.1.2. Ядролық отын	14
1.1.3. Қайта жаңартылатын энергия ресурстары	14
1.2. Энергия және қоршаған орта	18
1.2.1. Шектеулі рұқсат етілген құрам және басқа да белгілі шекке дейін рұқсат етілген құрамы белгіленген ластаушы заттар	19
1.2.2. Көмірқышқыл газының қалдықтары, оларды ұстау және сақтау технологиялары	22
1.2.3. Суды пайдалану мәселелері	23
1.3. Холистикалық тәсіл	24
1.3.1. Жеткізу тізбегі және өмірлік циклды бағалау	24
1.4. Қорытындылар	26
Әдебиет	27
2. Термодинамика заңдары	28
2.1. Термодинамиканың бірінші заңы	29
2.1.1. Бірінші заңның ішкі жану қозғалтқыштарында қолданылуы	30
2.1.2. Термодинамиканың бірінші заңынан туындайтын тиімділік	38
2.2. Термодинамиканың екінші заңы	43
2.2.1. Сапаның төмендеуі және энтропияның туындауы	43
2.2.2. Термодинамиканың екінші заңын талдау	44
2.2.3. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарынан туындайтын тиімділік	47
2.3. Жану реакциялары және Гиббстың еркін энергиясын азайту	48
2.4. Үдерістердің мінсіз өтпеуі	50
2.4.1. Газ тәріздес фаза	50
2.4.2. Бу сұйықтықты фаза	52
Әдебиет	54
3. Гидродинамикалық жүйелер	55
3.1. Гидродинамика негіздері	51
3.1.1. Ағын режимдері	56
3.1.2. Бернуллидің жалпыланған теңдеуі	56
3.2. Бір фазалы сығымдалмайтын ағын	57
3.2.1. Құбырлардағы қысымның өзгеруі	58
3.2.2. Фитингтердегі қысымның өзгеруі	69
3.3. Бір фазалы сығымдалатын ағын	59
3.3.1. Құбырлар мен фитингтердегі қысымның ауытқуы	59
3.3.2. Дроссельденген ағын	60
3.4. Сұйықтықтың екі фазалы ағыны	60
3.4.1. Газды сұйықтығы ағындардың режимдері	60
3.4.2. Құбырлар мен фитингтердегі қысымның өзгеруі	61
3.4.3. Тұман аулау	62
3.5. Сұйықтарды қатты бөлшектерден бөлу жүйесі	64
3.5.1. Ағын режимдері	64
3.5.2. Қысымның өзгеруі	65
3.5.3. Пневмокөлік	67
3.6. Құбырлардағы ағын жылдамдығы	67
3.7. Турбомашиналар мен компрессорлар	68
3.7.1. Сорғылар	68
3.7.2. Компрессорлар	75
3.7.3. Желдеткіш және үрлегіш қондырғылар	81
3.7.4. Кеңейткіш турбина	82
Әдебиет	83
4. Жылу беруге арналған жабдықтар	84
4.1. Жылу беру негіздері	84
4.1.1. Кондукция	85
4.1.2. Конвекция	85
4.1.3. Сәулелендіру	93

4.2. Жылу алмасу жабдығы	97
4.2.1. Қапталған құбыр жылу алмастырғыштары	98
4.2.2. Пластиналы жылу алмастырғыштар	108
4.2.3. Ауамен салқындатылатын жылу алмастырғыштар	108
4.2.4. Кәдеге жаратушы қазандықтар (КҚ)	109
4.2.5. Жылытқыш қазандықтар мен қыздырғыштар	110
Әдебиет	112
5. Масса алмасу аппараттары және химиялық реакторлар	113
5.1. Масса тасымалдау негіздері	113
5.1.1. Молекулярлы диффузия	114
5.1.2. Конвективті тасымалдау	115
5.1.3. Адсорбция	115
5.2. Газ-сұйықтықты жүйелер	116
5.2.1. Масса тасымалдау түрлері	116
5.2.2. Баған түрлері	124
5.2.3. Баған өлшемдері	126
5.2.4. Қысым өзгеруінің баған диаметріне тәуелділігі	136
5.3. Сұйықтық-қатты зат жүйелері	137
5.3.1. Адсорберлер	137
5.3.2. Катализдік үдерістер мен реакторлар	139
Әдебиет	144
6. Бастапқы қозғалтқыштар	145
6.1. Газ турбиналары	146
6.1.1. Өрекет ету қағидасы	146
6.1.2. Ішкі жану камералары түрлерінің қалдықтарға әсері	150
6.1.3. Жұмыс жүктемесін және іске қосуды бақылау	151
6.1.4. Өнімділік сипаттамалары	152
6.1.5. Отын түрлері	153
6.1.6. Технологиялық әзірлемелер	156
6.2. Бу турбиналары	158
6.2.1. Жұмыс атқару ұстамдары	159
6.2.2. Жұмыс жүктемесін бақылау	159
6.2.3. Пайдалану сипаттамалары	162
6.2.4. Технологиялық әзірлемелер	162
6.3. Іштен жану піспекті қозғалтқыштары	163
6.3.1. Өрекет ету қағидасы	165
6.3.2. Қалдықтардың құрамы	162
6.3.3. Іске қосу	165
6.3.4. Өнімділік сипаттамасы	165
6.3.5. Отын типтері	166
6.4. Гидравликалық турбиналар	167
6.4.1. Өңдеу өнеркәсібінде қолдану	167
6.4.2. Гидроэнергетикалық қондырғыларда қолдану	167
Әдебиет	168
7. Жүйелерді талдау	169
7.1. Жобалау негіздері	169
7.1.1. Отынның және оның берілген құрамының техникалық сипаттамалары	169
7.1.2. Жылуды бұру тәсілдері	171
7.1.3. Қоршаған орта жағдайлары	171
7.1.4. Пайдалану ортасының басқа да өзіндік факторлары	171
7.1.5. Қоршаған ортаға шығарылатын қалдықтардың шекті рұқсат етілген көрсеткіші	172
7.1.6. Пайдалану коэффициенті	173
7.1.7. Жобадан тыс талаптар	174
7.2. Жүйе конфигурациясы	175
7.3. Пинч-талдау және эксергия талдауы	177
7.3.1. Эксергия талдауы	177
7.3.2. Пинч-талдау	178
7.4. Технологиялық ағын сызбалары	181
7.5. Динамикалық модельдеу және технологиялық бақылау	183
7.5.1. Динамикалық модельдеу	183
7.5.2. Автоматты технологиялық бақылау	187
7.6. Шығындарды бағалау және экономикалық құраушысы	189
7.6.1. Қондырғының жалпы құны	189

7.6.2. Экономикалық талдау	192
7.7. Өмірлік циклды бағалау	194
Әдебиет	196
8. Ренкин циклы бойынша жұмыс істейтін жүйелер	197
8.1. Ренкин циклының негізгі сипаттамасы	198
8.2. Қатты қыздырылған жұмыс сұйықтығын қосу	199
8.3. Қайта қыздыруды қосу	203
8.4. Экономайзерді және қоректік суды регенеративті қыздыруды қосу	204
8.5. Шамадан тыс Ренкин циклы	207
8.6. Бу циклы	207
8.7. Көмір энергиясын алу	209
8.7.1. Көмір отыны қолданылатын қазандық	210
8.7.2. Қалдықтар және бақылау критерийлері	211
8.7.3. Көлемді қондырғыларға арналған шамадан тыс Ренкин бу циклының сипаттамасы	216
8.8. Жану реакциясы арқылы энергия алу үдерісі кезінде өсімдік биомассасын қолдану	219
8.8.1. Берілетін отын құрамының сипаттамасы	220
8.8.2. Биомасса қазандықтары	221
8.8.3. Көмір қазандықтарында биомассаны қоса өртеу	221
8.8.4. Қалдықтар құрамы	222
8.9. Қатты тұрмыстық қалдықтардың (ҚТҚ) жану реакциясы арқылы энергия алу үдерісінде қолданылуы	222
8.9.1. ҚТҚ кәдеге жаратушы қазандар (жойғыштар)	223
8.9.2. Қалдықтар құрамын қадағалау	223
8.10. Төмен температуралы циклдар	225
8.10.1. Ренкин органикалық циклы (РОЦ)	225
Әдебиет	227
9. Брайтон-Ренкин құрамдастырылған циклы бойынша жұмыс істейтін жүйелер	228
9.1. Құрамдастырылған цикл	228
9.1.1. Құрамдастырылған цикл кезінде газ-турбиналы циклды қолдану	229
9.1.2. Құрамдастырылған цикл кезінде бу циклын қолдану	230
9.2. Табиғи газ агрегаттары	231
9.2.1. Көлемді құрылғылар үшін құрамдастырылған циклдың сипаттамасы	231
9.2.2. NO _x жойылуы	235
9.2.3. СО және ұшпа органикалық қосылыстардың жойылуы	236
9.2.4. СО ₂ қалдықтарының құрамын қадағалау	236
9.2.5. Құрамдастырылған циклдың сипаттамалары	239
9.3. Көмір және биомассамен істейтін қондырғылар	242
9.3.1. Газдандыру	242
9.3.2. Газ генераторының отын құрамы	244
9.3.3. Көмірдің цикл ішіндегі газдандыруымен құрамдастырылған циклдық жүйелерге арналған аралас негізгі техникалық шешімдер (IGCC жүйелері)	245
9.3.4. IGCC жүйелерінің сипаттамасы	248
9.3.5. IGCC жүйелерінің артықшылықтары	251
9.3.6. Биомассаны сату мен газдандыруды үнемдеу	252
9.4. Отынды жанама жағу циклы	252
Әдебиет	255
10. Ілеспе өндіріс және когенерация	256
10.1. Ілеспе өнімдердің түрлері және ілеспе өндірісі бар үдерістерді біріктіру	257
10.2. Ілеспе өндіріс үдерісінде синтетикалық газдарды алу	258
10.2.1. Газ генераторлары	258
10.2.2. Риформинг-қондырғылар	258
10.2.3. Конвенсия реакторлары	258
10.3. Бірнеше негізгі ілеспе өнімдегі синтетикалық газдың конверсиясы	262
10.3.1. Метанол	262
10.3.2. Несепнәр	265
10.3.3. Фишер-Тропш сұйықтығы	269
10.4. Көмір мен биомассадан ілеспе сутегін алу	275
10.4.1. Қолданылатын жоғары технологиялық қондырғылар	

мен үдерістер	278
10.4.2. Жоғары технологиялық қондырғылар мен үдерістер	278
10.5. Электр энергиясымен жылудың аралас өндірісі	281
10.5.1. Литий бромидімен абсорбциялық салқындату	285
Әдебиет	289
11. Жоғары технологиялық жүйелер	290
11.1. Жоғары температуралы мембрана-сепараторлар	290
11.1.1. Керамикалық мембраналар	290
11.1.2. Ауаның мембранамен бөлінуі	293
11.1.3. Сутегі алуға қажетті мембрана технологиялары	293
11.2. Отын элементтері	295
11.2.1. Электрохимия негіздері және тасымалдау құбылысы	306
11.2.2. Отын элементтерінің іс жүзіндегі әрекеті	308
11.2.3. Отын элементтерінің жалпы сипаттамалары	300
11.2.4. Отын элементтерін қолдану арқылы электр энергиясын өндіру	303
11.2.5. Отын элементтері түрлерінің негізгі сипаттамалары	305
11.2.6. Гибридті циклдар	307
11.2.7. Көмір негізіндегі гибридті жүйелер	311
11.3. Химиялық циклдардың ұйымдастырылуы	313
11.4. Магнитті гидродинамика	314
Әдебиет	315
12. Жаңғыртылатын көздер және ядролық энергия көздері	316
12.1. Жел	317
12.1.1. Жел ресурсы және алаңшаны таңдау	318
12.1.2. Негізгі құрал-жабдықтар	320
12.1.3. Қаржылық мәселелер	321
12.1.4. Қоршаған орта мәселелері	322
12.2. Күн	322
12.2.1. Күн ресурсы және алаңшаны таңдау	322
12.2.2. Басты құрал-жабдықтар	322
12.2.3. Экономикалық тұрғыдағы мәселелер	324
12.2.4. Қоршаған ортаны қорғау	325
12.3. Геотермальді көздер	326
12.3.1. Геотермальді ресурс және алаңшаны таңдау	326
12.3.2. Негізгі құралдар	327
12.3.3. Экономика мәселелері	331
12.3.4. Қоршаған ортаны қорғау жөніндегі мәселелер	331
12.4. Ядролық энергия көздері	333
12.4.1. Ядролық отын көздері және алаңшаны таңдау	333
12.4.2. Басты жабдықтар	334
12.4.3. Экономикалық мәселелер	335
12.4.4. Қоршаған ортаны қорғау мәселелері	336
12.5. Электр жүйесінің тұрақтылығы және қазба отынға тәуелділігі	337
12.5.1. Аса жоғары және өте төмен кернеулі электр жүйесі	338
Әдебиет	339
ҚОСЫМША: Кітапта пайдаланылған қысқартулар мен аббревиатуралар, белгілер мен өлшем бірліктері	340
ӨЛІППЕЛІК КӨРСЕТКІШ	346

АЛҒЫ СӨЗ

Қазіргі заманғы өмір салтын қамтамасыз ету үшін бізге электр тоғымен қоса химиялық заттар да қажет, бірақ осы тұрмыс салтының экологиялық қауіпсіздігін қарастырған кезде қоршаған ортаға тигізетін әсерді де ескеру керек. Кітапта электр энергиясын өндіру және тағы бір нұсқа ретінде синтетикалық отын мен химикаттардың қосалқы өндірілуі мен энергияны тұрақты түрлендірудің пәнаралық саласын зерделеудің бірыңғай, жан-жақты және іргелі тәсілі ұсынылған. Осы мақсаттағы заманауи электр станциялары көп жағынан көмір сияқты қазба отыннан электр энергиясын өндірудің дәстүрлі әдістерінен, яғни Ренкин циклының көмегімен бу мен электр энергиясын өндіру үшін отынды "қарапайым" жағу жолымен ерекшеленеді. Мұндай "бу қондырғыларын" дәстүрлі түрде инженер-механиктер жобалаған, ал қазіргі заманғы электр станцияларында жылу сипаттамаларына да, экологиялық сипаттамаға да әсер ететін экологиялық қауіпсіздікке көбірек назар аударылады, дәстүрлі түрде инженер-химиктер орындаған үдерістерді қамтиды. Оған қоса қондырғылар өте жоғары жұмыс температурасы, қысымдар және агрессивті орта сияқты күрделі жағдайларда қолданылады, осындай жағдайлар үшін қажетті механикалық қасиеттерін, сондай-ақ қолайлы химиялық қасиеттерін көрсете алатын қазіргі заманғы материалдарды қолдану талап етіледі. Осылайша, бұл тұрақты энергетикалық қондырғыларды әзірлеу және жобалау тақырыбы тек инженер-механиктер, инженер-химиктер және инженер-технологтар мен химиктер үшін ғана емес, сонымен қатар материалтанушылар үшін де өзекті болып табылады. Аталған кітапта айтылған тақырыптардың көпшілігі, сондай-ақ заманауи электр станцияларын әзірлеуге қатысатын инженер-электриктер үшін де пайдалы болуы тиіс.

Осы қамтылған салалардың әрқайсысының кейбір ұстанымдары электр энергиясын өндіру мақсатында энергияны түрлендіру жүйелері бойынша неғұрлым толық түсінікті қалыптастыру үшін маңызды. Барлық негізгі талап етілетін пәнаралық ұстанымдарды толық талқылауды ақылға қонымды көлемдегі кітаптың өзінде қамту мүмкін емес болса да, бұл кітап айтарлықтай дәрежеде ақпараттық тұрғыдан тәуелсіз болу үшін жеткілікті мазмұн тереңдігін қамтамасыз етеді.

Әрбір тақырып инженерлер үшін қажетті теориялық және тәжірибелік тұрғыда қолдану жағынан толық қарастырылған. Бұл кітап жоғары курс немесе түлектер үшін, әсіресе химиялық технология, механикалық өнеркәсіптік жабдықтарды жобалау саласында және термодинамика, гидродинамика мен техникалық физика саласындағы бакалаврларға арналған оқулық бола алады. Энергияны түрлендіру саласындағы зерттеушілер мен саланың іс жүзінде қолданушы кәсіпқойлары оны анықтамалық ретінде аса пайдалы деп бағалауда.

Кітап энергетикалық жүйелерге кіріспеден басталады (1-тарау) және энергия көздерінің түрлі нысандарын сипаттайды, олар: табиғи газ, мұнай, көмір, биомасса, басқа да жаңартылатын энергия көздері және атом энергиясы. Осы ресурстардың кейбіріне қолжетімділік біркелкі емес және шектеулі. Мұны атап көрсету үшін олардың таралуы талқыланады. Тұрақтылықты қамтамасыз етуге қажетті біртұтас әдіс қолданылатынын көрсету мақсатында қоршаған ортаға әсер ету тақырыбы кіріспемен бірге жеткізулер тізбегінің талдауына және өмірлік цикл талдауына енгізілген. Келесі тараулар жинағында физиканың негізгі ұстанымдары және оларды инженерлік-техникалық жұмыстарда қолданылуы қарастырылады:

- 2-тарау. Термодинамика және оның жану циклдары мен энергетикалық циклдарда қолданылуы, сондай-ақ бірінші және екінші заңның талдауы.

- 3-тарау. Сығылмайтын сұйықтық ағыны, сондай-ақ сығылатын сұйықтық ағыны ретінде сипатталған сұйықтық ағынынан кейін тарауда құбырлар мен фитингтер, тұман ұстау, сұйыту және турбомашина жасау арқылы өтетін ағындарға арналған қолданыстар баяндалады.

- 4-тарау. Жылу берудің, жылу өткізгіштіктің, конвекцияның және сәулеленудің, кейіннен осы ұстанымдарды жылу алмасу жабдығының конструкциясына қолдана отырып,

жүзеге асырылатын үш режимі талқыланады.

- 5-тарау. Соңынан масса алмастыру жабдықтары мен реакторларды жобалау үшін қолданылатын диффузиялық және конвективті масса тасымалдау мен реакция кинетикасының негіздерін қамтитын масса тасымалдау және химиялық реакция қарастырылады.

Жабдықты жобалау негіздерін зерттегеннен кейін келесі тараулар жинағы "энергетикалық қондырғыларға" қатысты (яғни негізгі өнім электр немесе жылу сияқты энергия болып табылатын қондырғыларға) неғұрлым нақты тақырыптарға арналған әрі мыналардан тұрады.

- 6-тарау. Бу турбиналарын, газ турбиналарын, іштен жану піспекті қозғалтқыштары мен гидравликалық турбиналарды қамтитын қуатты қондырғының негізіне алынған бастапқы қозғалтқыштар талқыланады.

- 7-тарау. Жүйелік инженерия оқырманды жүйелердің тәжірибелік аспектілерімен немесе технологиялық шешімдермен таныстырады. Бұл тарауда қарастырылатын тақырыптар бастапқы деңгейде жүйелік интеграцияны және эксергия талдауы мен пинч-технологияларды қолдануды, динамикалық модельдеу мен үдерістерді басқаруды, ағындардың технологиялық сұлбасын әзірлеуді, шығындар мен экономиканы бағалауды, сондай-ақ өмірлік циклды бағалауды қолдануды қамтиды.

- 8 және 9-тараулар. Жүйелерді жобалау және интеграциялауды түсіну арқылы оқырман негізгі энергетикалық циклдармен, Ренкин циклымен және Брайтон-Ренкин аралас циклымен танысады.

- 10-тарау. Бұдан әрі отын мен химикаттардың бірлескен өндірісі ұсынылады, оған соңғы уақытта синергия әсерінің және энергияның көп бөлігін желіге жеткізетін, мерзімді жұмысқа қабілетті жаңартылатын энергия көздерінің көмегімен электр энергиясын өндіру мен жанама өнімдерді синтездеу арасындағы ыдырауды өзгерту қабілетінің арқасында елеулі көңіл бөлінуде. Кейбір негізгі жанама өнімдердің синтезі сипатталған және табиғи газ бен көмір немесе биомассаның негізінде кешенді газдандырудың аралас циклдарында бірлескен өндірудің нақты мысалдары ұсынылған.

- 11-тарау. Отын элементтері, сондай-ақ олармен қатар мембраналық сепараторлар мен реакторлар пайдаланылатын гибриді циклдар сияқты қазіргі заманғы жүйелер талқыланады.

- 12-тарау. Бұл тарауда күн мен жел энергиясы сияқты жұмысқа мерзімді қабілетті жаңартылатын энергия көздері электр желісінің тұрақтылығын ең болмағанда энергия жинақтаудың ірі масштабты құрылғылары коммерциялық қолжетімді болатын таяу болашаққа дейін сақтап тұру үшін қазба отынмен жұмыс істейтін электр станцияларына тәуелділік тақырыбы талқыланады. Бұл тарау оқырмандарға тұрақты энергия өндірісінің кейбір басқа құралдары туралы анықтамалық ақпарат беру үшін, әсіресе олардың энергетикалық құрылымға қосқан үлесі уақыт өте келе ұлғаятынын ескере отырып қосылған.

Осылайша, тәжірибелік сұрақтар мен теориялық ойлар қарастырылатын кітаптың жан-жақты әрі іргелі сипаты оны химиялық технология энергиясын түрлендіру, механикалық жабдықтарды жобалау және өнеркәсіптік жобалау пәндерімен байланысты жоғарғы курстардың студенттері немесе бітірушілері үшін оқулық есебінде, сондай-ақ инженер-электриктерді қоса алғанда, осы саладағы кәсіби инженер немесе зерттеушілер үшін анықтамалық я монография ретінде тәжірибелік қолданушылар мен студенттердің кең ауқымына тартымды етеді. Қазіргі уақытта энергияның тұрақты түрленуі өте белсенді зерттеліп отырған сала болып табылады. Кітап көптеген пәнаралық негізгі ұғымдарды жеткілікті терең қамти отырып, зерттеу үшін дербес негіз болып табылады және энергияны тұрақты әрі экологиялық қауіпсіз түрлендіру саласында жұмыс істейтін әр түрлі инженерлік-техникалық пәндер үшін де, химик-талдаушылар үшін де қолайлы. Осы саладағы мүдделі кәсіби қоғамдар AIChE, ACS, ASME, SME және IEEE қамтиды.

КІТАП ТУРАЛЫ

Электр энергиясын өндіру үшін энергияны түрлендірудің түрлі аспектілерін ескеріп, тұтастай қамтитын тек бірнеше кешенді кітап бар. Алайда мұндай кітаптар жалпы жүйелерде немесе физикалық қағидаларға аз сүйенетін жабдықтарда шоғырланған. "Нақты жүйелерді" жобалау саласындағы кең жұмыс тәжірибесі және негіз қалаушы қағидалар бойынша теориялық түсінік арқылы д-р Рао осы екі негізгі білім базасының бірегей әрі синергиялық үйлесіміне алып келеді. Оның университетке қатысуы авторға тек іс-тәжірибеде қолданушы маман үшін ғана емес, сонымен қатар студентке де пайдалы кітап жазуда басымдық береді.

Бұл кітаптың мазмұны доктор Раоның 30 жылдан астам өнеркәсіпте және 10 жылға жуық университеттік ортада алған тәжірибесіне негізделген. Өнеркәсіптік тәжірибесі энергетикалық жүйелерді әзірлеу мен жобалау бойынша кіші персоналды дайындауды қамтыды, ал университеттік ортада қысқа курстар мен жоғары курс бітірушілеріне арналған тұрақты энергетика бойынша курстарды оқытты, сондай-ақ ол аспирантурадағы зерттеу жұмыстарын басқарды.

АВТОР ТУРАЛЫ

Доктор Рао электр энергиясын өндіру мен химиялық заттарды бірге өндіру үшін энергияны түрлендіру саласында танымал ұлттық және халықаралық көшбасшы болып табылады әрі ол осы салаларға соңғы 40 жылда өнеркәсіп пен Калифорния университетінде, Ирвиннің энергетика және энергия бойынша озық бағдарламасы шеңберінде айтулы үлес қосты. Ол қазіргі уақытта университеттің энергетикалық жүйелер бойынша басты ғалымы болып табылады. Доктор Рао университетке келгенге дейін өнеркәсіпте 30 жылдан астам уақыт еңбек етті және салалық тәжірибе мен академиялық білімнің осындай бірегей үйлесімінің арқасында ол университет жұмысына айтарлықтай ат салысты, бұған оның энергияны түрлендіру технологиялары саласындағы әр түрлі жарияланымдары дәлел. Ғылыми қызметінің іс-тәжірибелік шешімдермен біріктірілуінің нәтижесінде басқа ғалымдар мен инженерлерді оның идеяларын зерттеуге және дамытуға әрдайым ынталандыратын жоғары сапалы басылымдар шығарылды. Доктор Раоның ғылыми қызметінде зерттелетін энергетикалық жүйелердің алуан түрлі: онда қазіргі заманғы газ турбиналарынан бастап, көмірді отын элементтері негізіндегі жүйелерге дейін циклішілік газдандыру жүретін аралас циклдарға дейін бар. Оның бүгінгі жас инженерлер және студенттермен жұмыс істеу тәжірибесі білім базасындағы олқылықтарды анықтап, осы кітапты әзірлеуге жақсы негіз қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Университетке келгенге дейін доктор Рао 25 жыл бойы 40 000-нан астам халықаралық мамандары бар әлемдік деңгейдегі инжинирингтік компания – «Fluor» корпорациясында жұмыс істеген. Өзінің энергетикалық технологиялар саласындағы және басшылық лауазымдардағы тәжірибесінің арқасында ол технологиялық жобалау жөніндегі директор болып тағайындалды әрі оның міндетіне газ турбиналарын, іштен жану піспекті қозғалтқыштарын, аралас циклдар мен отын элементтерін пайдалана отырып электр энергиясын өндіру үшін қоршаған ортаға әсерді барынша азайту кезінде энергияны түрлендірудің әр түрлі үдерістерін әзірлеу, сондай-ақ көмірден, мұнай коксынан, биомассадан, сұйық көмірсутектер мен табиғи газдан сутегіні алу, синтез-газды (немесе қысқартылған түрде сингаз), Фишер-Тропш сұйықтықтарын, аммиакты, спирттер мен диметил эфирін өндіру кірді. 1994 жылы "Fluor" доктор Раоны энергетикалық жүйелерді жетілдіру саласындағы жаңашыл еңбегі үшін марапаттады, оның еңбегі "Ылғалды ауада жұмыс істейтін турбиналар" циклына қосылды, бұл әлемдік деңгейде техникалық мамандануды растау арқылы танылған жетістік болып табылады. Кейін оның энергияны түрлендіру саласына елеулі үлес қосып отырғаны еленіп, "Fluor" компаниясының аға ғылыми қызметкері болып тағайындалды. Энергияны түрлендіру саласына қосқан үлесі үшін ол Калифорниялық инженерлік кеңес құрметіне ие болды. Энергетикалық циклдар бойынша әлемдік деңгейде танылған көшбасшы бола отырып, ол ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power редакторының көмекшісі және 2011 жылғы Перуджада, Италияда өткен Қолданбалы энергия бойынша халықаралық конференцияға негізгі баяндамашы ретінде шақырылды. Сондай-ақ оның қоржынында энергия түрлендіру саласындағы бірқатар патенттер бар. Ол Woodhead Publishing "Электр станцияларына арналған жетілдірілген материалдар, дизайн және технология" кітабының "Газбен жұмыс істейтін бу-газ қондырғысы" атты тарауының авторы, сонымен қатар Woodhead Publishing "Шығарындылары нөлдік деңгейдегі электр энергиясын өндіруге арналған аралас циклдық жүйелер" атты кітаптың негізгі редакторы болып табылады. Жақында ол Джон Уайлиге арналған "Таза энергия жүйесі бойынша нұсқаулық" кітабы үшін "Буландырғыш газ турбинасының (EvGT) / ылғалды ауада жұмыс істейтін турбинаның (HAT) циклдары" атты тарауды аяқтады.

¹ Бұл атау мұнай-химия өнеркәсібінен алынған, газ құрамы мұнай-химия өнімдерін синтездеу үшін пайдаланылатын газға ұқсас.

1

ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕРГЕ КІРІСПЕ

Вебстердің сөздігі энергияны "жұмыс істеу немесе орындау қабілеті" деп анықтайды. Күш өрісінде (айталық, биіктіктегі гравитациялық өрісте) ұстап қалып, денеде сақталатын потенциалдық энергия сияқты қозғалыстағы дененің кинетикалық энергиясы ретінде пайдалы жұмыс бөлініп алынуы ықтимал энергияның түрі болып табылады. Атомдар мен молекулаларды байланыстырушы химиялық байланыстарға қатысты энергия потенциалды энергия болып табылады. Егер отынның жану үдерісін қарастырсақ, онда энергия әдетте молекулалардың кинетикалық энергиясына (вибрациялық, айналмалы және үдемелі) айналады және жылу энергиясы деп аталады. Жану экзотермиялық реакцияларының нәтижесінде мұндай энергия жылу түрінде берілуі мүмкін және оның бір бөлігі жылу қозғалтқышымен жұмысқа түрлендірілуі мүмкін мүмкін. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдары энергияны түрлендірудің осы үдерістерін басқарады. Бірінші заң, тәжірибе заңы, табиғатта энергияның сақталуын мойындайды, ал екінші заң, сондай-ақ тәжірибе заңы энергияның жалпы сапасы ұлғайтылмайтынын мойындайды. Шын мәнінде, нақты үдерістер үшін энергияның жалпы сапасы соңғы (нөлдік емес) жылдамдықтарда энергияны түрлендіру үдерісін іске қосу үшін потенциалдардың ақылға қонымды әр түрлілігін жасау қажеттілігі есебінен төмендейді (мысалы, соңғы қозғалғыш күштермен жылу массасын тасымалдау, температура, массаға қатысты қолданылатын жылу және химиялық потенциал), бұл энергияның жоғалуына (немесе қайтымсыздыққа) және үйкеліс күшінің туындауына әкеледі.

Осылайша, тұтастай алғанда табиғатта болып жатқан кез келген іс-әрекет энергияның жалпы сапасының төмендеуімен (екінші заңның салдары) бірге жүреді, ал энергия жойылмайды әрі пайда болмайды (бірінші заңның салдары), бірақ неғұрлым сапасы немесе потенциалы төмен күйге (-лерге), не нысанға (тағы да екінші заңның салдары) айналады. М массасын және E энергиясын (c – жарық жылдамдығы) байланыстыратын Эйнштейннің атақты $E = mc^2$ теңдеуіне сәйкес, ядролық энергия қолданылған кезде материя да жоғарыда айтылған энергияны сақтау ұстанымына қосылуы тиіс.

Табиғи немесе адами үдерістер энергияның неғұрлым жоғары түрлерін пайдаланады, оның бір бөлігін пайдалы түрге айналдырады (осы үлестің жоғарғы шегі екінші заңмен шектелген) және соңында барлық энергия энергияның неғұрлым төмен нысандарына дейін төмендейді және көбінесе пайдасыз болады. Осылайша, энергияның пайдалы нысандарының тұрақты түрде сарқылуы орын алады және сарқылу жылдамдығы пайдалы нысандарға түрлендірілген энергия үлесінің қаншалықты жақын болуына байланысты екінші заңмен белгіленген шектерге жақындайды; былайша айтқанда, сарқылу деңгейі түрлендіру үдерісінің қаншалықты тиімді болуына байланысты болады. Ластаушы заттардың пайда болу жылдамдығы технологиялардың осы жинағы жағдайында энергия ресурстарын пайдалану деңгейіне пропорционал ұлғаяды.

Сонымен, неғұрлым тиімділігі жоғары үдерістерге, ғаламшарымыздың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ету үшін, яғни ресурстарды сақтау, сондай-ақ қоршаған ортаға әсерді азайту үшін пайдалы нысандарға жеткізілетін энергияның үлкен үлесін түрлендіретін үдерістерге жүгіну аса маңызды.

Энергияны электр энергиясына және ілеспе өнімдерге қауіпсіз түрлендіру: қағидаттар, технологиялар және жабдықтар, Бірінші басылым. Ашок Пао.

© 2015 John Wiley & Sons, Inc. 2015 ж. John Wiley & Sons, Inc. басып шығарған.

1.1 ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ ЖӘНЕ РЕСУРСТАРДЫҢ БӨЛІНУІ

Қазба отындар, яғни табиғи газ, мұнай және көмір қазіргі уақытта энергияның негізгі көзі болып табылады, ал тақтатас (сланец) ресурстары (тақтатас газымен немесе мұнаймен шатастырмау керек) бүгінгі таңда салыстырмалы түрде қымбат болғандықтан, шектеулі ауқымда (негізінен Эстонияда) ғана пайдаланылады. Электр энергиясының көп бөлігі атом электр станцияларында өндірілетін Францияны қоспағанда, радиоактивті элементтердің ядролық бөлінуі қазба отынға қарағанда көптеген елдерде аз көлемде пайдаланылды. Жаңартылатын энергия көздеріне биомасса, геотермальды энергия, электр энергиясын өндіру үшін турбиналардың айналуына арналған жел энергиясы, тікелей жылу беру үшін немесе фотоэлектрлік элементтерде пайдаланылатын күн энергиясы, сондай-ақ гидроэлектрэнергияны алу үшін пайдаланылатын өзендер жатады әрі осы ресурс АҚШ-тың солтүстік-батысы сияқты кейбір өңірлерде, сондай-ақ Норвегия мен Швецияда айтарлықтай пайдаланылады. Шын мәнінде, күн энергиясы желді, сонымен бірге **өзендердегі суды буландырып** және оны бұлт түрінде кері жылжытып, атмосфераның жоғары қабаттарында жаңбыр түзе отырып "қозғалтатынын" түсінген жөн.

1.1.1 Қазба отын

Биогенді теорияға сәйкес, қазба отын – бұл біздің планетамызда миллиондаған жыл бұрын гүлденген теңіз ағзалары мен өсімдіктері сияқты тіршілік түрлерінің қалдықтары ("қазба"). Осылайша, бұл энергия миллион жыл ішінде жинақталған күн энергиясының сақталған нысаны болып табылады. Алайда ағымдағы және болжамды пайдалану көрсеткіштеріне сүйенсек, өкінішке орай, қазба отын күннен энергия жинау үшін қажет уақытпен салыстырғанда аз уақытта жұмсалып кетеді. Оның салдарлары химиялық элементтердің синтезіне қажет құнды ресурстарды жоғалтуды, сондай-ақ біздің планетамыздағы тіршілік нысандары жұтуы мүмкін жылдамдықтан әлдеқайда жоғары жылдамдықпен атмосфераға өте көп CO_2 айдау арқылы болатын қоршаған орта сілкінісін қамтиды.

Атмосферада CO_2 жиналуы жаһандық жылынуға әкеледі. Жердің бетіне түсетін күн сәулесі инфрақызыл жылу ретінде шағылыса отырып, **атмосферадағы CO_2 (және CH_4 сияқты басқа да жылыжайлық газдардың)** ықпалына ұшырайды; бұл құбылыс энергия жиналуына әкеледі, ал температураның жоғарылауы мұндай газдардың жердегі концентрациясына байланысты.

Қазба отын түрлерінің арасында табиғи газ жеткізілетін түрінде, негізінен CH_4 түрінде неғұрлым тазартылған күйде болады. Күкірттің табиғи қосылыстары жойылады (алайда қауіпсіздік үшін иісі арқылы газ шығуын анықтауға болатын, құрамында күкірт бар меркаптан сияқты органикалық қосылыстардан тұратын одоранттың аз мөлшері қосылады), ал бұл газ тәрізді отында күл заты болмайды. Басқа элементтердің немесе қосылыстардың аз ғана мөлшері болады. Сутегінің көміртекке (H/C) ең жоғары қатынасында қазба отынның барлық түрлерінің ішінде табиғи газ қондырғының едәуір жоғары жалпы тиімділігі жағдайында энергия алу үшін пайдаланылуы мүмкін екендігін ескере отырып (қондырғымен электр энергиясының таза шығысына түрлендірілген отындағы энергия үлесінің өлшемі), CO_2 жылыжайлық газының шығарындылары қазба отын түрлерінің арасындағы ең төмені болуы мүмкін.

Көмірдің үлкен қорына ие Құрама Штаттар келесі 300 жыл ішінде өзінің энергияға қажеттілігін қанағаттандыра алады, бірақ көмір ең лас қазба отын болып табылады, өйткені құрамында күкірт және азот бар, олар жану үдерісінде оксидтер мен белгілі ластағыштар, сондай-ақ қоршаған ортаға зиян келтіруі ықтимал күл түзеді, онда H/C төмен қатынасы бар, бұл CO_2 -нің аса үлкен көлемде шығарылатынын білдіреді.

Табиғи газ құрамы жағынан ең қарапайым болып табылады және газ бола тұра жану камерасында оңай араласады әрі салыстырмалы түрде таза жанып кетеді. Бұған қоса ластануға қарсы күрес шараларын табиғи газбен жұмыс істейтін қондырғыларда жүзеге асыру оңай. Екінші жағынан, көміртегі мен сутегіне қосымша әр түрлі элементтерді қамтитын өте күрделі құрылымы бар көмірге қатты зат болғандықтан, таза күйде жанып кету қиын.

Көмірді жағу кезінде кептіру және (немесе) кейін бөлінген газдар мен көмірленген заттар тотығатын шала кокстау күрделі үдерісі жүреді, ал мұның өзінде күйенің едәуір бөлігі әдетте 10 мкм немесе одан аз мөлшерде күл қалдығы деп аталатын бөлшектерді құрайды. Түтін газдарынан қатты бөлшектерді жою жүйелерімен не оның өте тиімді жүйелерімен жабдықталмаған кейбір ескі көмір электр станцияларының айналасындағы ауа көрінісінің бұлыңғырлануы күл қалдығына байланысты.

Мұнайдан алынатын сұйық отын оның табиғи газ бен көмір арасындағы экологиялық сипаттамаларына қатысты аралық түрі болып табылады. Жану үдерісінің тиімділігі, сондай-ақ жағымсыз ластаушы заттардың түзілуі мен шығарылуын азайтуға қатысты параметр тұрғысынан, мұнай сұйық зат бола отырып, үлкен аумақтағы беткі қабаттарда жану алдында булану және араласу үшін жану камерасында 10 мкм және одан кіші өлшемдегі бөлшектерге дейін тозандануды қажет етеді. Мұнайды жағу кезінде күйе бөлшектері және төменде көрсетілгендей, басқа да ластаушы заттар пайда болуы мүмкін: жанбаған көмірсутектер – олардың түзілуі жану үдерісінің қаншалықты жақсы әзірленгеніне байланысты. Сондай-ақ жағылатын мұнайдың түріне байланысты күл бөлшектері бөлінуі мүмкін.

Отынмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғының жалпы тиімділігі қондырғының пайдалы өндіргіш қуатының және отынның "жылу шығару қабілетінің" қатынасымен (отынмен берілетін энергия өлшемі ретінде) белгіленеді.

Өнеркәсіпте жылу шығару қабілетінің екі түрі қолданылады: жоғары жылу шығару қабілеті (High Heating Value – HHV) және төменгі жылу шығару қабілеті (Low Heating Value – LHV). HHV бастапқы белгіленген стандартты температурада ауа арқылы отынның бірлі-жарым мөлшерінің жануы кезінде бөлінетін жылуды өлшеу және H_2O пайда болатын булардың конденсациясы кезінде осы бастапқы температураға дейін жану өнімдерін салқындату (және конденсацияның бөлінген жасырын жылуын қосу) жолымен алады. Оны сондай-ақ 2-тарауда көрсетілгендей, түзілім жылуы туралы деректер негізінде есептеуге болады. Эмпирикалық корреляциялар түзілім жылуы туралы деректері жоқ көмір сияқты отын түрлері үшін әзірленген. Дюлонг-Пти формуласы кейде тәжірибелік деректер болмаған уақытта HHV көмірді бағалау кезінде қолданылады. Ол сондай-ақ эксперименттік деректер жоқ кезде шектеулі жетістіктермен биомасса сияқты басқа отын түрлерінің HHV бағалау үшін пайдаланылады. Басқа корреляциялар да әзірленді және осындай әр түрлі формулалардың түйіндемелері Гарсия мен тең авторлар тарапынан (2014 ж.) ұсынылды.

Солтүстік Америкада анықталғандай, LHV мәні жану кезінде пайда болатын H_2O конденсациясының жылуын ескермеуде, яғни $LHV = HHV -$ бұл пайда болған су буының жасырын жылуы. Еуропада оның орнына HHV бойынша көмір сияқты отын түрлері үшін Халықаралық энергетикалық агенттіктің LHV анықтамасы пайдаланылады, ол мынадай түрде есептеледі: $LHV = HHV - 212 \times H - 24 \times H_2O - 0,8 \times O$, мұндағы H және O "алу кезінде" принципі бойынша отындағы сутегі мен оттегінің массалық пайыздық үлесі (яғни, ылғалдық пен күлділікті қоса алғанда қондырғыда алынған жағдайларда), H_2O – бұл жұмыс отындағы ылғалдың салмақтық пайызы болып табылады, HHV және LHV алынған деректер негізінде бір килограмм көмірге қатысты килоджоульмен көрсетілген. Бұл анықтама әдетте LHV-дің Солтүстік Америкада анықталған мәннен төмен мәніне әкеледі, бұл LHV негізінде тиімділікті түзеді, ол туралы жоғарыда аталған еуропалық авторлар хабарлайды. Сонымен, LHV анықтаудағы бұл айырмашылықты энергияны түрлендіру жүйесінің тиімділігін салыстыруда, еуропалық және Солтүстік Америка авторларының есептерінде, оған қосымша LHV немесе HHV тиімділікке негізделме деген жағдайларда назарға алу керек. Әдетте LHV тиімділігі газда жұмыс істейтін энергетикалық жүйелерді орнатудың жалпы тиімділігі туралы хабарлау үшін пайдаланылады, ал Құрама Штаттарда HHV тиімділігі қатты отынмен жұмыс істейтін жүйелер үшін қолданылады (мысалы, көмір және биомассада).

Отындағы HHV мен LHV арасындағы айырмашылық сутегі құрамына байланысты болғандықтан, HHV қатынасы 0,846 кезінде H_2 үшін ең төмен, 1,00 кезінде CO үшін ең жоғары, ал CH_4 үшін ол 0,901 құрайды. Дизель отыны сияқты сұйық отын үшін бұл арақатынас шамамен 0,93-0,94, ал этанол үшін 0,906 құрайды. Иллинойстағы № 6 көмір сияқты битуминозды көмір үшін бұл қатынас шамамен 0,968; Вайоминг штаты, Паудер өзені алабынан алынатын суббитуминозды көмір үшін – шамамен 0,964; ал Солтүстік Дакотадан

²25°C – Американдық мұнай институты үшін және 60°F – Газды өңдеуге арналған жабдықты жеткізушілер қауымдастығы үшін.

алынатын қоңыр көмір үшін – шамамен 0,962. HHV мен LHV арасындағы айырмашылық отынның көптеген түрлері үшін маңызды болғандықтан, мәлімделген тиімділіктің HHV немесе LHV-ға негізделген/негізделмегенін көрсету қажет.

Қазба отынның бұл ресурстарының сипаттамалары бұдан әрі бастапқы өңдеудің қысқаша сипаттамасын қоса алғанда неғұрлым егжей-тегжейлі талқыланады. Бұл энергияны рекуперациялауда осы ресурстарды пайдалану үшін қажет. Бұл алдын ала өңдеу талабы осы ресурстардың қоршаған ортаға деген әсерінің толық көрінісін алу үшін, яғни "тал бесіктен жер бесікке дейін" назарға алынуы тиіс, бұл көлік отындары жағдайында "отын өндірудің толық циклы" немесе "шахтадан тұтынуға дейін" деп аталады.

1.1.1.1. Табиғи газ. Мұнай сияқты табиғи газ биогенді теорияға сәйкес миллиондаған жыл бұрынғы өсімдіктер мен жануарлар қалдығы (бәлкім, микроорганизмдер) шөгінділерінен алынған болып саналады. Табиғи газ мұнаймен бірге немесе мұнай аз, не мүлдем жоқ көптеген газ кен орындарында да табылуы мүмкін. Абиогенді теория деп аталатын басқа теорияға сәйкес табиғи газ біздің күн жүйесіндегі кейбір басқа планеталар мен айларда CH_4 болуын мысал ретінде келтіре отырып, нәзік материядан алынған деп айтылады.

Қазіргі уақытта табиғи газдың негізгі жанғыш компоненті болып табылатын CH_4 қатар табиғи газдағы басқа да жеңіл көмірсутектер C_2H_6 , C_3H_8 және C_4H_{10} қамтиды. Шикі табиғи газдың құрамында CO_2 және кейде N_2 болуы мүмкін әрі бұл газдардың жылу шығару қабілеті жоқ. CO_2 әдетте табиғи газдан бөлініп алынады, ал C_2H_6 , C_3H_8 және C_4H_{10} әдетте арнайы отын немесе мұнай-химия өнімдерін өндіру үшін шикізат ретінде бөліп алынып сатылады. H_2 , H_2S және He сияқты басқа элементтер мен қосылыстар да табиғи газда табылған. Сондай-ақ H_2S те сатуға жіберілмес бұрын табиғи газдан бөлініп алынады. H_2S улы газ болып табылады және отынның жануы кезінде пайда болатын оксидтер ластаушы заттар болып табылады, бұл тақырып осы тарауда бұдан әрі талқыланатын болады. 1.1-кестеде (Рао және бірлескен авторлар, 1993 ж.) табиғи газға арналған типтік келісім-шарттық ерекшеліктер көрсетілген.

1.2-кестеде (Рао және бірлескен авторлар, 1993 ж.) көрсетілгендей, табиғи газдың құрамы елеулі түрде өзгеріп отыруы мүмкін. Табиғи газдың құрамындағы өзгергіштік, сондай-ақ Құрама Штаттардың белгілі бір аудандарында (Солтүстік-шығыс) сұраныс ең жоғары болатын айларда болуы мүмкін. Мұндай кезеңдерде табиғи газ көлемінде O_2 4%-ға дейін болуы мүмкін. Газ жеткізуші компания осындай жоғары сұраныс кезінде отын беруді арттыру үшін пропан немесе бутанды араластыруы ықтимал. Ауа Воббе индексін ұстап тұру үшін сұйылтқыш ретінде (қысымның шүмек (сопло) арқылы тіркелген көрсеткішке төмендеуі үшін жану камерасына түсетін энергияның салыстырмалы мөлшерінің өлшемі 6-тарауда толығырақ талқыланады) белгілі бір шектерде қосылады.

"Шығу тегі типтік емес табиғи газдың" жақында ашылуы осы қазба отынның әсіресе Құрама Штаттарда жеткізілуін ұлғайтты, ал қазба отынның басқа түрлерімен салыстырғанда көміртектің аз болуы оны пайдалануға жаңа қызығушылық тудырды.

1.1-КЕСТЕ. АҚШ-тың табиғи газға қатысты келісім-шартының типтік техникалық ерекшеліктері

Ерекшелік	Тұтынушыға өнімді беру шектері ^a
H_2S	0.25–1.0 бөлшектер / 100 стандарттық футтар ³
Меркаптандар (хош иістендіргіштер)	1.0–10.0 бөлшектер / 100 стандарттық футтар ³
Барлық күкірт	10–20 бөлшектер / 100 стандарттық футтар ³
CO_2	2%көлем бойынша
O_2	0.2%көлем бойынша
N_2	3%көлем бойынша
Барлық инертті газдар	4%көлем бойынша
H_2	көлем бойынша миллионға шақталған
400 бөлшек (миллионға шақталған б.)	

CO	Жоқ
Галогендер	Жоқ
Su	7фунттар /10 ⁶ стандарттық футтар ³ (118кг/10 ⁶ қалыпты м ³)
Көмірсутектер шық нүктесі	45F400кв.дюйм болғанда (7.2C27.6бар артық болғанда.)
HHV	975БТЕ /стандарттық футтар ³ ,минимум (38.4МДж / қалыпты м ³)

^a15.43 бөлшектер=г;100 стандарттық футтар³ (60F,1атм болғанда)=2.679 қалыпты м³ (0C,1атм.болғанда).

1.2-КЕСТЕ. Табиғи газ құрамындағы өзгеріс

Құрауыш	Көлем (%)			
	Орташа	Стандартты ауытқу	Минимум	Максимум
CH ₄	93.0	5.5	73	99
C ₂ H ₆	3.0	2.6	0	13
C ₃ H ₈	1.0	1.4	0	8
C ₄ H ₁₀	0.5	1.0	0	7
C ₅ H ₁₂	0.1	0.3	0	3
C ₆ H ₁₄	0.1	0.1	0	1
N ₂	1.5	2.9	0	17
CO ₂	0.5	0.5	0	2

CH₄ орташа ұйымдастырылмаған шығарындылары бар 100 жылдық уақыттық көкжиек үшін, Ховард пен бірлескен авторлардың бағалауына сәйкес (2011ж.), 8-тарауда сипатталған (битуминозды көмір болжанып отыр) көмірде жұмыс істейтін қазіргі заманғы энергетикалық қондырғы 9-тарауда сипатталған табиғи газда жұмыс істейтін, тақтатастағы (сланец) құрастырылған циклы бар қазіргі заманғы энергетикалық қондырғы жағдайында таза МВт-ға жылыжайлық газдардың ұқсас шығарындылары үшін көміртекті ұстап қалу мен сіңірудің шамамен 40% талап етеді. Мұндай құрастырылған циклдарда газ турбинасының жұмыс істеген жылуы (Брайтон циклы) бу өндіру үшін пайдаланылады, содан кейін қосымша қуат өндіру үшін бу турбинасында (Ренкин циклы) пайдаланылады. Көмірде жұмыс істейтін энергетикалық қондырғыда CO₂ ұстау және сіңіру мәселесінің күшеюі қондырғының жалпы тиімділігінің азаюына байланысты, мұның өзі отынның екі түріне арналған таза МВт негізіндегі жылыжайлық газдардың ұқсас шығарындыларын ұстап қалуға талап етілетін CO₂ мөлшерін қосымша ұлғайтады. Қолданыстағы көмір қазандықтары қолда бар жабдықтың едәуір бөлігін пайдалана отырып, табиғи газбен жұмыс істейтін құрастырылған циклдарға түрлендірілуі мүмкін.

Табиғи газбен жұмыс істейтін құрастырылған циклдар көмір негізіндегі қуатпен салыстырғанда күрделі шығындарының неғұрлым төмендігінің арқасында үздіксіз сипаттағы күн энергиясы мен жел сияқты жаңартылатын энергия көздерін толықтыра алады. Басқа артықшылықтарға олардың энергетикалық қондырғы электр энергиясын тұтынушыға жақын орналасқан және әдеттегі мега масштабты электр желісіне тәуелсіз жағдайдағы электр энергиясын бөлу өндірісі, сондай-ақ 10-тарауда талқыланатын жылу мен энергияны (ЖЭО) құрастырып өндіру үшін пайдаланылатын шағын қолдануларға жарамдылығы кіреді.

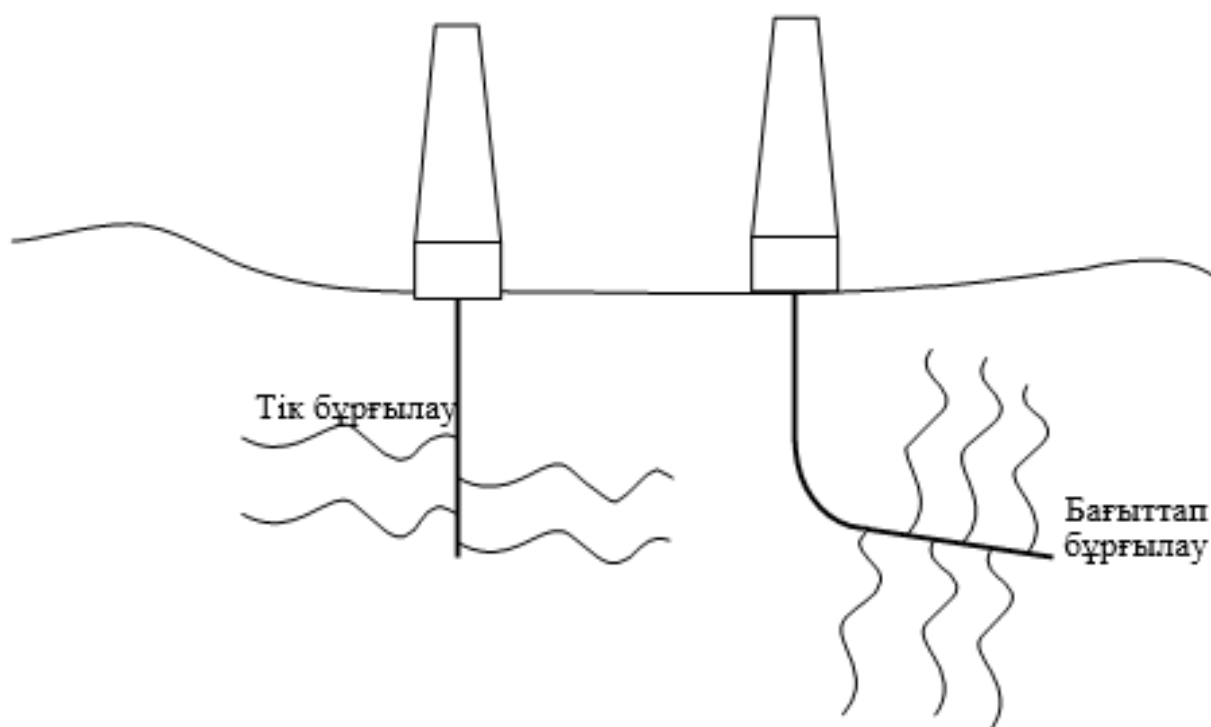
Типтік емес табиғи газ өткізгіштігі төмен коллекторларда болатын (i) "тығыз газдан", (ii) көмірде адсорбцияланатын көмір қабатының метаннан және (iii) өткізгіштігі төмен тақтатасты (сланец) формацияларда болатын (тығыз газ резервуарларына қарағанда өткізгіштігі тіпті төмен) әрі қорлары тез өсіп жатқан газдан тұрады. Табиғи газдың қарапайым шоғырлары әктас пен доломит сияқты құмтас пен карбонаттардың кеуекті тау жыныстарында болады және сайып келгенде ұңғыма оқпанына ағып кете алатын өзара байланысты кеуекті кеңістіктердегі газдан тұрады. Көмір қабаттарынан алынатын метан газы қысымды түсіру жолымен шығарылады. Сондай-ақ, адсорбцияланған табиғи газды ығыстыру үшін CO₂ енгізу қарастырылады. Тығыз газды, сондай-ақ тақтатастас (сланец) газын өндіру әдетте қосымша өткізгіштікті жасау үшін коллекторды ынталандыруды қажет етеді.

Көлденең жазықтықтағы бағытталған бұрғылау әдеттегі тік ұңғымаларға қарағанда

коллектордың көп бөлігін жалаңаштайды, бұл оны ұңғымаға байланысты анағұрлым арзан етеді әрі осылайша шектеулі және тақтатас (сланец) газ ресурстарын өзірлеу үшін неғұрлым қолайлы етеді (1.1-сурет). Көлденең бұрғылау, мысал үшін айтсақ, 600 м-ге дейін бұрғылаудан тұрады, одан кейін көлденең бағытта шамамен 1½ км бойы, ол арқылы ұңғыма қабат бойымен газға ұңғыма оқпанына ену үшін көбірек мүмкіндіктерді бере отырып өтеді. Өткізгіштік ұңғыманы бұрғылаудан және игергеннен кейінгі қабаттың гидравликалық жарылуы есебінен артады. Ол резервуардағы тау жыныстарын бұзу үшін жоғары қысымдағы ұңғымаға үлкен көлемді сұйықтықты (құм және 0,5-1% химиялық қоспалар сияқты тегістейтін толтырғыш бөлшектерінің 9,5% бар ~ 20000 м³ су) айдау жолымен қабаттағы тау жыныстарын бұзуды қамтиды. Фракция үшін сұйықтықтың қысымын түсіргеннен кейін ашылған индукцияланған гидравликалық ажырауды сыналаушы агенттің бөлшектері ұстап тұрады. Газ қысымның түсуіне қарай қалпына келеді. Суға 750-ге жуық химиялық қосылыс қосылады, оның ішінде майлау материалдары, бактериялардың өсуін болдырмау үшін биоцидтер, минералдардың шөгуін болдырмау үшін шөгінділердің түзілу ингибиторлары, сондай-ақ коррозия ингибиторлары мен кеңейген сазды минералдардың сөнуін болдырмау үшін тақтатас тұрақтандырғыштары бар.

АҚШ энергетикалық ақпарат басқармасының (2013а) 2012 жылы техникалық түрде алынатын тақтатас (сланец) газына жүргізген талдаулары Қытай үшін ең жоғары 32×10^{12} м³, одан кейін Құрама Штаттар үшін 20×10^{12} м³, ал әлем бойынша 207×10^{12} м³ болды, бұл табиғи газдың жалпы дүниежүзілік қоры елеулі көлемнің үштен бір бөлігі болып табылады. Бұл сандарды келешекте елестету үшін 2012 жылы газды жыл сайын тұтыну көрсеткіші әлемдік масштабта $3,4 \times 10^{12}$ м³ құрады.

Тақтатас (сланец) газында әдетте жай табиғи газға қарағанда көмірсутектердің едәуір жоғары мөлшері болады (CH_4 қарағанда жоғары), бұл жалпы экономиканы жақсартуға көмектеседі, себебі бұл жоғары көмірсутектер бөлек алынуы және жоғары бағамен сатылуы ықтимал.



1.1-СУРЕТ. Тік немесе бағыттап (негізінен көлденең) бұрғылау.

Жоғары көмірсутектерге қосымша ұңғыма сағасындағы табиғи газдың құрамында әдетте CO_2 және H_2S сияқты қышқылдық немесе "қышқыл" газдар, бұрынырақ айтылғандай, ылғал және жойылуы тиіс басқа да керек емес құрауыштардың қатары болады. Өңдеу адсорбциялық, абсорбциялық және криогендік сатылардың үйлесімін қамтиды. Қышқыл

газдар H_2O -мен қосылғанда күйдіргіш қышқылдарды түзеді, мысалы, CO_2 көмір қышқылын түзеді. Сонымен қатар CO_2 табиғи газдың жылу шығару қабілетін төмендетеді. Іс жүзінде CO_2 концентрациясы 2-3%-дан асқан кезде табиғи газ сатуға жарамсыз болады. Сонымен қатар H_2S өте улы газ болып табылады, ол ылғал болған жерде өте агрессивті. Қышқыл газдар табиғи газдан моноэтанолламинмен (МЭА) байланыстыру арқылы шығатын газдың қатаң сипаттамалары талап етіліп, төмен қысыммен жұмыс істеген кезде бөлініп алуы мүмкін. Диэтанолламин (ДЭА) орташадан жоғары қысымға дейін өңдеу кезінде қолданылады. ДЭА да МЭА сияқты еріткіш регенерациясын қажет етпейді, мұнда жағымсыз тұрақты қосылыстар табиғи газдың ластануынан пайда болады. Нг табиғи газда да болуы мүмкін және бұл жағдайда өңдеу үдерісі адсорбцияны қамтиды. Құрамында Нг бар адсорбенттен тұратын қауіпті ағынның пайда болуын болдырмау үшін регенеративті үдерісті қолданған жөн. Масса тасымалдау үдерістерінің бұл түрлері 5-тарауда сипатталған.

Табиғи газда болуы мүмкін басқа компонент Не болып табылады және ол өнеркәсіпте қолданылады. Ол криогенді бөлініп, оның табиғи газдағы концентрациясы көлемі бойынша 0,4%-дан асқан кезде шығарылады. Ол қысқа циклды адсорбция (PSA) үдерісінде қосымша тазартылуы мүмкін. Дистилляция да, PSA да 5-тарауда сипатталған. C_2H_6 , C_3H_8 және C_4H_{10} жоғары көмірсутектері әдеттегі құбыр газымен салыстырғанда қосылған шаманы білдіреді, ал C_5 + фракциясынан тұратын "конденсат" бензин ретінде пайдаланылуы мүмкін. Сонымен қатар конденсатты шығару газ құбырының шық нүктесінің ерекшеліктеріне сәйкес болу, яғни құбыр ішіндегі конденсацияны болдырмау үшін жиі талап етіледі.

1.1-мысал. Мінсіз газ жұмысын болжай отырып, 1.3-кестеде әрбір құрауыштар үшін ұсынылған LHV және HHV деректерін пайдалану арқылы 1.2-кестеде көрсетілген "орташа" құрамға сәйкес келетін стандартты текше метр ішіндегі (қДж / см³) килоджоульмен табиғи газдың LHV және HHV есептеңіз.

C_4 -тен бастап C_6 -ға дейінгі барлық көмірсутектердің тікелей тізбегі бар (яғни олар "N" көмірсутектерімен белгіленген "қалыпты" болып табылады) деп есептейік, мұның өзінде жылу шығару қабілеті, сондай-ақ басқа да жылу физикалық қасиеттері көміртекті тізбектің тармақталу дәрежесіне байланысты. Содан кейін осылайша есептелген табиғи газдың LHV-ын HHV бойынша есептелгенмен салыстырыңыз.

Шешімі:

Мінсіз газ жұмысы болжанып отырғандықтан, **мольдік құрам көлемдік** құраммен бірдей болады. 1.2-кестедегі пайызда көрсетілген көлемдік деректер 100% дейін толығымен жинақталмайды және тіркелмеген мәндер жанбайтын құрауыштарға сәйкес келеді деп болжанады.

LHV және HHV салынатын әрбір құрауыштың үлесі i 1.3-кестеде көрсетілгендей $y_i \cdot LHV$ және $y_i \cdot HHV$ түрінде беріледі, нәтижесінде $LHV = 35,290$ қДж / см³ және $HHV = 39,081$ қДж / см³ қоспасы алынады.

1.3-КЕСТЕ. Жылу шығару қабілетін есептеу жинағы

Құрауыш	% -тік көлемнен	Берілгені		Есептелгені		
	Моль %	LHV	HHV	$y_i \cdot LHV$	$y_i \cdot HHV$	Жану кезінде түзілетін H_2O
	100 y_i	қДж/см ³		қДж/см ³		см ³ /см ³ табиғи
CH_4	93	34,064	37,799	31,680	35,153	1.860
C_2H_6	3	61,220	66,853	1,837	2,006	0.090
C_3H_8	1	88,975	96,623	890	966	0.040
$n-C_4H_{10}$	0.5	116,134	125,722	581	629	0.025
$n-C_5H_{12}$	0.1	138,369	149,822	138	150	0.006
$n-C_6H_{14}$	0.1	164,595	177,652	165	178	0.007
$N_2 + CO_2$ + басқа жанбайтындар	2.3	—	—	0	0	—
Барлығы	100.0			35,290	39,081	2.028

Алдыңғы HHV мәнінен LHV есептеу үшін жанғыш заттардың толық тотығуы нәтижесінде пайда болған су мөлшері қажет, ал H_2O түзіліміне әрбір i құрауышының көлемді немесе молярлық үлесі y_i $m/2$ ретінде анықталады, мұндағы m – i құрауышындағы 1.3-кестенің соңғы бағанында келтірілген H атомдар саны, нәтижесінде $2,028 \text{ см}^3 H_2O$ жалпы мөлшері табиғи газдың стандартты текше метріне қалыптасады. Содан кейін су буының кестелерінен алынған 2464 кДж / кг ретінде H_2O жасырын жылуын (мысалы, Кинан және бірлескен авторлар, 1969 ж.) стандартты температурада 15°C пайдалана отырып табамыз, мұндағы мінсіз газдың молярлық көлемі $1 \text{ атм.қысымында } 23,64 \text{ см}^3 / \text{кмольді}$ құрайды:

$$LHV = HHV - \frac{2.028 \frac{\text{см}^3}{\text{см}^3}}{23.64 \frac{\text{см}^3}{\text{кмоль}}} * 2.464 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} * 18.015 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}} = 35.373 \text{ кДж/см}^3$$

Бұл мән 1.3-кестеде көрсетілген $35, 290 \text{ кДж / см}^3$ мәнімен жақсы салыстырылады.

1.1.1.2 Мұнай. Мұнай ресурстары түрлі дәрежеде әлемнің көптеген бөліктерінде кездессе де, негізгі коммерциялық құнды ресурстар салыстырмалы түрде осы отынның жер астында пайда болуы және сақталуы үшін тиісті геологиялық жағдайлар басым аз жерде орналасқан. Мұнайдың түзілуінің (латын тілінен алынған сөз: *petra* = тас, *oleum* = май) табиғатында биогенді болғаны кеңінен танылған, өйткені мұнай кендері көбіне миллиондаған жыл бұрын ғаламшардағы тіршілік гүлденген кезде орныққан шөгінді жыныстарда ғана табылады. Мұнай күкірттің, азоттың және металл органикалық қосылыстардың аз мөлшері бар әр түрлі көмірсутектердің қоспасы болып табылады. Мұнай өңдеу зауытында бензин, дизель отыны және мұнайдан реактивті қозғалтқыштар үшін алынатын отын сияқты әр түрлі құнды тауарлық сатылатын отын ағындарын өндіру үшін өңдеудің бірқатар кезеңдерімен жүргізіледі, бұл ретте өңдеудің негізгі сатысы айдау операциясы болып табылады.

Мұнай айдау операциясы жекелеген қосылыстарды бөлмейді, бірақ қоспалардан тұратын түрлі фракцияларды түзеді. Мысалы, мазутта әдетте 300-ге жуық жеке қосылыс бар. Шын мәнінде, мұнай, сондай-ақ мұнайдан алынған түрлі отын өнімдері химиялық құраммен емес, олардың қайнау температурасының қисығымен сипатталады. Бұл қисық белгілі көлемді (100 мл) үлгіні берілген жылдамдықпен қыздыру кезінде пайда болған буды жинау және конденсациялау құралдары бар дөңгелек колбаға орналастыру арқылы алынады. Конденсаттың бірінші тамшысы жиналған кездегі, сондай-ақ жиналған будың көлемі 5, 10, 15, 20 мл болғанда будың температурасы "қайнауың бастапқы нүктесі" деп жазылады, одан кейін әрбір келесі аралықта 10 мл-ден 80 мл-ге дейін әрі соңында әрбір кейінгі 5 мл сайын және "соңғы нүкте" деп жазылатын, булану бұдан былай болмайтын тест соңында жазылып отырады. Температура өссе, колбада қалған қалдық ыдырауы мүмкін екенін ескеріңіздер.

Мұнай өңдеу зауытында алынған мұнай атмосфералық қысым кезінде жұмыс істейтін дистилляциялық қондырғыда оны қайта өңдеу алдында тұздарды жуу үшін тұщыландырғышта өңделеді. Осы айдау қондырғысынан қалған қалдықтар неғұрлым төмен қайнау температурасы кезінде құнды құрауыштарды барынша алу үшін вакуумды айдау қондырғысына берілуі мүмкін. Сұйық отынның мына екі негізгі сыныбы мұнай өңдеу зауытында өндіріледі: дистилляттар мен қалдықтар. Дистилляттар мұнайды айдау операциясы нәтижесінде алынған толығымен буланған материалдан (кейіннен конденсацияланған) тұрады және таза болып табылады, құрамында тұнбасы жоқ, тұтқырлығы салыстырмалы түрде төмен және бейорганикалық күл болмайды. Бензин, керосин немесе реактивті қозғалтқыштарға арналған отын мен дизель отыны дистилляттар болып табылады. Қалдықтарда айдау үдерісінде буланбаған фракциялар және құрамында күлдің бейорганикалық құрауыштары болады (мұнайдан шыққан) және ауыр мұнай отыны сияқты жоғары тұтқырлығы бар. Бензиннің, керосиннің, дизель отыны мен мазуттың фракцияларына қосымша айдау арқылы бөлінген қайнау температурасы төмен басқа фракциялар мыналарды қамтиды:

Көмірсутектер қоспасы болып табылатын газ тәрізді ағын, негізінен тік тізбекті, көміртегі атомдарының орташа саны 4-ке жуық (молекуладағы C атомдарының саны) және

күкіртсізденуден кейін сұйытылған мұнай газы (ТМД) түрінде сатылады, бұған табиғи газды күкіртсіздендіруге ұқсас амин үдерісін пайдалана отырып қол жеткізуге болады.

Көмірсутектер қоспасы болып табылатын нафта, негізінен тік тізбекті 5-12 көмірсутектер атомы бар, ол құрылымын қайта құру жолымен октан санын арттыру үшін каталитикалық риформинг үдерісіне беріледі. Нафта алдымен күкірт қосылыстарынан H_2S түзумен гидротазартуға (жоғары қысым кезінде H_2 -мен каталитикалық әсер етеді) ұшырайды, одан кейін риформинг-қондырғыда катализаторды қорғауға арналған риформинг-үдеріске түсер алдында десульфурация жүргізіледі.

Сұйытылған мұнай газының, бензиннің, керосиннің, дизель отыны мен мазуттың фракциялары мұнай өңдеу зауытынан алып кетер алдында өнім талап етілетін ерекшеліктеріне сәйкес болуы үшін одан әрі өңдеуге ұшырайды, бұған күкіртті, азотты (жану үдерісі нәтижесінде пайда болатын олардың оксидтері ластаушы заттар болып табылады) және оттегіні алып тастау кіреді.

Өңдеудің бұл сатылары меркаптандарды органикалық дисульфидтерге дейін қышқылсыздандыру жолымен десульфурациялау үдерісіне көмектесетін Mercox қондырғысын; неғұрлым ауыр фракцияларды жеңілдеу және аса құнды өнімдерге айналдыру үшін сутекті пайдаланатын гидрокрекинг блогын; ауыр қалдық майларды термиялық крекинг жолымен оларды тұтқырлығы төмен жеңіл және аса құнды өнімдерге қайта өңдейтін висбрекинг қондырғысын; катализатор ретінде жоғары октанды құрауыштарды алу үшін H_2SO_4 немесе HCl пайдаланатын, бензин араластыруға қолайлы алкилдеу қондырғысын; олефинді бензиннің жоғары октандық саны бар құрауыштарға айналдыруға арналған димеризациялау қондырғысын; тікелей тізбекті молекулаларды бензин компоненттері ретінде қайта жарамды, тармақталған тізбектердің жоғары октанды саны бар молекулаларға айналдыруға арналған изомерлеу қондырғысы; қалдық өнім ретінде мұнай коксын құра отырып, қосымша бензин мен дизель отынын ала отырып, өте ауыр қалдық майларды өңдей алатын кокстеу қондырғысын қамтиды. Мұнай коксын өндіру үдерісінің тазалығына (яғни S және Va мен Ni сияқты металдардың құрамына) және түріне байланысты ол электродтарды дайындау үшін қолайлы құнды өнім болуы немесе көмір сияқты қатты отын ретінде пайдаланылуы мүмкін. Алайда коксты пайдаланатын қазандық түтін газдарын тазалаудың қолайлы үдерістерін орнату, сондай-ақ күлді экологиялық қауіпсіз тәсілмен кәдеге жарату арқылы оның қоспаларын есепке алатындай етіп жобалануы тиіс.

Мұнайдан алынған сұйық отын олардың қолжетімділігі мен қолайлылығының арқасында көлік қозғалтқыштары үшін (бензин, керосин және дизель отыны), сондай-ақ кейде стационарлық энергетикалық қондырғылар үшін де (мазут) көптеген елдерде энергияның негізгі көзіне айналды.

АҚШ энергетикалық ақпарат басқармасының (2014 ж.) мәліметінше, 2012 жылы қалған алынатын мұнай қорлары бойынша Сауд Арабиясы үшін ең жоғары 267 × 109 баррел, олардан кейін 211 × 109 баррельмен Венесуэла мен АҚШ тұр, ал дүние жүзі бойынша барлығы 1526 × 109 баррель (HNV 1 баррель 5,8 × 106 БТ немесе 6,1 ГДж тең) болды. Бұл сандарды келешекте елестету үшін 2012 жылы мұнай тұтыну деңгейі күніне 89 × 106 баррельді құрады.

Аса құнды өнімдер, сондай-ақ десульфурацияланған және денитрифицирленген өнімдер өндіруді барынша арттыру үшін бірқатар үдерістер мұнай айдау үдерісінен кейін жүзеге асырылады. Мысалы, күкіртсіздендіру, денитрификациялау және дезоксигенирлеу мақсатындағы гидротазалау үдерісі.

Каталитикалық риформинг – бұл әдетте төменгі октанды сандарға ие нафтаны жоғары октанды бензиннің (сонымен қатар газолин ретінде белгілі) құрамдас бөліктері болып табылатын риформаттар деп аталатын жоғары октанды сұйық өнімдерге айналдыру үшін пайдаланылатын химиялық үдеріс. Шын мәнінде, бұл үдеріс көмірсутекті молекулаларды нафта шикізатына қайта айналдырады немесе қайта құрылымдайды, сондай-ақ кейбір молекулаларды анағұрлым ұсақ молекулаларға бөледі. Жалпы алынатын тиімділік әсері – риформинг өнімі нафтаның бастапқы шикізатындағы көмірсутектеріне қарағанда жоғары октандық сандары бар күрделі молекулалық формадағы көмірсутектерден тұрады. Бұл ретте үдеріс сутегі атомдарын көмірсутекті молекулалардан бөледі және қазіргі заманғы мұнай өңдеу зауытында пайдаланылатын басқа да бірқатар үдерістерде пайдалану үшін жанама

газ тәрізді сутектің айтарлықтай мөлшерін өндіреді. Басқа жанама өнімдер – аз мөлшердегі метан, этан, пропан және бутан.

1.1.1.3 Көмір. Көмір қазба отындары түрлерінің арасындағы анағұрлым біртекті емесі болып табылады. Ол өсімдік тіршілігінен жер қыртысында басым болатын үлкен қысымдар мен температуралардың әсерінен иллиондаған жылдарды қамтитын уақыт шеңберіндегі ауасыздық жағдайында қалыптасқан. Көмірдің "органикалық бөлігінде" болатын негізгі элементтер сутегі, оттегі, азот және күкірттің аз мөлшерінен құралған көміртек болып табылады. Күкірт негізінен темір пириті түрінде, сондай-ақ "бейорганикалық бөлік" құрамында немесе алюминий, кремний, темір, сілтілі жер металдар мен сілтілердің қосылыстарын қамтитын көмірдегі күлдің құрамында болады. Көмір құрамында хлор, сынап және басқа да ұшқыш металдар бар. Көмірдің құрамы оның "элементтік құрамында" және оның "техникалық талдауында" көрсетіледі. Элементтік талдау көмірдің органикалық бөлігінің ылғалдың құрамымен (егер деректер ылғалды масса туралы болса), күлділікпен және күкірттің құрамымен бірге элементтік талдауын қамтамасыз етеді. Сондай-ақ күкірттің түрлерін, яғни көмірдің органикалық және бейорганикалық бөліктерінің бір бөлігі болып табылатын фракцияларды көрсетуге болады. Бейорганикалық бөлік сульфид түрінде ("пирит", өйткені ол әдетте FeS_2 түрінде болады) және сульфат түрінді қосымша бөлінуі мүмкін. Техникалық талдау "белгіленген көміртегінің", "ұшқыш заттардың", ылғал мен күлдің құрамын көрсетеді. Белгіленген көміртегі мен ұшқыш заттар бірге көмірдің органикалық бөлігін құрайды, ал ұшатын зат көмірдің O_2 жоқ кезінде бөлінетін фракция болып табылады, ал қалған қалдық көміртегі (бекітілген белгіленген көміртегі) және бейорганикалық құрамдастар болып табылады. Ұшқыш заттардың құрамы әдетте реакциялық қабілеті мен оңай тұтану көрсеткіші болып табылады және пеш конструкциясына әсер етеді, мысалы, ұшатын зат қайталама ауаның мөлшеріне және оның таралуына әсер ете отырып, жалынның ұзындығын арттырады.

Газдандыру жағдайында (9-тарауда сипатталғандай, жанғыш газдың пайда болуымен ішінара тотығу) неғұрлым жұмсақ температура кезінде ұшқыш заттардың құрамы гудрон, май және газ тәрізді қосылыстар сияқты шығатын органикалық құрауыштардың мөлшерін көрсетеді. Күлділік пешті немесе газ генераторды, ластануды бақылауға арналған жабдықтарды және күлді өңдеу жүйелерін жобалау кезінде де маңызды. Бұл сондай-ақ пештің немесе газ генераторының тиімділігіне әсер етеді. Ұшқыш заттарды жаңадан ұнтақталған көмірдің өлшенген үлгісін жабық отбақырға (тигель) орналастыра отырып және оны $900 \pm 15^\circ\text{C}$ жағдайында Американдық сынақтар және материалдар қоғамы (ASTM) белгілеген белгілі бір уақыт ішінде пешке қыздыра отырып анықтайды. Содан кейін ұшқыш заттар алдыңғы қыздыру үдерісінде өлшенген массаның жоғалуынан көмірдегі ылғалдың құрамын азайту жолымен есептеледі. Одан кейін күлділік отбақырда (тигель) қалатын қатты затты көміртектің толық жануына дейін (тұрақты салмақты алғанға дейін үлгіні бірнеше рет өлшеу жолымен) Бунзен жанарғысының үстінде қыздыру жолымен анықталуы мүмкін. Қалдық күл ретінде жазылады, ал белгіленген көміртегі айырмашылық болып шығады.

Көмір метаморфизм дәрежесі бойынша келесі төрт түрге жіктеледі:

1. Құрамында ұшқыш заттар аз және негізінен көміртектен (белгіленген көміртегі) тұратын антрацит көмірі.
2. Құрамында ұшқыш заттардың едәуір мөлшері бар тас көмір әдетте қызған кезде ісіну немесе басыла шөгу қасиеттерін көрсетеді.
3. Жартылай битуминозды көмір, ол неғұрлым жас көмір болып табылады, құрамында ұшқыш заттардың едәуір мөлшері, сондай-ақ өсімдіктің жасушалық құрылымының қалдықтарына байланысты ылғал ("оған тән" ылғал) болады.
4. Көмірдің ең жас түрі болып табылатын қоңыр көмір, яғни шымтезек мүгі көмір түрлерінің неғұрлым кең анықтамасына қосылмаған кезде онда ылғал мөлшері өте жоғары болады, бұл басқа көмір түрлеріне қарағанда әлдеқайда жылу шығару қабілетінің төмендеуіне әкеледі.

1.4-КЕСТЕ. Тас көмір мен қоңыр көмірдің құрамы (жұмыс массасында)

Көмірдің түрі	Тас көмі	Қоңыр көмір
Көмірдің атауы	Illinois No. 6	N. Dakota Beulah-Zap
Шахта	Old ben	Freedom
Техникалық талдау(%) ¹		
Ылғал	11.12	36.08
Күл	9.7	9.86
Ұшқыш заттар	34.99	26.52
Байланысқан көмір	44.19	27.54
Барлығы	100	100
Элементтік талдау(%)		
Көміртек	63.75	39.55
Сутек	4.5	2.74
Азот	1.25	0.63
Күкірт	2.51	0.63
Хлор	0.29	12 ppmw
Күл	9.7	9.86
Ылғал	11.12	36.08
Оттек	6.88	10.51
Барлығы	100	100
Жылу шығару қабілеті		
HHV (қДж/кг)	27,135	15,391
HHV (БТЕ/фунт)	11,666	6,617
LHV (қДж/кг)	26,172	14,803
LHV (БТЕ/фунт)	11,252	6,364
Микроэлемент(тер)		
Сынап (бөлш./млн.)	0.18	0.116

4-кестеде тас және қоңыр көмірдің құрамы мен жылу шығару қабілеті туралы мәліметтер берілген. Көріп отырғанымыздай, ылғал қоңыр көмірде әлдеқайда жоғары, ал оның жылу шығару қабілеті төмен. Көмір жоғары гетерогенді зат болып табылады және оның құрамы мен көмір үшін жылу шығару қабілетінің айтарлықтай өзгеруін күтуге болады.

Әлемде тұтынылатын барлық көмір дерлік қазандықтарда көмір жағу және **Ренкин бу циклы** арқылы электр энергиясын өндіру жолымен электр энергиясын өндіруге арналған, яғни 8-тарауда сипатталғандай турбинаны қоректендіру үшін жоғары қысымды бу шығарады. Көмір шектеулі дәрежеде газдандыру қондырғыларында, сондай-ақ синтез-газ ретінде белгілі газ өндіру үшін, 9-тарауда сипатталғандай, көмірді газдандыру арқылы (IGCC) құрастырылған циклдағы газ турбиналары негізіндегі отынды құрастырылған циклдар үшін пайдаланылады. Болашақта неғұрлым жетілдірілген газ турбиналарын шығарып және енгізудің арқасында көмір негізіндегі IGCC-дің қазандық энергетикалық қондырғылармен бәсекелесу үшін өзінің жоғары экологиялық сипаттамасына қосымша мықты экономикалық негізі болады деп күтілуде. Химиялық заттардың синтезі де жалғасуда, мұндай қондырғылардың көпшілігі Қытайда жасалады.

Көмір өндіру тәсілі көмір қабаттарының тереңдігі мен сапасына және жергілікті геологияға байланысты. Көмір жер бетінде немесе жер астында тереңдікке (жер бетінде өндіру әдетте тереңдігі 50 м дейін шектелген кезде жүргізіледі), көмір қабатының қалыңдығына және сорғының сипатына байланысты өндіріледі. "Қатардағы көмір" деп аталатын көмір оны өндіргеннен кейін әдетте кен өндіру үдерісінде қалуы мүмкін кез келген жыныстарды, сондай-ақ машина бөлшектерін немесе құралдарды бөлу және оның құнын арттыру мақсатында, бейорганикалық заттар қоспаларының (ілеспе пиритті күкірт бар күл) санын азайту үшін байыту фабрикасына жеткізіледі. Тазалау қазіргі уақытта тығыздық сияқты физикалық қасиеттердегі айырмашылықтарды пайдалана отырып, ластаушы заттарды физикалық (механикалық) бөлу арқылы жүзеге асырылады. Қоспалар жуылып

кететін химиялық тазалау, сондай-ақ бактериологиялық үдерістер (әсіресе күкіртті жою үшін) әзірлеу сатысында болады.

Физикалық тазалау кезінде көмір майдаланады және сұрыптау арқылы ірі және ұсақ фракцияларға бөлінеді, бұл ретте осылайша генерацияланатын ағындар жеке өңделеді. 12,5 мм үлкен көмірді гравитациялық бөлу әдісімен "ауыр ортада байытуға арналған ыдыстарда" тазалауға болады. Суда магнетиттің өлшенген ұсақ бөлшектерінен немесе ферросилицийден тұратын суспензия салыстырмалы салмағы бар орта құрайды, ол көмір бөлшектері сияқты тығыздығы төмен материалдарға жоғарыдан жүзуге және бөлуге, ал тығыздығы жоғары бейорганикалық материалдарға батуға мүмкіндік береді. Өлшемі 1-ден 12,5 мм-ге дейінгі көмір бөлшектері тығыздық негізінде бөлуді қайта туғызу үшін айналма қозғалыспен жасалатын ортадан тепкіш күш қолданылатын ауыр ортасы бар циклонда тазартылуы мүмкін. 150 мкм-ден 1 мм-ге дейінгі өлшем диапазонындағы бөлшектерді тығыздыққа қосымша кедергі сияқты гидродинамикалық қасиеттердегі айырмашылықты пайдаланатын спиральды сепараторда тазалауға болады. Өлшемі 150 мкм-ден кем бөлшектер флотацияда тазартылуы мүмкін, онда негізінен олардың сутепкіштігіндегі айырмашылық пайдаланылады, ол өз кезегінде беттік-белсенді заттар мен сулаушы агенттерді пайдалану есебінен күшейтіледі. Көмірдің бөлшектері агентке келтірілген ауа көпіршіктеріне жабысып, жер бетіне көтеріледі, сол арқылы бөліктеу үдерісін туғызады. Көбіктендіретін агентке (мысалы, алифаттық немесе хош иісті спирттер, қарапайым гликоль эфирлері) және флокулянтқа (мысалы, суда еритін полимер, анионды полиакриламид) қосымша коллекторлар, белсендеткіштер, депрессанттар, сондай-ақ рН бақылауға арналған реагенттер сияқты бөлуге ықпал ететін басқа химиялық заттар қосылады.

АҚШ-тың энергетикалық ақпарат жөніндегі басқармасының бағалауынша (2014), 2008 жылы қалдықпен шығарылатын көмір бойынша Құрама Штаттар үшін ең алғашқы болды – 236 × 109 тонна, ал Ресей бойынша – 157 × 109 тонна, ал әлемдік масштабта жалпы мөлшері 860 × 109 тоннаны құрады. 2011 жылы көмірді тұтынудың жылдық деңгейі 7,4 × 106 тоннаны құрады. Дегенмен әр аймақтан алынатын көмірдің энергия мөлшері әр түрлі болатынын ескеру керек. Бұл деректер ағымдағы тұтыну нормасы сақталса, көмір қорлары ұзақ уақыт сақталатынын көрсетеді, бірақ CO₂ шығарындыларының бақылаусыз қалуы және атмосферада жинақталуы қауіп туғызады.

1.2-мысал. Табиғи газда жұмыс істейтін құрастырылған цикл ретінде қондырғымен өндірілетін таза МВт электр энергиясына сүйене отырып, CO₂ шығарындыларының сол көлемін алу үшін параметрі шектен тыс **көмірді қолданып жұмыс істейтін қазандықтан талап** етілетін CO₂ (бұдан әрі секвестрлеу үшін түтін газдарынан бөлінген) ұстап қалу пайызын бағалаңыз (осы мысалда қарастырылатын CO₂ шығарындылары) айтарлықтай көлемді толық өмір циклы негізіндегі шығарындылары болып табылмайды, мысал үшін көмірді алсақ онда өндіруді, тазалауды және тасымалдауды қамтымайды). Келесі деректер көмір электр станциясы және табиғи газбен жұмыс істейтін қондырғы үшін қол жетімді (қыздыру жылдамдығы – бұл электр энергиясының бірлігін өндіру және кері пропорционалды тиімділікке қажетті отындағы энергия мөлшері екенін ескеріңіз). Қондырғының таза жылу қуаты CO₂ ұстап қалу пайызына және отынның екі түрінің толық жануына байланысты сызықты түрде өзгереді делік.

Көмір қазандығы:

Ұстап қалусыз нетто жылуының үлестік шығыны (HHV негізінде) CO₂ = 9165 кДж / кВт сағ

90% ұстап қалу кезіндегі нетто жылудың үлестік шығыны (HHV негізінде) CO₂ = 12 663 кДж / кВтсағ

Көмір: 1.4-кестеде келтірілген сипаттамалары бар № 6 Иллинойс тас көмірі.

Табиғи газбен жұмыс істейтін бу-газ қондырғысы:

Ұстап қалусыз нетто жылуының үлестік шығыны (LHV негізінде)

CO₂ = 5800 кДж / кВт.сағ

Табиғи газ: 1.1-мысалында есептелген сипаттамалары бар.

Шешуі:

Табиғи газдың толық жануы кезінде пайда болатын CO₂ мөлшері табиғи газдың үш кмоль CO₂/кмоль түрінде оның құрауыштарының әрқайсысынан құралатын жиынтықтау жолымен есептеледі, мұндағы үі – I түрінің мольдік үлесі, ал n – осы түрдегі атомның C саны. Бұл мәндер 1.5-кестеде жинақталған, ол 1,056 кмоль CO₂/кмоль табиғи газды түзеді.

Бұдан әрі табиғи газдағы LHV

$$= 35,290 \frac{\text{кДж}}{\text{см}^3} (\text{мысалынан 1.1}) = 35,290 \frac{\text{кДж}}{\text{см}^3} * 22,414 \frac{\text{Нм}^3}{\text{кмоль}} * (273,18 + 15)^\circ\text{K} \text{ см}^3 / (273,18 + 0)^\circ\text{K Нм}^3 = 834,422 \frac{\text{кДж}}{\text{Таб. газ кмоль}}$$

Одан кейін табиғи газды жаққан кезде CO₂ бөлініп шығады

$$1,056 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}} * 5,800 \frac{\text{кДж}}{\text{кВт. ч}} * 1,000 \frac{\text{кВт}}{\text{МВт}} / \left(834,422 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \right) = 0,007340 \frac{\text{кмоль}}{\text{МВт. ч}}$$

1.5-КЕСТЕ. Толық жанғанда пайда болатын CO₂ есептік саны

Құрауыш	Моль % жану кезінде пайда болатын CO ₂	
	100 үі	кмоль / табиғи газ кмоль
CH ₄	93	0.930
C ₂ H ₆	3	0.060
C ₃ H ₈	1	0.030
n-C ₄ H ₁₀	0.5	0.020
n-C ₅ H ₁₂	0.1	0.005
n-C ₆ H ₁₄	0.1	0.006
CO ₂	0.5	0.005
N ₂ + басқа жанбайтындар	1.8	0
Барлығы	100.0	1.056

Көмір толық жанған кезде пайда болатын CO₂ мөлшері көмірдегі көміртегі мөлшері бойынша есептеледі (0,6375 кг / кг көмір).

Көмір жанған кезде пайда болатын CO₂ = (0.6375 кг/кг/12.011 кг/кмоль) = 0.05308 кмоль/кг көмір.

Көмірді 0% пайыздық ұстап қалумен жағу кезінде шығарылатын CO₂ = 0.5308 кмоль/кг көмір × 9, 165 кДж/кВт с × 1.000 кВт/МВт/ (27, 135 кДж/кг) = 0.01793 кмоль/МВтч.

Көмірді 90% пайыздық ұстап қалумен жағу кезінде шығарылатын CO₂ = 0.05308 кмоль/ кг көмір × 12, 663 кДж/кВт с × 1.000 кВт/МВт/ (27,135 кДж/кг) × (1 – 0.9) = 0.00248 кмоль/МВтч.

Содан кейін көмір жағу кезінде бөлінетін CO₂ үшін осы екі мән арасындағы сызықтық интерполяция жолымен табиғи газда жұмыс істейтін қондырғыға арналған шығарынды алу үшін қайтадан толық тіршілік циклына негізделмеген көмір электр станциясына қажетті = 62% CO₂ ұстау қажет.

1.1.1.4 Жанатын тақтатастас (сланец). Жанатын тақтатастардағы органикалық қатты заттар кероген деп аталатын балауыз тәрізді материал болып табылады әрі ол мұнай, газ, су және кокс қалдықтарының кейбір мөлшерін қалыптастыра отырып, ауасыз реторттарда жынысты қыздыру жолымен өндіріледі. Керогеннің шығатын көзі табиғатта биогенді болып табылады, өйткені жанатын тақтатастың ең кең шоғыры бір кездері ірі болған кішкентай көлдер мен теңіздер миллиондаған жыл бұрын болған, субтропикалық және тоқырау жағдайлары балдырлардың, споралар мен тозаңның өсуіне және жиналуына ықпал еткен кезеңдерде кездеседі деген деректер бар. Жанатын тақтатаста азот мөлшері мұнайға қарағанда әдетте жоғары болады әрі егер оны реактивті қозғалтқыштарға арналған бензин

немесе отын сияқты жанғыш тақтатастан алынған отында қалдырса, бұл NO және NO₂ (бірге NO_x ретінде белгіленетін) елеулі шығарындылардың пайда болуына алып келеді. Жанғыш тақтатастан алынған тауарлық отын өндіру мұнай шикізатының көптеген түрлеріне қарағанда кеңірек өңдеуді талап етеді. Құрама Штаттарда Колорадо мен Юттада шоғырланған жанар тақтатастың едәуір қоры бар, одан кейінгі сатыда Ресей мен Бразилия тұрады.

1.1.2 Ядролық отын.

Ядролық энергиядан коммерциялық энергия өндіру ядролық бөліну реакцияларының көмегімен затты энергияға түрлендіруді қамтиды. Бұл реакциялар бөлінетін изотоптардың ядроларымен нейтронды басып алу арқылы жүреді. Қазіргі заманғы коммерциялық ядролық реакторларда жалпы алғанда 235 нейтрон мен протон бар уран изотопынан бөлінетін U-235 пайдаланылады. Қазіргі заманғы реакторлардың көпшілігі құрамында 3,5-тен 5%-ға дейінгі U-235 бар отынды талап етеді, ал табиғи уран (кеңде оксид нысанында болатын) құрамында тек 0,1% уран болуы мүмкін (негізінен бөлінбейтін U-238 нысанында) және оның тек 0,7% ғана бөлінетін болуы ықтимал. Осылайша, ядролық реакторлар үшін қолайлы отын дайындаудың бастапқы сатысы әдетте 80% уранды құрайтын уранның концентрацияланған түрін алудан тұрады. Осы концентрациялау үдерісінің қалдықтары төмен концентрациялардағы тіршілік мерзімі ұзақ радиоактивті материалдар мен ауыр металдар сияқты уытты материалдарды қамтиды және қоршаған ортадан оқшаулануы тиіс. Ядролық "жылу бөлетін элементтерді" өндіру үшін, 12-тарауда көрсетілгендей, бірқатар басқа технологиялық кезеңдер талап етіледі.

Негізгі қиындықтар реактордан қоршаған ортаға радиоактивті материалдарды кездейсоқ шығару тұрғысынан ядролық энергия өндірісінің қауіпсіздігі, сондай-ақ ядролық қалдықтармен қауіпсіз жұмыс істеу және оларды кәдеге жарату болды. Бұл мәселелер көптеген елдерде ядролық энергияны кеңінен пайдалануға кедергі келтіреді. Алайда Франциядағы жағдай ерекше, онда электр энергиясының көп бөлігі ядролық бөліну нәтижесінде өндіріледі.

Атом энергиясын өндіру толық өмір циклының негізіндегі қазба отыннан энергия өндірумен салыстырғанда көміртек ізі едәуір аз, бұл ядролық энергетикалық қондырғылардағы алдында болған апаттардан алынған сабақтар негізінде конструкцияны бір мезгілде жақсартқан кезде бірқатар елдерде ядролық энергетикалық қондырғылар құрылысына деген қызығушылықтың жаңғыруына алып келді.

Экономикалық ынтымақтастық және даму ұйымы (ЭЫДҰ) мен Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің (Уран, 2011 ж.: ресурстар, өндіріс және сұраныс, 2012 ж.) есебі алынатын уран кенінің қалдық бағалауын көрсетеді, егер оның бағасы килограммға 130 АҚШ долларынан төмен болса, Австралия үшін ең жоғары – 1 661 000 тонна, одан кейін Қазақстан үшін 629 000 тонна болып табылады, ал әлемдік масштабтағы жалпы сома 5 327 200 тоннаны құрайды. Ағымдағы тұтыну деңгейінде жалпы қор тағы 100 жылға жетеді.

1.1.3. Қайта жаңартылатын энергия ресурстары

1.1.3.1 Биомасса және муниципалды қатты қалдықтар (қоқыстар). Барлық тірі өсімдік заттары, сондай-ақ өсімдіктерден, адамдардан, жануарлардан және теңіз тіршілігінен алынған органикалық қалдықтар энергия көздері болып табылады, оларды дұрыс басқарған және пайдаланған жағдайда, біздің шектеулі органикалық қазба энергия көздері мен ядролық отынды сақтауға елеулі үлес қосуға болады әрі оның жылыжайлық газдардың жаһандық шығарындыларына әсер етуі одан да маңыздырақ болып саналады.

Биомассаның нақты мысалдары энергетикалық дақылдар ретінде жинау үшін арнайы өсірілетін ауыл шаруашылығы қалдықтары, ағаштар мен шөптер, орман қалдықтары, қалалық ағаш қалдықтары мен диірмендердің қалдықтары, қағаз өнеркәсібінің қалдықтары, сарқынды сулар мен мал шаруашылығы қалдықтары болып табылады. Бұл қалдықтар немесе қоқыстар, сондай-ақ қатты тұрмыстық қалдықтар көп жағдайларда елеулі энергия мөлшері бар бола тұрып, кәдеге жарату мәселесін тудырады. Энергия көзі ретінде өсімдік биомассасын пайдалану үшін негізгі қозғаушы күш оның CO₂-нің бейтарап деңгейі болып табылады. CO₂-нің толық бейтараптылығы CO₂ шығарындысының жылдамдығын дәл теңестіретін биомассаның өсу жылдамдығына әкеледі, бірақ тыңайтқыштар синтезі үшін

пайдаланылатын кез келген қазба отынмен байланысты CO_2 шығарындылары және биомассаны өсіру үшін қажетті басқа да ауыл шаруашылығы химикаттары, сондай-ақ жинау және басқа да кептіру мен биомассаны тасымалдау жағдайы назарға алынуы тиіс. Фотосинтез жолымен биомассаның өсуі күн энергиясына негізделген CO_2 -нің табиғи жұтқышы болып табылады, алайда энергетикалық дақылдарды қарау кезінде өсу мен пайдаланудың салыстырмалы уақыт ауқымын ескеру қажет. Мысалы, қураған ағаштарды отын ретінде дайындау энергия ретінде пайдалану үшін қаралмауы тиіс, ал тез өсетін отын дақылдары, ауыл шаруашылығы қалдықтары мен ағаш қалдықтары бұл мақсатта қаралу керек. Ауыл шаруашылығы қалдықтары тауарлық дақылдарды жинаудың әрбір циклынан кейін қалыптасады және қалған сабақтар мен биомассаның бір бөлігі жинауға болатын жерде қалады.

Бидай мен жүгері сабанының қалдықтары өсімдік қалдықтарының көп бөлігін құрайды, бірақ топырақты қайта жырту кезінде олардың тыңайтқыш ретінде құндылығы назарға алынуы тиіс. Тек энергия өндіру мақсаты үшін ғана өсірілетін немесе бірінші кезекте энергия өндіру үдерістерінде шикізат ретінде пайдалану үшін өндірілетін энергетикалық дақылдарға гибриді терек, гибриді тал және шыбық тәрізді тары кіреді, бірақ оны тамақ өнімдерін өндірумен бәсекелеспей, жерде өсіру керек. Энергетикалық дақылдарды өсірудің назарға алынуы тиіс әлеуетті экологиялық проблемалары бірнеше дақылдардың циклы үшін өсімдіктердің бір ғана түрін өсіру, сондай-ақ экожүйелердің тыңайтқыштармен ластануынан биологиялық алуандықтың жоғалуы болып табылады.

Орман қалдықтарына сүрек үшін дайындалған ормандарда қалатын биомассаның материалы кіреді. Сүрек дайындау жөніндегі операциялар биомассадан барлық материалды алуға мүмкіндік бермейді, өйткені тек белгілі бір сападағы ағаш материалдарын ғана қайта өңдеу кәсіпорындарында пайдалануға болады және осылайша, сүрек дайындағаннан кейінгі қалдық материалдың едәуір мөлшері энергия өндіру мақсаттары үшін қолжетімді болуы ықтимал. Бұл орман қалдықтары ағаш кесу қалдықтарынан, қатты, шіріген, өлі сүректі және артық шағын ағаштардан тұрады. Қалалық ағаш қалдықтары мен диірмендердің қалдықтары өндірістік операциялардан қалған ағаш қалдықтарын қамтиды, пайдаланылмаған жағдайда диірмен қалдықтары, тұғырлар, құрылыс қалдықтары мен құрылыс қоқыстары сияқты қалдықтар көмілетін еді.

Қағаз өнеркәсібінде сүректі немесе басқа целлюлоза шикізатын байланыстырушы заттардан (лигниндерден, шайырлардан) сүректің целлюлоза талшықтарын бөліп алу үшін жоғары температура мен қысым кезінде сілтілі химикаттармен өңдейді, ал пайдаланылған (қара) сілтілер арнайы содорегенерациялық қазандықтарда $\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ қосу арқылы, сонымен бірге оның энергетикалық құндылығын қалпына келтіре отырып регенерацияланады. Қара сілтіні газдандыру тағы бір қарастырылатын нұсқа болып табылады. Қағаз өңдеу өнеркәсібінде макулатураны алады және сия бөлшектері мен дайын қағаз өнімге айналдыру үшін тым қысқа талшықтардың бөлшектері бар шлам түзетін талшықты өңдеу алдында сияны алып тастайды. Бұл қалдықтар ағыны да энергияны қалпына келтіру үшін пайдаланылуы мүмкін.

Биомассаны **арнайы дайындалған қазандықтарда** өртеуге немесе ішкі жану қозғалтқыштарында, не отын элементтерінде энергия өндіру үшін пайдалануға болатын газ алу үшін газдандыруға болады. Биомассаны ірі энергетикалық қондырғыларда көмірмен бірге пайдалану ауқымдылық әсерін іске асыруда үлкен қызығушылық тудырады. Алайда қатты тұрмыстық қалдықтар, өңделген сүрек пен пластмассалар, әсіресе құрамында хлор бар қалдық ағындарын жағу кезінде диоксиндер мен фурандар (бұдан әрі осы тарауда сипатталған) сияқты уыттылығы жоғары лаастағыштар түзілуі мүмкін және осы шығарындыларды шектеу үшін тиісті жобалық шараларды қабылдау керек.

Биомасса жаңартылатын энергия көзі ретінде 2008 жылы әлемде бастапқы энергияның жалпы көлемінің шамамен 50 ЭДж / жыл немесе 10%-ын қамтамасыз етті, ал 2009 жылы АҚШ-та осы энергия түрі энергияны жалпы тұтынудың кемінде 4%-ын құрады. 2050 жылға қарай биомассадан алынатын энергияның техникалық әлеуеті жылына 500 ЭДж (Эденхофер және бірлескен авторлар, 2011ж.) жетуі мүмкін. 1.10-кестеде көмірге арналған

³ Химиялық өңделген құрылыс қалдықтары жану кезінде лаастаушы заттардың пайда болуына әкелуі мүмкін, бұл ретте олардың көзі өңдеуге арналған химикаттар болып табылады әрі қондырғы сұлбасына ластануға қарсы күрес жөніндегі тиісті шаралар енгізілуі тиіс.

деректермен қатар, ағаш биомассасы мен шыбық тәрізді кептірілген тарының құрамы мен жылу шығару қабілеті туралы мәліметтер келтірілген. Көрініп тұрғандай, биомассаның жылу шығару қабілеті көмірден анағұрлым төмен.

1.6-КЕСТЕ. Биомассаның көмірмен салыстырғандағы сипаттамасы

Негізі	Сүрек биомассасы		Тары		Тас көмір	
	Құрғақ	Алған кезде	Құрғақ	Алған кезде	Құрғақ	Алған кезде
Элементтік талдау (%)						
Көміртегі	52.36	26.18	42.60	36.21	71.72	63.75
Сүтегі	5.60	2.80	6.55	5.57	5.06	4.5
Азот	0.37	0.19	1.31	1.11	1.41	1.25
Күкірт	0.03	0.02	0.01	0.01	2.82	2.51
Хлор	0.10	0.05	0.04	0.03	0.33	0.29
Күл	1.38	0.69	7.41	6.30	10.91	9.7
Ылғал	0.00	50.00	0.00	15.00 ^a	0	11.12
Оттегі	40.16	20.08	42.08	35.77	7.75	6.88
Барлығы	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Жылу шығару қабілеті						
HHV	19,627	9,813	18,113	15,396	30,531	27,135
HHV	8,438	4,219	7,787	6,619	13,126	11,666
LHV	18,464	9,232	16,659	14,161	29,568	26,172
LHV	7,938	3,969	7,162	6,088	12,712	11,252
(БТЕ/фунт)						

^aДалада кептірілген.

Егер биомасса тары секілді далада кептірілген болмаса, биомассадағы ылғал мөлшері әдетте тас көмірге қарағанда әлдеқайда жоғары болады.

1.3-мысал. Сүрек биомассасын алу кезінде оны кептіруге қажетті эквивалентті жылу энергиясын 1.6-кестеде көрсетілген сипаттамалармен алынған кездегі тас көмірге арналған ылғал мөлшеріне дейін, биомассадаан HHV-дан пайызбен көрсетіңіз. Сонымен, биомассадағы кептіру операциясы үшін талап етілетін эквивалентті энергия 2400 кДж / кг буланған суды құрайды (бумен қыздыратын кептіргішке баламалы жылу энергиясына түрлендірілген кептіру операцияларында пайдаланылатын электр энергиясы кіреді деп болжанады) деп алайық.

Шешуі:

Биомассаның алған кездегі ылғалдылығы = 50%. Биомассаның кептіргеннен кейінгі ылғалдылығы = 11,12%.

Жойылатын ылғал = $0.5 - (0.1112/1 - 0.1112) \times (1 - 0.5) = 0.4374$ кг H₂O/ кг алынған биомассаға шақтап есептегенде 0.4374 кг H₂O/ кг.

Кептіруге арналған отынның жиынтық эквиваленті = 0.4374 кг H₂O/кг алу кезіндегі биомассаға есептегенде) (2400 кДж/кг H₂O) = 1050 кДж / кг алу кезіндегі биомассаға есептегенде 1050 кДж / кг.

Биомассаның HHV = 27,135 кДж/кг алынған түрінде 27,135 кДж/кг.

Биомассадағы кептіруге арналған отынның HHV-дан пайызы ретіндегі жиынтық эквиваленті = $(1,050 \text{ кДж/кг} / 27,135 \text{ кДж/кг}) \times 100\% = 3.87\%$.

1.1.3.2. Гидроэлектр энергиясы. Бұл – жаңартылатын энергия көздерінің ең кең қолданылатын түрі, ол 2008 жылы электр энергиясын әлемдік тұтыну көлемінің 16%-дан астамын құрады, ал жалпы ресурстық әлеует 14,576 ТВтч / жылына (Эденхофер және бірлескен автор, 2011ж.) құрайды. 2009 жылы ол АҚШ-тағы жалпы энергия тұтынудың 2,7% құраған. Бұл энергия көзі қазіргі уақытта тиімді электр генераторлары мен жеткізу технологиясын әзірлеудің арқасында маңызды ресурсқа айналды, олар алыс орналасқан гидроэнергетикалық қондырғылардан электр энергиясын бірнеше жүз миль аралықтағы жерде орналасқан энергия тұтынушыларға дейін үлкен қашықтыққа жеткізуге мүмкіндік береді.

Ағынды судан алынатын энергия су ағынының көлемі мен гидростатикалық арынға байланысты, бұл жерде арын суды бөгет жасаған резервуардан гидравликалық турбинаға ағызуға болатын биіктік болып табылады. Осылайша, мұндай гидроэнергетикалық қондырғылар үшін су жинау және су қоймалары бөгеттерінің құрылысы тиісті топографияны және жергілікті жердегі басқа да жағдайларды, сондай-ақ өзендегі су деңгейінің күрт төмендеуін талап етеді. Бөгет салу кезіндегі жобалар жергілікті халыққа, сондай-ақ флора мен фаунаға деген ықпалды барынша азайту үшін тиісті түрде жоспарланбаса, жердің үлкен аумақтарын су басу жағдайының экологиялық әсері жойқын зардаптарға әкеп соғуы мүмкін. Гидроэнергетикалық қондырғылар күрделі қаражат салуды қажет етеді, бірақ пайдалану шығындары төмен болады, өйткені мұндай қондырғыларда отын шығындары жоқ.

1.1.3.3 Күн энергиясы. Жердің сыртқы атмосферасына жеткен күн энергиясының шамамен жартысы жер бетіне жетеді, ал қалған бөлігі атмосферада жұтылған фракция мен кері ғарышқа шағылысқан фракциядан тұрады. Жер бетіне жеткен энергияның бір бөлігі химиялық байланыс энергиясы түрінде биомассаға, жел мен толқындарға кинетикалық энергия түрінде, потенциалды энергия ретінде өзендерге және жылу градиенттерін жасау үшін мұхиттарға түседі. Олардың барлығы жаңартылатын энергия көздері болып табылады, бірақ соңғы уақытта күн энергиясын жылыту үшін және электр энергиясына тікелей күн фотоэлектрлік элементтердің көмегімен айналдыру мен 12-тарауда сипатталған жылу қозғалтқыштарын пайдалану арқылы Карно циклы арқылы түрлендіру үшін тікелей пайдалану жиі қолданылуда.

Күн энергиясынан электр энергиясын өндіру әлеуеті өте зор, бағалаулар бойынша – жылына 1580-нен 49 800 ЭДж-ге дейін, бұл 2008 жылы әлемде алғашқы энергияны тұтынудан шамамен 3-100 есе артық (Эденхофер және бірлескен авторлар, 2011 ж.), ал 2009 жылы АҚШ-та жалпы энергия тұтыну көлемінің 0,1%-ын құраған.

1.1.3.4 Жел энергиясы. Жер бетіндегі ауа қозғалысы болып табылатын жел қысымның ауытқуынан туындайды. Бұл Жер бетін Күннің біркелкі қыздырмауына байланысты. Күннің қызуы (i) ендікке байланысты, өйткені күн сәулесінің құлау бұрышы да осыған байланысты, сондай-ақ (ii) шағылысу қабілеті мен сіңіру қабілеті (мысалы, ол мұхитпен немесе құрлықпен жабылған ба және онда өсімдіктер бар ма) сияқты жер бетінің қасиеттеріне және, сөзсіз, (iii) тәулік уақытына байланысты. Желдің жер бетінде бөлінуі біркелкі емес; жел ресурстары тропикалық аймақтарға қарағанда полярлы және орташа аймақтарда жоғары, сондай-ақ жағалау аудандарында ішкі аймақтан гөрі жоғары болады. Сонымен қатар жердің айналуынан туындаған атмосфераның тежелуі жер бетіндегі желдің өзгеру сипатының негізі – турбуленттілікке әкеледі.

Қазіргі уақытта қол жетімді жел энергетикалық ресурсының шағын бөлігі ғана қолданылады. Жел энергиясы. 12-тарауда сипатталғандай, электр генераторларына қосылған "жел диірмендері" деп аталатын пропеллерлер түріндегі айналмалы машиналарды орнату арқылы қолданылады. Қазіргі кезде жел тек белгілі бір жылдамдық диапазоңдарында ғана пайдаланылуы мүмкін. Жел энергетикалық турбиналары үйкелуге кететін шығындарға байланысты әдетте жел жылдамдығымен жұмыс істемейді, ол шамамен 16 км/сағаттан аз, ал жел турбиналарының роторлары әдетте дауыл сияқты желдің өте жоғары жылдамдығы кезінде зақымданудың алдын алу үшін бір-бірімен жалғанады (қалақтар қадамының өзгеруіне есептелген).

Желден электр энергиясын өндірудің жаһандық әлеуеті өте үлкен, талдаулар бойынша, ол құрғақ жер бетіндегі қондырғылар үшін 70 ЭДж / жылына (19 400 ТВтч / жыл)

бастап, жер бетіндегі және жағалау маңындағы қондырғылар үшін 450 ЭДж / жыл (125 000 ТВтч / жыл) дейін, ал терең емес теңіз қондырғылары үшін, егер тек салыстырмалы ұсақ және жағалаудағы қолдануды қарастырса, жылына 130 ЭДж / жыл (4000-нан 37 000 ТВтч / жыл) дейін ауытқиды. Алайда жел энергиясы 2009 жылы Құрама Штаттардағы жалпы энергия тұтынудың небары 0,72%-ын құрады.

1.1.3.5 Геотермальді энергия. Геотермальді энергия – бұл жер қыртысында сақталатын жылу энергиясы. Жер ядросы элементтердің біртіндеп радиоактивті ыдырауы нәтижесінде бөлінетін жылудан 5000°C асатын температураны ұстап тұрады. Бұрынырақ жылу ғаламшардың қалыптасуынан қалған деген қате пікір болды, бірақ есептеулер ондай жағдайда Жер ядросы әлдеқашан суып қалатынын көрсетті. Ядроның ішіндегі жылу жер қабығының астында балқытылған мантияның конвективті тасымалдануы және өткізуі арқылы жер бетіне үздіксіз беріледі. Ең күшті жылу қарқындылығы тектоникалық плитаның шекарасында өтеді. Жанартау белсенділігі ыстық материалды беткі қабатқа апарады, бірақ іс жүзінде жер бетіне балқытылған жыныстың аз ғана бөлігі жетеді, ал оның көп бөлігі жер астында 5-20 шақырым тереңдікте қалады. Содан кейін жылу жер асты суларымен гидрологиялық конвекция арқылы жер бетіне беріледі, мысалы, ыстық су көздері және гейзерлер арқылы. Өткен ғасырдың басына дейін геотермальді жылуды пайдалану жылы суды пайдаланумен шектелді, олардың ертедегі мысалы ретінде Англиядағы Рим моншаларын келтіруге болады. Сонымен қатар геотермальді ыстық көздер бүкіл әлемде терапиялық емдеу әдісі ретінде кеңінен қолданыла бастады. Геотермальді энергия энергетикалық және бейэнергетикалық қолдануларда бертін ғана кеңінен пайдаланыла бастады. Өдетте электр энергиясын өндіруге арналған пайдалы геотермальді жылу 150-ден 200°C дейінгі диапазондағы температурамен ыстық тұзды су түрінде қолжетімді, ол туралы 12-тарауда толығырақ талқыланады.

Неғұрлым қолайлы жоғары температуралы геотермальді энергиядан электр энергиясын өндіру үшін әлемдік әлеует жылына 33 600 Твтс, ал төмен температурадағы геотермальді энергия көмегімен жылыту үшін жылына 1400 Твтс-тан астамды құрайды, ал оның үлесіне 2009 жылы АҚШ-тағы жалпы энергия тұтынудың 0,2%-ы ғана кіреді.

1.2 ЭНЕРГИЯ ЖӘНЕ ҚОРШАҒАН ОРТА

Өнеркәсібі дамыған қоғамда адам қатысатын әр салада энергия қолданылады, мысалы, көлік (автомобильдер, автобустар, жүк машиналары, поездар, ұшақтар, зымырандар), үй шаруашылығы (тамақ дайындау, ыстық су, ауа кондиционерлеу), ауыл шаруашылығы (тыңайтқыштар өндіру, су айдау) және өндіріс (жылыту, электр).

Осылайша, біз энергияны тасымалдау және тұрмыста пайдалану кезінде тікелей, сондай-ақ өндіріс барысында энергияны талап ететін тауарларды тұтыну кезінде жанама тұтынамыз. Энергияны пайдалану қоғамның экономикалық әл-ауқатының тікелей көрсеткіші болуы мүмкін, өйткені ол біздің өмірімізде маңызды рөл атқарады. Жан басына шаққандағы энергияны тұтыну елдің жан басына шаққандағы жалпы ұлттық өніммен жиі байланыстырылады (корреляцияланады) әрі бірнеше елге арналған деректерге негізделген тренд желісі, шын мәнінде, түзу сызықты көрсетеді. Нақтырақ айтқанда, бұл корреляцияны осы елде энергияны пайдаланудың тиімділігі, сондай-ақ оның климаттық жағдайлары мен экономиканың түрі сияқты басқа да факторларды ескере отырып түзету керек. Яғни онда қызмет көрсету экономикасы, ауыл шаруашылығы немесе өнеркәсіп өндірісі басым болатындығын ескерген жөн. Нақты елде қолданылатын немесе енгізілетін жаппай көлік және климаттың қатаңдығы, яғни жылыту және / немесе суыту қажеттілігі сияқты энергия үнемдеу іс-шаралары энергияны пайдалануға әсер етуі мүмкін. Кез келген жағдайда біздің планетамыз өзін қамтамасыз ете алуы үшін дамушы және дамыған әрбір елдің мақсаты энергияны пайдалану трендінің көлбеу сызығын азайту мақсатында энергия үнемдеу тәжірибесі болуы тиіс.

Келесі екі онжылдықта энергияны тұтынудың бүкіл әлемде айтарлықтай өсуі күтілуде, ең жоғары өсу қарқыны Азияда болмақ. Болжамдарға сәйкес, энергияны әлемдік тұтыну 2020 жылы шамамен 20%-ға, ал 2040 жылға қарай 2010 жылдың мәндерімен салыстырғанда 60%-

ға ұлғаяды. Энергияға деген осы сұраныстың 85%-дан астамға ұлғаюы күшті экономикалық өсу және тұрғындардың өсімі арқылы қозғалысқа түсетін дамушы елдерге байланысты (АҚШ энергетикалық ақпарат басқармасы, 2013ж.). Болжам бойынша қазба отыны (сұйық отын, табиғи газ және көмір) әлемдік энергияның көп бөлігін қамтамасыз етеді, бұл 2040 жылы әлемдегі энергияны жалпы тұтыну көлемінің төрттен үшін құрайды.

2040 жылға қарай мұнайды және отынның басқа да сұйық түрлерін әлемдік пайдалану 2010 жылдың мөндерімен салыстырғанда 30%-ға артады деп күтілуде. Табиғи газды жалпы әлемдік тұтыну 2040 жылға қарай табиғи газды, әсіресе тақтатас қабаттарынан алудың ұлғаюына байланысты 2010 жылдың мөндерімен салыстырғанда 60%-ға асады деп күтілуде. Көмір әлемдік энергетикалық нарықтарда, әсіресе Азияның дамушы елдерінде маңызды рөл атқаруды жалғастырады, онда көмірді әлемдік тұтыну 2010 жылғы мөндермен салыстырғанда 2040 жылға қарай 50 %-ға өседі деп болжануда. Бүкіл әлемде қазба отынды пайдаланудың едәуір ұлғаюынан атмосфераға жылыжайлық газдардың шығарындылары 2010-2040 жылдары орта есеппен 1,3%-ға немесе 2010 жылғы деңгеймен салыстырғанда 2040 жылға қарай 46%-ға ұлғаяды деп күтілуде. Осы жылыжайлық газға қосымша отындағы энергияны жағу арқылы пайдалану атмосфераға енгізілетін күкірт оксидтері, азот оксидтері және жанбаған көмірсутектер сияқты ластаушы заттардың пайда болуына әкеледі, мұның өзінде оның мөлшері қоршаған ортаның ластануын болдырмау жөніндегі біріккен шаралар дәрежесіне байланысты. Сонымен, егер энергия тұтынуды тұрақты басқару жүзеге асырылмаса, өмір сүру деңгейін арттыру (жан басына шаққандағы жалпы ұлттық өнім бірліктерінде өлшенетін) мен қоршаған ортаға тікелей әсер етуі мүмкін жан басына шаққанда энергияны тұтыну арасында шиеленіс туындайды.

1.2.1 Шектеулі рұқсат етілген құрам және басқа да белгілі шекке дейін рұқсат етілген құрамы белгіленген ластаушы заттар

АҚШ қоршаған ортаны қорғау агенттігі (US EPA) анықтаған шекте рұқсат етілген құрамы белгіленген ластаушы заттар CO, SO₂ мен SO₃, NO және NO₂, O₃, Pb әрі қатты бөлшектерден (ҚБ) тұрады.

Бұл ластағыштар әдетте Құрама Штаттардың барлық аумағында кездеседі, демек ауа сапасының көрсеткіштері ретінде қарастырылуы мүмкін.

1.2.1.1 Көміртегі тотығы және органикалық қосылыстар. СО органикалық қосылыстардан тұратын зиянды ластағыштардың басқа жиынтығымен қатар көміртекті отынның дұрыс жанбауынан пайда болады және ол жоғары температураларда болудың жеткілікті уақытын қамтамасыз ете отырып, отынның тотықтырғышпен (ауамен) жақсы араласуы арқылы (турбуленттік) жану үдерісін әзірлеу жолымен барынша азайтылуы мүмкін. Бұдан әрі табиғи газды жағу кезінде СО түзілу механизмі сипатталады.

CH₄ молекуласы өте тұрақты және жоғары энергия атомдарының жану үдерісін таратуда маңызды рөл атқаратын CH₃ радикалын құра отырып, h атомын ыдыратуды қажет етеді. Бұл үдеріс CH₄ ішінара тотығуын, СО және ол реакцияларының тотығуын қамтиды. СО түзілуі бірнеше сатыны қамтиды, бірақ жылдам ортақ реакция болып табылады, СО₂-де тотығу өте баяу, нәтижесінде поршень қозғалтқышы болу ұзақтығының аздығына байланысты СО елеулі мөлшерін шығарады. Алайда жану камерасында газ турбинасында болу уақыты көбірек, ал СО шығарындылары айтарлықтай төмен. Жоғары температуралар мен О₂ концентрациясы және болу уақыты жану үдерісінде пайда болатын радикалды реакцияны қамтитын СО тотығуы үшін қажет. СО жоғары эмиссиясы тек ластануды ғана емес, сонымен қатар қондырғының жалпы тиімділігін де білдіреді.

Жану үдерісінен кейінгі бақылау СО тотығуын, сондай-ақ бағалы металдан жасалған катализатордың қатысуымен ұшқыш органикалық қосылыстарды (ҰОҚ) қамтуы мүмкін. Адам денсаулығына СО әсер етуінің зиянды салдарларына жүрек және ми сияқты органдарға, сондай-ақ тіндерге О₂ түсуінің төмендеуі кіреді, ал СО өте жоғары деңгейі өлімге әкелуі мүмкін. ҰОҚ тыныс алу жолдары мен көздің күшті тітіркендіргіштері болып табылатын пероксиацилнитраттар (ПАН) сияқты бірқатар қайталама ластағыштардың түзілуіне жауапты. Олар сондай-ақ тропосфералық О₃ көп бөлігінің пайда болуына жауапты, мысалы, тікелей шығарындылар мен NO шоғырлануы төмен болуы мүмкін аз ластанған ауылдық аудандарда.

Отын түріне (ондағы Cl құрамына) байланысты бөлінетін уытты органикалық қосылыстардың басқа жиынтығы диоксиндер мен фурандар ретінде белгілі қосылыстар тобына жатады және осы қосылыстардың барлығы арасында 2,3,7,8-тетрахлородибензо-п-диоксин (2,3,7,8 ТХДД) ең уытты болып саналады. Бұл қосылыстар ағзаға ауа мен су арқылы, бірақ негізінен тамақ арқылы еніп, майлы ұлпаларда жиналуы мүмкін. АҚШ-тың қоршаған ортаны қорғау басқармасы 2,3,7,8 ТХДД адам үшін канцерогендік зат болуы мүмкін деп мәлімдеді. Сонымен қатар диоксиндер мен фурандардың әсері гормондардың деңгейін өзгертеді, ал диоксиндердің жоғары дозалары хлоракне деп аталатын тері ауруын тудырады. Жануарларға жүргізілген зерттеулер диоксиндер мен фурандардың әсерінен олардың гормондық жүйесі мен ұрықтың дамуы өзгертетінін, ұрпақ жалғастыру қабілетінің төмендеуі мен иммундық жүйенің нашарлауын көрсетті. Жану үдерісінен кейін бұл қосылыстардың пайда болуы түтін газдарын тез салқындату арқылы және олардың келесі жабдықта пайда болуына ықпал ететін немесе катализдейтін белгілі бір металдарды пайдалануды шектеу арқылы барынша азайтылуы мүмкін.

1.2.1.2 Күкірт тотықтары. Күкірті бар отынның жану үдерісі кезінде шығарылатын күкірт оксидінің 90%-ға жуығы SO_2 түрінде, ал қалған бөлігі SO_3 түрінде болады. Бұл оксидтер бірге SO_x ретінде белгіленген. Стационарлы көздерден жану үдерісінен кейін SO_x ұстап қалу қазіргі уақытта әктас (немесе әк) және доломит сияқты құрамында Ca немесе Mg-бар қосындылармен өзара әрекеттесу жолымен, тиісті сульфиттер түзу арқылы жүзеге асырылады, олар содан кейін тұрақты сульфаттар түзумен ауаны пайдалану арқылы тотығады. Жоғары температуралы газдандыру үдерісінде отындағы күкірт негізінен H_2S және сәл COS-ге, әрі тек қана CS_2 мен меркаптандардың аз мөлшері ғана түрлендіріледі. COS H_2S -тың H_2O -мен каталитикалық реакциясы арқылы H_2S дейін гидролизденеді, содан кейін H_2S қарапайым күкірттің немесе H_2SO_4 жанама өнімін алу үшін химиялық не физикалық еріткішті пайдалана отырып жойылады. Бұл үдерістер 8 және 9-тарауларда толығырақ талқыланады. Қоршаған ортаға SO_x әсері жарық әсерінен атмосферада H_2SO_4 түзілуін қамтиды, бұл жаңбыр суының pH төмендетеді, "қышқылды жаңбырға" әкеледі. Қышқылды жаңбыр топырақтың өнімділігін азайтады, өсімдіктерге зиян келтіреді. Сонымен бірге судағы тіршілікке залалын тигізеді және сульфат бөлшектерінің, негізінен H_2SO_4 және $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ пайда болуына әкеледі.

1.2.1.3 Азот тотықтары. NO негізгі жану өнімі болып табылады және үш жолмен қалыптасады. NO (1) молекулалық N_2 (термиялық NO) жоғары температуралы тотығу, (2) көмірсутекті радиалдың молекулалық N_2 (жылдам NO) және (3) отындағы химиялық байланысқан азоттың тотығуы (отын NO) нәтижесінде пайда болады. Термиялық NO, яғни жану үшін ауада болатын N_2 -ден NO түзілуі N_2 -де ковалентті үштік байланыстың үзілуін және өте жоғары температураны талап етеді әрі жану үдерісі кезінде жоғары температураларда пайда болатын O радиалының әсерінен пайда болады. Жоғары температура, болу уақыты және O_2 концентрациясы NO шығарындысын арттырады, бұл CO пайда болу үшін қажетті шарттарға тікелей қарама-қайшы. Мұнай және көмір сияқты отын түрлеріндегі азот отынымен байланысты 60-80% NO құрайды. NO_2 түзілуі жану үдерісі кезінде маңызды емес, бірақ NO атмосферада NO_2 дейін тотығады және осылайша, барлық NO әлеуетті NO_2 болып табылады. Жану үдерісі кезінде пайда болады басқа азот тотығы N_2O соңғы жылдары өзінің стратосферадағы жылыжай газы рөлі арқасында маңызды бола бастады. Ол қайнаған қабатта жағу кезінде айтарлықтай концентрацияларда (қоршаған ортаға әсер ету тұрғысынан) пайда болады.

Жану үдерісінен кейінгі бақылау NH_3 немесе несепнәр көмегімен ықпал ету жолымен NO азаюынан тұрады, бұл 8 және 9-тарауларда егжей-тегжей талқыланады. N_2 -де көмірсутек радикалының (жану үдерісінде пайда болатын) әсер ету механизмі бойынша NO тез түзілуі әдетте 5%-дан аз болады. Атмосферада NO_2 пайда болуымен тотығатын NO күн сәулесінің әсерінен O_2 -ні O_3 ластағышына дейін тотықтыруы мүмкін. NO сондай-ақ атмосферадағы көмірсутекті еркін радикалдармен түтін құрауыштар түзе отырып әрекеттесе алады, ал NO_2 қышқыл жаңбырларды туындатып, H_2O -мен әрекеттесе алады. HNO_2 фотолизі (күн сәулесінің қатысуымен ыдырау) OH радикалының пайда болуына әкеледі. Реактивті радикал ауаның фотохимиялық ластағыштарын, қышқыл жаңбыр мен тұмандарды, сондай-ақ уытты

органикалық заттарды құра отырып, күндізгі уақытта басым рөл атқарады (нитратты радикал NO_3 түнгі уақытта негізгі рөл атқарады). CO_2 қарағанда қуатты жылыжайлық газ болып табылатын N_2O -ны бақылаудың ықтимал стратегиялары қабаттың үстіндегі кеңістікте немесе жалған көрінетін қабаттың циклонында газ тәрізді отынды жағудан, қабат температурасының жоғарылауынан, артық ауаның азаюынан немесе металл оксидтерінің көмегімен каталитикалық қалпына келтіруден тұрады.

Жылулық NO пайда болу реакциясы кенеттен шамамен 1540°C басталады, осылайша жану үдерісінде осы температурадан сәл төмен ұстай отырып, NO бақылау мүмкіндігі бар. Термиялық NO түзілуі ауа мен отынның арақатынасы өзгергенде көмірсутектер мен CO шығарындыларына қатысты кері тәуелділікті көрсетеді. Бақылау стратегиясына (i) біріктірілген отынды жағу (артық ауаның жоғары болуы), (ii) екінші ауамен жалынды тез сөндіру арқылы кезең-кезеңімен жану, (iii) алдын ала араластырылған (ең дұрысында, қазандыққа немесе қозғалтқышқа түсірлетін әр түрлі жүктеме үшін өзгертін геометриямен) жанарғы және (iv) түтін газдарының рециркуляциясы кіреді. Өртеуден кейінгі үдерістер кейде қолданылады, бірақ кейбір кемшіліктері бар, мысалы, NO басқа жағымсыз заттарға айналдыру. NO_x талап етілетін аса төменгі шығарындыларына қол жеткізу үшін жану үдерісінің ішкі құрылымын түсіну қажет, ол күрделі болып табылады және жану камерасын толық немесе ішінара тиеу кезінде тиімділікті төмендетпей, жаңа шешімдерді әзірлеу үшін сұйықтық динамикасын, турбулентті араластыруды, жоғары температуралы химия және жылу алмасуды үйлестіреді.

1.2.1.4 Озон. O_3 өзі тыныс алу, сондай-ақ демікпе, бронхит және эмфизема сияқты созылмалы ауруларды ушықтыра отырып, көздің, мұрын мен тамақтың тітіркенуін тудыруы мүмкін. Жүрек аурулары мен өкпе тінінің қартаю үдерісінің жеделдеуі, сондай-ақ суық тию және пневмониямен күресуде ауруға қарсы тұру қабілетінің төмендеуі де озонның салдары болуы мүмкін. Сонымен қатар озон – атмосферадағы OH радикалының негізгі көзі; O_3 жарықтың әсерінен O атомын түзе отырып ыдырайды, O H_2O -мен OH радикалын түзе отырып әрекетке түседі.

1.2.1.5 Қорғасын. Pb ағзада жинақталады және мидың, сондай-ақ жүйке жүйесінің зақымдануына әкелуі мүмкін. Әсіресе балаларда ақыл-ой кемістігіне, сондай-ақ ас қорыту қиындығына әкелуі мүмкін; құрамында Pb бар кейбір химиялық заттар тәжірибе жасалған жануарлардың қатерлі ісігін туындататыны белгілі. Атмосфераға түсетін қорғасынның негізгі көзі этилденген бензин болды, ол көптеген елдерде қолданыстан шығарылды. Pb органикалық қосылысы антидетонациялық агент ретінде қосылды. Бояуларда қорғасын қосылыстарынан жасалған пигменттер пайдаланылды және ескі үйлерде осындай бояулар болуы мүмкін. Құрылыс қоқысынан энергия алатын қондырғылар жобалау кезінде осыны ескеруі тиіс. Pb және PbO_2 жасалған электродтар аккумуляторлық батареяларда пайдаланылады және оларды кедерге жарату қоршаған ортаға Pb түсуін шектеу үшін өте маңызды (қазіргі уақытта батареялар қуаты аз, белгілі бір мерзімдерде ғана жұмысқа қабілетті жаңартылатын энергия көздерімен, әсіресе күн фотоэлектрлік элементтермен өндірілетін электр энергиясын сақтау үшін пайдаланылатынына назар аударыңыз). Оған қоса бақылаудың тиісті әдістері қорғасын өндіру кәсіпорындарында және қорғасынды балқыту үдерістеріне енгізілуі тиіс.

1.2.1.6 Қатты бөлшектер. QB^1 қатты немесе тамшы (аэрозоль) түрінде болуы мүмкін. Ауадағы ұсақ бөлшектердің жоғары деңгейі жүрек ауруларымен, өкпе функциясымен және өкпе обырымен байланысты. Шамамен 10 мкм немесе одан аз мөлшердегі бөлшектер ($\text{QB}104$) өкпенің ең терең бөліктеріне еніп кетуі мүмкін, ал 2,5 мкм ($\text{QB}2,5$) кем мөлшердегі бөлшектер өкпенің газ алмасу аймағына еніп, артериялардың нығыздалуын тудыруы және

⁴ Стандарттау жөніндегі әр түрлі ұлттық ұйымдардың өкілдерінен тұратын стандарттарды белгілеу жөніндегі халықаралық орган болып табылатын Халықаралық стандарттау ұйымы (ISO) $\text{QB}10$ бөлшектерінің 50% аэродинамикалық диаметрі 10 мкм-ден кем болатынын қатты бөлшектер ретінде анықтайды. Бұрыс нысандағы бөлшектердің аэродинамикалық диаметрі бұрыс пішінді бөлшектер сияқты тұндыру жылдамдығы бар тығыздығы 1000 кг / м³ сфералық бөлшектердің диаметрі ретінде анықталады.

жүрек ұстамасы мен басқа жүрек-қантaмыр мәселелеріне әкеп соғуы мүмкін. 100 нанометрден кем өлшемдегі бөлшектер өкпе арқылы өтіп, өзге мүшелерге әсер етуі ықтимал. Бөлшектердің химиялық табиғатына байланысты, олар жасушалардың мутациясын, репродуктивті мәселелерді және обырдың кейбір түрлерін тудыруы ықтимал. Көмірмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғылар (және аз дәрежеде мұнай мен табиғи газда) әрі өнеркәсіптік қондырғылар, көлік құралдары, әсіресе дизель отынын жағатын көлік құралдары, сондай-ақ жер жырту және өртеу кезіндегі ауыл шаруашылығы қатты бөлшектердің көздері болуы мүмкін. Сүзгіш құрылғылардың әр түрлі түрлері қатты бөлшектерді сүзу үшін пайдаланылады және 8-тарауда егжей-тегжейлі талқыланғандай көмірді жағатын энергетикалық қондырғылар жағдайында электростатикалық электр сүзгіштер кейде жеңдік сүзгіштер деп аталатын сүзгіш құрылғылардың орнына қолданылады.

1.2.1.7 Сынап. Hg қоректену тізбегіне көбінесе судағы тіршілік иелері арқылы түсуі мүмкін және оның әсері жүйке жүйесінің бұзылуын туғызады. Зерттеулер Hg әсері жүрек-қантaмыр ауруларына себеп болуы мүмкін екенін көрсетті. Hg антропогендік (адам қызметінен туындаған) шығарындыларының негізгі бөлігі көмірді отын ретінде пайдалануға байланысты. Сынапты шығарудың басқа көздері цемент өндірісі және қайта өңдеу өнеркәсібі болып табылады. Hg азық-түлік тізбегіне, сосын алғаш рет атмосфераға түскеннен кейін қоршаған ортаға бірнеше рет бөлінуі мүмкін. Активтендірілген көмір сынаптың керемет сорбенті болып табылатыны анықталды, бірақ оның көмірді жағатын энергетикалық қондырғыларда қолданылуы әлі бастапқы сатыда; оның отындық қасиеттерінің, түтін газдарының температурасы және іздік газдар құрауыштарының әр алуан жағдайларындағы тиімділігі зерттелуде. Алайда көмірді газдандыруға негізделген қондырғыларда синтездік газдан Hg-ның 90% астамын жою үшін сульфидтелген белсендірілген көмірдің өте тиімді екендігі дәлелденді.

1.2.2 Көмірқышқыл газының қалдықтары, оларды ұстау және сақтау технологиялары

Атмосферадағы CO₂, CH₄ және N₂O жылыжайлық газдарының шоғырлануы қазіргі уақытта адамның қызметіне байланысты он сегізінші ғасыр ортасының индустрияға дейінгі мәндерінен едәуір асып түседі. CO₂ атмосферадағы концентрациясы әлдеқайда жоғары болуы себепті жылыжай газы ретінде маңызды рөл атқарады, дегенмен CH₄, N₂O, сондай-ақ галоген көміртекті елемеуге болмайды. Қазіргі уақытта бүкіл әлемдегі CO₂ шығарындыларының негізгі көзі энергияны регенерациялау үшін қазба отынды, әсіресе көмірде жұмыс істейтін энергетикалық қондырғыларда пайдалану және мұнайдан алынған отынмен жұмыс істейтін автомобильдер болып табылады, ал бастапқы энергияны қазба отыннан алып жеткізу кем дегенде ғасырдың ортасына дейін басым сипатта болады деп күтілуде. АҚШ-тың энергетикалық ақпарат басқармасының деректері бойынша, энергетикалық нарықтарға әсер ететін ешқандай жаңа заңнама немесе саясаттың жүргізілмесі анық, демек энергияны жаһандық пайдалану 2035 жылға қарай 2008 жылдың мәнімен салыстырғанда 50%-ға өседі. Энергия тұтынудың бұл өсуі дамушы елдердегі табыс пен халықтың болжамды өсуіне байланысты және қазба отыны басты рөл атқаруды жалғастырады деп күтілуде. Климаттың жаһандық өзгеруі жөніндегі халықаралық алаңдаушылық 1992 жылы Біріккен Ұлттар Ұйымының Климаттың өзгеруі туралы негіздемелік конвенциясының пайда болуына алып келді, оның түпкі мақсаты климат жүйесіне қауіпті антропогендік араласуды болдырмау үшін атмосферада жылыжайлық газдардың шоғырлануын тұрақтандыру болып табылады.

Біріккен Ұлттар Ұйымының Климаттың өзгеруі жөніндегі сарапшыларының үкіметаралық тобы (КӨСҮТ) 2007 жылғы бағалау туралы өзінің Төртінші баяндамасында ХХІ ғасырдың ішінде жердің беткі қабатының жаһандық температурасы жылыжай газдарының ең аз шығарындылары қарастырылған сценарий үшін 1,1-2,9°C және әр түрлі климаттық модельдермен жасалған болжамдар негізінде жылыжай газдарының ең жоғары шығарындылары қарастырылған жоспар үшін 2,4-6,4°C-ге өсуі ықтималдығын көрсетеді. Бұл модельдер жылыжайлық газдардың шоғырлануына сезімталдығы бойынша ерекшеленеді, бірақ бұл құбылыстың күшті және қарқынды дауылдарға әкеп соғатын жел қарқынын

арттыру, құрғақшылық пен қатты жауын-шашынның күшеюі, сондай-ақ мәңгі мұздатуды қамтуды азайту сияқты әсерлері қатты алаңдаушылық туғызады. Іс жүзінде қазірдің өзінде орташа есеппен тау мұздықтары мен қар жамылғысы азайды. Құрлықтағы мұз жамылғысының еруі нәтижесінде теңіз деңгейі жоғарылайды, ал мұхиттағы жылыну бұл мәселені күшейтеді, өйткені теңіз суы оның температурасының жоғарылауына қарай кеңейеді. Мұхиттар мен ауаның қызуы нәтижесінде пайда болатын атмосферадағы басқа "жылыжай газы", H_2O буының жоғары концентрациясы әсері мәселені одан әрі қиындатады.

Көміртекті ұстау және сақтау (CCS) жаһандық жылынды төмендету құралы ретінде қызығушылық тудырады. CCS технологиясы қазба отынмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғылар сияқты ірі нақты көздерден CO_2 бөлуден және атмосфераға түспеу үшін оны сақтаудан тұрады. Көміртекті ұстап қалу технологиялары аммиак пен несепнәр синтезі, көмірсіз синтез-газ сияқты химия өнеркәсібінде әзірленіп пайдаланылады, мұнда CO_2 бастапқыда негізінен CO және H_2 -ден тұратын синтез-газdan тазартылады, ал CO су газын конверсиялау реакциясына айналады, $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ көміртекті синтез-газды қалдырып, CO_2 жұтуға қолайлы еріткішпен газды кейіннен тазарту арқылы CO_2 -ні сіңіруге арналған реакцияға айналады. IGCC кезінде бұл көмірсіз газды газ турбинасында жағуға болады. Аминнің сулы ерітіндісі немесе Selexol сияқты физикалық еріткіш секілді химиялық еріткіш синтез-газдың қысымына байланысты пайдаланылуы мүмкін. Бұл көміртекті "өртеуге дейін" деп аталатын ұстап қалу технологиясы 9-тарауда егжей-тегжейлі талқыланады. Тікелей жағу жағдайында, мысалы, "жағудан кейін көміртекті ұстап қалу" технологиясы пайдаланылатын табиғи газда жұмыс істейтін көмір қазандығында немесе газ турбинасында, 8-тарауда егжей-тегжейлі сипатталғандай, түтін газын сәйкес келетін амин ерітіндісімен (табиғи газбен жұмыс істейтін аралас циклда тексерілген) тазалау пайдалануы мүмкін. Алайда жалпы (энергетикалық) тиімділік те, күрделі шығындар да бұл коммерциялық қолжетімді технологиялар көміртекті ұстау үшін пайдаланылғанда айтарлықтай төмендейді әрі осы айыппұлдарды төмендететін технологияларды әзірлеуге елеулі зерттеу қаражаты жұмсалады.

Техникалық жағынан CCS-дағы басты мәселе CO_2 ұстап қалу емес, тұтылған CO_2 -ні секвестрлеу үшін сақтау болып табылады. Ұстап қалу бойынша түрлі ұсыныстар сарқылған мұнай немесе газ ұңғымаларында, бұзылмайтын көмір қабаттарында және терең тұзды сулы горизонттарда сақтауды қамтиды. АҚШ-тың энергетикалық технологиялар жөніндегі ұлттық зертханасы Солтүстік Америкада келесі 900 жыл ішінде оның ағымдағы пайда болу жылдамдығы жағдайында пайда болатын CO_2 ұстап қалу үшін жеткілікті сыйымдылық (қойма) бар, бірақ нақты қиындық геологиялық қауіпсіздікке және CO_2 қоршаған атмосфераға шығып кету қаупіне байланысты екенін мәлімдеді. Коллектор-қабаттармен реакциялар нәтижесінде CO_2 минералдануы ұзақ мерзімді шешім болуы мүмкін, осы бағыт бойынша зерттеулер жүргізілуде.

Көміртекті мұхит тереңдігінде сақтау ұсынылды, бірақ ол су қышқылдығының жоғарылауына байланысты бұдан былай қарастырылмайды. CO_2 -ні мұнай беруді арттыру үшін пайдалану – бұл оң кіріс ағынын тудыратын тағы бір мүмкіндік, бірақ мұндай мұнай кен орындары шектеулі. CO_2 мұнай кен орнындағы қысымды арттыру және мұнай ерітіндісіне кіре отырып, оны сұйығырақ ету үшін мұнай тұтқырлығын азайтуға қызмет етеді.

2000 жылдың қыркүйегінен бастап Канадада CCS ауқымды жарияланым жобасы жұмыс істейді. Бұл жобада синтез-газdan бөлінген, Құрама Штаттарда газдандыру қондырғысында 95% тазалықпен өндірілген CO_2 құбыр арқылы тасымалданады және Саскачевандағы Вейберн мұнай кен орнына тәулігіне 6500 тонна/тәулік жылдамдықпен айдалады.

1.2.3 Суды пайдалану мәселелері

Қоршаған орта үшін тағы бір қиындық бұды жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланатын қазіргі заманғы энергетикалық қондырғыларда (келесі тарауларда толығырақ **талқыланатын Ренкин циклында**) жылуды бұру үшін пайдаланылатын судың көп мөлшері болып табылады. Мұндай энергетикалық қондырғылар жылу қозғалтқышын жылуды энергияға түрлендіру үшін пайдаланады және түрлендірудің тиімділігі жоғары ұйымдастырылған энергия нысанын, жылу энергиясын, энергияның жоғары ұйымдастырылған түріне, жылу қозғалтқышының

айналатын білігінде механикалық энергияға түрлендірген кездегі табиғат (және 2-тарауда талқыланатын екінші заңда жарияланған термодинамика) шектеулеріне байланысты 100%-дан әлдеқайда төмен. 2012 жылы Құрама Штаттарда су алу / пайдалану көлемі бір адамға / күніне 1300-1400 галлон немесе 4,9-5,3 м³ / адам / күнді құраған (өнеркәсіпте, ауыл шаруашылығында және тұрмыста пайдалануды қоса алғанда) әрі осы көлемнің жартысынан астамы электр энергиясын өндіруде пайдаланылған. Энергетикада қолданылатын су мөлшері сулы салқындатқыш мұнараларды (градирня) пайдалану кезінде қондырғының тиімділігіне кері тәуелділікке ие, бұл энергетикалық қондырғы тиімділігінің маңыздылығын көрсетеді. Сулы градирнялар салқындатқыш судың салқындауын қамтамасыз етеді, ол су қондырғымен бөлінетін жылуды сіңіру үшін пайдаланылады, сондықтан салқындатқыш су салқындау үшін қайта айналуы мүмкін. Бірақ суыту үдерісі суытушы су бөлігінің қоршаған ауамен түйісуі арқылы булануына байланысты (буланудың жасырын жылуы салқындатуды қамтамасыз етеді) және бұл буланған су атмосферада жоғалады. Төменде талқыланатын дымқыл градирнялар үшін баламалар бар, бірақ кейбіреулері тиімділікті және / немесе орнату құнын қиындатады, ал басқалары әзірлеу сатысында.

Тура ағынды жүйелер өзен, көл және мұхит сияқты жақын орналасқан көздерден су алады, кейбір бастапқы тазартудан кейін қондырғы бөлетін жылуды сіңіріп алу үшін суды таратады. Содан кейін осылай қыздырылған су сақтық шараларын қолдана отырып, яғни қайтарылатын жылы суды қайта айналдырмай, осылайша, шығарындыға тастамай өзінің қайнар көзіне оралтады. Салқындаудың бұл түрі бастапқыда оның қарапайымдылығына және төмен құнына байланысты танымал болды, себебі қондырғыны су көзіне жақын орналастыруға болады. Оның кемшілігі су алу және жылы суды қайтару салдарынан жергілікті экожүйелердің бұзылуы болып табылады. Кейбір қондырғылар жергілікті экожүйеге әсерін азайту үшін ылғалды градирнялардың және осы бір жақты салқындату жүйесін комбинациясын пайдаланады, бірақ бұл сұлбада сулы градирняларда булану салдарынан болатын су ысырабына байланысты кемшіліктер бар.

Құрғақ суыту жүйелері қондырғы бөлетін жылуды сіңіріп алу үшін судың орнына ауаны қолданады әрі оны коммерциялық мақсатта пайдаланылады. Энергетикалық қондырғыда осы салқындату түрін қолданудың басты артықшылығы сонда, жылу беру температурасы әдетте сұйық сумен салыстырғанда ауаның жылу беру коэффициентінің төмендігінен ұлғаяды, бұл жылу алмастырғыштың өлшемін шектеу үшін ішіндегі температураның үлкен қозғалғыш күшін талап етеді.

2-тарауда түсіндіргендей, жылу бөлу температурасының ұлғаюы энергетикалық циклдың тиімділігін төмендетеді. Екінші кемшілігі – ең алдымен, өте үлкен (ауа салқындатқышымен) жылу алмастырғышты қажет ететіндіктен бұл қондырғының құны жоғарылайды.

Жақында әзірленген салқындату жүйесінің "Green Chiller" деп аталған технологиясы ауамен салқындататын жылу алмастырғыш жағдайында суды тұтынуды төмендетуге бағытталған, бірақ сонымен қатар қондырғының тиімділігін нашарлатпайды. Ол сондай-ақ салқындатқыш агент ретінде ауаны пайдаланады, ал жылы күндері ауа сумен тікелей байланыста алдын ала салқындатылады. Бұл алдын ала салқындату жұмыс режимінде судың бір бөлігі адиабатикалық жағдайларда тікелей контактімен ауа ағынына буланып кетеді және булану үшін қажетті жасырын жылу ауадан алынады, сол арқылы ауаны салқындатады. Суыту үшін бұл жұмыс режимінде су қажет, бірақ қондырғының суды орташа жылдық тұтынуы сулы градирня негізіндегі жүйемен салыстырғанда азаяды.

1.3 ХОЛИСТИКАЛЫҚ ӘДІС

Экологиялық бақылау стратегияларын қолдануға қосымша, алдыңғы бөлімдерде талқыланғандай, энергия жеткізу тізбегін генерациялау нүктесінде, шикізатты жеткізу жағында, сондай-ақ түпкі пайдаланушы жағында жасалған жақсартулар біздің ғаламшарымыздың экологиялық қауіпсіздігін айтарлықтай жақсартып алады.

1.3.1 Жеткізулер тізбегі және өмірлік циклды бағалау

Мысалы, тақтатас газы үшін бұрғылауды қарастырайық. Судың көп мөлшерін пайдалану ғана емес, сондай-ақ суға қосылатын әр түрлі химиялық заттардан да түрлі экологиялық проблемалар туындайды. Гидроажыртуға арналған сұйықтықтардың су тұтқыш қабаттарға және араластырылмаған химиялық заттардың үстіне төгілуіне байланысты алаңдаушылық бар. Пайдалану және қоршаған орта туралы деректерді өлшеу мен ашу, жергілікті қауымдастықтармен өзара іс-қимыл жасау, ұңғыма учаскелерін олардың әсерін азайту мақсатында тексеру, ұңғыма құрылысы кезінде сенімді конструкцияларды іске асыру, суды пайдалану мен жоюды тиісінше басқару, сондай-ақ рұқсаттарды өңдеу және талаптарды сақтау мақсатында тиісті ресурстарды беру осындай операциялардың тұрақтылығын арттыру үшін қажет. Сондай-ақ тығыздалмаған тасталған мұнай және газ ұңғымалары, су ұңғымалары (үйлердің жарылу қаупі және су ұңғымаларының газбен ластануы) арқылы газдың көшуіне қатысты алаңдаушылық бар. CH_4 CO_2 -ге қарағанда әлдеқайда қуатты жылыжай газы болып табылады. Ховарт және бірлескен авторлар (2011) бақыландыратын CH_4 шығарындылары мен көмірді қамтитын тақтатас газынан жылыжайлық газдардың жалпы шығарындыларын салыстыра отырып, 20 жылдық уақыт кезеңі ішінде тақтатас газының көмірге қарағанда жылыжайлық газдардың едәуір жоғары шығарындылары бар екенін мәлімдейді. Алайда бұл қорытынды жылу энергиясы түпкілікті өнім болатын жану үдерісі кезінде бөлінетін энергияға негізделген және түпкілікті өнім электр энергиясы болып табылса, бұл **қорытынды назарға** алынбайды, себебі табиғи газда жұмыс істейтін энергетикалық қондырғылардың көмірмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғыларға қарағанда тиімділігі айтарлықтай жоғары, дегенмен мұндай ұйымдастырылмаған шығарындылар барынша азайтылуы тиіс. Көмір электр станцияларының өзінде көмір өндіру өнеркәсібінде жеткізу жағынан елеулі қиындықтар бар. Көмір өндіру жер құнарлығының азаюына әкелуі мүмкін, ал жер өнім бермейтін болып қалса, эрозия мен топырақ көшкінінің ықтималдығы бар. Шахтерлердің денсаулығы мен қауіпсіздігі шахталардың иелері қауіпсіз еңбек жағдайларын және тиісті жабдықтарды қамтамасыз етпеген жағдайларда айрықша маңызды мәселе болып табылады.

Табиғи газ, мұнай немесе көмір сияқты пайдалы қазбаларды бұрғылаудың немесе өндірудің қоршаған ортаға әсерінен басқа, осы тарауда бұрын сипатталғандай, ресурстың қоршаған ортаға әсерін ескере отырып, энергияны қалпына келтіру үшін пайдаланылғанға дейін оны өңдеуді ескеру қажет. Операцияның бастапқы нұсқасына, сондай-ақ ағымдағы операцияларға экологиялық қауіпсіздік тұжырымдамаларын қосудың маңызды мәні бар. Шикізатты сатып алудан бастап түпкілікті өнім өндіруге дейін өмірлік циклды бағалау, сондай-ақ пайдаланылған түпкілікті өнімді кәдеге жаратуды жақсартуды енгізу қажет салаларды айқындау кезінде және нұсқалардың қайсысы толық цикл үшін неғұрлым қауіпсіз болып табылатынын айқындау кезінде абсолютті түрде қажет болады. Жай ғана экономикалық тұрақтылықты талдау, яғни қоршаған ортаға әсерді ақшалай бағалау жеткіліксіз.

Үдерістердің неғұрлым жоғары тиімділігі ресурстарды сақтауға, сондай-ақ қоршаған ортаға әсердің төмендеуіне алып келді. Энергия тиімділігі қазіргі уақытта да, болашақта да біздің ғаламшарымыз үшін үлкен және арзан "энергетикалық ресурс" болуы мүмкін әрі осы мақсатқа қол жеткізу үшін бізге қолданыстағы жоғары тиімді технологияларды тәжірибеде іске асыруға және осындай технологияларды жетілдіру жөніндегі ғылыми-зерттеу мен тәжірибелік-конструкторлық жұмыстарды жалғастыруға мүмкіндік беретін үйлестірілген халықаралық стратегия қажет.

Өндіруші тарапында және ақырғы тұтынушы тарапында да тиімділікті айтарлықтай арттыруға әлеует бар. Келесі тарауларда өндіруші тарапындағы энергия тиімділігіне баса назар аударылады, бірақ ақырғы тұтынушы тарапындағы тиімділіктің маңызын елемеге болмайды. Ақырғы **тұтынушылардың дағдыларын** өзгерту жүйенің жалпы тиімділігін (электр энергиясын өндіруді, жеткізуді және пайдалануды қоса алғанда) арттыру аспектілерінің бірі, ал мәселенің екінші жағы – технологиялық тұрғыдан алынған көзқарас. Мысал ретінде шамды қарастырайық. Шағын люминесцентті шамдар (ШЛШ) және жарықдиодтар (ЖШД) қыздыру шамдары сияқты өнімділік деңгейін қамтамасыз етеді, бірақ энергияның бір бөлігін ғана пайдаланады. Атап айтқанда, АҚШ Энергетика министрлігі жүргізген зерттеу өмірлік цикл ішінде энергияны пайдалану қоршаған ортаға басым әсер ететінін көрсетті: қуаты 15 Вт

және 12,5 Вт жарықдиодты шамдар шамамен бірдей жарық ағынын өндіретін қуаты 60 Вт қыздыру шамынан жақсы жұмыс істейді.

АҚШ Энергетика министрлігінің жарықтандыру құралдары бойынша зерттеуінде ШЛШ мен ЖШД өндіру мен кәдеге жаратудың тұрақтылығы туралы мәселе қаралды. ШЛШ-да Hg болуы оларды кәдеге жаратуды қатаң бақылауды талап етеді, бірақ ШЛШ өндірудің және пайдаланудың қоршаған ортаға әсері туралы салыстырмалы түрде ақпарат аз. Бар деректер негізінде ШЛШ жарық диодтары сияқты өмір циклының осы бағалауында жарық диодтары үшін ШЛШ-дан азғантай ғана артықшылықпен қыздыру шамдарынан әлдеқайда асып түсетіні анықталды.

Осылайша, үдерістің көрінісін толықтай қамту үшін ресурстар мен қоршаған ортаға әсерді бағалауды қамтитын өмірлік циклды бағалау қажет. Өмір циклын бағалау кезінде ауамен байланысты қоршаған ортаға әсер ету жаһандық жылынууды, қышқылдануды, фотохимиялық тотығуды, стратосфералық O₃-тің сарқылуын және адам үшін уыттылық ықтималдығын қамтуы мүмкін. Қоршаған ортаға суға қатысты әсер етуде тұщы суларда орын алуы ықтимал экоуыттылық, теңіз сулары үшін экоуыттылық және эвтрофталуды (мысалы, судағы тіршілік үшін қажетті O₂-нің сарқылуын тудыратын қоректік заттардың жоғары деңгейіне байланысты фитопланктонның ұлғаюы) қарастыруы мүмкін. Қоршаған ортаға байланысты топыраққа әсер етуді қарастырған кезде жер пайдалану, экожүйеге тиюі ықтимал залал мен жер экоуыттылығы ескеріледі. Ресурстармен байланысты қоршаған ортаға әсер ету абиотикалық (бейорганикалық тұздар, минералды топырақ бөлшектері сияқты биологиялық емес ресурстар) ресурстардың сарқылуын, қауіпсіз қалдықтарды, радиоактивті қалдықтарды және қауіпті қалдықтарды көмуді қамтуы мүмкін. Жарықтандыру құралдарының мысалына қайта орала отырып, соңғы жылдары қыздыру көздерін өндіруге тыйым салатын заңнаманың күшеюіне байланысты үйлер мен кәсіпорындарда қыздыру шамдарын баламалы өнімдермен алмастыру жеделдеді, мұнда үкіметтің ғаламшардың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз ете алатын маңызды рөлін атап өту қажет. Жұртшылықтың хабардар болуы және жарықтандырудың осы түрін еркін қоғамда қабылдау да сондай маңызды.

1.4 ҚОРЫТЫНДЫЛАР

Аз энергия мен ресурстарды пайдаланатын үдерістер ұзақ мерзімді экологиялық қауіпсіздік үшін қажет. Кейде экологиялық жобалар әдетте тексерілмеген технологиялар мен көп күрделі шығындарды талап ететін неғұрлым күрделі және неғұрлым қауіпті болып табылады деген пікір айтылады, бірақ кез келген тәуекелдер мен күрделі шығындардың ұлғаюын қоршаған ортаның бұзылуына және осыған байланысты денсаулық пен шектеулі табиғи ресурстардың сарқылуына байланысты қоғамның ұзақ мерзімді келешекте ұшырайтын жанама шығындарымен салыстырған жөн.

Жердің қоршаған ортаның әсеріне қарсы тұру қабілетінің шектеулі болуына орай сыртқы және ішкі шығындар да бар. Сыртқы шығындар қоғамдағы қоршаған ортаның бұзылуына байланысты, бірақ есепке алынатын энергияның ақшалай құндылықтарында көрсетілмейді. Ішкі шығындар – бұл сыртқы шығындарды төмендету үшін ластануға қарсы күреске арналған жабдық сияқты шаралармен байланысты шығындар. Ішкі шығындардың айтарлықтай ұлғаюына қарамастан, сыртқы шығындар өсуде. Сыртқы шығындарды сандық өлшеу қиын, бірақ өркениет сумен жабдықтауды реттеуге, зиянкестермен және патогенді микроорганизмдермен күресу мен төзімді климатты қолдауға аса тәуелді.

Климат көптеген экологиялық үдерістерді басқарады, біздің әл-ауқатымыз осыларға байланысты, ал жылыжайлық газдардан туындайтын жаһандық климаттық өзгерістер жойқын болуы мүмкін. Біраз уақыт ұтуға мүмкіндік беретін табиғи газға ауысу жағдайында CO₂ мәселесі кейінге қалдырылуы мүмкін. Климат үшін ядролық энергияның бүлдіру күші төмендеу, бірақ қауіпсіз реакторларды әзірлеуді және ядролық қалдықтармен қауіпсіз жұмыс істеуді талап етеді. Күн энергиясы, әрине, сыртқы шығындарды азайту тұрғысынан ұзақ мерзімді шешім болып табылады, бірақ қазіргі уақытта қымбат болып қалып отыр. Ең жақын шешім әсер ету деңгейі төмен (экономикалық өсуді бұзбай) энергия үнемдеу технологиясына көшу және түпкілікті пайдалану тиімділігін арттыру болып табылады. Егер дамушы елдерде

энергияны тұтыну дамыған елдердегі халықтың жан басына шаққандағы тұтыну деңгейіне жақындайтын болса, CO₂ және басқа да ластаушы заттар жергілікті деңгейде де, жаһандық деңгейде де бұрын болмаған көп көлемде әсер етеді. Ұзақ мерзімді баламалы таңдаулар бағытындағы энергетикалық зерттеулер саласында халықаралық ынтымақтастық шешуші рөл атқарады.

ӘДЕБИЕТ

- Edenhofer O, Madrugá RP, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Zwickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, von Stechow C, editors. *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.
- García R, Pizarro C, Lavin AG, Bueno JL. Spanish biofuels heating value estimation. Part I: Ultimate analysis data. *Fuel* 2014;117:1130-1138.
- Howarth RW, Santoro R, Ingraffea A. Methane and the greenhouse gas footprint of natural gas from shale formations. *Clim Change Lett* 2011;106 (4):679-690.
- Keenan JH, Keyes FG, Hill PG, Moore JG. *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1969.
- Rao A, Sander M, Sculati J, Francuz V, West E. Evaluation of advanced Gas Turbine Cycles. Prepared by Fluor Daniel, Inc., Report August 1993. Gas Research Institute Report nr 5091-294-2346. Chicago, IL: Gas Research Institute; 1993.
- Uranium 2011: Resources, Production and Demand. 2012. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. Paris: OECD Nuclear Energy Agency; Vienna: International Atomic Energy Agency.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy. 2013a. Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United States. Report June 2013. Available at <http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/fullreport.pdf>. Accessed February 17, 2014.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy. 2013b. International energy outlook 2013 with projections to 2040. Report July 2013. Available at <http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484%282013%29.pdf>. Accessed February 18, 2014.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy. 2014. International Energy Statistics. Available at <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm#>. Accessed February 17, 2014.
-

2

ТЕРМОДИНАМИКА ЗАҢДАРЫ

Машиналарды пайдалануға арналған механикалық және электрлік энергия, материалдарды өңдеуге және тұрғын үй-жайларды жылытуға арналған жылу энергиясы, сондай-ақ жарықтандыруға арналған сәулелену энергиясы біз үшін энергияның **ерекше пайдалы түрлері** болып табылады. Механикалық энергия қазіргі уақытта негізінен әр түрлі типтегі қозғалтқыштарды пайдалану арқылы жылу энергиясынан өндіріледі, ал жылу энергиясы қазбалы отынды жағу кезінде алынады. Механикалық энергия генератордың көмегімен әрі, керісінше, қозғалтқыш көмегімен электр энергиясына түрлендірілуі мүмкін. Қазба отынды жағу нәтижесінде алынуы мүмкін жылуды алу үшін жылу энергиясына қосымша ретінде ол жылу қозғалтқышының еңсерілмейтін энергиясынан алынуы мүмкін немесе соңғы әдіс экологиялық қауіпсіздік тұрғысынан өте тиімсіз болғанымен, электр энергиясын алу және жылуға кері түрлендіру жолымен жанама түрде алынуы мүмкін. Жарықтандыруға арналған сәулелену энергиясы электр энергиясын түрлендіру жолымен алынады. Электр энергиясы өте пайдалы рөл атқарады, ол соңғы тұтынушыда механикалық, термиялық немесе сәуле шығаратын энергия сияқты пайдалы формаларға түрлендіру үшін қашықтықтарға энергияны беру болып табылады. Біз тікелей немесе жанама пайдаланатын әр түрлі материалдық өнімдерді өндіру үдерісі материалды түрлендіру үдерісімен қоса жүретін энергияны түрлендірудің көптеген кезеңдерін, әсіресе химиялық реакциялармен байланысты түрлерін қамтиды.

Термодинамика энергияның **бір формасын** екіншісіне түрлендіруді зерттейтін ғылым саласы болып табылады. Бастапқыда ол жылу және оның энергия мен жұмыстың басқа формаларымен байланысы тұрғысынан қаралса да, энергияның басқа түрлерінің өзгеруін реттейтін заңдарды анықтауда айтарлықтай үлкен рөл атқара бастады, мысалы, аккумулятор немесе отын элементіндегі сияқты жылу энергиясына айнарудың аралық кезеңсіз электр энергиясына химиялық байланысқан энергия. Термодинамика қағидаттарын химиялық реакцияны түрлендірудің жоғарғы шегін анықтау үшін немесе қоспаларды бөлу үдерісі үшін де қолдануға болады.

Осылайша, осы мәселені терең түсіну біздің қазіргі өміріміз соншалықты тәуелді болатын энергия мен материалдарды түрлендірудің түрлі үдерістері қауіпсіз болуы үшін үлкен маңызға ие. Осындай үдерістердің талдауы термодинамиканың екі заңын қолдана отырып жүйелендірілуі мүмкін. Аталмыш тараудың мақсаты энергияны түрлендіру қондырғыларын түсіну және талдау үшін маңызды термодинамика тақырыптары бойынша **жаднама жасау** болып табылады.

2.1 ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ БІРІНШІ ЗАҢЫ

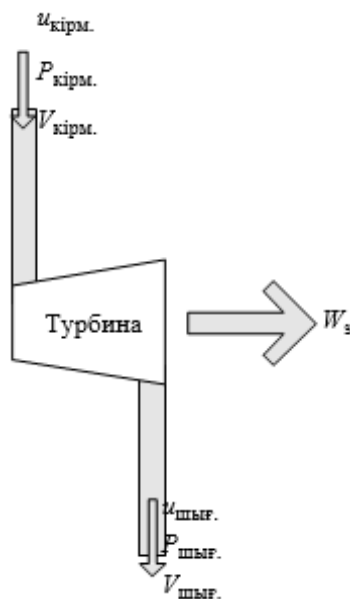
Термодинамиканың (ядролық емес үдерістерге арналған) бірінші заңын келесі тәсілмен қысқаша жазуға болады:

$$\text{Жүйе энергиясының өзгеруі} + \text{қоршаған орта энергиясының өзгеруі} = 0 \quad (2.1)$$

Мұндағы жүйе қызығушылық танытатын үдеріс өтетін салаға жатады, сол уақытта қоршаған орта бар Әлемнің қалған бөлігіне жатады. Алайда инженерлік мақсаттар үшін біз осы үдерістің ықпалында тұрған әлемнің бір бөлігін ғана қарастыра аламыз. Әдетте жүйені қоршаған ортадан бөлетін шекара ол арқылы тек жылу алмасу мен жұмыстың өзара әрекеттесуі болатындай етіп таңдалады, Осы жағдайда 2.1 теңдеуі келесі тәсілмен жазылуы мүмкін:

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q - W \quad (2.2)$$

мұндағы U – бұл жүйенің ішкі энергиясы (жүйе құрайтын молекулалардың потенциалды және кинетикалық энергиясының қосындысы), KE және PE – жүйенің жалпы макроскопиялық кинетикалық және потенциалды энергиялары (яғни жеке атомдар немесе молекулалардың KE және PE жоқ), Q – бұл қоршаған ортадан жүйеге берілетін жылу, ал W – бұл жүйенің сыртқы орта қатынасында орындайтын жұмысы. W энергия формасы болып табылатынына назар аударыңыз. Жылу қозғалтқышы жағдайында – бұл жүйені сыртқы ортамен қосатын біліктің кинетикалық айналу энергиясы. Егер Q мәні теріс болса, онда жылу жүйеден сыртқы ортаға беріледі. Ал егер W мәні теріс болса, онда жұмыс сыртқы ортамен жүйеге қарай орындалады. 2.1-теңдеуі материяны сақтау қағидатына сүйене отырып, ядролық реакциялар үшін өзгертілуі және келесі тәсілмен жазылуы мүмкін:



2.1- СУРЕТ Ашық жүйе

$$\Delta (\text{жүйенің массасы мен энергиясы}) + \Delta (\text{қоршаған ортаның массасы мен энергиясы}) = 0 \quad (2.3)$$

2.1-суретте көрсетілгендей, ішкі (меншікті) энергиясы $u_{\text{кirm}}$ бар турбинаға түсетін, біліктің W_s жұмысын орындайтын, ал содан кейін бүкіл үдеріс тұрақты жағдайда, яғни жүйенің ішінде зат немесе энергия жинақталмаған жағдайда ішкі (меншікті) энергиясы $u_{\text{шыф}}$ бар (үлестік) жүйені тастап кететін сұйықтық молі секілді – жұмыс жасаумен өзара әрекеттесу кезіндегі ашық жүйені қарастырайық. Сұйықтық жүйеге (турбинаға) келіп түскеннен кейін сыртқы орта (кіріс ағыны) жүйеге қатысты $W_{\text{кirm}}$ жұмысты орындайды және сұйықтық жүйені тастап кеткеннен кейін жүйе (шығыс ағыны) сыртқы ортаға қатысты $W_{\text{шыф}}$.

жұмысты орындайды.

Жұмыстың алынған өзара әрекеттесуін ескере отырып, 2.2 теңдеуі мына түрге ие:

$$\Delta u + \Delta KE + \Delta PE = Q - W_s + W_{\text{кір.}} - W_{\text{шығ.}} \quad (2.4)$$

Қысымға P және сұйықтықтың² меншікті көлеміне V қатысты $W_{\text{кір.}}$ және $W_{\text{шығ.}}$ айқындай отырып (осы тараудың барлық мазмұны үшін қолданылатын молярлық негізде), 2.4 теңдеуі мына түрге ие:

$$u_{\text{шығ.}} + P_{\text{шығ.}} V_{\text{шығ.}} - u_{\text{кір.}} - P_{\text{кір.}} V_{\text{кір.}} + \Delta(KE) + \Delta(PE) = Q - W_s$$

(Меншікті) энтальпияны анықтай отыра, $h = u + PV$, алдыңғы теңдеу келесі тәсілмен жазылуы мүмкін:

$$\Delta h + \Delta(KE) + \Delta(PE) = Q - W_s$$

Энергияның кинетикалық және потенциалды өзгерістері жіберілуі ықтимал жүйе үшін:

$$\Delta h = Q - W_s \quad (2.5)$$

11-тарауда сипатталған отын элементі сияқты электрхимиялық әрекет сияқты өндірілуі мүмкін жұмыстың басқа да формалары бар, бұл жағдайда біліктің W_s әсері 2.5 теңдеуінде электрхимиялық жұмыспен W_e алмастырылады.

Уақыттың белгілі бір аралығында әсерге және жылу өзара әрекеттесулерге тап болатын тұйықталған жүйе үшін екі мән $W_{\text{кір.}}$ және $W_{\text{шығ.}} = 0$ болуына байланысты бірінші заң келесі тәсілмен жазылуы мүмкін:

$$\Delta U = Q - W_s$$

2.1.1 Бірінші заңның ішкі жану қозғалтқыштарында қолданылуы

Жану үдерісі көптеген құрылғыларда немесе энергияны түрлендіру үдерістерінде маңызды рөл атқарады. Газ турбинасы сияқты отын жылу қозғалтқышы жағдайында, алдымен, отын O_2 -мен экзотермиялық реакциялар арқылы химиялық байланыстарға байланысты өзінің ішкі энергиясын жылу энергиясына түрлендіру үшін жанады, содан кейін жұмысқа айналады. Бірінші заң жану камерасының шығысындағы температураны есептеу үшін энергияны түрлендірудің осындай үдерістерін талдау кезінде маңызды қадам ретінде пайдаланылуы мүмкін. 2.5-теңдеуі жұмыс жану үдерісінде шығарылмайтын тұрақты ағынмен іштен жану қозғалтқышына қатысты (және $\Delta(KE)$ мен $\Delta(PE)$ ескермеуге байланысты бұл көптеген практикалық қолданулар үшін ақылға қонымды жорамалдау болып табылады) келесідей тұжырымдалады:

$$\Delta H = H_{\text{кір.}} - H_{\text{шығ.}} = Q \quad (2.6)$$

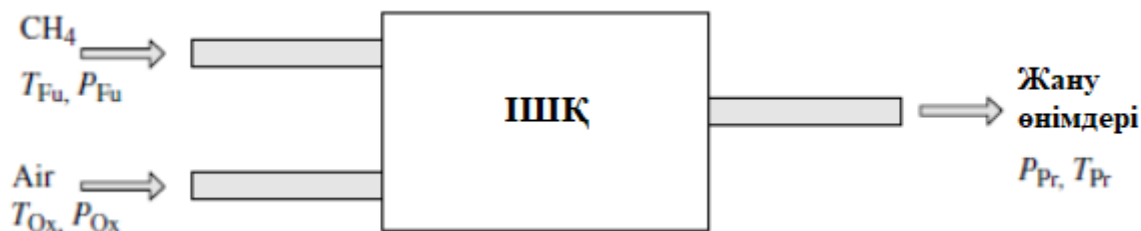
мұнда энтальпиялар жалпы молярлық шығысқа сәйкес келеді, яғни $H = nh$, мұндағы n – бұл **мольдердің жалпы саны**, ал h – бұл 1 мольге келетін энтальпия саны, Q – ішкі жану қозғалтқышынан жылу шығындары (олар әрқашан барынша азайтылуы тиіс), бұл әдетте отынның энергетикалық баламасының (жану жылуының) пайызы ретінде қабылданатын эмпирикалық мән болып табылады, бірақ 4-тарауда сипатталған жылу беру теңдеулері және іштен жану қозғалтқышы геометриясының деректері арқылы есептелуі мүмкін.

² $W = (\vec{F}) \Delta \vec{x} = (\vec{F} / A) (\Delta \vec{x} A) = PV$ болуына байланысты, мұндағы $\vec{F}$ – бұл келіп түсетін сұйықтықпен (немесе ағып кететін сұйықтықпен) салынатын күш, A – ол арқылы сұйықтық келіп түсетін (немесе жүйеден ағып түсетін) көлденең қима алаңы, ал Δx – бұл кіру (немесе жүйеден шығу) кезінде сұйықтық моль бірлігі ауысатын ара қашықтық.

Біз қарастыратын жүйеге қатысты энтальпия қабылдайтын, жасырын және химиялық, бірақ ядролық емес энтальпияның жағдайын қамтуы тиіс. ΔH реагенттер мен өнімдер үшін «стандартты» шарттардың белгілі бір жиынтығы кезінде реакциялармен бөлінетін немесе сіңірілетін жылуға арналған кестелік деректерден (тәжірибелік немесе тәжірибелік жолмен, не өзге де **әдістермен бағаланған**) алынуы, содан кейін біздің жағдайға тән шарттарға қарай түзетілуі мүмкін. Осы нақты шарттарды кестелік деректерге сәйкес келетін шарттармен байланыстыру үшін үдерістің болжамды жолы реакция деректер қолжетімді жағдайлар жиынтығында орын алатындай етіп анықталады. Осылайша алынған нәтижелер бастапқы жағдайлары бірдей және соңғы жағдайлары бірдей кез келген нақты үдеріс үшін жарамды болады, өйткені H күй функциясы болып табылады, яғни заттың белгілі бір мөлшері үшін оның мәні тек зат орналасқан жағдайға (оның температурасы, қысымы, құрамы және оның жағдайын толық анықтайтын фазасы) байланысты болады. Кестеде реагенттер элементтер болып табылатын, ал өнім реагенттермен және өніммен олардың «стандартты күйінде» бірыңғай қосылыс болып табылатын 25°C кезінде изотермиялық ағып өтетін реакциялардың арнайы типтері үшін әр түрлі қосылыстар реакциясының жылуына арналған деректер келтірілген. Өнімнің грамм-моліне есептегендегі реакцияның тиісті жылуы «түзілудің стандартты жылуы» деп аталады. Кез келген элементтің немесе қосылыстың қалыпты күйі таза компонент ретінде анықталады, бұл ретте газдар 1 атм. қысымда мінсіз күйінде орналасады, ал сұйықтар мен қатты заттар үшін стандартты қысым әдетте 1 атм-ға тең. Түзілу жылуының стандартты деректері реагенттердің, отынның және біздің жағдайымызда тотықтырғыштың мүддесін білдіретін жиынтық үшін реакция жылуын (реакцияның тиісті жылуы кейіннен жану жылуы деп аталады) есептеу мақсатында, ал кейіннен бұрын аталған болжамды жолды пайдалана отырып, қызығушылық танытатын нақты жағдайларға осы есептелген жылу реакциясын түзеткеннен кейін пайдаланылуы мүмкін. Метанда жұмыс істейтін іштен жану қозғалтқышының пайдаланылған газдарының температурасын есептеу үшін келесі мәтінде сипатталған әдіснама осы процедураны неғұрлым түсінікті етуге мүмкіндік береді. Көмір мен мұнай сияқты отын түрлері үшін түзілудің жылуы туралы деректер әдетте тікелей қолжетімді емес және мұндай жағдайларда отынның осындай түрлері түзілудің жылуын есептеу үшін әрбір өнім мен реагенттердің (нөл, әрине, толық жанған жағдайда жану өнімдері үшін, сондай-ақ ауа үшін) жану жылуы пайдаланылуы мүмкін. Екінші жағынан, мұндай отын түрлерін пайдалану арқылы реакция жылуы тікелей не жоғары жану жылуын (ЖЖЖ), немесе реагенттер мен өнімдердің әрқайсысының төмен жану жылуын (ТЖЖ) түзудің орнына пайдалана отырып есептелуі мүмкін. Әрбір компонент үшін тек ЖЖЖ немесе ТЖЖ ретімен пайдалану керек екенін ескеріңіз. Егер ЖЖЖ деректері пайдаланылса, онда кез келген реагенттегі немесе өнім ағынындағы су буының жасырын жылуы реагенттің энтальпиясына немесе нақты жағдайға байланысты өнім ағындарына қосылуы тиіс.

2.1.1.1 Метанмен жұмыс істейтін ІЖҚ пайдаланылған газдарының температурасы

2.2-суретте көрсетілгендей, абсолюттік температура, T_{Fu} және қысым, P_{Fu} кезінде белгілі бір артық ауамен (яғни толық жануды қамтамасыз ету үшін оның стехиометриялық талабынан артық O_2 жеткізіп) абсолюттік температура, T_{Ox} және қысым, P_{Ox} кезіндегі таза CH_4 жануын қарастырайық.



2.2-СУРЕТ. Іштен жанатын қарапайым қозғалтқыш

Ауада O_2 мен N_2 басқа Ar және H_2O булары (салыстырмалы ылғалдылыққа байланысты) сияқты жиі назарға алынбайтын, бірақ жүйенің көптеген түрлерін қамтуы мүмкін басқа рекреациялық жүйе мәселелерін шешудің негізін салу үшін осы мысалда қарастырылатын басқа да компоненттер бар. Қысымда $PP_r < P_{fu}$ және PO_x) және белгісіз температурада TP_r қалған жану өнімдері есептелінеді.

Бірінші қадам толық жануды болжайтын жану өнімдерінің құрамын анықтаудан тұрады. Толық жану үшін жалпы стехиометриялық реакция келесідей жазылуы мүмкін:



Жүйеде бес элемент, атап айтқанда, C , O , H , N және Ar бар. Осы бес элемент бес белгісіз шешім үшін қажетті теңгерімнің бес элементарлық теңдеуін қамтамасыз етеді, атап айтқанда: ІЖҚ шығарылымдағы CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 және Ar шоғырлануы келесі тәсілмен өтеді: ІЖҚ келіп түсетін i түрлерінің әрбір берілген молін ұсынатын $\dot{M}_{вх,i}$, және ІЖҚ шығысында j , түрлерінің әрбір берілген молін ұсынатын $\dot{M}_{шыф,j}$.

C теңгерімі:

$$M_{кірм.,CH_4} = M_{шыф.,CO_2}$$

O_2 теңгерімі:

$$M_{кірм.,O_2} + 0,5 M_{кірм.,H_2O} = M_{шыф.,O_2} + M_{шыф.,CO_2} + 0,5 M_{шыф.,H_2O}$$

H_2 теңгерімі:

$$2M_{кірм.,CH_4} + M_{кірм.,H_2O} = M_{шыф.,H_2O}$$

N_2 теңгерімі:

$$M_{кірм.,N_2} = M_{шыф.,N_2}$$

Ar теңгерімі:

$$M_{кірм.,Ar} = M_{шыф.,Ar}$$

Енді $\dot{M}_{шыф.,j}$ әрбір мәнін теңгерімнің бес ең қарапайым теңдеуін шешу жолымен анықтауға болады.

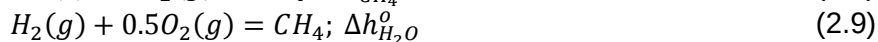
Егер фракциялық артық ауа λ тең болса, онда $M_{кірм.,CH_4}$ осы мәні және ауаның құрамы үшін $M_{кірм.}$ басқа мәндері үшін, 2.7-теңдеумен белгіленген стехиометрияны пайдаланумен i келесі тәсілмен көрсетілуі мүмкін:

$$\begin{aligned} M_{кірм.,O_2} &= 2 * (1 + \lambda) M_{кірм.,CH_4} \\ M_{кірм.,H_2O} &= y_{H_2O} M_{кірм.,O_2} / y_{O_2} \\ M_{кірм.,N_2} &= y_{N_2} M_{кірм.,O_2} / y_{O_2} \\ M_{кірм.,Ar} &= y_{Ar} M_{кірм.,O_2} / y_{Ar} \end{aligned}$$

мұндағы y_i^s – бұл ауадағы i түрлерінің мольдік фракциялары.

Келесі қадам ІЖҚ шығарылымдарының температурасын есептеуден тұрады. Түзілу реакциялары (элементтердің қалыпты күйінен бастап i қалыпты жағдайындағы әрбір қосылыстың түзілуіне дейін) және молярлық негізге қатысатын үш қосылысқа арналған түзілудің тиісті қалыпты жылуы Δh_{i0} (қалыпты күйді белгілеу үшін арнайы баптау белгісі o

пайдаланылады) болып табылады:



Алдыңғы теңдеулерде жақшаларға алынған s және g қысқа белгілері әрбір компоненттің фазасын белгілейді, яғни s қатты денеге және g газға арналған. 2.7-теңдеуін 2-ге көбейтілген 2.9 теңдеуі сомасынан 2.8-теңдеуін алу арқылы және 2.10-теңдеуінен алу мүмкін болғандықтан, 2.7-теңдеуіне арналған молярлық негіздегі реакцияның қалыпты жылуын ($\Delta h_{\text{реак}}$) келесі тәсілмен белгіленген:

$$\Delta h_{\text{реак}}^0 = 2(\Delta h_{H_2O}^0) + \Delta h_{CO_2}^0 - \Delta h_{CH_4}^0$$

$$\Delta H_{\text{реак}}^0 = M_{\text{кірм., } CH_4} \cdot (\Delta h_{\text{реак}}^0)$$

Болжамды жолы реагенттің CH_4 оның элементтеріне C және H_2 бірінші ыдырауынан, ал кейіннен олардың тиісті оксидтерге тотығуынан құралатын, алдыңғы $\Delta H_{\text{реак}}^0$ есептеулерінде көрсетілетініне назар аударыңыз. Сонымен қатар $\Delta H_{\text{реак}}^0$ алынған мәні энтальпия күй функциясы болып табылатындықтан, CH_4 тікелей тотығатын тәсіл үшін қолданылуы тиіс.

Одан кейін берілген ІЖҚ арналған реагенттердің және өнімдердің нақты шарттарын есепке алу үшін жол анықталады. Осы жол, 2.3-суретте көрсетілгендей, келесіден құралады:

1. Отын ағынын P_{Fu} және T_{fu} кезінде CH_4 пен P_{ox} және T_{ox} кезінде тотықтырғыш (ауа) ағынын $25^\circ C$ қалыпты температурасына дейін тұрақты қысыммен салқындату (немесе жағдайға байланысты қыздыру). Осы үдерістерге арналған энтальпияның тиісті өзгерістері = ΔH_{Fu1} және ΔH_{Ox1} .

2. Мінсіз арқылы диффузиялық үдеріске әкелетін, оның ішінара қысымы бар болжамды мінсіз мембрана арқылы ауаның өтуі жолымен ауа ағынынан жану үшін O_2 қажетті мөлшерін изотермиялық бөлу (қозғаушы күш үшін қысымның нөлдік ауытқуымен жұмыс істейді). Енді жеке шығарылған O_2 ауадағы оның парциалды қысымына тең қысымның астында орналасуда. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_2 .

3. Мінсіз турбиналар (немесе компрессорлар) арқылы өту жолымен қысымның CH_4 және 1 атм-ге дейін бөлінген O_2 изотермиялық төмендеуі (немесе жағдайға байланысты ұлғаюы). Осы үдерістерге арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_{Fu3} және ΔH_{Ox3} .

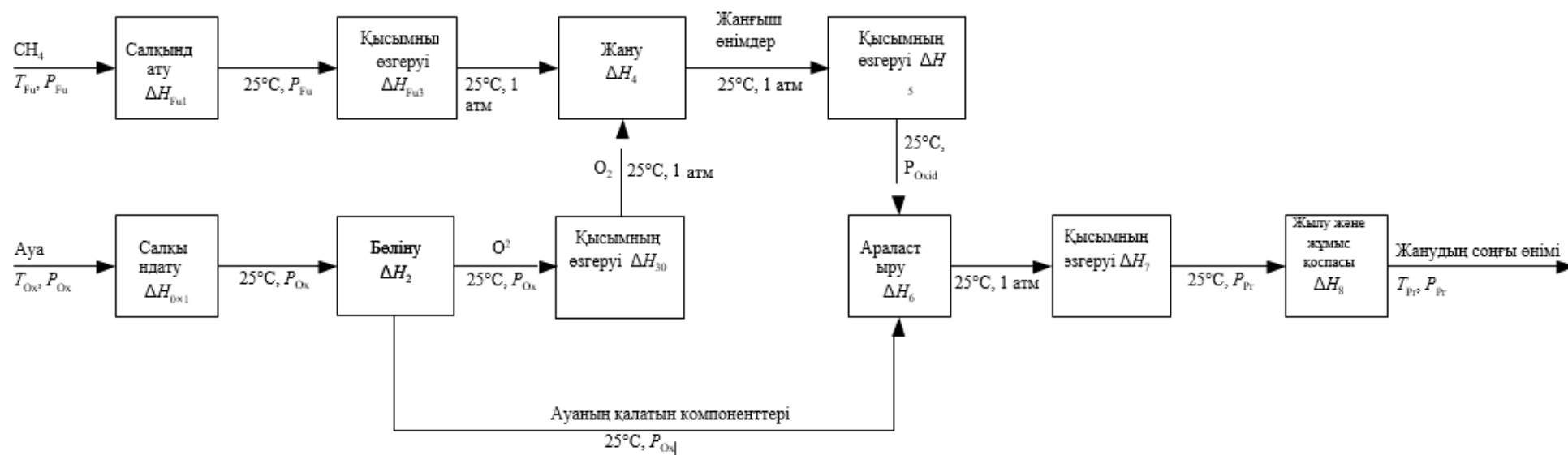
4. CH_4 барлық өнімдермен газды фазада орналасатын H_2O қоса алғанда 1 атм кезінде O_2 -мен изотермиялық әрекеттеседі. H_2O үшін гипотетикалық газ фазасын, егер оның барлығы 1 атм және $25^\circ C$ кезінде бу фазасында іс жүзінде орналаса алмаса ғана болжамдауға болады. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_4 .

5. Мінсіз турбинаны (немесе жағдайға байланысты компрессорды) пайдалана отырып, мембранадан шығатын әуе ағынының қалған компоненттерінің қысымына жану өнімдері қысымының изотермиялық өзгеруі. Осында да H_2O үшін гипотетикалық газ фазасын, егер оның барлығы осы жағдайларда бу фазасында іс жүзінде орналаса алмаса ғана болжамдауға болады. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_5 .

6. Мембранадан шығатын ауа ағынының қалған компоненттерімен жану өнімдерін изотермиялық араластыру. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_6 .

7. Мінсіз турбинаны (немесе жағдайға байланысты компрессорды) пайдалана отырып, ІЖҚ шығысындағы берілген қысымға P_{Pr} дейін осы қоспа қысымының изотермиялық өзгеруі. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_7 .

8. Нәтижесінде, осы алдыңғы жеті изотермиялық үдерісте қосылған немесе жойылған жылуды немесе жұмысты қоспа үшін температураға TP_r әкелетін жылу ретінде 7-кезеңде түзілген қоспаға тасымалдау. Осы үдеріске арналған энтальпияның тиісті өзгерісі = ΔH_8 .



2.3-сурет. ΔH_{Reak} есептеуге арналған болжамды жол

Бірінші заңды қолдану кезінде 1-7 қадамдарда айқындалған изотермиялық үдеріс үшін энтальпияның өзгеру сомасы келесідей жазылуы мүмкін:

$$\Delta H_{Fu1} + \Delta H_{Ox1} + \Delta H_2 + \Delta H_{Fu3} + \Delta H_{Ox3} + \Delta H_4 + \Delta H_5 + \Delta H_6 + \Delta H_7 = Q_{Net} - W_{S,Net} \quad (2.11)$$

Сол уақытта 8-қадамда:

$$Q_{Net} + W_{S,Net} = \Delta H_8 \quad (2.12)$$

Энтальпияның осы өзгерістерінің әрқайсысы барлық газ ағындары мінсіз газдық сипатқа сәйкес келеді деп болжай отырып, төменде келтірілген түрде беріледі, бұл практикалық ІЖҚ көпшілігіне ақылға қонымды жақындау болып табылады:

1. $\Delta H_{IOx} + \Delta H_{Fu1} = \sum_i \dot{M}_{\text{кірм},i} \int_{T_{Ox}}^{25+273} C_{pi} M_{wi} dT + \dot{M}_{\text{кірм},CH_4} \int_{T_{Fu}}^{25+273} C_{pCH_4} M_{wCH_4} dT$
мұндағы i төменгі индексі тотықтырғыштар ағынындағы әрбір түрді білдіреді, ал C_{pi} және M_{wi} – бұл i компонентінің массалық жылуы және молекулярлық массасы.
2. Мінсіз ерітінділер жағдайында ажырату үдерісі үшін $\Delta H_2 = 0$.
3. Мінсіз газдар үшін $\Delta H_3 = 0$, себебі ΔH тек температураның функциясы болып табылады, өйткені $dH = dU + d(pV) = M_w C_v dT + p R dT$, мұндағы M_w – бұл молекулярлық масса, C_v – бұл тұрақты көлемнің меншікті жылу массасы (Тфункциясы), p – бұл мольдер саны, ал R – бұл жеке мінсіз газды константа (масса бойынша).
4. $\Delta H_4 = \Delta H_{\text{реак}}$, біздің жағдайда булар формасындағы барлық реагенттер мен өнімдермен 25°C және 1 атм кезіндегі реакцияның қалыпты жылуы.
5. Мінсіз газдар үшін $\Delta H_5 = 0$, себебі ΔH тек температура функциясы болып табылады.
6. Мінсіз ерітінділер жағдайында араластыру үдерісі үшін $\Delta H_6 = 0$.
7. Мінсіз газдар үшін $\Delta H_7 = 0$, себебі ΔH тек температура функциясы болып табылады.

$$\Delta H_8 = \sum_j M_{\text{шығ},j} \int_{25+273}^{T_{Pr}} C_{pj} M_{wj} dT$$

мұндағы j төменгі индексі ІЖҚ шығарылымдарының әрбір түрін білдіреді, ал C_{pj} және M_{wj} – бұл j компонентінің массалық жылуы және молекулярлық массасы.

Осы алдыңғы мәндерді немесе ΔH_i әрбіреуіне арналған формулаларды қойсақ, 2.11 және 2.12 теңдеулерінде сегіз қадамның әрбіреуіне сәйкес келеді, ал екі теңдеуді қосқанда, біз мынаны аламыз:

$$\begin{aligned} & \sum_i \dot{M}_{\text{кірм},i} \int_{T_{Ox}}^{298^\circ} C_{pi} M_{wi} dT + \dot{M}_{\text{кірм},CH_4} \int_{T_{Fu}}^{298^\circ} C_{pCH_4} M_{wCH_4} dT \\ & + \Delta H_{\text{реак } 298^\circ-\text{де}} = - \sum_j \dot{M}_{\text{шығ},j} \int_{298^\circ}^{T_{Pr}} C_{pj} M_{wj} dT \end{aligned} \quad (2.13)$$

Енді T_{Pr} 2.13 теңдеуін санмен шешу жолымен анықталуы мүмкін, себебі меншікті жылу сыйымдылығы температураның функциялары болып табылады (әдетте полиномдар ретінде эмпирикалық арақатынас орнатады). СВ, ВМС және ВВС өзара әрекеттесу жөніндегі бірлескен басылымда (Чейз қос авт., 1985) әр түрлі температураларда энтальпиямен қатар олардың стандартты жағдайына сәйкес келетін әр түрдегі түзілу температурасы туралы кестелік деректер бар және осы жағдайда 2.14 теңдеуін қолдануға болады, мұнда төменгі индекс 1 көп компонентті отын қоспасы жағдайында әрбір компонентті ұсынады:

$$\sum_i M_{\text{кпрм},i} (\Delta h_i^o + h_i^{298^\circ \rightarrow T_{ox}}) + \sum_i M_{\text{кпрм},1} (\Delta h_i^o + h_1^{298^\circ \rightarrow T_F}) = \sum_i M_{\text{шыф},j} (\Delta h_j^o + h_j^{298^\circ \rightarrow T_{Pr}}) \quad (2.14)$$

мұндағы $\Delta h_i^o, \Delta h_1^o, \Delta h_j^o$ – бұл 298 К және $\Delta h_i^{298^\circ \rightarrow T_{ox}}$ шығыс температурасы кезінде тотықтырғыш, отын және өнімдер (элементтердің олардың қалыпты күйінде = 0) ағынының әрбір түрі түзілуінің нақты қалыпты жылытуы (кДж/кмоль), $\Delta h_1^{298^\circ \rightarrow T_F}, \Delta h_j^{298^\circ \rightarrow T_{Pr}}$ – бұл эталондық температурадан жоғары температурада әрбір түрдің ерекше энтальпиялары (кДж/кмоль).

2.9 теңдеуі бұ секілді H_2O тұзу жылуына сәйкес келгенін еске саламыз. Егер бұл үшін алдыңғы есептеулерде сұйықтық ретінде H_2O тұзу жылуы пайдаланылса, онда сұйықтықтан бұға өту үшін талап етілетін және ΔH сәйкес келетін фазаның өзгеру кезеңін қосу қажет.

2.1-мысал. Газдың мінсіз сипатына сүйене отырып, келесі құрамы мен шарттары бар биомассаның ауа үрлемелі газдандырғышынан алынған сингазды (тазартудан кейін) жағатын, ІЖҚ шығарынды газдардың құрамы мен температурасын есептеу (ластаушы заттардың толық жануы және түзілуін ескермегенде):

1. Сингаз: арақатынас кезінде $\text{H}_2 = 18\%$, мольді арақатынас кезінде $\text{CO} = 24\%$, мольді арақатынас кезінде $\text{CH}_4 = 3\%$, мольді арақатынас кезінде $\text{CO}_2 = 7\%$, мольді арақатынас кезінде $\text{N}_2 = 48\%$, 127°C және 50 бар қысымда қолжетімді.
2. Ауа: мольді арақатынас кезінде $\text{O}_2 = 21\%$, мольді арақатынас кезінде $\text{N}_2 = 79\%$ (Аг және H_2O есепке алусыз), 25°C және 5 бар қысымда қолжетімді.
3. Іштен жану қозғалтқышы: = 0,1 бар қысымның ауытқуы, ал жылу шығындары шамалы болатын артық ауаның 10% талап етіледі.

Шешім:

СВ, ВМС және ВВС өзара әрекеттесу жөніндегі бірлескен басылымның кестелері энтальпиялар мен түзілу жылуы үшін пайдаланылады және, осылайша, 2.14 теңдеуі есептеулерге арналған негіз ретінде отынның 100 мольін пайдалану кезінде қолданылатын болады. $\sum_1 M_{1f} (\Delta h_1^o + \Delta h_1^{298^\circ \rightarrow T_f})$ мәндерінің есептеуі 2.1-кестеде жалпыланады.

10 пайыздық асыру үшін талап етілетін тотықтырғыш (ауа) (және оның компоненттері) 2.2-кестеде келтірілген.

$\sum_1 M_{\text{кпрм},i} (\Delta h_1^o + \Delta h_1^{298^\circ \rightarrow T_{ox}})$ мәндерінің есептеуі 2.3-кестеде жалпыланады. Осы ерекше жағдайда энтальпия нөлге тең, себебі тотықтырғыш эталондық температурада болатынына, ал сол уақытта оларда компоненттер бола отырып, түзілудің нөлдік қызуы бар O_2 және N_2 ғана болуына назар аударыңыз. Әдетте ауада болатын H_2O буларында түзілудің нөлдік емес жылуы бар және оған енгізілуі тиіс.

2.2-кесте. Талап етілетін тотықтырғыш (ауа)

Жанғыш компонент	Химиялық реакция	Отын түрлерінің моль	Стехиометриялық O_2 қажет		10% артық ауа үшін O_2 қажет	Ауадағы N_2
			Отын түрі мольіне келетін моль	Жалпы моль	Жалпы, моль	
H_2	$\text{H}_2 + 0.5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$	18	0,5	9	9,9	37,24
CO	$\text{CO} + 0.5\text{O}_2 = \text{CO}_2$	24	0,5	12	13,2	49,66
CH_4	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	3	2	6	6,6	24,83
Барлығы		45,0		27,0	29,7	111,7

2.3-кесте. Қышқыл (ауа) энтальпиясы және түзілудің жылуы

Тотықтырғыш компонент	Мольдер (2.2-кестеде есептелінеді)	Моль %	Энтальпия 25°C		Түзілудің жылуы		Энтальпия + түзілудің жылуы
			кДж/моль	кДж	кДж/моль	кДж	кДж
O ₂	29,7	21	0	0	0	0	0
N ₂	111,7	79	0	0	0	0	0
Барлығы	141,4	100,0		0		0	0,0

2.4-кесте. Жану нәтижесінде пайда болған өнімдер

Жанғыш компонент	Химиялық реакция	Отын түрлерінің молі	Жану нәтижесінде пайда болатын H ₂ O		Жану нәтижесінде пайда болатын CO ₂	
			Отын түрінің моліне келетін моль	Жалпы моль	Отын түрінің моліне келетін моль	Жалпы моль
H ₂	H ₂ + 0.5O ₂ = H ₂ O	18	1	18	0	0
CO	CO + 0.5O ₂ = CO ₂	24	0	0	1	24
CH ₄	CH ₄ + 2O ₂ = CO ₂ + 2H ₂ O	3	2	6	1	3
Барлығы		45,0		24,0		27,0

Отында болатын үш жанғыш заттар үшін жану нәтижесінде пайда болатын өнім мөлшерінің есебі 2.4-кестеде келтірілген.

Содан кейін пайдаланылған газдағы әрбір компоненттің санын есептеу қысқаша түрде 2.5-кестеде анықталады.

2.5-кесте. Пайдаланылған газдың құрамы және түзілудің жылуы

Пайдаланылған газдың компоненті	Отында Моль	Жанудан кейін қалған ауадан Моль	Жану кезінде пайда болған Моль	Пайдаланылған газда барлығы		298 К кезінде түзілудің жылуы	
				Моль	Моль %	кДж/моль	кДж
H ₂ O	0	0	24,0	24	10,89	-241,8	-5803,8
CO ₂	7	0	27,0	34	15,42	-393,5	-13 379,8
O ₂	0	2,7	0	2,7	1,22	0	0
N ₂	48	111,7	0	159,7	72,46	0	0
Барлығы				220,4	100,00		-19 183,6

2.6-кесте. Пайдаланылған газдардың энтальпиясы және екі сынақ температурасында түзілудің жылуы

Пайдаланылған газдың компоненті	1900 К кезіндегі энтальпия		2000 К кезіндегі энтальпия		Энтальпия + ... К кезіндегі түзілудің жылуы	
					1900 К	2000 К
	кДж/моль	кДж	кДж/моль	кДж	кДж	кДж
H ₂ O	67,7	1 624,9	72,8	1 747,0	-4 178,9	-4 056,9
CO ₂	85,4	2 904,2	91,4	3 108,9	-10 475,5	-10 270,8
O ₂	55,4	149,6	59,2	159,8	149,6	159,8
N ₂	52,5	8 393,4	56,1	8 966,7	8 393,4	8 966,7
		13		13		
Барлығы		072,2		982,3	-6 111,3	-5 201,2

2.1.2 Термодинамиканың бірінші заңынан туындайтын тиімділік

Бірінші заң энергияны тұрақты күйдегі түрлендіру жүйесінен шығатын пайдалы өнім(дер)дегі энергия жүйеге келіп түсетін энергияға тең немесе аз болуы мүмкін, ал қалған бөлігі жарамсыз немесе қоршаған ортаға бос шығып кететінін білдіреді. «Жалпы үдеріс немесе қондырғының тиімділігі» ретінде белгілі бірінші заңның осындай шектеулері негізінде үдерістің немесе қондырғының тиімділігі жүйеге, өндірілетін пайдалы өнімдердегі энергияға түсетін энергияны түрлендіру тұрғысынан үдерістің қаншалықты тиімді екенін анықтауға мүмкіндік береді. Осы жалпы тиімділік өнім(дер)де бар энергияның жүйеге жеткізілетін энергияға қатынасы ретінде анықталады, және энергияны қалаған өнім(дер)ге түрлендіру жүйесіне жеткізілетін бір түрдегі энергияны түрлендірудің әр түрлі балама бағыттарын салыстыру үшін «өлшеу метрін» қамтамасыз етеді. Алайда осы тиімділіктің типі энергияны түрлендірудің әр түрлі баламалы түрлерін зерттеу кезінде, осы бөлімде төменде жазылғандай, өз кемшіліктері бар. 1-бөлімде көрсетілгендей, отын электр станциясына арналған жалпы тиімділік қондырғымен өндірілетін таза қуаттылықтың және отынның жылу сыйымдылығымен не болмаса отыннан алынатын энергия көрсеткіші ретінде оның ЖЖЖ, не оның ТЖЖ арақатынасымен көрсетіледі. Бірінші заңның тиімділігі электр станциясы жағдайында өнімнің белгілі бір мөлшерін, электр энергиясын өндіру үшін отынның құнын анықтау кезінде ерекше түрде пайдалы (әдетте энергия бірлігі негізінде немесе ЖЖЖ, не болмаса ТЖЖ тұрғысынан сатылады).

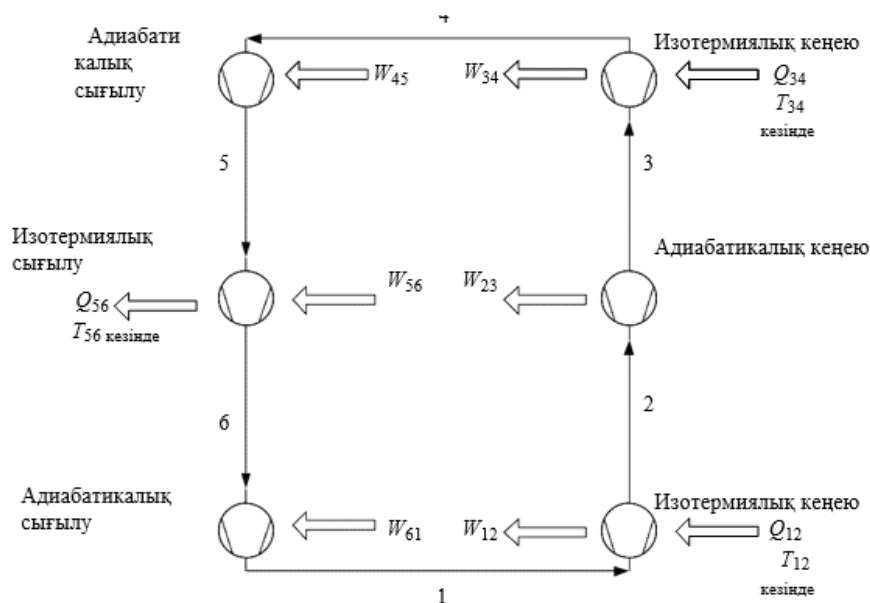
2.2 ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ ЕКІНШІ ЗАҢЫ

Нақты үдерістер тиімділігі 100% айтарлықтай болғанда, үдерістің жалпы тиімділігі үшін бірінші заңмен қарастырылған жоғарғы шегі 100% құрайды (мысалы, отынмен жұмыс істейтін қазіргі электростанция). Мәселен, отынмен жұмыс істейтін заманауи электростанцияның жалпы тиімділігі жанудың жоғарғы жылулығы (ЖЖЖ) негізінде белгіленгенде 40% шамасында болады. Қазіргі электростанцияларда отынның энергиясы алғашында жылу энергиясы түрінде шығады да, сосын жылу қозғалтқышының көмегімен осы жұмысты электр энергиясына айналдыратын электр генератормен білігі бірігетін жұмысқа айналады. Көмірмен байланысты энергияның айтарлықтай көлемі атмосфераға (сыртқы ортаға) шығарылады, осы тиімсіздіктің айтарлықтай бөлігі басты түрде жылу энергиясының қандай бөлігі жұмысқа айналатынына қатысты табиғатпен белгіленген шектеумен шартталады. Бұл шектеу жылу энергиясы жылу қозғалтқышында пайдаланылатын температураға байланысты болады. Температура жоғары болған сайын түрленудің тиімділігі жоғары болатыны анықталған. Аталған тиімділікке түрленбеген жылу энергиясы қоршаған ортаға шығарылатын кездегі температура да ықпал етеді. Температура төмен болған сайын **тиімділік жоғары** болады. Бұл бақылаулар энергияның айрықша қасиетінің тұжырымдамасына, санына

қосылатын сапаға алып келеді. Жүйеге келіп түсетін көлемге қарағанда жүйеден тұрақты күйде энергия көлемінің шығып кетуі сияқты табиғаттың энергияны (көлемін) осындай түрде түзілуіне жол бермейтініне ұқсас, табиғат жүйеден шығатын энергияның жалпы сапасының артуына да жол бермейді. Энергияның жалпы сапасы, соның ішінде жүйеден тұрақты күйде шығатын күйдегі энергия жүйеге келіп түсетін энергияның сапасынан жоғары бола алмайды. Сапаның нашарлау дәрежесі үдерістің қаншалықты қайтымсыз болуына байланысты болады. Энергия бірлігі негізінде (яғни сапа қарқынды қасиет ретінде анықталады) жүйеге келіп түсетін ($Q_{\text{кір.}}$) және шығатын ($Q_{\text{шығ.}}$) жылу энергиясының сапасы $\theta_{\text{кір.}}$ және $\theta_{\text{шығ.}}$ сияқты жүйеден шығатын (W_{net}) пайдалы жұмыстың сапасын θW сияқты анықтай отырып, екінші заң келесідей түрде жазыла алады

$$Q_{\text{кір.1}}\theta_{\text{кір.1}} + Q_{\text{кір.2}}\theta_{\text{кір.2}} + \dots \geq W_{\text{net}}\theta_W + (-Q_{\text{шығ.1}})\theta_{\text{шығ.1}} + (-Q_{\text{шығ.2}})\theta_{\text{шығ.2}} + \dots \quad (2.15)$$

$Q_{\text{шығ.1}}$, $Q_{\text{шығ.2}}$ саны... біздің конвенция бойынша жағымсыз сан болып табылатынына назар аударыңыз. Алдыңғы формуладағы теңдік тек гипотетикалық қайтымды жүйеге ғана қолданылады. Бұл жылу энергиясының сапасы (θ) газдың шартты температурасымен жылу үдерісті басқару үшін қолданылатын салқындату циклын жүргізу жолымен байланысты келесі қадамдармен жұмыс істейтін жұмыс сұйықтығы ретінде қайтымды жағдайдағы әрбір қадам болуы мүмкін (2.4-суретін қараңыз):



2.4-СУРЕТ. Шартты газды пайдалана отырып, бөлінетін жылумен шақырылатын салқындату циклы

1. Жылуды жұту Q_{12} және жұмыс өндірісі W_{12} кезінде T_{12} температура барысында газдың P_1 қысымынан 1-нүктедегі күйден қысымдағы 2-нүктеге дейінгі күйге изотермиялық кеңеюі.
2. Жұмыс өндірісі W_{23} және T_{34} температураға дейінгі салқындау үдерісі кезінде P_2 қысымында 2-нүктеге дейінгі күйден P_3 қысымындағы 3-нүктенің күйіне дейін адиабатикалық кеңеюі.
3. Жылуды жұту Q_{34} және жұмыс өндірісі W_{34} кезінде T_{34} температура арысында газдың P_3 қысымынан 3-нүктедегі күйден P_4 қысымдағы 4-нүктеге дейінгі күйге изотермиялық кеңеюі.
4. Жұмыс өндірісі W_{45} және T_{56} температураға дейінгі ысыту үдерісі кезінде P_4 қысымында 4-нүктедегі күйден P_5 қысымындағы 5-нүктенің күйіне дейін адиабатикалық сығылуы.

5. Жылуды босату Q_{56} және W_{56} жұмысты тұтыну кезінде 5-нүктедегі күйден 6-нүктедегі күйге дейінгі T_{56} температура барысында изотермиялық қысылуы.

6. Жұмысты тұтыну W_{61} кезінде циклды аяқтау үшін P_6 қысымындағы 6-нүктедегі күйден P_1 қысымындағы 1-нүктедегі күйге дейінгі адиабатикалық қысылуы.

Нүктелер күйлерінің шарттары қоршаған ортаның басқа жұмыс немесе жылу өзара әрекеттестігі жоқ болатындай, не $W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{45} + W_{56} + W_{61} + Q_{12} + Q_{34} + Q_{56} = 0$ болатындай етіп таңдалады. Салқындатудың осы циклы T_{34} температурасында одан жоғары температураға дейін Q_{34} және одан жоғары T_{12} температурадағы Q_{12} жылу ағынын пайдалану арқылы T_{56} жылу ағынын беретініне назар аударыңыз.

Бірінші заңды бүкіл жүйеге қолданған соң адиабатикалық қысылудан кейін газдың температурасы 6-нүктедегі күйден 1-нүктедегі күйге дейін T_{12} құрайтынын көруге болады.

Алдыңғы жұмыс және жылуды жеткізу/шығару қысымның және (немесе) жұмыс сұйықтығының температурасы жағдайында көрсетілуі мүмкін.

Шартты газ үшін (мольдік негізде), $PV = RuT$ және тұрақты T :

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} PdV = RuT_{12} \ln(P_1/P_2) \quad (2.16)$$

$$W_{12} = \int_{V_3}^{V_4} PdV = RuT_{34} \ln(P_3/P_4) \quad (2.17)$$

$$W_{12} = \int_{V_5}^{V_6} PdV = RuT_{56} \ln(P_5/P_6) \quad (2.18)$$

Бірінші заң негізінде және тұрақты T -мен:

$$Q_{12} = W_{12} = RuT_{12} \ln(P_1/P_2) \quad (2.19)$$

$$Q_{34} = W_{34} = RuT_{34} \ln(P_3/P_4) \quad (2.20)$$

$$Q_{56} = W_{56} = RuT_{56} \ln(P_5/P_6) \quad (2.21)$$

Себебі $(T_{12}T_{34}T_{56})/(T_{12}T_{34}T_{56}) = 1$,

$$\ln[(T_{12}T_{34}T_{56})/(T_{12}T_{34}T_{56})] = 0 \text{ or } \ln(T_{12}/T_{56}) + \ln(T_{34}/T_{12}) + \ln(T_{56}/T_{34}) = 0 \quad (2.22)$$

қайтымды адиабатикалық кеңеюді немесе қысылуды өтетін (6 және 1 күйдегі нүктелер арасындағы, 2 мен 3 күйдегі нүктелер арасындағы және 4 пен 5 күйдегі нүктелер арасындағы) тұрақты CP/CV бар шартты газ үшін 2.22 теңдеуі келесідей жазылуы мүмкін:

$$\ln(P_1/P_6) + \ln(P_3/P_2) + \ln(P_5/P_4) = 0$$

болғандықтан, қайта құрастырып

$$\ln(P_1/P_2) + \ln(P_3/P_4) + \ln(P_5/P_6) = 0$$

алмастырылатын 2.19-2.21 теңдеуін алдыңғыға:

$$\frac{Q_{12}}{T_{12}} + \frac{Q_{34}}{T_{34}} + \frac{Q_{56}}{T_{56}} = 0, \text{ or } \frac{Q_{12}}{T_{12}} + \frac{Q_{34}}{T_{34}} = -\frac{Q_{56}}{T_{56}} \quad (2.23)$$

Сонымен бірге қайтымсыз үдерістерді қарастыру барысында 2.23 теңдеуі келесідей

болады:

$$\frac{Q_{12}}{T_{12}} + \frac{Q_{34}}{T_{34}} \leq -\frac{Q_{56}}{T_{56}} \quad (2.24)$$

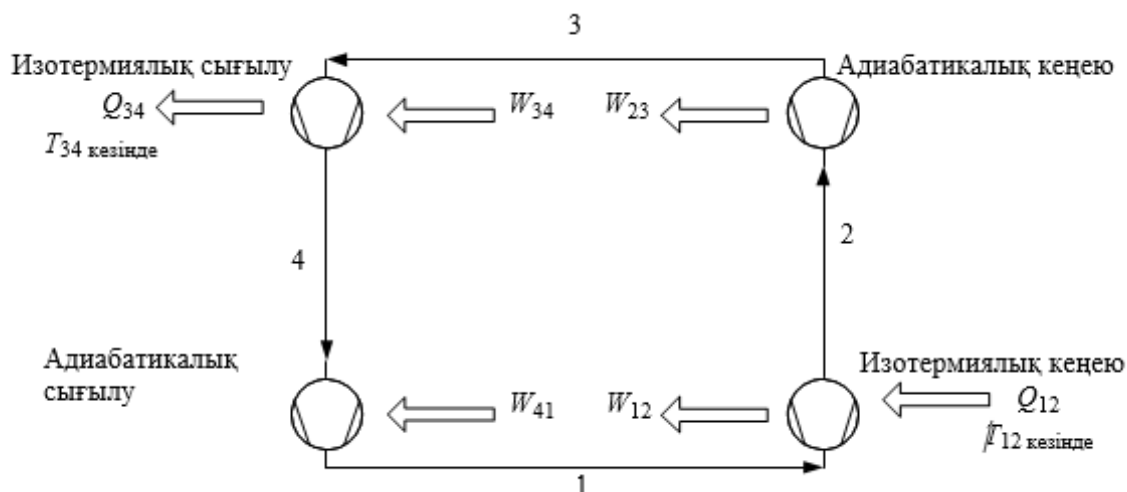
(2.15) формуласын (2.24) формуласымен салыстыра отырып, $\theta = -1/T$ екенін, яғни температура жоғары болған сайын жылу сапасы да жоғары болатынын көруге болады.

Энтропия тұрғысынан $Q_{\text{реверсивті}}$ – реверсивті түрде берілетін жылу, мұнда $\Delta S = \int \frac{dQ_{\text{реверсивті}}}{T}$ анықталады. (2.24) формуласы қайтымды жағдай үшін $\Delta S_{12} + \Delta S_{34} + \Delta S_{56} = 0$ сияқты жазыла алады, яғни энтропия қайтымды үдеріс үшін сақталады. ΔH сияқты ΔS да күйдің функциясы және оған ыңғайлы күй болып табылады әрі бастапқы күйді ақырғы күймен біріктіретін ыңғайлы қайтымды жол болған жағдайда шамалана алады.

$\Theta > 0$ бола алмайтындықтан, θ ең жоғарғы мәні 0 бола алады, ол (θW) жұмысына сәйкес келетін сапа болып табылады. Оны келесі қадамдардың көмегімен (2.5-суретте көрсетілген Карно циклына алып келетін) салқындату циклы үшін жасалғандай, жұмыс сұйықтығына арналған шартты газды пайдалана отырып, реверсивті жылу қозғалтқышына арналған ұқсас талдауды орындап тексеруге болады:

1. Q_{12} жылуды жұту және W_{12} жұмыс өндірісі кезінде T_{12} температурасында P_1 қысымындағы 1-нүктедегі күйден бастап P_2 қысымындағы 2-нүктедегі күйге дейін газдың изотермиялық кеңеюі.

2. W_{23} жұмыс өндірісінде және T_{34} температурасына дейін салқындатуда P_2 қысымындағы 2-нүктенің күйінен бастап P_3 қысымындағы 3-нүктенің күйіне дейін адиабатикалық кеңею.



2.5-СУРЕТ. Шартты газы бар циклды реверсивті жылу қозғалтқышы

3. Q_{34} жылу босағанда және W_{34} жұмыс тұтынғанда T_{34} температурасында 3-нүктедегі күйден 4-нүктедегі күйге дейін изотермиялық сығылу.

4. W_{41} жұмыс тұтынғанда P_4 қысымы кезінде қысымындағы 4-нүктедегі күйден P_1 қысымындағы 1-нүктедегі күйге дейін адиабатикалық сығылу.

Нүкте күйлерінің шарттары қоршаған ортаның басқа жұмыс немесе жылу әрекеттестігі жоқ болатындай, не $W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} + Q_{12} + Q_{34} = 0$ болатындай етіп таңдалады. Бірінші заңды бүкіл жүйеге қолданған соң 4-нүктедегі күйден 1-нүктедегі күйге дейінгі адиабатикалық сығылудан соң газдың температурасы T_{12} құрайтынын көруге болады.

Жұмыстың алдыңғы шарттары мен жылу жеткізу қысымның және (немесе) жұмыс сұйықтығының температурасы жағдайында көрсетілуі мүмкін. Шартты газ үшін (мольдік негізде) және тұрақты $T - PV = RuT$:

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} P dV = R_u T_{12} \ln(P_1/P_2)$$

$$W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} P dV = R_u T_{34} \ln(P_3/P_4)$$

Бірінші заң мен тұрақты Т негізінде:

$$Q_{12} = W_{12} = R_u T_{12} \ln(P_1/P_2) \quad (2.25)$$

$$Q_{34} = W_{34} = R_u T_{34} \ln(P_3/P_4) \quad (2.26)$$

Жылу қозғалтқышымен өндірілетін пайдалы жұмыс $W_{net} = W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41}$ беріледі. Әрі қарай, $T_{12}T_{34} = 1$ болғандықтан,

$$\ln[(T_{12}T_{34})/(T_{12}T_{34})] = 0 \text{ or}$$

$$\ln(T_{12}/T_{34}) + \ln(T_{12}/T_{34}) = 0 \text{ or} \quad (2.27)$$

Қайтымды адиабатикалық кеңею немесе сығылуға тап болатын (2 мен 3-нүкте күйлері арасында және 4 пен 1-нүкте күйлері арасында) C_P/C_V тұрақтысы бар шартты газ үшін 2.27 теңдеуі келесідей болып жазыла алады:

$$\ln(P_3/P_2) + \ln(P_1/P_4) = 0$$

$$\ln(P_1/P_2) + \ln(P_3/P_4) = 0$$

алмастырылатын 2.25 және 2.26 теңдеулерді алдыңғы теңдеуге қайта құрастырып, біз:

$$Q_{12}/T_{12} + Q_{34}/T_{34} = 0 \text{ or}$$

$$Q_{12}/T_{12} = -Q_{34}/T_{34} \quad (2.28)$$

аламыз. Сонымен бірге қайтымсыз үдерістерді қарастыру кезінде 2.28-теңдеуі келесідей болады:

$$Q_{12}/T_{12} \leq -Q_{34}/T_{34} \quad (2.29)$$

Біздің конвенцияға сәйкес, Q_{34} кері сан болып табылатынына назар аударыңыз. Осы формуланы (2.15) формуласымен салыстыра отырып, θ жұмыс үшін үлкен мәні бар екенін, яғни $\theta W = 0$, ал энтропия тұрғысынан реверсивті жылу қозғалтқышы үшін энтропия сақталады. Нақты (қайтымсыз) үдерістердің талдауы энтропияны сақтау қағидасын, сосын түзетуді (мысалы, компрессорлар, турбиналар және басқа да жылу қозғалтқыштары жағдайында эмпирикалық корреляциялық изентропикалық ПӘК), үдерістен шығу кезінде жұмыстың нақты жағдайларын және көрсеткіштерін қолдана отырып кіруінде шарттардың берілген жиынтығы үшін анықталуы мүмкін.

Реверсивті жылу қозғалтқышының тиімділігі (Карно ПӘК ретінде танымал), η , $W_{net} = Q_{12} + Q_{34}$ және 2.28 теңдеуі сияқты қозғалтқышпен берілетін әрі қабылданбайтын жылу тұрғысынан өндірілетін таза жұмысты көрсету үшін бірінші заңды қолдану жолымен есептелуі мүмкін:

$$\eta_{\text{Карно}} = W_{net}/Q_{12} = \frac{(Q_{12} + Q_{34})}{Q_{12}} = 1 - T_{34}/T_{12} \quad (2.30)$$

Жоғарыда келтірілген мысалдардан мынадай қорытынды жасауға болады:

1. Жылу одан төмен температурадан одан жоғары температураға беріле алады, бірақ сосын энергияның жалпы сапасы көтерілмес үшін жоғарырақ температурада берілуі тиіс, сапаның төмендеу көлемі үдерістің қаншалықты қайтымсыз болуына байланысты

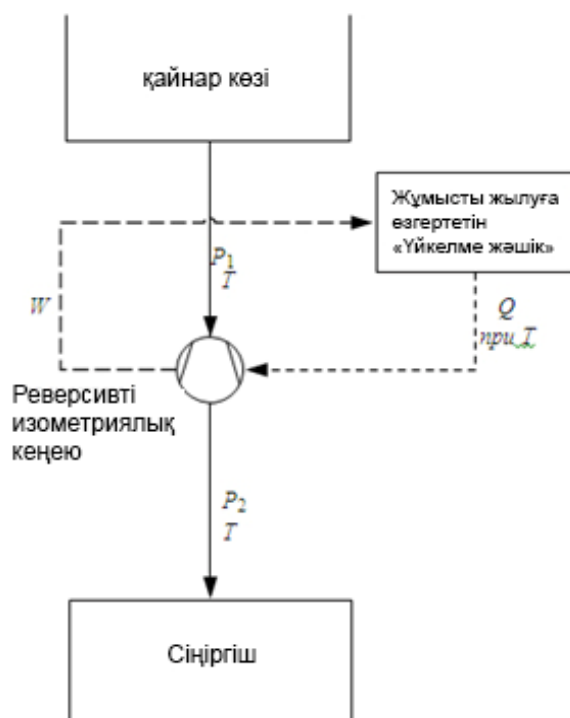
болады.

2. Жұмыс жылудың бөлігін түрлендіру жолымен жылудан жасала алады, ал қалған жылу төмендетілген сапамен қабылданбауы тиіс, осылайша, энергияның жалпы сапасы көтерілмес үшін сапаның төмендеу көлемі тағы да жылу қозғалтқышының қаншалықты реверсивті болмауына байланысты болады.

3. Реверсивті жылу қозғалтқышының тиімділігі, 2.30 теңдеуінде көрсетілгендей, жұмыс сұйықтығына байланысты болмайды, тек қозғалтқышқа жылу берілетін температураға және қозғалтқышпен жылу шығарылатын температураға байланысты болады. Бұл тиімділік, яғни Карно циклының КПД жылу жұтыла алатын максималды температурада (яғни жылу көзі сияқты температурада) және жылу апарыла алатын минималды температурада (яғни жылу жұтқыш сияқты температурада) жұмыс істеген жағдайда жылу қозғалтқышы тиімділігінің жоғарғы шегін білдіреді.

2.2.1 Сапаның төмендеуі және энтропияның туындауы

Қайтымсыз үдеріс барысында жұмысты орындау үшін жоғалтылған әлеует эквивалентті энтропияның генерациялануымен көрсетіле алатын энергияның сапасының төмендеуіне алып келеді. P_1 қысымынан бастап P_2 қысымына дейін шартты газдың «еркін кеңеюін» қарастырайық. 2.6-суретте көрсетілгендей, бұл кеңею үдерісі тұрақты T температурасында және W_s жұмысын өндіретін $Q_{\text{реверсивті}}$ жылуын жұтатын реверсивті турбинада изотермиялық жұмысты алғаш рет іске асыратын газ ретінде модельденуі мүмкін. Сосын W_s жұмысы үйкеліс арқылы жылуға айналып, тиісті жылу $Q_{\text{реверсивті}}$ мәніне тең болуы тиіс.



2.6-СУРЕТ. Газдың еркін кеңеюі кезіндегі энтропияның генерациялануы

Сосын осы жылу қайтадан реверсивті турбинаға беріледі. Таза нәтиже ешқандай жұмыс үдеріспен, яғни еркін кеңеюмен өндірілмейтіндігінде. Сапаның үйкеліспен тиісінше төмендеуі (суретте көрсетілген «үйкелме жәшікте»), $\theta W = 0$, $\theta T = -1/T$ және $\Delta S = Q_{\text{реверсивті}}/T$ екенін көрсете отырып, келесіні құрайды:

$$W_s \theta W - Q_{\text{реверсивті}} \theta T = -Q_{\text{реверсивті}} \theta T = \frac{Q_{\text{реверсивті}}}{T} = \Delta S$$

Демек энтропияның генерациялануы энергия сапасының төмендеу шамасы болып табылады. Әрі қарай осы мысал үшін $Q_{\text{реверсивті}} = WS = RuT \ln P_1 P_2$ және осы қайтымсыз үдеріс үшін энтропияның генерациялануы $\Delta S = Ru \ln P_1 P_2$. Бұл ΔS мәні қандай жолмен, яғни жылу берілім үшін реверсивті қадамды әзірлеу жолымен сыртқы ортамен жылулық өзара әрекеттесуі болмағанда да есептеле алады. Жоғалтылған жұмыс $T\Delta S$ түрінде болады.

Басқа мысал жылудың жоғарырақ T_1 температурасынан төменірек T_2 температурасына қайтымсыз тасымалдау болып табылады және энергияның сапасын жоғалтуы қайтадан энтропияның генерациялануымен дәлелдене алады,

$$\Delta S = Q(\theta_1 - \theta_2) = Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

2.2.2. Термодинамиканың екінші заңын талдау

Термодинамиканың екінші заңы жұмыс өндірісі үшін энергия көзінің немесе материалды ағынның пайдалылығын бағалау үшін қолданылуы мүмкін. Ол тағы да тиімсіздіктің салаларын және, осылайша, жүйенің жалпы тиімділігін айтарлықтай арттыруды мүмкін ететін жүйелерді өзгертетін салаларын сандық анықтау үшін талдау барысында қолданыла алады. Талдау сыртқы ортамен термодинамикалық тепе-теңдікке келтірілген ағындардың ішіндегі әрқайсысының (кіретін, шығатын және ішкі жүйенің) жұмысының максималды әлеуетін есептеуден тұрады. Осылайша, жүйе шеңберінде әрбір негізгі жабдық бойынша ең аз шамасына жеткізілген жұмыс әлеуетінің көлемі де анықталады.

Біз жұмысты тұрақты T_1 температурасы барысында жылу көзімен қамтамасыз етілетін Q жылу энергиясынан өндіргіміз келеді және жылудан әкету тұрақты T_s температурасы барысында қол жетімді деп болжайық. Бұл міндет үшін жылу қозғалтқышында пайдаланылатын материалдармен орнатылған шектеулерден T_2 ($T_2 < T_1$) жұмыс сұйықтығының максималды температурасы бар Карно жылу қозғалтқышы қолжетімді. Осы қозғалтқышпен Q жылудың W жұмысқа түрлену тиімділігі, онда

$$W = Q \left(1 - \frac{T_s}{T_2} \right)$$

Осы T_2 температурасы төмен болған сайын жылудың төменгі көлемі жұмысқа түрленеді және бұл T_1 бастап T_2 дейін температураның төмендеуімен байланысты жылу энергиясының сапасын жоғалтумен байланысты болады. T_1 барысында T_2 барысында түрленбеген жылуды алдыңғы жылу қозғалтқышына лақтыра отырып, жылуды қабылдай алатын қосымша жылу қозғалтқышы туралы болжам жасағанда теория жүзінде қосымша жұмыс жүргізіле алады, жылу қозғалтқышында материалдық шектеулерден тиімсіздік саласы болып табылатын одан төменірек T_2 температурасында жылуды пайдалану есебінен жоғалтылған жұмыс келесі түрде беріледі:

$$W_{\text{жоғалу}} = QT_s \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

Нақты жағдайларда жылу көзі немесе жылу жұтқыш, күн не ядролық энергия жағдайындағы энергия көзін санамағанда материалды ағындар ретінде болады. Жылу көзінен жұмысты алу үшін жылу ағынында жылуды әкету ағынына қарағанда сапасы одан жоғары ішкі энергияны қамтуы тиіс. Материалды ағын өзімен бір сыңарлы қаныққан буды немесе қаныққан сұйықтықты білдірмесе, оның температурасы бойынша өлшенген материал ағынының ішкі энергиясы жылудың кемуіне немесе қосылуына (яғни ол жылу көзі не жылу жұтқыш болып табылуына) байланысты төмендеп не болмаса артып отырады.

Осылайша, жылу көзі немесе жылу жұтқыштар сирек тұрақты температурада қалады және бұл аспектіні үдерістерді термодинамикалық талдау барысында ескеру қажет. Заманауи технология жұмысты тікелей ішкі энергияның келесі түрлерінен: сезімтал және жасырын, сонымен бірге 11-тарауда сипатталғандай, отын энергиясын пайдалану арқылы химиялық түрінен алуды мүмкін етеді. Жылу көзінің ағыны жылу жұтқышының ағынынан асатын қысым астында болғанда ішкі энергиясы оның температурасы кеңею кезінде ағынға

жылу энергиясы беріледі ме немесе қанша жылу энергиясы берілетініне байланысты тиісінше төмендей отырып, жұмысқа түрленіп, жұмыс бастапқы ағынның өзін кеңейту жолымен өндірілуі мүмкін (жылу жұтқыш ағынының қысымына дейін). Жылу көзі және жылу жұтқыштарының ағындары арасындағы қысымның жалпы градиентін пайдаланудан басқа құрамдастардың парциалдық қысымы жұмыс өндірісі үшін пайдаланыла алады және тағы да осы жұмысқа түрленетін ішкі энергия.

Ағынның жұмыс әлеуетін өлшейтін қасиет эксергия деп аталады, бірақ эксергияның қарапайым анықтамасынан айырмашылығы бұл кітапта максималды жұмыс әлеуеті оның температурасы қоршаған (сыртқы) ортаның температурасынан төмен болғанда ағыннан өндірілуі мүмкін жұмысты қосу үшін анықталады. Мұндай жағдайларда жылу қозғалтқышы қоршаған ортаны жылу көзі ретінде, ал оның ағыны жұмыс әлеуетін сандық бағалау үшін жылуды әкету ретінде пайдаланады деп болжанады. Осылайша, сығылған табиғи газ сияқты мұндай ағындардың тоңазытқыш әлеуетін ескеруге болады (электр станциясына отын ретінде жеткізілгенде). Сығылған табиғи газдың тоңазытқыш әлеуетін пайдалану мүмкіндігі компрессордың жұмысын қысқарту мақсатында әрі, осылайша, қозғалтқыштың КПД (және пайдалы қуатын) қысқарту мақсатында газ турбинының сіңіретін ауасын салқындатуында болуы мүмкін.

Берілген құрамы бар материалдың тұрақты ағынының эксергиясы T температурасы мен P қысымында (кинетикалық және әлеуетті энергетикалық әсерлері түсірілген жағдайда) T_0 температурасы мен P_0 қысымына (қоршаған орта) қатысты келесідей етіп анықтала алады:

$$= W_{\text{жыл.}} + W_{\text{кеңею}} + W_{\text{тотығу}} + W_{\text{дифф}} \quad (2.31)$$

онда $W_{\text{жыл.}}$ – бұл ағын температурасы (T температурасында) және қоршаған орта температурасы (T_0 температурасында) арасында жұмыс істейтін жылу қозғалтқышының көмегімен алынатын қайтымды жұмыс, $W_{\text{кеңею}}$ – T_0 температурасында және P қысымында қоршаған ортаның P_0 қысымына дейін изотермиялық кеңею жолымен (алдыңғы қадамда T_0 температурасына дейін теңестірген соң) алына алатын қайтымды жұмыс, $W_{\text{тотығу}}$ – бұл жанғыш заттардың толық тотығуы үшін қоршаған ауаның жеткілікті мөлшерімен ағын ішінде бола алатын жанғыш заттардың қайтымды изотермиялық тотығуы жолымен өндіріле алатын (алдыңғы қадамда T_0 температурасын теңестірген соң және P_0 қысымына дейін кеңейткен соң) жұмыс және $W_{\text{дифф}}$ – қоршаған ортаға мембрана арқылы P_i парциалды қысымы барысында бола алатын әрбір i құрамдасының реверсивті диффузияға ұшырау жолымен алынатын қосымша жұмыс.

2.31 теңдеуінің сол жағындағы бірінші термин 2.30. теңдеуі Карно циклының КПД негізінде алынуы мүмкін максималды жұмысты анықтайды және қоршаған ортамен тепе-теңдікті орнату кезінде фазалық өзгерістерге тап болатын құрамында буы бар ағындардың жұмыс әлеуетін қамтуы тиіс. Бұл термин ($W_{\text{жыл.}}$) келесідей болып жазыла алады:

$$W_{\text{жыл.}} = - \int_T^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dH(T)$$

онда энтальпия $H(T)$ температурасының функциясы ретінде маңызды және жасырын энергияны қоса алады. Егер $T < T_0$, онда $W_{\text{жыл.}}$ үшін алдыңғы формула бұрынғыдай өзімен реверсивті жылу қозғалтқышымен ағынға апарылатын dH жылуды білдіретінін дәлелдеуге болады әрі қоршаған ортадан жылуды жұту кезінде ағынның тоңазытқыш әлеуетін ескереді.

T_0 дейін теңестіруден соң ағын изотермиялық қысымды төмендету кезінде фазаның әрі қарай өзгеруіне тап болады, сондықтан 2.31 теңдеуінің сол жағындағы екінші термин, бірінші заңды қолдана отырып, келесідей жазыла алады:

$$W_{\text{кеңею}} = - \Delta H_{\text{кеңею}} + Q_{\text{реверсивті}}$$

Себебі $\Delta S = Q_{\text{реверсивті}}/T_0$, біздің алатынымыз:

$$W_{\text{кеңею}} = -\Delta H_{\text{кеңею}} + T_0 \Delta S_{\text{кеңею}}$$

Онда $\Delta H_{\text{кеңею}}$ және $\Delta S_{\text{кеңею}}$ ағынның осы изотермиялық кеңеюі үшін энтальпия және энтропияның тиісті өзгерістерін білдіреді, себебі оның қысымы реверсивті түрде қоршаған ортаның қысымына дейін төмендейді.

$\Delta h_{\text{кеңею}}$ және $\Delta S_{\text{кеңею}}$ күйдің функциялары бола отырып, келесі жолмен анықтала алады:

$$\begin{aligned} H_{\text{expan}} &= H_{P_0} - H_P \\ S_{\text{expan}} &= S_{P_0} - S_P \end{aligned}$$

онда H_{P_0} және S_{P_0} – бұл кеңеюден кейінгі P_0 қысымына дейінгі энтальпия және энтропия, ал H_P және S_P – бұл кеңею алдындағы энтальпия мен энтропия, яғни бастапқы P қысымы, барлығы T_0 температурасы барысында. Назар аударыңыз, фазасы өзгертілмеген шартты газ үшін молярлы ағын кезінде,

$$W_{\text{expan}} = -R_u T_0 \ln\left(\frac{P_0}{P}\right)$$

Қоршаған ортамен ағынның тепе-теңдігіне барар жолдағы келесі қадам қоршаған ауаның стехиометриялық санын пайдалана отырып, ағында болатын T_0 және P_0 жанғыш заттар кезінде толық жану үшін изотермиялық тотығудың реверсивті реакциясы болып табылады.

Осы реакция нәтижесінде өндіріле алатын тиісті жұмыс келесі мәнмен анықталады ($W_{\text{кеңею}}$ ұқсас H және S байланысты) болуы мүмкін немесе отын элементтеріне арналған бөлімдегі 11-тарауды қараңыз):

$$W_{\text{тотығу}} = -\Delta H_{\text{тотығу}} + T_0 \Delta S_{\text{тотығу}}$$

Гибстің еркін энергиясы G сияқты $G = H - TS$ қасиеттердің комбинациясын анықтау (күй функциясы),

$$W_{\text{тотығу}} = -\Delta G_{\text{тотығу}}$$

онда $\Delta G_{\text{тотығу}}$ – жанғыш заттардың изотермиялық тотығу реакциясы үшін (айталық, реакциясы барысында $aA + bBC + dD$) T_0 және P_0 кезінде. $\Delta g_{\text{тотығу}}$ ағынның молярлы негізіндегі арақатынасы арқылы анықтала алады:

$$\Delta G_{\text{тотығу}} = \Delta G_{\text{тотығу}}^0 + R_u T_0 \ln\left(\frac{\int_C^c \int_D^d}{\int_A^a \int_B^b}\right)$$

мұнда $f_i = i$ түрінің ұшпалығы, бұл жерде әрбір түрі үшін ұшпалықтың стандартты күйі біртұтас ретінде қабылданады. Кестелік деректер СВ, ВМС және ВВС өзара әрекеттесу бойынша бірлескен басылымда (Чейз бірлескен авторлармен бірге, 1985ж.) осы тарауда жоғарыда сипатталғандай, ΔH^0 ұқсас ΔG^0 есептеу үшін пайдалануы мүмкін түрлі температураларда стандартты күйлеріне сәйкес келетін алуан түрлі түрлерінің термодинамикалық әлеуетін түзу үшін берілген. Ұшпалық = 1 болатын оң жақтағы өрнектің екінші мүшесі стандартты күйден айырмашылығы бар құрамдастардың әрқайсысының нақты күйіне түзету жасайды. Шартты газ үшін i құрамдасының P_i – парциалды қысым

$$\Delta G_{\text{тотығу}} = \Delta G_{\text{тотығу}}^0 + R_u T_0 \ln\left(\frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b}\right)$$

Қоршаған ортамен ағын тепе-теңдігін орнатуға арналған жолда соңғы қадам T^0 температурасында және P^0 жалпы қысымында i құрамдасын гипотетикалық қайтымды мембранадан оның қоршаған ортадағы парциалды қысымына қайтымды изотермиялық

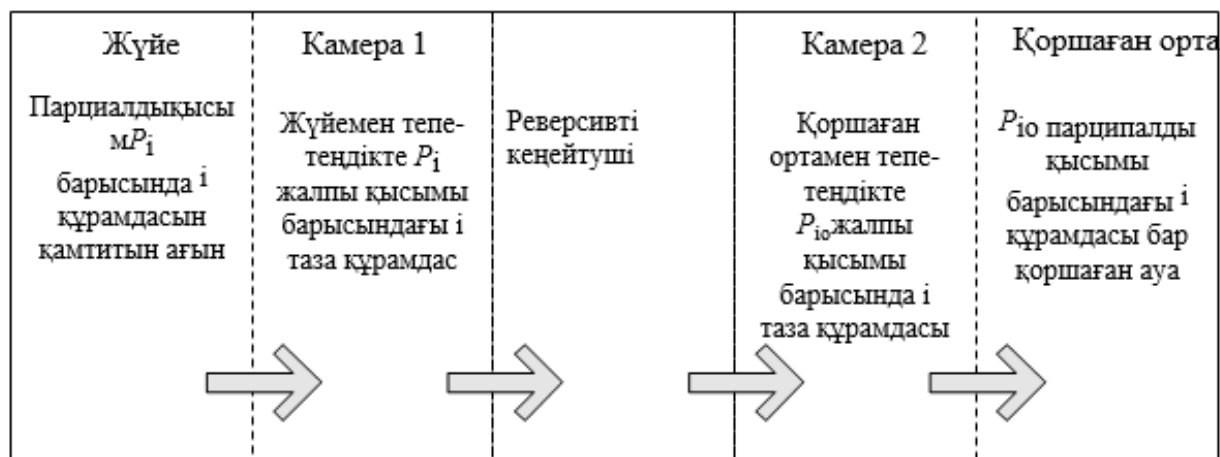
кеңеюі болып табылады, P_{i0} , яғни 2.7. суретте көрсетілгендей, құрамдасқа ағын мен камера арасындағы селективті мембрана арқылы реверсивті алмасуды іске асыруды мүмкін ете отырып, дәл солай қоршаған орта мен екінші камера арасында да реверсивті алмасуды іске асыруды мүмкін етеді, екі камера да екі қысым арасында реверсивті тәртіпте жұмыс істейтін турбо кеңейтушімен біріктірілген:

$$W_{\text{дифф}} = -\Delta G_{\text{дифф}}$$

назар аударыңыз, молярлы ағын негізінде фазаны өзгертпей i құрамдасын қамтитын шартты газ үшін

$$W_{\text{дифф}} = - \sum_i R_u T_0 \ln \left(\frac{P_{i0}}{P_i} \right)$$

Осы типті кеңеюдің негізгі құрамдастары екі құрамдас болып табылады, H_2O және CO_2 . O_2 және N_2 жұптары да кеңейе алады, бірақ жұмыстың өндірісінде кері бағытта, себебі осы құрамдастар үшін жүйе мен қоршаған орта арасында концентрацияградиенті болуы мүмкін (қоршаған ортадағы концентрация әдеттегідей жоғары). Бірақ мұндай ой бұрыс нәтижелерге алып келуі мүмкін немесе циклды жетілдіру үшін пайдасыз бағыт нұсқауы мүмкін.



2.7-СУРЕТ. Құрамдастың мембрана арқылы диффузиядан соң қайтымды кеңеюі

Жүйедегі әрбір жабдықтың энергиясын немесе максималды жұмыс әлеуетін жою және жүйеден максималды жұмыс әлеуетінен шығатын ағындармен бөлінген максималды жұмыс әлеуеті тиімсіздіктің көздерін анықтап, жүйенің жақсартылған конфигурациясына қол жеткізу үшін жетілдіруді енгізу бойынша басшылықты қамтамасыз етеді. Максималды жұмыс әлеуетінің төрт құрамдасының әрқайсысы жеке таныс екенін ескере отырып, жүйені конфигурациялау үшін қажетті өзгерістер мен түрленулердің нақты түрін анықтауда көмек көрсетілуі мүмкін. Осылайша, жүйенің жалпы тиімділігін барынша арттыруға бағытталған жаңа конфигурациялар анықталуы мүмкін. Бірақ конфигурацияның қарапайымдылығы осы жетілдірілген құрылымдарды өзірлеу барысында өнеркәсіптің капиталды шығындарына және үдерістің басқарылуына қатер төндірмес үшін қолдауды қажет ететін маңызды фактор болып табылады.

2.2.3. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарынан туындайтын тиімділік

Жоғарыда көрсетілген тиімділік іс жүзінде тиімділіктің бірінші заңы болып табылады, себебі ол жүйеге энергияны беру жылдамдығынан жүйеден алынатын (электр станциясына арналған электр энергиясы түрінде) пайдалы энергияның жылдамдығына жәй қатысын білдіретін термодинамиканың бірінші заңының негізінде анықталады. Тиімділіктің осы түрінің

кемшіліктері оның жүйеге берілетін энергияның сапасын ескермеуінде, тұтынатын энергияның алуан түрлерін (сапа тұрғысынан) салыстыру үшін төл өлшеу метрмен қамтамасыз етпейді және тиімділіктің шынайы жоғарғы шегімен қамтамасыз етпейді. Жүйені реверсивті пайдалану жағдайында алынатын пайдалы энергияның жылдамдығына қатысын білдіретін тиімділіктің екінші заңы әсіресе энергияның түрленуінің альтернативті жолдарын зерттеу барысында сәйкес болып табылады. Ол келесідей болып анықталады:

$$\eta_{II} = \frac{W_{\text{нақты}}}{W_{\text{жыл.}} + W_{\text{кеңею}} + W_{\text{тотығу}} + W_{\text{дифф}}} = \frac{W_{\text{нақты}}}{\dot{Q}} \quad (2.32)$$

2.2- мысал. Жылуды әкету температурасы тұрақты 15°C деңгейінде қалғанда (яғни жылу көзі де, жылу жұтқыш та тұрақты температурада жылуды беретін және жұтатын шексіз резервуар болып табылатын жағдайда), 100 МВт электр энергиясын генерациялайтын үдеріс үшін тұрақты 500°C температурасында қол жетімді 300 МДж/с жылу энергиясын түрлендіру жолымен бірінші және екінші заңның тиімділігін есептеңіз.

Шешім

Жылу көзі $Q \approx 300$ МДж/с

Жылу көзінің температурасы $T_{\text{көз}} = 500^\circ\text{C} = 773,15$ К

Жылу жұтқыштың температурасы $T_{\text{жұтқыш}} = 15^\circ\text{C} = 288,15$ К

Қуаттылық $W_{\text{нақты}} = 100$ МВт

Бұл жағдайда өндірілетін максималды жұмыс көлемі Карно циклының КПД берілетін жылу көзі мен жылу жұтқыштың арасында жұмыс істейтін мінсіз жылу қозғалтқышымен беріледі, яғни, 2.32 теңдеуіне сілтеме жасай отырып, $W_{\text{кеңею}} = W_{\text{тотығу}} = W_{\text{дифф}} = 0$ аталған жағдай үшін: $\eta_{\text{Карно}} = 1 - T_{\text{жұтқыш}}/T_{\text{көз}} = 0,6273$.

Тиімділіктің бірінші заңы: $\eta_I W_{\text{нақты}} \dot{Q} = \frac{100}{300} = 33.33\%$

Тиімділіктің екінші заңы: $\eta_{II} = \frac{W_{\text{нақты}}}{\dot{Q} \eta_{\text{Карно}}} = \eta_{I \text{ заң}} / \eta_{\text{Карно}} = 33.33\% / 0.6273 = 53.14\%$

2.3 ЖАНУ РЕАКЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ГИББСТЫҢ ЖИЫНТЫҚ ЭНЕРГИЯСЫН АЗАЙТУ

Термодинамика сонымен бірге, олар термодинамикалық тепе-теңдікте деп болжам жасауға болатын болса, реакция өнімдерінің құрамын бағалау барысында қолданыла алады. Энергетикалық салада маңызды реакциялар жану реакциялары болып табылады. Көптеген заманауи қолданыстарда қазба отынында және биомассадағы химиялық байланыстың энергиясы ретінде құрамындағы энергия жағу жолымен пайдаланылады. Жағу негізінде бұл көздер Құрама Штаттарында ағымдағы энергиямен жабдықтауды 90% дейін қамтамасыз етеді.

Жану үдерісінде бөлінетін жылу энергиясы, тамақты әзірлеу және суды жылыту үшін қолданылатын жылу сияқты тұрмыстық энергетикалық қажеттіліктерді қанағаттандырудан басқа, өндіріс пен өнеркәсіпте, мысалы, қазандықтар мен пештерде қолданылады. Олсонымен бірге турбинаны бұру үшін, мысалы, буды генерациялау, автоматтық қозғалтқышта сияқты механикалық қозғалысты жасау жолымен, авиациялық қозғалтқыштағы күш, немесе жерүсті газ турбинасында сияқты біліктегі қуат сияқты жылу қозғалтқышының көмегімен білікте қуатқа түрлене алады.

Жану үдерісінде бөлінетін, қазба отынында және биомассадан алынған отынның құрамындағы химиялық энергия ауа құрамындағы O_2 бірге экзотермиялық реакциялардан тұрады. Жану үдерісін жанудың ақырғы өнімдерін – CO_2 және H_2O құрап, тотығу үдерісін аяқтау үшін шамамен 1000 реакцияны қамтиды. Бірақ жану үдерісінде түрлі реакциялар нәтижесінде сонымен бірге CO , көмірсутектер, оттегілі органикалық қоспалар, күйе, NO_x и SO_x сияқты ластаушылар түзіледі. Мұндай ластаушылардың саны тиімділік есептемелерінің тұрғысынан үлкен емес және болмашы аз, бірақ қоршаған ортаның тұрғысынан айтарлықтай

болады. Осы ластаушылардың ішінен бірқатарын концентрациялауды болжау үшін реакциялардың кинетикасына негізделген модельдер әзірленген және әзірленуде. Қалыптастыру механизмі өзіне қарапайым реакциялардың біршамасын және аралық түрлерінің көпшілігін қамтиды. Түрлі реакциялар химиялық тепе-теңдікке қол жеткізеді деген болжам дәлелденген жағдайда, реакцияның жылдамдығы барысында жақсы жақындау және уақыттың жеткілікті болуы, ластаушылардың концентрациясын қосқанда, алуан түрлерінің концентрациясын болжау барысында екінші заң қолданылуы мүмкін. Бірінші қадам ішкі жану қозғалтқыштарының суағарында бола алатын түрлі химиялық түрлерін (қосылыстардың, сонымен бірге еркін радикалдардың) анықтаудан тұрады. Келесі қадамдар, 2.1. бөлімінде жасалғандай, қарапайым және энергетикалық теңгерімдерді (бірінші заңды қолдану) орындауды қамтиды, төменде түсіндірілгендей, екінші заңды қолданумен қатар жану өнімдері жәй ғана CO_2 және H_2O болып табылмайды.

ДЖҚ шегінде барлық түрлердің өкілі ретінде **ДЖҚ** өтетін келесі қайтымды реакцияны қарастырайық:



Онда жоғарғы регистрдің әріптері химиялық түрге жатады, ал төменгі регистрдің әріптері — реакцияға қатысатын түрдің мольдерінің санына жатады. **ДЖҚ** шығарылғанындағы химиялық тепе-теңдік тура және кері реакцияның бірдей жылдамдығы барысында қол жеткізіледі. Реакция C және (немесе) D немесе A және (немесе) B түрлерінің шамалы санын енгізу жолымен оңға немесе солға жылжи алады, яғни **ДЖҚ** шығарылатын газдарында қайтымды шарттары бар. Тепе-теңдік критерийі тұрақты қысымда және температурада аталған қайтымды үдеріс үшін келесідей алына алады.

Бірінші заңды пайдалана отырып:

$$dH = \delta Q_{\text{реверсивті}} - \delta W_s$$

Екінші заңды пайдалана отырып, яғни алдыңғы теңдеуде $\delta Q_{\text{реверсивті}} = T dS$ алмастырып, біз келесіні аламыз:

$$dH = T dS - \delta W_s \quad (2.34)$$

G үшін дифференциалды түрде T константасы үшін өрнектерді жазып аламыз:

$$dG = dH - T dS \quad (2.35)$$

2.34 және 2.35 теңдеулерін біріктіріп, $dG = -W_s$. T тұрақты температурасында және P қысымында реакциялардың жұмыс өзара әрекеттесуінсіз,

$$dG = 0 \quad (2.36)$$

Осылайша, Гиббстің еркін энергиясын барынша азайтатын **ДЖҚ** науаларының құрамы белгілі температура, қысым және болжанатын түрлер үшін суағарларда тепе-теңдік шарттарына сәйкес болады.

Гиббстің еркін энергиясы температура жылудың берілуді басқаруы сияқты химиялық реакцияларға алып келетін әлеует ретінде қарастырыла алады. Осы әлеует нөлге тең болғанда реакция тоқтатылып тепе-теңдікке жетеді.

Тепе-теңдік константасының алтернативасы ретінде (немесе тепе-теңдікке белгілі тәсілі бар құрамның), 5-тарауда сипатталғандай, жүйе термодинамикалық тәуелсіз реакциялардың шектелген санымен тепе-теңдік құрамды анықтау үшін де қолданыла алады. Мұндай тәсіл әдетте 10 тарауда сипатталған бірлескен өндірістің нысандарында көптеген реакторларды модельдеу барысында пайдаланылады. Мұндай жағдайларда тепе-теңдік константаларын пайдаланатын бұл әдіс қарапайым бола алады. Тепе-теңдік константалары

шын мәнінде температураның функциялары болып табылады, бірақ онымен өте қолайсыз емес теңдеулермен байланысуы мүмкін. Өрі қарай түсінікті тепе-теңдік константалары талқыланады.

2.36-теңдеуіне сәйкес Гиббстің молярлы еркін энергиясыні құрамдасын g_i бойынша ұсыну кезінде:

$$dG = cg_C + dg_D - ag_A - bg_B = 0 \quad (2.37)$$

Гиббстің еркін энергиясының түзілуі туралы деректер түрлі температураларда қол жетімді, бірақ белгіленген қысымда (Chase et al., 1985). Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйін есептеу үшін түрлі қысымдағы құрамдастардың әрқайсысы үшін қысымды түзету қажет. Шартты газ үшін тұрақты температурадағы қысымы бар Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйі келесідей жазыла алады:

$$\Delta G = - \int_{V_1}^{V_2} P dV = \int_{P_1}^{P_2} V dP = RT \ln(P_2/P_1)$$

Егер P^0 бастапқы қысымына сәйкесі құрамдасы үшін «Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйі» ол g^0 болған жағдайда, онда P_i қысымында Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйі келесідей болады:

$$g_i = g_i^0 + RT \ln(P_i/P^0) \quad (2.39)$$

Әдеттегідей $P^0 = 1$ атм. Сосын 2.37 теңдеуінен

$$c[g_C^0 + RT \ln(P_C)] + d[g_D^0 + RT \ln(P_D)] - a[g_A^0 + RT \ln(P_A)] - b[g_B^0 + RT \ln(P_B)] = 0 \quad (2.40)$$

Онда P_i – бұл i құрамдасының парциалды қысымы. 2.40 теңдеуі реакциялар үшін «Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйі» терминдерінде (функция тек T температурасы) келесідей жазылуы мүмкін

$$\Delta G^0 = cg_C^0 + dg_D^0 - ag_A^0 - bg_B^0$$

$$\Delta G^0 = -R_u T_0 \ln \left(\frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \right) = -RT \ln K_p$$

Онда $K_p = (P_C^c P_D^d / P_A^a P_B^b)$, температура үшін функция болып табылады, тепе-теңдік константасы ретінде танымал және реакция үшін Гиббстің еркін энергиясының өзгеруінің стандартты күйін өзгертуге есептелуі мүмкін. Сосын ол $P_i = (M_i / \sum_i M_i) P$ – z қатынасын пайдалана отырып, реакция өнімдерінің молярлық құрамынанықтау үшін пайдаланылуы мүмкін, онда P – бұл 5-тарауда сипатталғандай, жалпы қысым. Белгілі температурада K_p белгілі болған жағдайда, онда оның мәні қызықтыратын температура барысында келесіге қатысты эмпирик

$$\ln K_p = \frac{C_{-1}}{T} + C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + \dots \quad (2.41)$$

2.4 ҮДЕРІСТЕРДІҢ МІНСІЗ ӨТПЕУІ

2.4.1 Газ тәріздес фаза

Газдың идеалсыз тәртібі қысымы оның P_C сыни қысымымен салыстырғанда жоғары болып табылған кезде, ал температурасы оның T_C сыни температурасымен салыстырғанда төмен болып табылған кезде көрінеді.

Процестердің идеалсыз өтуі (шартты газ үшін $Z = 1$) шартты газ теңдеуіне Z сығылу коэффициентін енгізу жолымен белгіленуі мүмкін:

$$PV = ZR_u T \quad (2.42)$$

Жалпыланған диаграммалар термодинамика оқулықтарының көпшілігінде, P/P_c төмендетілген қысымымен Z және T/T_c төмендетілген температурасымен корреляциялай отырып, қол жетімді. Ауыспалы қасиеттер туралы деректер Полинг пен бірлескен авторлардың жарияланымының А қосымшасынан алынуы мүмкін. (2001). Идеалсыздықты ескеретін күйдің басқа теңдеулері газдың нақты түрлері үшін әзірленген және Z болжау барысында пайдаланылуы мүмкін. Күйдің бұл теңдеулері сонымен бірге қоспаның қасиеттерін анықтау үшін, сонымен бірге олардың бу мен сұйықтықтың теңгерімін бағалау үшін пайдаланыла алады. Қоспада күйдің теңдеуімен талап етілетін жалған сыни температура мен қысымды және басқа көрсеткіштерді есептеу үшін әрбір молекулалық жұп үшін (эксперименталды деректер немесе молекулалық модельдеу бойынша жарияланған мәндер) олардың жеке қасиеттері мен бинарлы өзара әрекеттесу көрсеткіштерінде¹ бар түрлі таза құрамдастардың молярлық фракцияларына негізделген араластыру ережелері әзірленген. Мысал ретінде Ван-дер-Ваальс теңдеуінің модификациясы болып табылатын Пенг-Робинсон күйінің теңдеуін келтіруге болады (Пенг және Робинсон, 1976). Ван-дер-Ваальс теңдеуіндегі қысымның тартымды мүшесі қасиеттерді болжау дәлдігін айтарлықтай арттыра отырып Пенг және Робинсонмен өзгертілген болатын. Қысымның тартымды мүшесінің есебіне функционалдық байланысы бу қысымының деректері бойынша анықталатын өлшемсіз эксцентрілі коэффициент енгізілген болатын. Пенг және Робинсон күйінің теңдеуі жоғары полярлық жүйелер үшін ұсынылмайды.

Брайтон мен Дизельдің циклдары сияқты энергетикалық циклдарда газ ағындарының көпшілігінің тәртібі болжанатын идеалдықпен аппроксимациялануы мүмкін. Бірақ Ренкиннің циклында жұмыс сұйықтығы қаныққан будың шарттарына жақынырақ, сондықтан идеалсыз тәртіпті ескеру қажет. Бу үшін АОИМ бу кестелерінің өндірісі үшін корреляциялар бар (Keenan et al., 1969). Стандарттар мен технологиялардың ұлттық институтымен жарияланған REFPROP деректер базасы Ренкиннің төмен температуралы циклдарында пайдаланылатын көптеген сұйықтықтар үшін, сонымен бірге механикалық салқындатулар барысында термодинамикалық қасиеттерін қосады.

Идеалсыздық заттардың үлесті жылулық, ішкі энергия, энтальпия, энтропия және Гиббстің еркін энергиясы сияқты түрлі термодинамикалық қасиеттеріне ықпал етеді. Қысымға жасалатын түзету «ауытқу функциясын» пайдалану арқылы күйдің сәйкес теңдеуін қолдану жолымен алынуы мүмкін. Осы функциялардың жалпы өрнектері Poling et al жарияланымының 6.5 бетінде келтірілген (2001); энтальпия, энтропия және Гиббстің еркін энергиясы үшін ауытқу функциясы келесі 2.43-2.45 теңдеулерімен беріледі:

$$\frac{h - h_{\text{идеал}}}{RT} = \int_V^\infty \left[T \left(\frac{dZ}{dT} \right)_V \frac{dV}{V} \right] + 1 - Z \quad (2.43)$$

$$\frac{S - S_{\text{идеал}}}{R} = \int_V^\infty \left[T \left(\frac{dZ}{dT} \right)_V - 1 + Z \right] \frac{dV}{V} \ln Z \quad (2.44)$$

$$\frac{g - g_{\text{идеал}}}{RT} = \int_V^\infty (1 - Z) \frac{dV}{V} + \ln Z + 1 - Z \quad (2.45)$$

онда $h_{\text{идеал}}$, $S_{\text{идеал}}$, және $g_{\text{идеал}}$ мінсіз қасиеттер болып табылады. Алдыңғы өрнектер теңдеудің тиісті күйімен бағалануы мүмкін.

Идеалсыз қоспалардың энтальпиясы және энтропиясы келесідей беріледі:

¹ Бинарлы өзара әрекеттесулер аталған уақытта тек екі молекула арасында болады. Үш немесе одан артық молекулалардың әрекеттесу ықтималдығы өте аз

$$h_{mix} = \sum_i y_i h_i + \Delta h$$

$$s_{mix} = \sum_i y_i s_i + R_u \sum_i y_i \ln \frac{1}{y_i} + \Delta s$$

Онда y_i – бұл молярлы үлес, h_i және s_i – бұл алдыңғы екі өрнектің әрқайсысының соңғы мүшесімен қоспаны құрайтын таза құрамдастардың әрқайсысының молярлы негізіндегі энтальпия мен энтропия, ал мінсіз ерітінді үшін жойылып кететін мінсіз ерітіндінің әрекетінен ауытқуды ескеретін Δh және Δs . Δh пен Δs бағалауға қолданылатын тәсілдердің бірі 2.43 және 2.44 теңдеулерін қоспаға қолданылуында, яғни қоспаға қолданылатын күйдің тиісті теңдеуінде.

Алдыңғы бөлімде шартты газдар үшін тұрақты тепе-теңдік $K_p = (P_C^c P_D^d / P_A^a P_B^b)$ сияқты анықталған. Онда идеалсыздық еленбей кетуі мүмкін емес:

$$K_p = \frac{(\gamma_C \phi_C P_C)^c (\gamma_D \phi_D P_D)^d}{(\gamma_A \phi_A P_A)^a (\gamma_B \phi_B P_B)^b}$$

2.4.2 Бу сұйықтықты фазасы

Ренкин типті циклдер, әсіресе төмен температуралы жылу энергиясын электр энергиясына түрлендіру кезінде пайдаланылатын циклдер (мысалы, қолданылған жылу мен геотермалды энергия), 8-тарауда айтылғандай, түрлендірудің тиімділігін арттыру үшін бір құрамдастан артық жұмыс сұйықтығын пайдалана алады. Пропан мен пентаннан тұратын бинарлы қоспа (бар болғаны екі құрамдастың қоспасы) кейде Ренкиннің органикалық циклдарында (РОЦ) пайдаланылады, ол кезде Калинаның циклында (Калина, 1984) NH_3 және H_2O қоспасы пайдаланылады.

Бу фазасының және сұйықтықтық фазаның құрамы мұндай жағдайда бірдей емес, және құрамның екеуінде де температура мен қысымға байланысты айырмашылығы болады. Жиі осы екі фаза тепе-теңдікте бола отырып қарастырылуы мүмкін, ол екі фазаның құрамын анықтауға мүмкіндік береді. Бу мен сұйықтық фазалардың тепе-теңдігі туралы деректер 5 тарауда айтылатын жаппай тасымалдау операцияларын жобалау және талдау барысында да пайдаланылады. Ерітінділер өздерін мінсіз ерітінділер сияқты ұстаған жағдайда Рауль заңы екі фазаның құрамын есептеу үшін пайдаланылуы мүмкін. P_i – бұл i құрамдастың бу қысымы болған жағдайда, онда оның бу фазасындағы парциалдық қысымы Рауль заңы бойынша тепе-теңдігі барысында сұйық фазадағы осы құрамдастың x_i молярлық үлесімен келесі сияқты байланысты болады:

$$P_i = P_i' x_i \quad (2.46)$$

Эмпирикалық немесе жартылай эмпирикалық әдістердің көмегімен алынған белсенділік пен ұшпалығының коэффициенттерінің мінсіз емес тәртібін есепке алу үшін келесідей етіп енгізілуі мүмкін:

$$\phi_i P_i = \phi_i' P_i' \gamma_i x_i$$

Немесе бу молярлы фракция y_i және P жалпы қысымының тұрғысынан:

$$\phi_i \gamma_i P = \phi_i' \gamma_i' P_i' x_i$$

Бу мен сұйықтық молярлық үлестерді кейде бу мен сұйықтық фазалары қысымының, температурасының және құрамының функциясы болып табылатын « K -мәні» деп есептейді

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_i \gamma_i P_i'}{\phi_i P} = K_i$$

Әдетте сұйытылған ерітінділерге жарамды эмпирикалық байланыс, — бұл Рауль заңының түрленуі деп есептеуге болатын Генри заңы, ол келесідей беріледі

$$P_i = H_i x_i$$

онда бұл аталған жүйеге арналған эмпирикалық түрде анықталған константа.

2.3-мысал. 2.7-кестеде H_2O-CO_2 жүйесі үшін бу-сұйықтықты тепе-теңдік туралы деректерге арналған 300 F (149°C) температурасында жиналған эксперименталды деректер келтірілген (Гилспи және Уилсон, 1982). Бу фазасындағы ылғалдық дәрежесін қысымдардың әрқайсысы үшін Рауль заңы бойынша есептелген ылғалдық дәрежесімен салыстырыңыз.

2.7-КЕСТЕ. H_2O-CO_2 жүйесі үшін бу-сұйықтықты тепе-теңдік туралы мағлұматтарға қатысты 300 F (149°C) температурасындағы эксперименталды деректер

Жалпы қысым, бар	Жалпы қысым, бар	6,89	25,34	50,68	101,35	202,70
Моль % CO_2 сұйық	Моль % CO_2 сұйық	0,0499	0,316	0,646	1,241	2,05
Моль % CO_2 бу	Моль % CO_2 бу	32,6	79,91	89,02	93,42	95,03

2.8-КЕСТЕ. Бу фазасындағы ылғалдықтың дәрежесі бойынша есептелген және эксперименталды деректер

Эксперименталды деректер бойынша					Рауль заңы бойынша есептелген	Қателік пайызы
Жалпы қысым, бар	Моль % CO_2 сұйық фазада	Моль % H_2O сұйық фазада	Моль % CO_2 бу фазасында	Моль % H_2O бу фазасында	Моль % H_2O бу фазасында	
6,89	0,0499	99,9501	32,6	67,40	66,97	-0,6
25,34	0,316	99,684	79,91	20,09	18,18	-9,5
50,68	0,646	99,354	89,02	10,98	9,06	-17,5
101,35	1,241	98,759	93,42	6,58	4,50	-31,6
202,70	2,05	97,95	95,03	4,97	2,23	-55,1

$$y_{H_2O} = \frac{P'_{H_2O} x_{H_2O}}{P_{Total}}$$

Бу туралы деректері бар кестелердің негізінде (Кинан бірлескен авторлармен, 1969) судың қаныққан буларының қысымы (P'_{H_2O}) 300°F (149°C) температура кезінде 4,62 барды құрайды. 2.7. кестесінен $P_{Total} = 6,89$ барға тең келетін $P'_{H_2O} = 4,62$ бар және $x_{H_2O} = (1 - 0,0499/100)$ ауыстырып, біз келесіні аламыз:

$$y_{H_2O} = \frac{4.62 * (1 - 0.0499/100)}{6.89} = 0.670$$

Эксперименталды түрде анықталатын мән $1 - 32,6/100 = 0,674$ құрайды және % қателігі $(0,67 - 0,674)/0,674 \times 100 = -0,6\%$ құрайды.

2.8-кестеде деректердің барлық нүктелері үшін ұқсас түрде есептелген нәтижелер келтірілген. Күткендей, жүйедегі жалпы қысым артқан сайын қателік көп бола түседі, яғни берілген температура үшін жалпы қысымның артуына қарай жүйе де мінсіз қалыптан ауытқи бастайды. 202,7 бар жалпы қысымы болғанда қателік 55% құрайды.

ӘДЕБИЕТ

- Chase MW Jr, Davies CA, Downey JR Jr, Frurip DJ, McDonald RA, Syverud AN. JANAF Thermochemical Tables, 3rd ed. J Phys Chem Ref Data 1985;14(1):1985.
- Gillespie, PC, Wilson, GM. Vapor-liquid and liquid-liquid equilibria: water-methane, water- carbon dioxide, water-hydrogen sulphide, water-n-pentane, water-methane-n-pentane. Research Report. Gas Processors Association Research Report; 1982. Report nr. RR-48. Tulsa, OK: Gas Processors Association.
- Kalina IA. Combined cycle system with novel bottoming cycle. ASME J Eng Gas Turbines Power 1984;106:737-742.
- Keenan JH, Keyes FG, Hill PG, Moore JG. *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1969. p 24-97.
- Peng D, Robinson DB. A new two-constant equation of state. Ind Eng Chem Fundam 1976; 116(1):59-64.
- Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP. *The Properties of Gases and Liquids*. 4th ed. New York: McGraw Hill; 2001.

ГИДРОДИНАМИКАЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

3.1 ГИДРОДИНАМИКА НЕГІЗДЕРІ

Электр станцияларының көпшілігі газ немесе сұйықтық, мысалы, Ренкин циклын қолданудағы бу және су, сондай-ақ егер электр станциялары органикалық биоотынмен жұмыс істесе, Ренкин циклы үшін жылу энергиясын қамтамасыз ететін газ тәрізді жану өнімдерін білдіретін жұмыс ортасын пайдаланады. Электр станциясы мұнайда жұмыс істеген және Брайтон циклын пайдаланатын жағдайда, циклдағы жұмыс ортасы мұнай, ауа және жану өнімдерін көрсетеді. Құрамдастырылған өндіріске арналған кәсіпорын газ тәрізді және сұйық ағындарды едәуір қамтуы мүмкін.

Сұйықтықтың ағыны сондай-ақ пайдасыз өзгеретін (жанама өнім жағдайында электр немесе химиялық энергияға айталық) энергияны бұру үшін қажет және атмосфераға шығарылуы тиіс. Мұндай жылу бұру үдерісі салқындатқыш судың немесе сұйықтықтың ағынын қайта қосатын ауаның айналымынан тұруы мүмкін. Осылайша, сұйықтық ағынының қасиеттерін толық түсіну конфигурацияны анықтау үшін маңызды мәнге ие, осындай энергия түрлендіргіш қондырғыларын жобалауды талдады, сондай-ақ сұйықтық ағысымен байланысты шығындарды есепке алу қажеттілігін түсінеді, және, мүмкін, осы шығындарды азайту үшін шешімдерді іздейді. Бұл тараудың мақсаты-энергияны түрлендіру қондырғыларын талдау және жобалау үшін қажетті гидромеханиканың жекелеген тұжырымдамаларына кіріспе. Гидродинамикамен байланысты мәселелерді шешу сұйықтықтың тұтқырлығы мен тығыздығы сияқты физикалық қасиеттерін білуді талап етеді. Тұтқырлығы ішкі деформацияға немесе жылжуға оның орнықтылығының өлшемі болып табылады және температураға қатты байланысты. Сұйық ортада тұтқырлығы азаяды, яғни ол температура жоғарылағанда жеңіл өтеді, ал газ тәрізді ортада тұтқырлығы артады.

Сұйықтықтың тұтқырлығына қысым әсері өте аз, ал газдар үшін ол маңызды болуы мүмкін, әсіресе ол сыни нүктеге жақын. Көптеген сұйықтықтардың тұтқырлығының мәнін инженер-химиктер, *Перри* (Green, 2007) анықтамасында табуға болады. Ньютондық сұйықтықтар үшін аудан бірлігіне жылжу күші тұтқырлықты білдіретін константамен жергілікті жылдамдық градиентінің теріс мәніне пропорционалды. Барлық сұйықтықтар барабарлықтың осы түріне сәйкес келмейді. Энергетикалық циклдарда қолданылатын сұйықтықтардың көпшілігі ньютондық сұйықтықтар болып табылады және бұл тарау осындай сұйықтықтардың ағындарына арналған.

Мұнай өнеркәсібіндегі тығыздық API градустарында (американдық мұнай институты) жиі байқалады және үлес салмағымен (SG) байланысты, берілген температура кезінде сұйықтық тығыздығының 15,6°C (60°F) кезіндегі су тығыздығына қатынасы ретінде анықталады:

$$API = 141.5 / SG - 131.5$$

2.42 теңдеумен анықталатын газдар үшін тығыздығы:

$$\rho_G = \frac{PM_w}{Z R_u T} \quad (3.1)$$

мұндағы Z – мінсіз емес газды есепке алуға арналған сығымдау коэффициенті, P – қысым, M_w – молекулалық масса, R_u – әмбебап газды тұрақты, T – абсолютті температура.

3.1.1 Ағын режимдері

Сұйықтық ағынының екі түрлі түрі бар: ламинарлы және турбулентті. Ламинарлық ағын "қабаттарда" бірқалыпты қозғалыспен сипатталады, бұл ретте сұйықтықтың аралас қабаттарын макроскопиялық араластыру жоқ. Екінші жағынан, турбулентті ағын көрші қабаттардың сұйықтық бөлшектерінің араластырылуымен сипатталады. Осборн Рейнольдс сұйықтыққа енгізілген бояғыш қозғалысын бақылай отырып, сұйықтық ағынының режимін басқаратын және құбыр арқылы ағатын жағдайларды анықтау үшін эксперименттер өткізді. Ағынның түрі Рейнольдс саны ретінде белгілі өлшемсіз айнымалылардың келесі топтамасына байланысты екені анықталды (Re):

$$Re = \frac{Dvp}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{D\mu}$$

мұнда D – құбыр диаметрі, v – ағын жылдамдығының шамасы, ρ – сұйықтықтың тығыздығы, μ – сұйықтықтың тұтқырлығы, $\dot{m}$ – массалық шығын. Құбыр бойынша қозғалыс жағдайында, $Re < 2100$ кезде ламинарлы және $Re > 4000$ кезде турбулентті болып саналуы мүмкін, бұл ретте олардың арасында өте күтпеген өтпелі аймақ бар. Инженерлік мақсаттар үшін ең қауіпсіз тәжірибе болуы мүмкін ағын турбулентті болып табылады, кезде $Re > 2100$. Толық толтырылмаған құбыр немесе сопақ немесе тікбұрышты қиманың ауа өткізгіші сияқты ағынның дөңгелектелмеген көлденең қимасымен жұмыс кезінде R_H гидравликалық радиусына ($c D = 4 R_H$) есептеу үшін анықталады:

$$R_H = \frac{\text{Ағынның көлденең қимасының ауданы}}{\text{Сулау периметрі}}$$

Бұл әдіс турбулентті ағынға қолданылады және сұйықтық ағынының көлденең қимасының ауданы өте тар, яғни ені биіктікке қатысы бойынша аз жерде қолданылмауы тиіс. Осындай жағдайларда,

$$R_H \approx \frac{1}{2} (\text{ағынның ені})$$

Әр түрлі қималар үшін R_H "Инженер-механиктер үшін Маркстің стандартты нұсқаулығы" (Аваллони және т.б., 2006) және Инженер-химиктер үшін анықтамалық, Перри (Грин, 2007) сияқты анықтамалардан табуға болады.

3.1.2 Бернуллидің жалпыланған теңдеуі

Ньютон қозғалысының екінші заңын қолдану арқылы алынатын сұйықтық ағынының негізгі теңдеуі – бұл Бернуллидің жалпыланған теңдеуі немесе толық механикалық энергия теңгерімі, ол сұйықтық ағынының V , қысым P және биіктік² z параметрлеріне сәйкес келеді. Дифференциалды түрде бұл қалай жазылуы мүмкін:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + v dv + dW_s + dW_f = 0$$

ал Британдық өлшем бірліктерінде:

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{g}{g_c} dz + \frac{v dv}{g_c} + dW_s + dW_f = 0$$

² Биіктік әсері сұйықтық сияқты тығыз флюид бір биіктіктен екіншісіне айдалғанда маңызды болады.

мұнда g – жергілікті гравитациялық жеделдету, g_c - Ньютон қозғалысының Заңы бойынша түрлендіру коэффициенті, WS – жүйеге біліктің кіріс жүктемесі, ал W_f – сұйықтық массасының бірлігіне де үйкелуден энергияның механикалық жоғалуы. V жылдамдығы құбыр арқылы ағыс кезінде ағынның көлденең қимасы бойынша тұрақты болмаған кезде, жоғарыда аталған Бернулли теңдеуінде α с түзету коэффициенті талап етіледі, мұнда v – енді орташа сызықтық жылдамдық:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz$$

Турбуленттік ағын үшін, жылдамдық профилі жалпақ дерлік, α с бірлікке тең, ал толық дамыған ламинарлы ағын α с = 0.5.

Үйкеліс құбырдың көлденең қимада не иілген жағдайындағыдай бағыттық өзгеруінен туындаған ағын құрылымындағы өзгеріс салдарынан немесе катализатор қабатындағыдай сұйықтық («үйкеліс») жолындағы «кедергілер» салдарынан ағу ортасы мен құбыр не канал қабырғасының («беттік үйкеліс») бөліну шекарасында, не болмаса сұйықтық ішінде өтетін құбылыстарды қамтуы мүмкін. Сұйықтықтың тығыздығы мен тұтқырлығы, сұйықтықтың жылдамдығы сияқты сұйықтықтың қасиеттерімен үйкеліс жоғалтуды байланыстыратын диаграммалар мен теңдеулер түріндегі корреляция жасалды, құбыр арқылы турбуленттік ағын жағдайында беттің кедір-бұдырлығы және жүйенің геометриясын анықтайтын тән ұзындығы (мысалы, құбыр диаметрі).

3.2 БІР ФАЗАЛЫ СЫҒЫМДАЛМАЙТЫН АҒЫН

Тұрақты тығыздық пен жылдамдық (яғни ағынның көлденең қимасының тұрақты ауданы) үшін 3.2 теңдеуді қорыту, сондай-ақ білікке жұмыс жүктемесінің болмауы:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + g\Delta z + W_f = 0 \quad (3.3)$$

3.2.1 Құбырлардағы қысымның өзгеруі

Тұрақты температура кезінде бір диаметрлі ұзын түзу түтікте толық дамыған ламинарлық ағын үшін тығыздығы мен тұтқырлығы өзгермейтін, 3.3 теңдеуде үйкелуден W_f механикалық энергияның жоғалуы Хаген-Пуазейльдің (бірінші қағидаттардан алынған) қатынасы негізінде мынадай түрге ие:

$$W_f = \frac{32Lv\mu}{D^2\rho} \quad (3.4)$$

мұнда L - құбыр ұзындығы, ал D - құбыр диаметрі.

Турбулентті ағында (әдетте құбыр өткізгішке шығындарды төмендету үшін өнеркәсіпте қолданылатын) W_f тәуелділігі флюидтің әр түрлі ағын жағдайлары мен қасиеттеріне оны бірінші қағидаттардан шығаруға болатын тым күрделі. 3.4 теңдеуінде көрсетілген айнымалыға қосымша W_f құбырдың кедір-бұдырлығына байланысты ε болады (ұзындығы бар және құбыр материалының түріне байланысты). Өлшемдік талдау және тәжірибелік деректер пайдалы корреляцияларды әзірлеу үшін пайдаланылды. Фаннинг үйкеліс коэффициенті ретінде белгілі үйкеліс коэффициенті f өлшемсіз үйкеліс коэффициентін енгізу арқылы W_f сұйықтық ағынының шарттарына және қасиеттеріне тәуелділігін салыстыру ыңғайлы:

$$dW_f = \frac{2fv^2}{D} dL \quad (3.5)$$

F бар жерде Re және ε функциясы ретінде орналасқан. Ламинарлық ағын үшін көрсетуге болады

$$f = \frac{16}{Re}$$

f яғни ε в ламинарлық ағынға байланысты емес екенін ескеріңіз, сонымен қатар, диаграмманың турбуленттік ағыны үшін үйкеліс коэффициентінің Re -дан және ε/D салыстырмалы кедір-бұдырлықтың тәуелділігін көрсететін (сонымен қатар әр түрлі құбыр материалдары үшін кесте мәндері), "*Инженер-Химиктерге арналған анықтамалық*", Перри (Грин, 2007) және "*Инженер-механиктерге арналған Маркстің анықтамалығы*" (Авалонни және т.б., 2006) сияқты анықтамаларда келтірілген. Маркс анықтамалығы, сондай-ақ CraneCo компаниясының № 410 техникалық құжаты. (1988) клапандар, құбырлар және фитингтер арқылы сұйықтықтар ағыны бойынша тамаша нұсқаулық болып табылады, онда Фаннингтің үйкеліс коэффициенті төрт есе көп Дарси (немесе Муди) f көрсетілген.

f' үшін теңдеу 3.5 теңдеуге тең:

$$dW_f = \frac{f v^2}{2D} dL \quad (3.6)$$

Тербеліс-Уайт теңдеуі сияқты эмпирикалық корреляция, сондай-ақ турбуленттік ағындарға арналған үйкеліс коэффициентін анықтау үшін $4000 < Re < 10^8$ и $0 < \varepsilon/D < 0.05$ қолданылуы мүмкін, бірақ шешім Ньютон-Рафсон әдісі сияқты итерациялық процедураны талап етеді:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{1.256}{Re \sqrt{f}} \right]$$

3.7 теңдеуі f нақты анықтамасын береді және Ромео және т.б. (2002) әдебиетте табылған әр түрлі корреляциялардың статистикалық талдауынан (f үшін олардың түпнұсқа өрнегі) шығарылды, және шын мәнінде $3000 < Re < 15 \times 10^8$ and $0 < \varepsilon/D < 0.05$ үшін.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 * \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7065} + \frac{5.0272}{Re} \log \left\{ \frac{\varepsilon/D}{3.827} - \frac{4.567}{Re} * \log \left(\left(\frac{\varepsilon/D}{7.7918} \right)^{0.9924} + \left(\frac{5.3326}{208.815 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right\} \right] \quad (3.7)$$

3.2.1 Фитингтердегі қысымның өзгеруі

Құбыр жүйесіндегі қысымды жоғалтудың едәуір бөлігі әдетте клапандар мен фитингтерде үйкеліс тудырады. Фитингтер иілу, Қос иілу, үштіктер, сондай-ақ диаметр өзгерісі бар өткел үшін кеңею немесе тарылу қамтуы мүмкін. Осыған байланысты шығындар энерго жүйелерді жобалау және талдау кезінде тиісті түрде ескерілуі маңызды. Клапандар мен фитингтердегі кедергі эмпирикалық әдістерді қолдану арқылы есептеледі және жалпы әдіс әрбір фитингтен тікелей құбыр үшін эквивалентті көріністе үйкеліс бағалауынан тұрады. Фитингтің нақты түрі мен өлшемі үшін K өлшемсіз көрсеткіші (кедергі коэффициенті) келесідей анықталады:

$$W_f = K \frac{V^2}{2} \quad (3.8)$$

K үшін мәндер немесе $K = f'T$, мұнда $f'T$ - толық турбуленттілік аймағындағы ағынға сәйкес келетін үйкеліс коэффициенті CraneCo компаниясының № 410 техникалық құжатында

қол жетімді. (1988), әр түрлі диаметрлі өнеркәсіптік өндірістің болат құбырларына арналған f_T мәндерді қоса алғанда.

3.8 теңдеуін 3.5 теңдеудің интеграцияланған формасымен немесе 3.6 теңдеулерін салыстыра отырып, 3.5 теңдеуде немесе 3.6 теңдеуде көрініс тапқан басқа айнымалылар тұрақты болып табылады, бұл

$$K = 4f_T \frac{L_e}{D} = f'_T \frac{L_e}{D} \quad (3.9)$$

f -ны f_T немесе f'_T ауыстыру және L -ны тіке құбыр ұзындығына баламалы L_e ауыстыру. $K = \text{тұрақты} \times f'_T$ болғанда, құбыр диаметріндегі түзу құбырдың эквивалентті ұзындығы L_e/D қатынасы тұрақты болады деп күтуге болады; көп қлапандар мен фитингтер үшін мәндер кестесі жасалды, оны "Инженер-химиктер анықтамалығынан", Перри (Грин, 2007) және "Инженер-механиктерге арналған Маркс анықтамалығынан" (Аваллони және т.б., 2006) табуға болады.

Фитингтің осы түрі мен D диаметрі үшін эквивалентті ұзындығы L_e құбырдың тік ұзындығына қосылған кестелік деректер негізінде есептелуі мүмкін (бірдей диаметрде), содан кейін үйкеліс коэффициенті f немесе f' егер жалпы эквивалентті ұзындық 3.5 теңдеудің интеграцияланған түрін немесе 3.7 теңдеуді пайдалана отырып, үйкеліс шығынын есептей отырып, түзу құбыр үшін анықталғандай анықталады. Дегенмен f_T немесе f'_T қолданыңыз, бұл фитингтер үшін қолайлы.

3.3 БІР ФАЗАЛЫ СЫҒЫМДАЛАТЫН АҒЫН

3.2 және 3.5 теңдеулерді v -ным/ ρ -ға алмастыру мен біріктіре отырып, мұнда m -массалық жылдамдық (ағынның көлденең қимасының ауданына бөлінген массалық шығын), аламыз:

$$\frac{dp}{\rho} + g dz + \frac{\bar{m}^2}{2ac} d\left(\frac{1}{\rho^2}\right) + 2 \frac{\bar{m}^2 f}{\rho^2 D} dL = 0 \quad (3.10)$$

3.1 теңдеуінен өтетін изотермиялық жағдайларда қысылған газ ағыны қарастырылады. 3.10 теңдеудің интеграциясы 1-нүктеден 2-ге дейін тұрақты көлденең қимасы бар құбыр арқылы ағын үшін (біліктің жұмыс істемей, dz мәнін өткізу арқылы, себебі газдар үшін биіктіктің әсері елеусіз, ал олардың тығыздығы (айтарлықтай төмен) қысым ауытқуын есептеу үшін келесі өрнек береді:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{G^2 Z_{\text{орт}}}{M} \left[\frac{4fl}{D} + \frac{2}{ac} \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \right] \quad (3.11)$$

мұнда $Z_{\text{орт}}$ қысу коэффициенті орташа арифметикалық $(Z_1 + Z_2)/2$ аппроксимациялануы мүмкін. f функциясы екенін ескеріңіз $Re = (4m/D\mu)$, тұрақты m және D үшін өзгеріссіз қалады. Теңдеулер құбыр арқылы өтетін адиабатикалық ағын жағдайы үшін қол жетімді (Лаппл, 1943), бірақ тәжірибелік пайдаланудағы ұзын құбырлар үшін ағын изотермиялық деп болжауға болады және 3.11. теңдеуін қолдануға болады.

3.3.1 Құбырлар мен фитингтердегі қысымның ауытқуы

3.8 теңдеуі газ құбыр жүйесі арқылы өтетін, ал қысым құбыр диаметрі өзгеруінің кеңеюіне немесе тарылуына байланысты төмендеген кездегі қысым ауытқуынан туындаған жылдамдық өзгеруін ескергеннен кейін қолданыла алады, бұны Маржанович, Джорджевич

(1994), Бенедикт және т.б. (1966) ғалымдар зерттеген.

3.3.2 Дроссельденген ағын

Сығылатын сұйықтық адиабатикалық жолмен резервуарға лақтырылғанда оның жылдамдығы ең жоғарғы мәнге жетеді, бұл кезде резервуардағы қысым азаяды. Осы сыни мәннен төмен қысымның кез келген одан әрі төмендеуі ағын жылдамдығына әсер етпейді. Бұл құбылыстың себебі, шектен шығатын ағынның жылдамдығы дыбыс жылдамдығына тең болған кезде, яғни ауытқулар ағымдағы орта арқылы тарайтын жылдамдыққа және осылайша, резервуардағы қысым сыннан төмен төмендеген кезде ағын жоғары түспейді. "Ағын тұнады" дейді. Келесі формуламен тамаша газ үшін ең жоғары жылдамдықты ұсынуға болады:

$$v_{sonic} = \sqrt{\frac{c_p P}{c_v \rho}} \quad (3.12)$$

мұндағы, v_{sonic} , P мен ρ - жылдамдықтың, қысымның және жоғары бағыттағы газдың тығыздығы, ал c_p және c_v - тұрақты қысым мен көлемдегі газдың ерекше жылуы.

Газ жүйелеріндегі ағындарды шектеу, мысалы, саңылаулар мен басқару клапандары, егер олардағы қысым түсуі жеткілікті үлкен болса, ағынның бітелуіне әкелуі мүмкін, сондықтан ағын жолында дыбыс жылдамдығы басым болады. «Шектеу тесіктері» бұл құбылысты белгілі бір уақыт ішінде шығыс қысымы төмендеген кезде (немесе жоғарылайды, содан кейін шектеулі мөлшерде, ал дыбыс жағдайлары ағын жолының бойында басым болған жағдайда) белгіленген газ ағынын қамтамасыз ету үшін пайдаланады.

3.4 Сұйықтықтың екі фазалы ағыны

Бір фазалы бу және басқа сұйықтық түрінде екі фазалы ағын жұмыс сұйықтығы буға ауысқан кезде Ренкин циклында пайда болуы мүмкін. Егер бір реттік өту жүйесі қолданылмаса, Ренкин циклының буландырғышына кіретін сұйықтық толығымен буланып кетпейтініне назар аударыңыз. Бу фазасы сұйық фазадан бөлінеді және бұл сұйық фаза буландырғышқа оралады (қосымша сұйықтықпен бірге, буландырғышты қалдыратын таза буларға тең).

Алайда бұл мүлдем қажет болған жағдайларды қоспағанда, жалпы екі фазалы ағыннан аулақ болу керек (буландырғышта, буланатын сұйықтықта болуы мүмкін еритін қатты заттардың тұнбаларын болдырмау үшін), жиі екі фазаны тез бөлу және әрбір фазаға жеке құбырларды пайдалану орынды. Екі фазалы ағын үшін қысымның төмендеуі ағын режиміне байланысты; келесі сипатталғандай, Әр түрлі режимдер бар, олар екі ағатын фазалардың үздіксіздігіне қатысты кеңінен жіктеледі. Ағынның режимі жүйелік айнымалылардың қатарына, сондай-ақ құбыр көлденең, тік немесе көлбеу болып табыла ма байланысты өзгеруі мүмкін. Сонымен қатар жұмыс шарттары өзгерген кезде ағын режимі өзгеруі мүмкін, ағынның белгілі бір режимдері құбыр желісіне құрылымдық жүктемеге алып келуі мүмкін және бұдан аулақ болу керек.

3.4.1 Газ сұйықтығы ағындарының режимдері

Құбырды бағдарлау, газ және сұйықтық ағынының салыстырмалы көлемді жылдамдығы едәуір дәрежеде ағын режимін анықтайды. Басқа факторлар сұйықтықтың тығыздығын, тұтқырлығын және беттік керілуін қамтиды. Төменде құбырдың көлденең ағынында кездесетін түрлі ағын режимдері сипатталған:

- Көпіршік режимі ағын. Сұйықтық ағынының көлемді жылдамдығы газ ағыны жылдамдығымен салыстырғанда салыстырмалы жоғары болғанда, сұйықтық құбыр көлденең қимасының үлкен бөлігін алады, ал газ кішкентай көпіршіктер түрінде ағады. Газ және сұйықтық жылдамдығы бірдей. Көпіршіктер әдетте құбырдың барлық көлденең қимасына бөлінеді, бірақ жүзбелі болғандықтан олар құбырдың жоғарғы бөлігінде шоғырланған. Бұл

ағынның ерекше жағдайы көпіршіктер басым және бүкіл көлемі бойынша таралған кезде көбік деп аталады.

- Ағынның тығын режимі. Бұл ағын түрі сұйықтық ағынының көлемді жылдамдығы көпіршікті ағынға қарағанда газ ағынының жылдамдығымен салыстырғанда салыстырмалы төмен болғанда пайда болады. Көпіршіктер төгіледі, нәтижесінде газ бен сұйықтықтың ауысатын тығындары құбырдың жоғарғы көлденең қимасының бойымен қозғалады, ал төменгі көлденең қиманың сұйықтық ағысының үздіксіз фазасы болады.

- Ағынның қатпарланған режимі. Газ шығынымен салыстырғанда сұйықтықтың көлемдік шығыны біртіндеп азайған кезде тығындар бөлінеді және газ құбырдың жоғарғы көлденең қимасының бойымен ағады, ал сұйықтық төменгі учаскенің бойымен ағады және бұл ретте екі фазаның арасындағы бөлімнің беті салыстырмалы түрде тегіс болып қалады. Әрбір фазаға байланысты үйкеліс құбырдың барлық ұзындығына қатысты тұрақты болып қалады.

- Ағынның толқындық режимі. Газ ағынының жылдамдығы қатпарланған ағында ұлғайған кезде толқындар екі фазаның арасындағы үйкеліс салдарынан сұйықтық бетінде пайда болады, ал толқын амплитудасы газ ағынының жылдамдығының артуымен артады.

- Снаряд ағыны режимі. Егер сұйықтық ағынының жылдамдығы ұлғайған болса, ол толқындардың жоталары құбырдың жоғарғы бөлігіне тиіп, көбікті тығындар түзеді, бұл оқшауланған үзік ағынға әкеледі. Сұйық тығын жылдамдығы және ауысатын үлкен газ көпіршіктері сұйық фазаның орташа жылдамдығына қарағанда көп болады, газдың үлкен көпіршіктері ақыр соңында құбырдың барлық көлденең қимасын алады. Ағын бұрын сипатталған тығын ағынына ұқсас және ағынның осы екі түрі арасындағы айырмашылық едәуір шартты болады.

- Айналым режимі. Жоғары жылдамдық кезінде газ сұйықтықты газы бар құбыр қабырғасының бойымен орталық бөлігі арқылы өтетін түрлі қалыңдықтағы сақиналы пленка түрінде ағады. Екі фаза жылдамдығында елеулі айырмашылық бар және газ құрамында сұйық фазадан бөлінген сұйық тамшылары болуы мүмкін.

- Эмульсиялық немесе шашыраңқы ағын режимі. Газдың жоғары жылдамдығы кезінде қармалған сұйық фазаның мөлшері артады, ал сұйық сақина азаяды.

Құбырдың тік ағынында қалыптасқан әр түрлі ағын режимдері екі фазаның әрқайсысының жылдамдығына қарай көпіршікті ағын, тығын ағыны, көбікті немесе эмульсиялық ағын, сақиналы ағын және тозаңдатылған ағыннан тұрады. Сұйықтық ағынының жылдамдығы азайған немесе газ ағынының жылдамдығы ұлғайған кезде ағынның снаряд режимі көбікті немесе эмульсиялық түрге ауысуы мүмкін, бұл уақытта газ бен сұйықтық арасындағы шекара турбуленттігі жоғарылайды. Газдың шағын көпіршіктері газдың ірі көпіршіктерімен бөлінген қысқа сұйық тығындардың турбулентті реттелмеген нысанын қалыптастыра отырып, сұйықтықпен араласады.

Екі фазаны ("тамшы қаққыш") бөлу үшін ыдыстарға сұйық фазаны дренаждауға пайдаланылуы мүмкін көлбеу құбырлардағы еңістің шағын ауытқуы көлденең құбырлар үшін сипатталған ағынның әрбір режимінің жылдамдығына айтарлықтай әсер етуі мүмкін. Құбырдың бағыты көлденең 20°C-ден артық ауытқығандықтан, ағын режимдерінің пайда болуы тік құбырға тән.

3.4.2 Құбырлар мен фитингтердегі қысымның өзгеруі

Құбырдағы қысымның ауытқуын есептеу үшін Беггс және Бриль әдісі алдымен ағынның режимін (сегреттелген, үзік немесе бөлінген) олардың өлшемдерін қолдану жолымен орнату, содан кейін осы ағынның режимдерінің әрқайсысына тән корреляцияларды пайдалана отырып қысымның құлауын есептеу (Беггс және Бриль, 1973). Фитингтер қысымының өзгеруі кезінде Чишолм сипатталған есептеу әдістемесін қолдануға болады (Коллиер, 1972).

3.4.3 Тұман аулау

Бу ағынынан сұйықтықты бөлу технологиялық қондырғыларда (тамшықаққыштар көмегімен орындалатын) және электр станцияларында жиі кездесетін, әсіресе Ренкин циклын пайдаланатын операциялардың бірі болып табылады.

Тамшықаққыштар тік немесе көлденең бағытталған ыдыстар болып табылады, оларды таңдау салыстырмалы үнемдеу және телім ауданына қойылатын талаптар сияқты факторларға байланысты. Бұл құрылғылар сондай-ақ будан сұйықтықтың бөлінуіне кепілдік беру үшін тұман ұстағышпен (сым торынан қалқан сияқты) біріктіріліп орындалуы мүмкін. Мұндай құрылғыда бөліну үш кезеңде жүзеге асады: (1) ауырлық күшінің әсеріне ұшырайтын бұрғыш элементке бумен көшірілетін неғұрлым ірі тамшыларды жою үшін енгізу белгішін пайдалана отырып бастапқы бөліну; (2) ауырлық күшінің әсеріне ұшырайтын ұсақ тамшыларға арналған ыдыстың бөлу секторында жүргізілетін екінші рет бөліну; және (3) ең кіші тамшыларды неғұрлым ірі тамшылармен біріктіру жолымен тұман жойылатын соңғы бөліну. Бұдың рұқсат етілген жылдамдығы V_V екінші рет бөліну жүзеге асу үшін жеткілікті төмен болуы тиіс, яғни бұдың жылдамдығы V_T тамшылардың жылжуының соңғы жылдамдығынан аз болуы тиіс, ол гравитациялық күш пен тамшыға әсер ететін кедергі күшіне қатысты жүзу күшінің айырмашылығын теңестіру арқылы анықталады:

$$v_T = \sqrt{\frac{4gD_p(\rho_l - \rho_v)}{3C_D\rho_v}} \quad (3.13)$$

Мұнда D_p – тамшы диаметрі, ρ_l и ρ_v – сұйықтық пен будың тығыздығы, ал C_D – кедергі коэффициенті, оны қатты салалар үшін әзірленген корреляция жолымен анықтауға болады (газ өңдеу жабдықтарын өндірушілер Қауымдастығының техникалық анықтамалығы – GPSA, 2013). C_D тамшы диаметрінің функциясы болып табылады, сондықтан бу фазасынан бөлінген ең кішкентай тамшы анықталуы тиіс.

Тұман ұстағышты қолданғанда теңдеудің 3.13 эмпирикалық түрі қолданылады:

$$v_V = K \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v}} \quad (3.14)$$

мұнда K – бұрын өткізілген эмпирикалық тәжірибеден алынды. K -кестелік мәндері газ өңдеу жабдықтарын өндірушілер Қауымдастығының тік және көлденең бағдарланған ыдыстарға арналған техникалық анықтамалығында (GPSA, 2013) қол жетімді. Сондай-ақ кейбір сұйықтық-бу жүйелері мен жұмыстың белгілі бір түрлері үшін K түзетулері ұсынылады. Тік ыдыстағы v_V жылдамдығы тік қиманың көлденең ауданына негізделген, ал көлденең ыдыстағы жылдамдық сұйықтықтың ең жоғары деңгейінен жоғары көлденең қиманың тік ауданына негізделген (мысалы, дабыл белгісін тудыратын). Осылайша, ыдыстың диаметрін есептеуге болады.

Диаметр есептелгеннен кейін ыдыстың тангенс-тангенс ұзындығы ретінде белгілі тігіс пен тігістердің ұзындығы анықталады (бұл жерде бастиектер³ ыдыстың цилиндрлік бөлігіне дәнекерленген), өңдеу өнеркәсібінде оқыс құйылу уақыты мен ұстап қалу уақытының негізінде тамшықаққыштар үшін анықталады. Оқыс ағынның уақыты - бұл ыдыстың шығыс ағынын жабу кезінде сұйықтықтың кіріс ағынын сыйдыра алатын және авариялық сигнал беру үшін сұйықтықтың қалыпты деңгейі (СД қалыпты) мен сұйықтықтың жоғары деңгейі (СД жоғары) арасындағы қашықтықты анықтау үшін пайдаланылатын уақыт. Күрт ағынның уақыты кіріс және шығыс ағынының өзгерістері арасында буферді қамтамасыз етеді, сондай-ақ оның көмегімен шығындарды азайту қажет болған кезде жоғарыдағы орналасқан

³ Бастиек эллиптикалық, жартылай сфералық немесе дөңес болуы мүмкін 2:1.

Өдетте, эллиптикалық бастиектер ыдыстың диаметрі 4,5 м-ден кем, ал қысым 7 бар-дан асқан кезде пайдаланылады; жартылай сфералық бастиектер ыдыстың диаметрі 4,5 м-ден астам, ал қысым 7 бар-дан асқан кезде пайдаланылады; диаметрдің 0,6 мәніне тең шеңберлі радиусы бар дөңес бастиектер ыдыстың диаметрі 4,5 м-ден кем және қысымы 7 бар-дан кем болғанда пайдаланылады

жабдықтың кенеттен тоқтауын болдырмайды. Ұстап қалу уақыты, екінші жағынан, ыдыстың ағыннан төмен тұрған жабдыққа сұйықтық бере алатын уақыт ұзақтығын білдіреді, бұл уақытта ыдыстың кіріс ағыны жабылады және сұйықтық СД қалыпты жағдайы және СД төмен деңгейі (төмен) арасындағы қашықтықты анықтау үшін пайдаланылады. Кідіріс уақыты кіретін ағынның тұрақтылығы және жабдықтардың төмен ағысы бойынша өзгерістерге ағын жылдамдығына сезімталдығы сияқты факторларға байланысты болып табылады. Сұйықтықтың деңгейін жоғары-жоғары деңгейге дейін көтеру (ЖЖСД), ол СД жоғарылығы кіріс ағынын жабуға әкеледі, ал СД жоғарылығы және ЖЖСД арасы оператордың араласуы үшін жеткілікті уақыт беруге негізделген. Сұйықтық деңгейінің төменге дейін төмендеуі-төмен (ТТСД) шығыс ағынының жабылуына алып келеді және ТСД мен ТТСД арасындағы қашықтық оператордың араласуы үшін жеткілікті уақыт беруге негізделетін болады. Ыдыстың өлшемдері ЖСД және ЖЖСД, сондай-ақ ТСД мен ТТСД арасындағы арақашықтықты қамтуы тиіс. ЖЖСД-ның өзі будың төменгі шығарылымға түсуінің алдын алу үшін түбінен белгілі бір биіктікте сақталады, бұл қашықтық клапанды жабу командасын іске қосу сәтінен бастап талап етілетін уақытқа және клапан толығымен жабылатын уақытқа байланысты. Ағынның тұрақтандырғышы шығудағы бұрыштық жылдамдықты азайту үшін сұйықтықты шығару айналасындағы радиалды қалақтардан немесе қалқалардан тұруы мүмкін, егер сифондық түріндегі құю пайдаланылмаса, будың сұйықтықпен тасымалдануын болдырмау үшін жиі төменгі ағызу үстінде орнатылады. Шығару және ұстап қалу үшін талап етілетін биіктікке қосымша ыдыстың тік биіктігі, егер ол бар болса, тұман ұстағыштың болуын ескеруге тиіс, ал әдетте ара қатынасы (тігістің диаметріне ұзындығы) есептік қысымға байланысты 1,5-тен 6-ға дейін түрленуі мүмкін (бұл арақатынас қысымның жоғарылауы кезінде ұлғаяды) және шығын негізінде таңдалады, ал көлденең ыдыстарға арналған пропорциялар әдетте 2,5-тен 6-ға дейін түрленуі мүмкін. Бу барабандары әдетте көлденең ыдыстар болып табылады, бірақ кірістірілген тік ыдыстар да бар. Көлденең бу барабандарында аз мөлшерде толтыру көлемі бөлу үшін ауырлық күшіне байланысты, ішкі циклондар екі фазаны бастапқы бөлу үшін орнатылған. Циклонның ішінде ағым ортасының қоспасының айналмалы қозғалысымен пайда болатын ортадан тепкіш күш судың ауыр тамшыларын будан қабырғаға қарай итереді. Қалақты түріндегі сепараторлар және / немесе ыдыстың ішінде қосылған пластиналар ұсақ тамшыларды біріктіру жолымен түпкілікті ақырғы бөлінуін қамтамасыз етеді. Тік бу барабандарында (жиі "бу бөлгіш" деп аталатын) бу-су қоспасы буландырғыштың барабанына тангенциалды түседі, екі фазаның бастапқы бөлінуін тудыратын ортадан тепкіш күш жасайды, және, демек, ішкі циклондар көлденең барабандағыдай талап етілмейді. Барабанның жоғарғы бөлігінде орналасқан қалақты түрдегі сепаратор ақырғы бөлуді қамтамасыз етуі мүмкін. 12-тарауда талқыланған сепараторлардың бұл түрлері жылу рекуперациясы бар бу генераторларына арналған (ЖБГ – жылуды кедеге жарату бу генераторы), жел және күн сияқты үзік жаңартылатын энергия көздеріне қосымша, жылдам іске қосу үшін арналған. ЖБГ-газ турбиналары мен кейде іштен жану поршеньді қозғалтқышы бар жылуды регенерациялау үшін пайдаланылады, мұндай электр станциялары желіге қосылуы тиіс, өйткені осы үзік жаңартылатын энергия көздерінің шығу қуаты төмендейді. Тік барабандардың айналмалы кернеуге жүктемені азайту үшін диаметрі аз болады, бұл оларға іске қосу үдерісінде пайда болатын төменге түсетін жылу кернеуі анағұрлым жұқа қабырғалар болуына мүмкіндік береді. Сондай-ақ, шағын диаметрлерді сақтай отырып, бірнеше блоктарды орнатуға болады.

3.1-мысалы. Көлденең тамшықаққыш жылдамдығы $mV\ 20\ кг/с$ бу ағынынан диаметрі $D_p > 150\ \mu m$ сұйық тамшысын бөліп алу үшін тұман аулау құрылғысынсыз әзірленген. Диаметрі $150\ \mu m$ тең сфера үстіндегі CD кедергі коэффициенті 1.4-ке тең екенін ескерсек, бұл ыдыс ішіндегі жұмыс жағдайына, $\rho L = 500\ кг/м^3$ сұйықтық тығыздығы мен $mV\ 20\ кг/с$ бу тығыздығына сәйкес келеді; егер ыдыстағы сұйықтық деңгейі ыдыс жалпы көлемінің $\frac{1}{2}$ сақталса, ыдыстың ішкі диаметрі $D = 1,2\ м$ және ұзындығы $L = \text{тангенс-тангенс } (T/T) \ 4,6\ м$ болса, ыдыс тамшыларды бөлу үшін жеткілікті ме екенін анықтаңыз.

Шешімі

3.13 теңдеуі арқылы тамшылардың соңғы жылдамдығын аламыз:

$$v_r = \sqrt{\frac{4 * 9.18 * 150 * 10^{-6} (500 - 33)}{3 * 1.4 * 33}} = 0.14 \text{ м/с}$$

Тамшының жоғарғы бөлігінен ыдыстағы сұйықтықтың бетіне тамшының пайда болуы үшін қажетті уақыт ($D/2$ қашықтық) = бу ағынының ыдысқа кіруі мен шығуы аралығы үшін қажетті уақыт (L қашықтық) деп болжасақ, төмендегі мәнге ие боламыз

$$\frac{D/2}{v_r} = \frac{L((\pi/4)D^2)/2}{m_V/\rho_V}$$

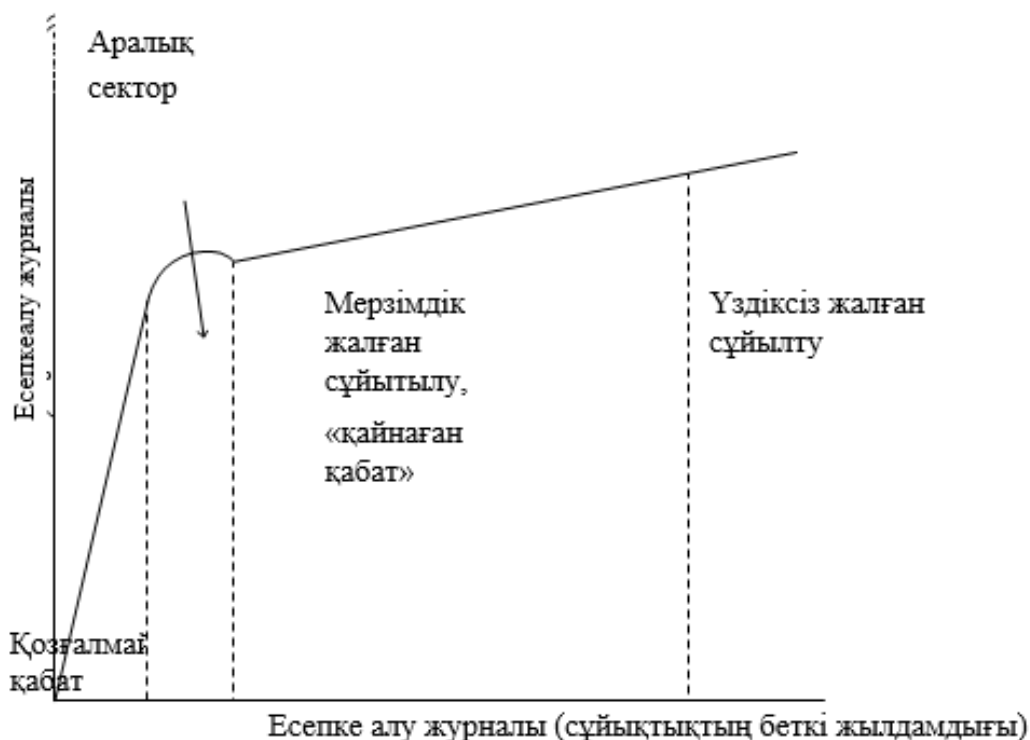
Берілген $d=12\text{м}$ мәні, ыдыстың ең аз ұзындығы T/T құрайды $L = \frac{4m_V/\rho_V}{\pi v_T D} = \frac{4*20/33}{\pi*0.14*1.2} = 4.57 \text{ м}$ 4.6 М берілген мәннен аз.

Осылайша, ыдыстың мөлшері, егер диаметрі $\frac{1}{2}$ биіктікте ұстап тұратын сұйықтық деңгейі бақылау-өлшеу аппаратурасы мен бақылау тұрғысынан сәйкес келеді деп болжанса жеткілікті болып табылады және айдау мен ұстап қалу талаптарын сақтайды.

3.5. Сұйықтықтарды қатты бөлшектерден бөлу жүйесі

3.5.1 Ағын режимдері

Сұйықтық төмен жылдамдықтағы қатты бөлшектердің кеуекті қабаты арқылы өтетін кезде, бұл қатты бөлшектер қозғалыссыз қалуы мүмкін, бірақ бөлшектердің жылдамдығының жоғарылауы бір-бірімен байланыста болмайды, оларға ағын жылдамдығының әсер етуінен кебеді. Қатты бөлшектер қозғалмайтын болса, қабат "бекітілген қабат" деп аталады, ал сұйықтың ыдырауы жағдайында қабат "жалған сұйытылу" деп аталады, ал жалған көрінетін қабат азайту басталатын сұйықтық жылдамдығы "сыни жылдамдық" деп аталады. 3.1-суретте көрсетілгендей, сұйықтық қабат арқылы өтуі кезінде қысымның ауытқуының әсеріне ұшырайды және сұйықтықтың келтірілген жылдамдығы арасындағы өзара байланыс (қабаттың көлденең қимасының барлық ауданын ескере отырып есептелген жылдамдық) және қабаттағы сұйықтық қысымының төмендеуі ағынның әр түрлі режимдерін көрсетеді. Мерзімдік жалған сұйылту кезінде бөлшектер жігерлі, құйындатып және кездейсоқ бағыттарда қозғалады, ал қабат қайнап жатқан сұйықтыққа кейде айтарлықтай ұқсайды.



3.1-сурет. Қысымның ауытқуы және қатты бөлшектермен "қайнаған қабатпен" сұйықтықтағы ағын режимдері.

Алайда бөлшектер сұйықтыққа ұшырамайды, себебі бөлшектер арасындағы сұйықтықтың жылдамдығы жалған сұйылған қабаттың үстіндегі кеңістіктегі жылдамдыққа қарағанда әлдеқайда көп, бұл сұйықтықтан барлық бөлшектердің жоғалуына әкеледі. Сұйықтықтың жылдамдығын одан әрі арттырғанда, "үздіксіз жалған сұйылту" болған кезде бөлшектер сұйықтықпен кетеді, бөлшектердің көлемімен мөлшері сұйықтықтың жылдамдығына және бөлшектердің тығыздығына байланысты. Қабаттың барлық материалы сұйықтықпен шығарылған кезде, мұндай қабат "басып алынған қабат" деп аталады.

Әдетте газ немесе сұйықтық ағыны "энергетикалық қондырғыларда" қатты бөлшектер қабаты арқылы өтеді (бұл кітапта негізгі өнім электр немесе жылу сияқты энергия болып табылатын қондырғылар, яғни энергетикалық қондырғылар деп аталады). Мысалы, су тазалау кезінде, оны бугенерациялау үшін жарамды ету үшін, суионалмастырғыш қатты заттар қабаты арқылы өтеді. Басқа мысал – жылу беру үшін мұнаралы салқындатқыш, айталық, электр станциядан қатты "орау" материалы қоршаған ауа мен салқындатқыш су арасындағы тасымалдау туралы жылу массасын күшейту үшін пайдаланылады. Бұл қозғалмайтын қабатпен жасалатын операциялар мысалдары және олар мерзімді жалған сұйылту, сондай-ақ үздіксіз жалған сұйылту ретінде жиі кездеседі. Мысалы, осы жалған сұйылту операцияларының екі түрі көмір мен биомассаны жағу және газдандыру кезінде қолданылады, бұл туралы 8 және 9-тарауларда егжей-тегжейлі талқыланады. Үздіксіз жалған сұйылту үлгісі болып табылатын газ ортасының қатты бөлшектерін пневматикалық тасымалдау, сондай-ақ энергетикалық қондырғыларда жиі кездеседі.

3.5.2 Қысымның өзгеруі

3.1-суретте көрсетілгендей қысымның түсуі Δp статикалық қабатындағы қосымша v_s сұйықтықтың беткі жылдамдығына байланысты, сондай-ақ L биіктік қабатына; ε кеуектілік қабатқа тәуелді. Қабаттың жалпы көлемінің берілген бос көлемге қатынасы; сұйықтық тығыздығы ρ_F және тұтқырлығын μ_F ; қатты бөлшектер арасында құрылған арналардың орта гидравликалық радиусы R_H . Қысымның ауытқуы осы арналар арасындағы сұйықтықтың жылдамдығымен ($V=v_s/\text{аударымдарды}$) бақыланады және $f_{\text{тығыз қабат}}$ үйкеліс коэффициентімен корреляциялануы мүмкін, ол өз кезегінде Рейнольдс Re санымен корреляциялануы мүмкін:

$$\frac{\Delta p R_H}{L \rho_F \bar{v}^2} = f_{\text{тығыз қабат}} = \phi(Re) = \phi\left(\frac{\bar{v} R_H \rho_F}{\mu_F}\right) \quad (3.15)$$

N қабатындағы қатты бөлшектер үшін гидравликалық радиус қабат қуысының $[=(NV\rho\varepsilon/(1-\varepsilon))]$ жалпы көлемінің қатынасымен толықтырылуы мүмкін және қатты бөлшек беттерінің жалпы ауданы (Nsp), онда VP және SP - бөлшектердің орташа көлемі мен бетінің ауданы. Сонымен қатар сұйықтықтың беткі жылдамдығын (vs) қолдана отырып, 3.15 теңдеуі түрінде жазуға болады:

$$\frac{\Delta p \varepsilon^3 V_P}{L \rho_F \bar{v}_S^2 (1 - \varepsilon) S_P} = f_{\text{тығыз қабат}} = \phi(Re) = \phi\left[\frac{\bar{v}_S V_P \rho_F}{\mu_F (1 - \varepsilon) S_P}\right] \quad (3.16)$$

3.16 теңдеуі **Казени-Карман теңдеуінің** түрі болып табылады. Бұл екі автор ешқашан бірге жарияланған емес, Казени (1927) осындай теңдеуді бірінші болып ұсынған болатын, ал кейінірек (1937, 1956) бұл теңдеуді Карман түрлендірді. Түйіршіктелген және қуыс бөлшектер үшін үйкеліс коэффициентіне байланысты Рейнольдс санының графиктерін **Маккаб пен Смитт еңбегінен** (1956) табуға болады. Рейнольдс саны төмен болса, $f_{\text{тығыз қабат}}=5/Re$ қатынасын компьютерде есептеуді жеңілдету үшін 3.16 теңдеуіне енгізуге болады. Сонымен қатар енгізілген λ_P формасының коэффициентімен Казени-Карман теңдеуінің ең танымал түрін аламыз:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \lambda_P^2 \mu_F \bar{v}_S}{\varepsilon^3 D_P^2} \quad (3.17)$$

λ_P формасының коэффициенті бөлшектердің сферикалық емес екенін және бөлшектердің үстіңгі бетінің ауданының эквивалентті көлем аясына қатынасы ретінде анықталады.

$\frac{(1/6 \pi)^{2/3}}{\pi} S_P / V_P^{2/3} = 0.2068 S_P / V_P^{2/3}$ және сфералар үшін тұтастық және артық 1 дұрыс емес бөлшек түрі болып табылады.

Форма коэффициентінің кестелік мәндері McCabe және Смит (1956) қол жетімді. Диаметрі D_P қатты бөлшектері бар қабат үшін Эргун теңдеуі (1952), Рейнольдс санының үлкен мәндерімен компьютерлік есептеулер үшін де қолайлы, 3.18 теңдеуі ретінде келтіріледі. Ол Рейнольдстің жоғары санын қолдана отырып, 3.17 теңдеуін кеңейту ретінде қарастырылуы мүмкін; оң жақ бөлігінде бірінші мүшесі 3.17 теңдеумен беріледі:

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \lambda_P^2 \mu_F \bar{v}_S}{\varepsilon^3 D_P^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \lambda_P \rho_F \bar{v}_S^2}{\varepsilon^3 D_P} \quad (3.18)$$

Жалған сұйылту қабаты үшін, (Лева және бірлескен авторлар), λ_P бөлшектерінің коэффициент түрін қолдана отырып, Рейнольдстің түрлендірілген үйкеліс коэффициентінің бұзылуының арақатынасын орнатты, келесі үшін МакКаб және Смит (1956) кестелерінің қатынастарын ұсынған:

$$\frac{\Delta p \varepsilon^3 D_P}{2 L \rho_F \bar{v}_S^2 (1 - \varepsilon)^2 \lambda_P^2} = f_{\text{сұйық қабат}} = \phi(Re) = \phi\left(\frac{\bar{v} D_P \rho_F}{\mu}\right) \quad (3.19)$$

Жалған сұйылтудың ең аз жылдамдығы, ол әлі статикалық болғанша, қабатқа әсер ететін пайда болған күштің, яғни, 3.18 теңдеумен анықталатын жалған сұйылтудың басында ($\Delta p \times$ қабаттың көлденең қимасының ауданы), таза да ұқсас күшке (қатты бөлшектердің салмағы – сұйықтықтағы қатты бөлшектердің балқуы) теңеу жолдарын есептеуге әкеледі, мұнда ρ_P – қатты бөлшектердің тығыздығы және g ауырлық күшінің әсерінен үдеу:

$$(\rho_P - \rho_F)g = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2 \lambda_P^2 \mu \bar{v}_S}{\varepsilon^3 D_P^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon) \lambda_P \rho_F \bar{v}_S^2}{\varepsilon^3 D_P}$$

3.5.3 Пневмокөлік

Бұл тасымалдау түрі құрғақ сусымалы қатты материалдарды ұнтақ тәрізді, түйіршіктелген немесе палеттік түрде тасымалдау үшін кеңінен қолданылады; ол қозғалатын бөліктердің аз санының, жинақы орналасуының арқасында басқа тасымалдау құралдарының алдында артықшылығы бар және қатты бөлшектер үшін бірнеше кіру және шығу жолдары болуы мүмкін, толық тұйықталған; тасымалдау қыздырумен, салқындатумен, кептірумен немесе араластырумен қатар жүреді. Тік ағын үшін тасымалдау сипаттамалары көлденең ағыннан айтарлықтай ерекшеленеді. Сонымен қатар пневматикалық тасымалдаудың екі негізгі түрі бар: сұйылтылған фаза және тығыз фаза. Сұйылтылған фазада тік тасымалдау кезінде қатты бөлшектермен газдың қатынасы төмен, бөлшектер біртекті суспензия түрінде тасымалданады, ал тығыз фазада тік тасымалдау кезінде қатты заттармен газдың қатынасы жоғары, неғұрлым ауыр немесе неғұрлым ірі бөлшектер партиямен тасымалдануы мүмкін, ал неғұрлым жеңіл немесе неғұрлым ұсақ бөлшектер кедергісіз ағыуы мүмкін. Көлденең пневматикалық тасымалдау үшін ағын режимдері неғұрлым күрделі болып табылады, өйткені олар тасымалданатын қатты бөлшектердің де азрациясының сипаттамаларына байланысты. Вогт және Уайт (1948) сол құбыр арқылы және сол жылдамдықпен біркелкі ағын үшін (яғни қатты бөлшектерсіз) қысымның ауытқуына қатты бөлшектер мен ағындағы қысымның ауытқуының қатынасы сыр етінде анықталатын қысымның салыстырмалы ауытқуын қамтитын тік және көлденең пневматикалық тасымалдау жүйелеріндегі үйкеліске қысымның ауытқуын бағалау үшін корреляция жасады. Мак Кейбпен Смит (1956) қатты бөлшектермен газ арасындағы жылжу жылдамдығын есепке ала отырып, қатты бөлшектерді көтеру және жылжыту үшін қажетті энергияны қосу жолымен қысымның ауытқуын бағалау әдістемесін сипаттайды.

3.6 ҚҰБЫРЛАРДАҒЫ АҒЫН ЖЫЛДАМДЫҒЫ

Сұйықтық ағынының жылдамдығы құбырлар мен фитингтердің шуын/дірілін және тозуын болдырмау үшін белгілі бір шектерден аспауы тиіс. Төменде кейбір ұсынымдар келтірілген:

* Сұйықтықтар: ең көп дегенде 15 фут/с (4,6 м/с), егер қысым ауытқуы шектелмеген болса; кем дегенде 3 фут/с (0,9 м/с) құбырдың төменгі бөлігінде қатты немесе сұйық бөлшектердің жиналуын болдырмау үшін. Алайда, сорғының сору жағында салқындатылған кезде жылдамдық 8 фут/с (2,4 м/с) дейін және қайнау нүктесі үшін 4 фут/с (1,2 м/с) дейін шектелуі тиіс (сұйық қоспаның қайнау нүктесі – бұл сұйықтық тек буланып қалатын нүкте), сору желісіндегі шығындарды азайту үшін және демек, сородың талап етілген биіктігіне қол жеткізуге болады, ол келесі бөлімде талқыланады.

* Газдар немесе булар: бір фазалы желі үшін ең көбі – 150 фут/с (46 м/с), **бірақ зауыттағы шуды ескерсек** – 60 фут/с (18 м/с) көрсеткішінен аспау керек; құбыр түбінде сұйықтықтың жиналуын болдырмау үшін кем дегенде 15 фут/с (4,6 м/с) болу қажет.

• Магистральдық газ құбыры: жылдамдық экономикалық ұстанымдарға сүйене отырып анықталады (сұйықтықтың орнын ауыстыру үшін қажетті энергия көлемін талап ететін қысымның ауытқуы мен құбырдың тиісті жабдықтары мен өлшемінің арасындағы оңтайлы ара қатынас негізінде).

* Екі фазалы ағын: эрозияның максималды жылдамдығы

$ve = C / \sqrt{\rho M}$, мұнда ve – эрозия жылдамдығы, ρM – жұмыс жағдайларындағы газ сұйықтықты қоспаның тығыздығы, ал C – тұрақты = 100 империкалық бірліктерде⁴ (ve секундтағы фунт және ρM в фунттағы кубтық фут) құбыр қабырғасының қалыңдығын периодтық бақылау өлшегішпен үздіксіз жұмыс істеу үшін, $C=125$ империялық бірліктерде

⁴ C бірлігіндегі C мәні СИ = 7,62 (ve метр секундына және ρM текше метрге килограмм)

тұрақсыз пайдалану үшін және

C=150-200 қатты бөлшектерсіз сұйықтыққа арналған имперсиялық бірліктерде немесе коррозияға төзімді қорытпалардың қосындыларымен немесе қолдануымен бақыланады.

3.7 Турбомашиналар мен компрессорлар

3.7.1. Сорғылар

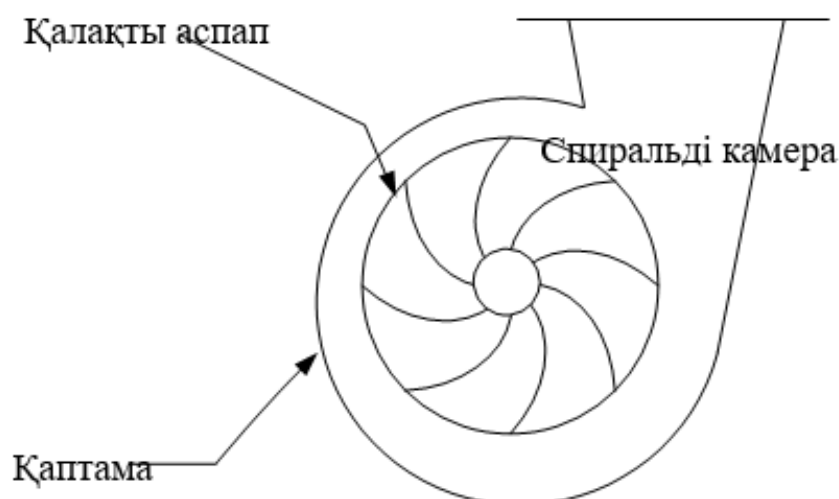
Сорғылар үйкеліс күштерін еңсеру, биіктікті арттыру және құбыр жүйесінің шығару соңындағы қысымға қойылатын талаптарды сақтау үшін механикалық энергияны қоса отырып, құбыр жүйесі арқылы сұйықтықты тасымалдау үшін пайдаланылады. Кейде "сорғы" термині "ауа сорғысы" және "вакуумдық сорғы" сияқты газ қысымын арттыруға арналған құрылғыларда қолданылады. Тікелей ығыстыру немесе кинетикалық сорғылар ретінде жіктеуге болатын түрлі сорғыштар бар. Поршеньді және ротациялық сорғылар тікелей ығыстырылатын поршеньді сорғылардың санатына жатады, ал кинетикалық сорғыларды ортадан тепкіш, осьтік немесе перифериялық сорғыларға бөлуге болады. Бұл санаттар қосымша әр түрлі кіші санаттарға бөлінуі мүмкін. Ортадан тепкіш сорғыларда сұйықтыққа, ең бастысы, ортадан тепкіш күш әрекет етеді, ал осьтік сорғыларда әсер аэродинамикалық көтеру немесе қанат шақалақтарының қозғалысы есебінен жүзеге асырылады. Радиалды ағыны бар сорғы орталықтан тепкіш сорғының мысалы болып табылады, одан сұйықтық радиалды, яғни сорғы білігіне перпендикуляр шығады.

Осьтік ағысы бар сорғы құбыр ішінде орнатылған және осьтік бағытқа кіретін және шығатын сұйықтықтың аэродинамикалық көтерілуін қамтамасыз ететін пропеллер түріндегі қанатшалардан тұрады. Аралас ағынның сорғыларында жұмыс ішінара орталықтан тепкіш күш есебінен және қалақтың аэродинамикалық көтеру әрекеті есебінен жүзеге асады. Негізгі түрлері көбінесе энергетикалық қондырғыларда кездеседі және төменде сипатталған.

3.7.1.1. Ортадан тепкіш сорғылар. Сұйықтық қаптаманың ішіндегі айналмалы қанатшаның ортасымен сорғыға түседі және қалақтардың ортадан тепкіш әсерінің арқасында сыртқа итеріледі. Сұйықтықтың кинетикалық энергиясы қанатшаның ортасынан оның ұшына дейін артады және сұйықтық қалақтар арқылы өтетін кезде кинетикалық энергия сұйықтықтың қысымына айналады. Мұндай түрлендіру диффузор ішінде жүреді, ол біртіндеп ағынның көлденең қимасының ауданын ұлғайту үшін спиральды қаптама түрінде жасалуы мүмкін және осылайша, сұйықтықтың жылдамдығын біртіндеп азайтады және бұл жағдайда ол спиральды қаптаманың құрылысы деп аталады (3.2-суретті қараңыз). Спираль қаптамасы сондай-ақ максималды тиімділік нүктесінде қанатша айналасында сұйықтықтың тұрақты жылдамдығын сақтауға арналған. Диффузордың баламалы дизайнының айырмашылығы ол қанатшаны дөңгелек корпусқа шығаруды қамтамасыз ететін бірнеше қалақтармен қоршайды. Көп сатылы орталықтан тепкіш сорғыларда білікке қанатшалар қатары құрастырылады және бірінші қанатшадан шығып, сұйықтық екінші қанатшаға және одан әрі қаптаманың ішкі арналары арқылы түседі. Осылайша, сұйықтық өнімділігі зиянсыз әлде қайда жоғары қысымға дейін айырылуы мүмкін. Мұндай сорғы жоғары қысымды Ренкин бу циклындағы қазандықтың қоректік су сорғысымен (ҚҚС) қолданылады.

Қанатшаның үш түрі бар: ашық, жартылай ашық және жабық (толық жабық, яғни екі жағынан бүйір қабырғалары бар). Ашық қанатшаның орталық ступицаға бекітілген қалақтары бар және бүйір қабырғалары жоқ, сондай-ақ берілген диаметрдің басқа да қанатшаларынан жеңілдірек, бұл білікке салынған аз күшке және демек, біліктің диаметрі мен құнының азаюына әкеледі. Ашық қанатшаның кемшілігі ол қаптаманың ішінде ұқыпты орналасуы тиіс, бұл ретте қанатшаның және қаптаманың арасындағы саңылау сорғының тиімділігін жоғалтуды азайту үшін барынша азайтылады. Саңылауды азайту, алайда сұйықтықтың жоғары жылдамдығына және қаптаманың жанында құйынның пайда болуына әкеледі, бұл шамадан тыс тозуға әкелуі мүмкін, әсіресе сұйықтықтың құрамында абразив бар болса. Әдетте ашық жұмыс қанатшаларының алдыңғы және артқы саңылауларда ағып кетуі салдарынан тиімділігі

төмен.



3.2- сурет Спиральді қаптамамен ортадан тебуші сорғы

Қанаттар қалқымалы қатты бөлшектер бар тұтқыр сұйықтықтар немесе сұйықтықтар үшін қолайлы. Бандаждың айналуынан туындаған бандаж бар қанатшада үйкеліс сорғының тиімділігін біршама жоғалтуға алып келеді. Тозған сақиналар қанатшаның теңестіру саңылауларымен үйлескен кезде қабық пен бандаж арасындағы ағуды болдырмау үшін пайдаланылуы мүмкін, бірақ айналмалы және қозғалмайтын тозған сақиналар арасындағы тым тар саңылау, әсіресе сұйықтықтың құрамында абразивтер бар болса, тез тозуы мүмкін. Қанатшаның артқы жағында тек бір қаптамадан тұратын жартылай жабық қанатшаның ашық және жабық қанатшаның арасындағы ымыралы шешім болып табылады. Егер сұйықтық бір жақтан ғана келіп түссе, онда қанатшалар бір жақты сору болады немесе сұйықтық екі жағынан келіп түссе, онда екі жақты сору болады.

3.7.1.2. Осьтік сорғылар. Бұл сорғылар сұйықтықты радиалды емес, осьтік бағытта жылжытуға арналған осьтік қанатшалардан тұрады. Олар әсіресе қысымның салыстырмалы төмен ұлғаюында ағынның салыстырмалы жоғары қысымын қажет ететін жерде қолайлы, бірақ кейбір құрылымдар сондай-ақ қанатша қалақтарындағы қадамды өзгерту жолымен ағынның төмен жылдамдығы мен жоғары қысымда тиімді жұмыс істей алады (яғни, сұйықтық бұрышын қалақшаның хордасына қатысты өзгерту). Электр станцияларындағы осьтік сорғылар әдетте салқын суды беру және нөсер суларын айдау жүйесі үшін қолданылады. Ағынды сулардың тазарту құрылыстары мұндай сорғыларды пайдаланады және бүкіл әлемде сенімді құрылғы болып саналады.

3.7.1.3. Ротациялық сорғылар. Тістегерішті, бұрандалы, қалақты және жұдырықшалы сорғылар роторлы сорғылар ретінде жіктеледі. Тістегерішті сорғыларда сорғыға түсетін сұйықтық қаптамасы бар баяу айналатын (ілінетін) механизмдердің тістері арасындағы аралықтарда кідіріп, сорғының айдалу жағына тасымалданады. Бұрандалы сорғылар жағдайында аралық тісті доңғалақтар бұрандасы бар, бірақ бұрандалар арасындағы тығыздама өте тиімді емес және төмен тұтқырлығы бар сұйықтық үшін қолайлы емес. Шибсорғысында қалақтар камераның ішінде орналасқан роторда орнатылған. Кейбір жағдайларда бұл қалақтар айнымалы ұзындықта болуы мүмкін және төмен қысымды секторға жоғары қысымды сектордан ағуды болдырмау үшін сорғыны айналдыру кезінде қабырғалармен байланысты ұстап тұру үшін жасалған. Өзінің қарапайым формасында қалақты сорғының цилиндрлік роторы бар, екі қалақтың арасында камераны құру үшін ортадан тыс дөңгелек қаптаманың ішінде енгізу жағында көлемнің ұлғаюымен және айдау жағында көлемнің азаюымен ерекшеленеді. Қалақты сорғыштарды қолданудың бір саласы-жоғары қысымды гидравликалық сорғылар, сондай-ақ вакуумдық сорғылар. Жұдырықшалы сорғы жағдайында қанатша осьтік бағытта орталықтандырылмаған айналмалы білікке айналады. Келіп түсетін сұйықтық қанатша мен қаптаманың арасындағы

кеңістік арқылы өтеді және бөлуші қалақтың екінші жағынан шығарылады. Мұндай сорғылар өте агрессивті сұйықтықтар үшін қолданылады. Тістегерішті, шибер және жұдырықшалы сорғылар әдетте қолдануға шектелген және мөлдір абразивті емес сұйықтықтармен пайдаланылады, бірақ тұтқырлығы жоғары немесе бу қысымы төмен сұйықтықтар үшін ерекше қолайлы. Олар сондай-ақ мөлшерлеуші сорғылар ретінде пайдаланылады, өйткені берілген жылдамдық кезінде тұрақты ығысады.

3.7.1.4. Поршеньді сорғы. Поршеньді типті, плунжерлі және диафрагмалық типті сорғылар тікелей ығыстыру сорғыларының мысалы болып табылады. Поршеньдік типті жағдайда айдау сұйықтығы цилиндрге бітеу клапаны арқылы поршеннің көмегімен қайтарымды-үдемелі жүрістің көмегімен тартылады. Поршень цилиндрдің ішіндегі толық жүрістің ұзындығына ауысқанда, поршеннің көлемді ығысуына эквивалентті сұйықтықтың көлемі сорғыдан шығарылады, бұл соғылушы ағынға алып келеді. Алайда сатылымдағы поршеньді сорғылардың көпшілігі соғылмалы ағынын тегістеу үшін бірнеше цилиндрлер бар. Қос әрекетті поршеньді сорғыларда цилиндр екі ұшында да іске қосу және шығару тесігі бар. Сұйықтық цилиндрге артқы ұшына тартылып, поршень алға жылжып, алдыңғы ұшы арқылы шығарылады. Поршень бағытын өзгерткенде кезектілік кері болады. Қос әрекетті сорғыларда бір жақты әрекет ететін сорғыларға қарағанда соғылулар төмен. Плунжерлік сорғылар жоғары қысыммен жұмыс істеу үшін пайдаланылады және ол негізінен ведомстволық біліктің жалғасы болып табылатын қайтарымды-үдемелі жүрістің плунжері бар шағын диаметрлі қалың қабырғалы цилиндрден тұрады. Поршеньді және плунжерлік типті сорғылар едәуір дәрежеде ортадан тепкіш немесе роторлы сорғылармен ауыстырылды, бірақ олар әлі де пайдаланылады, мысалы, ұшпалы немесе жоғары тұтқыр сұйықтықтарды айдау үшін, сондай-ақ ауыспалы жылдамдық пен поршеннің жүрісін талап ететін жағдайларда, мысалы, сұйықтық ағынын мөлшерлеу, бұл ҚҚС (қазандық үшін қоректік су) химикаттар қосу кезінде маңызды. Мембраналық сорғы жағдайында периферияға бекітілген, бірақ орталықта (осьтік бағытта) жылжымалы иілгіш диск батыру қызметін атқарады. Диафрагма механикалық немесе қысымдағы сұйықтықтың көмегімен жұмыс істей алады, мұндай сорғылар әдетте қалың суспензияларды айдау үшін пайдаланылады, поршеньді және плунжерлік түрі сұйықтықта қатты заттар, тасты немесе кір бар жерде жарамды емес.

3.7.1.5. Сорғының жылдам жұмыс істеуі. Турбомашинаның жұмыс істеуі үшін жалпыланған корреляцияларды алу кезінде пайдаланылатын өлшемсіз параметр (біздің жағдайда кинетикалық сорғы), егер оның өлшемі 1 м биіктікке 1 м³/с сұйықтықты берсе, геометриялық ұқсас қанатша жұмыс істейтін айналу жылдамдығы ретінде анықталатын NS меншікті жылдамдығы болып табылады (сорғы қанатшамен берілетін кинетикалық энергия кезінде жасай алатын сұйықтық бағанасының биіктігі). Математикалық NS былай анықталады:

$$N_s = \frac{NV^{0.5}}{(gH_{арын})^{0.75}} \quad (3.20)$$

мұндағы N – нақты айналу жылдамдығы, V – шығыс көлемді (қос соратын сорғылар үшін жалпы көлемнің жартысын пайдалану керек), g – гравитациялық үдеу және H_{арын} – арын. Сорғының жылдам жұмысына шығындар мен арынды есептеу үшін қажетті сорғы түрін таңдау кезінде бағдарлануға болады. Сорғының талап етілетін түрін таңдауға көмектесетін нұсқаулықтар, сондай-ақ жалпы арынның мәніне қарама-қарсы көрсетілген қажетті көлемді шығыны бар сорғылардың бар жерлерін көрсететін диаграмма түрінде қолжетімді. Мұндай сызбаны, мысалы, инженер-химиктерге арналған Перри (Грин, 2007) анықтамасында табуға болады.

3.7.1.6. Сіңірудегі тиімді оң қысым. Сұйықтықты енгізу тесігі арқылы соза алатын тікелей ығыстыру поршеньді сорғылардан айырмашылығы, орталықтан тепкіш сорғылар

"қосымша құюды" талап етеді, яғни сұйықтықпен⁵ толықтыруды қажет етеді. Егер сорғы өздігінен соратын құрылғымен жабдықталған болса, сұйықтық қысым астындағы сорғыға берілуі тиіс.

Бір рет іске қосылғаннан кейін ортадан тепкіш сорғы бірден сұйықтықты айдауды бастайды, бірақ сұйықтық буының қысымымен шектелген ағынның биіктігімен жүргізіледі. Сорғының орталық сызығынан жоғары сұйықтық деңгейі тіпті, үйкелуден, сондай-ақ сорғыға түсетін сұйықтықтың статикалық қысымына әсер ететін сұйықтық деңгейінен жоғары қысымнан жоғалады. Сорғыға түсетін сұйықтықтың статикалық қысымы, "соруда тиімді оң қысым" (СТОҚ) ретінде анықталатын бу қысымын алып тастағанда, сорғының ішінде булануды болдырмау үшін айтарлықтай қоры бар нөлден артық болуы тиіс. СТОҚ жеткіліксіз сұйықтықтың ішінде қуыстар немесе көпіршіктер пайда болады, олар сорғы ішінде жоғары қысымды секторға өту кезінде, шу, діріл және тіпті сорғының зақымдануы, сондай-ақ сорғының өнімділігі мен қысымының төмендеуі әкеліп соғады. Ортадан тепкіш сорғы үшін СТОҚ немесе $СТОҚ_R$ минималды талап $nsuct$ сорудың меншікті жылдамдығына байланысты, ол СТОҚ 3.20 теңдеуінде h_{imp} ауыстыру арқылы алынған салыстырмалы жылдамдық болып табылады. Кейде бұл қатынаста g есептелмейді, бұл $nsuct$ өлшемсіз санына әкеледі. Егер $N_{сорғы}$ және айналу жылдамдығы сорғының осы түрі үшін белгілі болса (сорғы өндірушісімен анықталады), онда талап етілетін көлемдік шығын үшін $СТОҚ_R$ есептелуі мүмкін. Бұл содан кейін сорғының белгілі бір түріне немесе сорғының белгілі бір түріне арналған СТОҚ толтыратын резервуардағы немесе ыдыстағы сұйықтықтың биіктігін анықтауға мүмкіндік береді. Сорғының қол жетімді түрлерінің/ жылдамдығының бар болуын көрсететін $СТОҚ_R$ -ге байланысты көлемді шығыс графиктерін кейде сорғыны өндіруші көрсетеді.

Поршеньді сорғылар жағдайында сору кезінде цилиндрді толық толтыру үшін жеткілікті СТОҚ (соруда тиімді оң қысым) талап етіледі. Оны есептеу кезінде h_{imp} "жылдамдатқыштағы арынды" ескеру керек, ол сору желісіндегі сұйықтық массасының инерциясын, оның жылдамдығын сорғы жұмысы кезінде өзгергенде нақтылауға мүмкіндік береді. Жылдамдатудың астындағы қысым СТОҚ азайтады және

$$H_{арын,acc} = K_{арын} \frac{L v N}{g Z_L}$$

ретінде есептеледі, мұнда $K_{арын}$ – сорғыға тән тұрақты шама және сорғыны өндірушімен ұсынылуы тиіс, L – сору желісінің ұзындығы, v – сұйықтықтың орташа жылдамдығы, N – сорғының айналу жылдамдығы, Z_L – сұйықтықтың қысылу өлшемі (1.4 су үшін; 2,4 ыстық май үшін), ag -ауырлық күшінің әсерінен үдеу.

3.7.1.7. Айдау қуаты. Сорғының жұмысы үшін қажетті қуат сорғының гидравликалық тиімсіздігін ғана емес, сонымен қатар сорғымен байланысты кез келген механикалық тиімсіздікті және сорғы (қозғалтқыштың немесе турбинаның) жетегінің тиімсіздігін ескеруі тиіс. Сорғымен талап етілетін біліктің жұмысы 3.2 теңдеуді интеграциялау жолымен турбулентті ағынның қысымсыздығына байланысты есептелуі мүмкін:

$$-W_s = \frac{\Delta p}{\rho} + g\Delta z + \frac{\Delta v^2}{2} + W_f$$

мұнда Δ – сорғыдан кейін бірден төмен орналасқан 2-станциядан құбыр жүйесіндегі сорғыдан кейін бірден жоғары орналасқан 1-станцияға дейінгі шамадағы айырмашылықты ұсынады (яғни, $\Delta X = X_2 - X_1$). Оң жақ бөлігіндегі мүшесі $\Delta P_{арын} / \rho$ болып өзгертілуі мүмкін, мұнда $\Delta P_{арын}$ – сорғының статикалық қысымының жоғарылауы әдетте сорғы шығысының арасындағы кинетикалық және гравитациялық әлеуетті энергиядағы өзгерістер өте аз болып табылады. Сорғы үшін қажетті гидравликалық қуат былай жазылуы мүмкін:

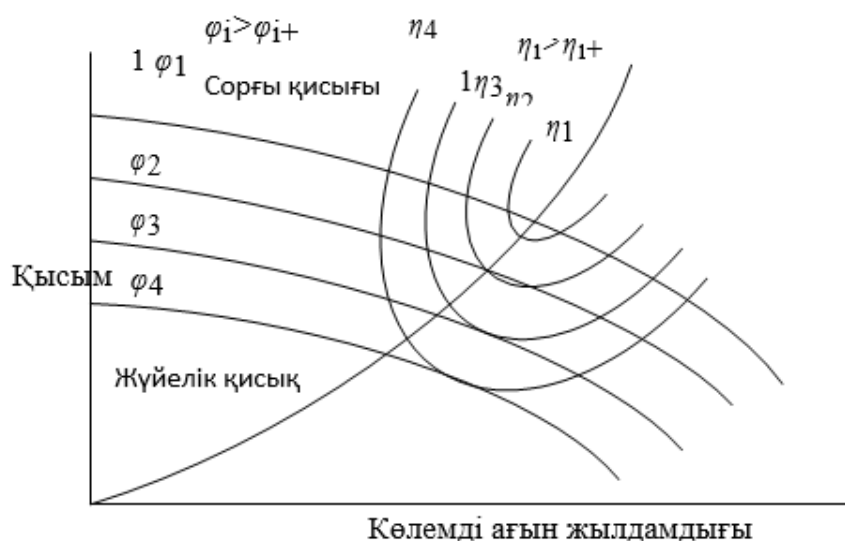
⁵ Айдау биіктігінің ұзындық бірліктері бар және $p/\rho g$ ретінде анықталады, мұнда p – сұйықтықтың қысымы, g – жергілікті гравитациялық үдеу және ρ – сұйықтықтың тығыздығы.

$$W_{Hy} = \frac{\Delta P_{арын} \dot{V}}{\eta H_y} \quad (3.21)$$

мұнда V – шығын көлемі, ал ηH_y – сорғының гидравликалық ПӘК. Поршеньді сорғы жағдайында көлемді тиімділікті ескеру қажет, ол өз кезегінде сұйықтың ағуын ескереді. Сорғының жұмысына байланысты кез келген механикалық шығындар, мысалы, мойынтіректердегі үйкеліс механикалық тиімділік деп түсіндірілуі мүмкін. Пайдалылық коэффициенттері 3.21 теңдеулер бөлімінде мультипликативті болып табылады, бұл сорғы үшін талап етілетін жалпы қуатқа әкеледі. Сонымен қатар сорғының жұмысы үшін қажетті жалпы қуат жетектің тиімділігін ескеруі тиіс.

3.7.1.8. Сорғының жүйелік талаптары мен сипаттамалары.

Технологиялық және энергетикалық жүйелер міндетті түрде ағынның тұрақты жылдамдығымен жұмыс істемейді. Мысалы, Ренкин қуатының циклінде қуатқа (жүктемеге) қажеттілік азаюы мүмкін, бұл өз кезегінде циклге енгізілетін жылудың аз мөлшерін және тиісінше, жұмыс сұйықтығы ағынының аз жылдамдығын талап етеді. Шығынның азаюы жүйедегі қысымның тиісті төмендеуін тудырады. Ағын жылдамдығы мен тиісті қысымның барлық диапазонында жақсы жұмыс істейтін сорғының жұмысын келісу үшін, сорғы сипаттамасының графигіне – жалпы арынның айырмасымен және ағынның жылдамдығымен жүйелік қысықтығына ескеруге болады. 3.3-суретте көрсетілген сорғының сипаттамасы түрінде ұсынылған қисық шығынының салыстырмалы қысым үшін берілген жиынтығының мөлшерін φ_i қалақты аспап немесе жылдамдықтың айналуы. Бұл графикте сонымен қатар η_i СТОҚ тиімділік контуры және толтыру қуаты жиі ескеріледі



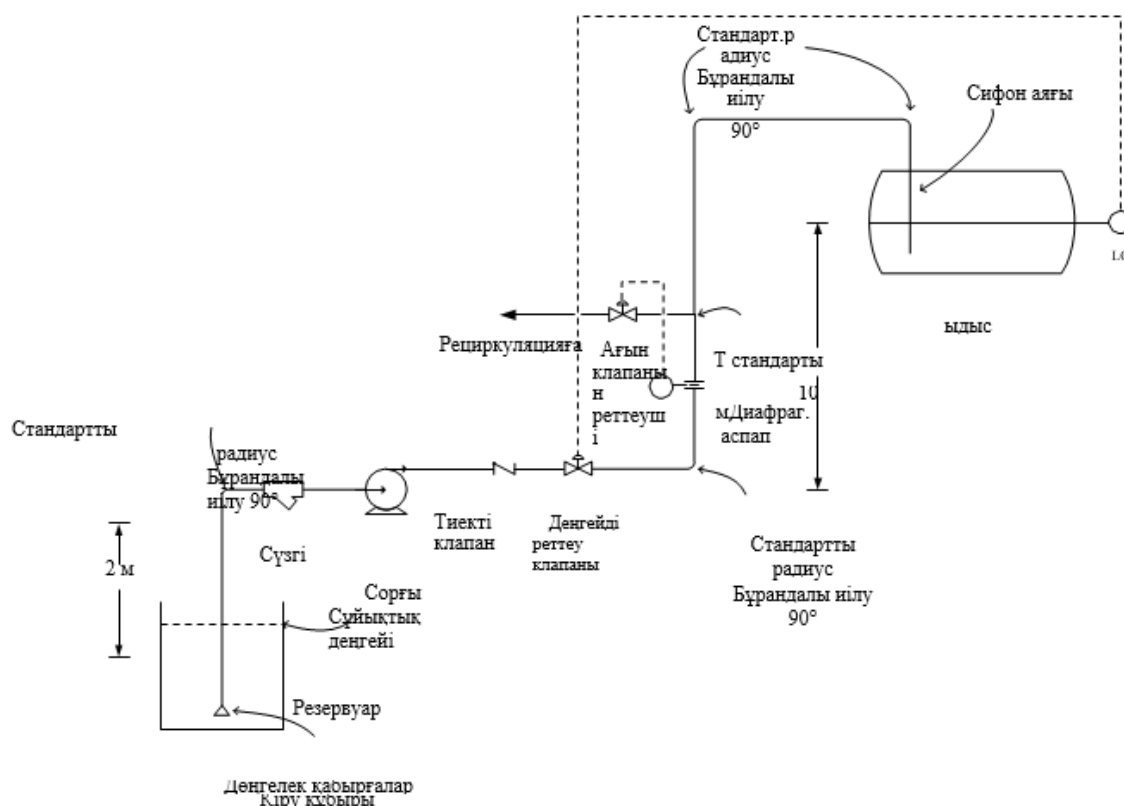
3.3-сурет. Ортадан тепкіш сорғы сипаттамалары және жүйелік талаптар

Бұл сипаттағы қисықтар әдетте 60°F температурада немесе 15°C жуық Құрама Штаттарда судың қасиеттері үшін қолданылады, бұл ретте нақты айдалатын сұйықтыққа және оның температурасына корреляцияны қолдану қажет. Кинетикалық сорғылар үшін шығынның қысымға тәуелділігінің графигі шығынның ұлғаюымен қысымның жылдам азаюын көрсетеді, ал жүйелік қисық қарама-қарсы үрдісті көрсетеді, яғни қысым шығынның азаюымен төмендейді. Тура ығыстыру сорғылары үшін бұл сәл теріс қиғаш сызық сияқты көрінеді, ол сорғының өнімділігі осы жылдамдық бойынша төмен кедергіге тәуелді емес екенін көрсетеді.

Сорғы режимінің жұмыс нүктесі жүйелік қисық пен сорғы қисығының қиылысында болады, ал талап етілетін жұмыс нүктесі ең жоғары тиімділік нүктесіне жақын болуы тиіс. Ағысты бақылау үшін сорғының артында орналасқан тиісті реттеуші клапанды таңдау жеңілдетіледі. Ағынның жылдамдығын төмендету қажет болғанда, реттеуші клапан сорғының айдау қысымын арттыру "пайдалану" үшін қысымның қосымша ауытқуын беруі тиіс (әдетте

қалыпты есептік шығын кезінде реттеуші клапан жоқ жүйедегі қысымның ауыспалы өзгеруіне тең қысымның ауытқуын қамтамасыз ету үшін реттеуші клапан өлшемі қажет). Сорғының сорғыш тесігіне кері сұйықтық бөлігін рециркуляциялау таза ағынын төмендету үшін пайдаланылуы мүмкін, бірақ кавитацияға әкелуі мүмкін сұйықтық температурасын жоғарылатудан аулақ болу керек. Бұл бақылау түрі әсіресе поршеньді сорғылар үшін пайдаланылады, өйткені олар су беруді реттемейді. Айналу жылдамдығын реттеу сорғының тағы бір тәсілі бақылау ағынның пайдаланылуы мүмкін кезде, жетегі турбиналық, ал жылдамдығы реттелетін қозғалтқыштар өте қымбат болып табылады.

3.2-мысал. 3.4-суретте көрсетілгендей электр жетегі бар сорғы атмосфераға ашылған резервуардан (1,014 бар қысымда) 25 °C температурада 70 м³/сағ суды айдайды, бұл ретте резервуардағы деңгей сорғының орталық желісінен 2 м төмен болады. Сорғы 20 бар қысымдағы ыдыстарға суды лақтырады, ал ыдыстағы сұйықтық деңгейі оның орталық сызығынан 10 м биіктікте болады (төгу құбыры сумен толтырылған және соған дейін ыдыстың үстінен су толтырылған қосымша биіктікте "сифонды аяқтың" соңғы түсуіне байланысты қарастырылмауы тиіс). Кіре берісте үйкеліс шығынын азайту үшін құбыр ернеуі жақсы дөңгелектенеді, ал сорғының сору құбырында қоқыс үшін сүзгі орнатылған (өлшенген бөлшектер). Сорғының шығу құбырында сорғы арқылы кері ағысты болдырмау үшін бекіту клапаны (бұрылыс түрі), қысым астындағы ыдыстағы деңгейді бақылау үшін шар клапаны және шығыс көлемін өлшеуге арналған диафрагмалық құрылғы (сорғы үшін жылдамдық белгілі бір ең төменгі мәнге жеткен кезде суды беру кезінде рециркуляция желісінде клапанды ашу үшін пайдаланылады) орнатылған. Диафрагмалық құралмен өлшенген қысымның өзгеруі 0,25 бар құрайды, бірақ мұндай ауытқудың 60% ағын бойынша төмен қалпына келеді деп болжауға болады. Құбырлардың жалпы ұзындығы сору жағында 10 м және айдау жағында 30 м құрайды. Изентроптық сорғының ПӘК-і 60%, ал білік мойынтіректері, нығыздау және қозғалтқыш салдарының шығындары 5%-ды (немесе $\eta_{\text{mech+elec}} = 95$) құрайды. 40 болат құбыр⁶ кестесі жағдайында құбырдың талап етілетін мөлшерін және осы жағдайларда қозғалтқышпен талап етілетін қуатты есептеуге болады.



3.4-сурет. Жоғары қысымды ыдыстарға резервуардан сұйықтық беретін сорғы

⁶ Графиктің өлшемсіз саны құбыр қабырғасының қалыңдығын анықтайды және: 1000 (ішкі жұмыс қысымы) / рұқсат етілген кернеу ретінде берілген.

3.1-КЕСТЕ. Құбырлардың таңдалған параметрлері

	Өлшем бірлігі.	Су тарту	Шығу
Сұйық шығыны (V)	м ³ /ч	70	70
	м ³ /с	0.01944	0.01944
Максим.рұқсат етілген жылдамдық	м/с	2.4	4.6
Стандартқа сай минималды диаметрі	мм	102	73
Кестеге сай 40 номин. Құбыр өлшемі немесе DN(номиналды диаметрі) (CraneCo.,1988)		100	80
Сыртқы диаметрі (D _o)	мм	114.3	88.9
Қабырға қалыңдығы (t)	мм	6.02	5.486
Ішкі диаметрі (D _i =D _o -2t)	мм	102.26	77.93
Таңдалған құбыр диаметріне сәйкес сұйықтықтың жылдамдығы (v)	м/с	2.37	4.08
Сұйықтық тығыздығы (ρ)	кг/м ³	997.0 при 25° С	997.0 at 25° С
Сұйықтықтың тұтқырлығы (μ)	кг/м·с	0.00091 при 25°С	0.00091 при 25°С
Рейнольдс саны		265,236	348,052
Таза болат құбыр үшін кедір-бұдыр (ε) (Crane Co., 1988)	м	4.57 × 10 ⁻⁵	4.57 × 10 ⁻⁵
Салыстырмалы кедір-бұдырлық (ε/D)		0.000447	0.00059
3.7(f) теңдеуінен Фаннинг үйкеліс коэффициенті		0.004652	0.00479
Муди үйкеліс коэффициенті (f=4×f)		0.01861	0.01916
Толық турбуленттілік аймағындағы ағын үшін үйкеліс коэффициенті (f _T) (CraneCo., 1988)		0.01700	0.01800

Шешімі

3.1-кестесінде бұдан басқа, осы тарауда талқыланған сұйықтықтың ең жоғары рұқсат етілген жылдамдығының өлшемдерін пайдалана отырып, құбырдың деректері мен таңдалған параметрлері жалпыланды, ал 3.2-кестеде сорғының сору және айдау жағындағы қысымның жоғалуы келтірілген.

Қайнар қысымы (P_{қайнар})=1.014бар;шығу қысымы (P_{шығу})=20бар.

Қайнар қысымы (Z_{қайнар})=-2м;шығу биіктігі (Z_{шығу})=10м.Сорғымен қысымды арттыру қажет,

$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{арын}} &= \Delta P_{\text{сорғы}} + \Delta P_{\text{disch}} + P_{\text{шығу}} - P_{\text{қайнар}} + Z_{\text{шығу}} g \rho_{\text{disch}} - Z_{\text{қайнар}} g \rho_{\text{всac}} \\ &= 0.12 + 1.4 + 20 - 1.014 + 10 \times 9.81 \times 997 - 0.100,000 / 100,000 \\ &= 21.68 \text{ бар н/е } 2,168,000 \text{ Па}.\end{aligned}$$

Қозғалтқыштың талап етілетін қуаты:

$$\dot{W}_{\text{эл}} = \frac{\dot{W}_{H_y}}{\eta_{\text{мех}} + \text{эл}} = \frac{\Delta P_{\text{арын}} \dot{V}}{\eta_{H_y} \eta_{\text{мех}} + \text{эл}} = \frac{2.168.00 \times 0.01944}{0.6 \times 0.95} = 73.940 \text{ Вт} = 74 \text{ кВт}$$

3.2-КЕСТЕ. Қысым шығыны (К мәндерінің көпшілігі No. 410 техникалық құжатынан келтірілген, CraneCo компаниясы, 1988)

		K/f_T' or $K/f' = L_e/D$	K	Саны	$\frac{\Delta P W_f \rho}{= K V^2 p/2}$ (кг/м /с ² or Н /м ² or Па)	ΔP (бар)
L (м)						
	Кіру кезіндегі шығындар (дөңгелектелген)		0.04	1	112	0.00
	Иілулер (стандартты бұранда)	30.00	0.51	1	1,425	0.01
	Сүзгі (Ү-түрі, 1-10 Тазалауға байланысты)		2.00	1	5,588	0.06
10	Тік құбыр (есепайырысу $K=f'L/D$)	97.79	1.82	1	5,084	0.05
	Жалпы ΔP_{suct}				12,209	0.12
	Шығу					
	Иілулер (стандартты бұранда)	30	0.54	3	13,421	0.13
	Бекіту клапаны (айналмалы)	100	1.7	1	14,084	0.14
	Реттеу клапаны (шарлы, Толығымен ашық)	340	5.78	1	47,886	0.48
	Диафрагмалық жабдық (40% берілген ΔP)			1	10,000	0.10
	Т-бейнелі жалғастырғыш тетік (стандартты тармақ арқылы ағынсыз)	5.4	0.092	1	761	0.01
	Шығудағы шығындар		1	1	8,285	0.08
30	Тік құбыр (есептеу $K=f'L/D$)	293.37	5.46	1	45,229	0.45
	Барлығы ΔP_{disch}				139,666	1.40

3.7.2 Компрессорлар

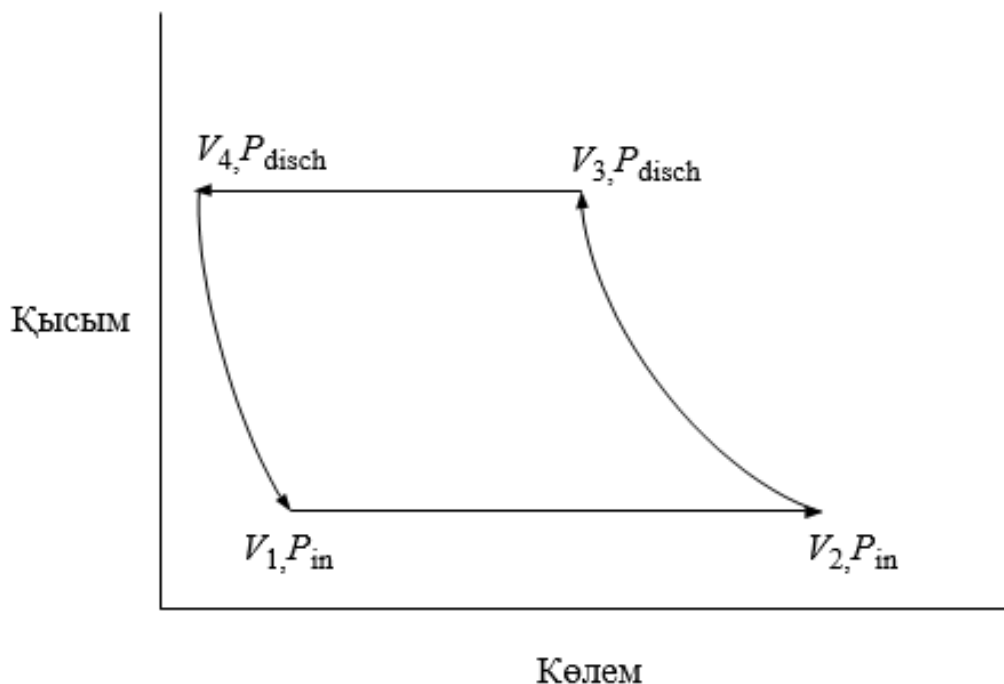
Компрессорлар газдарды құбырөткізгіштер жүйесі арқылы механикалық энергияның көмегімен тасымалдау үшін пайдаланылады, бұл ретте олардың қысымы құбыр өткізгіштегі үйкеліс күшін еңсеру үшін ұлғайтылады. Компрессорлардың негізгі үш түрі бар: динамикалық, механикалық сығымды және эжекторлы. Бұл категориялар өз кезегінде әр түрлі кіші категорияларға бөлінуі мүмкін. Динамикалық компрессорлар қанатты аспаптың айналып тұрған қалақшаларын немесе роторларды пайдалана отырып, инерция күшінің газға қосымшасымен жұмыс істейді. Механикалық сығымды компрессорларда тартып алынған газдың мөлшері көлемі жағынан кішірейеді де, кейін қысымы (және температурасы) ұлғаяды, содан кейін анағұрлым жоғары қысымда босайды. Эжекторлар газдың немесе будың қысымын басқа сұйықтық есебінен ұлғайтады. Энергетикалық қондырғыларда жиі кездесетін компрессорлардың негізгі түрлері төменде сипатталған.

3.7.2.1. Ортадан тепкіш компрессор. Газ корпуста орналасып айналып тұрған қалақшалардың ортасына жақын динамикалық компрессорға түседі де, сыртқа шығар бағытта пластиналардың немесе қалақшалардың ортадан тепкіш қимылдарының есебінен жылдамдайды. Қанатты аспап күпшекте орналасқан радиалды қалақшалардан тұрады және ашық болуы немесе жартылай жабық немесе ортадан тепкіш сорғылардағы сияқты құрсаулы болуы мүмкін. Сұйықтықтың кинетикалық энергиясы қанатты аспаптың ортасынан оның аяғына қарай ұлғаяды және сұйықтық қалақшалар арқылы өткенде, кинетикалық энергия радиалды диффузорлардың ішіндегі газдың баяулауы есебінен және әрі қарай разрядты диффузорлардың көмегімен қысымға айналады. Ортадан тепкіш көп сатылы компрессорларда білікке біраз қанатты аспаптар орнатылады, ал бірінші қанат арқылы өтетін сұйықтық екіншісіне түседі және одан әрі қарай жылжи береді. Сөйтіп, газ тиімділік үшін анағұрлым жоғары қысымға дейін зақымсыз сығылуы мүмкін.

Қалақшалардың үш түрі мынадай конфигурацияда болады: радиалды, қозғалыс бағытына қатысты кері және алға қарай имек. Ағынның жылдамдығына арынның тәуелділігі немесе қысымның қатысы қалақша түріндегі функциямен берілген; радиалды қалақшалармен арын іс жүзінде жазық болады, сол мезетте кері қайырылған қалақшалармен ол ағын жылдамдығын ұлғайта отырып кішірейеді, ал алға қарай қайырылған қалақшалармен ол ұлғаяды. Технологиялық қондырғыларда пайдаланылатын компрессорлардың көпшілігі радиалды немесе кері қайырылған қалақшалардан тұрады. Кері қайырылған қалақшалар жылдамдықтың кең диапазонында анағұрлым жоғары тиімділікті және тұрақтылықты қамтамасыз етеді және сол мезетте радиалды қалақшалар сияқты қарапайым құрылымға ие болады.

3.7.2.2. Осьтік компрессор. Бұл динамикалық компрессор да қаптаманың ішіне орнатылған ротордан тұрады, алайда роторға бекітілген қалақшалар қаптамаға бекітілген қозғалмайтын пластиналар қатарларының арасына орын ауыстырады. Қозғалмайтын қалақшалар тиісті бұрыш арқылы газды айналып тұрған қалақшаларға жібереді, ал айналып тұрған қалақшалар газға аэродинамикалық көтерім береді. Көпсатылы компрессор кезегімен айналатын және стационарлық қалақшалар қатарынан тұрады. Газ түгелімен дерлік осьтік бағытта қалақшаға кіріп шығады. Компрессордың бұл түрі анағұрлым ірі газ турбиналарында және IGCC арналған O_2 қамтамасыз ету үшін ауаны бөлу блогына қажетті көп мөлшердегі сығылған ауаны жіберу үшін қолданылады.

3.7.2.3. Піспекті компрессор. Компрессорда механикалық әсермен сығу газды цилиндрге сору жолымен және онда қысым түсіру піспекті цилиндр ішінде араластыру жолымен жүргізіледі. Бұл компрессор үшін термодинамикалық цикл 3.5-суретте бейнеленген. Сору барысында газ анағұрлым төмен $P_{к\text{іру}}$ қысымымен цилиндрге тартылады, бұл мезетте сорғыш қақпақшаның ашық күйінде және айдағыш қақпақшаның жабық күйінде цилиндр көлемі V_1 -ден V_2 -ге дейін ұлғаяды. Сығу кезінде сорғыш және айдағыш қақпақшалар жабық болады, ал сығу ырғағы аяқталған кезде, қысым P_{disch} дейін ұлғайып, ал цилиндр көлемі V_3 -ке дейін кішірейгенде, шығарғыш қақпақша ашылады да, цилиндрден анағұрлым жоғары қысымдағы газ бөлініп шығады. Газ жіберудің бұл тәсілінің соңында цилиндр көлемі V_4 -ке дейін кішірейеді де, шығарушы қақпақша жабылады, сол мезетте цилиндр саңылауында қалған газ айдағыш қысымның әсерінде қалады. «Пайдаланылмайтын» газ ретінде белгілі V_4 шағын көлемі цилиндрдің ішінде қалады, бұл кезде піспек өз қозғалысының алдыңғы күйінде болады және піспек пен цилиндр басының арасындағы байланыстың алдын алу үшін қажет. Содан кейін екі қақпақша да жабық кезде піспек қозғалысын жалғастырады және газ $P_{к\text{іру}}$ сору қысымына дейін кеңейеді, одан кейін қосымша газ енгізу саңылауы ашылғаннан кейін ішке тартылады және піспек циклдық операцияны жалғастыра отырып жылжиды. Енгізу және шығару қақпақтары тек піспек жүрісінің бір бөлігі бойы ғана ашық болатындықтан, ағын жүре бастайды және компрессордан шығу және оған кіру кезінде ағынның жатық болуын қамтамасыз ету үшін, сондай-ақ бүлкілді төмендету және компрессордың жүктемесінің артып кетуінің немесе жетпей қалуының алдын алу үшін оны тоқтату қажет.

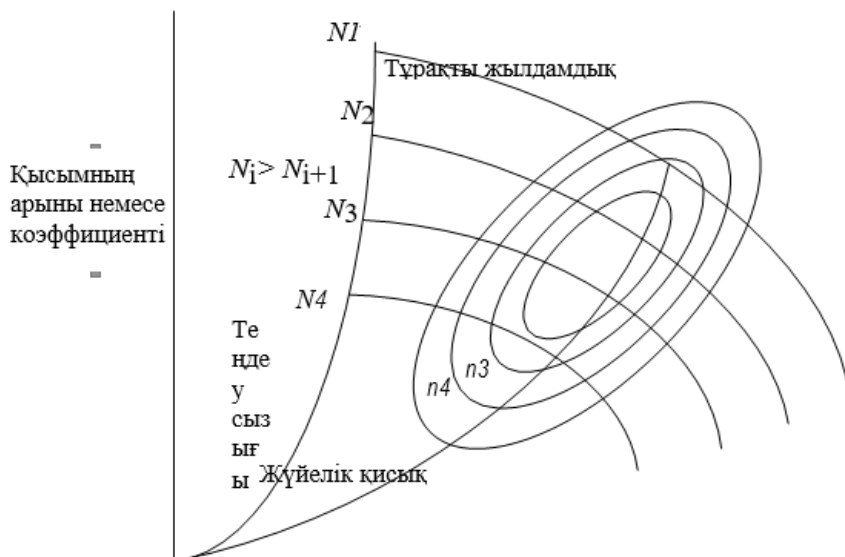


3.5-сурет. Піспекті компрессорға арналған қысым-көлем арақатынасының диаграммасы

Бүлкілді тоқтату үшін қарапайым тәсіл газға арналған камераны цилиндрдің кіру немесе шығу тесіктерінің қасына орнату болып табылады. Сондай-ақ бүлкілдеуші қысымға әсер ететін ішкі аралық қалқасы бар құрал ретінде танылатын бүлкілді жойғыштар да қолданылады. Піспекті компрессорлар ағынның анағұрлым төмен жылдамдықтарында айтарлықтай жоғары қысым талап етілген кезде ортадан тепкіш және осьтік компрессорлар ішінен таңдалады. Екі есе әсерлі піспекті компрессорларда цилиндрдің екі ұшында да енгізу және шығару тесіктері болады. Піспек алға жылжыған кезде газ цилиндрге артқы ұшынан беріледі және алдыңғы ұшынан шығарылады. Піспектің бағытын өзгерткен жағдайда жүйелілік кері айналады. Екі есе әсерлі сорғыда бүлкіл бір жақты қимылдағы сорғыға қарағанда төмен болады.

3.7.2.4. Айналмалы бұрандалы компрессор. Тура ығыстырмалы бұл компрессорлардағы айналып тұрған екі бұранданы газды сығу үшін қолданады. Құрғақ роторлы компрессорларда екі бұранда тісті берілістің көмегімен нақты айнаруды қамтамасыз етеді, сол уақытта маймен толтырылған бұрандалы компрессорда жағармай гидравликалық тығыздануды, сондай-ақ жетек және жетектегі бұрандалар арасында механикалық энергияның берілуін қамтамасыз ете отырып, бұрандалар арасындағы кеңістікті жабады. Газ винттер айналған кезде бұранда бойымен жылжиды, ал іліп алушы винттер газды компрессордың жоғары қысымды жағына қарай айдайды. Сығудың бұл әдісінің тиімділігі екі винт арасындағы, сондай-ақ винт пен камера арасындағы тесікті дәл орнатуға, сондай-ақ винттің құрамына байланысты. Компрессордың бұл түрі шағын электр станцияларына арналып сығылған газ шығыны ортадан тепкіш компрессорларға арналғандардан әлдеқайда төмен салаларда қолданылады.

3.7.2.5. Компрессордың жүйелік талаптары мен сипаттары. Сорғыларға арналған алдыңғы бөлімдерде айтылғандай, технологиялық жүйелер тұрақты ағында міндетті түрде жұмыс істемейді. Мысалы, газбен жұмыс істейтін электр станциясы үшін талап етілетін қуаттылық деңгейі (жүктеме) жоғары болмауы мүмкін және соған сәйкес циклға енгізілетін энергия аз талап етіледі және газ тәрізді жанармай шығыны да аз болады.



3.6-сурет. Компрессордың динамикалық және жүйелік талаптары

Шығынның азаюы тиісінше жүйедегі қысымның аумалы-төкпелілігінің төмендеуіне әсер етеді. Ағын мен қысым жылдамдығының барлық диапазонында қанағаттанарлық деңгейде жұмыс істейтін компрессор жұмысын келісімдеу үшін, компрессорлардың сипаттамалары графикасында ағынның арыны мен жылдамдығының жалпы айырмашылықтарымен жүйелік қисық сызылған. 3.6-суретте келтірілген компрессор сипаттамасы берілген N_i айналым жылдамдығында арынға тәуелді қисық шығын түрінде ұсынылған. Бұл кестеге КПД η_i контурлары да енгізілген, ал динамикалық компрессор жағдайында компаж туындауы мүмкін кезде бұл арын үшін ағынның төменгі шегін көрсететін жұмыс тұрақтылығының сызығы да көрсетілген. Помпаж кезінде ағынның бағыты өзгеруі мүмкін, бұл жабдықтың салмақты түрде бүлінуіне әкеледі. Ортадан тепкіш компрессорлар үшін де, біліктік компрессорлар үшін де тұрақты жылдамдық кезінде арынның шығынға тәуелділігінің кестесі шығын ұлғайғанда арынның кішіреюін көрсетеді, алайда бұл қисықтың өсу жылдамдығы біліктік компрессорлар үшін айтарлықтай жоғары. Жүйелік қисық қарама-қайшы үрдісті көрсетеді, яғни арын шығынның азаюымен азаяды. Ағынның жүйедегі жылдамдығы азайғанда, қысымға қойылатын айтарлықтай төмен талап егер компрессор турбинамен немесе ауыспалы жылдамдықты қозғалтқышпен (алайда мұндай қозғалтқыштар, ереже бойынша, тұрақты жылдамдықты қозғалтқыштардан қарағанда анағұрлым қымбат) қозғалысқа келтірілсе, қисыққа байланысты жылдамдықты реттеу жолымен немесе қақпақты аз тиімділікте қолдану жолымен анықталуы мүмкін. Тұрақты жылдамдықты піспекті компрессорлар үшін қисық тік сызық (қарсы көлбеумен) ретінде көрінеді, бұл компрессордың өткізгіштік қабілеті түгелдей дерлік бұл жылдамдықта ағын бойынша төмен қарсыласуға тәуелді еместігін көрсетеді.

Компрессордың жұмыс нүктесі жүйенің жүйелік қисығы мен компрессор сипаттамасының қисығының қиылысында орналасатын болады, ал талап етілетін жұмыс нүктесі ең жоғары тиімділік нүктесіне жақындатылуға тиіс.

Сору мен айдау қажет етілетін тек динамикалық компрессорлар үшін ағын жылдамдығының тиісті реттегіш қақпағын таңдау да жеңілдейді. Ағын жылдамдығын төмендету талап етілген кезде компрессордың айдау қысымының ұлғаюын «пайдалану» үшін (әдетте реттеуші қақпақ мөлшері қысымның айырмасын қамтамасыз ету үшін, қалыпты есептік шығында реттеуішсіз қақпақ жүйесінде қысымның өзгермелі айырымының жартысына тең) реттеуші қақпақ қысымның қосымша айырмасын қамтамасыз етуге тиіс. Бағыттаушы қалақшалардың көлбеу бұрыштарын өзгерту жолдарымен, алайда қысымның айтарлықтай айырмасынсыз газ ағынының жылдамдығын реттеу үшін, жылжымалы бағыттаушы енгізу қалақшалары ортадан тепкіш және үлкен біліктік компрессорлар үшін пайдаланылуы мүмкін. Тиімділігі: сығудың бірінші сатысының сипатын өзгерту және помпаж шегін төмендету; олардың әсері сатылардың жалпы санының ұлғаю межесіне қарай көрінуі солғындайды. Газ ағынының бір бөлігінің компрессордың сорғыш тесігіне кері айналымы таза

ағынды төмендету үшін пайдаланылуы мүмкін, бұл ретте сығу газ температурасын көтеретіндіктен, кері айналым газын салқындату үшін, жүйеге жылу алмастырғыш қосу қажет. Басқарудың бұл түрі әсіресе тура ығыстырғыш компрессорлар үшін қолданылады, өйткені олар реттелмейді. Компрессор жылдамдығын реттеу бұрын айтылғандай, таңдау кезіндегі тағы бір тәсіл болып табылады, ол турбина жетек болған кезде қолданылады, ал ауыспалы жылдамдықты қозғалтқыштар айтарлықтай қымбат.

3.7.2.6. Сығу қуаттылығы және аралық салқындату. Адиабатикалық сығуға ұшырағанмінсіз газ үшін, сығу қуаттылығы 3.26 теңдеуден көрінгендей кірудегі абсолютті температураға пропорционал болады. Жұмыс газда орындалатындықтан, оның температурасы көтеріледі; сығу уақытында газды салқындату сығу қуаттылығын төмендетеді, өйткені компрессордың ішіндегі газдың орташа температурасы төмендейді. Бұл құбылысқа жетудің іс жүзіндегі құралы – су немесе ауа сияқты ортамен жылу алмастырғыштасатылар арасында газды салқындату және әрі қарай сығу үшін оны компрессорға қайтадан беру. Аралық салқындатудан кейін қайтарылған газ компрессорға түскен газдың температурасымен бірдей болған кезде қысым коэффициенті сығу қуаттылығын азайту мақсатында аралық салқындатқыштардың берілген санын анықтау үшін n -ға бөлінеді, бұл ретте аралық салқындатқыштағы қысым айырмасы көп емес және 3.22. теңдеуімен анықталады:

$$\pi = \left(\frac{P_{\text{шығ.}}}{P_{\text{кірм.}}} \right)^{1/(n+1)} \quad (3.22)$$

мұндағы $P_{\text{кірм.}}$ және $P_{\text{шығ.}}$ – кіру мен шығудағы қысымның мәні, ал n – аралық салқындатқыштардың саны. Мысалы, бір аралық салқындатқыш жағдайында ағын бойынша аралық салқындатқыштан жоғары және төмен сатылар егер қысымының арақатынасы жеке саты үшін бірдей болса, қысымының жалпы коэффициенті бірдей болуға тиіс. Аралық салқындату сатыларының көп болуы сығу қуаттылығының жалпы төмендеуін білдіруі міндетті емес, өйткені қайтарымды азайту нүктесіне жеткізіледі, аралық салқындатқыштармен байланысты қысымның қосымша айырмасы температураның төмендеуімен байланысты қуаттылығының төмендеуін жоққа шығаруы мүмкін. Аралық салқындатқыштардың шығынын аралық салқындатқыштар сатысының сәйкес санын анықтау кезінде ескеру қажет. Кейбір жағдайларда аралық салқындату газ бен салқындатқыш орта тікелей байланысқа түспейтін жылу алмастырғышты пайдаланудың орнына сұйықтықты тікелей газға инжекторлау жолымен жүргізілуі мүмкін.

Сығу қуаттылығын төмендетуден басқа температура компрессордың материалдары мен құрылымына әсер етуі мүмкін.

Әдетте қайта өңдеу өнеркәсіптерінде қолданылатын ортадан тепкіш компрессорларда газ температурасының жоғарғы шегі 150°C құрайды, әсіресе газ оттегінің жоғары концентрациясына ие болса, өйткені O_2 жоғары парциалды қысымда өте реакцияға қабілетті. Хлордың немесе ацетиленнің жоғары концентрациясы бар газдар үшін температура қауіпсіздік себептеріне байланысты 90°C дейін шектелуі мүмкін. Біліктік компрессорлар үшін ауа температурасы (мысалы, газды турбиналарда) немесе инертті газда (азот сияқты) 600°C-дан асатын диапазонда есептелуі мүмкін. Компрессордан шығудағы шарт изоэнтропикалық жол арқылы және содан кейін кірудегі берілген шарттар жиыны үшін шығудағы нақты шарттарды анықтау мақсатында тиісті коэффициенттерді қолдану көмегімен есептелуі мүмкін. Бұл газ үшін (белгілі бір құраммен) температура мен қысымның берілген шарттар жиынында кірудегі энтальпия мен энтропия анықталады. Изоэнтропикалық сығу үшін $\Delta S_{\text{кірм.}} = \Delta S_{\text{шығ.ideal}}$, мұндағы $S_{\text{шығ.ideal}}$ – шығудағы энтропия. Белгілі $\Delta S_{\text{шығ.ideal}}$ шығудағы бұл қысым үшін энтальпия анықталады. Адиабаталық коэффициент $\eta_{\text{ад}}$ **политропиялық** көрсеткіш бойынша есептеледі, содан кейін шығу ағынындағы нақты энтальпияны орнату үшін пайдаланылады. Пайдалы қимылдың **политропиялық** көрсеткішін егер ол жабдықты өндірушіге белгілі болса немесе газ ағынының жылдамдығын (және сәйкесінше компрессор мөлшерін) ескеретін эмпирикалық арақатынас негізінде анықталған болсақолдануға болады. Мінсіз газ үшін осы екі коэффициент арасындағы арақатынас 3.23 теңдеуімен анықталады:

$$\eta = \frac{[(P_{\text{шығ.}}/P_{\text{кір.}})^{(k-1)/k} - 1]}{[(P_{\text{шығ.}}/P_{\text{кір.}})^{(k-1)/(\eta_P k)} - 1]} \quad (3.23)$$

мұндағы k – C_p/C_v меншікті жылу сыйымдылығының қатынасы. **Политропиялық** көрсеткішін – бұл адиабаталық сығу кезеңінің шексіз аз шамалы изоэнтропикалық тиімділігі, адиабаталық коэффициент аралық салқындатусыз сығу тиімділігін (яғни қоршаған ортамен жылусыз өзара әрекет үдерісі үшін) көрсетеді. **Политропиялық** көрсеткішін анықтама бойынша қысымның жалпы коэффициентіне тәуелді емес және компрессорларды қысымның әр түрлі коэффициенттерімен анағұрлым нақты салыстыруға мүмкіндік береді. **Политропиялық** тиімділік бойынша адиабаталық коэффициент есептелісімен шығудағы 3.24 теңдеуімен анықталуы мүмкін:

$$\Delta H_{\text{шығ.}} = \Delta H_{\text{кір.}} + (\Delta H_{\text{шығ.,идеал}} - \Delta H_{\text{кір.}})/\eta_A \quad (3.24)$$

$\Delta H_{\text{шығ.}}$ кірудегі және шығудағы энтальпия, $\Delta H_{\text{шығ.,идеал}}$ – изоэнтропикалық жолға сәйкес келетін шығу энтальпиясы (Шығу энтальпиясы бойынша температура анықталады. Талап етілетін және алынған жұмыс нәтижесі шығу мен кірудегі іс жүзіндегі энтальпия арасындағы айырмашылықпен анықталады. Мінсіз газ үшін $V_{\text{кір.}}$ кіру көлемді шығыны кезінде $W_{\text{газ}}$ адиабатикалық сығуға қажетті қуаттылық талап етіледі. 3.25 және 3.26 теңдеулерден есептелуі мүмкін:

$$W_{\text{газ}} = \frac{k P_{\text{кір.}} \dot{V}_{\text{кір.}}}{(k-1)\eta_A} \left[\left(\frac{P_{\text{шығ.}}}{P_{\text{кір.}}} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (3.25)$$

немесе $T_{\text{кір.}}$ температурасының негізінде $\rho_{\text{кір.}}$ ағынының молярлық шығынының және әмбебап газды тұрақты R_u :

$$W_{\text{газ}} = \frac{k R_u T_{\text{кір.}} \dot{n}_{\text{кір.}}}{(k-1)\eta_A} \left[\left(\frac{P_{\text{шығ.}}}{P_{\text{кір.}}} \right)^{(k-1)/k} - 1 \right] \quad (3.26)$$

қуаттылық компрессорға түсетін газдың абсолютті температурасына тура пропорционал екені көрінеді.

Бірақ бұл теңдеу белгілі дәрежеде $T_{\text{кір.}}$ алдында сығу коэффициентін енгізу жолымен мінсіз емес газды қамтиды. Компрессор жұмысы үшін қажетті жалпы қуаттылық мойынтірек пен редукторлар пайдаланылатын болса, ондағы үйкеліс сияқты шығындардан болған механикалық коэффициентті, сондай-ақ жетектің КПД ескеруге тиіс.

3.3-мысал. Оттегі ағынының 25°C температурадағы 2500 кмоль/сағ (Ar қалдық құрамымен O₂ 98% тазалығы шартында, яғни әдеттегі N₂ сүйемелдеуші құрам есебінсіз) және 2 бар қысымда 45 бар қысымға дейін сығу қажет. Компрессордың **политропиялық** көрсеткіші 88% пайызды құрайды, ол кезде компрессор жетегі КПД 97%-ке ие болады. 2%-те тиісті қуаттылық шығынында компрессор мен қозғалтқыш жылдамдығының келісілген жұмысы үшін тістегершік қажет. Қауіпсіздік мақсатынан оттегі температурасын 150°C дейін шектеу қажет, өте жоғары парциалды қысымда O₂ жоғары реакциялық қабілетті көрсетеді. Температураны мәлім етілген 150°C дейін шектеуге қажет аралық салқындатқыштардың минималды санын және оттегі ағыны өзін мінсіз газ сияқты ұстайтындай шартта қозғалтқышқа қажетті электр қуатын анықтаңдар. Аралық салқындатқышта оттегі ағыны 25°C дейін салқындатылуы мүмкін. Аралық салқындатқыш үшін (тиісті құбырөткізгішпен бірге) қысымның айырмасын бар бірлігінде $\Delta P_{\text{ар.салқ.}} = 0.09 P_{\text{кір.,ар.салқ.}}$ ретінде есептеуге болады, мұндағы кіру қысымы $P_{\text{кір.,intercooler}}$ бармен көрсетілген (мұндай корреляцияны өте жоғары кіру қысымында аса сақтықпен қолдану қажет, өйткені алынған маңызды қысым айырмасы талап етілмеуі

мүмкін), ол кезде мойынтіректер мен компрессор тығыздығында шығын ретінде киловатта Шеель (1961) теңдеуі бойынша есептеуге болады (киловаттағы л.с.шығыс газ қуаттылығының конвертациясы), $W_{\text{шығ.подш.+нығ.}}=08386 \text{ kW}^{04}$.

Шешімі:

Бірінші қадам сығу «үдерісінің кезеңі» санының алғашқы есебін алуды көрсетеді (бір аралық салқындатқыш үшін екі үдеріс кезеңі болады, ол кезде әрбір мұндай кезеңнің әдетте механикалық сығуға арналған көптеген ілеспе станциялары болады). Мінсіз газды изотропикалық-адиабатикалық сығу үшін $(P_{\text{шығ.}}/P_{\text{кіру.}})=(T_{\text{шығ.}}/T_{\text{кіру.}})^{(\kappa/(\kappa-1))}$, мұндағы кіру мен шығудың субиндекстеры бұл кезеңнің шығу және кіру ағындарына жатады⁷. Сандық мәндерді қойғанда, бұл қоспа үшін $T_{\text{кіру.}}=25+273=298\text{K}$, $T_{\text{шығ.}}=150+273=423\text{K}$, орташа мәні $\kappa=1.4$, мәні бойынша екі атомды газдан тұрады (технологиялық үдеріс кезеңінде температура мен қысымның өзгерісі айтарлықтай жоғары, κ -ге әсер ету үшін, κ -нің орташа мәнін есептеу үшін сынама және қателер әдісі талап етіледі), $P_{\text{шығ.}}/P_{\text{кіру.}}=3.4$. аламыз. Айдау температурасын 150°C -дан кем немесе бірдей немесе 423 K ұстап тұру үшін, изотропикалық емес сығу үшін қысым арақатынасының әрбірі <3.4 болады. Үдерістің екі кезеңінде $\Delta P_{\text{кіру.ар.салқ. ескермегенде}}$, қысым арақатынасы $(45/2)^{1/2}=4.7$ болады, бұл 3.4-тен артық және қолайсыз. Үш кезеңде қысым арақатынасы $(45/2)^{1/3}=2.8$ болады, бұл 3.4-тен аз, сөйтіп үдерістің үш сатысы жеткілікті болуы мүмкін. Іс жүзінде қысым коэффициенті сатыда $\Delta P_{\text{кіру.ар.салқ. өтеу үшін біраз жоғары болуға тиіс}}$. Сынама және қателесу әдісін әрбір кезеңдегі қысымның аздап көбірек арақатынасын болжай отырып, бірінші сатыдағы шығу қысымын және бірінші және екінші саты арасындағы $\Delta P_{\text{кіру.ар.салқ. ескере отырып, екінші саты үшін де осыны қолдана отырып пайдалануға, ал содан кейін соңғы кезеңдегі айдау қысымын талап етілген мәнімен салыстыру қажет.}}$

Қысым профилі орнатыла салысымен, η_A есептеу үшін 3.23 теңдеуін қолдануға болады, ал 3.26 теңдеуін – $W_{\text{газ.}}$ есептеу үшін қолдануға болады. Ақырында, қозғалтқышқа қажетті электр қуаттылығы, мойынтірек пен тығыздауыштағы шығын ескерілгеннен кейін есептелуі мүмкін Шеель арақатынасы бойынша), тісті беріліс шығыны 2% және қозғалтқыш КПД 97% мынадай:

$$\dot{W}_{\text{қозғ.қуаты}} = (\dot{W}_{\text{газ}} + \dot{W}_{\text{жоғалу, мойынтірек+нығыздағыш}})/(1 - 0.02)/0.97$$

Бұл есептеулердің нәтижелері 3.3-кестеде келтірілген. Қозғалтқышпен жалпы тұтынылатын электр қуаты $2650+2650+2650=7950\text{кВт}$ құрайды. Әрбір саты үшін талап етілетін қуаттылық бірдей, кірудегі температура, ағынның молярлық жылдамдығы, қысым қатынасы және адиабаталық тиімділік бірдей.

3.7.3 Желдеткіш және үрлегіш қондырғылар

Желдеткіштер және ауа үрлегіштер компрессорлармен салыстырғанда әжептәуір төмен қысым коэффициенттеріне ие, дейтұрғанмен олардың шығу қысымы айтарлықтай төмен. Американдық инженер-механиктер қауымдастығы (ASME) қысымның 1.11 максималды қатынасына және 1136 мм су бағаны айдау қысымына (су бағаны биіктігі бойынша өлшенген манометрлік қысым) ие желдеткіштерді, ал максималды 1,2 және одан жоғары мәнді, айдау қысымының 2066 мм су бағаны максималды мәнді айтарлықтай жоғары коэффициентке ие ауа үрлегіш қондырғыларды анықтайды. Желдеткіштер осьтік және ортадан тепкіш құрылғыларға арналған, сонымен қатар ауа үрлегіш қондырғылардың негізгі түрлері ортадан тепкіш және тура ығыстырғыш болып табылады.

⁷ Мінсіз емес сығу үшін адиабаталық коэффициентті енгізу жолымен шығарылған тиісті өрнек

$$\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right) = \left[\eta_A \left(\frac{T_{\text{out}}}{T_{\text{in}}} - 1\right) + 1\right]^{\kappa/(\kappa-1)}$$

3.3-КЕСТЕ. Компрессордың талап ететін қуаттылығы				
Үдеріс	Өлшем бірл.	1	2	3
$T_{кір.}$	К	298	298	298
$P_{кір.}$	Бар	2	5.52	15.45
$\Delta P_{салқындатқыш}$	Бар	0.31	0.63 ^a	
$P_{шығ.}$	Бар	5.83	16.08	45.00
η_P	%	88.00	88.00	88.00
η_A	%	86.09	86.09	86.09
$T_{шығ.}$	К	422	422	422
$\eta_{кір.}$	кМол/с	0.6944	0.6944	0.6944
R_u	кДж/кМол/К		8.314	
$W_{газ}$	кВт	2500	2500	2500
$W_{подшипник+}$	кВт	19	19	19
$W_{механизм.жоғ.}$	%	2	2	2
$\eta_{мотор}$	%	97	97	97
$W_{электрлік}$	кВт	2650	2650	2650

^aжоғары қысымның мұндай айырмасы міндетті емес және жабдықтар мен электр энергиясына жұмсалған шығын арасындағы ымыралы шешімдерді талдау жолымен анықталуға тиіс.

3.7.4. Кеңейткіш турбина

Турбиналар сығылған газдан немесе будан ұлғайту жолымен өндірістік қуаттылық үшін пайдаланылады. Бұл қондырғылар кері бағытта жұмыс істейтін компрессорлар ретінде қарастырылуы мүмкін. Радиалды жіберу турбины ортадан тепкіш компрессормен ұқсас. Олардың компрессорлық аналогтары сияқты, радиалды жіберу турбиналары осьтік турбиналарға қарағанда ағынның аз жылдамдығына сай келеді. Осьтік турбинаны алғаш қолдану бұмен жұмыс істеуге арналды, бұл технология кейін қысымдағы газ көлемін ұлғайту үшін қолданылды. Осьтік турбиналар да біліктік компрессорлар сияқты стационарлық және айналып тұратын қалақшалардың алма-кезек орналасқан қатарларынан тұрады

3.7.4.1. Қуаттылықты ұлғайтумен жылыту. Сығылған газдан немесе будан алынған қуаттылық температураны көтерген кезде ұлғаяды; мінсіз газ үшін қуаттылық ұлғайтылатын газдың абсолют температурасына тура пропорционал.

Сығу жағдайындағы аралық салқындатуға ұқсас ішінара ұлғайтылғаннан кейін газды жылыту да алынатын қуаттылықтың көлемін ұлғайту үшін пайдаланылуы мүмкін. 6-тарауда ұлғайту циклдерінің әр түрлі типі қарастырылады. Ұлғайтудан шығу шарттары изоэнтропикалық жолға сүйене отырып есептелуі мүмкін, ал содан кейін кірудегі белгілі шарттар жиыны үшін шығудағы нақты шарттарды анықтау үшін тиісті коэффициентті қолданады. Газдың берілген құрамы және температура шарттары және кірудегі қысым үшін, алдымен кіру энтальпиясы мен энтропиясын анықтайды. Изоэнтропикалық сығу үшін $\Delta S_{кіру} = \Delta S_{шығ.идеал}$, мұндағы ΔS шығ., идеал – шығудағы энтропия. Белгілі $\Delta S_{шығ.идеал}$ – мен шығудағы берілген қысым үшін энтальпия анықталады.

Детандерден шыққан газдың немесе будың энтальпиясы мынадай ретте анықталуы мүмкін:

$$\Delta H_{шығ.} = \Delta H_{кір.} + (\Delta H_{шығ.,идеал} - \Delta H_{кір.})/\eta_A \quad 3.27)$$

мұнда $\Delta H_{кір.}$ және $\Delta H_{шығ.}$ – кіру мен шығудағы нақты энтальпиялар, $\Delta H_{кір.,идеал}$ – изоэнтропикалық жолға сәйкес келетін шығудағы энтальпия. Шығудағы белгіленген нақты энтальпиямен температура анықталады. Талап етілетін немесе алынған қуаттылық шығу мен кірудегі нақты энтальпиялардың арасындағы айырмашылықпен анықталады.

Адиабатикалық коэффициенттер әдетте ұлғайтылатын газдың көлемдік шығынына, сондай-ақ кірудегі температураның, қысымның және ұлғайтылған қысымның (яғни қысымның кірудегі және шығудағы қатынасы) шарттарына байланысты болады. Қуаттылығы 16,5МВт артық бу турбиналары үшін Спэнсердің және басқалардың (1974) эмпирикалық корреляциясы қолданылады.

3.25 теңдеугіне ұқсас теңдеуді мінсіз газ жағдайында турбина қуаттылығын есептеу үшін пайдалануға болады:

$$\dot{W}_{\text{Газ}} = \frac{k P_{\text{кір.}} \dot{V}_{\text{кір.}} \eta_A}{(k-1)} \left[1 - \left(\frac{P_{\text{шығ.}}}{P_{\text{кір.}}} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.28)$$

немесе температураның $T_{\text{кір.}}$, ағынның молярлық жылдамдығының $\rho_{\text{кір.}}$ және әмбебап газдық тұрақты R_u :

$$\dot{W}_{\text{Газ}} = \frac{k R_u T_{\text{кір.}} \dot{n}_{\text{кір.}} \eta_A}{(k-1) \eta_A} \left[1 - \left(\frac{P_{\text{шығ.}}}{P_{\text{кір.}}} \right)^{(k-1)/k} \right] \quad (3.29)$$

3.29-теңдеуден турбинамен алынған қуаттылық турбинаға түсетін газдың абсолютті температурасына тура пропорционал екендігі көрінеді.

ӘДЕБИЕТ

- Avallone E, Baumeister T, Sadegh A, editors. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
- Beggs HD, Brill JP. A study of two-phase flow in inclined pipes. *J Petrol Tech* 1973; May:607-617.
- Benedict RP, Carlucci NA, Swetz SD. Flow losses in abrupt enlargements and contractions. *J Eng Power Trans ASME* 1966;88:73-81.
- Carman PC. Fluid flow through granular beds. *Trans Inst Chem Eng Lond* 1937;15:150-166.
- Carman PC. *Flow of Gases through Porous Media*. London: Butterworths; 1956.
- Collier JG. *Convective Boiling and Condensation*. 2nd ed. Berkshire: McGraw-Hill; 1972. Crane Co. Flow of fluids through valves, fittings, and pipe. Technical Paper No. 410; Lacey, WA: Crane Co.; 1988; p 410.
- Ergun S. Fluid flow through packed columns. *Chem Eng Progress* 1952;48(2):89.
- GPSE Engineering Data Book. Vol. 1. Section 7. 13th ed. Tulsa, OK: Gas Processors Suppliers Association; 2013.
- Green DW, editor. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill; 2007.
- Kozeny J. Ueber kapillare Leitung des Wassers im Boden. *Sitzungsber Wien Akad* 1927;136:271-306.
- Lapple CE. Isothermal and adiabatic flow of compressible fluids. *Trans Am Inst Chem Eng* 1943;39:385.
- Marjanovic P, Djordjevic V. On the compressible flow losses through abrupt enlargements and contractions. *J Fluids Eng* 1994;116:756-762.
- McCabe WL, Smith JC. *Unit Operations of Chemical Engineering*. New York: McGraw-Hill; 1956.
- Romeo E, Royo C, Monzon A. Improved explicit equations for estimation of the friction factor in rough and smooth pipes. *Chem Eng J* 2002;86(3):369-374.
- Scheel LF. *Gas and Air Compression Machinery*. New York: McGraw-Hill; 1961.
- Spencer RC, Cotton KC, Cannon CN. A method for predicting the performance of steam turbine-generators, 16,500 kW and larger. Paper no. 62-WA-209; ASME Winter Annual Meeting; Revised July 1974 version; New York.
- Vogt EG, White RR. Friction in the flow of suspensions—granular solids in gases through pipes. *IndEng Chem* 1948;40:1731-1738.

4

ЖЫЛУ БЕРУГЕ АРНАЛҒАН ЖАБДЫҚТАР

4.1 ЖЫЛУ БЕРУ НЕГІЗДЕРІ

Жылу берілісі жылу қозғалтқыштарын пайдаланатын электр станцияларында маңызды рөл атқарады. Мысалы, Ренкин циклын пайдаланатын қондырғыларда жылу қайнау нүктесіне жақын температураға дейін сұйық күйдегі жұмыс сұйықтығын қыздыру үшін, содан кейін оны буландыру үшін жылу алмастырғыштарды пайдалана отырып, жылу көзінен жұмыс сұйықтығына берілуі тиіс, содан кейін әдетте будың қызып кету үдерісі болады. Одан әрі, термодинамиканың екінші заңымен бекітілген шектеулерге байланысты, жұмыс сұйықтығына берілетін жылудың едәуір бөлігі қоршаған ортаға (атмосфераға) бөлінуі тиіс. Бұл жұмыс сұйықтығынан салқындатқыш су сияқты салқындатқыш ортаға немесе пайдаланылатын жылу бұру режиміне байланысты тікелей қоршаған ауаға жылу беруді талап ететін жылу беру үдерісінің тағы бір мысалы. Мұнда жұмыс сұйықтығы қайтадан фазалық түрленуге, бірақ циклді аяқтау үшін будан сұйық фазаға ұшырайды. Осылайша, сұйықтықтар арасындағы жылу берілісі фазалық түрленуді қамтуы немесе қоспауы мүмкін, ал тиісті жылу беру жылдамдығы айтарлықтай өзгеше болуы мүмкін.

Жылу берудің үш режимі бар: сәулелену, кондукция және конвекция. Пеште көмір немесе биомасса сияқты отынды жағуды қарастырайық, мұнда берілетін жылужұмыс сұйықтығына, қыздырылған жану өнімдерінің әсеріне ұшырайтын түтікшелердің ішінде ағатын, су мен будан тұратын Ренкин циклына босатылады.

Жану өнімдерінен түтікшелерге жылу берудің негізгі режимі **сәулелендіру** болып табылады. Жылу берудің осы режимінде жылу энергиясы электромагниттік спектрдің инфрақызыл және көрінетін бөліктерінде **сәулеленетін** фотондармен беріледі. Екі үстіңгі беттің арасында алмасатын, сәулеленетін жылу «екі жақты өзара әрекеттесу» болып табылады, себебі екі үстіңгі бет саны оның температурасына және бетінің қасиеттеріне байланысты болатын сәулеленуді шығарады, және де жылу берудің таза бағыты мен таза саны инженерлік тұрғыдан қызығушылықты арттырады.

Бұдан әрі жылу сыртқы бетінен түтікшелердің қабырғалары арқылы ішкі бетіне кондукциямен (жылу өткізгіштігімен) беріледі. Жылу берудің осы режимінде жылу энергиясы молекулалардың тікелей соқтығысуы арқылы едәуір үлкен молекулалық кинетикалық энергиясы аумағынан неғұрлым төмен молекулалық кинетикалық энергиясы аумағына беріледі. Бұдан басқа металл болған жағдайда тасымалданатын жылу энергиясының едәуір бөлігі кондукция аймағының электрондарымен ауыстырылады.

Соңында жылу содан кейін конвекция жолымен ішкі қабаттың бетінен суға беріледі. Жылу берудің осы режимінде жылу энергиясы диффузиямен, сонымен қатар сұйықтықтың қозғалысын неғұрлым ауқымды қамтитын адвекциямен беріледі.

Осылайша, сұйықтық ағынының қасиеттерін толық түсіну конфигурацияны анықтау, талдау немесе энергияны түрлендіру қондырғыларын жобалау, сондай-ақ жылу беруге байланысты шығындарды есепке алу қажеттілігін түсіну және осы шығындарды азайту үшін

шешімдерді іздеу үшін маңызды мәнге ие. Осы тараудың мақсаты – энергияны түрлендіру температура жылу берудің қозғаушы күші болып табылады, бірақ материалдың кейбір қондырғыларын талдау және жобалау үшін қажет жылу алмасу жабдығының кейбір түрлеріне кіріспе жасау. қасиеттері мен жұмыс жағдайлары әр түрлі температураларда екі аймақ арасында жылу беру жылдамдығын бақылайды. Жылу беру режиміне байланысты олар жылу өткізгіштікті, меншікті жылу сыйымдылығын, үлестік массаны, сұйықтықтың жылдамдығы мен тұтқырлығын және сәулелі жылу беру жағдайында беттің сәулелендіру қабілетін қамтуы мүмкін.

4.1.1 Кондукция

Белгіленген үдерістің жылу өткізгіштігінің негізгі теңдеуі декартты координаттарда бір өлшемді жылу ағыны үшін (мұнда материалдағы температура T – бұл x қимасының жеке алынған функциясы) және цилиндрлік координаттарда осесимметриялы жылу ағыны үшін (мұнда материалдағы температура T – бұл радиалды r қимасының жеке алынған функциясы) көрсетілген Фурье заңы болып табылады

$$\frac{dQ}{dt} = -k A \frac{dT}{dx} = -k(2\pi r L) \frac{dT}{dr} \quad (4.1)$$

мұндағы dQ/dt – жылу берудің жылдамдығы, k – жылу өткізгіштігі деп аталатын материалдың физикалық қасиеті, сол арқылы шартты бірліктері 4.1-теңдеуде ұсынылған басқа айнымалылар үшін пайдаланылатын шартты бірліктерге байланысты кондукция жүргізіледі, A – жылу ағынына перпендикуляр жылу беру бетінің ауданы, ал L – осьтік ұзындық. Әр түрлі материалдардың жылу өткізгіштігін «Маркстің инженер-механиктерге арналған нұсқаулығы» (Аваллоне және т.б., 2006 ж.) және «Перри. Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Грин, 2007 ж.) сияқты анықтамалықтардан табуға болады. Ол температураға байланысты өзгереді, бұл ретте температураның рұқсат етілген диапазоны көрсетіледі немесе кейде қажетті температураға қатысты оның мәнін түзету үшін корреляцияларды келтіреді.

4.1.2 Конвекция

Конвекцияның екі түрі бар: табиғи және мәжбүрлі. Табиғи конвекция кезінде сұйықтықтың қозғалысы температураның айырмасынан туындаған сұйықтықтың түрлі аймақтарындағы тығыздықтағы айырмашылықтар есебінен қамтамасыз етіледі, ал мәжбүрлі конвекция кезінде қозғалыс сұйықтыққа сыртқы күштердің көмегімен беріледі. Ньютонның салқындату заңына ұқсас, конвекцияның негізгі теңдеуі төменде келтірілген:

$$\frac{dQ}{dt} = hA\Delta T \quad (4.2)$$

мұндағы dQ/dt – берілетін жылу жылдамдығы, h – шартты бірліктері 4.2-теңдеуде көрсетілген басқа айнымалылар үшін пайдаланылатын шартты бірліктерге байланысты жылу беру коэффициенті ретінде белгілі пропорционалды константа, A – жылу ағынына перпендикуляр жылу беру бетінің ауданы, ал ΔT – температуралар айырмашылығы. Жылу беру коэффициенті ағын түрін (ламинарлы немесе турбулентті), қатты бетке қатысты ағынның бағытын немесе фазалық айнарудың пайда болуын және өлшеусіз топтарда сұйықтықтың белгілі физикалық қасиеттерін сипаттайтын белгілі бір өлшемсіз топтармен сәйкес келеді. Осындай корреляциялар «Үдерістің жылу берілісі» (Керн, 1950 ж.) секілді жылу берілісі жөніндегі стандартты оқулықтарда, сондай-ақ «Маркстің инженер-механиктерге арналған нұсқаулығы» (Аваллоне және т.б., 2006ж.) және «Перри.Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Грин, 2007ж.) сияқты анықтамалықтарда келтірілген. Төменде энергетикалық қондырғыларда, яғни жылу алмасатын екі сұйықтықты тұрақты бөлу үшін қатты бетті пайдаланатын жылу алмастырғыштарда (мысалы, түтіктер) пайдаланылатын, беттік типті жылу алмастырғыштарда жиі кездесетін ағын жағдайларының кейбір мысалдары келтірілген.

Басқа түрдегі жылу алмастырғыштар жылу алмасатын тікелей физикалық жанасумен байланысты және 5-тарауда ұсынылған, себебі олар әдетте бір мезгілде массалық тасымалдануды (мысалы, градириялар мен ылғалдағыштар) көздейді.

4.1.2.1. Тік және көлденең жазық беттен еркін конвекция арқылы жылу беру.

Резервуарлардың сыртқы беттерінен, сондай-ақ пеш қабырғаларынан жылу шығынын есептеу осындай беттерден еркін конвекциялау үшін жылу беру коэффициентін білуді талап етеді. Тік (салқындатылған немесе жылытылатын) беттер үшін осыны келесі корреляция (Дрю және т.б. 1936ж.) бойынша есептеуге болады.:

$$Nu = c_1 [(Gr) (Pr)]^{c_2} \quad (4.3)$$

мұндағы Nu – өлшемсіз hL топтамасымен берілген Нуссельт саны, Gr – өлшемсіз $L^3 \rho^2 g \beta \Delta T / \mu^2$ топтамасымен берілген Грасгоф саны, ал Pr – өлшемсіз $C_p \mu / k$ топтамасымен берілген Прандтль саны. Грасгоф және Прандтль сандарының көбейтіндісімен (Рэлей саны деп белгілі) сипатталатын $c_1 = 0,13$ константалары және турбуленттік диапазонға арналған $c_2 = 1/3$ константасы 10^9 – 10^{12} диапазонда орналасқан. Рэлей санымен сипатталатын $c_1 = 0,59$ және $c_2 = 1/4$ константалары 10^4 – 10^9 диапазонында.

Өлшемсіз сандармен пайда болатын түрлі айнымалылар:

h = жылу берудің коэффициенті

L = үстіңгі беттің биіктігі

g = ауырлық күшінің үдеуі

ΔT = үстіңгі бет пен сұйықтық арасындағы температуралардың айырмашылығы

k, ρ, β, μ , және C_p = жылу өткізгіштігі, тығыздығы, жылу кеңеюінің коэффициенті, тұтқырлығы және тұрақты қысым, сәйкесінше, сұйықтықтың тұрақты қысымының меншікті жылу сыйымдылығы.

Салқындатылатын және жоғарыға қарай бағытталған (немесе жылытылған және төменге қарай бағытталған) тік үстіңгі беттер үшін 4.3-теңдеуде туындайтын константалар Рэлей санының көбейтіндісімен сипатталатын, 10^5 – 10^{10} диапазонда орналасатын $c_1 = 0,27$ және ламинарлық диапазон үшін $c_2 = 1/4$ (Инкропера және ДеВитт, 1996ж.).

Салқындатылатын және төменге қарай бағытталған (немесе жылытылған және жоғарыға қарай бағытталған) көлденең үстіңгі беттер үшін 4.3-теңдеуде туындайтын константа c қайтадан әр түрлі мәндерге ие 4 (Инкропера және ДеВитт, 1996ж.); $c_1 = 0,15$ және Рэлей санының көбейтіндісімен сипатталатын, 10^7 – 10^{11} диапазонда орналасатын турбуленттік диапазон үшін $c_2 = 1/3$. $c_1 = 0,54$ және 10^4 – 10^7 диапазонда Рэлей санының көбейтіндісімен сипатталатын ламинарлық диапазон үшін $c_2 = 1/4$ константалары.

4.1.2.2. Көлденең құбырлардан шығатын еркін конвекция есебінен жылу беру

Сыртқы құбыр бетінен жылу шығынын бағалау үшін 4.3-теңдеуді Морганмен ұсынылған c_1 және C_2 константаларын Рэлей санының әр түрлі диапазондары үшін қолданумен еркін конвекциясына жылу беру коэффициентін есептеу үшін пайдалануға болады. Алайда құбырды қоршайтын сұйықтықтың физикалық қасиеттері үстіңгі беттің орташа арифметикалық мәні және сұйықтықтың көлемді температурасы ретінде белгіленген, пленка температурасында бағалануы тиіс.

Черчилль және Чу (1975ж.) Рэлей саны үшін шынайы бірлік корреляциясын шамамен 10^{12} дейін береді:

$$Nu \left[0.6 + \frac{0.387 \{ (Gr) (Pr) \}^{1/6}}{\{ 1 + (0.559 / Pr)^{9/6} \}^{8/27}} \right]^2$$

4.1.2.3. Құбыр арқылы мәжбүрлі конвекция көмегімен жылуды беру. Ағынның осы түрі жылу алмастырғыштар сияқты жабдықтарда кездеседі және де ағынның режимі, әдетте турбуленттік аймақта болады. Жылу берудің ішкі коэффициенті жылу берудің жалпы

коэффициентін есептеу кезінде талап етіледі, ол құбыр арқылы өтетін көлемді сұйықтықтан құбыр қабырғасының ішкі бетіне жылу беруді, құбыр қабырғасы арқылы жылу беруді және соңында құбыр қабырғасының сыртынан құбырдың сыртынан өтетін көлемді сұйықтыққа жылу беруді ескереді. Жылу берудің ішкі коэффициенті Диттус-Боэлтердің келесі корреляциясы (МакАдамс, 1942ж.) арқылы есептелуі мүмкін:

$$Nu = c_1 Re^{0.8} Pr^{c_2} \quad 4.4)$$

мұндағы Нуссельт саны $Nu = hD_i/k$, Рейнольдс саны $Re = D_i v \rho / \mu$ және Прандтль саны $Pr = C_p \mu / k$. $c_1 = 0,023$ және $c_2 = 0,4$ константалары жылыту үшін, ал салқындату үшін $c_2 = 0,3$. Осы өлшемсіз сандарда кездесетін әр түрлі айнымалылар:

h = жылу берудің ішкі коэффициенті

D_i = құбырдың ішкі диаметрі

v = құбыр ішіндегі сұйықтықтың жылдамдығы

k, ρ, μ , және C_p = құбыр арқылы өтетін сұйықтықтың тұрақты қысымының жылу өткізгіштігінің, тығыздығының, тұтқырлығының меншікті жылу сыйымдылығы және меншікті жылу сыйымдылығы құбырға келіп түсетін және одан шығатын көлемді сұйықтықтың орташа арифметикалық мәні бойынша бағаланады.

Тұтқырлығы жоғары сұйықтықтар үшін жылу беру коэффициентіне, құбырдың ішкі бетіне 4.1.2.9-бөлімде төмен түсіндірілгендей есептелуі мүмкін температура кезінде бағаланған μ_s бірге, 4.4-теңдеу бойынша есептелген түзету коэффициенті $(\mu/\mu_s)^{0,14}$ қолданылады.

4.1.2.4. Құбыр шоғыры бойынша мәжбүрлі конвекцияның көмегімен жылуды беру. Ағынның осы түрі жылу алмастырғыштар сияқты жабдықтарда қайтадан кездеседі, және де ағынның режимі әдетте турбуленттік аймақта болады. Сонымен қатар жылу берудің ішкі коэффициенті жылу берудің жалпы коэффициентін есептеу кезінде талап етіледі, сондай-ақ жылу берудің сыртқы коэффициенті де талап етіледі. Осы сыртқы жылу алмасу коэффициенті келесі корреляция бойынша есептелуі мүмкін (Колберн, 1933ж), ол шахматтық тәртіпте 10 немесе одан да көп құбырлар және $10 < Re < 40,000$ үшін жақсы жұмыс істейді:

$$Nu = 0.33(Re)^{0.6}(Pr)^{1/3} \quad 4.5)$$

Өлшемсіз топтамаларда болатын әр түрлі айнымалылар келесі түрде болады:

$$Nu = hD_o/k \quad Re = D_o v \rho / \mu \quad \text{и} \quad Pr = C_p \mu / k :$$

h = жылу беру коэффициенті

D_o = құбырдың сыртқы диаметрі

v = сұйықтық ағатын құбырлар арасындағы көлденең қиманың ең аз ауданындағы сұйықтықтың орташа жылдамдығы.

k, ρ, μ , және C_p = құбыр арқылы өтетін сұйықтықтың тұрақты қысымының жылу өткізгіштігі, тығыздығы, тұтқырлығы және меншікті жылу сыйымдылығы. Жылу өткізгіштігі және тұтқырлығы пленканың орташа температурасы кезінде бағаланады.

Шахматтық және тегістелген орналасудағы құбырлардың 20 немесе одан да көп қатары үшін, $1000 < Re < 2 \times 10^6$ және $0,7 < Pr < 500$ үшін, Заукаускаспен (1987ж.) ұсынылған одан да көп жалпыландырылған корреляция келесі форманы қабылдайды:

$$Nu = c_1 (Re)^{c_2} (Pr)^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4}$$

мұндағы c_1 және c_2 үшін мәндер әр түрлі геометриялық параметрлер үшін ұсынылған.

Өлшемсіз сандармен өрнектелетін барлық қасиеттер түтіктің сыртқы бетінің температурасы кезінде қасиеттерге негізделген Pr_s -тен басқа, кіру және шығу жағдайларының орташа арифметикалық мәні бойынша есептеледі. 20-дан кем түтіктер саны үшін түзету коэффициенттері де ұсынылады.

4.1.2.5. Құбыр сыртындағы конденсация есебінен жылу беру. Бу аз тамшыларды құрып, одан да суық үстіңгі бетте конденсациялануы мүмкін, және осы жағдайда бұл «тамшылы конденсация» деп аталады немесе үстіңгі беттегі сұйық пленка, және осы жағдайда бұл «пленкалы конденсация» деп аталады. Пленкалы конденсация конденсациялық қызметтегі жылу алмастырғыштарда жиі кездеседі және жылу берудің тиісті коэффициенті В. Нуссельттің (Якоб, 1936ж.) $Nu = hL/k$ бірге, кейінгі корреляция бойынша есептелуі мүмкін:

$$Nu = c_1 \left(\frac{g \rho_L^2 \lambda_{con} L^3}{\mu_L k_L \Delta T} \right)^{1/4} \quad 4.6)$$

Тік құбырларға арналған $c_1 = 0,943$ және көлденең құбырларға арналған $0,725$ константа.

Өлшемсіз топтамаларда болатын әр түрлі айнымалылар:

H = жылу беру коэффициенті

L = тік түтіктің биіктігі немесе көлденең түтіктің сыртқы диаметрі

g = ауырлық күшінің үдеуі

k_L, ρ_L , және λ_{con} = конденсаттың орташа температурасы кезінде есептелген (қанығу температурасының және сыртқы қабырғалар температурасының орташа арифметикалық мәні) жылу өткізгіштігі, тығыздығы және тұтқырлығы (конденсацияланатын будан түзілген сұйықтық).

λ_{con} = конденсацияның жасырын жылуы

ΔT = бу температурасы (оның қанығу температурасы) мен сыртқы құбыр бетінің температурасы арасындағы айырмашылық

Инкропера және ДеВитт (1996ж.) 4.6-теңдеуге ұқсас өрнектерді ұсынады, бірақ

мәні $\rho_L^2 \lambda_{con} (\rho_L - \rho_v)$ мәніне ауыстырылады, мұндағы ρ_v – бу фазасының тығыздығы, ал $c_1 = 0,729$ константасы тік құбырларға арналған. Будың жоғары тығыздығы кезінде осы модификацияланған өрнектерді қолданған жөн болар еді.

4.1.2.6. Құбырдан тыс қайнату арқылы жылу беру. Конденсацияға ұқсас сұйықтық бетінде бу пленкасын түзе отырып, неғұрлым ыстық бетте қайнауы мүмкін және бұл жағдайда бұл «пленкалы қайнау» (пленкадан көлемді сұйықтыққа берілетін жылу) деп аталады немесе беттің өзінде белсенді ядролардың учаскесінде көпіршіктер түзе отырып, және бұл жағдайда ол «көпіршікті қайнау» деп аталады. Пленкалы қайнау үстіңгі беті мен сұйықтық арасындағы температура айырмашылығы өте жоғары (сыни температурадан жоғары) болғанда және үстіңгі бетте пайда болатын бу пленкасы жылу беру коэффициентін төмендететін оқшаулатқыш қабатты түзгенде өтеді. Қайнаудың осы түрі құбырлардың ластануын да арттырады. Ластану жылу алмастырғыштың жұмыс істеу уақытында жылу алмасу бетінде пайда болуы мүмкін бөгде материалдардың шөгінділерінен тұрады. Бу пайда болған жағдайда, қазандық суы қазандық суды өңдеу дәрежесіне байланысты ерітілген қатты заттардың белгілі бір мөлшерін құрайтын болады және осы қатты заттар ластануды тудыруы мүмкін, себебі су буланады және жылу алмасу бетінде қатты заттарды қалдырады.

Қайнату кезінде жылу алмасу жабдығы әдетте қозғаушы күштердің өте жоғары температурасынан құтылуға болмайтын болса ғана пленкалы қайнаудың алдын алуға арналған. Түтікшелер қатарының түтікшелерінің бетінен тыс көпіршікті қайнату кезінде алынған максималды жылу ағынын келесі тәуелділікпен бағалауға болады (Пален және Смолл, 1964ж.):

$$\left(\frac{Q}{A}\right)_{\text{макс}} = \frac{c_1 p \rho_V \lambda_{\text{vap}}}{D_o \sqrt{N}} \left(\frac{g \sigma (\rho_L - \rho_V)}{\rho_V^2} \right)^{1/4} \quad (4.7)$$

СИ бірліктерінде c_1 константасы = 0,43, сонымен бірге 4.7 теңдеуіне әрекет ететін әр түрлі айнымалылар, олардың тиісті СИ бірліктерімен бірге төменде келтірілген:

Q = жылу алмасудың қарқындылығы (Дж/с)

A = жылу алмасу бетінің ауданы (м²)

p = екі көршілес түтік арасында қысқа қашықтық ретінде анықталатын түтік қадамы (м)

ρ_V және ρ_L = бу және сұйық фазалардың тығыздығы (кг/м³)

λ_{vap} = буланудың жасырын жылуы (Дж/кг)

D_o = түтіктің сыртқы диаметрі (м)

N = түтікшелер саны

g = ауырлық күшінің үдеуі (м/с²)

σ = сұйық және бу фазалары арасындағы беттік керіліс (Н/м).

Пленкалы қайнау үшін жылу беру коэффициентін келесі корреляция бойынша бағалауға болады (Бромли және басқалары, 1953ж.):

$$h = c_1 \left(\frac{k_V^3 \rho_V g \lambda' (\rho_L - \rho_V)}{\mu_V D_o \Delta T} \right)^{1/4} \quad (4.8)$$

СИ бірліктерінде c_1 константасы = 4,306, сонымен қатар 4.8 және 4.9-теңдеулерде әрекет ететін әр түрлі айнымалылар, олардың тиісті СИ бірліктерімен бірге төменде келтірілген:

$$\lambda' = \lambda_{\text{vap}} \left(1 + \frac{0.4 \Delta T C_{pV}}{\lambda_{\text{vap}}} \right)^2 \quad (4.9)$$

h = жылу беру коэффициенті (Дж/с/м²/К)

k_V, μ_V , және C_{pV} = бу фазасының жылу өткізгіштігі (Дж/с/м/К), тығыздығы (кг/м³), тұтқырлығы (Па·с) және тұрақты қысымның үлестік жылу сыйымдылығы (Дж/кг/К)

ρ_L = сұйық фазаның тығыздығы (кг/м³)

g = ауырлық күшінің үдеуі (м/с²)

λ = будың орташа температурасы мен қайнау температурасы кезінде сұйықтықтың жылу құрамындағы тиімді айырмашылығы (Дж/кг)

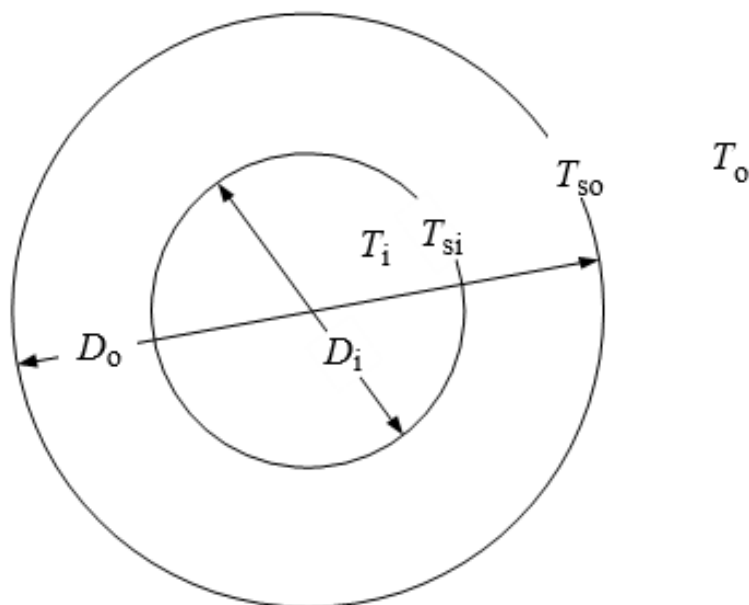
D_o = түтіктің сыртқы диаметрі (м)

ΔT = қайнау нүктесінде құбырдың беті мен сұйықтық арасындағы айырмашылық (К).

4.1.2.7. Құбырда қайнау арқылы жылу беру. Кандликар (1990ж.) тік және көлденең құбырлар үшін жалпыланған корреляция ұсынады, ол көпіршікті қайнау және конвективті механизмдерден салымдарды ескереді. Ол сұйықтыққа байланысты көпіршікті қайнау жағдайында оны әр түрлі сұйықтықтарға қолдануға болатын параметрді қамтиды. Су және әр түрлі салқындатқыш агенттер (сондай-ақ Ренкиннің төменгі температуралы циклдары үшін ескерілуі мүмкін) үшін осы жалпылама корреляцияның болжалды қабілеті тексерілді және су туралы деректер үшін шамамен 16% және салқындатқыш агенттер үшін шамамен 19% орташа ауытқуын берді. Кандликар (1990 ж.) келтірілген басқа корреляциялар, үлкен дәлдікті, бірақ сұйықтар санына шектеулі қолданумен көрсете алады.

4.1.2.8. Қабырғалары бар құбырлардан жылу беру. Сыртқы құбырдың жылу алмасу коэффициенті төмен болған кезде, ол төмен қысымды газ жағдайында болуы мүмкін, сыртқы қабырғалары бар құбырлар жылу алмасу бетінің ауданын айтарлықтай ұлғайта

отырып, құбыр ұзындығының бірлігіне жылу алмасу қарқындылығын арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін. Екінші жағынан, қабырға өзі кондуктивтік жылу беру кедергісін арттырады және әдетте қабырғаның пайдаланылуын ақтау үшін, жылу беру жылдамдығының шашыратылмаған қатынасына қатынасы ретінде анықталатын қабырғаның тиімділігі 2-ден артық болуы тиіс. Қарапайым жорамалдау ретінде жылу бетінің коэффициентін қабырғалануы жоқ құбырда секілді үстіңгі беттің жылу беру коэффициенті кейде болжамдалады, және сонда қабырғаларды қосу арқылы алынған жоғары жылу алмасу бетінің ауданы ғана есепке алынады. «Жылу беру үдерісі» (Керн, 1950ж.) сияқты жылу беру бойынша кейбір стандартты оқулықтарда ұсынылған графиканы егжей-тегжейлі талдау үшін қабырғалы құбырлардың кейбір типтеріне арналған жылу беру коэффициентін (сондай-ақ қысымның төмендеуін) анықтау үшін пайдаланылуы мүмкін.



4.1-сурет. Құбыр қабырғасымен бөлінген сұйықтықтар арасындағы жылу берілісі

4.1.2.9. Құбыр қабырғасымен бөлінген сұйықтықтар арасындағы жылу алмасуға арналған жылу берудің жалпы коэффициенті. 4.1-суретте көрсетілгендей, қабырғаның екі жағынан конвекциясы бар цилиндрлік қабырғаның сыртқы бетіне қарай іштен орнатылған жылу өткізгіштікті қарастырайық. T_i температурасы кезінде ішкі көлемді сұйықтықтан түтікшенің ішкі бетіне, түтікшенің қабырғасы арқылы, содан кейін түтікшенің сыртқы бетінен T_o температурасы кезінде сыртқы көлемді сұйықтыққа қарсы жылу ағынының кедергісін есепке алатын сыртқы құбыр бетінің ауданына A_o негізделген жылу берудің жалпы U_o коэффициентімен келесідей берілуі мүмкін:

$$\frac{dQ}{dt} = U_o A_o (T_i - T_o) \quad (4.10)$$

4.10-теңдеуі, егер U_o белгілі болса, осы A_o аймағына немесе жылу алмасу қарқындылығы үшін қажетті аймаққа арналған жылу алмасу қарқындылығын dQ/dt есептеу үшін пайдаланылуы мүмкін. U_o түтіктің барлық қалыңдығы бойынша интегралданудан кейін (D_i және D_o ішкі және сыртқы диаметрлері бар) түтіктің қабырғасы арқылы кондукцияға арналған цилиндрлік координаттарда 4.1-теңдеуді қолдана отырып және ішкі мен сыртқы беттерде конвекциялау үшін 4.2-теңдеуді қолдана отырып (T_{si} және T_{so} температурасында) белгілі шамалар арқылы білдіруге болады. Тұрақты күйде,

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= U_o A_o (T_i - T_o) = h_i A_i (T_i - T_{si}) = k [A_o / (D_o / 2)] \frac{(T_{si} - T_{so})}{\ln(D_o / D_i)} \\ &= h_o A_o (T_{so} - T_o) \end{aligned}$$

Мұндағы h_i және h_o – тиісті сұйықтықпен түтіктің беті арасындағы ішкі және сыртқы конвективті жылу беру коэффициенті, ал A_i – түтіктің ішкі бетінің ауданы. Құбырдың сыртқы және ішкі беттерінің өрнектері кезінде олардың тиісті диаметрлері арқылы ұзындықтың бірлігіне теңдеулердің жоғарыда келтірілген жүйесінен T_{si} және T_{so} үшін жағдай ерекшеленеді:

$$U_o A_o (T_i - T_o) = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} A_o (T_i - T_o)$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} \quad (4.11)$$

4.1.2.10 Тікелей ағатын, қарсы ағымды және көлденең ағын. Осы екі сұйықтық жылу беруге (немесе массаға) арналған жабдықтың ішінде бір бағытта ағуы мүмкін, осы жағдайда оны «ілеспе ағын», «параллель ағын» немесе «тура ағын» конфигурациясы немесе қарама-қарсы бағыттарда деп атайды және бұл жағдайда «қарсы ағымды» конфигурациясы немесе өзара перпендикуляр деп аталады, бұл жағдайда ол «көлденең ағын» конфигурациясы деп аталады. Екі сұйықтық арасындағы тасымалдау (жылу массасын тасымалдауды немесе химиялық реакцияларды қоса алғанда) үдерісі үшін орташа қозғаушы күштең жоғары, ал қайтымсыз ең төмен болып табылатыны, қарсы ағымның артықшылығы болады. А сұйықтығы T_{hot} температурада қол жетімді екінші В сұйықтығын пайдалану арқылы ең жоғары ықтимал температураға дейін қыздырылуы тиіс мысалды қарастырайық. Тек қарсы ағымды ағында А сұйықтығы T_{hot} жақындаған температураға дейін қыздырылуы мүмкін, сол арада ілеспе ағында А сұйықтығы жылу беруден кейінгі В сұйықтығының соңғы (едәуір төмен) температурасына жақын температураға дейін қыздырылуы мүмкін. Берілетін жылу энергиясының көлемі қарсы тура ағымды ағынмен шектелгеніне назар аударыңыз.

4.1.2.11 Температуралардың орташа логарифметикалық айырмашылығы. Көптеген жағдайларда, ыстық және суық сұйықтықтар фазалық өзгерістерге ұшырамаған кезде, ыстық ағын мен суық ағын арасындағы жергілікті температура айырмашылығы барлық жылу алмастырғышта тұрақты болмайды. 4.10-теңдеуде пайдалану үшін жылу алмастырғыштың конфигурациясына байланысты температураның тиімді орташа айырмасы қажет. Қарапайым қарсы ағымды жылу алмастырғыштар (ыстық және суық сұйықтықтар қарама-қарсы бағытта ағатын жерде) және тура ағынды (немесе параллель ағындарда) жылу алмастырғыштар үшін (ыстық және суық сұйықтықтар бір бағытта ағатын жерде) температураның осы тиімді орташа айырмасы келесі жағдайларда температураның орташа логарифметикалық айырмасы (LMTD) болып табылатынын көрсетуге болады: (i) екі сұйықтықтың үлестік жылуы тұрақты болып қалады; (ii) жалпы жылу беру коэффициенті тұрақты; (iii) жылуды беру тек қана радиалды бағытта өтеді; (iv) жылуды жоғалту шамалы; және (v) әлеуетті және кинетикалық энергиядағы өзгерістер еленбеуі мүмкін. Егер шынайы қарсы ағымды жылу алмастырғыш үшін T_{Ci} және T_{Co} – суық сұйықтықтың кірісі мен шығысындағы температуралар, ал егер T_{Hi} және T_{Ho} – ыстық сұйықтықтың кірісі мен шығысындағы температуралар болса, онда:

$$LMTD = \Delta T_{in} = \frac{(T_{Hi} - T_{Co}) - (T_{Ho} - T_{Ci})}{\ln[(T_{Hi} - T_{Co}) - (T_{Ho} - T_{Ci})]} \quad (4.12)$$

Осы тарауда одан әрі сипатталған түтік қорапты жылу алмастырғыштарда ішінара қарсы ағымды және ішінара тура ағымды ағынның үйлестіру тәсілі бар жылу алмастырғыштың конфигурациялары үшін LMTD есептеу қарапайым практика болып табылады, егер жылу алмастырғыш шынайы қарсы ағымда болса, ал кейіннен 4.10-

теңдеудегі F түзету коэффициентін қолдансақ, келесідей көрінеді:

$$\frac{dQ}{dt} = U_o A_o F \Delta T_{in} \quad (4.13)$$

F түзету коэффициентінің шамасы жылу алмастырғыштың конфигурациясына және ағын температурасына тәуелді. Жылу алмастырғыштың әр түрлі жүйелеріне арналған F мәндерін «Үдерістің жылу берілісі» (Керн, 1950 ж.) секілді жылу берілісі жөніндегі стандартты оқулықтардан, сондай-ақ «Маркстің инженер-механиктерге арналған нұсқаулығы» (Аваллоне және т.б., 2006 ж.) және «Перри. Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Грин, 2007ж.) сияқты анықтамалықтардан табуға болады. Әдетте егер F үшін алынған мән 0,8-ден кем болса, бұл бастапқыда таңдалған жылу алмастырғыштың конфигурациясы сәйкес келмейтіндігін көрсетеді және қаптаманың көп өтуінен немесе бірнеше тізбекті қаптамадан тұратын қарсы ағынға келетін конфигурацияны таңдау керек. Жылу алмастырғыштың қаптамалары 4.2-тарауда сипатталған. Ал әзірше бірнеше қаптаманың болуын жылу алмастырғышты бірнеше аз тізбекті жылу алмастырғышқа «бөлу ретінде қарастырайық. Сұйықтықтың температурасына қатысты сызықсыз жылу бөлу немесе жұтылу (мысалы, фазалық өзгеріске ұшырайтын екі немесе одан да көп компоненттерден тұратын сұйықтықтардың қоспасы) кездескен уақытта температураның орташа өлшенген орташа айырмашылығын және Галлидің оңайлатылған әдісін (1966ж.) пайдалану қажет. Осындай жағдайларда «жылу алмастырғыштың кез келген нүктесінде екі сұйықтық арасындағы температураның ең аз айырмасы) жылу алмастырғыштың кіре берісінде немесе шығуында болмауы мүмкін» екеніне назар аударыңыз. Іс жүзінде «температуралардың ауытқуы» (суық сұйықтықтың температурасы ыстық сұйықтықтың температурасына қарағанда жоғары) тек қана жобаны алмастырғыштың екі шетінде екі сұйықтық арасындағы орынды шекті температуралық айырмашылықтардың болуына негіздемей, қондырғының конфигурациясы/ жобалау үдерісі кезеңінде тексерілуі тиіс.

4.1-мысал. Буды сумен салқындататын беттік конденсатор (атмосфералықтан төмен немесе «вакуумдағы» қысым кезінде жиі жұмыс істейтін) турбинадан пайдаланылған будың 100 000 кг/сағ конденсациясы үшін 5°C тарылым температурасымен (конденсатордан шығатын салқындатқыш су температурасының айырмашылығы және конденсацияланатын будың температурасы) әзірленген. Жылу алмастырғыштың құбырлары бойынша өтетін салқындатқыш су 30°C кезінде беріледі және турбинаның есептік нүктесінде 40°C (яғни 10°C жоғарылауы немесе «диапазон») градирняға қайтарылады. Егер турбинаға бу шығыны 25% төмендесе, конденсатордағы қысымды төмендетіп есептеңіз, конденсаторға түсетін бу сапасы (бу үлесі) 1,0 өзінің қанығу температурасында қалады, ал салқындатқыш су ағынының жылдамдығы және оны беру температурасы тұрақты қалады (бұл температураның төмендеуі, егер тек градирняға ауа беру төмен жүктеме кезінде төмендемесе, қоршаған орта жағдайларының осы жиынтығы үшін күтуге болады) деп болжамдаңыз. LMTD түзету коэффициентінің кез келген өзгерістерін ескеріңіз.

Шешім

Қарастырылған жағдай үшін (design) жылу беруге қарастырылмаған жағдай үшін (off-design) жылу беру жылдамдығын бөлу:

$$\frac{Q_{k-ма}}{Q_k} = \frac{U_{k-ма} A_{конд} \Delta T_{ln,k-ма}}{U_k A_{конд} \Delta T_{ln,k}}$$

Жылу алмасу үдерістері қарқындылығының арақатынасы осы жағдайда бу шығысына жай ғана пропорционалды, $Q_{k-ма}/Q_k = 1 - 0.25 = 0.75$.

4.4 теңдеуінен көрінгендей, салқындатқыш су жағынан жылу беру коэффициенті тұрақты қалады деп болжауға болады, себебі салқындатқыш су ағынының жылдамдығы есептеуден тыс нүктеде бірдей ұстап тұрады, сол уақытта есептік нүктеден шығысындағы оның температурасының аздаған өзгеруі оның жылу қасиеттеріне болмашы әсер етеді. 4.6-теңдеуде көрінгендей, бу жағындағы жылу беру коэффициентін бұрынғыдай тұрақты деп

санауға болады, себебі оның жылу қасиеттерінің өзгеруі қысым/ конденсация температурасының аз ғана өзгеруіне байланысты едәуір аз болады. 4.6-теңдеуде шығатын ΔT бөлігіндегі өзгеріс қайтадан қысым/конденсация температурасының аз ғана өзгеруіне байланысты едәуір аз болады, сол уақытта есептеу нүктесінен тыс салқындату суының шығысындағы температураның өзгеруінде сыртқы температура, құбыр қабырғалары бетінің температурасы кішкене ғана азаяды. Осы өзгерістердің әсері 4.6 теңдеуде 0,25 дәрежесі көрсеткішімен одан да көп әлсірейді.

Осындай негіздеме үшін келесіні аламыз: $U_{\kappa-\text{ма}}/U_{\kappa}=1$.

Одан кейін будың есептік нүктесіндегі конденсация температурасы 40°C тең салқындатқыш судың шығысындағы берілген температурамен қысымның 5°C температурасын қосу арқылы есептеледі, бұл 45°C береді. Егер $T_{\text{H,шығ.}}$ бу конденсациясы температурасын белгілесе, ал $T_{\text{C,шығ.}}$ есептеуден тыс нүктедегі салқындатқыш судың температурасы болса, онда келесідей болмақ:

$$\frac{Q_{\kappa-\text{ма}}}{Q_{\kappa}} = 0.75 = \frac{\Delta T_{\text{In},\kappa-\text{ма}}}{\Delta T_{\text{In},\kappa}} = \frac{\frac{(T_{\text{H,кiр.}} - T_{\text{C,шығ.}}) - (T_{\text{H,шығ.}} - 30)}{\ln(T_{\text{H,кiр.}} - T_{\text{C,шығ.}})/(T_{\text{H,шығ.}} - 30)}}{\frac{(45 - 40) - (45 - 30)}{\ln[(45 - 40)/(45 - 30)]}}$$

Бізге тағы да екі белгісізді шешу үшін энергия балансының теңдеуі қажет. Осыны салқындатқыш су жағы үшін оның m шығыны тұрақты болып қала береді деп белгілеп, жазуға болады, және осы жағдайда төменде келтірілген температурамен C_p судың меншікті жылу сыйымдылығының аздаған өзгерісін ескермеу:

$$\frac{Q_{\kappa-\text{ма}}}{Q_{\kappa}} = 0.75 = \frac{m_{\kappa-\text{ма}} C_p \Delta T_{\kappa-\text{ма}}}{m_{\kappa-\text{ма}} C_p \Delta T_{\kappa}} = \frac{T_{\text{C,шығ.}} - 30}{(40 - 30)}$$

$T_{\text{H, кiр.}} = T_{\text{H, шығ.}}$, $T_{\text{C,шығ.}} = 37.5^{\circ}\text{C}$ және $T_{\text{H, шығ.}} = 41.5^{\circ}\text{C}$ бар екі алдыңғы теңдеуді шешу. Қаныққан будың 41.5°C сәйкес келетін қысымы пайдаланудың осы есептеу нүктесіндегі¹ конденсаторда 0,08 барды береді.

4.1.3 Сәулелену

Сәулеленуші энергия бетке түскенде оның α бөлігі сіңіріледі, басқа ρ бөлігі шағылысады, ал қалған τ бөліктері бетінің үстімен өтеді.

Сонда анықтама бойынша,

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.14)$$

Техникада кездесетін көптеген қатты материалдар мөлдір емес әрі бұл жағдайда өткізу коэффициенті $\tau = 0$, және 4.14 теңдеуі былай болады:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (4.15)$$

Абсолютті қара дене үшін сіңіру коэффициенті $\alpha = 1$, ал шағылысу коэффициенті $\rho = 0$ болады. Сәулеленуші толқынның осы ұзындығының сәулелі энергиясының (осы температурада) абсолютті қара дененің жазық бетіне аудан бірлігімен және уақыт бірлігімен

¹ Бұдан бұрын айтылғандай, бу конденсаторлары атмосфералық қысымнан төмен қысымда жұмыс істейді; қысым төмен болған сайын, бу турбинасының шығу қуаттылығы жоғары және жылу бұру температурасы төмен болады, бұл - тиімділіктің екінші заңына сәйкес. Конденсатордағы вакуумның құрылуын көру әдісінің бірі – бу күйінен сұйық күйге өту барысындағы сұйықтық көлемінің айтарлықтай азайғанын байқау.

қатынасы ретінде қарастырылатын, толқынның (және температураның) бұл ұзындығы үшін сәулелену коэффициенті ε сіңіру қабілетіне сәйкес болады. Сәулелендіру қабілеті толқынның ұзындығына және температурасына байланысты болмайтын жағдайда дене сұр сәулелендіруші деп аталады. Сұр бетпен сәулеленетін жылу үшін негізгі теңдеу Стефан-Больцман теңдеуінің жиынтығымен беріледі:

$$\frac{dQ}{dt} = -\sigma_{SB} \varepsilon_S A T^4 \quad (4.16)$$

мұндағы dQ/dt – жылу берілу жылдамдығы, σ_{SB} ($= 5,67 \times 10^{-8}$ Дж/с/м²/К⁴) – Стефан-Больцманның тұрақты шамасы, ε_S – беттің сәулелендіру қабілеті, A – жылу алмасу бетінің ашық ауданы және T – беттің абсолюттік температурасы.

Біреуінің T_1 температурадағы ауданы – A_1 , ал екіншісінің T_2 температурадағы ауданы A_2 болатын, екі қара беттер арасындағы жылу алмасудың таза қарқындылығы былай анықталады:

мұндағы F_{12} (немесе F_{21}) мағынасы екі беттің геометриялық орналасуын есептеу үшін, A_1 (немесе A_2) ауданына негізделген көріну конфигурациясын немесе коэффициентін білдіреді (яғни, «бір беттің екінші бетке қаншалықты қарап тұрғанын»). Әр түрлі геометриялық кестелер үшін конфигурация коэффициентінің мағыналарын анықтамалардан табылатын кестелерден немесе теңдеулерден алуға болады, мысалы, «Инженер-механиктерге арналған Маркс нұсқаулығы» (Avallone et al., 2006 ж.) және «Перри. Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Green, 2007 ж.). Бұл нұсқаулықтарда сондай-ақ, тек екі беттің геометриялық орналасуын ғана қамтымайтын, сонымен қатар әр түрлі сәулелендіру қабілеттері бар қара емес беттер де ескерілетін, жалпы факторларды табуға болады (және екі бетті біріктіретін, мысалы, пештің ішіндегі беттердің қайталап сәулеленуін қарастыратын геометриялар).

4.1.3.1 Газдық сәулелену Мысалы, H_2O , CO_2 және SO_2 үш атомдық бөлшектері (әдетте, жану өнімдерінде кездесетін) сияқты кейбір газдар және аз деңгейде CO екі атомдық газы радиация үшін мөлдір емес. Олар толқын ұзындықтарының жіңішке жолағында сәулелендіреді және сәулеленуді сіңіреді, және де, сәулелендіру және сіңіру газдың бүкіл денесі арқылы жүзеге асырылады, және ол осы температурадағы парциалдық газ қысымына және шоқтың орташа ұзындығы деп аталатын L – дене көлемінің өлшеміне пропорционал болатын оның молекулаларының санына байланысты. Осылайша, шоқтың орташа ұзындығы изотермиялық газдың көлемін және оның шекарасын анықтайтын, геометрия әсерін ескереді, және оны әр түрлі геометриялар үшін «Инженер-механиктерге арналған Маркс нұсқаулығы» (Avallone et al., 2006 ж.) және «Перри. Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Green, 2007 ж.) сияқты нұсқаулықтарынан табуға болады.

Шамамен мағыналарын былай бағалауға болады

$$L \approx 3.5 \frac{\text{Дене көлемі}}{\text{Оның бетінің ауданы}}$$

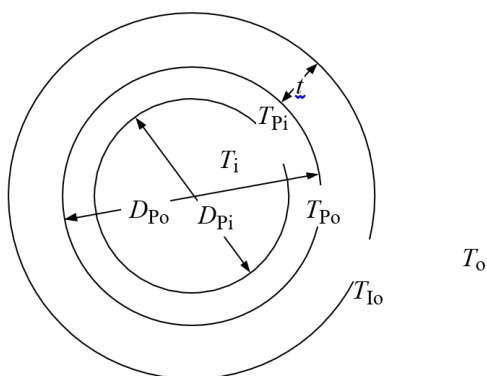
T_G температурада сәулелі энергияның газ арасында аудан бірлігіне таза алмасуы q_{net} және T_S температурада оны қоршап тұрған қара беті төмендегідей анықталады:

$$\frac{dQ_{net}}{dt} = \sigma_{SB} (\varepsilon_G T_G^4 - \alpha_G T_S^4) \quad (4.18)$$

мұндағы ε_G және α_G газдың сәулелендіру қабілеттілігін (газдың бетке **сәулеленуі** газдың температурасындағы температурада қара дененің **сәулеленуіне** қатынасы ретінде анықталатын) және газдың сіңірушілік қабілеттілігін білдіреді (қара дененің бетінен **сәулеленуінде**). Газ бен дене беті температураларының бірдей болуы міндетті емес болғандықтан, ε_G және α_G үнемі бірдей болмайды. Газдың температурасына T_G , газ түрінің әрқайсысының парциалдық қысымы мен шоғының орташа ұзындығының көбейтіндісіне

байланысты болатын, газдың сәулелендіру коэффициенті «Инженер-механиктерге арналған Маркс нұсқаулығы» (Avalloneetal.,2006 ж.) және «Перри. Инженер-химиктің нұсқаулығы» (Green, 2007ж.) сияқты нұсқаулықтарда ұсынылған диаграммалар мен кестелерден анықталады. Сіңіру қабілеті газдың сәулелендіру қабілетіне тең, бірақ беттің температурасына T_S сәйкес қабылдануы мүмкін. Күйенің, көмірдің, биомассаның немесе күлдің бөлшектері сияқты кез келген қалқыма бөлшектердің сәулелендіру қабілеті жоғарыда аталған нұсқаулықтарда талқыланды.

4.1.3.2. Кондукция, конвекция және сәулелену салдарынан оқшауланған түтікшелердің жылу шығындары Массаның орташа температурасында T_i ыстық сұйықтық ағып жатқан оқшауланған түтікшені қарастырайық, бұл жағдайда түтікше қоршаған (қозғалыссыз) ауаның температурадағы T_o әсеріне ұшырайды, бұл үдеріс 4.2-суретте көрсетілген. T_{Pi} температурада ыстық сұйықтықтан түтікшенің ішкі қабырғасына жылу берілу конвекциямен жүзеге асырылады, кейіннен жылу T_{Po} температурада түтікшенің сыртқы бетіне беріледі (кондукция k_p). Бұдан кейін жылу сыртқы беттің температурасында T_{Io} оқшаулаушы қабат арқылы жылжиды (кондукция k_l) әрі соңында конвекциямен және оқшаулаудың сыртқы бетінен сәулеленумен қоршаған ауаға бірлескен жылу берілім жүзеге асырылады.



4.2-сурет. Кондукция, конвекция және сәулелену салдарынан оқшауланған түтікшелердің жылу шығындары

Сәулеленудің ауа арқылы еркін өтуінің нәтижесінде оны оқшаулау арқылы конвективтік жылу шығындарына жатқызуға болады, және, осылайша, оқшаулаудың бетінен жылу берілімнің жалпы коэффициентін былай жазуға болады:

$$\frac{dQ}{dt} = h_o A_{Io} (T_{Io} - T_o) + \varepsilon_1 \sigma_{SB} (T_{Io}^4 - T_o^4) \quad (4.19)$$

мұнда h_o – оқшаулаудың сыртқы беті мен қоршаған ауаның арасындағы жылу берілімнің конвективтік коэффициенті, A_{Io} және ε_1 – беттің ауданы және оқшаулаудың сыртқы бетінің сәулелендіру қабілеті.

Кейде 4.19 теңдеуінің жылу берілімді сәулеленумен белгілейтін мүшесін, жылу берілімнің конвективтік коэффициентіне сәйкес формуламен ауыстырған дұрыс:

$$\frac{dQ}{dt} = h_o A_{Io} (T_{Io} - T_o) + h_r A_{Io} (T_{Io} - T_o) \quad (4.20)$$

бұл жерде:

$$h_r = \varepsilon_1 \sigma_{SB} (T_{Io}^2 - T_o^2) (T_{Io} - T_o) \quad (4.21)$$

Бұдан кейін жылу берілімнің жалпы коэффициенті U_o , оқшаулау бетінің сыртқы ауданына A_{Io} байланысты келесі формуламен есептеледі:

$$\frac{dQ}{dt} = U_o A_{I_o} (T_i - T_o) \quad (4.22)$$

Егер U_o мағынасы белгілі болса, 4.22 теңдеуі оқшауланған құбырлардың жылу шығындарын есептеу үшін пайдаланылады.

U_o белгілі шамалар арқылы белгіленеді және стационарлық режимде жылу берілімнің жылдамдығын әр түрлі учаскелер арқылы теңестіру нәтижесінде алынған теңдеулер жүйесін шешу жолымен анықталуы мүмкін:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= U_o A_{I_o} (T_i - T_o) = h_i A_{P_i} (T_i - T_{P_i}) = k_P A_{I_o} \frac{(T_{P_i} - T_{P_o})}{(D_{I_o}/2) \ln(D_{P_o}/D_{P_i})} \\ &= k_1 A_{I_o} \frac{(T_{P_o} - T_{I_o})}{(D_{I_o}/2) \ln(D_{I_o}/D_{P_o})} = (h_o + h_r) A_{I_o} (T_{I_o} - T_o) \end{aligned} \quad (4.23)$$

мұндағы D_{P_i} және D_{P_o} – түтіктің ішкі және сыртқы диаметрлері;

$D_{I_o} = D_{P_o} + 2t$, t – оқшаулау жуандығы.

U_o өрнегі бұдан бұрын түтіктің қабырғасымен бөлінген сұйықтықтар арасындағы стационарлық режимдегі жылу берілімдер үшін көрсетілгендей анықтала алады, нәтижесінде:

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_{I_o}}{h_i D_{P_i}} + \frac{D_{I_o} \ln(D_{P_o}/D_{P_i})}{2k_P} + \frac{D_{I_o} \ln(D_{I_o}/D_{P_o})}{2k_1} + \frac{1}{h_o + h_r}} \quad (4.24)$$

Алайда “сәулеленумен жылу берілім коэффициентіне” h_r белгісіз мағына T_{I_o} кіреді, оны итерация әдісінің көмегімен есептеп шығаруға болады: T_{I_o} мағынасын алып, және 4.21 теңдеуін пайдаланып h_r есептеп шығарып, одан кейін U_o шығару үшін, оның мағынасын 4.24 теңдеуіне қойып, бұдан әрі 4.20 және 4.22 теңдеулерінің көмегімен dQ/dt есептеп, соңында dQ/dt екі мағынасының сәйкестігін тексеру қажет. Сыртқы диаметрлерге D_{I_o} және температуралардың айырмасына $T_{I_o} - T_o$ арналған кестеге көшірілген $h_o + h_r$ мағыналарын пайдалану арқылы есептеп шығару процедурасын әлдеқайда жеңілдетуге болады (Jakob and Hawkins, 1957).

4.2-мысал. Диаметрі 6 дюйм ($D_{P_o} = 6,625$ дюйм немесе 16,83 см сыртқы диаметрге сәйкес болатын номиналды диаметр) және ұзындығы 6 м, оқшаулау жуандығы 2,5 см (немесе $D_{I_o} = 21,83$ см) болатын көлденең құрыш түтіктің жылу шығындарын есептеп шығарыңыз, оқшаулау материалының жылу өткізгіштігі – $k_1 = 0,061$ Дж/с/м/С. Түтік бетінің температурасы тұрақты – $T_{P_o} = 225^\circ\text{C}$, ал қоршаған ауаның температурасы – $T_o = 20^\circ\text{C}$.

Шешім

4.23 теңдеуінен шығатыны:

$$\frac{dQ}{dt} = k_1 A_{I_o} \frac{(T_{P_o} - T_{I_o})}{(D_{I_o}/2) \ln(D_{I_o}/D_{P_o})} = (h_o + h_r) A_{I_o} (T_{I_o} - T_o)$$

және

$$h_o + h_r = k_1 \frac{(T_{P_o} - T_{I_o})}{(D_{I_o}/2) \ln(D_{I_o}/D_{P_o}) (T_{I_o} - T_o)}$$

(4.25)

Алдыңғы теңдеуде конвекциямен және сәулелендірумен жылу берілімнің жалпы коэффициенті $h_o + h_r$ әрі оқшаулаудың сыртқы бетінің температурасы T_{I_o} белгісіз шама болған, бұған қоса итерация әдісі былай қолданылады:

1. Егер $T_{I_o} = 50^\circ\text{C}$ мағынасын алсақ, онда $T_{I_o} - T_o = 50 - 20^\circ\text{C} = 30^\circ\text{C}$ және оны берілген

мағыналармен 4.25 теңдеуіне қойсақ, $h_o + h_r = \frac{(0,061)(225-45)}{\left(\frac{21,83}{2 \times 100}\right) \ln\left(\frac{21,83}{16,83}\right)} = 12,9 \text{ Дж/с/м}^2/\text{C}$ мәнін аламыз.

Бірақ түтікшелердің әр түрлі диаметрлері үшін берілген кестелік мағыналардың интерполяциялау жолымен D_{10} және температуралардың айырмасы $T_{10} - T_o$ (Jakob and Hawkins, 1957) $h_o + h_r = 10,9 \text{ Дж/с/м}^2/\text{C}$.

2. Егер $T_{10} = 55^\circ\text{C}$ мағынасын алсақ, онда $T_{10} - T_o = 55 - 20^\circ\text{C} = 35^\circ\text{C}$ әрі оны берілген мағыналармен 4.25 теңдеуіне қойсақ, $h_o + h_r = \frac{(0,061)(225-45)}{\left(\frac{21,83}{2 \times 100}\right) \ln\left(\frac{21,83}{16,83}\right)} = 11,1 \text{ Дж/с/м}^2/\text{C}$ мәнін аламыз.

Бірақ түтікшелердің әр түрлі диаметрлері үшін берілген кестелік мағыналардың интерполяциялау жолымен D_{10} және температуралардың айырмасы $T_{10} - T_o$ (Jakob and Hawkins, 1957) $h_o + h_r = 11,1 \text{ Дж/с/м}^2/\text{C}$, бұл бұның алдында есептеліп шығарылған мәнімен сәйкес.

Онда жылу шығыны:

$$\frac{dQ}{dt} = (h_o + h_r) A_{10} (T_{10} - T_o) = (11,1) \left(\pi \times \frac{21,83}{100} \times 6 \right) (35) = 1,6 \text{ (кДж/с)}$$

4.2 ЖЫЛУ АЛМАСУ ЖАБДЫҒЫ

Бұл тарауда екі сұйықтықтың бір бірімен тікелей жанасуынсыз екі сұйықтық арасында жылу энергиясын беруге арналған жылуалмасу жабдығы қарастырылады. Осындай түрдегі жылу алмастырғыштардағы жылу берілім тосқауыл арқылы жүзеге асырылады, ол екі сұйықтықтың бір-бірімен араласуына жол бермейді, төменде сипатталған қаптама құбырлы жылу алмастырғыштарда тосқауыл қызметін түтікшелер атқарады. Содан кейін ауамен салқындататын жылу алмастырғыштар қарастырылатын болады, мұндай жылу алмастырғыштар қаптамалары жоқ түтіктерден тұрады. Соңында жылу беру үшін түтіктер қолданылатын басқа да жабдықтар, мысалы, кедеге жаратушы қазандар (КҚ) қарастырылады. Бұдан бұрын көрсетілгендей, сұйықтықтардың бір-бірімен тікелей жанасуы барысындағы жылу алмасу, әдетте екі сұйықтық арасындағы масса алмасудан тұрады. Блок жұмысының бұл түрлері² және қолданылатын тиісті жабдықтар 5-тарауда қарастырылады.

Жылу алмастырғыштар сұйықтықтардың ластануға бейімділігін ескерумен жобалануы керек. Ластану жылдамдығына ықпал ететін факторларға температура, конструкцияның материалдары және бетінің кедір-бұдырлығы жатады.

Жылу алмастырғыштың тиімділігін төмендететін жылу берілімнің қосымша кедергілері туындайды. Шөгінділердің айтарлықтай көп мөлшерде болу жағдайында сұйықтық ағынының көлденең қимасының ауданы қысқартылады, осының салдарынан сұйықтықтың жылу алмастырғыштағы ерікті қозғалысын қамтамасыз ету үшін қосымша қысым түсіру қажет болады. Жылу алмасудың жалпы коэффициентін есептеу үшін, ластануға қарсы қосымша термиялық кедергіні, сонымен қатар ластанған беттердің оңай тазартылуын қамтамасыз ететін қажетті механикалық қондырғыларды ескеру қажет.

Ластанудың рұқсатты деңгейі негізінен тәжірибені есепке алумен анықталады, бірақ әр түрлі сұйықтықтар үшін кедергілердің стандарттық мағыналарымен кестелер Түтікшелі жылу алмастырғыштарды өндірушілердің қауымдастығының Стандарттарында беріледі (2007). Бұл Қауымдастық құбыр қапты жылу алмастырғыштарды өндірушілердің сауда қауымдастығы болып табылады әрі ол 60 жыл бойы жылу алмастырғыштарды зерттеуді ұйымдастырумен және әзірлеумен айналысады. Бұл Қауымдастық жылу алмастырғыштардың осы түрін жобалау бойынша ережелер мен басқарушылық нұсқамаларды әзірлеген.

4.3-мысал. Бу генераторытабиғи газды жағу барысында алынатын түтіндік газдардан шығатын жылуды регенерациялауға арналған. Газ құбырлардан ағып шығады, ал бұл кезде құбырлардың ішінде бу түрленеді. Құбырлардың сыртқы диаметрі – 50,8 мм, ал жуандығы 7,75 мм құрайды. Жылу алмастырғыштағы жылу алмасу бетінің ауданының ұлғаюын,

ластануды ескеріп есептеп шығыңыз.

Ластану коэффициенті (шөгінділер қабатының салдарынан туындаған жылу берілімге қарсы кедергі ретінде беріледі немесе жылу берілімнің кері пропорционалды сәйкес коэффициентінің мағынасы болады) газ жағынан – 0,00025 м²°Сс/қДж, бу жағынан – 0,000025 м²°Сс/қДж, ал ластанусыз жылу берілімнің жалпы коэффициенті 250 қДж/м²/°С/с құрайды деп аламыз.

Шешім

4.11 теңдеуінде берілген жылу берілімнің жалпы коэффициентін есептеу барысында ластанулар салдарынан туындаған құбырлардың ішкі беттеріндегі қосымша кедергіні h_{fi} , және құбырлардың сыртқы беттеріндегі кедергіні h_{fo} ескергендегі жылу берілім жалпы коэффициентінің мағынасы:

$$U_{fo} = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{1}{h_{fo}}}$$

²Типтік үдеріс – бұл жалпы үдерістері негізгі кезең (немесе ішкі жүйе), оның ішіне қыздыру немесе салқындату (жылу берілім) сияқты, физикалық өзгерістер, бөлу (масса алмасу) кіреді. Екінші жағынан, дара үдеріс химиялық өзгерістермен байланысты.

Жылу алмасу бетінің ауданының ұлғаюы:

$$\begin{aligned} \frac{A_{fo}}{A_o} - 1 &= \frac{U_o}{U_{fo}} - 1 = \frac{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{1}{h_{fo}}}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} - 1 \\ &= \frac{\frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{1}{h_{fo}}}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} \\ &= U_o \left(\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{1}{h_{fo}} \right) \end{aligned}$$

Ішкі ластану коэффициентінің мәндерін $\frac{1}{h_{fi}} = 0.000025 \text{ м}^2\text{°Сс/қДж}$, сыртқы ластану коэффициентінің мәндерін $\frac{1}{h_{fo}} = 0.000025 \text{ м}^2\text{°Сс/қДж}$, құбырдың ішкі диаметрін $D_i = 50,8 - 2 \times 7,75 = 35,3 \text{ мм}$, құбырдың сыртқы диаметрін $D_o = 50,8 \text{ мм}$ жоғарыда берілген формулаға қойып, $\frac{A_{fo}}{A_o} - 1 = 250 \left(\frac{0.000025 \times 50,8}{35,3} + 0.00025 \right) = 0.07$ немесе 7 %-ға ұлғаюды аламыз.

4.2.1 Қапталған құбыр жылу алмастырғыштары

Кең ауқымда пайдалану үшін қаптамадағы бірнеше құбыры бар қаптама құбырлы жылу алмастырғыштар қолданылады, және көбінесе жылу алмастырғышта осындай бірнеше қаптамасы болуы мүмкін.

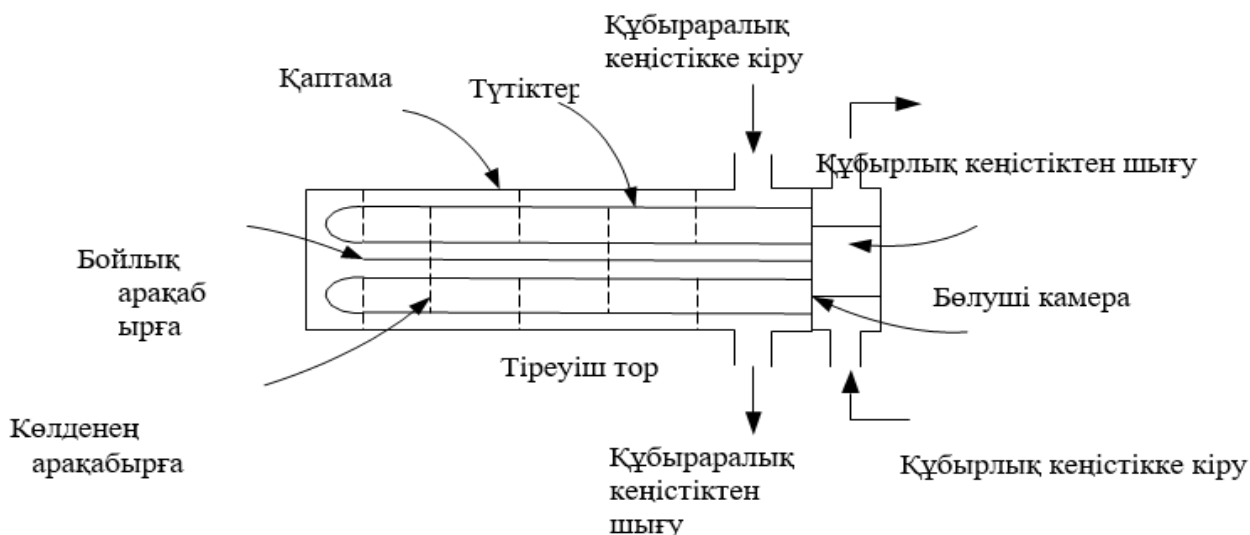
Әрбір қаптама цилиндр тәріздес үлкен ыдыстан тұрады, ал ол кезегінде құбырлар шоғынан тұрады, бұл ретте бір сұйықтық құбырлардың бойымен (құбырлық кеңістіктегі сұйықтық), ал екінші сұйықтық құбырлардың шоғы арқылы (құбыраралық кеңістіктегі сұйықтық) жылжиды. Құбырлар (бойлық) жылу берілім бетінің ауданын ұлғайту үшін ойлы-қырлы болуы мүмкін. Құбырлар шоғы алынбалы немесе алынбайтын болуы мүмкін, ол қолдану тәсіліне байланысты болады.

Көлденең арақабырғалар құбыраралық кеңістіктегі сұйықтық ағынының құбырлар шоғына қарай бағытын бақылау үшін қолданылады, және бұл турбуленттілікті және, демек

жылуберілімнің жылдамдығын арттырады, сондай-ақ олар құбырлардың механикалық сүйемелдеуін қамтамасыз ету үшін қолданылады. Арақабырғалардың әр түрлі түрлері болады, мысалы, сегменттік арақабырғалар, олар көбінесе қаптама құбырлы жылу алмастырғыштардың конструкцияларында қолданылады, сонымен қатар дисктік және сақиналық арақабырғалар да бар. Арақабырғалар арасындағы арақашықтық пен аралық құбырлардың механикалық тіректерінің қажетті деңгейіне және қаптамадағы қысым айырмасына байланысты анықталады. Біріктіруші тарту күші мен кергіштер арақабырғалар мен аралық арақабырғаларды бекітілген қалпында нық ұстап тұру үшін пайдаланылады. Бойлық арақабырға қаптаманы бөлу үшін және құбыраралық кеңістікте сұйықтық үшін екі жолды құру үшін орнатылады. Шағылдырғыштық арақабырғалар қаптаманың кіреберісіндегі келте құбырының жанында орналастырылатын жалпақ тіліктер (пластиналар) түрінде болады, олар құбырлардың шоғын қалқымалы заттардың немесе сұйықтықтың тым жоғары жылдамдықты ағынының әсерінен кесіліп кетуден, нүктелік коррозиядан немесе эрозиядан қорғауға, сонымен қатар құбырға келіп түсетін сұйықтықты таратуға арналған.

4.2.1.1 Алынбалы құбырлық шоқтар. Алынбалы құбырлық шоқтың екі түрі болады: U-тәріздес түтіктермен модификациялар және бастиектері қозғалмалы модификациялар. U-тәріздес түтіктері бар жылу алмастырғыштар алынбалы шоқтарының қарапайым құрылымына байланысты аса тиімді болып табылады. Тік құбырлар U әрпінің пішініне ұқсатып майыстырылған және бір шетінен құбырлық торға ерітіп жабыстырылған. U-тәріздес құбырлар қаптамада еркін ұлғая алады және бұл жағдай термиялық кеңею нәтижесінде туындайтын кернеуді түсіру үшін компенсатордың қажеттілігін жояды. Жылу алмастырғыштың бұл түрі өте жоғары қысым жағдайында қолданылады. Жылу алмастырғыштың конструкциясы қаптаманың кіреберіс келте құбырын U-түріндегі майысудан жоғары орналастыруға мүмкіндік береді, және бұл жағдай термоқаққыштың қажеттілігін жояды. Алайда жылу алмастырғыштардың бұл түрі жөндеу жұмыстары қарастырылмайтын қызметтерде пайдалануға ғана жарамды, өйткені, құбырдың үзілуі жағдайында кейбір жеке құбырларды ауыстыру қиынға түседі; сыртқы қатардағы құбырлар ғана кедергісіз ауыстырыла алады. Әдеттегідей құбырлық кеңістіктегі ағымның тек жұп саны ғана қарастырылған, және көбінесе өнеркәсіпте құбырлық кеңістіктегі ағымның тек жұп санымен жылу алмастырғыштар қолданылады.

4.3-суретте қаптама құбырлы жылу алмастырғыштардың осы түрінің құбыраралық кеңістіктегі бойлық арақабырғаның көмегімен бөлінген, екі ағынымен кестесі берілген («2-4 ағынды жылу алмастырғыш», мұндағы 2-құбыраралық кеңістіктегі ағындар санын және 4 саны құбырлық кеңістіктегі ағындар санын білдіреді). Бұл екі сұйықтық жылу алмастырғышқа түседі де, кері ағымдық бағытта қозғалады, алайда көлденең арақабырғалары бар қаптама сұйықтықты құбыраралық кеңістікте қазандағы түтіктер шоғына бағыттайды, және осының салдарынан жылуберілімнің коэффициентінің мағынасы өседі.



4.3-сурет Қаптама құбырлы U-тәріздес түтіктері бар жылу алмастырғыш

4.3-сурет. Қаптама құбырлы U-тәріздес түтіктері бар жылу алмастырғыш

Қалқымалы бастиектермен жылу алмастырғыштар жүйелі түрде техникалық қызмет көрсетулерді жүргізу мүмкіндіктерінде пайдаланылады. Бұндай жылу алмастырғыштардың тірегіш торларының екі жақ шеттерінде бекітілген тік құбырлары бар. Бір тірегіш торы еркін қозғалмалы болады, және осылайша құбырлардың шоғы мен қаптама арасында дифференциалдық жылуының ұлғаюын қамтамасыз етеді. Құбырлардың сыртқы беттерін тексеру, ауыстыру және тазалау үшін, құбырлардың шоғын ажыратуға болады. Құбырлық кеңістіктегі таратқыш камераларды, камераның қақпақтарын, аралық төсемдерді де, сондай-ақ жөндеуге және ауыстыруға болады, сонымен қатар құбырлардың ішкі беттерін тазалауға болады. «Шарбылық тығыздағышы» бар қалқымалы бастиекті жылу алмастырғыштағы (ТЕМА тип АЕР) құбыраралық кеңістік тығыздағыш сақинаны қысу арқылы тығыздағыш шоқпен герметизацияланады. Шарбылық тығыздағыш қозғалмалы құбырлық торға еркін қозғалуға мүмкіндік береді. Тығыздау тек құбыраралық кеңістіктегі сұйықтықпен байланысатындықтан, тығыздағыш арқылы ағып кету орын алған жағдайда, құбыраралық және құбырлық кеңістіктердегі сұйықтықтар араласпайды. Құбыраралық кеңістіктегі тығыздау қысымының рұқсат етілген мәні қауіпсіз пайдалану барысында шаршы дюймге 600 фунтты және 600 F құрайды (манометр 4140 кПа және 316 °C), өйткені сұйықтықтың құбыраралық кеңістіктен қоршаған ортаға ағып кету қаупі бар. «Шамды тығыздау сақинасы» бар қалқымалы бастиекті жылу алмастырғышта (ТЕМА тип АЖВ) құбыраралық және құбырлық кеңістік тығыздаушы жеке сақиналармен (немесе тығыздағыш сақиналармен), тесіктері бар бөлінген шамды сақиналармен герметизацияланады, сондықтан кез келген шарбылық тығыздағыш арқылы ағып кету сыртқы жағында жүзеге асады. Құбырлық тордың ені екі тығыздағыш, шамдық сақина және дифференциалдық жылу ұлғаюы үшін қарастырылуы керек. Кейде тығыздау және шамды сақиналар үшін тіреуші бетті қамтамасыз ету үшін кішкентай белдемше қозғалмалы құбырлық торға бекітіледі. Қысымның рұқсат етілген мәні 150 фунт/ш. дюйм және 500 F (манометр 1030 кПа және 260°C). Құбыраралық және құбырлық кеңістіктерде сұйықтықтың ағып кетуіне жол берілмейтін немесе құбыраралық және құбырлық кеңістіктерде сұйықтықтардың араласып кетуіне жол берілмейтін жағдайларда бұл конструкциялар қолданылмайды. Сонымен қатар бұл конструкция құбырлық кеңістіктегі бір немесе екі ағынмен шектелген. «Сақиналық аралық төсемі» бар қалқымалы бастиекті жылу алмастырғыштың конструкциясының (әдетте АКТ типті ТЕМА²) қозғалмалы құбырлық торға бұрандалармен тікелей бекітілген жеке бастиегі

² ТЕМА белгісі жылу алмастырғыштардың стандарттық түрлері үшін қолданылады. Қаптама құбырлы жылу алмастырғыштар үшін белгі үш әріптен тұрады, ондағы бірінші әріп жылу алмастырғыштың алдыңғы

болады, бұл ретте құбырлық тор және бастиек қаптама арқылы сырғанауға арналған, сондай-ақ бұл конструкцияның құбырлар шоғы бар, ол қозғалмалы шетіндегі кез келген қосындылардың бұзылуынсыз жойыла алады. Шеткі құбырлары мен қаптаманың ішкі қабырғасы арасындағы саңылаудың көлемі қозғалмалы құбырлық тордағы тығыздалу мен бұрандаларды есепке ала отырып қарастырылуы керек. Ағынның тақ саны жағдайында жалғама келте құбыр қалқымалы бастиектің қақпағынан қаптаманың қақпағына дейін орналасуы керек. Тығыздалумен қосындылар немесе ішкі сильфондар дифференциалдық жылу ұлғаюының компенсаторлары ретінде және сондай-ақ құбыр шоқтарын жою үшін пайдаланылады. Олар құбыраралық және құбырлық кеңістіктердегі сұйықтықтардың араласып кету қаупін тудырмайтын жағдайда, қозғалмалы құбырлық тор мен оның бастиегі арасындағы ішкі аралық төсемнің зақымдануы орын алған жағдайда қолданылады.

«Сақиналық аралық төсемі» бар қалқымалы бастиекті жылу алмастырғыштарда (ТЕМА тип AES) қалқымалы бастиектің қақпағы кесілетін сақиналық аралық төсемі бар бұрандалы қосылыстың көмегімен жылжымалы құбырлық торға жалғанған. Қалқымалы бастиектің қақпағы қаптама қақпағының ішінде орналасқан және жылу алмастырғышты бөлшектеу үшін, жылжымайтын режимде түтіктердің шоғын жою үшін ең алдымен қаптаманың қақпағын, содан кейін кесілетін сақиналық аралық төсемді және қалқымалы бастиектің қақпағын бөліп алу керек. Құбырдың тақ санды ағындарымен жылу алмастырғыштар үшін келте құбыры қалқымалы бастиектің қақпағынан қаптаманың қақпағына дейін орналастырылуы керек. Әдеттегідей қаптама құбырлы жылу алмастырғыштың бұл түрі ең қымбат бағалы болып табылады.

Егер ағып кету салдарынан (мысалы, ішкі аралық төсем арқылы) құбыраралық және құбырлық кеңістікте қысым айырмасы шамамен ш. дюймге 500–1000 фунттан асып кетсе (шамамен 3400–6900 кПа), қалқымалы бастиегі бар жылу алмастырғыштарды пайдалануға болмайды, оның орнына U-тәріздес шоқтар пайдаланылады.

4.2.1.2 Алынбайтын бумалар (бекітілген құбырлық тор). Кіші көлемді қолданыстарға арналған жылу алмастырғыштардың кең тараған түрі құбырлық торлардың екі шетінен бекітілген және қаптамаға ерітіп жабыстырылған тік түтіктерден тұратын жылу алмастырғыш болып табылады. Жылу алмастырғыштың конструкциясы таратушы камералардың алынбалы қақпақтарынан (ТЕМА тип AEL), таратушы камералардың қалпақ түріндегі қақпақтарынан (ТЕМА тип BEM) және кіріктірмелі құбырлық торлардан (ТЕМА тип NEN) тұрады, және олар бірігіп, сұйықтықтың қоршаған ортаға ағып кету қаупінен максималды қорғауды қамтамасыз етеді. Қаптаманың диаметрі жылу берілім бетінің берілген ауданына, түтіктердің санына, олардың диаметрі мен ұзындығына, сондай-ақ құбырлық кеңістіктегі ағындардың санына байланысты басқа қаптама құбырлы жылу алмастырғыштардың түрлеріне қарағанда кішкентай, және осының салдарынан бұл жылу алмастырғыштар салыстырмалы түрде қымбат болмайды. Алынбалы шоқтардың болмауы құбыраралық кеңістікті механикалық тазалауда қиындық тудырады, сондықтан оларға техникалық қызмет көрсетудің мүмкін болмауына байланысты, бұл жылу алмастырғыштарды қолдану шектеулі болады.

Дифференциалдық жылу ұлғаю салдарынан туындайтын кернеу компенсатордың (сильфонның) көмегімен төмендетіледі.

4.2.1.3 Қаптамалардың түрлері Қаптамалардың бірнеше түрлері болады. Бір кірісті, екі кірісті қаптама құбырлы жылу алмастырғыштар (Е типті ТЕМА) кең қолданысқа ие болды, алайда олардың қолданысы температура айырмасы болмайтын салаларда шектеулі. Екі кірісті қаптама құбырлы жылу алмастырғыштар (F типті ТЕМА) технологиялық ерекшеліктерге байланысты температуралар айырмасы міндетті түрде болатын, ал ауданының көлеміне байланысты бірінен кейін бірі дәйектеле орналасқан екі немесе одан да көп қаптамаларды пайдалану мүмкін болмайтын жағдайларда қолданылады.

Қаптамалардың бұл түрі алынбалы және алынбайтын бойлы арақабырғалармен қолжетімді. Алынбалы бойлы арақабырғаларды пайдалану барысында туындайтын негізгі

қозғалмайтын бастиегін, екінші әріп – корпустың түрін, және үшінші әріп жылу алмастырғыштың артқы сыртқы бастиегін білдіреді

мәселе бойлы арақабырға мен қаптама арасындағы саңылау арқылы сұйықтықтың ағып кетуі болып табылады, бұл жағдайда ағып кетудің мөлшеріне байланысты жылу алмастырғыштың тиімділігі төмендейді.

Бойлы тығыздаушы тарақтар сұйықтықтың ағып кетуін болдырмау үшін қажет. Құбыраралық кеңістіктегі жылуберілім бақыланбайтын жағдайда және құбыраралық кеңістікте қысымның төмен өзгерісі қажет болса, ағыны бөлінетін және ағыны тарамданатын қаптаманы пайдалануға болады (ТЕМА қаптамалар түрлері G, H, J және X).

4.2.1.4 Құбырлық кеңістік

Құрама Штаттардағы өндеуші өнеркәсіпте әдетте құбыр қабырғасының стандартты жуандығы 18-ден 10-ға дейінгі сымның бирмингемдік сұрыптамасы бойынша диаметрлері 3/4, 1, 1½ және 2 дюйм болатын құбырлар пайдаланылады (құбыр қабырғасының жуандығы көп жағдайда сымдардың бирмингемдік сұрыптамаларымен өлшенеді). Диаметрі 1 дюйм болатын құбырлар әдетте ластану ықтималдығы болған жағдайларда пайдаланылады, өйткені, көлемі кішкентай құбырларды механикалық тазалау қиындықтар тудырады. АҚШ көптеген өндірушілері үшін құбырлардың максималды ұзындығы шамамен 40 футты (12,2 м) құрайды, алайда құбырлардың стандартты ұзындықтары 8 футты (2,4 м), 10 футты (3 м), 12 футты (3,7 м), 16 футты (4,9 м) және 20 футты (6,1 м) құрайды, сондықтан жылу берілім бетінің бірдей ауданы үшін құбырлардың, тіреуіш торлардың аз мөлшері және кішкентай көлемдегі фланецтер қажет болатындықтан, бұл ретте неғұрлым ұзынырақ құбырлардың құны көп жағдайларда арзанырақ болады. Диаметрлері кішкентай құбырларды таза ағындар үшін, сондай-ақ құбырларды химиялық тазарту мүмкіндігі болатын жағдайларда пайдаланған тиімді әрі сонымен қатар құбыраралық кеңістіктегі қысым өзгерістерін (айырмасын) азайту тым маңызды болмайтын жағдайларда пайдаланылады, өйткені беттің ауданы шоқтың берілген диаметрі үшін үлкен болады.

4.2.1.5 Құбырлардың адымы және сызбанұсқалық бейнесі. Құбырлардың адымы – бұл қатар орналасқан құбырлардың орталықтары арасындағы ең қысқа арақашықтық, ал саңылау – бұл екі құбыр арасындағы ең қысқа арақашықтық. Көптеген қаптама құбырлы жылу алмастырғыштарда құбырлардың адымы түтіктің диаметрінен 1,25-1,5 есе үлкен, ал ең кішкентай минималды саңылау әдетте 3/16 дюймді (4,76 мм) құрайды. Құбырдың сызбынұсқалық бейнесі үшін төртбұрышты немесе үшбұрышты сурет пайдаланылады.

4.2.1.6 Материалдар. Конструкцияның технологиялық сипаттамаларына байланысты сирек кездесетін металдарды қолдану дұрысырақ болатын жағдайларды қоспағанда әдетте құбырлар, қаптама және қаптаманың қақпағы көміртекті болаттан дайындалады. Көміртекті болаттан жасалған қаптаманың сыртқы қаптауышы құнын төмендету мақсатында, сирек кездесетін материалдардан жасалуы мүмкін. Арақабырғаларды, біріктіргіш тартқыштарды және кергіштерді дайындау үшін қолданылатын материалдар қаптамалар жасалатын материалдарға ұқсас болады.

4.2.1.7 Сұйықтықты тарату. Құбыраралық немесе құбырлық кеңістікпен ағатын сұйықтықтарды пайдалану және капитал шығындарына байланысты таңдау маңызды. Төменде таңдау үдерісі барысында ескеру қажет кейбір факторлар атап өтілген. Сұйықтықты таңдауда үйлеспеушілік қайшылықтар болған жағдайда техникалық сипаттамаларға назар аудару қажет болуы мүмкін:

1. Тұтқырлы ағатын сұйықтық – қағида бойынша, құбыраралық кеңістікпен тұтқырлығы жоғарырақ сұйықтық аққанда жылу берілімнің жоғары қарқындылығына қол жеткізіледі.
2. Уытты сұйықтықтар – қағида бойынша, ағып кету ықтималдығын азайту үшін қос құбырлы торды пайдалану барысында құбыраралық кеңістіктермен уытты сұйықтықтар ағу керек.
3. Ағым ортасының шығыны (сұйықтықтар) – құбыраралық кеңістіктің ішіндегі сұйықтық төмен жылдамдықпен ағатын конструкция аса үнемді конструкция болып есептеледі, өйткені турбулент ағысына көлденең арақабырғалар пайдаланылатын тым

төмен жылдамдықтар барысында қол жеткізіледі.

4. Көпфазалық сұйықтық – құбыраралық кеңістікпен ағады.

5. Коррозиялық сұйықтық – құбыраралық кеңістікте коррозиялық сұйықтық ағатын конструкция аса үнемді конструкция болып есептеледі, өйткені тек құбырлар аса қымбат құймалардан дайындалуы керек.

6. Салқындатушы сұйықтық – сулы салқындатқышты жылу алмастырғыштарда салқындатушы сұйықтық әдетте арақабырғаларға байланысты пайда болған тоқырау нүктелеріндегі қалталар мен шөгінділердің пайда болуынан туындауы мүмкін құбырлық кеңістіктегі коррозияны болдырмау үшін, құбыраралық кеңістікпен ағады. Сонымен қатар құбырлық кеңістіктегі ластанудан тазарту шаралары кедергісіз іске асырылады.

7. Ластаушы сұйықтық – жылдамдықты жоғарлату ластану үрдісін төмендетеді, және осылайша ластануға бейімділігі жоғары сұйықтық құбырлық кеңістікпен ағады. Сонымен қатар ластануды жою үшін қолданылатын химиялық тазарту әдетте құбырлық кеңістікте тиімдірек болады, ал тік құбырларды тазарту шараларын жүргізгенде құбырлардың шоғын алып тастау міндетті емес.

8. Жоғары температуралы сұйықтықтар құбырлық кеңістікпен ағады, өйткені жоғары температураға төтеп беру үшін тек түтіктер ғана аса қымбат қорытпалардан жасалуы керек.

9. Қысымы тым жоғары сұйықтықтар құбырлық кеңістікте орналастырылады, өйткені диаметрлері аса кіші құбырлардың сақиналық кернеулері де тым аз болады. Сонымен қатар құбырлық кеңістіктегі сұйықтық қысымның біршама төмендеу әсеріне тап болатындықтан, қысымның тым төмен түсуі барысындағы шығындар қысымы одан жоғарырақ сұйықтық үшін аса маңызды емес.

10. Қысым ауытқуы – қысымы төменірек болатын сұйықтық әдетте құбырлық кеңістікпен ағады.

4.2.1.8 «Құбыр ішіндегі құбыр» түріндегі жылу алмастырғыштар.

Жылу алмастырғыштардың бұл түрін қаптаманы қалыптастыру үшін пайдаланылатын ішінде орнатылған үлкен көлемді құбыры, кішігірім құбыры, қатпарлы немесе қатпарсыз құбырлары бар қаптама құбырлы жылу алмастырғыштардың арнайы түрі ретінде қарастыруға болады.

Жылу алмастырғыш U-тәріздес құбырлардан тұрады; бұл жағдайда ол U-тәріздес жылу алмастырғыш деп аталады. «Құбыр ішіндегі құбыр» түріндегі жылу алмастырғыштар жылуберілім бетінің қажетті ауданы ықшам, шамамен 50 ш² кем болған жағдайларда немесе жоғары қысымда пайдаланылады. Стандартты конструкциялар әдетте құбырлық кеңістіктегі қысымның бір шаршы дюймге 5000 фунтқа (345 бар) дейінгі шектерінде және құбыраралық кеңістіктегі қысымның бір шаршы дюймге 500 фунтқа (34,5 бар) дейінгі шектерінде пайдаланылады және бұл ретте бұдан да жоғары қысым мағыналары үшін арнайы конструкциялар бар. Жылу алмастырғыштың бұл түрінде нағыз қарсы ағымды ағынға қол жеткізілетіндіктен, «жылу алмастырғыштардың шеттеріндегі температуралық өзгерістер» (бір сұйықтық температурасының екінші сұйықтық температурасына неғұрлым жақындауы) қаптамалары мен құбырлары бар қарапайым жылу алмастырғыштармен салыстырғанда, әлдеқайда төмен болуы мүмкін, логарифмдік түзету коэффициенті бірге тең. Сонымен қатар конструкциясының қарапайымдылығына байланысты, жылу алмастырғыштың бұл түрлерінде құбырларды тазалау, тексеру және ауыстыру жеңілірек болады. U-тәріздес құбырлары бар конструкциялардың артықшылығы компенсатор қажеттілігінің болмауында.

4.2.1.9 Сыртқы конденсатор.

Ренкин циклында пайдаланылатын бу қондырғының маңызды бөлігі болып табылатын сулы салқындатқышты қаптама құбырлы жылу алмастырғыштардың ерекше түрі болып табылады. Ол бу турбинасынан шығатын энергияның рекуперациясын ұлғайтады, турбинаның шыға берісінде тұрақты вакуумды қамтамасыз етеді, бу конденсатын қайта қалпына келтіреді. Турбинаның шығарылатын буы құбыраралық кеңістікте жиналады, ал құбырлық кеңістіктегі салқындатқыш сұйықтық жылуды бұрады. Қондырғыға топталмайтын заттектерін (O₂ және CO₂) бұруға арналған жабдық (буағынды эжектор немесе аса тиімді механикалық вакуумдық «сорғылар») кіреді, әйтпесе бұл топталмайтын заттектер құбыраралық кеңістікте жиналып қысымды арттырады.

Конденсат «конденсат жинағышта» жиналады және қайтадан ауасыздандырғышқа (коррозия тудыратын судағы оттегі және көміртек диоксиді сияқты ерітілген газдарды жою үшін) ауыстырылып құйылады. Қаптама әр түрлі пішінде болуы мүмкін, мысалы, дөңгелек, сопақ, тікбұрышты немесе бірнеше пішінде бола алады, ал конденсат жинағыштың пішіні цилиндр немесе ванна формасында болады.

4.2.1.10 Ребойлерлер. Жылу алмастырғыштардың бұл түрлері масса алмасу жабдығында қолданылады, мысалы, ректификациялық және булау бағандарында, олар құрамында екі немесе одан да көп компоненттері бар ағыннан компоненттерді бөлу үшін пайдаланылады. Бағандардың бұл түрлері екі ағын арасындағы компоненттердің масса алмасуын жақсарту үшін тығыздағыш немесе оның бірнеше қақпағы арқылы жоғары ағып жатқан бу мен төмен ағып жатқан сұйықтықтың арасындағы тығыз байланысты қамтамасыз етеді, ал ребойлер бөлу үшін қажетті жылу энергиясын қамтамасыз етеді. Ол бағандар арқылы өтетін булардың қажетті мөлшерін қамтамасыз етеді, сонымен бірге бөлу үдерісіне мүмкіндік туғызу үшін тым ұшпа компоненттердің көп бөлігін буға айналдырады. Бұл операциялар 5-тарауда талқыланады. Ребойлерлердің көбінің конструкциясы қаптамамен және түтіктермен жабдықталған болады және әдетте жиналған бу жылу энергиясымен қамтамасыз етеді, бірақ термальді май немесе Dowtherm™ сияқты басқа жылу көздері де пайдаланылуы мүмкін, ал кейбір жағдайларда жағу пештері ребойлерлер ретінде қолданыла алады. Ребойлерлердің бірнеше түрі болады, олар төменде сипатталған.

Бір кірісті термосифондық ребойлерде бағанның төменгі табандығындағы сұйықтық сұйық өнімді өндіру барысында тікелей ребойлердің өзінде ағады. Ребойлер арқылы ағатын сұйықтықтың ағыны гидростатикалық қозғалтқыш күшке әрі сол себепті термосифонға байланысты. Гидравликалық қысым түріндегі қозғалтқыш күш контурдағы қысымның толығымен түсуін жеңуі керек. Бір кірісті ребойлерлер тік те және көлденең де бола алады әрі бұл ретте қайнап жатқан сұйықтық құбыраралық және құбырлық кеңістікпен аға алады. Қайта айналымды термосифондық ребойлерде төменгі табандығындағы сұйықтық ребойлердің қайтатын ағынының сұйық фракциясымен араласады және ребойлерге арналған шикізат ретінде қайтадан рециркуляцияланады. Ребойлердің бұл түрін (баған түбіндегі арақабырғамен) пайдалану әдетте тік ағынды ребойлерге қарағанда қолайлырақ, өйткені гидравликалық конструкция мұнда міндетті шарт болып табылмайды.

Ребойлердің тағы да бір түрі – қазан-ребойлер, ол әдетте реттеу мүмкіндігі кең диапазонды болатын жағдайда немесе ребойлерден шығатын бу ағыны сапасының аса жоғары болу қажеттілігінде қолданылады. Бұл ребойлерлердің құны корпусының үлкен болуына және өнімнің буферлік көлеміне қатысты талаптарына байланысты бұдан бұрын сипатталған ребойлерлерге қарағанда қымбатырақ болады. Әдетте айдау қызметі немесе мәжбүрлі айналымы бар ребойлерлер ең қымбат түрі болып табылады және тұтқырлы сұйықтықпен жұмыс үшін немесе қатты ластану барысында пайдаланылады әрі олар сондай-ақ айналымдағы сұйықтықты қосуы да, қоспауы да мүмкін.

4.1-кестеде бағандардан тыс орнатылатын ребойлерлердің әр түрінің артықшылықтары мен кемшіліктері берілген.

4.1-КЕСТЕ. Ішкі ребойлерлердің әр түрлі типтерінің артықшылықтары мен кемшіліктері

Түрі	Артықшылықтары	Кемшіліктері
Қазан-ребойлер	• Баламалы теориялық сатылар • Тұрақты жұмыс режимі және басқару қолайлылығы • Ретке келтірудің кең диапазоны • Бағанның төменгі түйінінің ең кіші биіктігі	• Жылу берілім коэффициенті төмен және орташа • Ластану ықтималдығы жоғары • Ағылу ұзақтығы төмен • Қосымша құбырларды қажет етеді • Құны жоғары • Учаске ауданы үлкен • Қыздырылған зонада болу уақытының ұзақтығы температураға сезімтал сұйықтықтардың сапасының төмендеуіне әкелуі мүмкін • Сұйықтық құбыраралық кеңістікте ағатындықтан, және осылайша құбыраралық және құбырлық кеңістікте металдарға әсер ететіндіктен, агрессивті жұмыс сұйықтығы үшін жарамсыз болуы мүмкін • Қызмет көрсету мен тазалау шаралары қиындатылуы мүмкін
Тік термосифон	• Бір кірісті баламалы теориялық сатылар • Құбырлар санының аз мөлшері және аса қарапайым орналасуы • Айналым жылдамдығының аса жоғары болуына байланысты, жылу берілім қарқындылығы да жоғары болады • Айналым жылдамдығының жоғары болуына байланысты ластану үрдісінің төмен болуы • Қыздырылған зонада болу уақытының қысқалығы температураға сезімтал сұйықтықтардың сапасының төмендеуін болдырмауға мүмкіндік береді • Қазан-ребойлерге қарағанда, құны төмен болады • Учаскелік ауданы кішірек • Сұйықтық құбыраралық кеңістікте ағатындықтан әрі осылайша құбыраралық	• Бағанның төменгі түйінінің қажетті биіктігінен асып кететін биіктігі • Шектеулі сипаттамалары және тұрақсыздыққа бейімділік • Сұйықтық пен будың тығыздылығының айырмашылығы қайта айналым үшін қозғаушы күшті қамтамасыз етеді, сондықтан сыни жағдайларда жұмыс үшін жарамсыз болуы мүмкін

Көлденең термосифон	және құбырлық кеңістікте металдарға әсер ететіндіктен, агрессивті жұмыс сұйықтығы үшін жарамсыз болуы мүмкін • Бір кірістілер теориялық бөлімге сәйкес келеді • Жылу берілімнің қарқындылығы орташа жоғары болуы мүмкін • Айналым жылдамдығының аса жоғары болуына байланысты, жылу берілім қарқындылығы да жоғары болады • Тік түріне қарағанда қысым айырмасының төменірек болуы • Құнын төмендету үшін, ұзынырақ құбырларды пайдалануға болады • Тік түріне қарағанда, пайдалану қарапайымдылығы; құбырлардың алынбалы шоғын пайдалануға болады • Қазан-бойлерге қарағанда құны төмен	• Бағанның төменгі түйінінің қажетті биіктігінен асып кететін, алайда тік термосифонның биіктігінен аспайтын биіктігі • Параметрлерінің өзгеруінің шектеулі сипаттамалары және тұрақсыздыққа бейімділік • Тік түрінің құбырлары санынан асып кететін қосымша түтіктер • Тік түріне қарағанда үлкен көлемді кеңістік қажет • Ластану ықтималдығы жоғары, бірақ қазан-ребойлерге қарағанда, жоғары емес • Құбыраралық кеңістікте болатындықтан, қаптамасындағы да, құбырындағы да металл коррозиялық жұмыс сұйықтығының әсеріне түседі
Мәжбүрлі айналыммен тік ребойлер	• Айналым жылдамдығының аса жоғары болуына байланысты жылу берілім қарқындылығы да жоғары болады • Айналым жылдамдығының жоғары болуына байланысты ластану үрдісінің төмен болуы • Қыздырылған зонада болу уақытының қысқалығы температураға сезімтал сұйықтықтардың сапасының төмендеуін болдырмауға мүмкіндік береді • Тік термосифонға қарағанда белдемше биіктігі төменірек • Учаскелік ауданы кішірек, бірақ сорғыларға арналған қосымша учаскелер бар • Сұйықтық құбыраралық кеңістікте ағатындықтан әрі осылайша құбыраралық және құбырлық кеңістікте металдарға әсер ететіндіктен, агрессивті жұмыс сұйықтығы үшін	• Теориялық сатыға сәйкес емес • Қызмет көрсету мен тазалау шаралары қиындатылуы мүмкін • Қайта айналымды сорғыларға байланысты қосымша түтіктер қажет болады • Сорғының қуаттылығы салдарынан пайдалану шығындары жоғары • Қосымша сорғыларды пайдалану салдарынан, термосифонның сәйкес басқа түрлеріне қарағанда капитал шығындары жоғары, бірақ қазан-ребойлермен салыстырғанда төменірек

	жарамсыз болуы мүмкін	
	• Тұтқырлығы жоғары сұйықтыққа арналған	
Мәжбүрлі айналыммен көлденең ребойлер	• Айналым жылдамдығының аса жоғары болуына байланысты жылу берілім қарқындылығы да жоғары • Айналым жылдамдығының жоғары болуына байланысты ластану үрдісінің төмен болуы • Қыздырылған зонада болу уақытының төмендігі температураға сезімтал сұйықтықтардың өзгеруін болдырмайды • Көлденең термосифонға қарағанда белдемше биіктігі төмен • Құнын төмендету үшін ұзынырақ түтіктерді пайдалануға болады • Көлденең түріне қарағанда пайдалану қарапайымдылығы; құбырлардың алынбалы шоғын пайдалануға болады • Тұтқырлығы жоғары сұйықтыққа арналған	• Баламалы теориялық емес сатылар • Қайта айналымды сорғыларға байланысты қосымша құбарлар қажет болады • Басқа түріне қарағанда үлкен көлемде кеңістік қажет • Сорғының қуаттылығына байланысты пайдалану шығындары жоғары • Қосымша сорғыларды пайдалану салдарынан, термосифонның сәйкес басқа түрлеріне қарағанда капитал шығындары жоғары, бірақ қазан-ребойлермен салыстырғанда төменірек • Құбыраралық кеңістікте болатындықтан, қаптамасындағы да, құбырындағы да металл коррозиялық жұмыс сұйықтығының әсеріне түседі

4.2.2 Пластиналы жылу алмастырғыштар

Пластиналы жылу алмастырғыштардың конструкциясында екі сұйықтық арасында жылу беру үшін, металл ирек пластиналар қарастырылған. Жылу алмастырғыштардың бұл түрлерінің басты артықшылықтары – сұйықтықтар пластиналар бойымен таратылатындықтан, сұйықтықтар жылу берілім бетінің әлдеқайда үлкен ауданында әсерге ұшырайды. Бұл жылу алмастырғыштар негізінде сұйықтықтан сұйықтыққа жылу беру үшін қолданылады, алайда сұйықтықтан газға жылу беру үшін де пайдаланылуы мүмкін. Пластиналар бірге нығыздалады және осылайша жіңішке тар каналдарды құрастырады (әдетте, ені $<1,5$ мм болатын), осы каналдар арқылы ыстық және суық сұйықтықтар кезекпен ағады. Пластиналар қолданылу мақсаттарына қарай бірге нығыздалады, балқытылып жапсырылады немесе дәнекерленеді әрі ағынның қатар каналдарын қалыптастыру үшін қатты жақтаумен біріктіріледі.

Әрбір каналды тарылту сұйықтықтың неғұрлым көп мөлшерінің пластина бетімен байланысқа түсуіне мүмкіндік туғызады және осылайша жылу алмасудың қарқындылығын арттырады.

Гофрлер де сұйықтықтың турбуленттік ағынына ықпал етіп, соның салдарынан жылу берілімнің коэффициенті артады. Жылу алмастырғыштардың бұл конструкциясы кіріс және шығыс ағындары арасындағы өте азғана қысым айырмасы үшін үнемді болады, небары 1°C , ал қаптама құбырлы жылу алмастырғыштарда әдетте ол 10°C жетеді немесе одан да асып кетеді, осылайша, жылу берілімнің жалпы коэффициенті қаптама құбырлы жылу алмастырғыштың коэффициентінен үш-төрт есе асып кетуі мүмкін. Жылу алмастырғыштардың бұл түрі төмен температура шарттарында, мысалы, «суықты рекуперациялауды» арттыру, демек үдерістің тиімділігін арттыру үшін ауаны бөлуге арналған қондырғыларда және сұйылтылған табиғи газ қондырғыларында қолданылады. Сонымен қатар олар ЖЭЦ-нан ыстық суды жеткізетін, орталықтандырылған жылумен қамтамасыз ету желілерінде жиі пайдаланылады, бұл тақырып 10-тарауда талқыланады.

Геотермальді сұйықтықтан жылуды қалпына келтіру көп жағдайда жылу алмастырғыштың осы түрінің көмегімен жүзеге асырылады. Жылу алмастырғыштың кішкентай көлемділігі де, сондай-ақ оның артықшылығы болып табылады: қажет болған жағдайда қаптама құбырлы жылу алмастырғышты орнату үшін қажетті ауданның 50% ғана пайдаланып, учаскенің қажетті ауданын азайтуға болады. Жылу алмастырғыштың бұл түрінің пайдаланылуына қатысты шектеулер сұйықтықтың рұқсат етілген максималды температурасының шектеулерімен түсіндіріледі, ол температура аралық төсемнің материалы мен қысымымен анықталады; максималды есептеу температурасы мен қысымы шамамен 400°F (200°C) және 300 фунт/ш. дюймге (21 бар) құрайды. Жылу алмастырғыштың бұл түрінде қысымның түсуі қаптама құбырлы жылу алмастырғышқа қарағанда жоғары болады әрі бұл жағдай да оны қолданудың бір шектеуі болып табылады.

4.2.3 Ауамен салқындатылатын жылу алмастырғыштар

Жылу алмастырғыштардың бұл түрі сұйықтықтарды қоршаған ауамен салқындату үшін пайдаланылады. Ауа салқындатылған сұйықтық ағып өтетін, қатпарланған құбырлардың шоғы арқылы ағады. Қатпарлар әдетте алюминийден жасалады, олар ауа жағынан жылу берілімнің салыстырмалы түрде төмен коэффициентін өтеу мақсатында кеңейтілген бетті қамтамасыз ету үшін пайдаланылады. Ауа суытқышы бар конденсаторлар су суытқышы бар сыртқы конденсаторлардың орнына су жетіспейтін географиялық мекендерде пайдаланылады. Мәжбүрлі үрлеумен желдеткіш немесе соратын желдеткіш ауаны жылу алмастырғыш арқылы сорады.

Мәжбүрлі үрлеумен конструкцияларда құбырлардың шоғы желдеткіштің ауа айдау жағында орналасқан, ал жасанды тартумен конструкцияларда құбырлардың шоғы желдеткіштің сору жағында орналасқан. Автокөліктің радиаторы мәжбүрлі үрлеумен ауамен салқындатқышы бар жылу алмастырғыштың тік қондырғысының үлгісі болып табылады. Алайда өнеркәсіпте көбінесе ауамен салқындатқышы бар көлденең орналасқан қондырғысы қолданылады. Көптеген қондырғылардың конструкциясында мәжбүрлі үрлеумен құрылғылар пайдаланылады, дегенмен мәжбүрлі тартумен құрылғыларды пайдаланудың көптеген

артықшылығы бар және олар ескерілуі керек. Мәжбүрлі тартумен құрылғылардың артықшылықтары: желдеткіштерге түсетін ауа суығырақ болатындықтан, энергия тұтыну азырақ болады; техникалық қызмет көрсету үшін механикалық компоненттердің қолжетімділігі және тым суып кетуді болдырмау үшін жылы ауаның суық климатта қайта айналымына жеңіл бейімделуі. Кемшіліктері ауаның дұрыс таратылмауы, айдалатын ауаның төмен жылдамдығына және сорып алатын мұржаның болмауына байланысты ыстық ауаның қайта айналу ықтималдылығының жоғары болуы (ауаның қайта айналымы бөліктер арасындағы «кедергілердің» салдарынан белгілі бір дәрежеде шектелуі мүмкін); желдеткіш істен шыққан жағдайда табиғи сорғының төмен деңгейі. Мәжбүрлі тартумен конструкциялардың артықшылықтары: ауаның тиімді таратылуы; ыстық ауаның жіберілуіне қайта айналымның төмен мүмкіндігі; желдеткіштердің ақаулыққа орнықтылығы, өйткені табиғи сорғының тиімділігі әлдеқайда жоғары. Кемшіліктері – жылы ауа желдеткішке түседі, ал желдеткіш жетегінің бөлшектері техникалық қызмет көрсетуді жүргізу жағдайында қолжетімсіз болатынына байланысты желдеткіштің тым жоғары қуаттылығы.

Салқындатқыш қондырғылар жүйелі түрде Құрама Штаттарда өндіріледі: олардың құбырларының ұзындығы 6-дан 50 футқа дейін (1,8–15,2 м) және кей бөлігінде (бөлігі бір немесе бірнеше құбырлық шоқтарынан тұрады) ені 4-тен 30 футқа (1,2–9,1 м) дейін болады. Жеткізу барысындағы қиындықтарға байланысты, көбінесе ені 4,3 м (14 фут) болатын құрылғылар сұранысқа ие. Бұдан ұзын құбырларды пайдалану конструкцияның өндірістік шығынының азаюына ықпал етеді; әдетте ұзындығы 30 немесе 40 фут (9,1–12,2 м) болатын құбырлар пайдаланылады.

4.2.4 Көдеге жаратушы қазандықтар (КҚ)

Көдеге жаратушы қазандар, мысалы, ЖЭЦ пайдалану үдерісінде немесе 9-тарауда сипатталғандай, бу турбинасын біріктірілген циклда іске қосу үшін пайдалануға болатын буды өндіру үшін, атмосфералық қысымға жақын (ұқсас) қысыммен ішкі жану қозғалтқышының немесе газ турбинасының пайдаланылған газдары сияқты ыстық газ ағынынан туындаған жылудың қайта айналымын жүзеге асыру үшін арнайы жобаланған жылу алмастырғыштар болып табылады.

Көдеге жаратушы қазандар (КҚ) туралы бұл бөлімді 9-тарауды оқып алып зерттеген дұрыс болады. КҚ жылу алмастырғыш құбырлардан тұрады, құбырлар отпен жұмыс істейтін қазандарға қарағанда температурасының әлдеқайда төмен болуына байланысты тік бұрышты қимамен және отқа төзімді қаптамалаусыз қаптаманың ішінде орналасқан. Ыстық газ ағыны құбырлардың шегінен тыс шығады және жылу берілімі конвекция есебінен жүзеге асырылады. Бу циклының түріне байланысты қазандарды қуаттандыру үшін («қыздырғыштың» ирек құбырларында), суды буландыру үшін («буландырғыштың» ирек құбырларында), пайда болған буды қатты қыздыру үшін («буды қатты қыздырғыштың» ирек құбырларында), сонымен қатар бу турбинасының жоғары қысымды цилиндрынан шығарылатын буды қайтадан бу турбинасына кіргізу алдында оны қыздыру үшін («буды қатты қыздырғыштың» ирек құбырларында) ирек құбырлар немесе суды қыздыруға арналған арнайы құбырлар қарастырылған.

Көлемі кішкентай КҚ көбінесе кеңістікті үнемдеу мақсатында газды тік беру үшін (көлденең құбырлармен) арналған, алайда көлемі үлкен КҚ газдың көлденең ағынына (тік құбырлармен) есептелуі керек.

Бір кірісті КҚ қазандарды қуаттайтын сулар буландырғыштың ирек құбырларында толығымен буланып кететіндей жобалануы керек, ал қалған КҚ қазандарды қуаттауға арналған судың бу барабанынан буландырғыштың ирек құбырлары арқылы табиғи қайта айналымын жүзеге асыруға арналған. Бу барабаны да буландырғыштың ирек құбырларынан қайтып оралатын буды судан айыру үшін қызмет етеді. КҚ 1-ші контурдағы қысымнан бір қысыммен бу өндіреді, және демек оларда тек бір ғана бу барабаны болады. 3-ші контурдағы қысыммен қатты қыздырудың бу циклымен КҚ үш секциядан тұрады: төмен температуралы секция, ол жерде төмен қысымды қаныққан бу өндіріледі, одан кейін ол қатты қыздырылады және қазандарды қуаттау үшін алдан ала суды қыздырады; аралық температурамен секция, ол жерде орта қысымдағы қаныққан бу өндіріледі, одан кейін ол қатты қыздырылады және қазандарды қуаттау үшін суды қосымша қыздырады; жоғары температурамен секция, ол

жерде жоғары қысымды қаныққан бу өндіріледі, одан кейін ол да қатты қыздырылады; бу турбинасының аралық қысымды секциясына түсер алдында бу турбинасының жоғары қысымды секциясынан шыққан буды қыздыратын қыздырғыш. Бұл секциялардың әрқайсысында өзінің бу барабаны болады, ол барабандар буландырғыштың сәйкес ирек құбырларымен жалғанады.

Жоғары қысымды бу белгілі бір деңгейге дейін қатты қыздырылады, оның мақсаты – су тамшыларының бу турбинасына түсіп кетуін болдырмау ғана емес, сонымен қатар Ренкин циклының тиімділігін көтеру. Бұл үдеріс 8 және 9-тарауларда талқыланған.

Жылу берілімнің сыртқы коэффициентінің төмен болуына байланысты КҚ құбырлары әдетте қатпарлы болады. Алайда егер осы құбырлар арқылы ағатын газдың салдарынан тым жоғары температурада қатпарлардың тотығуы мүмкін болатын болса, жоғары қысымды бу ысытқыштың ирек құбырлары қатпарлы бола алмайды, өйткені жылу берілімнің ішкі коэффициенті буландырғыштағыдай жоғары емес. Қыздырғыш үшін жылу берілімнің ішкі коэффициенті жылуберілімнің сыртқы коэффициентінен шамамен 10 есе, буландырғыш үшін шамамен 50-200 есе және жоғары қысымды қатты қыздырғыш үшін шамамен 20 есе көп болады.

Кейбір КҚ қосымша немесе каналдық жағу қарастырылған, олар ЖЭЦ-те пайдаланылатын немесе кейде бу турбинасында қосымша қуаттылықты өндіру үшін (бу турбинасы, басқа сәйкес жабдықтар және құбыр желісі будың үлкен ағынына арналған жағдайларда) пайдаланылатын будың көп мөлшерін өндіру үшін жылу шығаруға арналған жанарғылардан тұрады.

4.2.5 Жылытқыш қазандықтар мен қыздырғыштар

Жылытқыш қазандықтар мен қыздырғыштар буды немесе қыздырылған технологиялық сұйықтықты өндіру үшін жылуды қамтамасыз ету мақсатында табиғи газ, мұнай өндіру газы, сұйылтылған мұнай газы, қоқыс газ, дистилляциялы май, мұнай немесе көмір қалдығы сияқты отындарды жағуға арналған. Отын сұйықтық түрінде болса, қауіпті жағдай тудыруы мүмкін, пештің астына ағып кетуді болдырмау мақсатында бүріккіш қолданылады, сонымен қатар тамшылардың көлемі аз болған сайын жағу тиімділігі де жоғары болады.

Әдетте табиғи газ өз кезегінде трансформатор көмегімен тұтанатын бастапқы оттықпен жасақталған агрегаттар үшін негізгі отынды жағу мақсатында кішігірім жалын тудыратын бастапқы отын ретінде қолданылады. Қазандардың көлемі пайдаланылу аясына байланысты түрленеді: жылу жүктемесі 10 ГДж/сағ кем болатын коммерциялық қондырғылардан бастап жылу жүктемесі шамамен 10-нан 250 ГДж/сағ дейін болатын өнеркәсіптік қондырғыларға және жүктемесі 250 ГДж/сағ жоғары бағаланатын тұрмыстық қазандарға дейін болады, бұл туралы 8-тарауда толық талқыланады.

4.2.5.1 Ыстық жіберу құбырының конструкциясы. Ыстық жіберетін құбырлары бар қазандарда газ түріндегі, сұйық немесе қатты отынды жағу барысында қалыптасатын ыстық жану өнімдері құбырлар арқылы өтеді, ал бу құбыраралық кеңістікте қазанды қуаттандыруға арналған судан өндіріледі. Ыстық жіберетін құбырлары бар қазандар көп жағдайларда салыстырмалы түрде кішігірім, 12 000 кг/сағ дейінгі бу өнімділігі үшін және 18 барға дейінгі будың төмен немесе орташа қысымында пайдаланылады. Ыстық жіберетін құбырлары бар қазандардың көбі көлемінің кішкентай болуына байланысты «жиналмалы блоктар» ретінде ұсынылады және бұл ретте жұмсалатын шығындардың үнемделуіне қол жеткізіледі.

4.2.5.2 Су құбырларының конструкциясы. Су құбырлары бар шектен артық қысымды қазандарда қазанды қуаттандыруға арналған су құбырлар арқылы ағады, ол құбырларда судың белгілі бір көлемі фазасын өзгертеді және бу бөлуге арналған қазанның ағын барабанына түседі. Қажетті жылу жану өнімдерімен құбырлардың сыртында өндіріледі. Бұл қазандар бу ағынының жылдамдығы мен оның қысымы ірі габаритті және энергетикалық қазандардағыдай, жоғары болған жағдайларда пайдаланылады. Сонымен қатар бұл қазандардың көбі олар майда және/немесе газда жұмыс істейтін жағдайларда буып-түйіледі,

ал қатты отынмен жұмыс істейтін буып-түйілген агрегаттар сирек кездеседі. Су құбырлы қазандарына радиациялық секциялар кіреді, олардағы құбырлар өзінің бүкіл жылулығын жандырылатын отынның жалыны есебінен алады, оның артынан салқындау конвекциялық секциясы орналасады, ол жерде жылу берілім конвекция есебінен жүзеге асырылады. Радиациялық секциядағы құбырлар отқа төзімді қабырғаларының бойымен тік немесе көлденең орналасқан, бірақ олар оқшаулаудан түтіктің қабырғаларының біркелкі температурасын қолдау мақсатында сәулелену энергиясы құбырлардың артқы жағындағы бөлігіне шағылысатындай арақашықтықта орналасуы керек. Конвекциялық секциядағы құбырлар жетілдірілген жылу берілімді қамтамасыз ету үшін әдетте қатпарлы болады, тек конвекциялық секцияның төменгі бөліміндегі құбырлардың алғашқы бірнеше қатарлары қатпарлы болмайды, өйткені олар жалынның көп мөлшерлі әсеріне тап болады. Бұл құбырлар конвекциялық секциядағы басқа құбырларды сәулелену әсерінен қорғау мақсатында экрандауды қамтамасыз етеді. Үлкен қазандар жасанды тарту күші бар желдеткіштермен және тартпа желдеткіштермен жабдықталған. Жағу ауасы жасанды тарту күші бар желдеткіштермен қазанға айдалады, ал тартпа желдеткіш түтіндік газдар ағынының түтіндік құбырға келіп түсуіне ықпал етеді, бұл ретте желдеткіштердің көлемдері қазанның ішіндегі қысым атмосфералық қысымға (қауіпсіздік шаралары ретінде ағып шығатын ыстық газдардың әсерін болдырмау үшін кішігірім вакуум) жақын (ұқсас) болатындай іріктеледі.

Тікелей қыздыратын қыздырғыштардың конструкциясы су құбырлы қазандардың конструкциясына ұқсайды, тек қызыдырылуға тиісті технологиялық сұйықтық оларда құбырлар арқылы ағады.

Пештердің конструкциялары олардың атқарымдық қызметіне, берілетін жылу энергиясының мөлшеріне (қыздыру режимі), отынның түріне және жағуға арналған ауаны беру тәсіліне байланысты түрленеді. Жанарғылар камераларда орналастырылады, олар құбырлардың белгілі бір жиынтығын қыздырады және олар еденде, қабырғада немесе төбеде (шатырда) орнатылуы мүмкін. Тік цилиндрлік пештегі жанарғылар еденінде орнатылған және жоғары көтеріледі. Отын ретінде әдетте табиғи газ немесе мазут қолданылады.

ӘДЕБИЕТ

- Avallone E, Baumeister T, Sadegh A, editors. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 11th ed. New York: McGraw-Hill; 2006.
- Bromley LA, Leroy NR, Robbers JA. Heat transfer in forced convection film boiling. *Ind Eng Chem* 1953;44(12):2639-2646.
- Churchill SW, Chu HH. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *Int J Heat Mass Transf* 1975;18(9):1049-1053.
- Colburn AP. A method of correlating forced convection heat transfer data and a comparison with fluid friction. *Trans Am Inst Chem Eng* 1933;29:174.
- Drew TB, Hottel HC, McAdams WH. Heat transmission. *Trans Am Inst Chem Eng* 1936;32:271.
- Green DW, editor. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill; 2007.
- Gulley DL. How to calculate weighted MTD's. *Hydrocarb Process* 1966;45(6):116-122.
- Incropera FP, DeWitt DP. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1996.
- Jacob M. Heat transfer in evaporation and condensation. *Mech Eng* 1936;58:643-729.
- Jakob M, Hawkins GA. *Elements of Heat Transfer*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1957.
- Kandlikar SG. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes. *J Heat Transf* 1990;112(1):219-228.
- Kern DQ. *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill; 1950.
- McAdams WH. *Heat Transmission*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill; 1942.
- Morgan VT. The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders. *Adv Heat Transf* 1975;11:199-264.
- Palen JW, Small W. A new way to design kettle and internal reboilers. *Hydrocarb Process* 1964;46(11):199-208.
- Tubular Exchanger Manufacturers Association. *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association*. 9th ed. New York: Tubular Exchanger Manufacturers Association; 2007.
- Zukauskas A. Heat transfer from tubes in cross-flow. *Adv Heat Transf* 1987;18:87.

5

Масса алмасу аппараттары және химиялық реакторлар

5.1 МАССА ТАСЫМАЛДАУ НЕГІЗДЕРІ

Массаны тасымалдау энергияны бірлесіп өндіру қондырғылары, сондай-ақ «лас отынды» немесе жылу қозғалтқыштарын пайдаланатын электр станциялары сияқты түрлендіру қондырғыларында маңызды рөл атқарады. Синтез-газды күкіртті тазарту (бірлескен өндіріс қондырғылары) сияқты сұйық еріткіштермен немесе реагенттермен жууды көздейтін газды тазарту жөніндегі операцияларға немесе оттық газды («лас» отынмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғылар) тазарту жөніндегі операцияларға газдан сұйықтыққа массаны тасымалдау үдерісіне (осы жағдайда ластаушы зат) қатысады. Басқа мысал ретінде қондырғының жылуын бұру үшін қолданылатын градирня болып табылады, онда қондырғыда қыздырғаннан кейін салқындатқыш үшін су қоршаған ауамен өзара әрекеттескен кезде салқындайды. Салқындатқыш судың бір бөлігі ауаға буланады. Газ-сұйықтықты масса берілісіне қарағанда, басқа фазалар арасындағы массаны тасымалдау да өнеркәсіптік мәнге ие. Сұйықтық-сұйықтық массалық берілісі экстракция үдерістерінде қолданылады, осыған этанолды дегидратациялау мысал ретінде қызмет етеді, алайда қазіргі уақытта этанолды дегидратациялауды адсорбцияны қолдану арқылы жүзеге асырады, ол сұйықтық пен қатты заттың қатысуымен масса алмасу үдерісі болып табылады. Адсорбция газдарды құрғату кезінде, сондай-ақ H_2 синтез-газдан, ауаны бөлудің кішігірім жүйелерінде O_2 ауадан бөліп шығару және газдан да, сұйықтықтан да ластануды жою кезінде қолданылады. Мысалы, табиғи газдың десульфурациясы белсендірілген көмір бөлшектерін пайдалана отырып жүзеге асырылады. Биомассаны, мысалы, ағашты кептіру массаны (және жылуды) тасымалдау үдерісі болып табылады, бұл кезде сүректегі су соңғы сатыда бу фазасына көшіріледі. Сондай-ақ массаны тасымалдау гетерогенді химиялық реакцияларда маңызды рөл атқарады.

Жұмыс жағдайына байланысты каталитикалық реакторлардағы реактордың өлшемдері **реакция кинетикасы** немесе массаны тасымалдау, не болмаса олардың үйлесімі арқылы бақылануы мүмкін. Массаны тасымалдау реагенттерді бірге жинауға, содан кейін процесті жалғастыру мақсатында жаңа реагенттерге арналған орынды босату үшін реакция аймағынан өнімдерді алып тастауға мүмкіндік береді.

Сұйықтықтардың ішінде массаны тасымалдау үдерісінің екі түрі бар: диффузиялық массаны тасымалдау немесе молекулалық диффузия (сұйықтықтар қозғалмайтын жағдайда немесе ламинарлық ағында болғанда өтеді), және сұйықтықтар турбуленттік ағында болғанда өтетін конвективті массаны тасымалдау. Ағаш сүрегін кептіру жағдайында диффузиялық механизм жасушалық қабырға арқылы байланысқан судың көшуіне қатысады. Оттық газы сияқты кептіру ортасы пайдаланылатын ағаш сүрекке арналған өнеркәсіптік кептіргіште, конвективті механизм оттық газ фазасындағы ылғалдың сыртқы масса тасымалдауын жүзеге асырады.

Химиялық әлеует массаны тасымалдаудың шынайы қозғаушы күші болып табылады, бірақ осы қозғаушы күшті ұсыну үшін мінсіз сұйықтықтарға арналған концентрация және шартты газдарға арналған парциалды қысым қолданылуы мүмкін. **Адсорбенттер** үшін қозғаушы күш масса тасымалданудың қатты денеден сұйықтыққа қарай бағытталған кезінде қатты бетінде іске көшкен белсенді орталықтардың (адсорбция өтетін жерде) үлесі ретінде қабылдануы мүмкін. Бұл ретте масса тасымалдану сұйықтықтан қатты денеге қарай бағытталған кезде концентрациядағы белсенді учаскенің үлесі қатты бетте бос жатады. Сонымен қатар масса тасымалдау жылдамдығына әсер ететін материал мен жұмыс шарттарының бірнеше қасиеті бар, ал газ-сұйықтықты масса тасымалдау кезінде диффузия коэффициенті, тұтқырлығы, массалық тығыздығы, беттік керілуі және сұйықтықтың жылдамдығы сияқты қасиеттер бар. Массаны тасымалдау жылдамдығына әсер ететін басқа маңызды факторлар қол жетімді сұйықтықтың бөліну ауданы және бір сұйықтықтың басқасына таралу дәрежесі болып табылады. Екі араласпайтын сұйықтықтар арасындағы масса тасымалдау кезінде массаны тасымалдау ауданын ағынның арнасына тығыздауды қосу жолымен ұлғайтуға болады, ал дисперсия дәрежесі араластыру немесе барботаждау жолымен (газ жағдайында) ұлғайтылуы мүмкін. Сұйықтық пен қатты дене арасындағы массаны тасымалдау кезінде беру жылдамдығы қатты бөлшектердің мөлшерін азайту есебінен ұлғайтылуы мүмкін, және бұл кеуектер ішіндегі беткі қабаттың көлемін ұлғайту, яғни қатты заттың беткі жағындағы көп бөлігі шоғырланатын жоғары кеуекті затқа болып айналуы есебінен аса маңызды.

Осы тараудың мақсаты – массаны тасымалдаудың негізгі теңдеуіне кіріспе, одан кейін массаны тасымалдаудың негізгі типтерін жобалаудың негізгі әдістері, сондай-ақ осындай жүйелерді талдау және жобалау үшін маңызды болатын, энергияны түрлендіру қондырғыларында кездесетін реакторлар жүреді. Осы тақырып бойынша толығырақ ақпаратты «*Mass Transfer Operations*» (Treybal, 1980 ж), «*Separation Processes*» (King, 2013 ж), «*Chemical Reaction Engineering*» (Levenspiel, 1972 ж) және «*Chemical and Catalytic Reaction Engineering*» (Carberry, 1976 ж) сияқты кітаптардан табуға болады.

5.1.1 Молекулалық диффузия

Молекулалық диффузия молекулалардың жоғары концентрация аймағынан едәуір төмен концентрация аймағына көшірілетін кездейсоқ шарлау үдерісімен реттеледі және де жекелеген молекулалардың осындай диффузиясы молекулалардың тасымалданатын қозғалысына себепші болады. Жылу алмасуға ұқсас молекулалық диффузияның тұрақты жай-күйінің анықтаушы теңдеуі – қоспаның орташа молярлық жылдамдығымен қозғалатын декартты координаттардағы бір өлшемді ағынға арналған Фиктің бірінші заңы болып табылады:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} = -C_{\text{жалпы}} D_{AB} \frac{dy_A}{dz} \quad (5.1)$$

Мұндағы J_A – диффузия бағытына немесе B ортасына диффузияланушы ауданның бірлігіне A компонентінің молярлық ағынына перпендикуляр ауданның бірлігіне ағынның молярлық жылдамдығын білдіреді, D_{AB} – 5.1-теңдеуде көрсетілген басқа айнымалылар үшін пайдаланылатын бірліктерге тәуелді болатын диффузия коэффициенті немесе диффузия деп аталатын қос жүйенің физикалық қасиеті, C_A – A компонентінің молярлық концентрациясы, $C_{\text{жалпы}}$ – қоспаның (жалпы) молярлық концентрациясы, y_A – A компонентінің мольдік үлесі, ал z – диффузия бағытына бойлай ұзындық. Әр түрлі екілік есептеу жүйелерінің диффузия коэффициентін «*Полинг және қосавт.*» (2001) кітабында, диффузия коэффициентін бағалау әдістерімен қатар табуға болады. Инженер-химик Перри анықтамалығында (*Perry's Chemical Engineers' Handbook*, Green, 2007) диффузия коэффициентін бағалау әдістері сипатталған. Ол температураға байланысты өзгереді, ал қысымдағы газдарда қажетті шарттар жиынтығының мәнін түзету үшін корреляциялар болады. Көп компонентті қоспалардағы диффузия кезінде диффузиялық компоненттің және әрбір басқа түрдегі **диффузияның бинарлы коэффициенттері** негізінде анықталатын тиімді диффузия коэффициенті қолданылады. A компонентінің мольдік үлесі жағдайындағы

тұрақты координаттар үшін 5.1 теңдеуінің эквивалентті формасы:

$$N_A = -C_{\text{жалпы}} D_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A (N_A + N_B) \quad (5.2)$$

Мұндағы N_A және N_B – тұрақты координаталарға қатысты A және B компоненттерінің молярлық ағындары. 5.2 теңдеудің оң жағындағы екінші қосындысы таза молярлық көлемді ағынмен байланысты.

Бір бағыттағы тұрақты диффузия және δ қалыңдығына арналған концентрацияны бөлудің сызықтық профилдерін қабылдау кезінде 5.2 теңдеуін келесідей жазуға болады:

$$N_A = \frac{C_{\text{жалпы}} D_{AB}}{\delta} \Delta y_A + y_A (N_A + N_B) \quad (5.3)$$

мұндағы Δy_A – δ қалыңдығы бойынша A компонентінің мольдік үлесін өзгерту.

5.1.2 Конвективті тасымалдау

Өнеркәсіптік үдерістерде, оның ішінде газ (бу) сұйықтықпен жанасу кезінде масса тасымалдау механизміне еритін газдың (CO_2) бөлшектері будан сұйық фазаға өтетін декарбонизирлеуші скруббердегі синтез-газ секілді конвективтік тасымалдау кіреді. Бу-сұйықтықты үстіңгі беті арқылы буды тасымалдау үстіңгі беттің әр жағында болатын іркіліс булары мен сұйық пленкалары арқылы өтуі мүмкін. Массаны тасымалдау кедергісі, негізінен, осы іркіліс пленкаларымен бақыланады. Шын мәнінде, бу-сұйықтықты үстіңгі бетінің шекарасы масса тасымалдау кедергісін қамтамасыз етпейді, ал көлемді будан іркілген бу пленкасына, содан кейін іркілген сұйық пленкадан көлемді сұйықтыққа тасымалдау механизмі құйындармен жүзеге асырылады және тиісті тасымалдау үдерістері әлдеқайда жылдамырақ өтеді. Пленкалар іркілген болғандықтан, пленка ішінде массаны тасымалдау механизмі диффузиялық және тұрақты күйде болып табылады, 5.3 теңдеуі ретінде әрбір пленкаға тасымалдау үдерісіне келесідей қолданылуы мүмкін:

$$N_A = k_V (y_A - y_A^{\text{int}}) + y_A (N_A + N_B) = k_L (x_A^{\text{int}} - x_A) + x_A (N_A + N_B) \quad (5.4)$$

Мұндағы $k_V = (C_{\text{жалпы},V} D_{AB} \delta_V)$ және $k_L = (C_{\text{жалпы},L} D_{AB} \delta_L)$ бу және сұйық пленкаларға арналған және газ бен сұйықтық массасын тасымалдау коэффициенттері деп аталады, y_A және x_A – бу және сұйық фазалардағы A компонентінің көлемдік концентрациясы, ал y_A^{int} және x_A^{int} – үстіңгі бет шекарасындағы тиісті концентрациялар. Масса тасымалдау коэффициенттерінің басқа формасы, $k_{C,V}$ және $k_{C,L}$ концентрациялар негізінде пайдаланылады және келесідей анықталады:

$$N_A = C_{\text{жалпы},V} k_{C,V} (y_A - y_A^{\text{int}}) + y_A (N_A + N_B) = C_{\text{жалпы},L} k_{C,L} (x_A^{\text{int}} - x_A) + x_A (N_A + N_B) \quad (5.5)$$

5.1.3. Адсорбция

Сұйық-қатты адсорбент жүйесінде адсорбция құбылысы молекулаларды қатты беттермен байланыстырудан тұрады. Абсорбция кезінде сіңірілетін бөлшектер ерітіндіні түзе отырып, абсорбциялаушы фазаға кіреді (абсорбциялау), бұл ретте абсорбциялаушы фазаның барлық көлемі қатысады, ал адсорбция адсорбенттің үстіңгі бетімен шектелген. Сұйық компоненттің табиғатына және қатты бетіне байланысты адсорбция кезінде байланыстыру әлсіз ван-дер-ваальстік күштерден (физикалық сорбция) немесе коваленттік байланыстан (хемосорбция) немесе электростатикалық тартылудан болуы мүмкін. Әдетте адсорбция әлсіз және керісінше, температураның жоғарылауы немесе адсорбцияланған бөлшектердің парциалды қысымының төмендеуі адсорбцияланғанның санын азайтады. Осылайша, шикізат ағынынан жеке ағын түрінде адсорбцияланған бөлшектерді босату кезінде адсорбенттің регенерациясы температураны ұлғайту жолымен жетуі мүмкін және

осы жағдайда үдеріс температураның өзгеруімен адсорбция немесе парциалды қысымды төмендету жолымен, яғни қысым тербелісінің адсорбциясы деп аталады. Бұл беткейлік құбылыс болғандықтан, жақсы адсорбенттің активтендірілген көмір сияқты әдеттегі өнеркәсіптік адсорбенттер жағдайында адсорбент массасының бірлігіне қол жетімді өте жоғары беттік ауданы болуы тиіс. Оның бетінің көп бөлігі кеуектермен жабылған (әдетте үстіңгі бетінен микроскопиялық кеуектерден қатты бұтақтың ішкі бөлігіне дейінгі бірнеше макроскопиялық кеуектермен). Химиялық реакциялардың катализаторларында беттік құбылыстар, реагенттердің адсорбциясы және өнімдердің десорбциясы бар, ал химиялық реакторға қажетті катализатордың саны оның ішкі бетін, яғни кеуектер ішінде ұлғайту жолымен едәуір азайтылуы мүмкін.

5.6 теңдеуімен көрсетілген жартылай эмпирикалық моделін Ленгмюр шығарды және оның қарапайымдылығына және көптеген жүйелер үшін қолданылуына байланысты кеңінен қолданылады.

$$\theta = \frac{KC_i}{1 + KC_i} \quad (5.6)$$

Мұндағы θ тепе-теңдікте адсорбцияланған молекулалармен жабылған үстіңгі беті учаскелерінің үлесін білдіреді, K – адсорбаттың және адсорбенттің осы жүйесі үшін температура функциясы болып табылатын коэффициент, ал C_i – сұйықтықта i адсорбаттың молярлық концентрациясын (немесе шартты газ жағдайында парциалды қысым) білдіреді. Модель адсорбцияның барлық учаскелері эквивалентті деген болжамдарға негізделген, әрбір учаске басқа адсорбцияланған молекулалармен өзара әрекеттеспейтін және фазалық өтпелерге ұшырамайтын бір ғана молекуланы сыйдыра алады, үстіңгі беті біртекті болып табылады және адсорбцияның ең жоғары деңгейінде тек моноқабат түзіледі. Егер адсорбция жылдамдығы C_i қозғаушы күшіне және адсорбцияға қолжетімді үстіңгі бет учаскелерінің үлесіне $(1 - \theta)$ пропорционалды, ал десорбция жылдамдығы үстіңгі беттің (θ) бос емес учаскелері үлесіне пропорционалды деп болжамдасақ, онда 5.6 теңдеуін шығаруға болады. Тепе-тең күйде, себебі адсорбция жылдамдығы = десорбция жылдамдығы:

$$k_{\text{адсорб}} C_i (1 - \theta) = k_{\text{десорб}} \theta \quad (5.7)$$

Мұндағы $k_{\text{адсорб}}$ және $k_{\text{десорб}}$ жылдамдық тұрақтысы болып табылады. Кейін $k_{\text{адсорб}} / k_{\text{десорб}}$ шамаларын 5.7 теңдеуіне K -ға ауыстырып және қайта топтастырып, адсорбенттің санын анықтау үшін пайдалануға болатын 5.6 теңдеуін аламыз, бұл осы тараудағы «Сұйық-қатты жүйелер» бөлімінде төменде келтіріледі. Басқа модельдер осы жорамалдардың кез келгеніне жол берілмейтін жүйелер үшін әзірленген, мысалы, 5.8 теңдеумен берілген Ленгмюр-Фрейндлих моделі, мұндағы ξ – әртекстілік индексі (немесе шарасы) және адсорбцияланған молекулалар шынымен көп қабаттылықты құрайтын жүйелерге арналған BET моделі (Брунауэр және қос авт., 1938ж).

$$\theta = \frac{KC_i^\xi}{1 + KC_i^\xi} \quad (5.8)$$

5.2 ГАЗ-СҰЙЫҚТЫҚТЫ ЖҮЙЕЛЕР

5.2.1 Масса тасымалдау түрлері

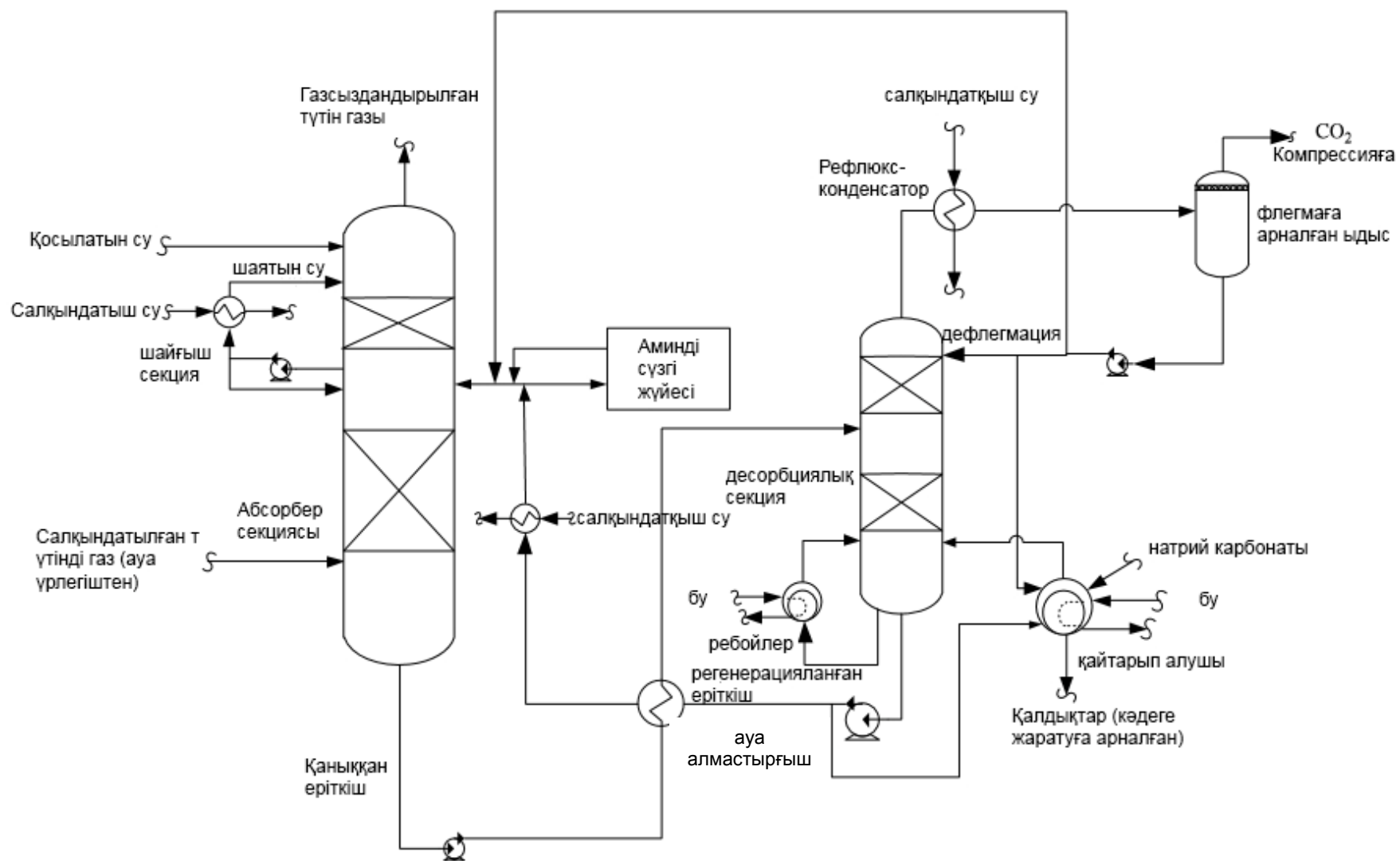
5.2.1.1 Абсорбция. Газды сіңіру компонентті немесе компоненттерді газ фазасынан сұйық фазаға ауыстыру болып табылады. Газ сұйықтықта газ қоспасының бір немесе бірнеше компоненттерін еріту үшін сұйықтықпен байланысады. Абсорбция үдерісі әдетте ыдыста жоғарыдан енгізілетін сұйықтықпен және төменнен енгізілетін бумен бағана түрінде орындалады, бұл ретте сұйықтық ауырлық күшінің әсерінен төмен қарай ағады. Бағана, осы

тарауда бұдан әрі сипатталғандай, екі фаза арасындағы тасымалдау массасына қолжетімді үстіңгі беттің ауданын ұлғайту үшін ішкі элементтермен жабдықталған. Араластырылатын ыдыстар, сондай-ақ газдың сұйықтыққа қатынасы төмен болған жағдайда немесе сұйықтықтың құрамында катализатор сияқты өлшенген қатты зат, немесе ферментация үдерісіндегі (мысалы, C_2H_5OH алу үшін) микроорганизм болған жағдайда, газды абсорбциялау үдерісі үшін пайдаланылады.

Газ араластырылатын ыдыстағы сұйықтық арқылы көпіршіктер түрінде ыдырайды. Араластырғышы бар ыдыстарды пайдаланудың мысалы түтін газдарын десульфурациялау үдерісінде пайда болатын $CaSO_3$ кедеге жарату үшін немесе құрғақ қабырғаларды қалау кезінде неғұрлым тұрақты болатын тұрақты $CaSO_4$ (гипс) дейін тотығуы. Осы үдеріс таза физикалық үдеріс болмаса да, химиялық реакция болғандықтан, массаны тасымалдау өте маңызды рөл атқарады, себебі реагенттерді біріктірудің қажеттілігі бар. Компоненттердің түріне және сұйықтық пен газдың арақатынасына байланысты жұтқан кезде бөлінетін жылу (ерітіндінің жылуы) сұйық фазаның температурасын арттыру үшін және сіңіргішті жобалау кезінде айтарлықтай маңызды болуы мүмкін. Сонымен қатар артық салқындату пайда болуы мүмкін, онда бағанаға салынған немесе сыртқы жылу алмастырғышқа орнатылған салқындатқыш жылан суытылады, содан кейін абсорбция үдерісін жалғастыру үшін бағанаға қайта енгізіледі.

Газ абсорбциясының мысалы ретінде 5.1-суретте көрсетілгендей, *Selexol*™ еріткішін қолданумен синтез-газды десульфурация және / немесе декарбонизация болып табылады (*Palla, 2009ж*). Осы үдеріс 9-тарауда сипатталған, бірақ қазіргі уақытта кезең-кезеңмен көрсетілген екі абсорберді байқауға болады, бірі синтез-газды десульфурациялау үшін, ал екіншісі синтез-газды көміртексіздендіру үшін (синтез-газ ылғалдандыру және алдын ала қыздыру сияқты одан әрі өңдеуден кейін 9-тарауда сипатталған кешенді газдандырудың құрамдастырылған циклы ретінде турбинаның газында жағылуы мүмкін). Газ бірінші абсорберде көбінесе H_2S -ті сұйық фазаға көшіру үшін және екінші абсорберде CO_2 -ні сұйық фазаға көшіру үшін, полиэтиленгликольдің диметил эфирлері қоспасынан тұратын еріткіші бар қарсы ағынмен байланысады. Газ абсорбциясының басқа, мысалы, 5.2-суретте көрсетілгендей, көмір қазандығындағы түтін газдарын декарбонизациялау болып табылады (*Реди және қосавт., 2008ж.*), мұнда оттық газ CO_2 -ні сұйық фазаға беру үшін сулы моноэтаноламиннен (МЭА) тұратын еріткішпен байланысады. Осы үдеріс 8-тарауда сипатталған, бірақ қазіргі уақытта бағанада бірізді орналасқан екі секцияны бақылау жеткілікті: біреуі CO_2 жұту үшін, ал екіншісі атмосфераға түсер алдында түтін газын жуу үшін қолданылады. Осы екінші секция түтін газынан сұйық амин тамшысын жуумен қатар су фазасына ластаушы буларды жұтуы мүмкін.

5.2.1.2. Стриппинг. Стриппинг сұйық фазада ерітілген компонентті немесе компоненттерді газ фазасына көшіруді қамтитын кері абсорбцияны білдіреді. Сұйықтық бумен немесе газбен сұйық фазадан алынған компоненттерден алынғанына байланысты N_2 сияқты), сұйық фазада бір немесе бірнеше компоненттерді бу фазасына ауыстыру артықшылығымен байланысады. Десорбция үдерісі әдетте жоғарыдан енгізілетін сұйықтықпен және төменнен енгізілетін десорбентпен (бумен немесе газбен) бағанада орындалады, бұл ретте сұйықтық ауырлық күшінің әсерінен төмен қарай ағады. Десорбер ретінде бу пайдаланылса, оның бір бөлігі бағана бойынша жоғары жылжу шамасына қарай конденсацияланады, оны бөлу немесе десорбциялау үшін қажетті жылуды қамтамасыз етеді. Осындай жұмыс түрінің мысалы 5.1-суретте көрсетілгендей, *Selexol*™ еріткішін пайдалана отырып, синтез-газды бұдан бұрын аталған десульфурациялаумен және/немесе декарбонизациялаумен немесе 5.2-суретте көрсетілген амин үдерісін пайдалана отырып, түтін газдарын декарбонизациялаумен байланысты. Абсорберден бөлінетін қаныққан еріткіш ерітілген газдарды (H_2S және/немесе CO_2) бу фазасына тасымалдау үшін будың көмегімен босатылады және осылайша еріткішті абсорбция үдерісінде қайта пайдалану мүмкіндігі үшін регенерациялайды. Стриппинг үдерісінің тағы бір мысалы, газдандыру қондырғысында пайда болатын NH_3 және H_2S сияқты ластаушы заттарды ағынды («қышқыл») судан алып тастау болып табылады.



5.2-сурет. Түтін газдарын көмірсіздендіру үдерісі

Егер бу десорбер ретінде әрекет етсе, онда ішінде судың булануы үшін ерітілген (технологиялық бу конденсациясы нәтижесінде пайда болған) суы бар еріткіш қыздырылатын, ребойлер (4-тарауда сипатталған жылу алмастырғыш типі) пайдаланылады және осылайша, синтез-газды өңдеу үшін *Selexol*TM үдерісінде, сондай-ақ түтін газдарын өңдеу үшін амин үдерісінде жасалғандай технологиялық бу генерацияланады не болмаса қышқыл суы бар буланған бағанада секілді «тірі» бу бағанаға шашырайды. Осындай екінші нұсқа ребойлер (агрессивті ортада жұмыс істейтін) болуына қатысты шығындарды болдырмайды, бірақ бу генерациясына арналған қазандық суын (енді тазартылған судың бір бөлігіне айналады) қамтамасыз ету үшін өңдеу шығындары ымыралы шешімді таңдау мақсатындағы талдау кезінде ескерілуі тиіс. Бағананың жоғарғы бөлігінен шығатын, сұйық фазадан бөлінген бу мен компоненттерден тұратын бу ағыны кейіннен «флегма» түрінде бағананың жоғарғы бөлігіне қайта енгізілетін бу мен кез келген буланған еріткіштің конденсациясына арналған конденсаторда¹ (құбырлар арқылы өтетін салқындатқыш су сияқты, салқындатқыш ортасы бар көлденең қаптамалы жылу алмастырғыш немесе ауаны салқындатқыш жылу алмастырғышы) салқындатылады. Конденсатордан шығатын бу ағынындағы ылғал мөлшері оның температурасы мен қысымына байланысты. Конденсатор ішінара конденсатор бола алады және осы жағдайда сұйықтық ағыны флегма ретінде бағанаға қайтарылады, ал бу ағыны дистилляция өнімін құрайды. Жалпы конденсатор жағдайында сұйықтық ағынының бір бөлігі флегма түрінде қайтарылады, ал қалған сұйықтық дистилляция өнімін құрайды.

5.2.1.3. Дистилляция. Дистилляция компоненттердің салыстырмалы ұшу айырмашылығы негізінде компонентті немесе компоненттерді сұйық қоспадан бөлу үшін абсорбцияны да, стриппингті де біріктіреді. Дистилляцияның үздіксіз «бір сатылы» үдерісін қарастырайық, онда екілік сұйық қоспа (екі компоненттің қоспасы) сұйықтықтың булану үшін қыздырмайтын бөлігіне түседі. Қыздыру біркелкі, әрбір фазасы жақсы араластырған және екі фазаның арасындағы тепе-теңдік үшін жеткілікті уақыт бар жағдайды болжамдайық. Көптеген жағдайларда (кейінірек талқыланатын азеотропты қоспалардан басқа) сұйық фазасы бар тепе-теңдікте тұрған бу фазасы одан да жоғары ұшатын компоненттің едәуір жоғары концентрациясын құрайтын болады, ал сұйық фаза кіретін сұйық қоспамен салыстырғанда ұшатын компоненттен анағұрлым аз болады. Осылайша, сұйықтықтың бөлігін ішінара буландыру арқылы екі ағынды алуға болады: одан да жоғары ұшатын компонентпен байытылған бу фазасы және аз ұшатын компонентпен байытылған сұйық фаза, және де бұл бөлінудің өтуіне жол беретін булы фаза мен сұйық фазаның құрамындағы айырмашылық болып табылады. Екілік (i және j компоненттерінің, мұндағы i компоненті одан да жоғары ұшатын болып табылады) қоспа үшін берілген температура мен қысымда α_{ij} салыстырмалы ұшпалылығы келесідей анықталады:

$$\alpha_{ij} = \frac{(y_i/x_i)}{(y_j/x_j)} = \frac{K_i}{K_j} \quad 5.9)$$

Мұндағы бу және сұйық фазалардың тепе-тең молярлық үлестері y^s және x^s ретінде ұсынылған, сол арада K^s бу-сұйықтықтың таралу қатынасы ретінде белгілі немесе кейде оларды жай ғана « K мәндері» деп атайды. Осылайша, ұшпалылықтың салыстырмалы шамасы жоғары (бірліктен көп) болған сайын дистилляциямен бөлу өткізуге оңайырақ болады.

Дистилляцияның жоғарыда аталған бір фазалы үдерісі 5.3-суретте көрсетілгендей, тепе-теңдік сатыларының қатары болған кезде көп фазалы үдеріске айналуы мүмкін, сондықтан бөлудің жоғары дәрежесіне қол жеткізуге болады. Осындай көп сатылы дистилляция бағанада жүргізіледі, онда төменгі секция десорбер функциясын атқарады, ал

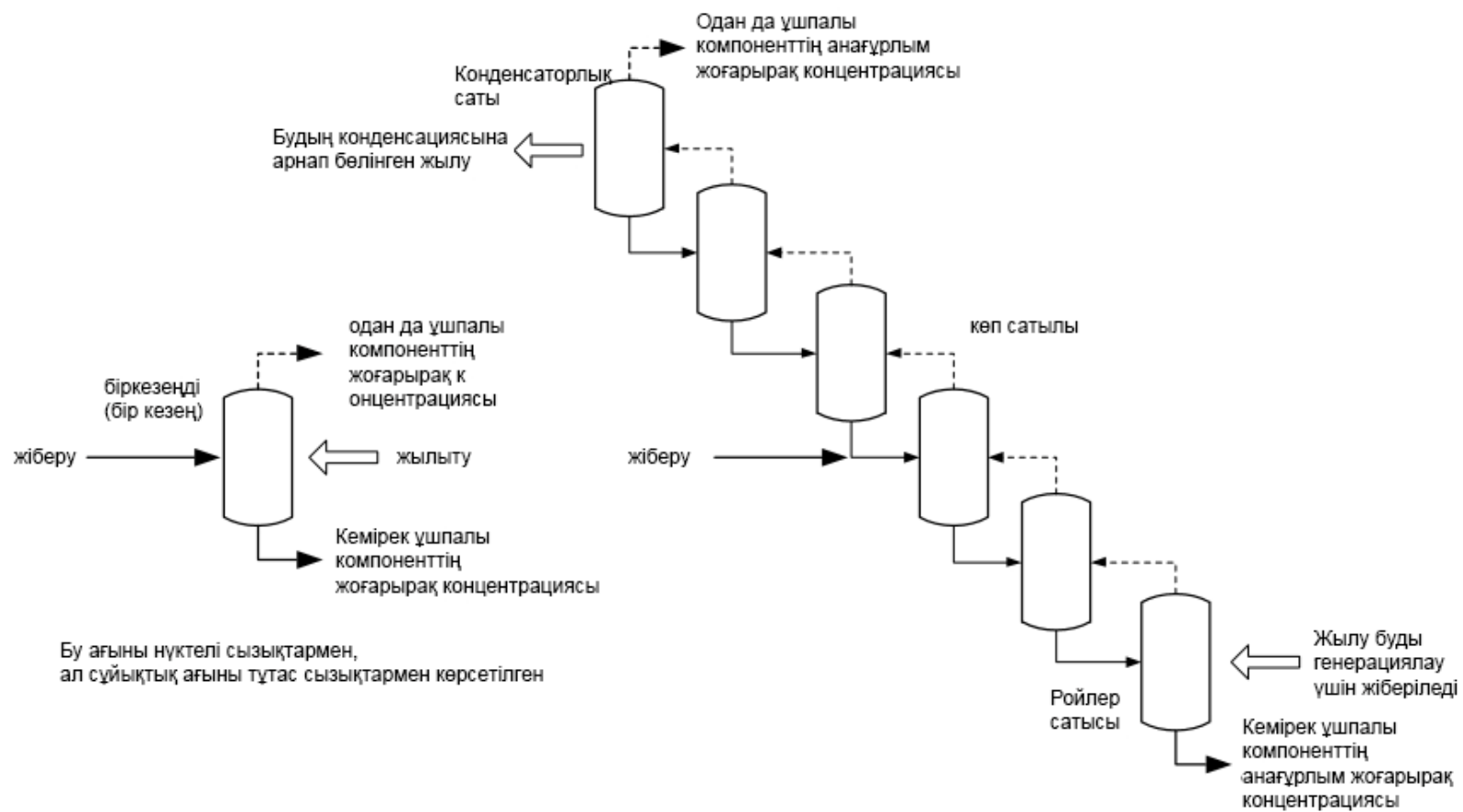
¹ Қышқыл су десорбері жағдайында артықшылық сұйықтықтың жоғарғы бөлігінің (жоғарғы тарелкадан шығатын буды салқындатудың орнына) жанында тәрелкеден (науадан) алыстатылатыны, оны суытып, одан кейін будың ағынын тікелей байланыспен салқындату үшін бағананың жоғарғы бөлігіне қайта беру, оны бу бағанадан кеткенге дейін тазарту болып табылады. Конфигурацияның осындай түрі конденсатордың тұздардың шөгуінен ластануын болдырмауға мүмкіндік береді.

жоғарғы секция байыту немесе ректификациялау секциясының функциясын орындайды. Осыдан бұрын сипатталғандай, бағаналарда жүргізілетін абсорбция және десорбция үдерістері тепе-теңдіктің көптеген сатыларынан тұратындар сияқты визуализациялануы мүмкін.

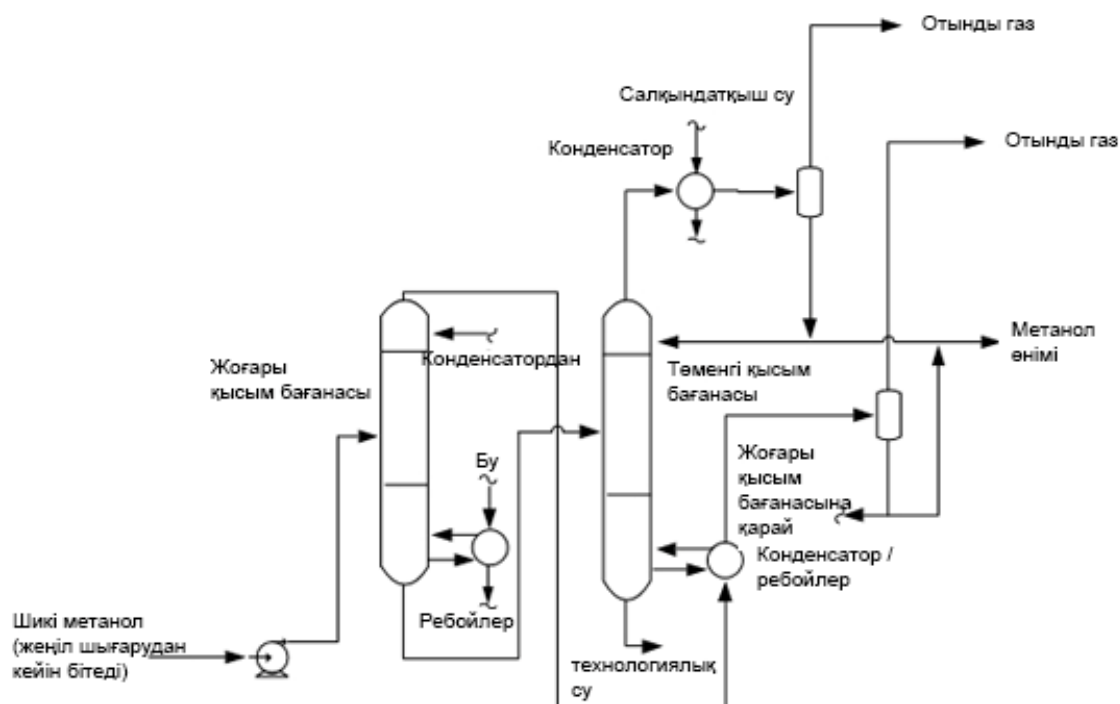
Дистилляциялық бағаналар үшін бөлуге қажетті энергияны қамтамасыз ету үшін ребойлерлер қажет, ал флегма конденсаторы жіберу бағананың ортаңғы бөлігіне енгізілгенде, массаны тасымалдау өтуі мақсатында бағананың жоғарғы бөлігіне сұйықтық (флегма) беру үшін пайдаланылады. Жоғарғы өнім немесе конденсатордан шығатын өнім «дистиллят» деп аталады, ал бағананың төменгі бөлігінен немесе ребойлерден шығатын өнім «кубты қалдық» деп аталады. Флегма ағыны дистиллят тазалығын арттыру үшін рециркуляциялық ағын ретінде жұмыс істейді.

5.2.1.4. Энергияны үнемдеу шаралары. Бағанаға беріліс ребойлердің жылу жүктемесін азайту және беріліс орнындағы бағана ішіндегі температураға сәйкес келтіру мақсатында қызуы мүмкін. Бағанаға қайнау нүктесінен төмен салқындатылған сұйықтық түрінде (алдыңғы тарауда көрсетілгендей, сұйық қоспаның қайнау нүктесі – бұл сұйықтық жаңадан булана бастайтын нүкте, және бұл бір компонентті сұйықтық үшін «қайнау нүктесінің» баламасы) немесе оның қайнау нүктесінде қаныққан сұйықтық түрінде, не екі фазалы қоспа түрінде, не болмаса конденсация нүктесінде² қаныққан бу түрінде (бу қоспасының конденсация нүктесі бу жаңадан конденсацияланатын нүкте болып табылады) немесе конденсация нүктесінен жоғары қыздырылған бу түрінде түсе алады. Беріліс бағанаға құрамы бағанадағы тиісті фазаның құрамына жақын болатындай етіп енгізіледі (берілістің орнын анықтау үшін сынамалар мен қателер процедурасы немесе бағалау әдісі қажет). 5.4-сурет өнімнің 10-тарауда сипатталатын ерекшеліктеріне сәйкес, метанолды тазалауға арналған метанолды дистилляциялау үдерісін көрсетеді. Дистилляция блогы одан да төмен қысымды бағана ребойлері үшін жылуды қамтамасыз ететін, одан да жоғары қысымды бағана конденсаторы бар екінші бағанаға қарағанда жоғарырақ қысым кезінде жұмыс істейтін, бағана қабырғасы үшін төмен қысымды жылуды қамтамасыз ететін бір бағанасы бар энергия үнемдейтін біріктірілген жылу ректификациялық бағаналардың жиынтығынан тұрады..

² Азеотропты емес қоспа үшін бу қоспасының конденсация нүктесінің температурасы осы құрам үшін сұйық қоспаның қайнау нүктесінің температурасына қарағанда жоғары, ал қайнау нүктесінің температурасының жеке компоненті жағдайында және конденсация нүктелері бірдей екенін атап өткен жөн. Азеотропты қоспа үшін конденсация нүктесінің температуралары мен қайнау температуралары белгілі бір құрамда бірдей болады.



5.3-сурет. Бір сатылы немесе көп сатылы дистилляция



5.4-СУРЕТ. Метанол дистилляциясы

Жоғары қысымды бағанадан шығатын жоғарғы погон буының конденсация нүктесі одан да жоғары жұмыс қысымы кезінде ұлғаяды. Енді конденсацияның жылуы төмен қысымды баған ребойлерінде конденсацияланатын бу мен қайнаған сұйықтық арасындағы тиісті температураның қозғаушы күші көмегімен берілуі мүмкін, одан да төменгі қысымда оның қайнау нүктесі төмен болады.

5.2.1.5 Тиімділік сатысы. Шынайы практикада әрбір сатыдан шығатын бу мен сұйықтықтар ағыны тепе-теңдікте болмайды, әсіресе жанасу уақытының жетіспеуі мен араласу дәрежесіне байланысты массаны тасымалдау қатынасында. Осылайша, осы бөлу үшін қажетті байланыс сатыларының нақты саны тепе-теңдік туралы жорамалдарды пайдаланумен есептелгеннен әлдеқайда жоғары болады. Жалпы тиімділік тепе-теңдік сатыларының дәл сол бөліну дәрежесіне жету үшін талап етілетін нақты сатыларға қатынасы ретінде анықталуы мүмкін.

Жеке науаның өнімділігі Мёрфи бойынша науаның ПӘК өлшенеді және компонент пен фазаға (сұйықтық немесе бу үшін) байланысты болады және егер тепе-теңдік басым болса, өзгеріске бөлінген кіріс және шығыс ағындары арасындағы нақты концентрациясының өзгеруі ретінде анықталады. Науалардың тиімділігіне ластануды, конструкцияның лайықты материалдарын таңдауды талап ететін коррозияны, көбіктенуді және алып кетуді қоса алғанда, сұйықтықты бумен жоғарыда көрсетілген сатыға кері тасымалдауға әкеліп соқтыратын бірқатар факторлар әсер етеді.

5.2.1.6. Азеотроптар. Жоғарыда айтылғандай, кейбір сұйық қоспалар (этанол мен судың екілік қоспасы сияқты) бу фазасында, сонымен қатар сұйық фазада бірдей құрамы бар қысымның мен құрамның белгілі бір жағдайларында азеотроптарды құрайды. Осындай жағдайларда бөліну дәрежесі тиісті азеотропты құраммен шектеледі және дистилляция үдерісінен кейін едәуір жоғары бөліну дәрежесіне жету үшін экстракция үдерісін немесе төменде сипатталған экстрактивті дистилляцияны пайдалануды ұстануға тиіс.

5.2.1.7 Экстракция. Осындай үдеріс шикізат ағынынан (құрамында i және j компоненттері бар) еріткіш ағынына негізінен i компонентін (ерітілген зат) беру үшін араласпайтын екі сұйықтықтың (шикізат пен еріткіш ағындары) байланысуынан құралады. Еріткіштің тиімділігі «селективтілігімен» өлшенеді, ол айдау кезіндегі салыстырмалы ұшқыштыққа ұқсас және келесідей анықталады:

$$\beta_{ij} = \frac{X_i \text{ Ерітінді шығысындағы } X_i \text{ немесе қысқартылған беріліс шығысындағы } / X_i \text{ сығындысы не тазартылған өнім}}{X_j \text{ Ерітінді шығысындағы } X_j \text{ немесе қысқартылған беріліс шығысындағы } / X_j \text{ сығындысы не тазартылған өнім}}$$

Мұндағы X_s – екі компоненттің тепе-теңдіктегі массалық үлесі. Осылайша, селективтіліктің жоғары мәні – жөнді болады. Еріткіштің басқа да қажетті сипаттамалары: уытты емес, жанбайтын және химиялық тұрақты, құны төмен, тұтқырлығы төмен, бу қысымы төмен, қату температурасы төмен, еріткіш ағынын азайту мақсатында экстрагацияланатын компонентке арналған еріткіштің жоғары ерігіштігі бар және алынған еріткіш экстракциялау үшін қайта айналғандықтан, еріткіш пен экстрагирленген компонент (-тердің) бөлінуінің қарапайымдылығы тұрғысынан қалпына келтірілетін болып табылады.

5.2.18 Экстрактивті дистилляция. Экстрактивті дистилляцияда салыстырмалы ұшқыштықты арттыру есебінен дистилляциямен бөлуге ықпал ететін, ұшуы төмен еріткіш қолданылады. Аз ұшатын компонент бағанадан жоғарғы бөлігіне енгізілген еріткіші бар ерітіндіге кіреді және дистилляциялық қондырғыдан кубтық қалдық ағыны түрінде шығады. Мұндай қоспаны екінші айдау қондырғысында бөліп алады, ал еріткіш бірінші айдау қондырғысына қайтарады. Бастапқы шикізатта ерімейтін компоненттер бағанадан дистиллят ретінде шығады. Еріткішке арналған қажетті сипаттамалар: бастапқы ағында компоненттердің бу сұйықтықты тепе-теңдігін өзгерту үшін жоғары селективтілік және салыстырмалы ұшқыштықты арттыру, уыттылық, жанбайтын және химиялық тұрақтылық, төмен тұтқырлық, будың төмен қысымы, мұздату нүктесінің төмендігі, еріткіштің ағынының жылдамдығын азайту үшін алынған компоненттің (-тердің) жоғары ерігіштігі және еріткіштің және компонент (-тер) бөлінуінің қарапайымдылығы тұрғысынан қалпына келтірілетін, алынған, осындай еріткіш қайта айналады.

5.2.19 Ылғалдандыру және градирнялар. Газ ағынына су буының көп мөлшерін енгізу үшін бағанада қарсы ағымды ылғалдандыру бу генерациясының және кейіннен буды газбен араластырудың орнына энергетикалық қондырғыларда қолданылады, оның термиялық жағынан тиімділігі аздау болады. Осындай ылғалдандыру операциясының мысалы метанның бу конверсиясы болып табылады, мұнда синтез-газды реакция бойынша алу үшін метан мен будың қоспасы қажет: $CH_4 + H_2O = 3H_2 + CO$. Басқа мысал – кешенді газдандырудың құрамдастырылған циклы қондырғыларында, мұнда H_2O булары газ турбинасында жалын температурасын төмендету үшін газ турбинасының (синтез-газ) отынды газына термиялық сұйылтқыш ретінде енгізіледі және осылайша қалыптасатын NO_x мөлшерін шектейді.

Судың үлкен жасырын (меншікті) жылуына байланысты бағанада жылу берудің едәуір мөлшері болады, өйткені су буланып, осылайша, тасымалдау массасынан бір мезгілде болатын жылу беру жылдамдығы назарға алынуы тиіс. Ылғалдағыштардың жоғарыда сипатталған түрлері жоғары қысымда (25-30 бар) жұмыс істейді, ал градирняны атмосфералық қысымда жұмыс істейтін қоршаған ауаны ылғалдаушы ретінде қарастыруға болады.

5.2.2 Баған түрлері

Массаны тасымалдау операцияларында қолданылатын жабдықтардың ең көп таралған түрлері (бір мезгілде тасымалдау жылу массасын қоса алғанда) тік цилиндрлік ыдыстардан тұратын тәрелкелер (науалар) немесе саптама бағаналары болып табылады, онда бу мен сұйықтық «науалар» не қаптау материалының қабаттары сериясындағы қарсы ағынмен түйіседі. Бағананың жоғарғы бөлігіне енгізілетін және ауырлық күшінің әсерінен ағатын сұйықтық бағана арқылы өтетін бу қысымына қарсы әрекет етеді.

5.2.2.1 Тәрелкелі бағаналар. Науалардың әр алуан түрлері, сондай-ақ «тәрелкелер» деп аталатындары бар және ең көп таралғандары туралы төменде айтылады.

Көпіршікті қақпағы бар науа тіреулер мен қақпақтың арасындағы саңылауы бар

қақпақпен жабылған, сақиналы кеңістікті құрайтын тіреулерден тұрады. Науадан оның астына түсетін бу тіреуіш арқылы жоғары көтеріледі, содан кейін сақиналы кеңістік арқылы, оның ағынын бұрап және көпіршіктерді саңылаулар арқылы науадағы сұйықтыққа шығару арқылы көтереді. Көпіршікті қақпағы бар науалар орташа жоғары сыйымдылыққа ие және ағын жылдамдығының кең ауқымында тасымалдау массасының жылдамдығы тұрғысынан өз тиімділігін сақтайды. Сатының жалпы тиімділігін және қарсы операцияның тиімділігін төмендететін сұйықтықты бұмен басып алу, бұдан әрі сипатталатын тесілген және елекшелі науалар сияқты науалардың басқа түрлеріне қарағанда әлдеқайда жоғары. Әрбір науадағы сұйықтықтың деңгейі суағар көмегімен ұсталады, ал суағар үстіндегі сұйықтық тартпа астына құбыр немесе «ағызу науасы» арқылы ауырлық күшінің әсерінен түседі, науадағы олардың саны бағана диаметріне байланысты. Науаның осындай түрі қосымшаларда қолданылады, мұндағы ағын жылдамдығы өте төмен болуы мүмкін, науа ылғалды болып қалады және осындай жағдайларда бітеулігін ұстап тұрады. Әдетте науалар 18 дюйм (46 см) қашықтықта, бірақ төмен жұмыс қысымында орналасқан, мысалы, атмосфералық қысымнан төмен болса, қашықтық 24 дюймге (61 см) дейін, ал кейде 36 дюймге (91 см) дейін артады.

Елекше тектес науаның немесе тесілген науаның шағын тесіктері бар, ол арқылы бу сұйықтық арқылы тез өтеді. Науадағы сұйықтық деңгейі қайтадан су ағызумен ұсталады және су ағызу арқылы өтетін сұйықтық науаға төмен ағызу науасы арқылы түседі, олардың саны бағана диаметріне қайтадан байланысты. Бұл науалардың жұмыс сипаттамалары көпіршікті қақпақтары бар науаларға қарағанда есептік жылдамдықтан 60% дейін бірдей немесе жақсы қалады, бірақ ағынның төмен жылдамдығы кезінде өнімділік жылдам. Алып кету көпіршікті қақпақтары бар науаларға қарағанда әлдеқайда шамамен үштен бірге төмен, бірақ төмен бу жүктемесі кезінде науаларда ағу проблемасы туындауы мүмкін. Науаның ағып кетуі (түсіру ретінде белгілі) науадағы тесік арқылы сұйықтықты ұстап тұру үшін ағынның төмен жылдамдығы кезінде бұмен жасалатын жеткіліксіз қысымнан туындайды. Шамадан тыс ағу әрбір келесі науада осындай әсердің жинақталуына әкеледі және соңында бағананы ажырату және қайта қосу керек болуы мүмкін. Елекше тектес науалар есептік нормаға жақын болып қалатын, сондай-ақ қолдануға жарамды жоғары жұмыс сипаттамалары бар қосымшаларда қолданылады, мұндағы өлшенген қатты бөлшектер бар. Науалар арасындағы қашықтық көпіршік қақпақтары бар науаларға қарағанда аз болуы мүмкін, бұл ретте орташа мәні 15 дюйм (38 см), кейде 9 дюймнен (23 см) 12 дюймге (30 см) дейінгі қашықтық қолданылады. Осындағы төмен қысым немесе вакуум үшін қашықтық 20 дюймге (51 см) 30 дюймге (76 см) дейін артады.

Клапанды науалар елекше тектес науаларға ұқсас (сұйықтық ағуына арналған түсіру құрылғыларымен), бірақ науадағы тесіктер бу ағынының жылдамдығына байланысты жоғары және төмен (белгілі бір шектерде) қозғалуы мүмкін қақпақтармен жабылған. Бұл жұмысқа әлдеқайда үлкен дайындықты қамтамасыз етеді, себебі қалпақтар ағынның төмен жылдамдығы кезінде сулану үдерісін азайтады. Клапанды лотоктар олардың кең жұмыс диапазоны, қарапайымдылығы және құнына байланысты бірқатар қолдануларда көпіршікті қақпақтары бар науаларды алмастырды.

Кейде ішіндегі бу тесік арқылы жоғары ағатын ағызғыш клапаны жоқ тесік науалар пайдаланылады, бірақ сұйықтық төменгі науаға қарсы сол тесік арқылы ағады. Осы науаларды ұстау сыйымдылығы мен сипаттамалары елекше тектес науаларға ұқсас, бірақ ағынның неғұрлым төмен жылдамдығы кезінде өнімділік ағынның жобалық жылдамдығынан 60%-ға төмен қабылданбайтын мәндерге дейін тез нашарлайды. Елекше тектес науалар сияқты осындай науалар жоғары жұмыс сипаттамалары бар қосымшаларда қолданылады, бірақ бұл ретте олар есеп айырысқандарға жақын қалады. Осындай науалар өлшенген қатты бөлшектер болған кезде де жарамды. Науалар арасындағы типтік қашықтық 12 дюйм (30 см), бірақ кейде 9 дюймнен (23 см) 18 дюймге (46 см) дейін. Төмен қысым немесе вакуум жағдайында жұмыс істеу үшін қашықтық 18 дюймнен (46 см) 30 дюймге (76 см) дейін артады.

5222 Саптама типіндегі бағаналар. Саптама типтес бағаналар, сатылы типтегі бағандар болып табылатын төрелкелі бағаналарға қарағанда үздіксіз жалғау бағаналары болып табылады. Сұйықтық ауырлық күшінің әсерінен тығыз орын арқылы төмен ағып, тығыздалған қабат бойынша бөлінеді, ал бу жоғарыға түседі. Тиімді масса тасымалдауға арналған бу және сұйық фазалар арасындағы үлкен фазааралық бетті қамтамасыз ету үшін

оңтайландырылған тығыздауға арналған геометриялық пішіндердің әр алуан түрлері бар. Осылайша, тығыздалған кеңістік көлемінің бірлігіне үстіңгі бет ауданы арқылы көрінетін тығыздау тиімділігі жоғары болуы тиіс. Тығыздаудың басқа да қажетті сипаттамалары: төмен қысымның ауытқуы бар үлкен сұйықтық ағынын қамтамасыз ету үшін фракциялық қуыстарға арналған үлкен кеңістік, өңделетін сұйықтықтар қатынасында химиялық инертті болуы, оның үстіндегі тығыздау салмағын ұстау үшін құрылымдық беріктігінің болуы, төмен тығыздығы және төмен құнының болуы. Әдетте бағананың шағын диаметріндегі немесе коррозиялық орталардағы төрелкелерден гөрі қондырмаларға артықшылық беріледі, себебі пластиктен, керамикадан бастап металл қорытпаларға дейін саптама материалының, сондай-ақ қысымның едәуір төмен түсуі қажет болатын жағдайларда үлкен таңдау бар. Сонымен қатар саптама бағаналары сұйықтықтың аз шығуымен сипатталады және сұйықтықтың бұмен аз араластырылуынан аз көбіктенуді тудырады. Екінші жағынан, саптама бағаналары сұйықтықтың немесе будың шығынында үлкен айырмашылық, ластаушы сұйықтықтар, сұйықтық пен будың үлкен арақатынасы, сондай-ақ қажетті сатылардың саны болған жағдайда, пайдалану үшін аз жарамды болады, бұл ретте температураның үлкен ауытқулары болуы мүмкін, бұл тығыздаудың жарылуына әкеп соқтыруы мүмкін немесе егер бағанаға аралық салқындатқыш ретінде температураны шектеу үшін салқындатқыш жылан түтікті орнату қажет.

Саптама бағанасы ерікті немесе құрылымдалған типте болуы мүмкін. Кездейсоқ тығыздау жеке фасонды бөліктерден тұрады, олар бағанаға тығыздалған қабаттар түрінде секциялармен лақтырылады әрі әрбір секцияның ең жоғары биіктігі тығыздаушы материалдың беріктігіне (оның езілу беріктігіне) және көлденең қима бойынша сұйықтық ағынының таралуына байланысты. Осы жеке тығыздағыш элементтерде инженер-химик Перри (*Green, 2007ж*) анықтамалығында көрсетілгендей, Палль сақинасы, Рашиг сақинасы, *inteloх* ер-тоқымы секілді белгілі әр түрлі формалары бар, ал кейбіреулері әр түрлі өлшемдегі патенттелген конструкциялардан тұрады. Әдетте тығыздалған учаскенің биіктігі 15 футтан (4,6 м) бастап 18 футқа (5,5 м) дейін шектелген. Тығыздалған қиманың төменгі бөлігіндегі тығыздау осы қимадағы барлық тығыздалған материалдың салмағын көтеруі тиіс екенін ескеріңіз. Қабат торда ұсталады, кейде оған үлкен мөлшердегі тығыздағыш материал жүктелуі мүмкін, одан кейін тығыздама тордағы тесік арқылы түспеу үшін аз мөлшердегі тығыздама қажет. Бағананың диаметрі аз болған сайын кездейсоқ тығыздаудың өзіндік ұзындығы соғұрлым аз болуы тиіс. Әдетте бағана диаметрінің 1/8 шегінде. Құрылымдалған тығыздау әдетте жұқа гофрленген металл пластиналардан немесе бағана ішінде реттелген тәртіппен салынған торлардан тұрады және қысым төмен түскен кезде жоғары тиімділіктің артықшылығы бар.

Сұйықтық таратқыштары төмен тығыздалған секцияның көлденең қимасы бойынша ағынның біркелкі таралуын қамтамасыз ету үшін орнатылған. Қайта бөлу, сондай-ақ әсіресе шағын диаметрлі бағаналар үшін, сұйықтық ағынының қайта бағытталуын болдырмау мақсатында, қабатты ұсақ секцияларға бөліп, қабаттар арасында қайта бөлу науаларын орнату қажет болуы мүмкін. Таратқыштардың әр алуан түрлері инженер-химик Перри (*Green, 2007ж*) анықтамалығында көрсетілген. Сұйықтықтың бір бөлігі бағанадан алынуы тиіс кезде тығыздалған қабаттар арасында газ өтуге арналған келте құбыры бар төрелке орнатылады, ол сұйықтықтың тікқұбырға түсуін болдырмау үшін бұ ағынына арналған тіреуіштерден құралады, сол арада сұйықтық бұру үшін жиналады.

5.2.2.2 Бүріккіш бағаналар. Бүріккіш бағаналар әдетте бұ жағында қысымның шектеулі ауытқуы болған кезде қолданылады. Олар ыдыстың ішінде орнатылған сұйықтыққа арналған бүріккіш сепкіштен тұрады. Кіріс газ ағыны әдетте бағананың төменгі бөлігіне келіп түседі және жоғары қозғалады, ал сұйықтық бір немесе бірнеше деңгейлерден қарсы байланыс үшін төмен шашырайды. Дегенмен бұмен тамшыны тасымалдау нақты қарсы байланысқа жету үшін маңызды болуы мүмкін.

5.2.3 Бағана өлшемдері.

Бағана биіктігі мен оның диаметрінің анықтамасымен танысу одан әрі дистилляция қатынасында ұсынылған және осы мәселе бойынша толық ақпаратты *Treybal* кітабы (1980 ж.) сияқты массаны тасымалдау үдерістері жөніндегі кітаптардан табуға болады.

Дистилляцияны абсорбция мен десорбциямен салыстырғанда жалпы жағдай ретінде қарастыруға болады, себебі ректификациялық бағаналарда әдетте конденсатор мен ребойлер болады, сол арада беріліс бағанаға жоғарыдан емес және төменгі науаға емес, аралық науаға енгізіледі. Бағанаға әр түрлі құрамдардың шикізат ағындары енгізілген неғұрлым кең таралған жағдай, әрқайсысы тиісті сатыда және жанама өнімдердің бірнеше ағындары (дистиллят ағындарына және кубты қалдыққа қосымша ретінде) тиісті кезеңнің әрқайсысы іріктеледі. Графикалық (екілік қоспалар үшін) және сандық әдістер (көп компонентті қоспалар үшін пайдаланылуы мүмкін) әзірленді. Келесі талқылау энергетиктер үшін кеңінен қолжетімді технологиялық қондырғылардың симуляторларында пайдаланылатын сандық әдістермен шектеледі, бұл мықты үстел компьютерінің болуына байланысты мүмкін болды. Суретте бір жіберу ағыны бар және бүйір тартпаларсыз бағана қарастырылады. Мұнда сипатталған сандық әдістер тарелкалары бар бағаналарға арналған тепе-теңдік сатысының тәсілінен және тығыздалған бағаналар үшін неғұрлым қолайлы болуы мүмкін жылдамдық негізінде жақындаудан тұрады. Тепе-тең сатының тәсілі «Теориялық төрелкеге баламалы биіктікті» (ТТББ), эксперименталды анықталған ТТББ деректерін пайдалана отырып тығыздаумен бағандарға қолданылуы мүмкін, бірақ нақты тығыздау түріне арналған ерекшелікке қосымша ретінде ТТББ бу мен сұйықтық ағынының жылдамдығын, түрлер мен типтердің концентрациларын қоса алғанда жүйенің жағдайларына байланысты болады. Көптеген эксперименттік деректер қажет. *Piché et al. (Пиче және қосавт. (2003ж))* мақаласында әр түрлі деректер көздері мен бар корреляциялар келтіріледі. ТТББ пайдалану ТТББ-ға кезеңдердің нақты санын көбейтуге (яғни тиімділікті пайдаланусыз), ал кейіннен есептік жорамалдауды әдетте 10% қолдануға әкеліп соқтырады.

5.2.3.1 Негізгі компоненттер. Көп компонентті дистилляция кезінде едәуір жоғары ұшпалы компоненттер «жеңіл» ретінде белгіленеді, ал едәуір төмен ұшпалы компоненттер «ауыр» ретінде белгіленеді, салыстырмалы ұшқыштық шара болып табылады. Кубтық қалдықтардағы барынша рұқсат етілген концентрациясы жобалық ерекшелік болып табылатын жалғыз компонент болған кезде осы компонент «жеңіл кілт» деп аталады. Ұқсас тәсілде, дистиллятта ең жоғары рұқсат етілген концентрациясы жобалық ерекшелік болып табылатын бір компонент болған кезде осы компонент «ауыр кілт» деп аталады.

5.2.3.2. Бағаналар сипаттамалары.

1. Беріліс температурасы, қысымы, құрамы және шығыны, сондай-ақ ол енгізілетін саты.
2. Әдетте конденсатордың салқындату ортасының температурасына байланысты таңдалатын бағанадағы жұмыс қысымы.
3. Жүйенің қуаттылық бірлігіне салыстырмалы аз үстіңгі беттен ірі габаритті блоктар болған жағдайда, әдетте көрінбейтін жылу шығыны.

Жүйені толық анықтау үшін қажетті қосымша сипаттамалар келесіден таңдалуы мүмкін:

1. Кезеңдер саны.
2. Флегманың шығысы немесе конденсатордың қатынасы немесе жұмысы.
3. Ребойлерде пайда болатын бу шығысы (қайнау жылдамдығы) немесе ребойлерде пайда болатын будың кубтық қалдық өнімімен (қайнау не қайта қайнау коэффициенті) арақатынасы не болмаса ребойлер жұмысының режимі.
4. Дистиллятта немесе кубтарда, не болмаса екеуінде де белгілі бір компоненттің концентрациясы.
5. Дистиллятта немесе кубты қалдықта нақты компоненттің ағын жылдамдығының шикізат шығынына арақатынасы (фракциялық шығарып алу).
6. Дистилляттың жалпы санының немесе жалпы кубтық қалдығының шикізаттың жалпы санына арақатынасы.

5.2.3.3. Кері ағын коэффициенті және сатылар саны. Кері ағын коэффициентінің (бағанаға кері берілетін сұйық дистиллят санының жоғарғы ағыны түрінде бөлінетін

мөлшерге қатынасы ретінде анықталатын) ұлғаюына қарай бағанаға одан да көп сұйықтық (ұшпалы компоненттермен көбірек қанықтығы) және бөлудің белгіленген дәрежесі үшін бағанадағы сатылардың қажетті саны азаяды, сол арада конденсатор мен ребойлердің жылу жүктемесі артады, себебі конденсаторда бу көбірек конденсациялануы тиіс және нәтижесінде бойлерде одан да көп сұйықтық булануы тиіс. Барлық жоғарғы ағын конденсацияланатын және кері тоңазытқышпен бағанаға, яғни өнім ретінде дистилляттың қандай да бір мөлшерін бұрмаусыз жылытылғанда (дефлегмирленгенде) сатылардың нәтижелік саны осындай «толық суландырудың» (флегманың толық қайтарылуы) жағдайында ең аз болып табылады. Сатылардың ең аз санын білу бастапқы мәнді таңдау үшін қажет, осындай параметр бағананың конструкциясы үшін таңдалған ерекшеліктердің бірі болып табылады. Флегманың толық қайтарылуында сатылардың ең аз санын бағалау әдісін *Фенске (1932ж.)* ұсынды және жалықтыратын есептеулерді орындаусыз тиісті мәнді алу үшін пайдаланылуы мүмкін қарапайым болжамдарды пайдаланады.

Негізгі компоненттерді бөлу сатыларының шексіз санына әкелетін кері ағынның коэффициенті үшін ең көп мән кері ағынның ең аз коэффициенті (рефлюкс қатынасы) деп аталады және осы жағдайларда дистилляттан ауыр кілтке қарағанда барлық ауыр компоненттерді және төмендегі жеңіл кілтке қарағанда жеңіл компоненттерді алып тастауға болады.

Кері ағынның ең аз коэффициентін білу кері ағынның тиісті коэффициентін таңдау үшін қажет, осындай параметр бағананың конструкциясы үшін таңдалған ерекшеліктердің бірі болып табылады. Әдетте кері ағынның таңдалған коэффициенті (рефлюкс қатынасы) кері ағынның ең төменгі коэффициентінен 1,2-1,5 есе асады. Кері ағынның ең төменгі коэффициентін бағалау үшін бірқатар әдістер ұсынылды, бірақ қарапайым жорамалдарды пайдаланатын *Андервуд (1948ж.)* әдісі жалықтыратын есептеулерді орындаусыз тиісті мәнді алу үшін пайдаланылуы мүмкін қарапайым болжамдарды пайдаланады.

5.2.3.4. Беріліс науасының орналасуы. Науаның оңтайлы орналасуы технологиялық қондырғының симуляторында бірқатар жағдайларды іске қосу жолымен анықталуы мүмкін, бірақ *Treybal (1980ж.)* сипатталған, (i) тұрақты молярлы толтыру (яғни, екі фаза арасындағы таза молярлық алмасу нөлге тең, барлық компоненттердің булану жылуы тең, ал ерітіндінің жылуы, жылу сыйымдылығының өзгеруі және жылу ысырабы шамалы) секілді белгіленген жеңілдететін болжамдарды жасап, тек негізгі компоненттерді ғана ескеретін қолайлы бастапқы мән бағалануы мүмкін және (ii) жүйе шешімнің мінсіз жүрісіне ереді.

5.2.3.5 Тепе-тең сатының тәсілі. Бағана тепе-теңдіктің бірқатар сатыларынан тұратын мән ретінде үлгіленеді, яғни осындай сатыдан кетіп қалатын бу мен сұйықтық ағындары масса мен жылу берудің тепе-теңдігінде болады деп болжанады (5.3-суретті қараңыз). Жартылай конденсатор және жартылай ребойлер де тепе-теңдік сатысы ретінде ескерілуі мүмкін. Көрсетілген бөлу дәрежесі үшін қажетті сатылар саны неғұрлым көп болса, соғұрлым бағана биіктігі көп болады. Сатылардың немесе науалардың нақты саны осы тарауда бұрын сипатталған науаның тиісті тиімділігінің көмегімен анықталуы мүмкін.

Науаның тиімділігі әдетте эмпирикалық деректер негізінде анықталады, бірақ науалардың кейбір түрлері үшін науаның тиімділігін болжамдаудың жартылай эмпирикалық және негіз құрайтын модельдері әзірленді (*BurgessandCalderbank, 1975; GarciaandFair, 2000; Geddes, 1946; Hughmark, 1971; Neuberg u Chuang, 1982; PradoandFair, 1990; Zuiderweg, 1982*) және масса берілісі мен жылу берілісі коэффициенттерін білуді талап етеді.

Әр түр үшін молярлық баланстан құралатын әрбір сатыға, екі ағында фракцияны байланыстыратын, сатыдан шығатын әрбір түр үшін тепе-теңдік қатынасына және сатыдан шығатын екі ағын үшін бірдей температуралы энергияның жалпы балансына арналған теңдеулер жүйесі шешіледі. Екі кететін ағыс тепе-теңдікте болады деп болжанады. Бағана конструкциясын технологиялық қондырғының симуляторын пайдалана отырып, ерекшеліктердің мәндерін өзгертіп және компьютерде бірқатар жағдайларды басу арқылы оңтайландыруға болады.

Теңдеулердің келесі жинағы сыртқы жылу берілісінен – Q , шикізат ағынынан және сұйықтықтың бүйірлік сору ағынынан құралатын «жалпы сатыға» арнап келтірілген. Әдетте

молярлық фракциялар өнімдер ағындарын, сондай-ақ тепе-теңдік туралы деректерді сипаттауда қолданылады және де осылайша массалық және энергетикалық баланстарда молярлық ағын жылдамдығын қолдану ыңғайлы. 5.5-суретке сілтеме жасай отырып, k сатысына арналған теңдеулер келесідей:

- i түрі, сұйықтықтың, будың және i түріндегі шикізаттың молярлық фракциясын білдіретін x^s , y^s және z басталатын молярлық баланс:

$$\dot{F}_k = Z_{k,i} + \dot{L}_{k-1}x_{k-1,i} + \dot{V}_{k+1}y_{k+1,i} = (\dot{L}_k + \dot{S}_k)x_{k,i} + \dot{V}_ky_{k,i}$$

- Молярлық фракцияларды қосу:

$$\sum_i y_{k,i} = 1 \text{ және } \sum_i x_{k,i} = 1$$

- L^s , V^s бар жалпы молярлық баланс сұйықтық пен бу ағынының молярлық жылдамдығын ұсынады, сол арада F^k және S^k беріліс ағынының және жақтың молярлық жылдамдығын ұсынады. Осы теңдеу жоғарыда аталған екі теңдеу жүйесін біріктіру арқылы, яғни түрлердің молярлық баланстарын қосу және содан кейін молярлық фракцияларды қосу арқылы алынуы мүмкін екенін назар аударыңыз. Осылайша, ол тәуелсіз теңдеуді білдірмейді, бірақ шешім процедурасын жеңілдету үшін пайдалы болуы мүмкін:

$$\dot{F}_k + \dot{L}_{k-1} + \dot{V}_{k+1} = \dot{L}_k + \dot{S}_k + \dot{V}_k$$

- Түрлік тепе-теңдік қатынастары i (2-тарауды қараңыз):

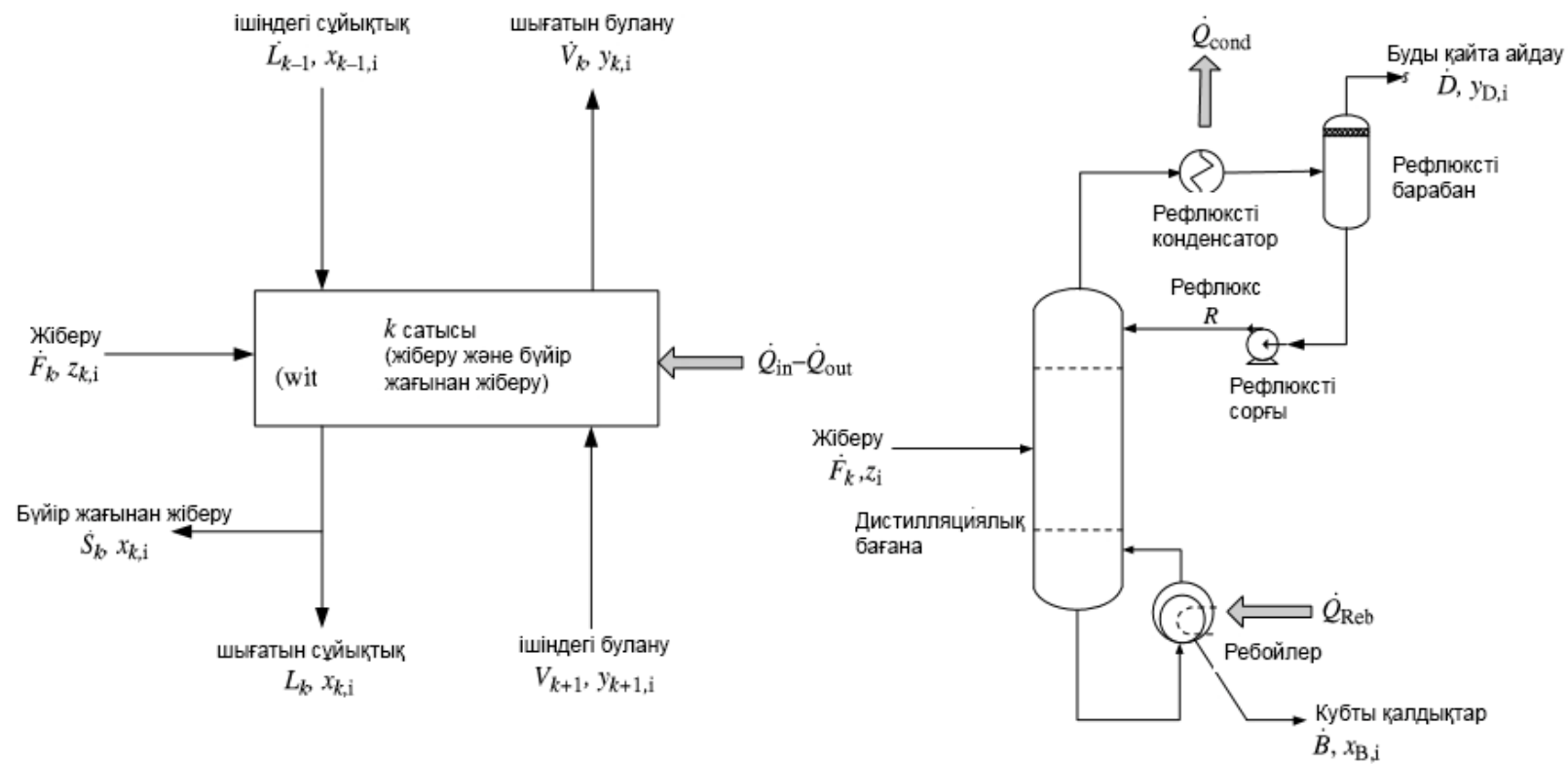
$$y_{k,i} = f(x_{k,i})$$

осындай $i-1$ қатынастар $\sum_i y_{k,i} = 1$ тұрғысынан қажет

Конденсатор үшін $Q_{\text{кір.}}=0$ и $Q_{\text{шығ.}}=Q_{\text{cond}}$, ребойлер үшін $Q_{\text{кір.}} = Q_{\text{reb}}$ және $Q_{\text{шығ.}} = 0$ және жылу шығыны болмашы кезіндегі кез келген басқа саты үшін $Q_{\text{кір.}} = 0$ және $Q_{\text{шығ.}} = 0$ мольдік негіздегі берілісті, сұйықтықты және бу энтальпиясын білдіретін h^s бар энергетикалық баланс:

$$\dot{F}_kh_{k,F} + \dot{L}_{k-1}h_{k-1,L} + \dot{V}_{k+1}h_{k+1,V} + \dot{Q}_{in} = (\dot{L}_k + \dot{S}_k)h_{k,L} + \dot{V}_kh_{k,V} + \dot{Q}_{out}$$

Барлық бағанаға (бақылау көлеміндегі конденсатор мен ребойлерді қоса алғанда) арналған теңдеу шешім процедурасын жеңілдетуге көмектесе алады. Мысалы, егер төменгі бөліктегі ағынның жылдамдығы емес, керісінше, дистиллят ағынының жылдамдығы көрсетілсе, онда төменгі бөліктегі ағынның жылдамдығы бағананың жалпы массасының балансы бойынша анықталуы мүмкін немесе ребойлерге емес, керісінше, конденсаторға жүктеме берілген болса, онда бағананың жалпы энергетикалық балансынан ребойлерге жүктеме анықталуы мүмкін (аралық салқындатқыштар не болмаса бүйірлі сорғышы бар қыздырғыштар сияқты басқа жылу алмастырғыштар болмаған жағдайда).



5.5-сурет. Ректификациялық бағанадағы кезең-кезеңмен есеп айырысулар

• Шикізаттың, дистилляттың, текшелі қалдықтар мен бүйір погондардың молярлық жылдамдығын білдіретін F^s, D, B , және S^s бар жалпы молярлық баланс:

$$\sum_k \dot{F}_k = \dot{D} + \dot{B} + \sum_k \dot{S}_k$$

• Шикізатта молярлық фракцияларды білдіретін $z_i, y_{D,i}$, және $x_{B,i}$ бар i молярлық балансының түрі, дистиллят (барлық дистиллят бу формасында орналасқан жағдайларда), және кубты қалдықтар:

$$\sum_k \dot{F}_k Z_{k,i} = \dot{D} y_{D,i} + \dot{B} x_{B,i} + \sum_k \dot{S}_k x_{k,i}$$

• Берілісті білдіретін h^s бар жалпы энергетикалық баланс, дистиллят, мольдік негіздегі кубты қалдық және бу энтальпиясы:

$$\sum_k \dot{F}_k h_{k,F} + \dot{Q}_{reb} = \dot{D} h_D + \dot{B} h_B + \sum_k \dot{S}_k h_{k,L}$$

Жеңіл және ауыр кілттер фракциялары көрсетілгенде, жеңіл кілттен жеңілірек барлық компоненттер тек дистиллятта ғана болады, ал ауыр кілтке қарағанда ауырлау компоненттер тек кубты өнімде (қалдықта) болады деп болжанады.

Одан кейін 5.1-мысалда көп компонентті буды суыту кезінде пайда болған бу және сұйық фазалардың құрамын есептеу үшін тепе-теңдік сатысының тәсілін қарапайым қолдану сипатталған.

5.1-мысал. z_i берілген құрамының молярлық жылдамдығы F молярлық жылдамдығы бар көп компонентті бу ағыны берілген қысымда конденсат нүктесінің температурасынан төмен берілген температураға дейін салқындатылады. K - мәндерін (2-тарауда көрсетілгендей, бу-сұйықтық тепе-теңдік деректерінен алынуы мүмкін) ескере отырып, тепе-теңдік сатысының тәсілін пайдаланумен түзілген бу және сұйық фазалардың y_i және x_i құрамдарын есептеу үшін жұмыс теңдеулерін шығарыңыз.

Шешім

Жалпы молярлық баланстан $F = L + V$

Түрлік молярлық баланстан $F z_i = L x_i + V y_i$

K -мәндері бар тепе-теңдік қатынастарының түрлері, $y_i = K_i x_i$

Жоғарыда келтірілген теңдеулерді қосып, келесі жұмыс теңдеуін аламыз:

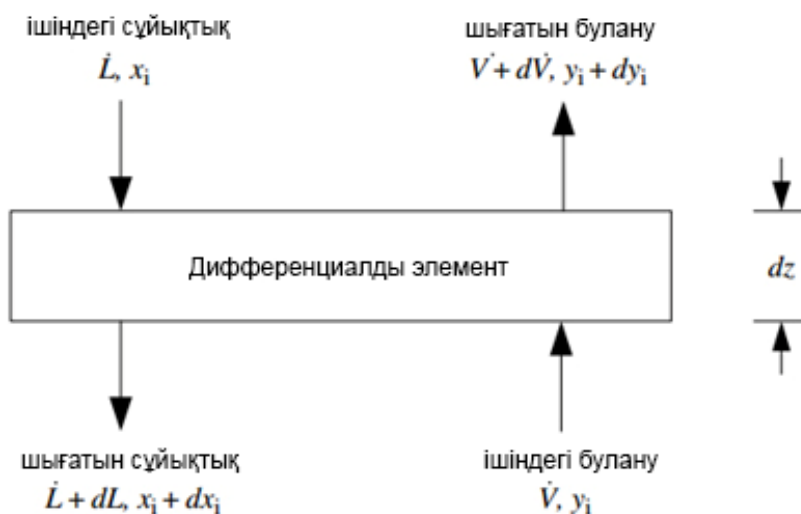
$$x_i = \frac{z_i}{1 + (\dot{V}/\dot{F})(K_i - 1)}$$

оны V/F қабылдап және $\sum x_i = 1$ теңдеуін алынған x_i қанағаттандыратынын тексеріп, сынамалар мен қателер әдісімен шешуге болады. Онда $y_i = K_i x_i$, пайдаланып, y_i есептеп шығаруға болады, сонда V мәнін $F \times (V/F)$ алуға, ал $L = F - V$ теңдеуінен алуға болады. Келесі жұмыс теңдеуін жоғарыда келтірілген жұмыс теңдеуін $y_i = K_i x_i$ мәнінен шегерумен және шешім үшін барлық i^s қосумен алынған теңдеудің орнына пайдалануға болады (Rachford and Rice, 1952 ж.).

$$\sum_i (y_i - x_i) = \sum_i \frac{z_i (K_i - 1)}{1 + (\dot{V}/\dot{F})(K_i - 1)} = 0$$

5.2.3.6 Тарифтік тәсіл. Тығыздалған бағаналарда бу және сұйық фазалар төрелкелі бағаналарда секілді қадаммен емес, үздіксіз байланысқандықтан, есептеп шығару үдерісі кезеңді есептеп шығару процедурасын пайдаланудың орнына (егер ТТББ әдісі пайдаланбаса), 5.6-суретте көрсетілгендей, dz биіктіктегі дифференциалды элементтерге

тығыздау биіктігін бөлуден құралады. Тепе-теңдік сатысының тәсілі ішінара ребойлер немесе ішінара конденсатор үшін әлі де қолайлы болуы мүмкін.



5.6-сурет. Ректификациялық бағанадағы дифференциалды элемент

Алайда 5.6-суретке сілтеме жасап, элементке арналған дифференциалды теңдеулер сұйық және бу фазаларына арналған піспекті режимді, сондай-ақ көлемдік фазалардың әрқайсысының біртектілігін ескере отырып келесі тәсілмен көрінеді:

- i түріндегі молярлық баланс, мұндағы x_i және y_i сұйықтық пен газдың i түріндегі көлемді молярлық фракцияларын білдіреді:

$$\frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz}$$

- i түріндегі молярлық фракцияларды сұйықтық-бу бөлінуінің шекарасында i түріндегі молярлық фракцияларды білдіретін x_i^{int} және y_i^{int} мәндерімен қосу:

$$\sum_i y_i = 1, \sum_i x_i = 1, \sum_i y_i^{int} = 1, \text{ және } \sum_i x_i^{int} = 1$$

- L және V бар жалпы молярлық баланс сұйықтық пен бу ағынының молярлық жылдамдығын білдіреді. Жоғарыда айтылғандай, жалпы молярлық баланс жоғарыда көрсетілген екі теңдеудің жиынтығын біріктіру жолымен, яғни түрлердің молярлық қалдықтарын қосу және одан кейін молярлық фракцияларды қосу жолымен іс жүзінде алынуы мүмкін. Осылайша, ол тәуелсіз теңдеуді білдірмейді, бірақ шешім процедурасын жеңілдету үшін пайдалы болуы мүмкін:

$$\frac{dL}{dz} = \sum_i \frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = \frac{d\dot{V}}{dz} = \sum_i \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz}$$

- i және a масса тасымалдаудың түрлілік арақатынасы тығыздау көлемінің бірлігіне үстіңгі бет ауданын білдіреді және тығыздау типіне тәуелді, бірақ бу мен сұйықтықтың массалық шығынына байланысты ауытқуы мүмкін (эксперименттер арқылы анықталады және тығыздау өндірушісімен беріледі), k_L және k_V 5.4-теңдеуді немесе 5.5-теңдеуді қолдану кезінде мольдық негіздегі сұйық және бу фазаларындағы масса тасымалдаудың коэффициенттерін ұсынады.

$$\frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = aAk_L(x_i^{int} - x_i) + x_i \sum_i \frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz} = aAk_V(y_i - y_i^{int}) + y_i \sum_i \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz}$$

немесе

$$\frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = aAC_{T,L}k_L^*(x_i^{int} - x_i) + x_i \sum_i \frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz} = aAC_{T,V}k_V^*(y_i - y_i^{int}) + y_i \sum_i \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz}$$

Бу және сұйық фазалар арасындағы компоненттердің эквимолярлы контрдиффузиясы үшін бұл дистилляция³ бойынша операцияларда жиі кездеседі, келесі теңдеулер есепті жеңілдетеді:

$$\frac{\dot{L}dx_i}{dz} = aAk_L(x_i^{int} - x_i) = \frac{\dot{V}dy_i}{dz} = aAk_V(y_i - y_i^{int}) \quad (5.11))$$

Немесе

$$\frac{\dot{L}dx_i}{dz} = aAC_{T,L}k_L^*(x_i^{int} - x_i) = \frac{\dot{V}dy_i}{dz} = aAC_{T,V}k_V^*(y_i - y_i^{int})$$

- Интерфазадағы (бірақ көлемді фазалар арасында емес) түрлілік i тепе-теңдігі:

$$y_i^{int} = f(x_i^{int})$$

осындай i - 1 қатынастары келесіні пайдаланумен қажет:

$$\sum_i y_i^{int} = 1$$

- Жалпы энергетикалық баланс және жылу беру жылдамдығы, мұндағы h^s сұйықтықтың және будың тиісті көлемдік температураларында молярлық үлестік энтальпияларды, h_L және h_V – сұйықтық пен будың жылу беру коэффициенттері, ал T^s сұйықтық пен будың температурасын білдіреді:

$$\frac{d(\dot{L}h_i)}{dz} = aAh_L(T_{int} - T_L) + \sum_i h_{L,i} \frac{d(\dot{L}x_i)}{dz} = \frac{d(\dot{V}h_V)}{dz} = aAh_V(T_V - T_{int}) + \sum_i h_{V,i} \frac{d(\dot{V}y_i)}{dz}$$

Жоғарыда бөлу шекарасындағы будың тасымалданатын массасының конденсациясы салдарынан бөлінетін жылу сұйық және бу фазаларына шашырауы тиіс екені көрсетілген. Дәл осылай булану үшін қажетті жылу екі фазамен берілуі керек.

«Тепе-тең сатыға келетін тәсіл» бөлімінде айтылған, осындай бақылау көлеміндегі конденсатор мен ребойлерді қоса алғанда, барлық бағанаға арналған теңдеулер шешім процедурасын жеңілдетуде көмектесе алады.

Тығыздау типі үшін ерекше болып табылатын масса тасымалдау коэффициенттері, әдетте екілік жүйелер үшін қолжетімді, бірақ көп компонентті жүйе үшін талап етілетіндер екілік коэффициенттерден (*Krishna and Standart, 1979ж.*) бағалануы мүмкін. Автор Ванг және оның қос авторларының кітабында (*Ванг және қосавт. 2005 ж*) кездейсоқ, сондай-ақ құрылымдалған тығыздаулар үшін әр түрлі зерттеушілермен әзірленген масса тасымалдау коэффициенттеріне арналған корреляциялар жасалды.

Инженер-химиктер Перри (*Грин, 2007ж*) анықтамалығында әр түрлі тығыздағыштардың арақатынасы келтірілген. Жылу беру коэффициенттері қол жетімді болмаған жағдайда, оларды деректер сұйықтығының жылу берілісі (импульсті беру) және үйкелу бойынша масса тасымалдау коэффициенттерін бағалау үшін іс жүзінде болған Чилтон-Колберн (*Чилтон және Колбёрн, 1934ж.*) ұқсастығын пайдалана отырып, масса беріліс коэффициенттері бойынша көптеген жағдайларды бағалауға болады. Тасымалдың

осы құбылыстары ұқсас әрі егер олардың барлығы бірдей өлшемсіз теңдеулердің жиынтығымен реттелсе және егер олардың ұқсас шекаралық шарттары болса, онда аналогиясы шынайы. Жылу және екілік масса тасымалдау Чилтон-Колберннің j_H және j_M коэффициенттерімен байланысты болады:

$$j_H = \frac{Nu}{RePr} Pr^{2/3} = \frac{h}{C_p \rho \bar{v}} Pr^{2/3} = j_M = \frac{Sh}{ReSc} Sc^{2/3} = \frac{k_x}{\rho \bar{v} / M_w} Sc^{2/3}$$

мұндағы Шервуд саны $Sh = (k_x D / C_T D_{AB})$ және Шмидт саны $Sc = (\mu / \rho D_{AB})$ жылу алмасудағы Нуссельт саны Nu мен Прандтль саны Pr сияқты масса тасымалдауда бірдей рөл атқарады. Өлшемсіз сандармен пайда болатын әр түрлі айнымалылар мыналар:

h = жылу беру коэффициенті;

k_x = масса берудің бинарлы коэффициенті;

D_{AB} = диффузияның бинарлы коэффициенті;

C_T = Sh пайда болатын, бірақ j_M пайда болмайтын қоспаның концентрациясы;

$D = Nu, Sh$ және Re пайда болатын, бірақ j_H немесе j_M болмайтын тығыздаудың өзіндік ұзындығы;

ν = сұйықтықтың беткі жылдамдығы (бағанның көлденең қимасы ауданының бірлігіне ағынның көлемді жылдамдығы);

M_w = сұйықтықтың молекулалық салмағы;

k, ρ, μ және C_p = сұйықтықтың жылу өткізгіштігі, тығыздығы, тұтқырлығы мен тұрақты қысымы, массасы, меншікті жылу сыйымдылығы.

Кешенді газдандырудың құрамдастырылған циклында және ылғалды ауада жұмыс істейтін турбиналар сияқты қоректендірудің жетілдірілген циклдерінде пайдаланылатын қарсы ағынды ылғалдағыштар (Рао, 1989ж.) жылдамдыққа негізделген жоғарыда аталған тәсілді пайдалана отырып, модельденуі мүмкін. Градирнялар, сондай-ақ тұманға қарсы ағынды кептіргіштер де ұқсас түрде модельденуі мүмкін. Теңдеулер осы қосымшаларда қарапайым формаларды қабылдайды, өйткені тек бір компонент (H_2O) тасымалданады, және ребойлер немесе конденсатор жоқ. Осы қосымшада массаны тасымалдаудың өте жоғары жылдамдықтары кездескенде (Паренте және қос авт., 2003), масса беру коэффициенттері бойынша бар деректерді Акерман коэффициентін пайдаланумен түзетуді пайдалануға тура келуі мүмкін (Бёрд және қос авт., 2007).

5.2-мысал. Кері ағынды масса тасымалдау мен сұйықтық пен бу арасындағы эквимолярлы контрдиффузиясы бар тығыздалған бағана үшін, масса тасымалдаудың бу фазасындағы коэффициентін ескере отырып, массаны тасымалдаудың барлық кедергісі бу фазасында орналасқанын болжап, тығыздау биіктігінің өрнегін шығарыңыз. Сонымен қатар а тығыздау көлемінің бірлігіне арналған бөлім бетінің ауданы және массаны беру коэффициенті k_V тұрақты болып қалады деп болжамдайық, сол арада $X_{i,kip}$ және $Y_{i,kip}$ кіріс деректері, $X_{i,шығ.}$ және $Y_{i,шығ.}$ шығыс деректері мен L және V сұйықтық пен бу ағынының жылдамдығы берілген.

5.11 теңдеуінің
шешімі,

$$\left(\frac{\dot{V}}{ak_V} \right) \frac{dy_i}{(y_i - y_i^{int})} = dz \quad (5.12)$$

$$L dx_i = \dot{V} dy_i \quad (5.13)$$

Бағананың барлық биіктігі бойынша 5.12 теңдеуін және 5.13 теңдеуін төменнен бастап (мұндағы бу бағанаға түседі, ал сұйықтық бағанадан шығады), бағана ішіндегі кез келген нүктеге эквимолярлы қарсы диффузия үшін L және V константаларымен біріктіріп, төмендегіні аламыз:

$$Z = \left(\frac{\dot{V}}{ak_V} \right) \int_{y_{i, \text{кiр.}}}^{y_{i, \text{шығ.}}} \frac{dy_i}{(y_i - y_i^{\text{int}})} \quad (5.14)$$

$$(y_i - y_i^{\text{int}}) = \left(\frac{L}{V} \right) \quad (5.15)$$

Екі фаза бөлу шекарасында тепе-тең орналасқанын және массаны тасымалдауға барлық кедергілер бу фазасында (сұйық фазада емес, яғни $x_i^{\text{int}} = x_i$) орналасатынын болжамдауға болғандықтан, $y_i^{\text{int}} = f(x_i^{\text{int}}) = f(x_i)$ аламыз.

$$Z = \left(\frac{\dot{V}}{ak_V} \right) \int_{y_{i, \text{кiр.}}}^{y_{i, \text{шығ.}}} \frac{dy_i}{[y_i - f(x_i)]} \quad (5.16)$$

5.16 теңдеуі не эксперименталды алынған, не жартылай эмпирикалық әдістермен алынатын бу сұйықтықты тепе-теңдік деректерін пайдалана отырып, графикалық немесе сандық түрде x_i және y_i арасындағы қажетті арақатынасты қамтамасыз ететін 5.1 -теңдеуі көмегімен біріктірілуі мүмкін. 5.16 теңдеуіне ұқсас өрнек масса тасымалдаудың барлық кедергісі сұйық фазада болатын жағдайлар үшін алынуы мүмкін. Екі фаза да кедергіде көрсетілгенде, масса тасымалдаудың жалпы коэффициенті қозғалыс күшін дұрыс таңдағанда пайдаланылуы мүмкін.

5.14 теңдеуінің оң жақ бөлігіндегі бірінші мүшенің (жақшаларда) ұзындық бірлігі бар және өлшемсіз болатын, тасымалдау бірліктерінің саны деп аталатын екінші мүшеге (интегралға) көбейту кезіндегі тасымалдау бірлігінің биіктігі аталады, ол масса тасымалдау операцияларына қажетті жалпы биіктікті береді. Эмпирикалық корреляциялар тасымалдау бірлігінің биіктігін бағалау үшін әзірленді. Тасымалдау бірлігінің биіктігі тұрақты шамада болмауы мүмкін, себебі (ak_V) өзгеруі мүмкін, өйткені бу мен сұйықтық ағынының массалық жылдамдықтары, тіпті молярлық ағын жылдамдығы тұрақты қалғанда, диффундирлеуші бөлшектердің молекулалық салмақтарындағы айырмашылықтарға байланысты тұрақты болып қала алмайды және осылайша тасымалдау блогы биіктігінің тұрақтылығы жоғарыда көрсетілген әдіснаманы қолданар алдында тексерілуі тиіс.

5.2.3.6 Бағананың жалпы биіктігі. Науаларды немесе тығыздағыштарды (және науалар немесе тығыздау секциялары арасындағы кеңістікті) орналастыру үшін қажетті бағананың биіктігіне қосымша бағананың жоғарғы жағынан да, төменгі жағынан да биіктік талап етіледі. Кері тоңазытқышпен шүмекті, кез келген люкті, кез келген демистерді орналастыру үшін жоғарыдан (әдетте 1,5-3 м) кеңістік және сұйықтықтың тамшыларын будан бөлу үшін жеткілікті орын қажет. Төменгі бөліктегі биіктік ребойлер буына арналған шүмекті орналастыру үшін және сұйықтық үшін жеткілікті өткізу қабілетін қамтамасыз ету үшін талап етіледі, ол әдетте 5 минутты құрайтын төмендеткіш ағынның үдерісінде беріледі. Сұйықтықтың шекті жоғары деңгейі мен төменгі науа немесе тығыздау секциясы арасындағы жеткілікті биіктік болуы тиіс (сұйықтықтың әр түрлі деңгейлерін орнату үшін, 3-тарау, «Тамшыны бөліп шығару» бөлімінде тамшыларды ұстағыштар үшін сипатталған *Өлшемшарттарды* қараңыз).

5.2.4. Қысым өзгеруінің баған диаметріне тәуелділігі

Егер бағананың диаметрі тым үлкен болса, онда қысымның (бу тұрғысынан) өзгеруін азайту үшін бағананың тәрелкесі тамшылап жабылады, яғни сұйықтық тәрелкедегі тесіктер арқылы ағады, бұрын түсіндірілгендей, тығыздалған бағана жағдайында, масса және жылу беру коэффициенттері азаяды. Кез келген жағдайда бөлу тиімділігі айтарлықтай төмендейді. Екінші жағынан, егер бағананың диаметрі тым кішкентай болса, бағана шетіне дейін сумен толтырылуы мүмкін. Ауырлық күшінің әсерінен ағатын сұйықтық бумен жасалатын жоғары қысымды еңсеруі тиіс және сұйықтық аға алмайтын және шегінетін нүктеге (тәрелкелері бар баған жағдайында ағызу құрылғысында) жетеді. Будың шамадан тыс жылдамдығы сұйықтықтың бағанаға тамшылатып немесе көбік түрінде жүруіне алып келеді, тәрелкенің

үстіне жиналып жетеді, бұл тұманға қарсы жұмыстың артықшылығын және тәрелкенің тиімділігін төмендетіп қана қоймай, сонымен қатар судың жоғары деңгейіне әкеледі. Бағана диаметрін анықтау кезінде пайдаланылатын өлшемшарт – алдымен су басу жүргізілетін көлденең қиманың ең аз ауданын анықтау, содан кейін осы алаңды 0,85-ке әдетте неғұрлым ірі бағаналар үшін және одан да ұсақ бағаналар үшін 0,75-ке (диаметрде <2 м) бөлу жолымен ұлғайту болып табылады.

5.2.4.1 Тәрелкелі бағаналар. Тәрелкелі бағаналар жағдайында, «су басу диаметрін» анықтау кезінде пайдаланылатын өлшемшарт сұйықтықтың тамшыларын бұмен көшіруден болатын алып шығару кезіндегі су басу болып табылады (көбік түзетін сұйықтықтар үшін, мұндағы су басудың осындай түрі күштірек болады, «су басу ауданын» 0,85-ке бөлу арқылы берілген диаметрден асатын бағана диаметріндегі ұлғаю). Су басу кезінде бу ағынының жылдамдығы сұйықтық тамшысын суспензиялау үшін қажетті жылдамдыққа сәйкес келеді және сұйықтықтың тығыздығына байланысты (*Souders and Brown, 1934ж*):

$$\frac{\dot{V}}{A} = C_F \sqrt{\frac{\rho_L - \rho_V}{\rho_V}}$$

мұндағы $\dot{V}$ – көлемді бу шығыны, A – бу ағыны үшін қолжетімді, яғни азаймалы тіреуіштің көлденең қимасының ауданын шегергеннен кейін бағананың таза көлденең қимасының ауданы, ρ_L және ρ_V – сұйықтықтың және будың тығыздығы, ал F тәрелкенің аталған типі үшін эмпирикалық айқындаушы фактор болып табылады және сұйықтық пен будың массалық ағындары қатынасымен, сұйықтықтың буларға тығыздығы қатынасымен, тәрелкелер арасындағы қашықтықты қосқанда, сұйықтықтың беткейлі кернеуі мен тәрелкенің геометриясымен байланысты. Тәрелкелер арасындағы берілген аралыққа арналған ағызу тесігінің ауданы ағызу науасы арқылы мөлдір сұйықтықтың эмпирикалық айқындалған жылдамдығына негізделеді, жоғары көбіктенуі бар сұйықтық үшін шамамен 0,2 фут/с (0,06 м/с), науалар арасындағы қашықтық 18 дюймнен (46 см) 0,6 фут/с (0,18 м/с) дейін, науалар арасындағы қашықтық 30 дюймге жеткенде (76 см). *Kozioł және Maskowiak (1990ж.)* немесе инженер-химик Перри анықтамалығында (*Green, 2007ж.*) ұсынылған корреляция бұмен басып алынған сұйықтықтың үлесін бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін. Әдетте салмағы бойынша алып кету сұйықтық ағынының 10% шектелген және егер ол үлкен болса, баған диаметрі немесе тәрелкелер арасындағы қашықтық артады.

Бұдағы **қысым үш компонент** жиынтығының әсерінен төмендейді: (1) құрғақ тәрелке арқылы будың ағынынан, тәрелкедегі сұйықтықтың тереңдігінен (2) және (3), көпіршіктер тәрелкенің тіліктерінде пайда болған кезде беттік керуді жеңу қажет болады. Осындай компоненттер үшін қысым ауытқуының корреляциясы тәрелкелердің нақты типтерін ескере отырып әзірленген және елекше тәріздес тәрелкелерге арналған *Мадиган (1964ж)* жұмысында және клапанды тәрелкелерге арналған *Бенет және қос авт. (1983ж)* жұмысында ұсынылған. Инженер-химиктер Перри анықтамалығында (*Green, 2007 ж.*) қысымның ауытқуын есептеу әдістемесі берілген.

5.2.4.2. Қондырма типіндегі бағаналар. Еркін типі үшін қысымның келуі және өзгеруі өлшемсіз топтастыру диаграммасынан алынуы мүмкін,

$$(\dot{m}_L/\dot{m}_V)(\sqrt{\rho_V/\rho_L})$$

өлшемсіз топтастыруға байланысты (хосі ретінде белгіленді),

$$((\dot{m}_V/A)^2 C_F (\mu_L)^{0.2} / \rho_V \rho_L) (\rho_V / \rho_L)$$

(y осі ретінде белгіленді), мұндағы $\dot{m}_V$ және $\dot{m}_L$ – бу мен сұйықтық ағынының массалық жылдамдығы, μ_L – сұйықтықтың тұтқырлығы, ал C_F – осы тығыздаудың бірегей геометриясын ескеретін «тығыздау коэффициенті» (*Treybal, 1980ж*). Тығыздау биіктігінің бірлігіне (параметр ретінде), сондай-ақ толтыру шарттары үшін қысым ауытқуының әр түрлі мәндерінің қисықтары берілген. Су басу (толтыру) шарттарының қисығы су басуға сәйкес келетін

көлденең қиманың A ауданын анықтау үшін, содан кейін су басудан төмен қауіпсіздікке арналған тиісті коэффициентке A -ны ұлғайту жолымен пайдаланылуы мүмкін, u осі – қысымның төмендеу қисығын пайдалана отырып көлденең қиманың ұлғайтылған ауданына сәйкес келетін қысымның төмендеуі.

Бағана диаметрі бақылау науасы немесе тығыздау секциясы негізінде есептелуі тиіс және әр түрлі тәрелкелерде немесе сұйықтық және/немесе бу ағынының жылдамдығы немесе температура сияқты басқа да жұмыс жағдайлары айтарлықтай өзгерген жағдайдағы тығыздаудың әр түрлі биіктіктерінде бағана ішіндегі жағдайларды бағалауды талап етеді. Егер жоғарғы секцияға есептелген диаметр төменгі секцияға талап етілетін диаметрден едәуір көп болса, немесе керісінше, онда екі түрлі диаметрлі жоғары және төменгі секциялары бар бағананы, егер әр секцияның ұзындығы едәуір басқа диаметр болса, шамамен 6 м артық болса әдеттегідей жобаланады.

5.3 СҰЙЫҚТЫҚ-ҚАТТЫ ЗАТ ЖҮЙЕЛЕРІ

5.3.1 Адсорберлер

Адсорбция әдетте адсорбент бөлшектерінің тығыздалған қабатынан тұратын жылжымайтын қабатта жүргізіледі. Сұйықтық (газ не болмаса сұйықтық) ағынның жуық сынамалы режимінде қабат арқылы төмен ағады. Қабаттағы қысымның ауытқуын бағалау әдісі 3-тарауда сипатталған және бөлшектердің өлшемі мен формасына байланысты. Едәуір үлкен бөлшектер қысымның аздап ауытқуына әкеліп соқтырады, бірақ ұсақ бөлшектер одан да үлкен тиімділікке ие. Беттік алаңның үлкен бөлігі адсорбент бөлшектерінің кеуектерінде орналасқандықтан, бөліктердің диффузиясы үшін қол жетімді алаң бөлшектердің осы көлемі үшін бөлшектер мөлшерінің ұлғаюына қарай азаяды. Адсорбент адсорбенттің қанығуынан болатын жарылыс өткенге дейін қалпына келтірілуі немесе ауыстырылуы тиіс, яғни қалаусыз бөлшектер бұдан әрі бөлінуі мүмкін емес және шығатын ағында рұқсат етілген мөндерден жоғары болады. Әдетте кезең-кезеңмен адсорбцияланған су будың көмегімен бөлінгенде, кептіру операциялары үшін екі қабат толық ағынға есептелген сыйымдылықпен жабдықталады, әрі қарай олардың біреуі адсорбция режимінде жұмыс істейді, ал екіншісі регенерацияланады. Регенерациялаудың бірнеше сағатын ғана талап ететін және жиі, мысалы, әр 5 күн сайын регенерациялайтын, микроэлементтерді жоюға арналған белсендірілген көмірдің қабаты жағдайында екі қабаттың толық ағын мөлшері болмауы тиіс. Себебі бір қабатты регенерациялау кезеңі ішінде екінші қабатқа барлық ағын берілетін болғандықтан, қабаттағы қысымның ауытқуы жоғары болады және жүйені жобалау кезінде ескерілуі тиіс. Адсорбенттің саны мен ыдыстың мөлшерін одан кейін адсорбентті ауыстыру немесе регенерациялау жиілігі негізінде анықтайды. Регенерация қабат арқылы жоғары ағатын сұйықтықпен (мысалы, кептіргішке арналған бумен) орындалғанда, егер қабаттың үстінде бөлшектерді ұстап тұруға арналған торша көзделмеген болса, сұйықтық жылдамдығы шектелуі тиіс. Адсорбция үдерісі төменде көрсетілгендей, бірінші қағидаттардан (тасымалдау моделі) кодталуы мүмкін, бірақ өте күрделі болуы үрдісі бар. Көлемдік тепе-теңдік моделі осы бөлімде бұдан әрі сипатталғандай, оның орнына аппроксимдеу ретінде пайдаланылуы мүмкін.

5.3.1.1 Тасымалдау моделі. Адсорбцияның үлкен бөлігі кеуектер ішінде өткендіктен, жоғары кеуекті бөлшектерге қатысты адсорбцияланатын бөлшектер үшін масса тасымалдаудың үдерісі мыналардан тұрады деп санауға болады: кеуектің аузындағы қатты бөлшектері айналасындағы үлпек арқылы өтетін диффузия, микрокеуектер аузындағы макрокеуектер ішіндегі, сондай-ақ микрокеуектер қабырғасы бетіндегі диффузия және адсорбция, микрокеуектер ішіндегі микрокеуектер қабырғасы бетіндегі диффузия және адсорбция. Кеуектердегі диффузия кеуектің диаметрін салыстырғанда немесе молекулалардың орташадан төмен еркін жүрісі, және беткейлік миграция өткенде молекулярлық диффузия және/немесе тығыздылығы төмен газ жағдайында Кнудсеннің диффузиясы болуы мүмкін.

Кнудсеннің диффузиясы кезінде молекулалар керісінше бір-бірінен секіріп кетпей, олардың миграциясы уақытында қабырғалардан тыс секіріп кетеді. Егер жоғарыда көрсетілген кезеңдердің біреуі ғана жүйеге және оның пайдалану шарттарына байланысты

орын алуы мүмкін басқару кезеңі болып табылса, тасымалдау массасының барлық үдерісін модельдеу айтарлықтай жеңілдетіледі.

Үлпек арқылы массаны тасымалдауды қозғалыс күші ретінде концентрацияның әр түрлілігін пайдаланумен конвективті 4.2 жылу берілісінің теңдеуінен ұқсас келетін 5.17 теңдеуі көмегімен эмпирикалық түрде модельдеуге болады:

$$N_A = k_C (C_{\text{көлем}} - C_{in}) \quad (5.17)$$

мұндағы k_C – масса беру коэффициенті, $C_{\text{көлем}}$ – адсорбат газының көлемді концентрациясы, ал $C_{\text{кір}}$ – кеуектің аузындағы (кірудегі) концентрация. Масса тасымалдау коэффициентіне Шервуд санын, $Sh = (k_C D_P / D_m)$, Шмидт санын, $Sc = \nu / D_m$ және $3 < Re < 10\,000$ үшін Рейнольдс санын, $Re = \nu D_P / \nu$ байланыстыратын 5.18-теңдеуі (Wakao and Funazkri, 1978ж) секілді, тығыздалған қабаттар үшін k_C корреляциялары алынды:

$$Sh = 2 + 1.1 Re^{0.6} Sc^{1/3} \quad (5.18)$$

мұндағы ν – сұйықтықтың беткейлі жылдамдығы, D_P – бөлшектің диаметрі, D_m – молекулалық диффузия, ал ν – сұйықтықтың кинематикалық тұтқырлығы.

Кеуектерге арналған оңайлатылған геометриялық модель оларды кеуектердің орташа диаметрімен цилиндрлік пішін ретінде қарастырудан және кеуектер тік және цилиндрлік болып табылмайтынын, көлденең қиманың әр түрлі алаңдарымен бір қатардан тұратынын түсіндіру үшін экспериментальды белгілі бір «икемді коэффициентін» қолданудан тұрады (молекула екі нүкте арасында, осы екі нүкте арасындағы ең қысқа қашықтықтан өтетін нақты қашықтықтың қатынасы ретінде анықталады). Кеуектер арқылы диффузияланушы сұйықтық арқылы масса тасымалдаудың аралас жылдамдығы және кеуектің ішкі қатты бетіндегі адсорбция мінсіз кеуекті қарастыру және кеуектердің осьтік бағытында дифференциалды элемент массаларының балансын орындау жолымен, содан кейін қатты бетінде адсорбцияны бір мезгілде шешу кезінде кеуектер ұзындығының барлық көлемі бойынша біріктіріліп алынуы мүмкін. Жылу әсерлері мен температураның тербелістері адсорбцияның едәуір жылуы кезінде де ескерілуі тиіс. Молекулалық, кнудсендік және беттік диффузия мен икемділікті ескеретін тиімді диффузиялық қабілет пайдаланылады және осы әдістеме гетерогенді каталитикалық реакцияларды моделдеу кезінде пайдаланылатын әдіснамаға ұқсас (Carberry, 1976ж; Levenspiel, 1972ж), бірақ та бөлшектер ішіндегі адсорбция үшін талдау стационарлық емес жағдайға әкеп соқтырады, себебі бөлшектердің беті белгілі бір уақыт кезеңі ішінде адсорбатпен қанығады. Жалпы алғанда, беттік адсорбция үдерісі тепе-теңдіктен ығысу ретінде қозғалмалы күштерді пайдаланатын бірінші ретті жылдамдықтың өрнектері көмегімен эксперименталдық деректермен қанағаттанарлық түрде сәйкес келеді (Levenspiel, 1972ж). Адсорбция жылдамдығы J_A келесідей жазылуы мүмкін:

$$J_A = k_a (C_{\text{кеуек}}^* - C_{\text{кеуек}}) \quad (5.19)$$

мұндағы k_a әдетте Аррениус типінің температураға тәуелділігін көрсетеді, $C_{\text{кеуек}}$ – бұл кеуек ішіндегі адсорбат бөлшектерінің сұйық фазасының концентрациялары, ал $C_{\text{кеуек}}^*$ қатты беттегі тепе-теңдікпен кеуек ішіндегі адсорбат бөлшектерінің сұйық фазасының концентрацияларына сәйкес келеді. Одан кейін 5.6 теңдеумен өрнектелген типтің қатынасы C_{pore}^* және қатты беттегі адсорбат концентрациясы қатынасында пайдаланылады.

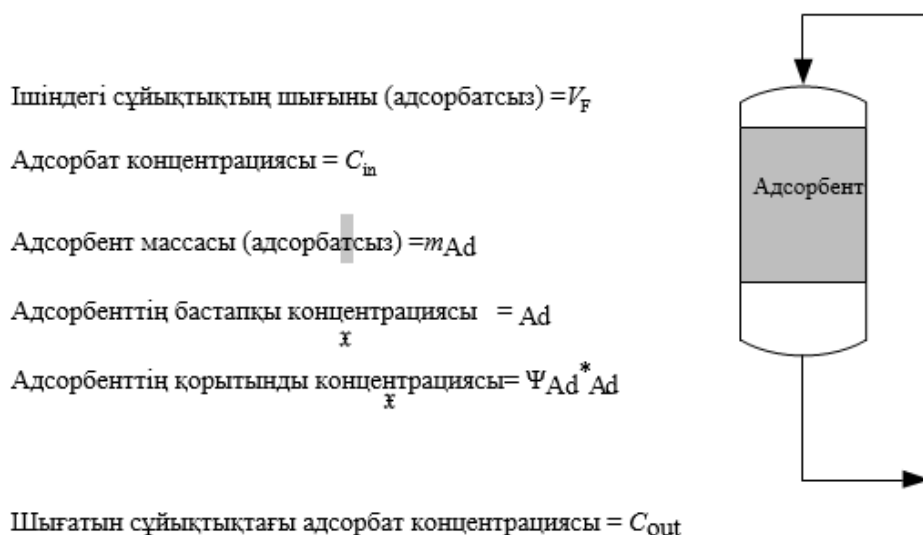
5.3.12 Тепе-теңдік моделі.

Т уақыттан кейін (адсорбент қабаты ауыстырылатын немесе қайта қуатталатын кезде) қол жеткізілетін ағылатын сұйықтықта көрсетілген концентрациямен $C_{\text{шығ.}}$ (масса/көлем бірлігі) тепе-теңдіктегі адсорбенттің бөлшекті жүктемесі мәнінен $\Psi_{\text{ад}}$ құрайтын жылдамдықпен V_F сұйықтықты өңдеу үшін қажетті адсорбент массасын $m_{\text{ад}}$ бағалау үшін 5.7-суретте көрсетілген жүйеге арналған адсорбат массасының жалпы балансы мынаны береді:

$$C_{in}\dot{V}_F t + X_{Ad}m_{Ad} = C_{out}\dot{V}_F t + \Psi_{Ad}X_{Ad}^*m_{Ad} \quad (5.20)$$

мұндағы X_{Ad} – адсорбаттағы бастапқы концентрация (массалық үлесі), X_{Ad}^* – $C_{шығ.}$ сәйкес келетін тепе-теңдік мәні, ал $C_{кір.}$ – өңделетін сұйықтықтағы концентрация. Одан кейін $C_{шығ.}$ және X_{Ad}^* арасындағы байланыс қажет. Егер жүйе Ленгмюр изотермасымен сипаттала алса, 5.6 теңдеуін концентрациялар түрінде келесідей жазуға болады:

$$\frac{X_{Ad}^*}{X_{Ad,sat}} = \frac{K C_{шығ.}}{1 + K C_{шығ.}} \quad (5.21)$$



5.7-сурет. Адсорбция үдерісі

мұндағы $X_{Ad,sat}$ – адсорбенттегі адсорбаттың максималды және қаныққан концентрациясы, аталған жүйе үшін тұрақты, және K бірге эксперименталды деректер бойынша анықталуы тиіс. 5.20 және 5.21 теңдеулерінің бірізгі шешімі m_{Ad} мәнін береді. Осы әдіс адсорбцияның едәуір жылуында пайдалана алмауына назар аударыңыз, себебі жылу қабат температурасын көтеріп, жинала бастайды, бұл $C_{шығ.}$ және X_{Ad}^* арасындағы қатынасқа әсер етеді.

5.3.2 Катализдік үдерістер және реакторлар

Катализикалық реакциялар тығыздалған қабаттарда (қозғалмайтын қабаты бар реакторлар, құбырлы реакторлар және ағысты қабаты бар реакторлар), реакциялық жүйенің түріне және жұмыс ауқымына байланысты жалған сұйықталған қабатта және суспензияның көпіршікті қабаттарында жүргізілуі мүмкін. Одан кейін реакторлардың осы негізгі типтерінің қысқаша сипаттамасы, сондай-ақ масса тасымалдау және реакторды модельдеу үдерісінің сипаттамасы берілген.

5.3.2.1 Тығыздалған қабаты бар реактор. Катализатор бөлшектерінің тығыздалған қабатынан тұратын жылжымайтын қабаты бар реактор, реакцияның үлкен жылуы жоқ баяу реакциялар қатынасында, ірі ауқымдыларға ең қолайлы болып табылады. Газдан немесе сұйық ағындардан тұратын сұйықтық ыдыстағы қабат арқылы төмен ағады. Қабаттағы қысымның ауытқуын бағалау әдісі 3-тарауда сипатталған және бөлшектердің өлшемі мен формасына байланысты. Едәуір ірі бөлшектер қысымның төмендеуін азайтады, бірақ неғұрлым ұсақ бөлшектер жазықтықтың катализикалық белсенділікке арналған қабат көлемінің бірлігіне сай келетін үлкенірек ауданына ие. Беттік ауданның үлкен бөлігі катализатордың кеуектерінде және адсорбенттің бөлшектерінде орналасады және катализикалық белсенділікке қол жетімді алаң катализатордың осы көлемі үшін азаяды. Реактор температураның өзгеруі катализатор конструкциясы мен сыйымдылық тұрғысынан қолайлы болған кезде, адиабаттық реактор ретінде жұмыс істей алады. Экзотермиялық

реакциялар үшін: (i) жылуды бұру үшін салқындатқыш жыланшалар, мысалы, буды генерациялау арқылы, (ii), не ыдыста бірнеше қабаттары болуы мүмкін және бірінші қабаттан ағуларды оның екінші қабатқа түсер алдында жаңа шикізатты араластыру жолымен және т.б. немесе (iii) жекелеген құтыларда бар қабаттар арасында салқындатқыш ортасы бар үстіңгі типті жылу алмастырғышты орнату жолымен салқындатуы мүмкін. Температураны нашар бақылау жергілікті қызуды тудыруы және катализатордың дезактивациясына және реактор қабырғасының балқымасына әкелуі мүмкін. Бұл реакция жылулығы ғана емес, реакцияның жоғары жылдамдығы (жоғары жылдамдық орналасқан аймақтарда жылудың көп мөлшерін тудыруы мүмкін), қабаттағы төмен жылу өткізгіштік (жоғары өткізгіштік жылуды едәуір шашыратуы мүмкін) және жеткіліксіз суыту, бұл жергілікті қызып кетуге әкелуі мүмкін. «Қашу» жағдайы да туындауы мүмкін, себебі едәуір жоғары температура да реакциялар жылдамдығын арттырады (жұмыс кезінде тепе-теңдік нүктесіне тым жақын емес), бұл проблеманы одан әрі қиындатуы мүмкін.

Құбырлы реактор жоғары эндотермиялық реакциялар үшін қолданылады және де «тығыздалған қабаттан» тұрады, бірақ түтікшенің ішінде болады, сондықтан жылу құбырдың сыртынан тиімді берілуі мүмкін. Қысымның төмендеуі екі компонентке ие, бірі түтік қабырғасының әсерін ескере отырып тығыздалған қабатқа байланысты (себебі сұйықтық негізінен қабырға бойымен ағуы мүмкін), ал екіншісі құбырдың жалаңаш қабырғасының үйкелуіне байланысты.

Бүріккіш ағысы бар реакторда реакция беретін газ және сұйық фазалар қатты бөлшектердің (катализатордың) тығыздалған қабаты арқылы тікелей ағумен төмен ағады.

5.3.2.2 Жалған сұйылтылған қабаты бар реакторлар. Осы реактор түрінің артықшылығы катализаторды жүктеу және жою оңай болуынан құралады, бұл катализаторды жиі жоюға, ауыстыруға немесе регенерациялауға тура келген кезде әсіресе пайдалы. Әдетте үлкен өткізу қабілеті бар конверсияның жоғары дәрежесіне қол жеткізуге болады, бірақ бөлшектер уатылуға төзімді болуы және жентектелмеуі тиіс. Циклондар әдетте керуетке бөлшектерді кәдеге жарату үшін орнатылады. Қабаттағы қысымның ауытқуын, сондай-ақ жалған сұйықтықтың минималды жылдамдығын бағалау әдісі 3-тарауда сипатталған және бөлшектердің өлшемі мен формасына байланысты. Бөлшектердің көлемі бойынша тар бөлінуі жақсырақ, бұл ретте сфералық форма үйкелуге барынша төзімді болып табылады. Реакцияның үлкен жылуы температураның біркелкі таралуын сақтай отырып, жалған сұйылтылған қабатта оңай бақылауға болады.

5.3.2.3 Үш фазалы жалған сұйылтылған қабаты бар реактор. Үш фазалы жалған сұйылтылған қабаты бар реакторлар үш фазаның реакциясы үшін пайдаланылуы мүмкін: қатты, сұйық және газды, бірақ синтез-газdan химиялық жанама өнімдерді синтездеу кезінде қатты зат катализатор болып табылады, сұйықтық жылу бұрғыш ретінде әрекет етеді, ал газ құрамында реагент бөлшектері бар. Бөлшектер (катализатордың) айналмалы сұйықтықта суспензияланады, сол арада газ сұйық фаза арқылы жоғары көтеріледі. Үш фазалы жалған сұйылтылған қабаты бар реакторлар жоғары реакция температурасында жиі қолданылады. Бөлшектер үйкелуге төзімді болуы тиіс, ал аз мөлшердегі катализатордың бөлшектері үлкен масса мен жылу беру жылдамдығы үшін қажет, бірақ егер олар тым аз болса, реактордан шығатын газ ағынымен тасымалдануы мүмкін және де бөлшектер кластерлерінің түзілуін тудыруы мүмкін, бұл масса тасымалдау жылдамдығының азаюына әкеледі. Осы типтегі реактордың катализаторды жүктеу және жою қатынасында жалған сұйылтылған қабаты бар кейбір артықшылықтарға ие, бұл катализаторды жиі жоюға, ауыстыруға немесе регенерациялауға тура келетін кезде және үлкен өткізу қабілеті бар конверсияның жоғары жылдамдығында пайдалы. Газ жағында қысымның ауытқуы төмен болуы мүмкін, бұл қуат пен қысу құнын үнемдейді.

5.3.2.4 Жетілдірілген конструкцияның реакторы. Микроканалды технологияны пайдалану реакция жылдамдығын арттыру және жылу беру жылдамдығы мен массасын арттыру есебінен реакторлық жүйенің мөлшерін азайту үшін дамушы сала болып табылады. Осы жинақы реакторлардың миллиметрлік диапазонда өзіндік өлшемдері бар мыңдаған каналдар бар. Катализатормен толтырылған 0,1-10 мм диапазондағы диаметрлі каналдар экзотермиялық реакциялар үшін жылу тасығышпен толтырылған каналдармен

кезектестіріледі. Каналдардың кішігірім өлшемдері жылу берудің жоғары жылдамдығын өткізеді және де нәтижесінде шамадан тыс локалды температураларды немесе ыстық нүктелерді дамытусыз неғұрлым белсенді катализаторларды пайдалануға болады.

11-тарауда талқыланатын мембраналық реакторлар энергетикалық қондырғыларда пайдалану үшін тағы бір перспективалық технология болып табылады. Осы реакторлар реакция өнімін бөлу үшін жоғары температуралы мембраналарды пайдаланады, себебі олар едәуір жоғары конверсия жағына тепе-теңдік үшін түзіледі, ал әдеттегі конверсия реакторларында тепе-теңдікпен шектеледі.

5.3.2.5 Реактордың модельдері. Реакторға арналған тасымалдау моделі, ол әдетте екі бөлшекті (реагентті) катализатордың бетіне қарай жылжытуға және реакция өнімдерін қарама-қарсы бағытта көшіруге әкеп соқтыратынын қоспағанда адсорбция үдерісі үшін жазылған үлгіге ұқсас. Осы жүйе үшін тән болатын, реакция жылдамдығы үшін кинетикалық өрнек талап етіледі. Мысалы, кешенді газдандырудың қазіргі біріктірілген циклдарында кездесетін су газының ығысу реакциясының жалпы кинетикасына арналған өрнек $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ (газ турбинасында оны жағу алдында синтез-газды декарбонизациялауды қамтитын) екі реакция өтетін молекула адсорбцияланады, ал адсорбцияланған молекулалар бимолекулярлық реакцияға ұшырайды деген болжамда алынған Ленгмюр-Хиншелвуд түріндегі өрнек болып табылады. CO-ның, атап айтқанда, Fe (Подольски және Ким, 1974) негізіндегі катализатордағы айналу жылдамдығы келесідей анықталады:

$$r_{\text{CO}} = kK_1K_2 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}} p_{\text{CO}} - p_{\text{H}_2} p_{\text{CO}_2} / K_p}{(1 + K_1 p_{\text{CO}} + K_2 p_{\text{H}_2\text{O}} + K_3 p_{\text{CO}_2} + K_4 p_{\text{H}_2})^2}$$

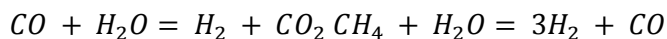
мұндағы k және K_p – жылдамдық және су газының ығысу реакциясына арналған тепе-теңдіктің жалпы константалары, ал K_1 , K_2 , K_3 және K_4 – CO, H₂O, CO₂ және H₂ арналған адсорбциялық тепе-теңдік константалары.

Жалпы алғанда, модель беттік реакциямен және кейінгі десорбциямен өтетін адсорбция жылдамдығын ескеруі тиіс, олар осы жылдамдықпен бақыланатын үдерісте шешуші рөл атқара алады. Реакция жылдамдығының жалпы өрнегін жеңілдету, әрине, осы үш кезеңнің қайсысы (адсорбция, беттік реакция немесе десорбция) бақылаушы болып табылатынын анықтаудың арқасында мүмкін болды.

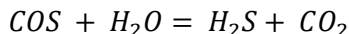
Көлемдік тепе-теңдік моделі жақындау ретінде пайдаланылуы мүмкін. Мысал ретінде төменде адиабаттық реактор жағдайында шығатын газдардың және температураның құрамын, және шығуда талап етілетін температураны үшін адиабаттық емес реактор жағдайында жылу берудің талап етілетін жылдамдығын анықтау үшін есептеу әдістері төменде сипатталған. Осы иллюстрация үшін H₂O және CO₂ қосылып, шикізат құрамы, қысым және температура, сондай-ақ реактордағы қысымның ауытқуы сияқты конструктивтік параметрлердің берілген жиынтығымен, синтез-газды түзу (бірінші кезекте H₂ және CO қоспалары, бірақ бұдан басқа, реактордан шығатын ағында түзілетін CO₂ және реакцияға түспеген H₂O және CH₄ бар реактордан шығатын ағын) арқылы өтетін бу-метанды риформер таңдалды.

Осындай есептер термодинамикалық тепе-теңдікке тәсілді сандық түрде анықтайтын, термодинамикалық тәуелсіз реакциялардың әрқайсысы үшін элементтік баланстардан, энергетикалық баланстан және реакция коэффициенттерінен тұратын бір мезгілді теңдеулер жүйесін шешу жолымен орындалады. Осындай термодинамикалық модель жүйелі зерттеулерде жиі пайдаланылады, мұндағы реактордың қалдық ағынының құрамы мен температурасы (немесе жылу берудің жалпы коэффициенті) сандық түрде анықталуы және де реактордың көлемін тәжірибе жасау жолмен анықтауға болатын кезде өткізілуі тиіс. Реактордың көлемін (және каталитикалық реакторға қажетті катализатордың санын) анықтау үшін реакцияның кинетикасын ғана емес, сондай-ақ осы жылдамдық үдерістерінің қайсысы болып табылатынына немесе бақылануына байланысты жылу массасын тасымалдаудың бұрын сипатталған моделі эмпирикалық емес түрде қажет. Реакция кинетикасының моделі осы катализатордың сипаттамаларына тәуелді болуына назар аударыңыз.

Термодинамикалық тәуелсіз реакциялар:



Келесі реакция H_2S және/немесе COS болғанда ескерілуі тиіс және осы жағдайда COS гидролиздей алатын күкіртке тұрақты болатын катализатор пайдаланылады:



Элементтік баланстардың әрбіреуі «инерттер» секілді біртұтас мәнге біріктірілген, реакция етпейтін элементтермен теңдеулердің келесі жиынтығын береді:

Н (сутек) балансы:

$$4\dot{M}_{шыф.,CH_4} + 2\dot{M}_{шыф.,H_2} + 2\dot{M}_{шыф.,H_2O} = \dot{M}_H \quad (5.22)$$

С (көміртек) балансы:

$$\dot{M}_{шыф.,CH_4} + \dot{M}_{шыф.,CO} + \dot{M}_{шыф.,CO_2} = \dot{M}_C \quad (5.23)$$

О (оттегі) балансы:

$$\dot{M}_{шыф.,CO} + 2\dot{M}_{шыф.,CO_2} + \dot{M}_{шыф.,H_2O} = \dot{M}_O \quad (5.24)$$

S балансы (күкірт қосылыстары болған кезде):

$$\dot{M}_{шыф.,H_2S} + \dot{M}_{шыф.,COS} = \dot{M}_S \quad (5.25)$$

Инертті баланс:

$$\sum \dot{M}_{шыф.,I} = \sum \dot{M}_I \quad (5.26)$$

мұндағы $\dot{M}_{шыф.,CH_4}$, $\dot{M}_{шыф.,H_2}$, $\dot{M}_{шыф.,H_2O}$, $\dot{M}_{шыф.,CO}$, $\dot{M}_{шыф.,CO_2}$, және $\dot{M}_{шыф.,I}$ – бұл шығатын реакторлардағы әрбір түрінің молярлық жылдамдығы әрі $\dot{M}_H, \dot{M}_C, \dot{M}_O, \dot{M}_S$, және $\dot{M}_I$ реакторға арналған шикізаттағы атомдық элементтердің немесе инертті бөлшектердің әрбіреуіне жалпы мольдар болып табылады.

Одан кейін тепе-теңдік тұрғысынан:

Риформинг реакциясы:

$$\frac{\dot{M}_{шыф.,H_2}^3 \dot{M}_{шыф.,CO}}{\dot{M}_{шыф.,CH_4} \dot{M}_{шыф.,H_2O} \dot{M}_{шыф.,жалпы}^2} = K_R \quad (5.27)$$

Орын ауыстыру реакциясы:

$$\frac{\dot{M}_{шыф.,H_2} \dot{M}_{шыф.,CO_2}}{\dot{M}_{шыф.,CO} \dot{M}_{шыф.,H_2O}} = K_S \quad (5.28)$$

COS гидролизінің реакциясы:

$$\frac{\dot{M}_{шыф.,H_2S} \dot{M}_{шыф.,CO_2}}{\dot{M}_{шыф.,COS} \dot{M}_{шыф.,H_2O}} = K_H \quad (5.29)$$

мұндағы $\dot{M}_{шыф.,жалпы}$ – реактордан ағынның жалпы молярлық жылдамдығы, K_R , K_S және K_H –

толық емес реакцияларды ескеру үшін белгілі бір эмпирикалық температура кезінде үш реакцияға арналған тепе-теңдік константаларына сәйкес келетін реакция коэффициенттері (рифформинг реакциясы үшін ағынның нақты температурасынан төмен, себебі осы реакция эндотермиялық болып табылады және жылжу реакциясы үшін ағынның нақты температурасынан жоғары).

Реактордағы энтальпия балансымен бірге, жоғарыда келтірілген сегіз теңдеу (5.22)-(5.29) адиабаттық реактор жағдайында ағынның құрамы мен температурасын немесе адиабаттық емес реактор жағдайында жылуды сіңіру (немесе бөлу) жылдамдығын анықтауға мүмкіндік береді. K_u (осы мысалда K_R , K_S және K_H) мольдік үлестерге негізделгеніне, $aA + bB \leftrightarrow cC + dD$ реакциясы үшін ол туралы 2-тарауда айтылған K_P -мен байланысуына назар аударыңыз:

$$K_y = K_p P^{(a+b-c-d)}$$

5.3-мысал. Қозғалмайтын қабаты бар реакторға берілістің келесі құрамы (мольдегі) бар: 20% CO , 10% CO_2 , 22% H_2 және 40% H_2O , қалғанын N_2 құрайды және реактордан $391^\circ C$ температурасында шығады. Катализатор шығатын құрам реактор шығысындағы нақты температураны $14^\circ C$ -ден ($14^\circ C$ «жақындау температурасы» $14^\circ C$) асатын температура кезінде тепе-теңдік құрамға сәйкес келетін кейбір мөлшерді төзгеннен кейін шегінетін газдар құрамын есептеңіз.

Шешім

CH_4 және NH_3 түзумен кез келген күкірттен немесе гидрациялауға ұшырайтын HCN еркін болатын шығыс газымен "жұмсақ" ығыстырылатын реактор жағдайында сияқты, жалғыз термодинамикалық тәуелсіз реакция жағдайында шешім реакцияға X молярлық конверсиясын шешу жолымен жеңілдетіледі. Ығыстыру реакциясының стехиометриясын ескере отыра, ағындардағы мольдік үлестер $y_{CO} - X$, $y_{CO_2} + X$, $y_{H_2} + X$, $y_{H_2O} - X$ болады.

Онда:

$$\frac{(y_{H_2} + X)(y_{CO_2} + X)}{(y_{CO} - X)(y_{H_2O} - X)} = K_S$$

немесе

$$(1 - K_S)X^2 + [y_{CO_2} + y_{H_2} + K_S(y_{CO} + y_{H_2O})]X + (y_{CO_2}y_{H_2} - K_S y_{CO} + y_{H_2O}) = 0$$

$391+14=405^\circ C$ температурасына (экзотермиялық реакция үшін тепе-тең конверсияға қарағанда аз конверсияны беретін шығудағы нақты температурадан жоғары) сәйкес келетін $K_S = 15,26$ бар осы теңдеудің шешімі, $X = 0,17$ береді, бұл мольге 3% CO , 27% CO_2 , 39% H_2 және 23% H_2O ағындарының құрамына әкеліп соқтырады.

ӘДЕБИЕТ

- Bennett DL, Agrawal R, Cook PJ. New pressure drop correlation for sieve tray distillation columns. *AIChE J* 1983;29(3):434-442.
- Bird RB, Stewart WE, Lightfoot EN. **Transport Phenomena**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.; 2007.
- Brunauer S, Emmett PH, Teller E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. *J Am Chem Soc* 1938;60:309-319.
- Burgess JM, Calderbank PH. The measurement of bubble parameters in two-phase dispersions- II: The structure of sieve tray froths. *Chem Eng Sci* 1975;30(7):1107-1121.
- Carberry JJ. **Chemical and Catalytic Reaction Engineering**. New York: McGraw-Hill; 1976.
- Chilton TH, Colburn AP. Mass transfer (absorption) coefficients prediction from data on heat transfer and fluid friction. *Ind Eng Chem* 1934;26(II):II83-II87.
- Fenske MR. Fractionation of straight run Pennsylvania gasoline. *Ind Eng Chem* 1932;24:482.
- Garcia JA, Fair JR. A fundamental model for the prediction of distillation sieve tray efficiency. 1. Database development. *Ind Eng Chem Res* 2000;39(6):1809-1817.
- Geddes RL. Local efficiencies of bubble plate fractionators. *Trans Am Inst Chem Eng* 1946;42:79.
- Green DW, editor. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8th ed. New York: McGraw-Hill; 2007.
- Hughmark GA. Models for vapor-phase and liquid-phase mass transfer on distillation trays. *AIChE J* 1971;17:1295.
- King CJ. **Separation Processes**. Mineola, NY: Courier Dover Publications; 2013.
- Koziol A, Mackowiak J. Liquid entrainment in tray columns with downcomers. *Chem Eng Process Process Intensif* 1990;27(3):145-153.
- Krishna R, Standart GL. Mass and energy transfer in multicomponent systems. *Chem Eng Commun* 1979;3(4-5):201-275.
- Levenspiel O. **Chemical Reaction Engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1972.
- Madigan CM. Pressure drop and stability characteristics of Sieve Tray columns [doctoral dissertation]. New York: New York University; 1964.
- Neuberg HH, Chuang KT. Mass transfer modeling for GS heavy water plants. *Can J Chem Eng* 1982;60:504-510.
- Palla R. Meeting Staged CO₂ Capture Requirements with the UOP SELEXOL™ Process. Gasification Technologies Conference; October 2009; Colorado Springs, CO.
- Parente JO, Traverso A, Massardo AF. Saturator analysis for an evaporative gas turbine cycle. *Appl Therm Eng* 2003;23(10):1275-1293.
- Piche S, Levesque S, Grandjean B, Larachi F. Prediction of HETP for randomly packed towers operation: integration of aqueous and non-aqueous mass transfer characteristics into one consistent correlation. *Sep Purif Technol* 2003;33(2):145-162.
- Podolski W_F, Kim YG. Modeling the water-gas shift reaction. *Ind Eng Chem Process Des Dev* 1974;13(4):415-421.
- Poling BE, Prausnitz JM, O'Connell JP. **The Properties of Gases and Liquids**. 4th ed. New York: McGraw Hill; 2001.
- Prado M, Fair JR. Fundamental model for the prediction of sieve tray efficiency. *Ind Eng Chem Res* 1990;29(6):1031-1042.
- Rachford HH, Rice JD. Procedure for use of electrical digital computers in calculating flash vaporization hydrocarbon equilibrium. *J Petrol Tech* 1952;4(10):19.
- Rao AD, inventor; Fluor Corporation, assignee. Process for producing power. US patent 4,829,763. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office; 1989, May 16.
- Reddy S, Johnson D, Gilmartin J. Fluor's Econamine FG PlusSM Technology for CO₂ Capture at Coal-fired Power Plants. Power Plant Air Pollutant Control "Mega" Symposium; August 2008; Baltimore, MD.
- Souders M, Brown GG. Design of fractionating columns I. Entrainment and capacity. *Ind Eng Chem* 1934;26(1):98-103.
- Treybal RE. **Mass Transfer Operations**. New York: McGraw-Hill; 1980.
- Underwood AJV. Fractional distillation of multicomponent mixtures. *Chem Eng Prog* 1948;44(8):603-614.
- Wakao N, Funazkri T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds: correlation of Sherwood numbers. *Chem Eng Sci* 1978;33(10):1375-1384.
- Wang GQ, Yuan XG, Yu KT. Review of mass-transfer correlations for packed columns. *Ind Eng Chem Res* 2005;44(23):8715-8729.
- Zuiderweg F. Sieve trays—A review on the State of the Art. *Chem Eng Sci* 1982;37:1441.

6

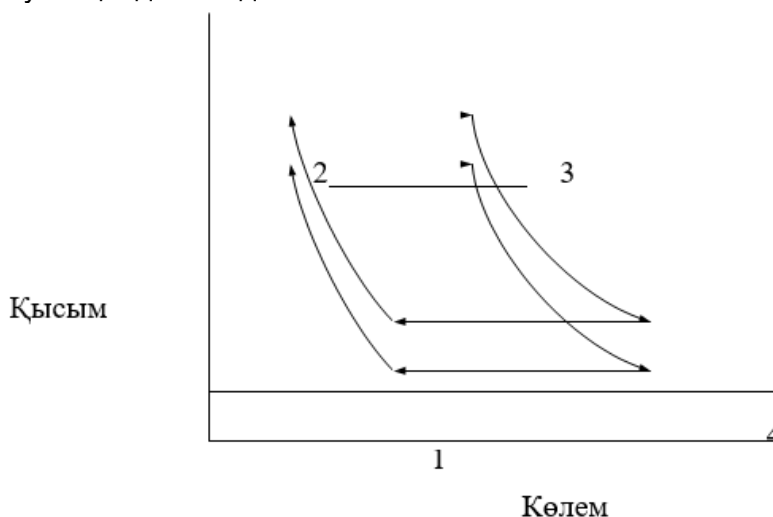
БАСТАПҚЫ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАР

Бастапқы қозғалтқыш болып, энергияны (механикалық емес) жұмысқа айналдыратын машина және осындай машиналардың мысалдары ретінде газ турбины, бу турбины, поршеньдік іштен жану піспекті қозғалтқыш және гидравликалық турбиналар болып табылады. Бұл машиналарды электр энергиясын алу үшін генераторларды айналдыру үшін немесе компрессор немесе сорғы сияқты басқа машинаны жүргізу үшін пайдалануға болады. Кейіндеу 12-тарауда талқыланатын басқа да бастапқы қозғалтқыштың тағы бір мысалы жел турбины болып табылады.

Газ турбины сияқты бу турбины және піспекті іштен жану қозғалтқышы барлық жылу қозғалтқыштары болып табылады, яғни жылу энергиясын жұмыс энергиясына айналдырады, ал гидравликалық және жел турбиналары қолданыстағы кинетикалық энергияны жұмыс күшіне айналдырады.

Гидравликалық турбиналар жағдайында сұйықтық қысыммен немесе жинақталған әлеуетті энергиямен сұйықтық болып табылады, содан кейін сұйықтық турбинаға кіргенде сұйықтықтың кинетикалық энергиясына айналады.

Газ турбины сияқты піспекті іштен жану қозғалтқышы «ауамен тыныс алу» машиналары болып табылады, ал егер оларға жақын жерде тұтанатын бу шығып кетсе, онда қозғалтқыштың ауа қабылдағышына бумен қозғалу мүмкіндіктері бар, олар отын ретінде әрекет етеді және мұндай жағдайларда қозғалтқыштың жұмысын тоқтату талап етіледі. Екінші жағынан, кейбір газ турбиналары газды турбиналық жану камерасында бөлу немесе тотығу мүмкін болса, ауадағы әлдеқайда төмен концентрациялар болса да, булармен ластанған «таза» ауаға қолданылады.



6.1-сурет. Брайтонның ауа-стандартты циклы

6.1 ГАЗ ТУРБИНАЛАРЫ

«Ауа-стандартты циклы¹» түріндегі Брайтон циклы 6.1-суретте көрсетілген (Cengel and Boles, 1998; Smith et al., 2005) және газды адиабатикалық қысудан (нүктелік жағдайынан 1-ден 2-ге дейінгі), содан кейін тұрақты қысымда жылууды газға қосумен жалғасады (нүктелік жағдайынан 2-ден 3-ге дейін), содан кейін қысыммен (3-тен 4-ге дейін) қысым жағдайында қыздырылған ауаның адиабатикалық кеңеюі. Цикл американдық инженер Джордж Брайтон құрметіне аталған. Бұл циклды қамтитын механизм – бұл газ турбины, кейде қызу қысыммен ауадағы тиісті отын түрлерін жағу арқылы қосылатын жану турбины деп аталады. Мінсіз циклден айырмашылығы жану камерасында қысымның төмендеуі бар, әдетте шамамен 4% болады. Цикл арқылы өндірілген таза жұмыс кеңейту сатысында (турбинада) және қысу кезеңінде (компрессорда) тұтыну арасындағы айырмашылық болып табылады. Қазіргі заманғы газ турбиналарында компрессор үшін қажетті жұмыс турбинаның жартысын құрайды, қазіргі заманғы газ турбиналарының қуаты (қолданылатын өлшемі) 1600°C дейін жететін жоғары кіріс температурасына ие болады. Осы циклдың жабық және ашық формалары пайдаланылады, ал ең көп таралғаны ашық цикл болып табылады.

Жабық циклда жұмыс сұйықтығы (газ) жұмыс істейтін сұйықтық пен жылу көзі арасында жылу алмасуы немесе бетінің типті жылу алмастырғыштары арқылы өтетін жылу алмасу жұмыс істейді. Мұндай цикл сонымен қатар ішкі жану турбинындағыдай «тікелей циклге» қарағанда «жанама цикл» деп аталады. Жанама газ турбиналық циклындағы жылу көзі 9-тарауда талқыландыдай көмір немесе биомасса сияқты «лас» жанармайдың жануынан туындаған қызған жану өнімдерінен тұруы мүмкін не ол ядролық реакция арқылы жылытылатын не болмаса айналармен шоғырлануы мүмкін 12-тарауда сипатталғандай күн сәулесінің қызуы.

Жылу алмасқаннан кейін жылу алмастырғыштан кейінгі кеңістіктегі газды жылу алмасу жабдығы арқылы сығымдау сатысына жанама қозғалыспен жабық циклға әкелетін циклды аяқтау үшін жіберіледі.

6.1.1 Әрекет ету қағидасы

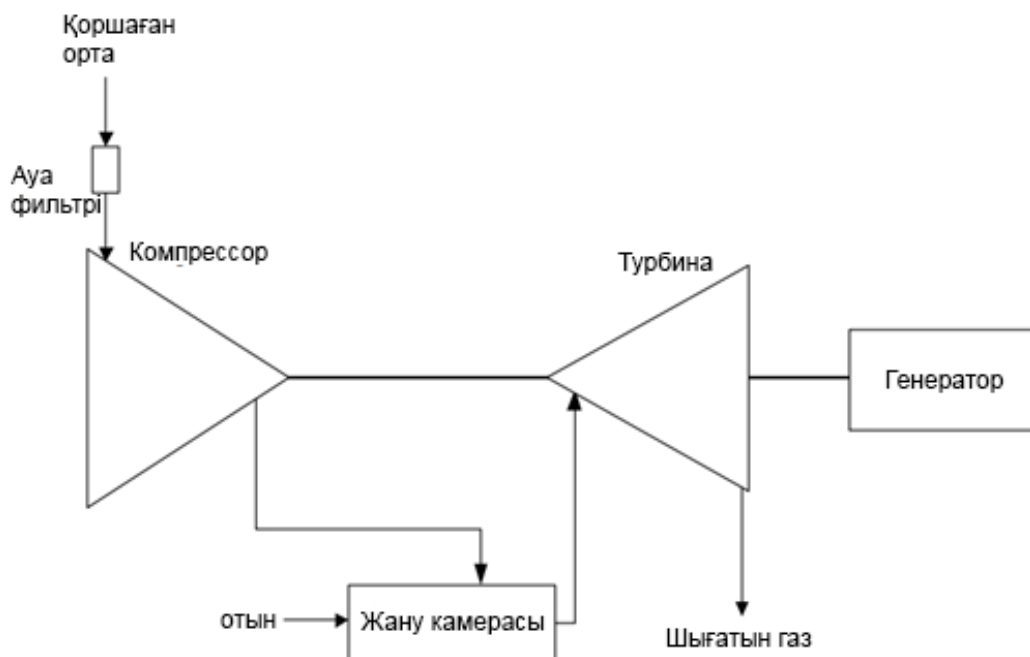
6.2-суретте көрсетілгендей, ашық цикл түріндегі «қарапайым цикл» газ турбинында жаңа (сүзгіден өткізілген) ауа сығымдау сатысына шығады және жылу «таза» жанармайды тікелей жағу арқылы қосылады (мысалы, табиғи газ, дистиллят, дистиллятты мұнайлы жанармай мен инъекциялық ауада көмір немесе биомасса сияқты «лас» жанармайды газдандыру арқылы синтез газы өндіріледі). Жану өнімдері кеңейту сатысына енеді, ал кеңейту кезеңі аяқталғаннан кейін айналымсыз жылу энергиясы газбен жойылады. Кейбір жағдайларда, металдар мен күкірт құрамына байланысты «ластанған» мұнайдан алынған ауыр майлар тікелей газ турбинына шығарылады. Газ турбины бұл жағдайда отынның осы түріне жататын металдар мен күкірттің жағымсыз әсерлерін барынша азайту үшін турбина кірісінде төмен температураларда жұмыс істейді, бұл өнімділік пен тиімділіктің төмендеуіне әкеледі. 3.29 теңдеуіне назар аударсаңыз, кеңейту кезінде пайда болған қуат жұмысшы сұйықтықтың кірісіндегі абсолюттік температураға тікелей пропорционалды екені көрінеді.

Бұл циклдың әр түрлі формалары бар, ал ең көп таралғаны – жоғарыда сипатталған қарапайым цикл. Аралық салқындату төмен қысымды компрессордың және жоғары қысымды компрессордың арасындағы үстемені енгізу арқылы қысу сатысында енгізілуі мүмкін. Аралық салқындату өте жоғары жалпы қысу коэффициенттері үшін бірінші заң негізінде негізделеді, ал аралық салқындатқыш үшін оңтайлы орналасу төмен қысымды компрессордағы қысым қатынасы жоғары қысымды компрессорға қарағанда әлдеқайда төмен болады.

Жылуды арттырып қосу сатысына шықпас бұрын компрессордан шығарылған ауаның

¹ Идеалдық цикл тұйықталған циклға жақын, онда жану үдерісі жылу алмастырғыш арқылы жылу қосумен алмастырылады, бұл ретте жұмыс сұйықтығы толығымен өзін мінсіз газ ретінде көрсететін ауадан тұрады және барлық процестер ішкі қайтымды болып табылады.

турбиналық шығарындыларына қатысты алдын ала қыздырылуы мүмкін, бұл «қалпына келтіру циклына» алып келеді. Екі аралық салқындату және қалпына келтіру циклға қосылған кезде аралық салқындатқыш жүйесінің оңтайлы орналасуы төмен қысымды және жоғары қысымды компрессордың қатынасы олардың кіріс температурасына байланысты бірдей болады.



6.2-сурет. Ашық циклдағы газ турбины

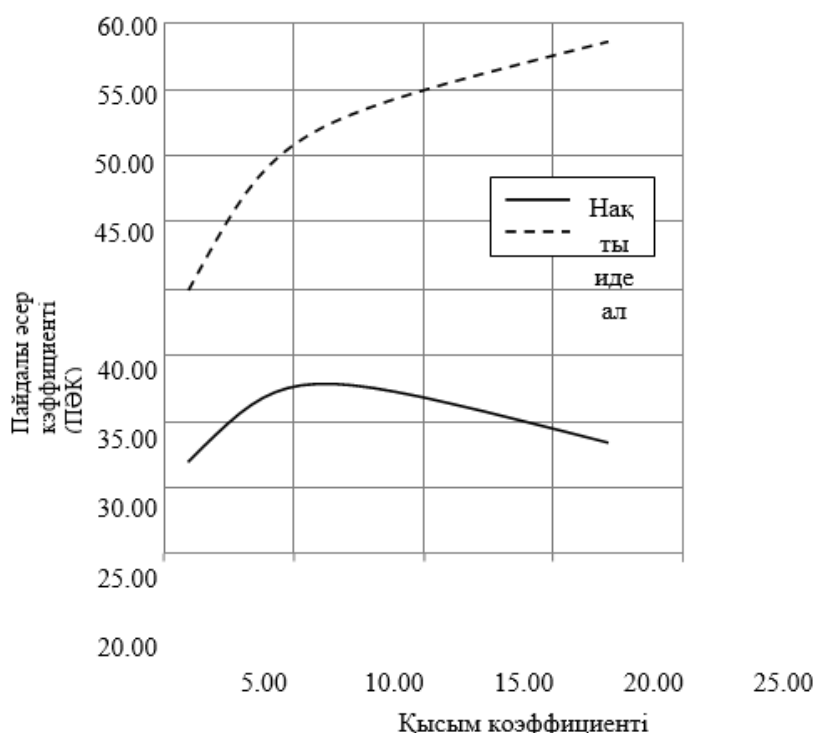
Газ турбины арқылы өндірілетін пайдалы энергия генераторды айналдыру арқылы электр энергиясына айырбастаудың орнына компрессор секілді басқа айналмалы жабдықты механикалық қуат ретінде қолдануға болады. Ұшақтардың реактивті қозғалтқышы газ турбины болып табылады, тек қозғалтқыштың қуаты турбинаның шығарылуынан басталады, ал турбина компрессорды басқару үшін жеткілікті қуат шығарады.

Неғұрлым ірі масштабтағы жердегі газ турбиналарының екі түрі бар: ауыр рамалы қозғалтқыштар мен ауа қозғалтқыштары. Ауыр рамалық қозғалтқыштар қысу коэффициенттерімен сипатталады, олар төмен және физикалық тұрғыдан үлкен болады. Көпшілік қаңқалы қозғалтқыштардың қысу коэффициенті 15-тен төмен болған, бірақ қысу коэффициенті турбиналық кірістегі көтерілетін температураны толық пайдалану үшін тұрақты түрде артып, қазіргі заманғы газ турбиналарының кейбіреулерінің қысу коэффициенті 25 дейін жақындайды. Аэродинамикалық қозғалтқыштар, аты аталғандай, реактивті қозғалтқыштардан алынады және қысқару коэффициенттеріне ие, олар әлдеқайда жоғары және ықшам болып келеді. Газ турбиналық компрессорға ауа ағынының бірлігіне шығарылатын таза қуаты ретінде анықталған нақты шығу қуаты қысымның арақатынасымен үнемі артады, ал пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) белгілі бір қысым арақатынасында шыңның мәнін көрсетеді және турбинаның кіріс температурасымен қатар артады. 6.3-суретте қысу коэффициентінің қысымы немесе қысымы стандартты газ турбинының қарапайым циклмен 980°C температурасында кіретін қарапайым циклдің ПӘК-іне, компрессор мен турбинаның изэнтроптық тиімділігі 100%, екіншісі шынайы мәндермен кішігірім газ турбиналары үшін әсер етеді (83% компрессорға және 86% турбина үшін). Графиктер, циклдарды талдау кезінде компоненттердің нақты емес тиімділігін пайдаланғанда, яғни бұл жағдайда қысымның артуымен тиімділіктің артуы туралы толық қате қорытындыға келу мүмкін екендігін көрсетеді.

Газ турбинының қарапайым циклдық конфигурацияда оңтайлы қысым қатынасы (яғни аралық салқындату немесе қалпына келтірусіз) қарапайым қолданылатын циклға қарағанда (аралас циклдарда газ турбинынан шығатын кезде пайдаланылған кезде) әлдеқайда төмен болады (мұнда шығатын газдардың жылуы атмосфераға жоғалтты). Бүкіл аралас циклдың тиімділігі газ турбинының қысымның арақатынасын оңтайландыру үшін пайдаланылады, бұл жүйенің жалпы құнына әсер етеді. Үлкен ауыр рамалары бар

қозғалтқыштар аралас циклдарда қолдануға арналған және олар да нақты өзіндік құны бар (кВт үшін \$ есептеу).

Электр энергиясына сұраныс күнделікті және маусымда өзгереді. Мысалы, өндіруші кәсіпорын тәуліктің және аптаның кез келген уақыты ішінде жұмысын бастап және тоқтата алады, ал кондиционерлерді (салқындатқыш-жылытушы) маусымдық түрде қосып және өшіруге болады. Электр энергиясының ең көп мөлшері тұтынушыларға жыл бойы талап етілетін электр қуатының «негізгі жүктемесінен»² асатын ең жоғары жүктеме кезеңінде талап етіледі. Газ турбиналары алғаш рет электр энергетикасында қолданылған кезде газ турбиналары арқылы өндірілетін электр энергиясының басым бөлігі «ең жоғары жүктеме» режимінде жұмыс істеуге арналды. Алайда сол уақыттан бері тиімділігі мен сенімділігі артып, газ турбинасы негізгі жүктемені генерациялауда көбірек қолданылады. Газ турбиналарынан шығатын газ будың турбинасында қосымша электр қуатын өндіру үшін қалпына келтірілгенде, 9-тарауда егжей-тегжейлі баяндалғандай, аралас циклға әкеледі, негізгі жүктеме кезінде электр энергиясын өндіруге немесе үдерісті, не аудандық жылытуды қамтамасыз етуге қолайлы болады, нәтижесінде 10-тарауда сипатталғандай, ЖЭО не болмаса когенерационды қондырғылары пайда болады.



6.3-сурет. Газ турбинасының қысу коэффициентінің ПӘК-ке әсері

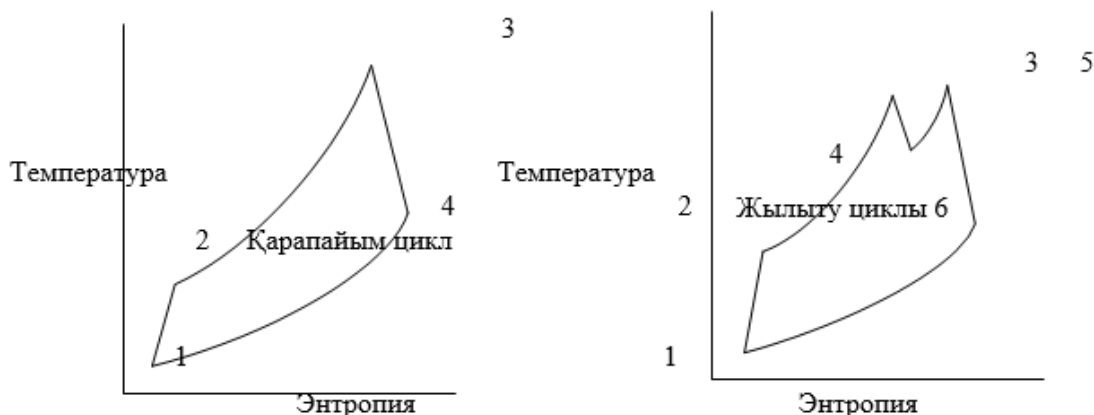
Газ турбинасының ПӘК-і кеңею кезеңіне кіретін жұмыс сұйықтығының температурасы максималды болған кезде максималды болып табылады, себебі кеңейту жұмыстары максималды болып табылады және бұл күйде стехиометриялық жағдайда сығылған ауаның болуы кезінде отын жағылады. Дегенмен табиғи газды стехиометриялық жағдайда ауа арқылы жағу кезінде жану өнімдерінің температурасы 1940°C-ден (3500°F) асып кетеді (жану ауа температурасына байланысты), ол материалдар бойынша өте жоғары болады. Демек жану өнімдерінің температурасын азайту үшін жану сатысында жанармай сатысында көп мөлшерде артық ауаны қолдану қажет, бұл температура келесі тармақта сипатталғандай, турбинаға және ыстық бөліктерге арналған салқындатқыш технологияға әсер ететін факторлармен шектеледі. Жану камерасындағы сығылған ауаның үлкен мөлшерін қолдану

² «Экзотикалық» конструктивті материалдары заманауи газ турбиналарында жоғары тиімділікке қол жеткізу үшін қажетті экстремалды жұмыс температурасына төтеп беру үшін қажет және бұл материалдар әдетте төмен жылу циклдауға төзімге ие болады. Осылайша, газ турбиналарын өндірушілер жылына бір рет іске қосу санын қатаң шектеп, қазіргі заманғы газ турбиналарының өнімділігін қамтамасыз етеді.

қажеттілігі циклға үлкен зиянды (паразиттік) жүктемені тудырады, өйткені ауа қысымы цикл арқылы өндірілетін пайдалы қуатты азайтатын, сондай-ақ циклдың жалпы тиімділігін төмендететін механикалық энергияны қажет етеді.

Газ турбиналарын алғаш енгізілген кезден бастап турбиналық кіріс температурасы тұрақты түрде өсіп келеді, ал қазіргі заманғы газ турбиналары турбоагрегаттың айналмалы қалақшаларының бірінші жиынтығы (сондай-ақ жану температурасы немесе ротордың кіріс температурасы деп аталады) шамамен 1300-1400°C шамасында кіріс температурасына ие болады. Жиырмасыншы ғасырдың ортасында ол 900°C болған. Бұл жану температурасының ұлғаюы жоғары температураларда турбиналық компоненттердің (ыстық газдармен байланысқа түсетін) қабілеттілігімен мүмкін болады. Газ турбиналық компрессордан шығатын қысылған ауаның айтарлықтай көлемі осы турбиналық компоненттерді салқындату үшін пайдаланылады, олардың пайдаланылатын қорытпаларына байланысты 800-ден 950°C-ге дейін өзгеруі мүмкін конструкция шектерінде металл температурасын ұстап тұру үшін, ал турбиналар арқылы өтетін газ жетуі мүмкін температура 1300-1400°C дейін жетеді. Турбины қалақшаларды салқындату кезінде салқындатқыш ауа турбиналық пышақтарға салынған ішкі арналардан және ашық сұлбалық ауаны салқындатудан (қазіргі уақытта қолданылып жүрген) ауысады, сол кезде ауа пышақтың стратегиялық нүктелерінде орналасқан тесіктер арқылы өтеді, пышақтардың сыртында орналасқан сұйықтықпен қатар қолданылады. «Үлдірмен салқындатылған» кезде ауа жүзі пышақтың сыртқы бетінде оқшаулайтын қабат қалыптастырады (жабық тұйықталу кезінде салқындатудың ашық сұлбасының артықшылығы). Турбинаның ыстық бөлігін турбоагрегатқа салқындату қажеттілігі газ турбинының жалпы тиімділігін шектейді, өйткені салқындатқыш ауа турбоагрегат арқылы араластыратын ыстық газдың (жұмыс сұйықтығының) температурасын төмендетеді. Бұдан әрі 6.1.6-бөлімде талқыланатындай, ауа салқындатқышқа деген қажеттілікті барынша азайту үшін керамика мен турбиналық салқындатуды қоса алғанда материалдарды өңдеу технологиялары әзірленуде. Керісінше, озық материалдар мен салқындатқыш технологиялардың арқасында ауа ағынының қажеттілік деңгейін айтарлықтай арттырмай, турбоагрегаттың температурасын көтеруге болады, ол тағы циклдың жалпы тиімділігін арттыруға әсер етеді. Қозғалтқыштың нақты шығу қуаты көбейтіледі, бұл әдетте жабдықтың өзіндік құнының төмендеуіне әкеледі (егер қозғалтқышта жоғары тиімділікке және арнайы шығу қуатына жету үшін пайдаланылатын материалдар тым экзотикалық болмаса).

Тиімділікті арттырудың басқа тәсілдері бу салқындату, бұл аралас циклдарда газ турбинысын пайдалану кезінде мүмкін болатын тұйық циклды қамтиды. 1300-1400°C аралығындағы жану температурасымен ауаны салқындатуға арналған заманауи газ турбиналарында, салқындату үшін 25% дейін қысылған ауа қолданылған. Жабық циклдағы газ турбинысында буды салқындату ауа көп салқындату қажет болмай жану температурасын арттырудың тиімді әдісін ұсынады. Сонымен қатар өте үлкен жылу сыйымдылығы жоғары бу керемет салқындатқыш болып саналады. Жабық циклды салқындату да турбинадағы импульсты жоғалтуды және сұйылтуды азайтады (ашық сызбанұсқада салқындаған кезде суыту ауасы қалақшаның сыртында жұмыс істейтін сұйықтықпен араласқан кезде пайда болуы мүмкін), ал турбина ішінара қайтадан төменгі цикл үшін жұмыс істейді. Жабық тұйықталған салқындатудың тағы бір маңызды артықшылығы – жану камерасының шығыс газдары мен турбиналық ротордың кіріс газы арасындағы температуралық айырмашылық төмендейді, себебі бірінші сатыдағы турбиналық шашқыштарда қолданылатын салқындатқыш бекітілген қалақшалардан келетін газдармен араласпайды. Осылайша, жану камерасынан шыққан кезде қажетті температура жану температурасы үшін төмендейді, бұл NOx шығарындыларының азаюына әкеледі. Осындай жоғары жану температураларында NOx шығарындыларын азайту маңызды мәселе болып табылады. General Electric H сериясының газ турбиналары жоғары қысымды турбина сатыларының стационарлық және айналмалы жүздерінің буын салқындатуды қамтиды, ал Siemens және Mitsubishi G серияларының газ турбиналары жоғары қысымды стационарлық қалақшалармен суды салқындатуды қамтиды.



6.4-сурет. Газ турбинасының қарапайым және жылыту циклы

6.4-суретте көрсетілгендей, негізгі Брайтон циклының кеңейту кезеңінде қыздыру, осы цикл тиімділігі үшін жану температурасын төмендету үшін пайдаланылуы мүмкін. Қарапайым циклдық жағдай үшін көрсетілген күй нүктелері 6.1-суретте көрсетілген нүктелерге сәйкес келеді. Газ турбинасын қыздыру циклы үшін жоғары қысымды жану камерасы бар (2-3 күй нүктелері осы жоғары қысымды жану камерасына жылуды қосады) және төмен қысымды жану камерасы (4-5 күй нүктелері бұл төменгі қысым жану камерасына қосылады) болады. Жоғары қысымды жану камерасынан шыққан газдар жоғары қысымды турбинаға түседі, бұл газдарды ішінара ғана кеңейтеді (3-4 нүкте бұл жоғары қысымды турбинаның кеңеюін білдіреді). Атмосфералық қысымнан жоғары қысымға ұшыраған бұл газдар қосымша жанармай жағылған төмен қысымды жану камерасына енеді және осы төмен қысымды жану камерасының пайдаланылған газдары кеңейту кезеңін аяқтау үшін төменгі қысым турбинасына енеді (5-6 нүктелер кеңейту бұл төмен қысымды турбиналарда).

Осындай цикл үшін қажетті оңтайлы қысым коэффициенті қарапайым циклдік газ турбинасы үшін талап етілгеннен жоғары, тіпті жоғары температурада да сол термиялық тиімділікке жету үшін қажет болады, Alstom ұсынғандай, газды қыздырылған турбиналар коммерциялық пайдалануда, ал болашақта жоғары тиімділікке жету үшін циклдың бұл түрі маңызды рөл атқаруы мүмкін, бірақ жоғары тиімділікке жету үшін жану температурасы артатындықтан, компрессордағы қысым қатынасы шектеуші технология болуы мүмкін.

6.1.2 Ішкі жану камералары түрлерінің қалдықтарға әсері

Қазіргі заманғы газ турбиналарында жану камераларының үш негізгі түрі пайдаланылады: баллонды, сақина түрдегі және баллонды-сақина түріндегі жану камералары. Жану камерасының түтікшелі құрылымы, кірістіру және корпусы болуы мүмкін. Компрессордың бастапқы жану ауасы тікелей қыздырғышқа жіберіледі, ал компрессордың қосымша жану ауасы да гильзадан шығып, салқындаған кезде гильзадағы саңылаулар арқылы жану аймағына енеді. Орталық цилиндр айналасында бірнеше цилиндрлер орналасқан, ал олардың әрқайсысының жану өнімдері «өтпелі бөлік» арқылы турбинаға шығуы мүмкін. Жану камерасының бұл түрінің негізгі артықшылығы конструкция мен сынаудың қарапайымдылығымен байланысты, өйткені бір баллонды ауыстыру және/немесе қызмет көрсету кезінде барлық жүйені тестілеусіз бір баллонды сынауға болады. Сақиналы жану камерасы ішінде орналасқан гильзасы бартұтас қаптамадан тұрады, ол біркелкі жанудың артықшылығын, қысқа өлшемі мен кішігірім бетінің ауданын қамтамасыз етеді. Қажетті салқындатқыш ауаның мөлшері беткі қабаттың ауданы аздығына байланысты азайтылуы мүмкін және жану камерасының бұл түрі жану температурасы жоғары немесе отын синтез-газ болып табылатын қолдануларда тартымды болады, өйткені мұндай қолдануларда барлық жалпы (бастапқы + қайталама) ауадан аз жану камерасы қолданылады, сондықтан салқындату үшін екінші ауаға қарағанда қол жетімділігі төмен болады. Баллонды-сақиналы корпусы бар гибриді конструкцияда корпус сақиналы болып табылады, ал жапсырма баллон түрінде болады және жану камералары секілді

конструкцияның қарапайымдылығы, сынау және қызмет көрсету сияқты артықшылықтарға ие.

Газ турбиналарына байланысты негізгі ластаушы зат NOx болып табылады және басқару стратегиялары жергілікті оттың температурасын төмендету үшін, демек NOx қалыптастыру үшін суды немесе бу мен оттықтарды араластыруды қамтиды. Жанып кетуді бақылау, 9-тарауда көрсетілгендей, каталитикалық қалпына келтіру агентін орнату арқылы NOx-ты одан әрі төмендету үшін пайдаланылуы мүмкін. Ол катализатордың қатысуымен болған NH₃ бар NO (азот оксидінің жану камерасында пайда болған NO) реакциясынан тұрады. Төменгі NOx құрғақ жану камералары, қазіргі уақытта табиғи газды қолдану үшін ұсынылған, жанармайды ауа арқылы алдын ала араластырып, жалынның температурасын азайту үшін оны қалыпты жағдайда күйдіруден тұрады. Кейбір қозғалтқыштар үшін көлемі құрғақ күйде 9 ppm болатын осындай төмен мәндерге және түтін газдарындағы CO құрамының 15% (моль) мөлшеріне дейін «түзетілген» мәндерге кепілдік беріледі. Жану үдерісіне қосылған NOx бақылау стратегиялары жиі жану тиімділігін төмендетуге, CO қалдықтарын және жанбаған көмірсутектерді ұлғайтуға, сондай-ақ NOx қоса алғанда пайда болатын ластағыштардың санын бір мезгілде азайту кезінде жану тиімділігін арттыру үшін қазіргі уақытта компьютерлік модельдер мен лазерлік диагностика әдістері пайдаланылады.

Әдеттегі жану камерасының ішіне кіретін ауаға әсер ететін бұралу әсері орталық циклдың күшін жасайды және бастапқы аймақтың аймағында төмен қысымды тудырады, бұл жанудың бастапқы жану өнімдерін рециркуляциялауға және жану үдерісіне тұрақтылықты қамтамасыз етуге әкеледі. Ыстық жану өнімдерінде жануды бастауға көмектесетін бос радикалдар бар, бұл автокөлік қозғалтқышы ішіндегі оталдыру шырағына ұқсайды. CO тотығу аймағында қосымша CO₂-ге тотығады. Жанармайдағы көмірсутектер, бастапқы аймақта айналымы бар және араластыруда болатын «күмбез» аймағындағы CO отын түрінде түзіледі. Бұл жерде ластаушы заттар да пайда болады, бірақ осы жерде сақталатын отынға бай шарттар NOx түзілуін азайтады. Алайда бұл әсіресе газ турбинының іске қосу, бос тұру және толық жүктеме сияқты әр түрлі жұмыс режимдерін қарастырғанда жану үдерісінің тұрақтылығын жоғалтуға әкеледі. Өзгеретін геометриясы бар жану камералары даму сатысында және осы мәселелердің кейбірін шеше алады.

6.1.3. Жұмыс жүктемесін және іске қосуды бақылау

Газ турбинысы тұтану үшін (өртті болдырмау үшін үрлеуден кейін) және өз жылдамдығын қолдау үшін нөлден жеткілікті жылдамдыққа дейін тездетілуі тиіс. Айналу кезін қамтамасыз ету үшін жеке электр қозғалтқышы немесе іштен жану қозғалтқышы пайдаланылса, турбина өз бетінше жұмыс істеу үшін қажетті жылдамдыққа жеткен кезде іске қосу жүйесі ілініс арқылы ажыратылады. Электр энергиясын өндіруде қолданылатын үлкен газ турбиналары үшін іске қосуға арналған синхронды қозғалтқыш ретінде жұмыс істеу үшін газ турбинысына қосылған генераторды пайдалану үнемдірек болып табылады (бұл жағдайда ілініс қажет емес). Синхронды генераторды пайдаланатын энергия өндірудегі осындай қолдануларда генераторды тормен синхрондау үшін қозғалтқышты тездеткеннен кейін қозғалтқыштың айналу жиілігі кейінірек модулятормен реттеледі.

Газ турбинысының шығыс қуатылығын төмендету әдетте газ турбинысының компрессорында бағыттаушы қалақтарды модульдеу жолымен сорылатын ауаның жылдамдығын азайту есебінен бастапқыда қол жеткізіледі. Осылайша, газ турбинысының жану температурасы қозғалтқыштың жалпы тиімділігін ықшамдау үшін есептік температураға жақын температурада қолдануы мүмкін. Алайда қозғалтқыш қысымының қатынасы азаяды, бұл толық жүктеме кезінде оның тиімділігімен салыстырғанда циклдың жалпы тиімділігінің төмендеуіне алып келеді. Нәтижесінде турбинаның неғұрлым кеш сатыларындағы жұмыс сұйықтығының температурасы, сондай-ақ турбинаның шығарылу температурасы ұлғаяды береді және жану температурасының тиісті төмендеуі жүзеге асырылады, бұл циклдың тиімділігін қосымша төмендетеді. Жану температурасының айтарлықтай төмендеуі кіріс бағыттаушы қалақтары «толық жабық» және кірістегі ауа ағынының одан әрі азаюы мүмкін емес кезде өнімділікті төмендету үшін талап етіледі (әдетте толық жүктемеден ~ 40% төмен деңгейге дейін), бұл әдетте ауа ағынының толық жүктемесінің 60%-ға жуығын құрайды. Осы сәтте қыздыру жылдамдығы толық жүктеме кезіндегіге қарағанда 40%-ға жоғары болуы мүмкін, дегенмен пайдаланылған газдардың жылуын рекуперациялау ЖЭО қолдану үшін

немесе Ренкиннің бу циклы арқылы қосымша қуаттылықты өндіру үшін аралас циклда іске асырылса да, біріктірілген жүйенің ұлғаюы қыздыру жылдамдығы соншалықты маңызды емес, себебі газ турбиасы шығындалатын түрлендірілмеген энергияның көп бөлігі бу өндіру үшін пайдаланылады.

6.1.4. Өнімділік сипаттамалары

Газ турбиасының шығыс қуаттылығы мен тиімділігіне температура, атмосфералық қысым және аз дәрежеде ылғалдылық сияқты қоршаған орта жағдайлары әсер етеді. Құрғақ патронның температурасы 15-тен 35°C-ге дейін ұлғайтқан кезде шығыс қуаттылық 10%-дан артық азаяды, негізінен компрессор соратын ауаның аз салмағына байланысты (ауаның тығыздығы анағұрлым жоғары температурада төмен). Газ турбиасындағы ПӨК те қоршаған орта температурасын ұлғайтқан кезде төмендейді, себебі компрессор қуаттылығына қажеттілік артады, ал қыздыру жылдамдығы шамамен 3%-ға артады. Анағұрлым жоғары алаңдар үшін, мысалы, 1800 м, шығыс қуаттылық теңіз деңгейімен салыстырғанда шамамен 20%-ға азаяуы мүмкін, ол тағы да компрессор соратын ауаның аз салмағының аз болуына (ауаның тығыздығы анағұрлым жоғары биіктікте төмен) байланысты. Ауа ылғалдылығының газ турбиасының өнімділігіне әсері газ турбиасының жану температурасын басқарудың қолданылатын сызбанұсқасына, яғни пайдаланылған газдардың температурасы компрессор қысымының шамамен жану температурасына қатынасымен ығыстырылатынына/ығыстырылмайтынына байланысты. Газ турбиналарының жұмыс сипаттамалары қоршаған орта жағдайына сезімтал болғандықтан, шығыс қуаттылыққа немесе ПӨК сәйкес келетін қоршаған орта жағдайларының жиынтығын көрсету маңызды. Қоршаған ортаға арналған ISO шарттары (15°C-ден, теңіз деңгейінен және 60% салыстырмалы ылғалдылықтан тұратын) әдетте өнімділік туралы деректерді ұсынған кезде көрсетіледі.

Барлық турбомашиналар сияқты газ турбиналары уақыт өте келе өз өнімділігін жоғалтады және әдетте компрессордың ластануына байланысты жұмыс сипаттамаларының нашарлауының бір бөлігі кем дегенде сумен шаю жолымен ішінара немесе компрессордың қалақтары мен қалақшаларын механикалық тазарту жолымен неғұрлым толық қалпына келтірілуі мүмкін. Алайда механикалық тазалау агрегатты ашуды талап етеді, бұл қондырғы іркілісіне, қондырғының өнімділік коэффициентін жоғалуына алып келеді. Газ турбиналары да турбинаның және компрессордың секцияларындағы ұлғайтылған саңылаулармен, сондай-ақ аэродинамикалық профиль контурының және қалақтар бетінің тазалығының өзгерістерімен байланысты қалпына келтірілмейтін шығындарға ұшырайды. Олар қажетті тексеру аралықтарын сақтай отырып, зақымдалған бөліктерді ауыстыру арқылы ғана түзетілуі мүмкін. Электр энергиясын өндіруге арналған газ турбиналары бірнеше киловаттан (микротурбиналар) бірнеше жүз мегаватт қуаттылығына дейін қол жетімді. Әдетте 60 циклға арналған машиналар (АҚШ, Канада, Мексика, Оңтүстік Корея сияқты елдер және Жапонияның кейбір аудандары үшін) тиісті 50 циклдан аз (көптеген басқа жерлерде қолдану үшін), себебі бір машина әдетте екінші машинадан масштабталады және масштабтау критерийі тиісті сатыда компрессорда ұштың тұрақты жылдамдығын қолдаудан тұрады. Үлкен газ турбиналары осьті машиналар болып табылады және негізінен циклдың қарапайым конфигурациясы бар. Пайыздық ПӨК бірінші заңы микротурбиналар үшін 20 немесе 30 секунд болуы мүмкін, сол мезетте үлкен газ турбиналары үшін табиғи газбен жұмыс істегенде 30-40 с болуы мүмкін (ISO жағдайында LHV негізінде). Микротурбиналар радиалды компрессор мен радиалды турбинадан тұрады және циклдың жалпы тиімділігін арттыру үшін жану камерасына түсер алдында жылу алмастырғышта (рекуператорда) турбинаның шығарылуына қарсы компрессордың айдалатын ауасын алдын ала қыздырудан тұратын рекуперативті циклді (регенеративті деп аталатын) пайдаланады, бұл ретте жекелеген компоненттердің тиімділігі өте төмен.

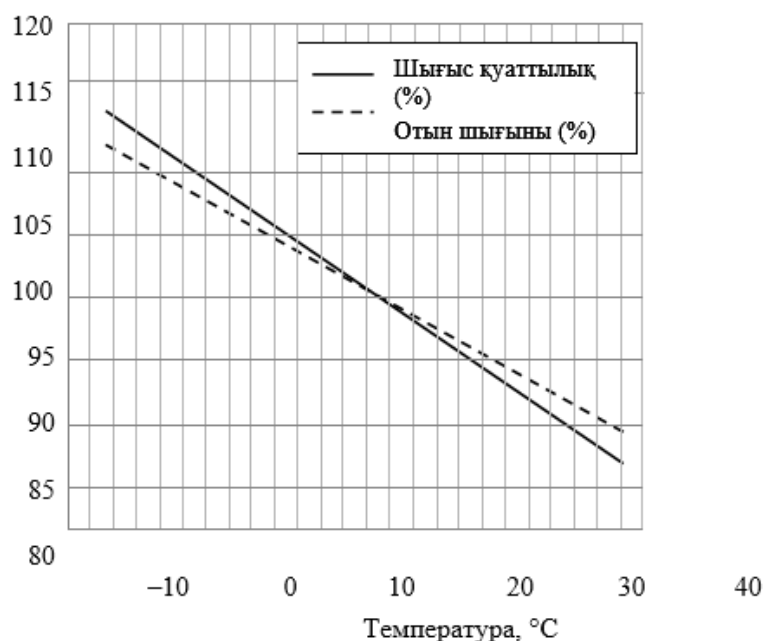
6.1-мысал. Қоршаған орта температурасының шығыс қуаттылыққа және ашық циклдағы газ турбиасының отын шығынына әсері 6.5-суретте көрсетілген. Қоршаған ортаның температурасы (i) 20°C-қа көтерілсе және (ii) ISO температурасымен салыстырғанда 20°C-қа төмендегенде газ турбиасының бірінші заңының тиімділігін есептеңіз.

Шешуі:

Тиімділіктің бірінші заңы $\eta_I \alpha$ (Шығыс қуаттылық /Отын шығыны)

1. Қоршаған ортаның температурасы ISO температурасымен салыстырғанда 20°C-қа жоғарылаған кезде немесе қоршаған ортаның 35°C температурасында, 35°C, $\eta_I \alpha$ (86%/ 90%) = 96 % бойынша ПӘК.

2. Қоршаған орта температурасы ISO температурасынан 20°C-қа төмендесе немесе қоршаған ортаның -5°C температурасында, 5°C, $\eta_I \alpha$ (112,5%/ 110%) = 102% ISO бойынша ПӘК.



6.5-СУРЕТ. Қоршаған орта температурасының газ турбинасының өнімділігіне әсері

6.1-КЕСТЕ. Домна, пісіру және қоқыс газдарының сипаттамалары

		Көлем %	
	Домна газы	Пісіру газы	Қоқыс газы
CH ₄		57-61	20-60
H ₂	1-4		
CO	25-30		
CO ₂	8-16	36-38	22-60
N ₂	55-60	0.6-1.1	0.6-46
O ₂		0.2-1.4	0-2.5
H ₂ S + CS ₂ + SO ₂		40-200 ppmv	1-1700 ppmv
Cl қосылыстары		25-200 ppbv	Қазіргі
C ₂ + (парафиндер)		40-175 ppmv	Жолақ
Химиялық иістендіргіш	хош	800-1800 ppbv	240-1400 ppmv
Силоксандар	LHV,	Қазіргі	Қазіргі
kJ/Nm ³	3500-4300	20,000-22,000	7,900-24,000
(Btu/SCF)	(90-110)	(520-560)	(200-600)

6.1.5. Отын түрлері

Газ турбиналарына арналған қолайлы газ тәрізді отын табиғи газды; буланғаннан кейінгі сұйытылған табиғи газды; газдандырудан алынған синтез-газды; сондай-ақ қоқыс

газы, тазарту құрылыстарындағы анаэробты реактордан алынған газ, металлургия өнеркәсібінен алынған домна газы және мұнай өңдеу зауытынан шығатын газдар сияқты «ерекше мүмкіндік» газдарын қамтиды (Рао мен авт., 1996). Осы арнайы газ ағындарының кейбіреулерінің сипаттамалары 6.1-кестеде көрсетілген. Мұнай өңдеу зауыттарымен жеткізілетін дистилляттар сияқты сұйық отын да отын ретінде, бірақ отынның анағұрлым жоғары құнына байланысты аз дәрежеде пайдаланылады және негізінен шекті пайдаланумен шектеледі. Табиғи газ базалық жүктеме үшін қолданудағы ірі масштабты газ турбиналары үшін (әдетте аралас циклды қондырғыларда және ЖЭО-да), әсіресе тақтатас газының үлкен ресурстары болған кезде таяу болашақта басым отын болып табылады және болып қала береді. Табиғи газдың құрамын қоса алғанда газ тәріздес отынның құрамы айтарлықтай айрықшалануы мүмкін және газ турбинасының өндірушісі газ турбинасының зақымдануын болдырмау және отынды тиімді жағу мүмкіндігі болу үшін газ турбинасының әрбір моделі үшін құрамы мен ластану деңгейлерінің рұқсат етілген диапазондары үшін ерекшеліктерді белгілейді. Басқа сипаттамалар газ тәрізді отын жағдайында температураны, жылу шығару қабілетін және Вобба (MWI) модификацияланған индексін қамтиды. Бұл көрсеткіш шүмек арқылы қысымның тіркелген төмендеуі үшін жану камерасына түсетін энергияның салыстырмалы көлемінің өлшемі болып табылады. 6.1 теңдеуі бойынша есептелген осы индексте рұқсат етілген ауытқулар әдетте $\pm 5\%$ құрайды.

$$MWI = \frac{LHV}{\sqrt{(SG)T}} \quad 6.1)$$

мұндағы LHV – отынның көлемдік төменгі жылу шығару қабілеті, SG – ISO шарттары кезіндегі ауаға қатысты отынның меншікті салмағы және T – отынның абсолютті температурасы.

6.2-мысал. Табиғи газбен жұмыс істейтін газ турбинасы қолданыстағы құбыржолдар жүйесінің жобалық шектеулері шеңберінде қалу үшін табиғи газ сияқты қысым мен температурада берілетін газ тәріздес реактормен толтырылуы тиіс. Егер ешқандай физикалық өзгерістер, соның ішінде отын бүріккішіне өзгерістер енгізілмесе, газ турбинасының жұмысы кезіндегі қуаттылықтың төмендеуін бағалаңыз, бұл ретте турбина кірісіндегі газдың аэротермиялық сипаттамалары (мысалы, қалақ қабырғасының температурасына әсер ету) және қозғалтқыш қысымының коэффициентіне әсер ету сияқты факторларға байланысты турбожабдықтардың жұмыс параметрлеріне кез келген әсерлерді ескерілмейді. Табиғи газ үшін 1.1-мысалда көрсетілгендей, LHV құрамы және есептелген мәнін пайдаланыңыз, ал пісіру газы үшін келесі көлемдік құрамды пайдаланыңыз: $CH_4 = 60\%$, $CO_2 = 38\%$, $N_2 = 1.1\%$, $O_2 = 0.9\%$.

Шешуі:

6.1-теңдеуден

$$\frac{MWI_{DG}}{MWI_{NG}} = \frac{LHV_{DG}/LHV_{NG}}{\sqrt{(SG_{DG}/SG_{NG})(T_{DG}/T_{NG})}}$$

Жоғарыда көрсетілген өрнек идеал газдың жүріс-тұрысы туралы болжаммен жасалған екі газдың молекулалық массаларының терминдерінде жазылуы мүмкін:

$$\frac{MWI_{DG}}{MWI_{NG}} = \frac{LHV_{DG}/LHV_{NG}}{\sqrt{(M_{wDG}/M_{wNG})(T_{DG}/T_{NG})}}$$

мұндағы M_{wDG} және M_{wNG} – пісіру және табиғи газдарының молекулалық массалары.

Жоғарыда көрсетілген өрнекке екі газдың берілген құрамдарына сәйкес келетін есептелген LHV және M_w қойып (табиғи газ үшін онда көлемдік мәнде N_2 және CO_2 тең мөлшерде болады деп болжанған), келесіні аламыз:

$$\frac{MWI_{DG}}{MWI_{NG}} = \frac{20,439/35.290}{\sqrt{(26.94/17.54)(1)}} = 0,47$$

Осылайша, берілген жол берулер кезіндегі газ турбинының номиналды қуаттылығының төмендеуі 53% құрады.

Газдағы жанармай түріне қосымша отын газында болуы мүмкін инертті газдардың концентрациясы (мысалы, N_2 , H_2O бу немесе CO_2) оның LHV әсер етеді және LHV үшін төменгі шек тұрақты және тиімді жану үшін ғана емес, сондай-ақ аэродинамикалық және азэротермиялық мақсаттар үшін де бар. LHV бар отын есептік отынға қарағанда әлдеқайда аз, газ турбинының компрессорындағы қысым коэффициентінің отын сұйылтқыштардың көп шоғырлануынан туындаған турбина арқылы өтетін газдардың көп массалық шығынынан айтарлықтай ұлғаюына әкелуі мүмкін. Егер компрессордың енгізу саңылауындағы бағыттаушы қалақтар сорылатын ауаның мөлшерін шектеу және / немесе компрессордан айдалатын ауаның бір бөлігін шығару мақсатында жабық болмаса әрі мұндай ауа қысыммен пайдаланылып, қозғалтқышты осындай тәсіл үшін өзгертуге мүмкін болса, бұл компрессордың шамадан тыс кернеуін және оған байланысты шығынның пайда болуын келтіруі мүмкін. Дегенмен кірістегі бағыттаушы қалақтардың көмегімен ауа ағынының азаю дәрежесіне (компрессорда, егер оған ауа жеткіліксіз келіп түссе, кернеу туындауы мүмкін екенін ескеріңіз) және алынуы мүмкін ауа үлесіне (жану камерасы мен турбинаны салқындатуға арналған ауа, егер тым көп ауа жойылса, сарқылуы мүмкін екенін ескеріңіз) шектеулер бар. Отын газының LHV байланысты отынды тиімді жағу және CO және VOC сияқты ластаушы заттардың түзілуін шектеу үшін реттеуші клапанды, сондай-ақ жану камераларын қоса алғанда, отын беру жүйесін түрлендіру қажет болуы мүмкін. Табиғи газбен жұмыс істеуге арналған кейбір газ турбиналары қажетті өзгерістер енгізілгеннен кейін шамамен 4 МДж / H_m^3 төмен LHV отын газын сыйдыра алады.

Егер отын жануға арналған ауамен араласатын отын газындағы H_2 мөлшері алдын ала жану камерасын пайдалану кезінде өте жоғары болса, тұтану және кері қайтару проблемасы туындауы мүмкін. Содан кейін қоспа жергілікті жалын температурасын төмендету, және, сәйкесінше температураға қатты тәуелді NOx түзілуін төмендету үшін жану камерасына енгізіледі. Қоқыс газы немесе ағынды суларды анаэробты тазартудан кейінгі газ (пісіру газы) сияқты отын газының белгілі бір ағындарда O_2 болуы мүмкін және алдын ала тұтандыру мен кері тұтанудың алдын алу үшін O_2 мөлшері үшін жоғары шектер бар. 1-тарауда аталғандай, тіпті табиғи газ да Құрама Штаттардың кейбір аудандарында (солтүстік-шығыс) ең жоғары сұраныс айларында көлемі бойынша O_2 4%-ға дейін қамтуы мүмкін, себебі мұндай маусымда белгілі бір шектерде Вобба индексі ұстап тұру үшін табиғи газдың жетіспеуі газ компаниясы пропан немесе бутан араластыра алады, олар отын және ауа беруді арттыру үшін сұйылтқыш ретінде қосылады.

Отын аралас циклдың жалпы тиімділігін арттыру үшін төменгі циклдағы жылуды пайдалану арқылы алдын ала қыздырылуы мүмкін, бірақ отынды басқару клапандарында пайдаланылатын материалдарды қоса алғанда отын беру жүйесінің конструктивтік мүмкіндіктерімен белгіленген, сондай-ақ алдын ала аралас жану жағдайында күйдіру және кері тұтану қажеттілігі ретінде берілген осы газтурбиналық жүйе үшін жоғарғы шегі бар. Отын газдарында ылғал, сондай-ақ кейбір ауыр көмірсутектер болуы мүмкін және отын сүзгішінің бұғатталуын, сапасының нашарлауын, отын бүріккіштерін немесе көмірсутектердің тамшыларымен алдын ала араластыру не құбырдың төменгі нүктелерінде сұйықтықтарды жинау кезінде, сондай-ақ CH_4 және CO_2 гидраттарының пайда болуын болдырмау үшін отын газы оның шық нүктесінен қауіпсіз болуы үшін отын температурасының төменгі шегі қарастырылған.

Газдардың көпшілігінде (H_2 және He басқа) қоршаған орта температурасынан жоғары және әдетте газ кеңеюден салқындауы мүмкін қысымда Джоуль-Томпсон оң коэффициенті бар болады. Қысымның төмендеуі елеулі болғанда температураның бұл төмендеуі елеулі болуы мүмкін, мысалы, қысым шығару клапаны арқылы өту кезінде және бұл аспекті отын газының минималды температурасын (клапаннан ағын бойынша жоғары) баптаған кезде ескеру қажет. General Electric Bulletin GEI 41040G (2002) көмірсутектер конденсациясын болдырмау үшін газ көмірсутектері шық нүктесінен жоғары қызуға қойылатын минималды талаптарды және отын шығыны мен температураны реттейтін газ турбинының кірісіндегі

газ қысымын ескеретін корреляция нысанында ылғал конденсациясын және гидраттардың пайда болуын болдырмау үшін газдың ылғал шық нүктесінен жоғары қызуға минималды талаптарды ұсынады.

Қатты шектеулер газ турбинасын коррозиядан / эрозиядан қорғау үшін отын газына бөлшектерді тиеу үшін өлшем бойынша көрсетілген. Әдетте егер берілетін отында (мысалы, табиғи газ және СТГ) бөлшектер жоқ болса да, отын беру желісіне бөлшектерді ұстау үшін сүзгі қосылады, себебі отын газының тот немесе қабыршақтың бөлшектерін ұстап қалу ықтималдығы бар. Vа, жалпы сілтілер (Na және K), Pb, Ca және Mg үшін де қатаң шектер көрсетілген.

Қоқыс, сондай-ақ пісіру газының құрамында күкірттің бейорганикалық, сонымен қатар органикалық қосылыстар, Cl органикалық қосылыстары және Si атомдары бар органикалық қосылыстар болып табылатын силоксандар болуы мүмкін. Әр түрлі қосылыстар жану камерасы мен турбина секцияларында тотығуды болдырмау үшін және / немесе S және Cl байланысқан жағдайда қоршаған ортаға шығарындылардың шектерін қанағаттандыру үшін газ турбинасын жеткізуші белгілеген шектерге дейін жойылуы тиіс, сол мезетте силоксандар турбиналардың қалақтарындағы және HRSG жылу алмасу беттеріндегі Si шөгінділерден кетуі мүмкін, сондай-ақ қатты бөлшектердің шығарындысын тудырады. Күкірттің бейорганикалық қосылыстарының көп бөлігі осындай шағын қолдануларға ұсынылатын темір оксидінің «тасталатын» қабатын пайдалана отырып жойылуы мүмкін. Күкірттің қалған бейорганикалық қосылыстарымен бірге әр түрлі органикалық қосылыстар құрамында белсендірілген көмір сияқты адсорбент(тер) бар қабат арқылы газды өткізу жолымен жойылуы мүмкін (сондай-ақ тастау үдерісі). Газ турбинасынан ағын бойынша жоғарыда орналасқан бұл өңдеу үдерістерінде жабдықтағы конденсацияны болдырмау үшін, сондай-ақ адсорбенттерде саңылауларды пайда болдырмау үшін оның шық нүктесінен жоғары газ болуы тиіс. Бұған ылғал сіңіргішті пайдалана отырып, газды сусыздандыру немесе газды оның шық нүктесінен айтарлықтай төмен кейінгі алдын ала қыздыру арқылы суытумен қол жеткізуге болады. Барлық осы жабдық мөлшерді азайту үшін компрессор ағынынан төмен орналасуы мүмкін, кез келген жағдайда компрессор қажет, себебі оның көзінде қоқыс газы қоршаған ортаға жақын қысымда қол жетімді.

6.1.6. Технологиялық әзірлемелер

Газ турбиналары электр энергиясын пайдаланудағы таза, тиімді, қолжетімді және икемді өндіріс проблемаларын шеше отырып, болашақта электр энергиясын өндіру нарығында негізгі рөл атқаруы мүмкін. Брайтон циклын жақсарту үшін қабылданатын немесе зерттелетін технологиялық жетістіктер ротордың кірісіндегі жоғары температураны 1700°C (3100°F) немесе одан жоғары шамамен 1040°C (~ 1900°F) қалақ металлының температурасын қамтиды, бұл ретте қазіргі заманғы материалдарды, соның ішінде алдыңғы қатарлы температуралық тосқауылдық жабындарды және тұйық контуры бар бумен салқындатуды қоса алғанда турбиналарды салқындату технологияларын пайдалана отырып мүмкін болатын салқындатқыш сұйықтықтың мөлшерін шектейді. Басқа жетістіктер өзіне жану камерасында анағұрлым жоғары температураға, қысымның күшеюіне (Gemmen et al., 1994) және немесе басып алынған құйынды (Hsu et al., 1995) жану камераларына, қысымның жоғары қатынасы бар компрессорларға (толық толтыру үшін) қарсы тұру үшін жану камерасына арналған салмаларды, анағұрлым жоғары жану температурасының артықшылығын және 9-тарауда талқыланатын IGCC қолдану үшін ионды-көліктік мембранамен ауаның жоғары температуралық бөлінуімен интеграциялау мүмкіндігін қамтиды.

6.1.6.1. Жану температурасы. Жанудың анағұрлым жоғары температурасы қатаң қоршаған орта жағдайларына қарсы тұру үшін жану камерасында да, турбинада да алдыңғы қатарлы материалдардың болуын талап етеді. Заманауи турбиналарда сәтті пайдаланылған бағытталған қатаятын қалақтарды, сондай-ақ монокристалды қалақтарды енді никель негізіндегі қарапайым құйма супер қорытпаларға алмастырады. Металдың температурасын төмендету үшін керамиканы кеңінен пайдаланатын заманауи температуралық тосқауылдық жабындар зерттелуде, алайда бұл жабындар жоғары парциалдық қысымда су буынан

тұратын, әсіресе карбонилсіздендірілген синтез-газбен қолдану үшін, қоршаған орта жағдайына тезуі тиіс. Сондай-ақ ыстық компоненттерге немесе турбина секцияларына арналған монокристалды оксидті талшықтарды қоса алғанда керамикалық матрицалық композиттерді әзірлеу қарастырылады. Жану камерасына арналған жоғары жану температурасындағы металл аққыштығының комбинациясына, қысымдағы жүктемеге, жоғары циклға және термиялық қажуға төтеп бере алатын материалдар зерттелуде.

Жоғары жану температуралары да газ турбинына арналған салқындатудың үздік технологиясын талап етеді, компоненттер металл температурасын шектеу үшін ыстық жұмыс сұйықтығының әсеріне ұшырайды. Заманауи газ турбиналарындағы жоғары қысымды (стационарлы және айналмалы) турбиналар қалақтарының ашық контурларында салқындату ішкі конвективті салқындату және сыртқы беттегі пленканы салқындату көмегімен жүзеге асырылады. Ішкі конвективті салқындату қысымның қол жетімді градиенттерінде салқындатуды талап ететін компоненттің барлық аймақтарына салқындатқыш сұйықтықты жібереді. Жылу беру коэффициенттері риброгенерлер немесе турбулизаторлар сияқты әр түрлі беттік өңдеулердің, сондай-ақ ағынды мәжбүрлі бағыттауға арналған ауытқытқыштар мен құйынды құрылғыларды пайдаланудың арқасында жақсарады, сол мезетте пленкалы салқындату оқшаулау қабатын тудыру үшін қалақтың сыртқы бетіне салқындатқыш сұйықтығының ішкі ағынын айдаудан тұрады. Ашық тізбектегі салқындатудың зерттелетін озық технологиясы транспирациялық салқындату болып табылады, ол кезде салқындатқыш газ сыртқы бетте оқшаулағыш пленка немесе шекаралық қабат жасай отырып, кеуекті қабырға арқылы ағады.

6.1.6.2. Сығу коэффициенті мен аралық салқындату. Сығу коэффициенті жалпы жылу тиімділігі тұрғысынан анағұрлым жоғары жану температурасын толық көлемде пайдалану үшін ұлғайтылуы тиіс. Қысымның анағұрлым жоғары қатынастары ірі масштабты қолдануға арналған газ турбиналарында ұзын болу үрдісі бар және салқындамайтын соңғы сатыдағы турбина қалақтарының түбірлеріндегі турбинаның шығу температурасын және жылу кернеуін шектеу үшін қажет. Су ауа ағынына буланатын төмен қысымды компрессорды шығаратын ауаға суды бүрку жолымен тікелей байланысты аралық суыту, соның арқасында ды, қосымша қозғалғыш сұйықтықты (су буын) ұсыну жолымен ауа жағында қысымның төмендеуін ықшамдау есебінен циклдың жалпы тиімділігі тұрғысынан қаптамалы-құбырлы аралық салқындатқыштың алдында артықшылығы болады. Жоғары қысу дәрежесімен газтурбиналық компрессорды бүркумен аса салқындау (>30) біріктірілген циклмен қолданудағы жалпы тиімділікті төмендетпей, компрессордың айдау температурасын төмендетуі мүмкін. Компрессордың айдау температурасын төмендету компрессор материалының құнына, сондай-ақ жану камерасында NO_x түзілуіне төмендетуші әсер етеді. Бүрку типін пайдаланатын аралық салқындатуымен газ турбины General Electric компаниясымен коммерцияланды. Мұндай жағдайда сондай-ақ қысымның өте жоғары жалпы шығулары кезінде оңтайландырылатын газ турбины жылыту циклдарында өзара салқындатуды пайдалануға болады.

6.1.6.3. Кіре берістегі ауаның булануы. Ауаны қысудың паразиттік жүктемесін және газ турбинында оның шығарылу температурасын төмендетудің басқа тәсілі сорылатын ауаға сұйық суды енгізу болып табылады (Bhargava and Meher-Homji, 2002). Су тамшылары мөлшері бойынша өте кішкентай болуы тиіс және соққы нәтижесінде компрессор қалақтарының эрозиясын болдырмау үшін шаңның нысаны сияқты болуы тиіс. Қысылған ауа салқындатылады, себебі су қысу жылуынан компрессордың ішінде буланады. Қысу бойынша жұмыс қысылатын сұйықтықтың абсолютті температурасына тікелей пропорционал болғандықтан, суық ауаның қысылуы аз жұмысты талап етеді, бұл қозғалтқыштың үлестік шығыс қуатын арттыруға әкеледі. Басқа артықшылығы – жануға арналған ауадағы қосымша су буының болуына, сондай-ақ жану үшін төмен ауа температурасының болуына байланысты NO_x төмендеуі. Мұндай тұмандануды жасау жүйесі бірнеше газ турбиналарында орнатылған, бірақ суды тазалауға арналған жабдықты таңдау кезінде сақ болу керек, өйткені жоғары сапалы деминерализацияланған су және компрессор қалағына су тамшыларының түсуін болдырмау үшін шаңның пайда болу жүйесінің қондырғысы талап етіледі.

6.1.6.4. Жоғары қысымды жану камерасы. Жану камерасының бұл түрі шығарынды

газдардағы шығарынды газдардың қысымы бастапқы күйдегі іркіліс қысымына қарағанда көп, нәтижесінде түпкілікті күйдегі тұрақты қысымдағы жүйелерге қарағанда қол жетімді энергия көп өндіріледі. Мұндай жүйенің мысалы-ұшқынды мінсіз қозғалтқышта тұрақты көлеммен жағу. Газ турбинасының қыздырылу жылдамдығы шамамен 1200°C (2200°F) турбина кірісіндегі қысым қатынасы 10 және температурамен тұрақты көлеммен (Gemmen et al., 1994) жану жүйесін пайдалану кезінде қарапайым циклдың газ турбинасының қыздырылу жылдамдығы 10%-дан артық азайтылуы мүмкін. Резонанстық камералардың өзіндік тұрақсыздығына негізделген импульстік жану қысымды арттыру үшін жану камерасы ретінде пайдаланылуы мүмкін. АҚШ-ның Энергетика министрлігінде, НАСА және т.б. қысымды арттыру үшін жану камераларын әзірлеу бойынша зерттеулер жалғасуда. Негізгі мәселе турбомашинаның үздіксіз ағынымен (компрессор мен турбина) циклды жұмыс істей алатын жану камерасымен түйісуі болып табылады.

6.1.6.5. Басып алынған құйынды камера. Басып алынған құйынды камера (TVC) қазіргі заманғы жану газтурбиналық камералармен салыстырғанда көптеген пайдалану артықшылықтары үшін әлеуетке ие, олар аз салмақты, ластаушы заттарды аз шығарады, жалынды тиімді тұрақтандырады, жанудың жоғары тиімділігі және аздаған жану режимдеріндегі тұрақты жұмысты қамтиды. Газ турбиналарының жану камераларында қолданылатын құйынды жанарғылар келіп түсетін ауа мен отынның үздіксіз тұтануын қамтамасыз ету үшін жану газдарының бір бөлігі ағынының рециркуляциясын туғызу үшін тороидалдық қозғалыс жасайды, бірақ құйынды жану камералары бірнеше шектеулі жану тұрақтылығына ие және пайдаланудың белгілі бір жағдайларында жарылуы мүмкін, ал TVC жану камерасында негізгі ағыннан қорғалған рециркуляцияның тұрақты аймағын қамтамасыз ететін қуыс ішінде басып алынған құйынды пайдалана отырып, жалын тұрақтылығының жоғары деңгейін қолдайды. TVC ішіндегі ағытқыштың күмбезі, содан кейін негізгі ауа ағынымен қуыстан ыстық өнімдерді таратады және араластырады. Отын мен ауа қуысқа онда табиғи түрде пайда болатын құйынды күшейтетіндей етіліп қуысқа шашыратылады. Концептуалды ретте TVC екі пилоттық аймағы және бір негізгі аймағы бар сатылы жану камерасы болып табылады, пилоттық аймақтар жану камерасының гильзаларына (Burgus et al., 2001) кірістіріп орналастырылған, пилоттық жалынның бай, СО шығарындылары және жанбаған көмірсутектер төмен деңгейіне жетудің, сондай-ақ жақсы тұтану және үрлеу тиімділігін қамтамасыз етудің бай аймақтары ретінде аймақтары аз қуаттылықта жұмыс істейтін қуыстардан құрылған. Аса жоғарылау қуаттылықта, мәселен, 30%-дан астам қуаттылықта, қажетті қосымша отын қуыстардан негізгі ағынға беріледі, ал сол кезде қуыстар отынға бай жағдайларда жұмыс істейді. Тәжірибелер, жұмыс диапазоны тиімділігі 99%-дан артық дәстүрлі жану камераларына қарағанда 40%-ға кең екендігін көрсетті. Табиғи газбен жұмыс істейтін өндірістерде NO_x шығарындыларын басуға арналған балама нұсқа ретінде пайдалануға қосымша, TVC жану камерасы алдын ала араластыру арқылы жанарғылар пайдаланылмауы мүмкін синтез-газбен қолданудағы ерекше перспективаларға ие.

6.1.6.6. Жанудың катализдік камерасы. NO_x түзілуін азайту үшін жалын температурасының төмендеуі жүдетілген жағдайларда жұмыс істеу кезінде қол жеткізілуі мүмкін, бірақ жанудың тұрақтылығын сақтап отыру проблема болуы мүмкін. Катализаторды пайдалану NO_x, СО шығарындыларын және жанбаған көмірсутектерді (Smith, 2004) бір мезгілде төмендету мүмкіндігімен осындай жағдайларда тұрақтылықты қамтамасыз етуі мүмкін. Басқа әлеуетті артықшылық жанудан туындаған қысым ауытқуларын азайту болып табылады. Каталитикалық жану камерасы сондай-ақ NO_x шығарындыларын азайту үшін синтез-газын қолдануында ерекше рөл атқара алады.

6.2 БУ ТУРБИНАЛАРЫ

Жұмыс сұйықтығы, бу 8-тарауда қарастырылғандай "лас" отынды (мысалы, көмір немесе биомассаны) жағу кезінде түзілетін жану ыстық өнімдері сияқты көзден немесе 9-тарауда қарастырылғандай газ турбинасының пайдаланылған газдарынан, не 12-тарауда қарастырылғандай ядролық реакциядан не болмаса концентрацияланған күн энергиясынан

жылу беру жолымен генерацияланады.

6.2.1 Жұмыс атқару ұстамдары

Үлкен көлемдегі бу турбиналары 3-тарауда сипатталған, буды айналмалы қалақтарға (шөміштерге) бағыттайтын кезектесетін стационарлы қалақтары (шүмектері) бар осьтік машиналар болып табылады. Жоғарғы сатының шөміштерінен шыққан шығыс тікелей төменгі сатының шүмектеріне түседі. Үлкен осьтік турбиналар пайдаланылған бу 10-13% астам сұйықтықты қамтымайтындай етіп жұмыс істеуі тиіс, өйткені конденсат тамшылары жоғары жылдамдық кезінде шүмектер мен қалақтарды елеулі ретте бұзуы мүмкін және кіре берістегі будың қысымы мен температурасын дұрыс таңдау талап етіледі. Будың асқынып қызып кету температурасы, мысалы, жылу көзінің температурасымен шектелген кезде конструкцияға ылғал кетудің арнайы сатылары енгізілуі мүмкін.

Бу тікелей бу турбинасында әдетте төмен қысымды бумен, сондай-ақ атом электр станцияларындағы жоғары қысымды немесе цикл тиімділігін арттыру үшін асқына қыздырылған, не қыздырылған бумен істелетіндей қандай да бір асқынып қызып кетусіз пайдаланылуы мүмкін. Қыздыру бұрын талқыланған қыздыруы бар газ турбинасы циклы жағдайындағыдай ретте асқындыра қыздырылған буды аралық қысымға дейін кеңейтуден, осы ішінара кеңейтілген буды қыздырудан және оны кеңейту сатысын аяқтау үшін турбинаға ілестіре қайта беруден тұрады.

Конденсациясы бар бу турбинасы жағдайында бу атмосфералықтан төмен қысымға дейін кеңейтіледі және конденсаторға бұрылады, ал будың ішкі жылуы буды BFW-ге түрлендірген кезде салқындатылған суға беріледі, содан кейін цикл аяқталған кезде буды генерациялау үшін пайдаланылады. Қарсы қысымды бу турбинасы жағдайында турбина, мысалы, ЖЭО қосымшасында қыздыру үшін немесе технологиялық пайдалану үшін пайдаланушы анықтайтын осы пайдаланылған бу үшін анағұрлым жоғары қысым кезінде шығаруға арналған. Сондай-ақ бу шығарынды газдардың қысымынан асатын қысым кезінде, осыған ұқсас қолдану үшін, сондай-ақ турбинаны сатылар арасындағы шүмектермен жабдықтау жолымен BFW алдын ала қыздыру үшін алынуы мүмкін, ал сол кезде экстрагирленбеген бу турбина арқылы кеңейту кезеңін жалғастыра береді.

6.2.1.1 Импульстік және реакциялық қалақтар. Импульстік қалақтарды пайдаланатын турбинада бу әрбір шөмішке бағытталған жоғары жылдамдықты ағын түрінде әрбір шүмектің ішінен шығып кетеді, бұл ретте бу суда қысымның ауытқуына ұшырайды, ал сол кезде оның кинетикалық энергиясы артады. Бұл кинетикалық энергия будың ағыны шөміштерге соғылғаннан кейін өз бағытын өзгерткен кезде шөміштерде механикалық энергияға (біліктің айналуы) түрленеді. Ескектермен жабдықталған су дөңгелегі импульстік турбинаның үлгісі болып табылады. Импульстік турбиналар негізінен шағын қолдану үшін пайдаланылады. Реакциялық қалақтарды пайдаланатын турбинада да сол сияқты бу айналмалы қалақтарға шүмектер арқылы жіберіледі, бірақ айналмалы қалақтардың өздері, бу осы бірігетін шүмектер арқылы үдеген кезде спринклерден шығатын айналмалы суға берілетін қозғалыс тәрізді реакция күшін құру үшін бірігетін шүмектер құратындай етіп орналасқан. Реакциялық турбиналардың анағұрлым тиімді болу үрдісі бар, бірақ талап етілетін сатылардың саны, сондай-ақ осьтік тартым жоғары. Кезеңдердің санының көптігі техникалық қызмет көрсетуге жұмсалатын шығындардың артуына алып келеді.

6.2.2 Жұмыс жүктемесін бақылау

Синхронды генераторға қосылған бу турбинасының шығыс қуатын басқарудың үш түрлі әдісі (жылдамдық тормен реттелетін) – бұл сырғанау қысымын, дросселдеуді реттеу және сатыны реттеуді басқару. Осы әдістердің кейбірін біріктіретін гибриді стратегиялар да пайдаланады. Сырғанау қысымын реттеу кезінде турбинаға келіп түсетін будың мөлшері реттеу клапанының көмегімен ағынның азаюы сияқты турбинаға бу беретін жүйенің геометриясында қандай да бір өзгерістерсіз азаяды, ал бу генерациясының қысымы сұйықтық ағынының физикасында белгіленген мәнге дейін төмендеуі мүмкін. 9-тарауда сипатталған аралас циклды құрылғыларда әдетте пайдаланылатын басқарудың бұл түрінде

турбинаның изэнтропиялық тиімділігі іс жүзінде өзгеріссіз қалады. Дроссельдеуді реттеу кезінде буды басқарудың барлық басты клапандары турбинаға түсетін бу қысымын реттеу үшін бір мезгілде жұмыс істейді, ал бу тұрақты қысымға жақында генерацияланады. Турбинаның изоэнтропикалық тиімділігі біршама төмендейді, бірақ неғұрлым маңыздысы, қайтымсыздықтың елеулі дәрежесі дроссельдік клапандардағы қысымның төмендеуімен енгізіледі. Басқарудың реттеуші сатысы буды бірінші (басқарушы) сатысына беру доғасын ұлғайту немесе азайту жолымен турбинаның қуатын өзгертетін реттеуші клапандардың тізбектелген жұмысынан тұрады. Әрбір реттеуші клапан басқару сатысының учаскесін қоректендіреді, және олар осы сатыда рұқсат етілген кернеулерге негізделген тәртіпте жұмыс істейді. Берілген жүктеме кезінде клапандардың бұл жинағы толығымен ашық немесе толық жабық болуы мүмкін болғандықтан, дроссельдеумен қамтамасыз етілетін қайтымсыздық жойылады, бірақ турбинаның өзінің изоэнтропикалық тиімділігі төмендейді

6.2.3 Пайдалау сипаттамалары

Электр энергиясын өндіруге арналған бу турбиналары 100 кВт-тан төменнен жүздеген МВт-қа дейін қуаттылығымен қол жетімді. Бу турбиналарының изоэнтропикалық тиімділігі кіруде будың берілу жағдайларына, ағынның жылдамдығына, температураға және қысымға, шығыстағы қысымға байланысты шағын машиналар үшін 30%-дан, ірілеу машиналар үшін 80-ге дейінгі және 90%-тен жоғарыға дейін өзгеруі мүмкін. 3-тарауда көрсетілгендей, сондай-ақ 16,5 МВт-тан астам бу турбиналары үшін, Спенсер мен басқалар әзірлеген эмпирикалық корреляция (1974) қол жетімді болады.

Шағын мөлшердегі турбиналар радиалды конструкциялы, ал үлкен турбиналар осьтік машиналар болып табылады.

6.3-мысал. Конденсациялық бу турбины кірісінде температурасы 400°C, қысымы 42 бар, шығысы 100 000 кг/сағ жағдайында жұмыс істеуге арналған, шығарылған будың конденсациясы үшін салқындатқыш су 30°C температурасында беріледі және салқындату мұнарасына 40°C температурада қайтарылады (яғни 10°C көтерілген жағдайда), ал вакуумдық бу конденсаторында қысу температурасы турбина жұмысының есептелген нүктесінде 5°C құрайды (Жылу алмастырғыштағы ең аз температура айырмашылығы – конденсатордан шығатын салқындатқыш судың температурасы мен конденсацияланушы будың температурасы арасындағы айырмашылық). Турбинаға бу ағынының жылдамдығы 25% төмендейді, ал оның температурасы 375°C дейін төмендейді. Жүйе сырғу қысымын реттеу үшін арналған және турбина кіру шүмегінде ластанған ағын жағдайлары басыңқы, ал оның изоэнтропикалық тиімділігі 80% құрайды, ал 5% құрайтын (бумен өндірілетін қуаттың) механикалық және генераторлық шығындар өте төмен бу шығыны кезінде айтарлықтай өзгермейді деп жорамалдайық. Сәндірілген пайдалану нүктесіндегі бу турбинының кіріс қысымын және шығыс электр қуатын есептеңіз.

Шешу

Егер тығыздықты P қысымымен және T абсолюттік температурасымен мінсіз газ заңының көмегімен ауыстырса, 3.12 теңдеуді массалық m_{sonic} шығыс терминдеріне былай жазуға болады:

$$m_{\text{sonic}}\sqrt{T}/P = K_{\text{sonic}}$$

мұндағы K_{sonic} ағынның көлденең қимасының осы ауданы үшін және тұрақты қысымның тұрақты қалған меншікті жылудың тұрақты көлеміне қатынасы бар мінсіз газ үшін тұрақты шама.

K_{sonic} есептеу нүктесінің деректерін пайдалана отырып анықталуы мүмкін, содан кейін P оның массалық шығыны мен температурасын пайдалана отырып, конструкцияланбаған нүкте үшін анықталуы мүмкін. Турбина шығысының қысымы, ол конструкцияланбаған нүктедегі беттік конденсатордағы қысым болып табылады, 4.1-мысалдағыдай, бірақ итеративті түрде анықталады:

1. Конденсатордың температурасын қабылдай отырып;
2. Қаныққан будың тиісті қысымын анықтау;
3. Бу турбинының есебін орындау;
4. 3-қадамда орнатылған бу турбинының шығару шарттарын пайдалана отырып, беттік конденсатордың жылу беру коэффициентін есептеу;
5. 4.1-мысалдағыдай беттік конденсатордың есептеулерін орындау;
6. 5-қадамда есептелген бу температурасы 1-қадамда қабылданған температурамен сәйкестігін тексеру.

Берілген 5°C салқындатқыш судың шығысындағы берілген температураға 40°C есептік нүктедегі температураны қосу жолымен есептелетін конденсатордың қысымы 45°C кезінде қаныққан бу қысымына сәйкес келеді.

Бу турбинысын есептеудегі бірінші қадам – будан шығу жағдайында қысым мен температура жағдайында берілген немесе есептелген кестедегі (мысалы, Keenan et al., 1969) $\Delta h_{\text{кір.}}^V$ энтальпияның және будың $\Delta s_{\text{кір.}}^V$ энтропиясының нақты оқылуы (негізгі массаның бірлігіне). Кірістегі энтропия қаныққан буға арналған қысымның шығысындағы энтропияға қарағанда төмен болғандықтан шығарды, себебі бу да және сұйықтық та екі фазалы сұйықтық болуы тиіс. Сондықтан келесі қадам Δh^V және Δh^L энтальпиясын және үлестік энтропияны есептеу болып табылады.

Қаныққан бу мен сұйықтыққа арналған шығудағы берілген немесе есептелген қысымда келесі изэнтропикалық теңдеу шешіміне сәйкес пайдаланылған газдардағы X_L (=1 – бу сапасы) сұйықтықтың массалық үлесін анықтау:

$$\Delta S_{\text{кір.}}^V = (1 - X_L) \Delta S_{\text{шығ.}}^V + X_L \Delta S_{\text{шығ.}}^L$$

Белгілі X_L кезінде Δh_{mix} шығысындағы будың тиісті энтальпиясы изэнтропиялық жолмен есептеледі:

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{mix}} = (1 - X_L) \Delta h_{\text{шығ.}}^V + X_L \Delta h_{\text{шығ.}}^L$$

Атқарылған будың нақты энтальпиясы $\Delta h^{\text{белс.}}$ турбинаның $\eta_{\text{турб}}$ изэнтропиялық тиімділігін қолдану арқылы былай есептеледі:

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс.}} = (\Delta h_{\text{кір.}}^V - \Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{mix}}) \eta_{\text{турб}}$$

X^{act} пайдаланылған нақты ылғалдылық келесі теңдеуді шешу арқылы есептелуі мүмкін:

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс.}} = (1 - X_L^{\text{белс.}}) \Delta h_{\text{шығ.}}^V + X_L^{\text{белс.}} \Delta h_{\text{шығ.}}^L$$

6.2-КЕСТЕ. Бу турбинының құрылымы және жобадан тыс сипаттамалары

Турбина	Бірлік	Жобалау нүктесі			Жобалау нүктесінен тыс		
		Кіру	Шығару		Кіру	Шығару	
			Мінсіз	Іс жүзінде		Мінсіз	Іс жүзінде
K_{sonic}		61 767			61 767		
Тиімді (ПӘК)	фракция			0,8			0,8
Жылдамдық	кг/ч	100,000	100 000	100 000	75 000	75 000	75 000
Температура	С	400	45	45	375	41.5	41.5
Қысым	бар	42	0.095	0.095	30.91	0.079	0.079
Энтальпия	кДж	3210.6	2130.1	2346.2	3172.2	2132.5	2,340.4
Энтропия	кДж / кг-К	6.7444	6.7444	7.4239	6.8203	6.8203	7.4815
Бу сапасы			0.81	0.90		0.82	0.90
Қуат	МДж/ч			86,444			62,386
Генератор	фракция			0.95			0.95
Тиімділік							
Электрлік қуат	кВт			22,811			16,463

	фракция	1.00	0.72
Беті	МДж/ч	215 836	162 544
конденсатор	фракция	1.00	0.75
Ластанған			

W турбинаның шығыс электр қуаты содан кейін m будың массалық шығынын және генератордың ПЭК-ін пайдалана отырып былай есептеледі

$$\dot{W} = \dot{m}(\Delta h_{\text{кір.}}^V - \Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}}) \eta_{\text{ген}}$$

Келесі қадам сығылған бушығару кезінде Q беттік конденсатордың жылу жүктемесін есептеу болып табылады. Конденсатор қысымындағы сәйкестендірілген қаныққан сұйықтықтық бу кестелерінен Δh^L үлестік энтальпия. Онда жылу жүктемесі былай есептелуі мүмкін:

$$Q = m(\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}} - \Delta h_{\text{конд.,шығ.}}^L)$$

Құрылымдық руктивтік және құрылымдық емес жағдайлар үшін беттік конденсатордың жұмыс режимдері 4.2 Мысалдағыдай есептерде қолданылады.

6.2-кесте турбина мен конденсатор есебі арасындағы осы итерациялық процедураның нәтижелерін жинақтайды. Бу турбинасына кіре берістегі қысым 42-ден бастап 30,91 барға дейін, ал жұмыс істемей қалса, электр қуатын өндіру 22 811-ден 16 463 кВт немесе 28% төмендейді.

6.2.4 Технологиялық әзірлемелер

Шаң тәріздес көмірі бар қазіргі заманғы электр станцияларына қарағанда анағұрлым жоғары температура мен қысымда жұмыс істейтін жоғары тиімді аса сыни бу циклдары үшін қолайлы бу турбиналарына заманауи материалдар саласында зерттеулер мен әзірлемелер жүргізілуде. Жоғары температуралы аса қорытпалар температураның және қысымның (> 800°C және > 350 бар) қатал бу жағдайларында жарылу, шаршау және тотығу кедергісі бар дайын өнімге қалыптау қабілеті бойынша бағаланады. Сондай-ақ эрозияға, коррозияға және тотығуға төзімді жабындар зерттеледі. Жоғары әлеуетті қорытпалар сыни компоненттерге арналған үміткерлер айналмалы бөлшектерде, сондай-ақ болттық материалдар мен корпус материалдарын қоса алғанда, стационарлық бөлшектерде пайдалану үшін механикалық және коррозиялық қасиеттерге сәйкестендіріледі және бағаланады.

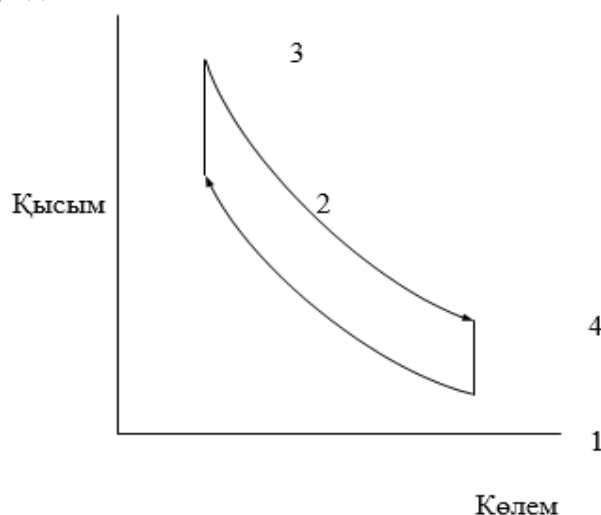
6.3 ІШТЕН ЖАНУ ПІСПЕКТІ ҚОЗҒАЛТҚЫШТАРЫ

Поршеньді қозғалтқыштың мысалдары жедел де және тұрақты қолданылатын бензинді автомобиль қозғалтқышы мен дизель және газ қозғалтқыштары болып табылады. Дизель циклды қозғалтқышта (өнертапқыш Дизель Рудольфтың құрметіне аталған) жану үдерісі сыртқы тұтану көзін талап етпей, сығудың өзі жылуымен басталады және сығылу дәрежесі жанудан болуы мүмкін ауа температурасының жоғарылауы үшін жеткілікті жоғары болуын талап етеді. Екінші жақтан, Отто циклдық қозғалтқышта (өнертапқыш Николаус Отто құрметіне аталған) (бензинді автоматты қозғалтқыштағыдай) от алдыру білтесі жану үдерісін іске қосады, ал қысу дәрежесі өздігінен тұтануды болдырмау үшін шектелген. Осылайша, осы қозғалтқыштардың әрқайсысы үшін қолайлы отын сипаттамалары әр түрлі. Дизель циклы бар қозғалтқышқа арналған отын поршені жоғарғы өлі нүктеге жеткеннен кейін тез жануы тиіс (цилиндр басына жақын орналасқан қысу тактісінің соңында поршеньнің жағдайы), әйтпесе ол жұмыс барысы кезінде толық жанып кетпеуі мүмкін. Отынның бұл сипаттамалары осы бөлімде бұдан әрі сипатталғандай, сығудан тұтанатын қозғалтқыш үшін цетан санымен және ұшқынмен тұтанатын қозғалтқыш үшін октан санымен сандық түрде айқындалады.

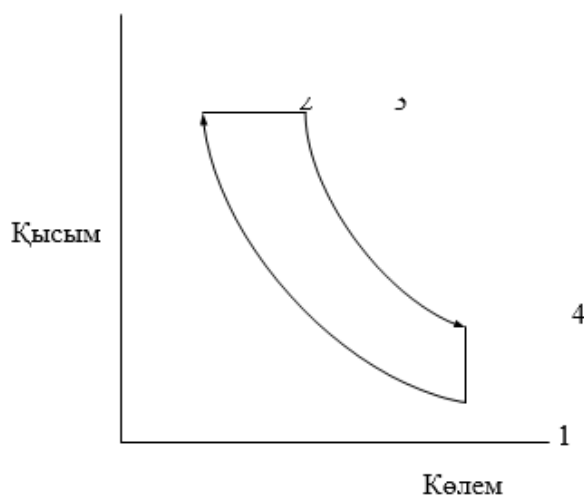
6.3.1 Әрекет ету қағидасы

Поршеньді қозғалтқышта ауа немесе алдын ала сығылған ауа (немесе қозғалтқыштардың белгілі бір типтері жағдайында ауа-отын қоспасы) цилиндрде поршень қозғалысымен қысылады (қысу такты), содан кейін жылу энергиясы пайдалы жұмыс жүргізу үшін (жұмыс барысы) поршеньге қатысты цилиндрдегі қысым астында жанудың ыстық өнімдерін кеңейту қажет цилиндрдегі сығылған ауамен отынның тікелей жануы үшін сығылған ауаға қосылады. Цилиндрлердің қабырғаларын салқындату ортасын цилиндрлердің жейделері арқылы немесе ауамен салқындатылатын қабырғалардың көмегімен салқындатуға болады. Цилиндрлердің қабырғаларын суыту ЖЭО үшін қолдануда жылуды рекуперациялауға және экспорттауға мүмкіндік береді.

Отто циклы бар қозғалтқыштар да, дизель циклы бар қозғалтқыштар да газ тәрізді отынмен жұмыс істей алады. Мұндай қолдануларда дизель циклы бар қозғалтқыштар, алайда ұшқынмен оталуды талап етеді немесе қолайлы сұйық отын (дизель) мен газдың қоспасында жұмыс істей алады, бұл ретте негізгі отын газ болып табылады, ал сұйық отынның аз мөлшері тұтанудың көзі болып табылады. Ауа үшін стандартты цикл түріндегі осы екі цикл үшін үлестік көлем диаграммалары 6.6 және 6.7-суреттерінде (Cengel and Boles, 1998; Smith et al., 2005) көрсетілген (күй нүктесінен 1-ден 2-ге дейін) газды адиабатикалық сығудан және (күй нүктесінен 2-ден 3-ке дейін) келесі жылуды қосудан, содан кейін қысым астында ыстық газды адиабатикалық кеңейте отырып (күй нүктесінен 3-тен 4-ке дейін) газды адиабатикалық сығудан тұрады.



6.6-СУРЕТ. Оттоның ауа-стандартты циклы



6.7-СУРЕТ. Дизельдің ауа-стандартты циклы

Отынның жануы Дизель циклы жағдайында ұзақ уақыт бойы жүреді, ол піспек жоғарғы өлі нүктеге жақындап, жану жұмыс жүрісінің бастапқы бөлігі ішінде жалғасады. Осылайша, жылу қосу кезеңі тұрақты қысымда болатын сияқты идеалданады.

Бұл қозғалтқыштар олардың жұмыс әдісі бойынша анықталатын екі санатқа бөлінуі мүмкін: біріншісі – бұл екі циклда білік айналымы үшін бір рет жұмыс істейтін қозғалтқыштар, ал екіншісі – төрт циклда жұмыс істейтін қозғалтқыштар. Екі белсенді қозғалтқыштар өте аз қуат үшін қолданылады.

6.3.1.1 Екі тактілі қозғалтқыштар. Екі тактілі қозғалтқышта жоғары жүру және поршень жүрісі иінді біліктің бір айналымы үшін аяқталады, бұл жоғары меншікті қуатқа әкеледі, бірақ айналу жылдамдығының тар диапазонында болуы мүмкін. Жану жоғарғы өлі нүкте аймағында орын алады, ал газ алмасу (таза ауа немесе жану өнімдерін ауыстыру үшін ауа-отын қоспасы) әрбір тактаның төменгі өлі нүктесіне жақын жүреді. Осылайша, таза ауаның немесе ауа-отын қоспасының түсуі және жану өнімдерінің шығуы қысу тактісінің басында және кеңейту тактісінің соңында бір мезгілде болады. Осылайша, циклдың әр түрлі кезеңдері: (i) гомогенді ауа-отын қоспасының сығылуы газ қозғалтқышы жағдайында поршеньнің жоғары жүруіне байланысты (дизель қозғалтқышы үшін ауа қысылады, содан кейін қысу тактасының соңына қарай отын гетерогенді қоспаның пайда болуына арналған спрей түрінде цилиндрге бүріледі, (ii) отын-ауа қоспасының ұшқынмен (газ қозғалтқышы үшін) немесе қысу жылуымен тұтануы (дизель қозғалтқышы үшін (iii) поршеньнің төмен жүру кезінде жұмыс істеу үшін ыстық жану өнімдерін кеңейту, иінді білікті айналдырау үшін (iv) цилиндрден жану өнімдерінің шығуы кезінде қысымның тез төмендеуіне әкелетін шығару клапанын ашу, (v) жану өнімдері негізінен таза ауамен (дизельді қозғалтқыштарда) немесе ауа / отын қоспасымен (газ қозғалтқыштарында) алмастырылатын газ алмасу және (vi) цилиндр зарядтау кезінде шығатын клапанды қосу клапаны жабылғанға дейін жабу.

6.3.1.1 Төрт тактілі қозғалтқыш. Төрт тактілі қозғалтқышта поршень қозғалтқыш иінді білігінің екі жекелеген айналымы ішінде енгізу тактісінен, қысу тактінен, кеңейту тактінен және шығару тактісінен тұратын төрт жеке тактіні жасайды.

Поршень жоғарғы өлі нүктеде болғанда шығару жүрісі басталады және ол төменгі өлі нүктеде болғанда аяқталады. Қысылу барысы поршень төменгі өлі нүктеде болғанда, ал іске қосу және шығару клапандары жабық болғанда басталады. Кеңейтудің жұмыс тактісі поршень екі клапаны да жабық кезде жоғарғы өлі нүктеде болғанда басталады және поршень төменгі өлі нүктеде болғанда аяқталады (поршеньнің төмен жүрісі кезінде жұмысты орындау үшін қысыммен жанатын ыстық өнімдердің иінді білікті айналдыра отырып кеңейі). Шығару барысы шығару клапаны ашылғанда басталады және поршень жоғарғы өлі нүктеге жеткенде аяқталады және осы сәтте шығару клапаны жабылады, ал шығару клапаны циклды қайталау үшін ашылады. Осылайша, циклдың әр түрлі кезеңдері мыналар болып табылады: (i) газда жұмыс істейтін қозғалтқыш жағдайында поршень жүрісінің көмегімен жоғары (дизельді отынмен жұмыс істейтін қозғалтқыш үшін ауа заряды сығылады және одан кейін қысу тактісінің соңына қарай отын гетерогенді қоспаның пайда болуы үшін спрей түрінде цилиндрге) бүріледі, (ii) отын-ауа қоспасының ұшқынмен (газ қозғалтқышы үшін) немесе сығылған жылумен тұтануы (дизель қозғалтқышы үшін), (iii) поршеньнің төмен жүруі кезінде жұмысты орындау үшін ыстық жану өнімдерін кеңейту, (iv) цилиндрден шыққан кезде қысымның тез төмендеуіне әкелетін шығару клапанын ашу, (v) екінші жүріс кезінде жоғары қарай цилиндрден жану өнімдерін шығару, (vi) кейіннен шығару клапанын жабу арқылы іске қосу клапанын ашу, (vii) цилиндрдің төмен екінші жүрісі кезінде біртекті отын-ауа қоспасының (газ қозғалтқыштары) таза порциясын немесе ауаның таза порциясын (дизельді қозғалтқыштар) тарту, және (viii) барлық клапандар жабық қысу тактісінің басталуы.

6.3.1.2 Қысымды көтеру мен турбиналы сорғы

Қозғалтқышты қысылған ауамен қамтамасыз ету белгілі бір көлемдегі цилиндрде болатын ауа массасын көбейтеді, бұл отынның көп мөлшерін жануына мүмкіндік береді, осылайша қозғалтқыштың қуатын арттырады.

Қысымның артуы компрессор арқылы көбейтіледі, ол тікелей қозғалтқыштан басқарылуы мүмкін (қысымды көтеру) немесе қозғалтқыштың пайдаланылған газымен

қуатталатын турбина көмегімен әрі пайдаланылған газдар атмосфералық қысымнан жоғары (турбиналы сорғы). Сығу үдерісі қызуды көтергендіктен, қозғалтқыш цилиндрлерінің тығыздығын арттыруға кіріспес бұрын, ауаны салқындату үшін аралық салқындатқыш падаланылады.

Іс жүзінде цилиндрде артық қысымды болдырмау үшін турбиналы сорғы дизель қозғалтқышының сығылу дәрежесі азайтылу керек. Газ қозғалтқыштарында детонацияны болдырмау үшін қысымның қатынасы шектелуі керек.

6.3.2 Қалдықтардың құрамы

Шығарылатын ластаушы заттардың саны отын түріне, сондай-ақ қозғалтқыш үлгісіне байланысты: екі тактілік немесе төрт тактілік. Екі тактілік қозғалтқышта ауа мен отынның бір бөлігі поршеньге түсіп, шығарындыларға айналып, шығару ойығынан шығып кетеді. Сонымен қатар екі тактілік қозғалтқыш картерді майлау үшін отынмен бірге майды (мысалы, бензинмен) бүркуді талап етеді, ол жанармаймен жанып, органикалық қосылыстардың шығарындылары мен күйені көбейтеді. Төрт тактілі қозғалтқыштар, екінші жағынан, жану үдерісінен айтарлықтай айырмашылығы бар жағдайларда арнайы майлау жүйесімен жабдықталған. Қозғалтқыштың пайдаланылған газдары ластағыш заттардың көпшілігін тасымалдайды, бірақ кейбір органикалық қосылыстар поршеньдік сақиналардың артындағы цилиндрлерден шығады және картерден газ тәріздес шығады және май табағынан шығады.

Бұл «Пайдаланылмаған» шығарындылардың бұл түрі дизельді қозғалтқыштарда айтарлықтай төмен. Ішкі жану қозғалтқыштарының негізгі ластағыштары – NOx, жалпы органикалық қосылыстар (TOC), CO және қатты бөлшектер, олар негізінен шығатын көрінетін түтінге жауап береді. NOx қалыптасуы жану үдерісіне кезінде жоғары қысымдар мен температураларға тікелей байланысты және азотпен, отынмен байланысты, ал басқа ластаушы заттар тоқ, CO және түтін толық емес жанудың нәтижесі болып табылады. Қатты бөлшектердің шығарындылары, сонымен қатар жанармайдағы күл мен металл қоспаларының болуымен байланысты. SOx отынның құрамында күкірттің болуына байланысты шығарылуы мүмкін.

Дизельдік және қос отын қозғалтқыштарына арналған NOx бақылау әдісі жану температурасын төмендетуді, ал кейбір жағдайларда қысымды төмендетуді қамтиды. Әдістердің біреуі жану температурасын өзгерту үшін отын мен ауаның қатынасын реттеуден тұрады. Байытылған жану қозғалтқыштары үшін ауаның отынға қатынасы стехиометриялық, сол кезде қозғалтқыштардың жұтанданған отыны ауаның отынға қатынасы стехиометриялыққа қарағанда айтарлықтай жоғары. Қарқынды жану жағдайында, температураны төмендетуден басқа, қалпына келтіру шарттары (O₂ жеткіліксіздігі) сонымен бірге NOx қалыптасуының төмендеуіне әкеледі. Каталитикалық бұрынғы қалпына келтіру және жанудан кейінгі NOx-ті бақылау әдістері де пайдаланылады, сондай-ақ CO және органикалық қосылыстардың тотығу кезінде пайдаланылады.

6.3.3 Іске қосу

Қозғалтқыш білікті оталдыру мен автономды жұмыс істеу үшін жеткілікті жылдамдықта айналдыра отырып іске қосылады.

Кіші қозғалтқыштар электр қозғалтқыштар арқылы қосылады, сол кезде үлкен қозғалтқыштар арнайы клапандармен жабдықталған, қозғалтқышты айналдыру үшін кейбір қозғалтқыш цилиндрлері пневматикалық қозғалтқыштар ретінде жұмыс істей алады, жоғары қысымды ауаны қолдана алады. Қатты қалдық майларда жұмыс істейтін дизельді қозғалтқыштарда қалыпты жұмыс істеу үшін, екі отын жүйесі қажет, қалыпты жұмыс істеу үшін ауыр сұйық отын жүйесі және іске қосу және тоқтату үшін жеңіл май жүйесі.

6.3.4 Өнімділік сипаттамасы

Ұшқын тұтану және қысу тұтануы бар екі тактілік және төрт тактілік қозғалтқыштар да ұқсас сипаттамаларға ие. Жұмыс диапазонында жылдамдық пен қуат барлық жылдамдықтар үшін нөлден толық айналу сәтіне дейін өзгеруі мүмкін және жанармаймен қамтамасыз етуді

реттеуішпен реттейді, ол әр түрлі жүктемелермен тұрақты жылдамдықты сақтайды. Осы қозғалтқыштардың қоршаған ортаның әр түрлі жағдайларына әсер етуінің сезімталдығы айдаушы немесе турбокомпрессордың өлшемін дұрыс анықтау арқылы азайтылуы мүмкін. Стационарлы қозғалтқыштар бірнеше киловатттан 50 МВт-ға дейін шығарылады. Пайыздық тиімділіктің бірінші заңы қозғалтқыштың түріне және оның жұмыс істеу жағдайларына байланысты 20-40 қорғаныс бірлігі болуы мүмкін.

Дизельді және газ қозғалтқыштарының өнімділігі цилиндрлер, поршеньдік сақиналар және механикалық компоненттердің тозуынан нашарлайды, бірақ өнімділікті кем дегенде жартылай күрделі жөндеу арқылы қалпына келтіруге болады. Қозғалтқыштарды тексеру және жөндеу үшін жүйелі түрде сөну керек, ал машиналарға қажетті техникалық қызмет көрсету ПӘК 95%-дан артық тиімділікке ие болуы мүмкін. Пайдалану жиілігіне байланысты бұл қозғалтқыштар электр қозғалтқыштарына немесе бу турбиналарына қарағанда бұзылуға бейім.

6.3.5 Отын типтері

6.3.5.1 Цетан саны

Цетан саны – сығу қозғалтқыштары үшін қолайлы жанармай жану сипаттамаларының көрсеткіші. Ол жанармай бүрку басталуының және тұтанудың басталуының арасындағы уақыт кезеңі болып табылатын отынның жанудың кешігуін өлшейді; цетанның саны неғұрлым жоғары болса, онда тұтану кідірісі қысқарады. Әдетте дизельді қозғалтқыштар 40-тан 55-ке дейінгі цетан саны жақсы жұмыс істейді. Өте тез тұтанатын зат Цетан (н-гексадекан) еркінше 100 бағалауын алды, сол кезде баяу тұтанатын зат ретінде 1-метилнафтален деп аталады (бірақ 15 бағалауын бар изокетанмен ауыстырылды) нөлдік баға және осы масштабтағы мәндер цетан сандары деп аталды. Жанармайдың цетан нөмірін анықтау үшін арнайы құрастырылған компрессияны реттейтін қозғалтқыш отынның цетан санын анықтауға пайдаланылады.

Сынаққа алынған жанармайы 13 жоғарғы өлі нүктеге бүркейді, мұнда 13 бұрышы поршендердің әрқайсысын (бірнеше цилиндрден тұратын қозғалтқыштың) жүктемені жалғайтын иінді біліктің айналуына қатысты.

Содан кейін қозғалтқыштың қысу коэффициенті жоғарғы жағында отын жанша реттеледі. Бұдан соң қозғалтқыш цетан қоспаларында және 1-метилнафталенде әзірше жануы сол отынның тығыздығымен бірдей дәрежеде пайда болғанша жұмыс істейді.

Қоспадағы цетанның көлемі бойынша тиісті пайыздық көрсеткіш цетан саны болып табылады. Бұл сынақсыз цетанның санын отынның нақты салмағы мен температурасынан үлгідегі 10, 50 және 90% буланғанын бағалауға болады.

6.3.5.2 Октандық сан.

Іштен жанатын қозғалтқыштар жағдайында, жанармай ұшқын от көзінен тұтану уақытында жанып кетпес бұрын өздігінен жанбауы керек, әйтпесе «детонация» тудырады (жұмыс кезінде шу естілуі мүмкін). Октан саны бұл сипатты өлшейді; октан саны неғұрлым жоғары болса, жанармайдың тұтану алдында тұра алатын қысымы күшейеді. Зерттелген октанды саны бүкіл әлемде қолданылатын октанның ең көп тараған түрі болып табылады, және детонация қарқындылығы жанармаймен бірдей болатын қоспасы табылғанша қозғалтқышты изооктан және н-гептанның әр түрлі қоспаларында іске қосу арқылы анықталады. Қоспада изооктанның тиісті көлемінің пайызы октан саны болып табылады.

Тұрақты өнеркәсіптік қозғалтқыштарда қолданылатын отын әдетте мұнайдан алынады, бірақ табиғи газ, биомассада газды синтездеу газы, газ тәріздес реактор және қоқыс газы қолданылады. Газ тәрізді отын шаңнан тазартылу керек, коррозияға жол бермеуі керек, соққыға детонацияланбау және сығымдау кезінде жанбау керек және электр қуатын дамыту үшін жағу кезінде жеткілікті қуат шығару. Осындай газ тәріздес отынмен қысу от қозғалтқыштарында 5-6% дизель отынын тұтыну қажет болуы мүмкін. Сұйық жанармай түйіршіксіз, бүркілетін, бүрку поршендердің тозуын азайту үшін жеткілікті майлылыққа ие болуы және, әрине, энергия шығаруға жағу кезінде жеткілікті қуатты босату керек. Кейде отын тұтқырлығын азайту үшін отынды алдын ала қыздыру қажет болуы мүмкін.

6.4 ГИДРАВЛИКАЛЫҚ ТУРБИНАЛАР

Гидравликалық турбиналар ағымды сұйықтықтан айналмалы білікке дейінгі кинетикалық энергияны береді; сұйықтық, сұйықтық әдетте қысым астында болады немесе потенциалды энергия жинақтаған, сұйықтық турбинаға кірген кезде сұйықтықтың кинетикалық энергиясына айналады. Гидротурбиналар гидроэлектр станцияларында, сондай-ақ өңдеу өнеркәсібінде қолданылады, бірақ бұл турбиналардың конструкциясы екі қолдануда әр түрлі.

6.4.1 Өңдеу өнеркәсібінде қолдану

Өндірісте бұл турбиналар энергияны қалпына келтіруге арналған гидравликалық турбиналар деп аталады. және қысымын төмендету арқылы сұйықтық ағынының энергиясын алу үшін пайдаланылады, керісінше, қысымның төмендеу клапаны арқылы жоғалуы мүмкін.

Гидравликалық турбинаның жалпы түрі – кері айналымы бар ортадан тепкіштік сорғы. Ортадан тепкіштік сорғылардың әр түрлі түрлері гидравликалық турбиналар ретінде пайдаланылуы мүмкін, бұл конструкцияның кері өзгеруіне және жоғары кіріс қысымына байланысты. Техникалық сұйықтығы әрқашан қол жетімді болмағандықтан емес немесе оның қысымы өзгеретіндіктен, гидравликалық турбина әдеттегі дербес желі ретінде пайдаланылмайды, оның орнына ол электр қозғалтқышымен бірге қозғалтқышты пайдаланатын қуатты азайту үшін негізгі желі ретінде пайдаланылады. Гидравликалық турбина жұмыс істейтін сұйықтық қол жетімсіз болғанда тіркеуді пайдаланып қозғалтқыштан ажыратылады немесе оның қысымы гидравликалық турбинаның жүйені тежеуіне жол бермеу үшін тым төмен болады.

Энергияны қалпына келтіруге арналған гидравликалық турбинаның өнімділігі сорғыдан ерекшеленеді. Ең төменгі деңгейден ең жоғары ағындық диапазонға дейін жұмыс істейтін сорғыдан айырмашылығы, гидравликалық қуатты қалпына келтіру турбинасы ең жақсы (БЕР) тиімділік нүктесіне жақын жерде жұмыс істеуге тиіс. ВЕП-тың төмен ағымдарда гидротурбиннің энергияны қалпына келтіру мүмкіндігі айтарлықтай төмендейді және төменгі ағындық жылдамдықта ол жүйеде тежегіш бола алады.

6.4.2 Гидроэнергетикалық қондырғыларда қолдану

Гидравликалық турбиналардың екі негізгі түрі бар: импульстік және реактивті, ал турбинаның түрі таңдалған судың биіктігіне («бас») және ағын жылдамдығына байланысты. Басқа факторлар су турбинасын, оның тиімділігі мен құнын қаншалықты терең орнатуға болатынын қамтиды. Импульстік турбина «жүргірішті» (роторды) жылжыту үшін су жылдамдығын пайдаланады және атмосфераға дейін қысымды төмендейді. Импульстік турбина әдетте жоғары қысым және төмен шығынды қолдану үшін қолайлы. Реактивті турбина қысымды және су жылдамдығының аралас әсерінен энергияны шығарады.

Реактивті турбиналары әдетте импульстік турбиналарға қарағанда төменгі басы мен жоғары ағындық жылдамдығына сай келеді. W_{Hy} турбинасы нығайтылатын гидравликалық қуат, сорғыға қолданылатын теңдеуге ұқсас теңдеуді пайдалана отырып есептелуі мүмкін, және турбинадағы 3-фазада өзгерістер болмаған жағдайда мынадай түрде берілген. Тұрақты сұйықтық биіктігі (қысымы) белгілі мәнге тең болса, онда гидростатикалық қысымның орнына турбинаға арналған ΔP_{turb} статикалық қысымның төмендеуі сұйықтықтың тығыздығын пайдаланып қысымнан есептелуі мүмкін.

$$W_{Hy} = \Delta P_{turb} V \eta_{Hy}$$

мұнда V – көлемді шығын, және η_{Hy} – турбинаның гидравликалық тиімділігі. Жоғарыда аталған гидравликалық қуат желінің пайдалы қуатын анықтау үшін механикалық және генератордың тиімділігіне көбейтілуі тиіс.

ӘДЕБИЕТ

- Bhargava R, Meher-Homji CB. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging. ASME IGTI Turbo-Expo Conference; June 2002; Amsterdam, Holland.
- Burrus DL, Johnson AW, Roquemore WM, Shouse DT. Performance assessment of a prototype trapped vortex combustor for gas turbine application. Proceedings of the ASME IGTI Turbo-Expo Conference; June 2001; New Orleans, LO.
- Cengel YA, Boles MA. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. Hightstown, NJ: McGraw-Hill; 1998.
- Gemmen RS, Richards GA, Janus MC. Development of a pressure gain combustor for improved cycle efficiency. ASME Cogen Turbo Power Congress and Exposition; October 25-27, 1994; Portland, OR.
- General Electric Bulletin GEI41040G. Specification for fuel gases for combustion in heavy-duty gas turbines. Schenectady, NY: General Electric Company; revised January 2002.
- Hsu KY, Gross LP, Trump DD. Performance of a trapped vortex combustor. Paper No. 95-0810, AIAA 33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit; January 1995; Reno, NV.
- Keenan JH, Keyes FG, Hill PG, Moore JG. *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1969.
- Rao AD, Francuz DJ, West E. Refinery gas waste heat energy conversion optimization in gas turbines. ASME Joint Power Generation Conference; October 1996; Houston, TX.
- Smith JM, Van Ness HC, Abbott MM. *Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics*. 7th ed. Boston, MA: McGraw-Hill; 2005.
- Smith LL. Ultra low NO_x catalytic combustion for IGCC power plants. Prepared by Precision Combustion Inc., U.S. Department of Energy Topical Report; March 2004. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Spencer RC, Cotton KC, Cannon CN. A method for predicting the performance of steam turbine- generators: 16,500 kW and larger. Paper no. 62-WA-209; ASME Winter Annual Meeting; New York; Revised July 1974 version.

7

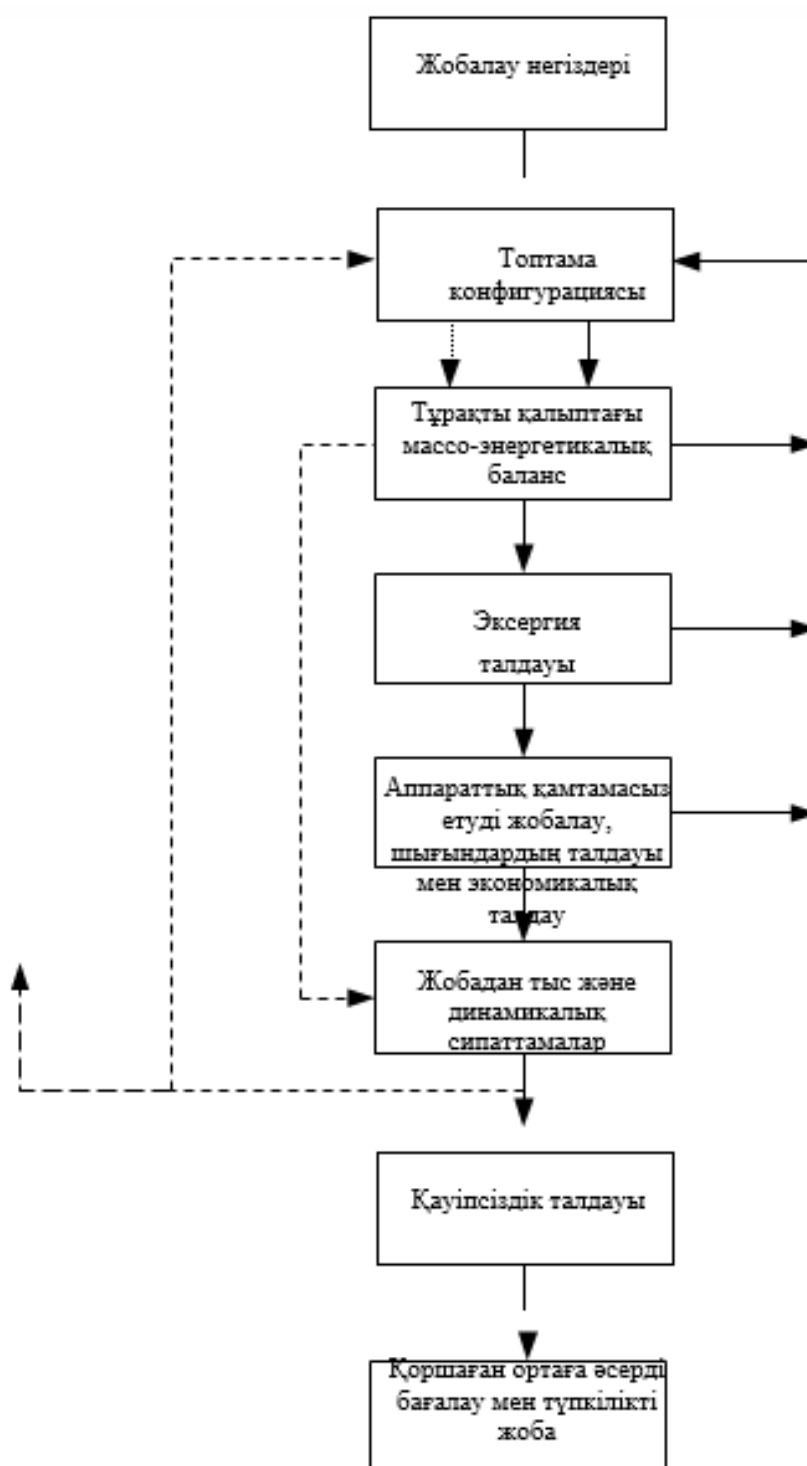
ЖҮЙЕЛЕРДІ ТАЛДАУ

Әр түрлі нұсқалардың ішінен осы үрдісті құратын тиісті үрдісті (біздің жағдайда энергияны экологиялық қауіпсіз қайта құру үшін) немесе ілеспе жүйені таңдау әр баламаның экологиялық сипаттамасы мен экономикалық бағасын қоса есептегенде салыстырмалы өнімділікті анықтау үшін жүйені алдын ала жобалау мен құнын бағалауы жататын жүйені талдауды талап етеді. 7.1-суретте әр балама үшін осындай талдауды әзірлеуге талап етілетін әр түрлі міндеттер ұсынылған. Осы жұмыс міндеттерінің кейбіреулерін тек сапалы негізде орындауға болатын жұмыс міндеттерінің ішінен қаншалықты егжей-тегжейлі болу керектігіне байланысты талдаудан шығаруға болады. Мысалы, алдын ала зерттеулер, жобадан тыс және динамикалық сипаттамалар үшін, сонымен қатар қауіпсіздік талдауы үшін, яғни жүйе бөгет болуы мүмкін ерекше қызметтермен аяқталмай ма екендігін анықтау үшін түбегейлі технологиялық сызбанұсқаны зерттеу жолымен тек сапалы негіздегі міндеттер қарастырылуы мүмкін. Орындауды талап ететін әр түрлі міндеттер төменде қарастырылған және сызбанұсқада көрсетілгендей жүйе конфигурациясы қайталана дамуы мүмкін, өйткені кейінгі көптеген операциялардың нәтижесіне байланысты өзгерістерге ұшырауы мүмкін. Бұл бөлім қондырғыны салуға қажетті үрдісті түбегейлі жобалауды қарастырмайтындығын атап өту керек. Төменде алдын ала орнатылуы тиіс минималды талаптар аталған.

7.1 ЖОБАЛАУ НЕГІЗДЕРІ

Кез келген жүйені талдаудың бірінші кезеңі жүйе жобаның белгілі шарттарына келетіндей белгілеу болып табылады. Сонымен қатар оған әр түрлі баламалардың бірізді салыстырулар үшін жобалық өлшемшарттар жинағы кіреді.

Төменде алдын ала орнатылуы тиіс минималды талаптар аталған.



7.1-СУРЕТ. Жүйені талдаудың жұмыс үрдісі

7.1.1 Отынның және оның берілген құрамының техникалық сипаттамалары

Бұған отын мен шикізатта бар қоспалардың, ластану деңгейінің болуы мен құрамы, оның қысымы мен температурасы, қайда қолданылатындығының анықтамасы жатады. Сонымен қатар осы өлшемдердің өзгергіштігі көрсетілуі керек, өйткені ол жүйе жобасына тікелей әсер етеді. 1-бөлімге сәйкес, табиғи газ бен көмір сияқты отын түрлерінің құрамы әр түрлі болуы мүмкін және жүйе жобасы «жобаланбаған» отын қабылдауы керек.

7.1.2 Жылуды бұру тәсілдері

Жүйеге келетін энергияның маңызды бөлігі екінші заңдылықтың шектеулеріне сәйкес материя мен энергияның өзгеруі болған сайын әрдайым жылу энергиясы түрінде (егер ол ЖЭО болмаса) қоршаған ортаға шығарылады. 8-бөлімде сипатталған жылуды бұрудың әр түрлі әдістері бар және тиімдірек әдісті таңдау алаңның жергілікті жағдайына ғана байланысты емес (судың болуы және ауаның ылғалдылығы) және де экологиялық нормаларға да байланысты. Егер ылғалдылық көрсеткіштері жоғары болса, онда градирняларды орнату қажет емес. Егер де салқындату үшін бір рет су алуға болатын көл, мұхит немесе өзен сияқты үлкен су қоймасының болуы қарастырылса, тіршіліктің су ортасын шығынға ұшыратуды болдырмау үшін қоректендіретін су қоймасына қайтып келетін су температурасының жоғарғы шегі орнатылған жергілікті экологиялық нормаларды ескеру керек. Кері қайтатын судың температурасы салқындататын су айналымының жылдамдығына әсер етеді және де айналмалы су сорғысының көлеміне, оның пайдалану қуатына және құнына әсер етеді. Сонымен қатар экологиялық нормалар тор арқылы өтетін ұсақ су фаунасын (құрттар күйінде) жою мен сорып алуды болдырмау үшін суды алу нүктесін көрсету әдісі мен су тіршілік ортасының ауытқуын болдырмау үшін су қоймасына судың кері төгілу әдісін қарастыруы мүмкін, бұл жағдайда төгу жүйесінің құнына әсер ететін төгу жерінің бірнеше жері қажет болуы мүмкін.

7.1.3 Қоршаған орта жағдайлары

Жобалық мәні ретінде, соның ішінде құрғақ және ылғалды термометр бойынша температура көрсеткіштері (қоршаған орта ауасының ылғалдылығын анықтауға және қондырғы жылуын бұру үшін ылғалды градирняларды қолданған уақытта салқындату үшін суды беру температурасын орнатуға қажетті) және атмосфералық қысым ретінде қоршаған орта жағдайын таңдау болып табылады. Осы қоршаған орта жағдайлары әсер ететін ішкі жану қозғалтқыштарына компрессорлар мен газ турбиналар сияқты турбокомпрессорлы құрал-жабдықтардың пайдалану сипаттамасына, сонымен қатар ішкі жану қозғалтқыштарына қосымша олардың өлшемі өзгереді. Әсіресе «құрғақ салқындау» жағдайында жылуды бұру жүйесінің жұмыс сипаттамасы мен өлшемі де (мысалы, ауа салқындау жылу алмасуы) қоршаған орта жағдайына байланысты. Бұл жағдайлардың өзгергіштігі құрғақ термометр бойынша минималды және максималды температураны және ылғалды термометр бойынша ілеспе температураны көрсету жолымен түсіндіріледі. Кем дегенде жүйе осындай экстремал жағдайларда жұмыс істей алатындай сапалы орнатылуы керек. Мысалы, қондырғы құны қысқы пайдалану мен құрал-жабдықтар орналасқан, мысалы, құрғақ термометрдің минималды температурасына байланысты бу турбинының қондырғысы. Жүйенің аса түпкілікті талдауы кезінде қондырғының өнімділігі өнімділіктегі өзгерістерді бағалау үшін жобадан тыс талдау ретінде қоршаған ортаның минималды және максималды жағдайында талап етілуі мүмкін. Сонымен қатар осы экстремалды жағдайда қондырғының өнімділігін шектейтін құрал-жабдық анықталуы мүмкін және жалпы проблеманы жою үшін мұндай құрал-жабдықтардың көлемінің өсуі расталса бағалау жүргізілуі мүмкін.

7.1.4 Пайдалану ортасының басқа да өзіндік факторлары

Назарға алынатын немесе атап өтілетін жергілікті жағдайларды есепке алудың басқа да ерекшеліктеріне, әсіресе бір зерттеу нәтижесінің басқасымен салыстыруы кезінде олар қондырғы бағасына әсер ететіндіктен төмендегілерді енгізеді:

- Топографиялық учаске – әдетте зерттеу үшін болжамды деңгей, бірақ егер деңгей болмаса, онда учаскені әзірлеуге қосымша шығындарды ескеру керек.
- Алаңға қол жетімділік – егер оның теңізге шығатын жері болмаса, онда ол темір жол мен автомобильдік шоссе бойынша қол жетімділікке ие және бұл жағдайда алаңға тасымалдауға қажетті өндіруші жасаған құрал-жабдықтар үшін көлемінің максималды шегі орнатылады. Көпір астындағы саңылау цехтерде жасалған ыдыстар үшін максималды диаметр (шамамен 4м) белгілейді. Теңізге шығатын жері жоқ учаскелер үшін үлкен көлемді құрал-жабдықтар жасау керек, яғни қосымша шығындарды талап ететін жерде, бірақ осы құрал-жабдықтың пойыз бен желі саны азаюы мүмкіндігінен қондырғының жалпы құнына

негізделген арзандау нұсқасы болуы мүмкін. Мысалы, үнемдеу бақылау-өлшеу аппаратурасында және оған байланысты электрлік сымда және/немесе пневматикалық құбырда іске асуы мүмкін. Технологиялық және коммуналдық құбырдағы үнемдеу, оның үлкен диаметрі масштаб¹ есебінен үнемдеуінен үлкен өнімділікке қажетті болғандығына қарамастан үнемдеуге қол жетуі мүмкін. Құрылымдық тірек пен іргетас шығындары жалпы зауыт бойынша төмендейді. Алайда алаң су жолдарына жақын орналасса, мүмкін ірілеу құрал-жабдық баржамен жіберілуі мүмкін.

- Бастапқы материалды жеткізу «алаңға қол жетімділікке» байланысты. Шикізатты беруде қолданылатын тасымалдау әдісі олардың құнына әсер етеді. Кейде көмір негізіндегі ірі зауыттар шығынданбау үшін, әсіресе көмір лигнит сияқты төмен сапалы болса, шахтаның аузына жақын жеріне орналасуы мүмкін.

- Зауыт қалдықтарын жою – көмір зауытының күлі сияқты зауыт қалдықтары, алаңда көмілуі мүмкін, бұл жағдайда көлік шығындарын болдырмауға болады.

- Көміртегің тұту мен қысқарту – егер CO₂ шығарылуы шектелген болса (көмір электростансасындағыдай), онда тұтылған CO₂ қандай деңгейде жойылады, яғни тұту мен зауыт алаңынан жою үшін қолданылатын әдіс және CO₂ қандай қысыммен тасымалданады.

- Шикі суды беру – қазандықтарға құнарлы суды әзірлеу кезінде өңдеу шығындарына әсер ететін балғын су бар ма, қанша және оның талдамасы, сонымен қатар ылғалды градирияға толықтыру ретінде қолдану кезінде. Егер су жетпесе, онда ылғалды градирияларды қондырғыдан жылуды бұру үшін қолдануға болмайды.

- Топырақ жағдайлары – ескерілуі қажет кез келген ерекше ескертулер іргетастың құнына әсер етеді, яғни бағана мен алқап салу.

- Сейсмикалық аймақ – ескерілуі қажет кез келген ерекше ескертулер құрылыстың іргетасы мен жобалауына әсер етеді.

7.1.5 Қоршаған ортаға шығарылатын қалдықтардың шекті рұқсат етілген көрсеткіші

Қоршаған ортаға сұйық және қатты шығарылымдарды шығаруды ескере отырып жобалау өлшемі жүйе конфигурациясына қосылуы тиіс ластануды төмендету бойынша қажетті шараларды және құрал-жабдықтар түрін таңдауды анықтайды. Қоршаған ортаға шығарылатын заттардың өлшемдерін анықтау кезінде, соның ішінде шығарылатын заттардың қолданыстағы нормативтері, реттеу тенденциялары мен бақылаудың аса күшті қол жетімді технологияларының жағдайын ескеру керек (BACT). Шығарылатын заттардың ағымдық нормативтері электр энергиясын өндірудің жаңа көзінің пайдалану сипаттамасына белгіленеді (NSPS). 1970ж. таза ауа туралы заңына түзету АҚШ қоршаған ортаны қорғау агенттігі (US EPA) жаңа және түрлендірілген стационарлық дереккөздер NSPS әзірлеуін талап етеді. NSPS бағдарламасында реттелетін ластаушы заттар ТЧ, SO₂, NO_x, CO, VOC, түссіздік, диоксиндер/ фурандар, фторидтер, ылғал H₂SO₄, Cd, Pb, Hg, төмен күкірттің жалпы құрамы, қатты тұрмыстық қалдықтар қоқысындағы төгілген заттар және металл мен қышқыл газдардың муниципалдық қалдықтарының жану камерасына төгілетін заттар (SO₂ и HCl).

Жаңа қондырғының шығарылатын заттарына әсер ететін басқа да нормативтік актілерілерге қоршаған орта ауасы сапасының стандарттарына жауап бермейтін аудандарда орналасқан көздер үшін минималды жол берілетін салыстырмалы шығарылымдар технологияларына (LAER) (сонымен қатар «экологиялық талаптарға сай келмейтін аймақтар» сияқты белгілі) немесе атмосфералық ауаның сапа стандарттарының талаптарына жауап беретін аймақтарда орналасқан жаңа көздер үшін BACT анықтауға сай келетін шығарылатын заттарды бақылау технологиясының орнатылуын талап ететін ауа ортасының маңызды ластануын алдын алу (PSD) мен жаңа көздердің сараптамасы (NSR) жатады.

Осы уақытта Құрама Штаттарда CO₂ шығарылымдары реттелмейді, бірақ келешекте шектеулер орнатылуы мүмкін деген болжам бар. 2013 жылғы 20 қыркүйекте АҚШ қоршаған ортаны қорғау агенттігі келешектегі электр станцияларынан CO₂ шығарылымдарына

¹ Ірілеу құрал-жабдықтың меншікті құны (куат бірлігінің құны) кішірек құрал-жабдыққа қарағандағы екеуі де цехтерде жасалса төмендеу. Алайда, жоғары қысымды ыдыстар жағдайында қабырғаның қалыңдығы айналма кернеудің өсуінен диаметрмен бірге өседі және цехтерде жасалған диаметрі кіші ыдыстар мен алаңда жасалған ыдыстар арасындағы компромисс кезінде ескерілуі керек.

ұсынылатын NSPS хабарлады, бірақ олар қолданыстағы электростанцияларына қолданылмайды. Табиғи газ бен көмір қондырғылары үшін жеке мемлекеттік шектеулер ұсынылады. Табиғи газбен жұмыс істейтін жаңа кішігірім энергоблоктар CO_2 МВт/сағ. 1100 фунт (499кг)-тан аз бөлуі керек болған кезде табиғи газбен жұмыс істейтін ірі электрстансалары CO_2 МВт/сағ. кемінде 1000фунт (454кг) бөлуі керек. Жаңа көмір агрегаттары CO_2 МВт/сағ. 1100фунттан (499) аз бөлуі керек. Бұл құрылғылардың операторлары қаттырақ қол жетімділікке қол жеткізу үшін бірнеше жыл бұрын өз шығарылымдарын орталатып қосымша икемділікті таңдауы керек. Табиғи газбен жұмыс істейтін біріктірілген циклді үлкен жаңа қондырғылар осы стандартқа сай келуі мүмкін, бірақ көмірмен жұмыс істейтін электр станцияларына (шектен асқан қысымды) көміртегінің шамамен 40% тұту талап етіледі.

7.1.6 Пайдалану коэффициенті

Қондырғының талап етілетін қуаттылық коэффициенті (ҚК) қондырғының құнына әсер ететін резервтік отынды беру қажеттілігі (және сұйық зат жағдайында оны сақтау) және қауіпті құрал-жабдықтағы қуаттылық қорын анықтайды. Резервтік отын пайдалану шығындарын арттырады. ҚК зауыт экономикасына тікелей әсер етеді, өйткені өнімді сатудан белгілі бір уақыт кезеңі бойы табыс ағымына әсер етеді, сонымен қатар капиталдың қаншалықты жақсы қолданылатындығын өлшейді. Электр энергиясын сенімді қамтамасыз ету жөніндегі Солтүстік америкалық штаттар кеңесі (NERC) дайындықтың эквивалентті коэффициенті аз жүктемеде жоспарланған жұмыс уақытын, сонымен қатар аз жүктемедегі маусымдық жұмыс уақытын ескерген жағдайда өнімге әрқашан сұраныстың бар болуын болжай отыра зауыттың ҚК шарасы ретінде дайындықтың эквивалентті коэффициентін анықтайды. 400-599 көлеміндегі диапазонда көмір қазандықтары үшін дайындықтың эквивалентті коэффициентінің орташа мәні 2004 жылы шамамен 85% құрады және кен отынында жұмыс істейтін әр түрлі электр стансалары жүйесінің талдауында демеушілік ететін АҚШ Энергетика министрлігі қолданатын мән болып табылады (Black, 2010). Көмірді берумен кешенді газификацияның біріктірілген циклы үшін тиісті ҚК 80%-ға төмен болды. Ал табиғи газдағы біріктірілген цикл үшін 85% болды.

7.1-мысал. Құрама Штаттарда газ турбинасының негізінде газ турбинасынан немесе аралас циклдан NO_x шығаруларының шегін анықтау үшін қоршаған ортаны қорғау нормалары көлемі бойынша миллион бөліктерінде және құрғақ қалыпта O_2 концентрациясы көлемі бойынша өндірілетін қуаттың бірлігіне бөлінетін NO_x емес, 15% құратындай (« ppmv », 15% O_2 ») түтін газынан ауаны шығару немесе қосу жолымен O_2 15% дейін «түзету» кезінде көрінеді. ppmv негізінде А және В аралас циклының екі қондырғы төгетін NO_x , O_2 15% және өндірілетін қуат бірлігін салыстырыңыз ($x=2$ қолдана отырып, алайда NO газ турбинасының жану камерасында пайда болады, Nox нақты формасы атмосферада NO_2). Түтін газында O_2 концентрациясын 15% арттыруға қажетті құрғақ затты қайта есептеуде сұйылту ауасы O_2 20,9% тұрады деп есептелік. Бұл екі зауыттың деректері 7.1-кестеде көрсетілген.

Шешімі:

Есептеу 7.2-кестеде көрсетілген. O_2 15% дейін құрғақ негізде және түзету кезінде көрінуінде бұл екі зауыттың NO_x «бірдей» шығарылымдары бар екеніне қарамастан А зауыты таза МВт түрінде В зауытына қарағанда NO_x 10% көбірек төгеді және көбірек ластайтындығын көруге болады, өйткені В зауыты тиімдірек.

7.1-КЕСТЕ. Біріктірілген циклдың мәліметтері

Зауыт	А	В
Таза өндірілу қуаттылығы (МВт)	518.4	564.7
Қалыптасқан NO_x (кг/сағ.)	56.2	56.0
Түтін газдарының шығыны (кг/сағ.)	4.179.592	3.230.636
Түтін газдарының негізгі компоненттері(көлемі,%)		
O_2	14.14	12.09
$\text{N}_2 + \text{Ar}$	76.56	75.2
CO_2	3.1	4.04
H_2O	6.2	8.67

7.2-КЕСТЕ. Шығарындыларды есептеу NOx

Завод	A	B
Молекулярлық масса Nox	46.01	46.01
NOx пайда болған (кмоль/сағ.)	1.222	1.217
Түтін газдарының молекулярлық массасы	28.46	28.28
Түтін газдарының молярлық шығыны (кмоль/сағ.) Құрғақ түтін газдарының негізгі компоненттері (көлемі, %)	146,872	114,242
O ₂	15.07	13.24
N ₂ + Ar	81.62	82.34
CO ₂	3.30	4.42
H ₂ O	0	0
Барлығы	100.00	100.00
Құрғақ түтін газының молекулярлық массасы	29.15	29.25
Құрғақ түтін газының молярлық шығыны (кмоль/сағ.)	137,766	104,337
Құрғақ түтін газының молярлық шығыны 15%-дан O ₂ , кмоль/сағ.[= Құрғақ түтін газының молярлық шығыны×(20,9% O ₂ құрғақ түтін газында)/(20.9-15)]	136,024	135,502
Nox шығарылымдар,ppmvd(15% O ₂)	9.0	9.0
Nox шығарылымдар(кг/мВт/сағ.)	0.1084	0.0992

7.1.7 Жобадан тыс талаптар

Қоршаған орта жағдайының белгілі бір диапазонындағы жұмыс үшін жүйеге қойылатын талап анықтамасына қосымша электр энергиясын өндіретін зауыт өзінің негізгі өнімі ретінде жүктеме өзгерістерін тез қабылдау қабілеті талап етіледі ме (кестеде көрсетілгендей) және зауыттың қаншалықты төмен өнімділігін төмендету керек деген анықтамасы болатындығы да маңызды. Жүйенің динамикалық модельдеу жүктемені қадағалау мүмкіндігін анықтау үшін талап етіледі. Бірақ қондырғының өнімділігінің төмендеуінің минималды жол берілетін деңгейі үшін жобалық мәні мен құрал-жабдықпен пайдалану проблемасының болуын анықтау үшін есептелген құрал-жабдықтарға жүйенің жобадан тыс сипаттамаларын әзірлеу қажет болуы мүмкін. Станцияны өшіру мүмкіндігі құрал-жабдықтар немесе ілеспе жүйенің бірнеше технологиялық желілерін орнату жолымен кеңейтілуі мүмкін және де кем дегенде станцияда негізгі құрал-жабдықты өшірудің максималды мүмкіндіктерін қайта қарастырып, осы құрал-жабдық үшін жеке технологиялық желілер санына қатысты шешім қабылдау керек. Мысалы, екі желі, олардың әрқайсысы зауыттың жалпы жобалық қуаттылығының жартысына ие немесе үш желі, олардың әрқайсысы зауыттың жалпы жобалық қуаттылығының үштен бір бөлігіне ие. Алдында түсіндірілгендей, зауыт құны өседі, өйткені кіші құрал-жабдықтың меншікті құны (қуат бірлігінің құны) көбірек, сонымен қатар электрлік, бақылау және құрылымдық құрал-жабдықтармен байланысты шығындар технологиялық желілер санының өсуімен бірге өсетіндігіне назар аударыңыз.

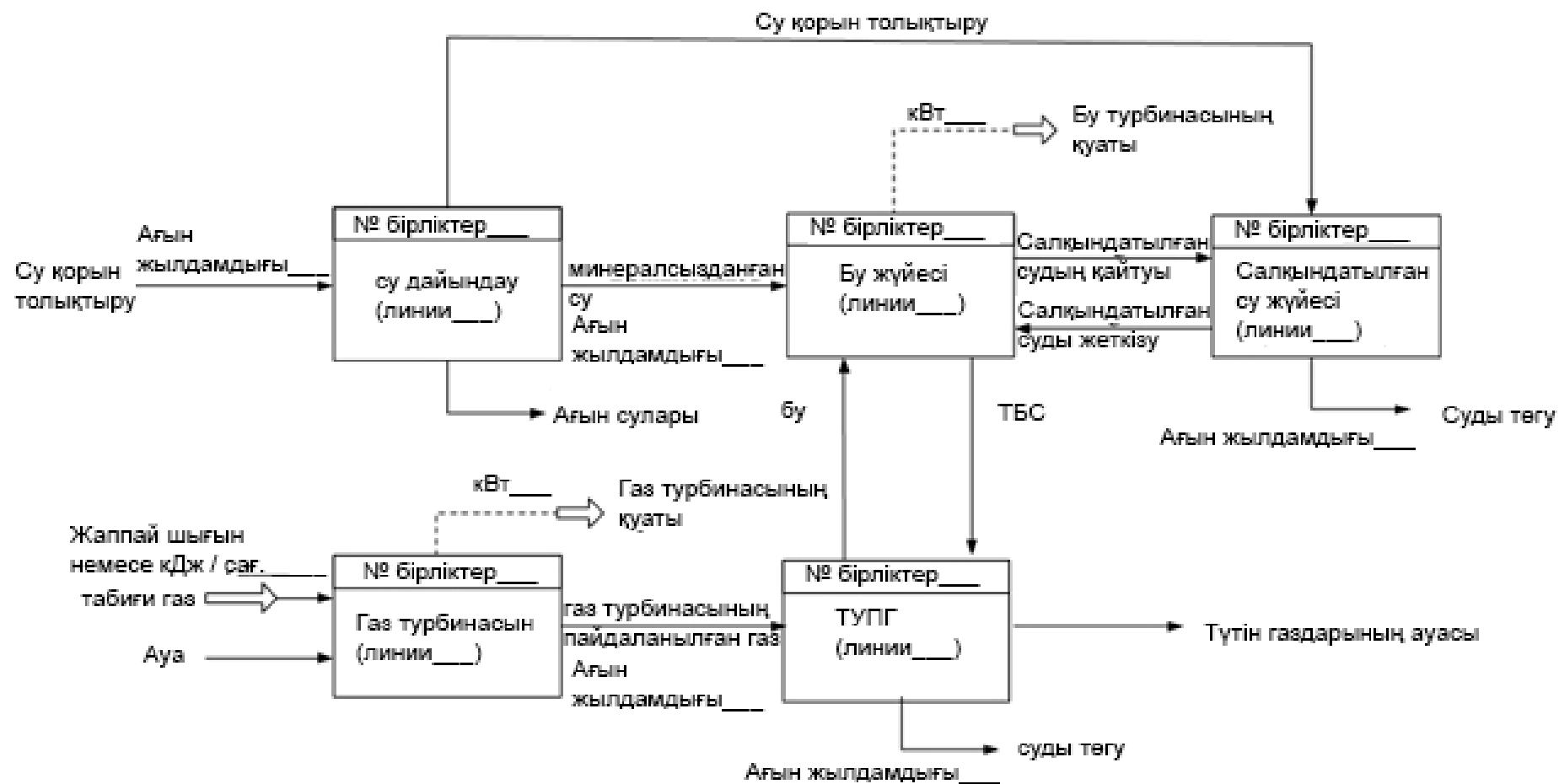
Жоғарыда айтылғанға қосымша құрал-жабдықтардың жобалау өлшемдері шығынды бағалау үшін құрал-жабдық анықталғанға және бағаланғанға дейін белгіленуі керек. Жылу алмастырғыш жағдайында ыстық және суық ағын температурасының әр түрлілігі сұйықтық түріне байланысты сияқты минималды қозғаушы күштері немесе қоршаған ортаға салқындайтын судың температурасының жақындауы градирнядағы ылғалды термометр бойынша алдын ала зерттеулерде анықталуы керек. Өйткені мұндай өлшемдерді оңтайландыру зерттеу мен бюджет аясынан тыс шығыны мүмкін.

7.2 ЖҮЙЕ КОНФИГУРАЦИЯСЫ

Бастапқы кезең жалпы технологиялық блок-сызба (ТБС) арқылы аса жоғары деңгейде жүйенің конфигурациясын тұжырымдамалауды білдіреді. ТБС үдерістің кең шолуын береді және өте аз белгілі бір бөлшектерден тұрады. Орта ағыны бағытының бағдар-нұсқаушы арқылы барлық жүйенің «бірлігі» немесе негізгі ілеспе бөлімдері арасындағы тәртіп пен өзара байланысты көрсетеді. 7.2-суретте біріктірілген циклы бар газ турбиналы қондырғы үшін ТБС көрсетілген. Мұнда газ турбинасы оған келетін отын мен ауамен жоғарғы цикл ретінде қолданылады, ал оның пайдаланылған газдары жылуды кедеге жаратушы бу генераторына келеді (ЖКЖБГ). ЖКЖБГ бу турбинасын іске қосу үшін буды қамтамасыз етеді. Осы ТБС енгізілген басқа блоктардың кейбіреулері жылуды бұру жүйесі мен тазарту/суды дайындау жүйесі болып табылады.

Келесі кезең ТБС әр блогында технологиялық үдеріс сызбанұсқасын әзірлеуден тұрады. Технологиялық үдеріс сызбанұсқасын әзірлеу энергияның негізгі генераторларынан (газ турбиналары, энергетикалық циклдар жағдайында отын элементтері), сонымен қатар реакторлардан (мұндай құрал-жабдықты талап ететін аса күрделі жүйе кезінде) басталады. Масса тасымалдау операциялары үшін келесі бағандар блок-жүйеге қосылуы мүмкін. Кіретін, шығатын және қайта айналатын ағындар конфигурацияланғанда ағындар үшін соңғы нүктелерде және дереккөздерде қысым есебіне байланысты компрессорлар, ауа үрлегіштер және сорғылар қосылуы мүмкін. Кейін соңғы ағын нүктелерінде және көздердегі температураға байланысты қыздыру мен салқындау талап етіле ме екендігін анықтап, жылу алмастырғыштарды қосуға болады. Бұл температуралар алдыңғы жұмысқа негізделген болжалды болуы мүмкін немесе төмен тұрған және/немесе келесі құрал-жабдықпен анықталуы мүмкін. Жылу алмастырғыштың екінші жағындағы сұйықтық масса мен энергия балансының есебі негізінде жүйенің бастапқы модельдеуін тудырған соң берілуі мүмкін. Осы тараудың келесі бөлімінде сипатталған пинч-талдау жылуды қайтару мен бұру сызбанұсқасын әзірлеу кезінде пайдалы болуы мүмкін.

Технологиялық үдеріс сызбанұсқаларын әзірлеу әр ілеспе жүйенің немесе жобалау кезеңінде негізгі ілеспе жүйе тобының стационарлық режимін модельдеумен қатарлас орындалуы керек. AspenPlus® немесе Pro/II® сияқты компьютерлік модельдеудің бірнеше қол жетімді құралдары бар, олар табиғи газбен жұмыс істейтін электростансаларға жарамды IGCC, GateCycle™ және Thermoflex сияқты күрделі энергетикалық қондырғыларға келеді. Бұл бағдарламалық бағдарламалар пайдаланушыға қолайлы графикалық интерфейстерден тұрады және жүйелік инженерлер осы графикалық интерфейсті қолдана отырып, үдерістер интеграциясының сызбасын алдын ала лақтырмай жиі тікелей әзірлейді.



7.2-СУРЕТ. Біріктірілген циклы бар газ турбиналы қондырғыға арналған ТЭС

Модельдеуді іске қосу үшін жобалық негізге сәйкес келген қажетті деректерді ұсынған соң үдерісті интеграциялау сызбасын мүмкін өзгерту керек болады. Қолданылатын бағдарлама түріне байланысты құрылым операциялары мен үрдістерінің әрқайсысына масса мен энергия теңгерімін жүзеге асырудан тұратын модельдеу не жылу берілім немесе масса берілім үшін белгілі бір таза қозғаушы күшпен шектелген, не масса берілім мен химиялық реакциялар үшін тепе-теңдікке тәсілдемемен шектелген. Тарифтік бағалау негізінде құрал-жабдықтар модельдері Aspen Plus сияқтылар бағдарламалық қамтамасыз етуге енгізілген, алайда модельдеуді ең алдымен жеңілдетілген термодинамикалық модельдерді қолдана отырып әзірлеген тиімді, ал жобалаудың қанағаттандырылған сызбанұсқасын алған соң қарапайым модельдерді тарифтік бағалау негізінде қиындау жылдамдық моделімен алмастыру. Үрдістегі құрал-жабдық түрін және оның физикалық байланысын көрсететін жүйе немесе үрдіс сызбанұсқасының нобайы және қолданылатын коммуникациялар келесі кезеңдерде қолдану үшін суреттелетін графикалық интерфейсті, жүйе конфигурациясын қолдана отырып әзірленген.

7.3 Пинч-талдау және эксергия талдауы

Стационарлық жүйені модельдеуден және технологиялық сызбанұсқаны конфигурациялаған соң тиімсіздік саласында және де осылай жобалық өлшемдер немесе конфигурация өзгерістері жүйенің жалпы тиімділігін маңызды түрде жақсартатын салаларда сандық анықтау үшін екінші термодинамика заңы қолданылуы мүмкін. Негізінен, эксергия талдауы мен пинч-талдау үдеріс термодинамикасы туралы түсінік береді. Ол үдерістің энергияны пайдалануын төмендету мақсатында жұмыс жағдайында және конфигурацияда үдерістің тиімді өзгерістерін әлеуетті анықтауға мүмкіндік береді.

7.3.1 Эксергия талдауы

2-тарауға сәйкес эксергия талдауы жүйедегі әр басты құрал-жабдықта бұзылған жұмыс шамасының көлемін сандық бағалау, сонымен қатар жүйе тиімділігі үшін жоғарғы шегін сандық анықтау үшін әр ағынның эксергиясының есебін (шығатын, кіретін және жүйенің ішіндегі) талап етеді. Бұл тиімділік көзқарасынан бір конфигурацияның екінші конфигурациядан жақсырақ екендігіне сандық түсініктеме береді. Мысалы, аралас циклды эксергия талдауы эксергетикалық бұзылудың көп бөлігі газ турбинасының жану камерасында болатындығын көрсетеді. Осылай, аралас цикл тиімділігінің жақсаруы жоғары күйдіру температурасы бар газ турбинасын таңдау болып табылады. Эксергия талдауы ұзақ мерзімді келешектегі зерттеулер мен әзірлемелерде тұтынушылықты анықтауда көмек көрсетеді. Мысалы, күйдіру температурасының жақсаруы жану камерасында, өтпелі бөлікте (жану камерасы мен турбинаны қосатын) және турбинада жоғары температураға төзімді жетілдірілген материалдарды әзірлеу жолымен қол жетуі мүмкін. Отын энергиясы механикалық энергияға өзгертін әдісті әрі қарай жетілдіру үшін жанудың изобарлық үдерісіне балама талап етіледі. Осы эксергияның шығынын қалай төмендету керектігі туралы тиісті әдеби көздерге жүгінуге немесе жаңа идеялар (мысалы, командада талқылау барысында) ойлап шығаруға болады. Зерттеулер мен әзірлемелер үшін алдыңғылардың орнына өзгертін немесе революциялық жақсарулар анықталуы керек (температураның аз үстелуін беретін). Мұндай технологиялардың бірі изобарлы жану үрдісін тұрақты көлемді үрдіспен ауыстыру болып табылады. Мұндай жану камерасы 6-тарауда көрсетілген импульсті детонациялық камера немесе тұрақты көлемді немесе қысымның күшеюімен жану камерасы болып табылады (Тангирала және бірлескен авторлар, 2007). Ол эксергетикалық бұзылудың едәуір аз деңгейін көрсетеді (Hutchins and Metghalchi, 2003). Қазір стационарлық емес ағынның жану камерасы арқылы компрессор және турбинамен түйіндесуімен байланысты негізгі проблемалар шешілмеген күйде тұр. Тағы да бір тәсіл отын энергиясының электрохимиялық өзгеруі үшін 11-тармаққа сәйкес жоғары температуралы отын элементін қолданудан тұрады (немесе оның көп бөлігінің), дегенмен осы уақытта отын элементтерінің негізгі проблемасы оның жоғары бастапқы құны болып табылады. Осылай эксергия талдауына құны мен экономикасына әсерін қосу мүмкін. Мұндай әдістің мысалы аралас циклдің ТУПГ жұмыс өлшемдерін жетілдіру контекстінде сипатталған (Franco and Russo, 2002). ТУПГ жылуды беру температурасының қозғалмалы күшінің азаюы есебінен эксергетикалық шығынның азаюы көлемді арттыратындықтан және ТУПГ құны, методология

эксергия шығынының сомасы мен құнын көрсететін мақсатты функцияның минимизациясын болжайды. Мұндай аралас мақсатты функцияларлар тиімділік пен құнының арасында оңтайлы ымыра табуға мүмкіндік береді. Эксергикалық бұзылу ресурстардың сарқылу шаралары ретінде қолданылды (Lombardi, 2001).

7.3.2 Пинч-талдау

Термодинамикалық үдерістерге негізделген пинч-талдау технологиясы алып шығу мен шеттету ретіндегі жылу интеграциясының тиімді сызбанұсқасын әзірлеу үшін жүйелі әдіснаманы болжайды (Линхоф және бірлескен авторлар, 1988). Бұл технология эксергиямен (StaineandFavrat, 1996), эконоталдаумен біріккен (Gundersenand Naess, 1990; Линхоф, 1993) талдауға айналды, және бу-газ қондырғысы мен ішкі циклдық көмір газификациясы бар (мысалы, Эмун және бірлескен авторлар, 2010) электр станцияларына қатысты қолданылды. Төменде бұл технологияның қысқаша сипаттамасы келтірілген және оқырман осы техниканы қолдану үшін практикалық білімдерін алуға жоғарыда аталған сілтемелерге жүгінуі мүмкін.

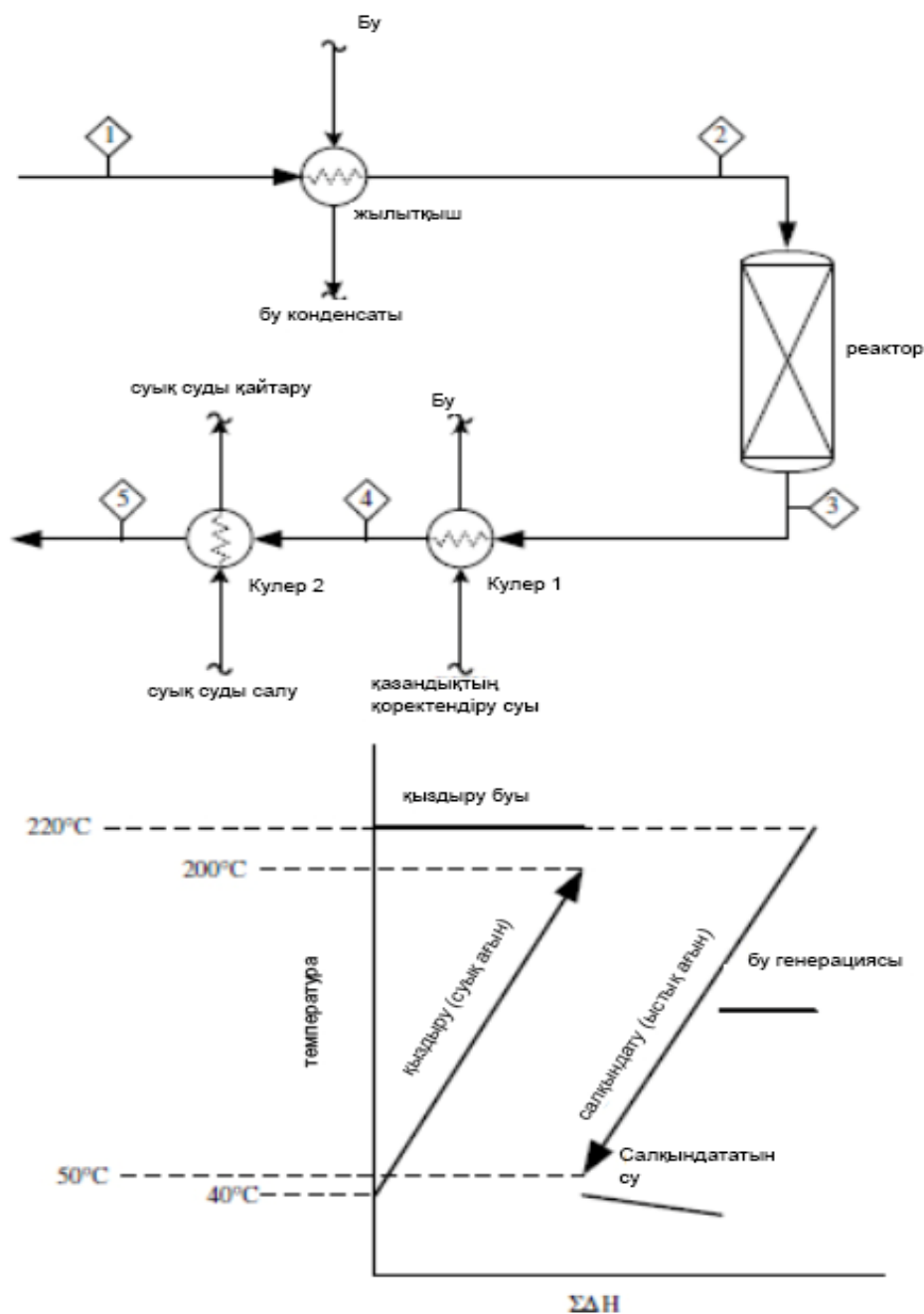
Пинч-технологияның негізгі әдісі салқындату және де қыздыруды талап ететін ағындар температурасымен салыстыруда энтальпия туралы деректерді, ең алдымен, түрлендіруден тұрады. Кейін барлық ыстық ағындар ұсынылатын температурадан энтальпияның байланыстылығының жеке құрама кестесі әзірленеді (берілген температура кезінде тиісті энтальпияны қосу жолымен). Ұқсас құрама кесте осы уақытта үрдісті қыздыру мен салқындатудың жалпы талаптарын көрсететін температураның энтальпиялық диаграммасында ұсынылған барлық суық ағындарды ұсыну үшін әзірленген. Ыстық композиттің қисығы екі қисық жабылатын тек энтальпия өсінің бойымен ағын жылу алмасуын өңдеу бойынша технологиялық ағынмен суық композит қисығын қыздыру үшін қолданылуы мүмкін («алмасу құрылғысын» қолдана отырып). Екі шеттің кез келген дөңесі ыстық және суық құрал-жабдықтағы қажеттілікті қанағаттандыру қажеттілігін көрсетеді, суық композиттің қисығының жоғарғы жағына жылудың сыртқы көзі талап етіледі $Q_{H,min}$ ал ыстық композит қисығының төменгі бөлігіне сыртқы салқындау талап етіледі $Q_{C,min}$. Екі қисық бір-бірімен ең аз температуралық қисымы нүктесінде жақын жанасып, жақындаудың таңдап алынған ең аз температурасы үшін ΔT_{min} («қысқыш мақсаты») жылу алмасу ағыны үшін технологиялық ағынның ең көп мүмкін болар санын көрсететін жабу аясы сай келеді және тиісті $Q_{H,min}$ және $Q_{C,min}$ ыстық (мысалы, бу) және суық (мысалы, салқындататын су) энергия тасымалдауыштарында ең аз қажеттілік болып табылады және «энергетикалық мақсаттарды» қамтамасыз етеді. Осы энергетикалық мақсаттарға жету үшін қондырғының жылу интеграциясы жылу қысылған жер арқылы берілмейтіндей теңшеу керек. Сонымен қатар қысылу жерінде сыртқы салқындау немесе оның астында сыртқы қыздыру болмау керек. Құрама қисықтар абсолюттік мән емес, энтальпия өзгерісін көрсететіндіктен бір немесе екі құрама қисықтың энтальпия осыне параллельді жылжуы жолымен ΔT_{min} өсуі немесе азаюы мүмкіндігіне назар аударыңыз. ΔT_{min} артқан кезде энергетикалық мақсаттарды арттыра отырып жабын азаяды, бірақ құрал-жабдық құны төмендейді және ΔT_{min} дұрыс таңдауы қондырғы тиімділігі мен құнының арасындағы ымыра шешімнің талдауымен жеңілдетіледі.

Тиімділік көзқарасы бойынша $Q_{H,min}$ берудің пайдалылығының барлық көлемі мен $Q_{C,min}$ бас тартудың пайдалылығының барлық көлемі құрама қисықтарда көрсетілгендей міндетті түрде ең жоғары және ең төменгі температураларда болуы міндетті емес. Мысалы, егер жылу конденсаттайтын бумен берілсе, онда жоғары қысымды будың барлығын қолданудың орнына жылу бөлігін беру үшін төмен қысымды буға ауыстырылуы мүмкін. Бағалаудың бұл түрі Linnhoff (1993) сипатталған үрдіс екеудің ішінен «үлкен құрама қисық» салу жолымен жасалуы мүмкін. Жылу алмастырғыш желілерін теңшеуге қосымша ретінде пинч-технология технологиялық қондырғыларда жүйенің жалпы тиімділігін арттыру үшін жылу сорғылары мен жылу қозғалтқыштарының мүмкіндіктерін анықтау үшін қолданылады.

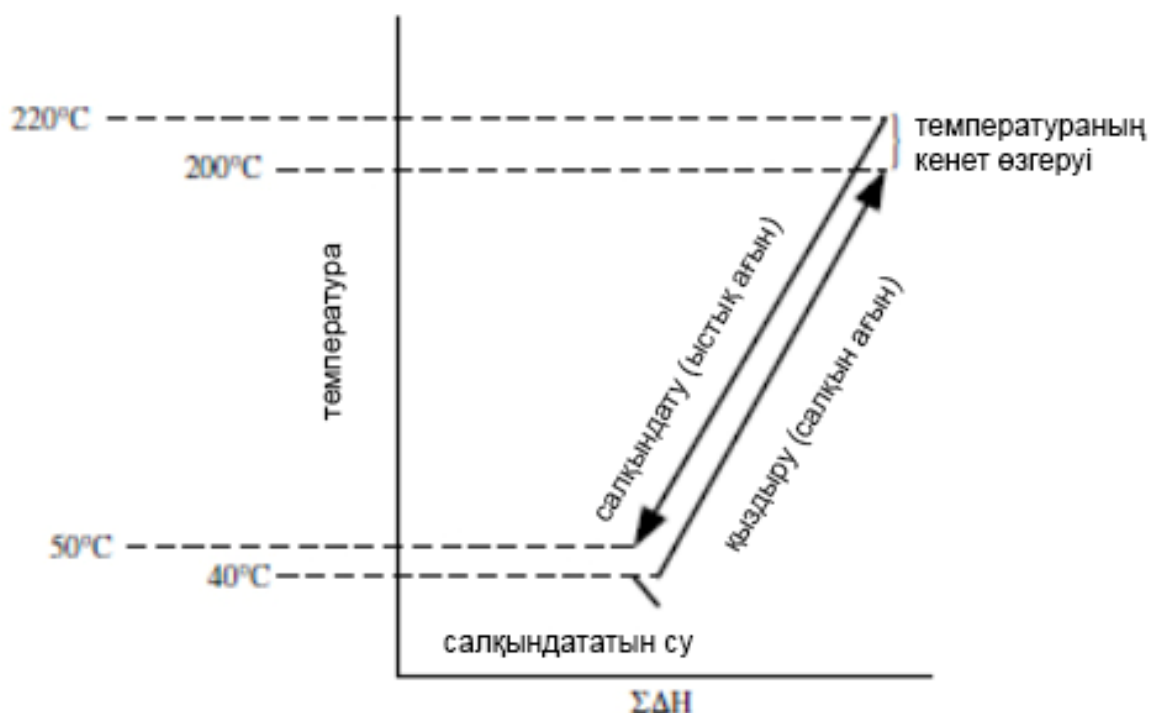
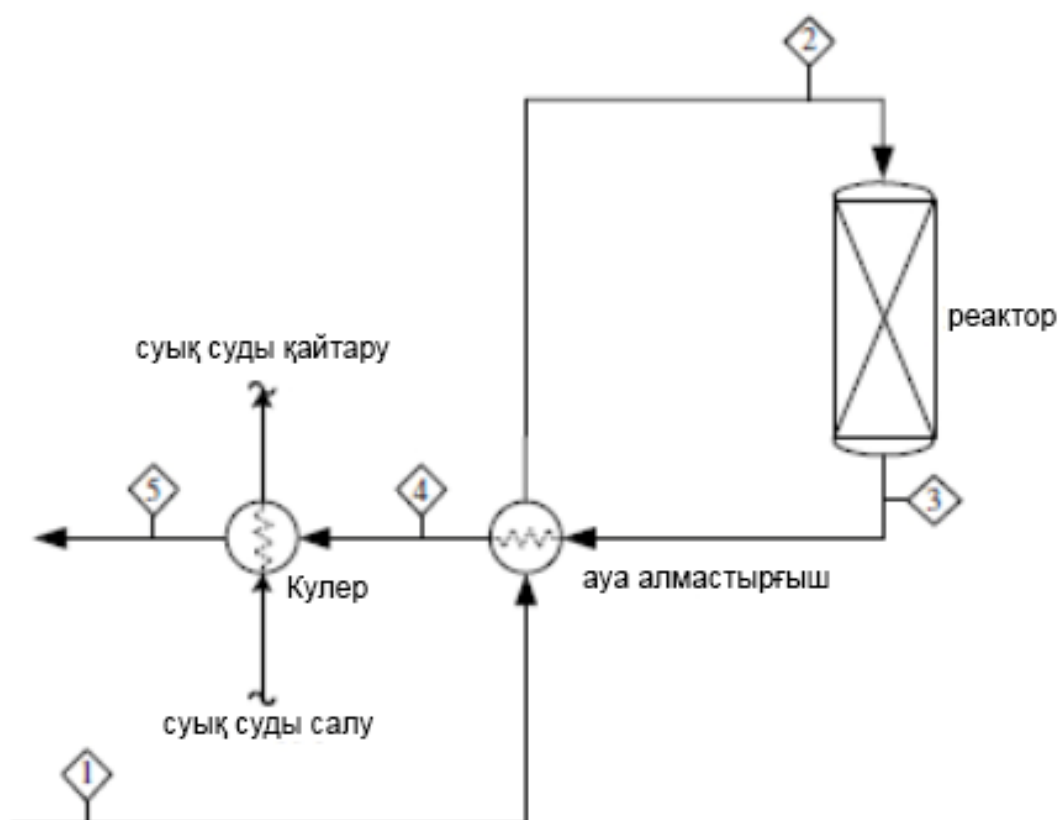
Жылу интеграциясын орындау кезінде, яғни бір-бірімен жылу алмасу үшін үйлесімді сұйықтықтарды таңдау кезінде қауіпсіздік ережелері назарға алынуы керек. Жылу алмастырғыштар түтікшенің үзілуі мен тесіктен ағуын тудыруы мүмкін және бұл жағдайда түтіктің бір жағындағы сұйықтық екінші жақтағы сұйықтықпен байланысуы мүмкін, бұл сұйықтық түрі мен оны пайдалану шарттарына байланысты өртке немесе жарылысқа

соқтығыуы мүмкін. Экзотермикалық реакторға арналған жылу интеграциясының сызбанұсқасын дамыту үшін құрама қисықты қарапайым қолдану осы әдіснаманың мәнін көрсететін 7.2-мысалда көрсетілген. Экзотермикалық реакторлар CH_3OH , CH_4 синтезінде, Фишер-Тропш сұйықтығында, NH_3 және H_2CO -ға қатысын түзету үшін синтез-газының жылжуында табылуы мүмкін.

7.2-мысал. Экзотермикалық реакторға ағынды беруді (1-ағын) реакцияның басталуы үшін жеткілікті жоғары температураға дейін 40°C бастап қыздыру керек және де бұл температура катализатор мен синтез үрдісіне байланысты. Бұл мысалда талап етілетін температура 200°C құрайды (2-ағын). Реактордан шығатын ағынның 220°C температурасы бар (3-ағын) және де синтезделген өнім бөлінер алдында 500°C дейін салқындау керек. Нұсқалардың бірі реактордың бастапқы газын алдын ала қыздыру үшін буды жай ғана қолданудан тұрады (қосымша ағын), содан кейін 7.3-суретте көрсетілгендей ағынды сулардың соңғы температураға дейін 50°C (5-ағын) салқындату үшін соңынан салқындататын су болатын түрленетін буға, қысымға байланысты реактордың шығатын ағынына қарсы аралық температураға дейін буды түрлендіру.



7.3-СУРЕТ. Коммуналдық ағынды жоғары қолдану конфигурациясы



7.4-СУРЕТ. Коммуналдық ағынды минималды қолдану конфигурациясы

Осы конфигурацияға сай келетін ыстық және суық қисық кестелері 7.3-суретте көрсетілген. Осы таңдап алынған қарапайым мысалда бір ағын ыстық қисықты, біреуі суық қисықты көрсетеді және де бұл қисықтар «құрамды» болып аталмайды. Осы қисықтардың деректерін қолдана отырып, коммуналдық ағындарды қолдануды төмендету үшін жылу интеграциясының сызбанұсқасын әзірлеңіз.

7.4-суретте ыстық және суық қысық арасындағы 20°C (сығылу температурасы) ең төменгі температураны алғанға дейінгі суық қысықтың¹ оңға жылжуы нәтижесінде пайда болатын конфигурация көрсетілген. Бірден бір қолданылатын қосымша ағыны 5-ағынға алып келетін 50°C соңғы температураға дейінгі 4-ағынның салқындауы үшін салқындататын судың біраз көлемі болған кезде бұл конфигурация енді ағынды жылу алмастырғыш немесе аралық жылу алмастырғышты өңдеу үшін (бұл жағдайда беру/төгу жылу алмастырғышы) технологиялық ағыны бар.

Жоғарыда келтірілген мысалдағыдай үрдіске бір ыстық және бір суық ағын жатса, жылудың интуитивтік рекуперацияның оңтайлы сызбанұсқасын әзірлеу оңай, бірақ ағындар саны едәуір көп IGCC немесе бірлесіп өндірілген қондырғы сияқты күрделі энергетикалық қондырғылар кезінде пинч-технологияны қолдану пайдалы болуы мүмкін.

Егер құрылғы беру/төгу алмастырғышымен жобаланған болса, іске қосу кезінде берілетін газды алдын ала қыздыру үшін жылудың баламалы көзі қарастырылуы керек. Мысалы, электр немесе бумен жылытатын жылу алмастырғыш арқылы. Бұл жылытқыштың көлемі синтез-газ ағынының толық есептеу жылдамдығына сай келуі міндетті емес. Өйткені қондырғы ағынның аз жылдамдығы кезінде іске қосылуы мүмкін, мысалы, ағынның есептеу жылдамдығының 25%, алайда оның құны жылу интеграциясының әр түрлі нұсқаларын зерттеу кезінде ескерілуі керек.

7.4 Технологиялық ағын сызбалары

Жүйенің блок-сызбалары деп кейде аталатын технологиялық ағын сызбанұсқалары (ТАС) алдыңғы кезеңдерде әзірленген жүйе конфигурациясын қолдана отырып әзірленуі мүмкін. ТАС – үдерістің айқындылығы үшін қажетті құрал-жабдықтарды, құбырларды және негізгі құрал-саймандарды ғана көрсететін технологиялық үдерістің базалық сызбанұсқасын қарапайым графикалық сипаттау. Құрал-жабдықтар мен бұру желісінің әр түрін белгілеу үшін символдар (сонымен қатар егер ТАС-қа енгізілген болса, онда клапан мен құралдар) белгіленеді және алдын ала құжатталады. ТАС құрал-жабдық түрлері және олар бір-бірімен қалай байланысты екені туралы, сонымен қатар үрдісте қолданылатын коммуналдық объектілер туралы, қондырғының әр саласында орналасқан негізгі құрал-саймандар туралы маңызды ақпарат береді. Сызбанұсқа технологиялық сызбанұсқаны жалпы басқарудың базалық стратегиясын көрсетеді. Сонымен қатар ТАС төмендегілер үшін қажетті ақпаратты ұсынады:

- Құрал-жабдық ерекшелігінің формасын әзірлеу.
- Басқа инженерлік дисциплиналардың жобалық қызметке белсене қатысуы мен ақпараттандыру.
- Жұмыс үрдістерін әзірлеу мен тексеру (іске қосуды есептегенде) және пайдалану нұсқаулығын әзірлеу.
- Құрал-жабдықтар мен құбырларға құрылыс материалдарын қолдана отырып материалдарды таңдау сызбанұсқасын әзірлеу.
- Үрдістің жалпы үздіксіздігі мен бүтіндігін тексеру.
- Қондырғы құнын дәл бағалау талап етілгенде немесе ол нақты құрылған кезде жүйені түпкілікті талдау үшін құбырлар мен бақылау-өлшеуіш құралдарының сызбанұсқасын әзірлеу.

Төменде ТҮС құру үшін негізгі басқару үрдістері аталған:

¹ Бұл жағдайда қысылу шеткі ыстықта болды, алайда салыстырмалы еңіске және екі қысықтың формаларына байланысты қысылу шеткі суықта немесе қысықтар тік желі болмаған кезде ыстық және суық шеттер арасында болуы мүмкін. Ағын фаза өзгерісіне ұшырағанда (мысалы, бу компоненті ағынның салқындау кезінде немесе керісінше конденсацияға ұшырайды) қысық түзу желі бола алмайды. Бұл меншікті жылу сыйымдылығындағы үлкен айырмашылық болған жағдай.

- Парақтың альбомдық бағдарын қолданып, оны сол жақтан оң жаққа қарай қарау керек.
- Сызбанұсқаны үйіп тастаудан қашу керек, оның орнына бірнеше парақты қолдану керек.
- Құрал-жабдық шамамен салыстырмалы өлшемде болу керек (мысалы, бағаналар қазандықтардан жоғары, бу мен сұйықтықты бөлу үшін қолданылатындар сияқты, жылу алмастырғыштар сорғыларға қарағанда үлкенірек)
- Негізгі бағандар мен реакторлар бір деңгейге жақын орналасуы керек.
- Ағындар бағыттың минималды өзгерістерімен бейнеленуі керек
- Ағындар қондырғының сол жағынан шекара арқылы кіретіндей, ал шығатындар оң жақтан бейнеленуі керек.
- Келесі параққа түсетін ағындар сол жақтан бейнеленуі керек, ал алдыңғы бетке қайтып келетін ағындар сол жақтан бейнеленуі керек.

Келесі тармақтар жүйе талдауын тексеру деңгейіне байланысты ТҮС ақпаратын жинақтайды:

- Үрдіске кіретін және шығатын барлық материалдық түйдектер дереккөз бен белгіленген орны бойынша анықталуы керек. Екі не одан көп бірдей желінің болуы кезінде параллельді желінің санын көрсететін ескертумен бірге тек бір тән желі бейнеленеді. Кейде осы желі қондырғысының шегінен шығатын не кіретін бу түйдекті тармақтай отырып желі санын көрсетеді.
- Технологиялық ағындар үшін қондырғының технологиялық шегінен тыс кіретін және шығатын ағындарды қоса есептегенде қалыпты жұмыс температурасы мен қысымы көрсетілген. Ағын температура мен қысымды өзгерткен кезде жаңа жағдай бейнеленеді. Каталитикалық реакторлар іске қосылған уақытта циклдың басы (SOR) мен циклдың аяғы (EOR) үшін мәндер көрсетілген, өйткені каталитикалық белсенділік уақыт өткен сайын өзгереді, қалыпты жұмыспен салыстырғанда әр түрлі температураға, ағын құрамына және кейде қысымның төмендеуіне соқтырады.
- Барлық технологиялық ағындар (ауа-реактивті қозғалтқыш немесе реакторға келетін ауа, сөндіру үшін немесе реакция үшін қолданылатын су т.с.с.) ағынның массалық, молярлық жылдамдығы, құрамы, фазасы (қатты зат, сұйықтық немесе бу), молекулярлық салмағы, немесе ТҮС өзіндегі немесе оның орнына жеке беттегі тығыздығы сияқты ағын деректері көрсетілген кестеде атаулары (дереккөзді көрсететін жолдың басында немесе белгіленген пунктте көрсететін жолдың соңында жиектемеде пайда болуы мүмкін) және нөмірлері жазылуы керек. SOR, EOR және басқа кез келген жұмыс жағдайы үшін ағын деректері кесте түрінде көрсетілуі керек.
- Энергокәсіпорынның келесі ағындары үшін деректерге келесілер жатуы.
- Керек:
- Салқындататын су;
- Кіру мен шығу жеріндегі температура;
- Беру қарқыны (негізінен көлемді);
- Бу мен конденсат;
- Кіру мен шығу жеріндегі қысым;
- Егер конденсат пен қызған бу қаныққан бу ретінде анықталса;
- Жаппай шығын;
- Әр құрал-жабдық маркаланған болуы керек. Нөмір (i) құрал-жабдықтың жататын бірлік нөмірін, (ii) желі нөмірін, (iii) бір немесе екі әріпті идентификаторды қолдана отырып құрал-жабдық нөмірін және осы белгілі бір санаттағы (iv) құрал-жабдық нөмірін анықтайды. Егер желіде резервті құрал-жабдықты орнату себебі бойынша бірнеше құрал-жабдық болса, онда соңғы әріп қосылады, мысалы, А және В: 20-2-Р-3А немесе (20-2-PU-3А) құрал-жабдық сорғы болып табылатындығын (Р немесе PU әріптерімен белгіленеді) көрсетеді және 20 блоктың екінші желісінде орналасқан.
- Келесі құрал-жабдықтарға арналған деректерге мыналар жатуы керек:

- Ыдыстар;
- Катализатор, қаптама, демистерлер сияқты барлық маңызды ішкі элементтер сызбанұсқасы;
- Жұмыс қысымы мен температурасы;
- Технологиялық желілермен және/немесе құрал-саймандармен қосылған және нөмірленген жоғарғы және төменгі науалардың ағандары үшін;
- ТҮС жоғарғы бөлігінде әр ыдыстың үстінде;
- Құрал-жабдықтың маркалануы (ыдыста көрсетілген);
- Ыдыстың сипаттамасы;
- Ішкі диаметр мен жанама сызықтан жанама сызыққа дейінгі ішкі диаметрі;
- Жалынмен қыздырғыштар;
- Отын түрі;
- Бір тәсілдемедегі құбырлар сызбанұсқасы.
- ТҮС үстіңгі жағында әр жылытқыш үстінде;
- Құрал-жабдықты маркалау
- Сипаттау атауы
- Сіңірілген жылу жүктемесі
- Ауа салқындатқышы бар жылу алмастырғыштар
- Нүкте сызықпен белгіленген құбырдағы бүйір ағыны
- Бірнеше қабаттың әріп түбірімен белгіленуі кезіндегі құрал-жабдықты маркалау (А, В, С және т.с.с.).
- Алынған жылу жүктемесі.
- Сорғылар (әр сорғы астында):
- Құрал-жабдықты маркалау;
- Қалыпты жұмыс көлемді шығын;
- Компрессорлар;
- Көп сатылы компрессордың әр сатысы компрессор символының қайталануымен көрсетілген;
- Құрал-жабдықты маркалау әр компрессор астында көрсетілген.

Негізінен ТҮС-те құбырлардың жіктемесі, құбырлардың нөмірлері, фланцтер, екінші кезекті байпас желілер, бақылау-өлшеуіш құралдары, датчиктер мен шеткі элементтер, оқшаулаушы және бекіткіш клапандар, желдеткіш тесіктер мен ағындар, сонымен қатар сақтандырғыш клапандар көрсетілмеген.

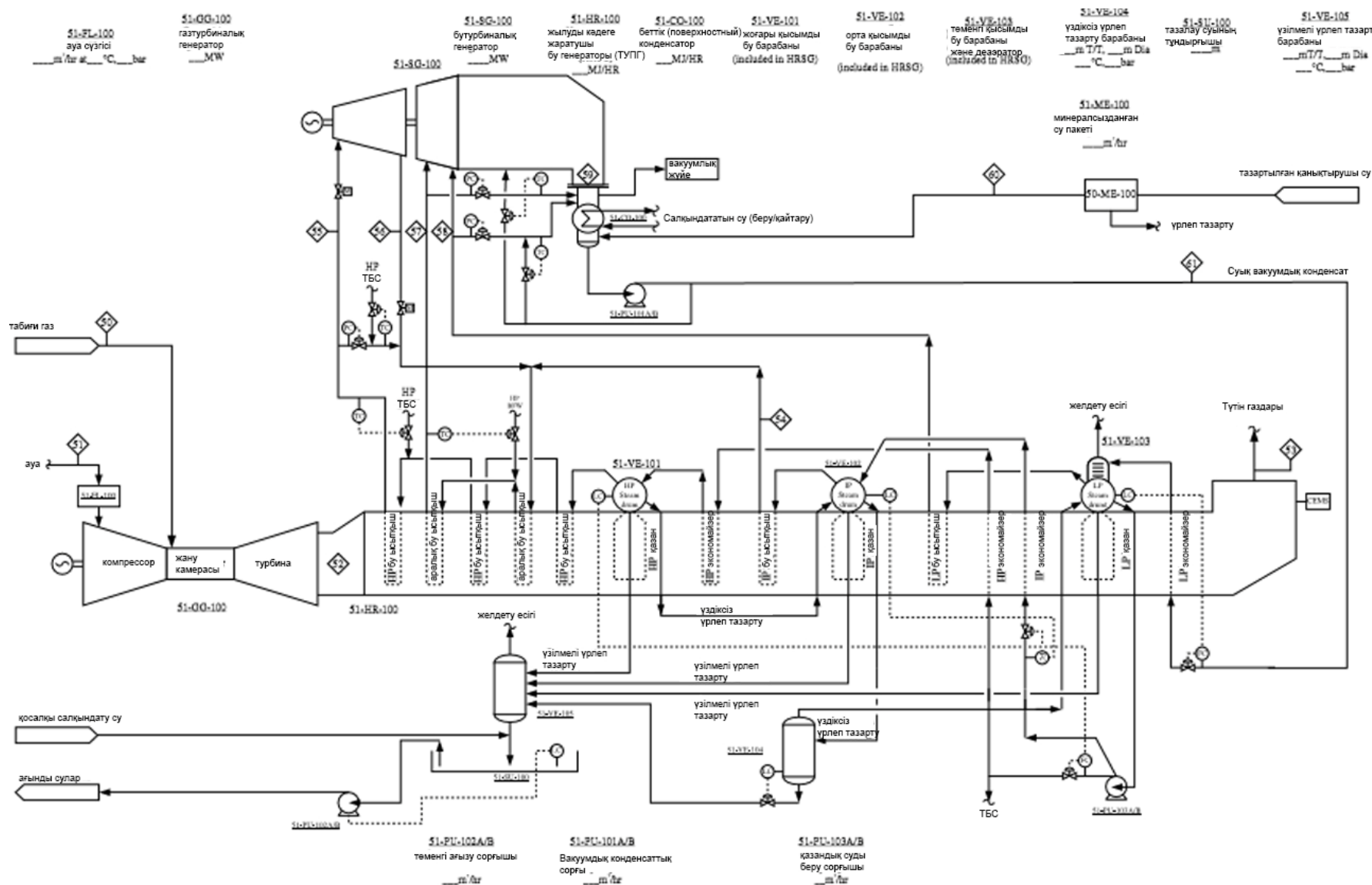
7.5-суретте газ турбинасы мен бу циклынан тұратын, бірақ осындай графиктерге енгізілген құрал-жабдық туралы деректерде олқылықтар бар біріктірілген циклы бар қондырғының электр энергиясын өндірудің ілесімі жүйесі үшін ТҮС көрсетілген. Ағын деректерінің кестесі диаграммамен ілеседі және де негізгі ағындар кестеге айқыш сілтеме үшін белгіленеді (нөмірленеді). Әр диаграммаға нақты сызба нөмірі беріледі және басқа бірліктен шығатын және қондырғыға басқа бірлікті енгізу кезінде біріктірілген циклдың осы бірлігін тастап кететін немесе басқа бірліктен шығатын ағындар сызба нөмірімен анықталады.

7.5. Динамикалық модельдеу және технологиялық бақылау

7.5.1. Динамикалық модельдеу

Энергетикалық қондырғыда операциялардың көбі динамикалық болып табылады, мысалы, күштік жүктемеге қажеттіліктің өзгеруіне жауап беру ретінде блоктың іске қосуы және өшіруі сияқты, бір отыннан басқасына ауыстыруы немесе газ не бу турбина сияқты жүйенің компонентінен кенеттен бас тартуы. Бір жұмыс режимінен басқасына көшу салдары күтпеген жерден және кейде қауіпсіз емес болуы мүмкін. Қауіпсіздіктен басқа экологиялық

және экономикалық факторлар қондырғы жұмысының түсіну маңыздылығын ерекшелейді. Сонымен қатар үздіксіз және қауіпсіз жұмыс үшін шынайы(физикалық) қондырғыны нақты пайдаланудың алдында басқару сызбанұсқаларын тестілеу, жұмыс рәсімдерін әзірлеу және станция операторларын оқыту қондырғының динамикалық компьютерлік модельдеуін немесе оның осы міндеттердің тиімді экономикалық шешімін қамтамасыз ететін бөлігін пайдалана отырып жүзеге асыруы мүмкін. Тұрақтылық жай-күйді модельдеу, мысалы, Aspen Plus немесе Pro/II-де әзірленген, тиісінше, динамикалық модельдеуді әзірлеуге арналған, Aspen Plus Dynamic және Dynsim сияқты тиісті бағдарламалық жасақтаманы пайдалана отырып динамикалық модельдеуге түрлендірілуі мүмкін.

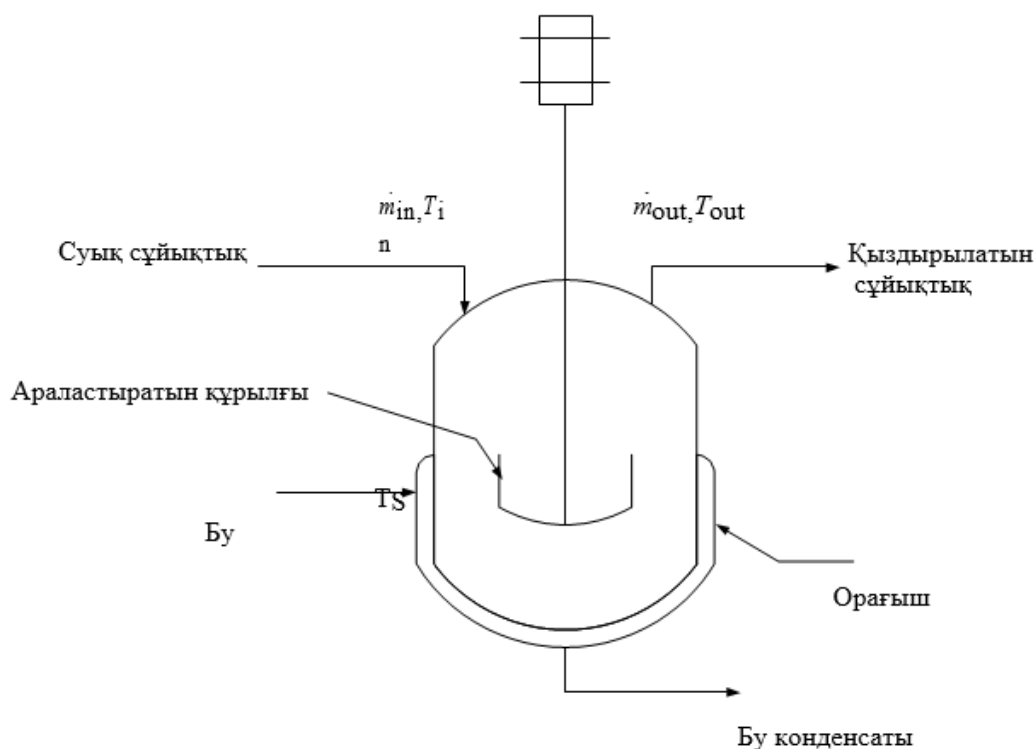


7.5-СУРЕТ. Аралас циклды қондырғының электр қуатын өндіріп шығарудың ілеспе жүйе үшін бағаналық (дінгектік) трансформаторлық ілеспе станция (БТҚ)

Стационарлық пен динамикалық модельдеудің арасындағы негізгі айырмашылық: стационарлық модельдеу жағдайында қондырғының ішінде болып жатқан операциялар мен үдерістердің көбі термодинамикалық негізде модельденеді, яғни тепе-теңдік шартпен немесе тепе-теңдікке белгілі бір тәсілдеме жағдайында, ал динамикалық модельдеу жағдайында құбыр жолдардың және жабдықтың геометриясын, кідірісті қажет ететін метал массасын, клапан сипаттамаларын және үдеріспен басқару сызбанұсқасын анықтауды қоса алғанда жылдамдыққа негізделген модельдер талап етіледі. Осылайша, динамикалық модельдеу стационарлық модельдеуден қарағанда оның бейстационар күйін дәл басып алу үшін қондырғының айтарлықтай көп анықтауын талап етеді. Дегенмен стационарлық модельдеу жүйедегі компоненттердің «геометриясын» анықтау үшін пайдаланылады. Келесі қарапайым мысал динамикалық модельдеудің мәнін түсіндіріп береді.

7.6-суретте көрсетілгендей T_s температурасында будың суға айналуы үшін арналған орағышпен жабдықталған жақсы араластыру механизмі бар ыдысты қарастырайық. C_p тұрақты жыл ұсыымдылықпен $T_{к\text{ір.}}$ температурасында $\dot{m}_{к\text{ір.}}$ жылдамдықпен ағатын сұйық ағын, әзірше ыдыстан шығатын қыздырылған сұйықтық шығыны $\dot{m}_{ш\text{ығ.}}$, $T_{ш\text{ығ.}}$ температурасына дейін компенсаторлық бумен қызады.

Болжам бойынша, араластырудың арқасында ыдыс біртекті температурада болады.



7.6-СУРЕТ. Бу орағышы және араластырғыш құрылғысы бар ыдыс

Жүйе айналасында массаның теңгерімі, мұндағы m – ыдыстағы бар сұйықтық массасы, кез келген t уақытта жазылуы:

$$\dot{m}_{к\text{ір.}} - \dot{m}_{ш\text{ығ.}} = \frac{dm}{dt} \quad (7.1)$$

Егер жүйе сұйықтықтың жаппай шығынына қатысты тұрақтылық жай-күйінде болса, онда жинақтау мерзімі $dm/dt=0$, және $\dot{m}_{к\text{ір.}}=\dot{m}_{ш\text{ығ.}}$. Бұдан әрі жақсы араластырылатын ыдыстағы сұйықтық температурасы кез келген уақытта тұрақты температураға тең және шығыстағы $T_{ш\text{ығ.}}$ температураға тең бұл ерекше жағдай үшін жүйе айналасындағы энергетикалық баланс ретінде жазылуы мүмкін:

$$\dot{m}_{к\text{ір.}} C_p (T_{к\text{ір.}} - T_{ш\text{ығ.}}) + \mu_0 A_0 (T_s - T_{ш\text{ығ.}}) = m C_p \frac{dT_{ш\text{ығ.}}}{dt} \quad (7.2)$$

мұндағы U_0 – жылу берудің жалпы коэффициенті, есептік мәні/(Чилтон мен авт., 1944; Кирн, 1950) A_0 орағыш беттік ауданына негізделген. Орағыш ішінде сұйытылған бу саны берілетін жылу санына байланысты вариацияланады, яғни тұрақты U_0 және T_s үшін $T_{шығ.}$ өзгерген кезде өзгереді. Қабықшада A_0 ауданы бұл компоненттің «геометрия» анықтамасының бөлігі ретінде 7.3.3 теңдеуінен анықталуы 7.2 теңдеуінен алынып қалыптасқан энергетикалық баланс $dT_{шығ.}/dt=0$ және $T_{шығ.}=T_{шығ.,R}$, есеп айырысулардың мәні:

$$\dot{m}_{кір.} C_p (T_{кір.} - T_{шығ.}) + \mu_0 A_0 (T_s - T_{шығ.}) = 0 \quad (7.3)$$

$T_{кір.,f}$ температураға кірісте сұйықтықтың температурасының бірте-бірте өзгеруін болжаймыз. Динамикалық модельдеу енді бізге t уақытта шығыста $T_{шығ.}$ температурасы қалай өзгередінін болжауға мүмкіндік береді, 7.2 теңдеуінен алынған төменде келтірілген 7.4 теңдеуін шеше отырып, $T_{кір.}$ ауыстырумен $T_{кір.,f}$ (өйткені $T_{кір.}=T_{кір.,f}$ $t>0$) және m белгілі айнымалыларға ауыстыруға, сұйықтың тығыздығы ρ (болжамды температураға қарамастан) және сұйықтықпен қамтылған ыдыс көлемі V (ол күтіліп отырғандай, тұрақты болып қалады бұл жағдайда).

$$\dot{m}_{кір.} C_p (T_{кір.} - T_{шығ.}) + \mu_0 A_0 (T_s - T_{шығ.}) = \rho V C_p \frac{dT_{шығ.}}{dt} \quad (7.4)$$

Егер жоғарыда келтірілген теңдеудегі барлық басқа айнымалылар тұрақты (әрине $T_{шығ.}$ және t қоспағанда) болса, онда ол теңдеудің төмендегі шешімі көрсеткендей, $T_{шығ.}$ сатылы өзгерістен өтпейді, керісінше, t мен экспоненциалды өзгерістен өтеді.

$$T_{шығ.} = T_{шығ.,R} + \frac{(\mu_0 A_0 / \dot{m}_{кір.} C_p) T_s + T_{кір.,f}}{1 + (\mu_0 A_0 / \dot{m}_{кір.} C_p)} (1 - e^{-t/T})$$

³ Бұл теңдеуде пайдаланатын шарттар егер ыдыстан кететін ағынның температурасы $T_{шығ.}$ қалаулы мәнде кез келген жағдайда соның ішінде таңдалған жобалық негізге байланысты осы шектерде ұсталынып тұрса, осы экстремалды жағдайда жылу берілім бетінің A жеткілікті ауданын қамтамасыз ету үшін $T_{кір.}$ мәніне m және $\dot{m}_{кір.}$ үшін $\max$ мәніне сәйкес болу керек екеніне назар аударыңыз.

мұндағы $\rho V / \dot{m}_{кір.}$ уақыттың тұрақты шамасы және жүйе өзгерістерге қалай тез әрекет ету, және ыдыстың көлемі төмен болған кезде немесе сұйықтықтың жаппай шығыны жоғары болған кезде одан да тезірек әрекет ету өлшемі болып табылады. Үдерістердің нақты жүйесінің динамикалық модельдеуі алайда аппаратура және басқару стратегиясымен пайдаланатын құбыржолдар жүйесінің сыйымдылық кедергісімен туындаған кідірістермен күрделене түседі.

7.5.2. Автоматты технологиялық бақылау

Қыздырылған сұйықтықтың $T_{шығ.}$ температурасын реттеу (үдерістің айнымалы шамасы немесе жоғарыда келтірілген жағдайдағы ПП) оны талап етілетін $T_{шығ.,R}$ (берілген мән) мәнімен және орағышқа берілетін (жоғарыда көрсетілген жағдайда басқарылатын айнымалы болып табылатын) будың өзгеруімен салыстыру арқылы өзімен жабық басқару жүйесін білдіреді. Бу беру клапан шығысында өзінің қысымын өзгертетін, демек T_s температура конденсациясын да өзгертетін реттеуші клапанның ашылуымен немесе жабылуымен бақыланады. Берілетін жылудың санында өзгерістер қозғалды, өйткені, $T_{шығ.}$ қосымша T_s өзгерді, онда U_0 айтарлықтай өзгермейді. Будың қанығу қысымы $< \sim 34$ бар құрайтын аймақта оның қысымының адиабаттық төмендеуі реттеуші клапанда сияқты будың қызып кетуін туғызатынына назар аударыңыз, бірақ қызып кеткен бумен берілетін жылу конденсациямен берілетін жылумен салыстырғанда.

Кері байланыспен басқарылатын айнымалыны өзгерту үшін ПП-дағы ауытқуы (немесе «қате») оның қалаған берілген режимі және қадағалаушы шығысымен арасындағы өзара

байланысты анықтайтын басқаруда алгоритмдер түрінде эмпирикалық тәсілдер қолданылады. Негізгі тәсіл контроллердің y шығыс сигналының y_0 -ға өзгеруінен тұрады, $e = T_{шығ.} - T_{шығ.} = 0$ қате кезінде (сондай-ақ қадағалаушы ығысуы деп аталатын) оның шығу сигналы қателе пропорционалды өзгеруінде тұрады. Бұл басқару түрі пропорционалды басқару деп аталады, сол уақытта пропорционалдық коэффициенті K_p пропорционалды күшейту деп аталады, яғни $y = K_p e + y_0$. Бұл қадағалаушының мөлшерлеу функциясы соңғы басқару элементінің бүкіл жұмыс диапазоны қамтылатын пропорционал диапазоны атты белгілі бір диапозонда белсенді. Берілген кірістің өзгеруі үшін контроллердің шығыс өзгерісі пропорционалдық зонаның кішірейген кезінде үлкейеді. Осы басқару типінің кемшілігі мынада: y_0 үдерістің белгілі бір шарттар тобына сәйкес келеді (жоғарыда келтірілген мысалда қыздырылған сұйықтық ағынының белгілі бір жылдамдығы), содан осы ағынның жылдамдығы өзгергенде, қате нөлге тең болуы мүмкін емес, ал үдерістің ауыспалы шамасы оның берілген шамасынан ауады, бұл бізге белгілі «төмендеу». Мәселе бұрынғыдан да қиындай түседі, егер тұрақты ақаулықтар болса (жоғарыда көрсетілген жағдайда сұйықтықтың кірістегі температурасы). Бұл басқару әдісі содан кейін берілген шамадан үдерістің айнымалысында туындайтын ауытқуға немесе құлдырауға қосымша үдерістің айнымалы шамасы да, басқарылатын айнымалылар да үнемі ауытқуға әкеледі. Пропорционалды басқару уақыттағы тез қателерді жинауға негізделген түзету әрекетін қамтамасыз ететін интегралды бақылауды қосу арқылы жақсаруы мүмкін. Бұл жинақталған қате тұрақтыға көбейтіледі, K_i интегралды реттеуішті беру коэффициенті тек пропорционалды басқарудан алынатын шығыстағы сигналға қосылуы мүмкін, бұл пропорционалды-интегралдық реттеуге (ПИ) әкеледі, $y = K_p e + K_i \int_0^t e dt + y_0$

ПИ басқару жетіспеушілігі, алайда K_p және K_i үшін таңдалған мәндеріне байланысты келесіде: үдерістің айнымалысы берілген мән айналасында не тұрақты амплитудамен, не төмендеу орнына өсе алатын шамамен өзгеруі мүмкін, бұл тұрақсыздыққа әкеледі. Уақыт бойынша туындыны константаға көбейту жолымен шығуды қамтамасыз ететін жылдамдық бойынша реттеуді қосу, d туындыны күшейту үдеріс пен оның тұрақтылығын жылдамдатуы мүмкін, бұл пропорционалды-интегралды-дифференциалды реттеуге (ПИД) әкеледі, яғни $y = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d (de/dt) + y_0$ тепе-тең. K_p , K_i және K_d үш коэффициенті үшін оңтайлы мәндерге қол жеткізу, әсіресе, тұрақты басқару жүйесіне қол жеткізуге қатысты, баптау деп аталады. Осы параметрлерді баптау үшін сарапшыларды (олардың білімдері мен тәжірибесіне негізделе) пайдаланудың орнына нейронды желілер, бұлдыр логика және генетикалық алгоритмдер сияқты әдістер қолданылатын алгоритмдер әзірленеді (Siddique, 2013).

Жүктеме бұзылуы жиі болатын жағдайларда (жоғарыда көрсетілген жағдайда сұйықтың кіре берістегі $T_{кр.}$ температурасы) кері байланыспен басқару тікелей байланыспен басқаруды қосу жолымен жақсаруы мүмкін. Тікелей байланыспен таза басқаруда ақаулықтың өзі үдерістің айнымалысына немесе бақылауды қажет ететін (бұл жағдайда $T_{шығ.}$) ПП әсерін болжау үшін өлшенеді және пайдаланылады, содан кейін басқарылатын айнымалыны өзгерту үшін қадағалаушының талап етілетін шығыс сигналын есептейді (жоғарыда көрсетілген жағдайда орамаға берілетін бу шығыны).

Каскадтық басқару бір қадағалаушының шығысы басқасы үшін кірісін оның берілген мәнін анықтау кезінде қамтамасыз ететін екі немесе одан да көп қадағалаушыны пайдаланады. Мысалы, егер ыдыстағы деңгейді бақылау қажет болса, деңгей қадағалаушысы (негізгі қадағалаушы ретінде) ыдыстан шығыста басқару клапанын реттеу үшін ағынның жылдамдығын өлшейтін және оны бастапқы қадағалаушымен берілген мәнмен салыстыратын қадағалаушыға ағын енгізуді беру үшін (екінші реттік контроллер ретінде) пайдаланылуы мүмкін. Каскадты басқарудың қосымша күрделілігі сыртқы контур динамикасымен (бастапқы қадағалаушымен) салыстырғанда ішкі контур динамикасы (екінші реттік қадағалаушымен) жылдам (кем дегенде үш есе жылдам) кезде ақталуы мүмкін. Каскадтық басқару, сондай-ақ реттеуіш клапанда ағынның бейсызықты сипаттамасы бар кезде (яғни клапан соташығының шығыны және орналасуы арақатынасы бейсызықты) қолданылады немесе клапан жабысқақ болуы мүмкін кезде (жабысу және өткізгіш арасында құбылуға беталысы бар) пайдалы.

7.6. Шығындарды бағалау және экономикалық құраушысы

7.6.1. Қондырғының жалпы құны

Қондырғының жалпы құны – бұл жобалау, құбыржолдар, құрал-саймандар, электрсымдар жүйесі, құрылмалық болат, бетон сияқты барлық физикалық жабдықты сатып алу үшін қажетті құн, содан кейін құрылыс. Жүйені талдау үшін қондырғы құнының жалпы бағалауы, қағида бойынша, не қуат ықпалы есебінен, не жабдықты модельдеудің тәсілдері көмегімен, не кейде ілеспе жүйе үшін жеткізуші ұсыныстарының көмегімен анықталады. Қондырғының жалпы құны тікелей жеткізу материалдарына қатысты шығындар, еңбекақы төлеуге қатысты шығындар, ілеспе мердігерлерге шығындар, жанама шығындар, фирма ішіндегі кеңселік шығындар және де мердігер тәуекелі мен кіріс үшін жинау сияқты басқа да шығындарға бөлінеді. Бұл әр түрлі шығындар төменде суреттелген.

7.6.1.1. Тікелей жеткізу материалдарына қатысты шығындар – бұл тұрақты физикалық қондырғылар құрылысына пайдаланылған барлық материалдар үшін шығындар, олар жұмыс алаңына жеткізумен қатар мынадай элементтерді қамтиды:

- Құрал-жабдықтар – тұрақты негізде зауытта орнатылған барлық жаңа машиналар мен жабдықтар, келесі жабдықтарды қамтиды: резервуарлар, ыдыстар, жылу қозғалтқыштары, компрессорлар, жылу алмастырыштар/ТУПГ, қыздыратын жылытқыштар, сорғылар, материалдарды өңдеу үшін жабдық және сүзгілер сияқты ілеспе жабдықтар.

- Материалдар – цемент, толтырғыш, құм, болат, құрылыс материалдары, құбырлар және фитингтер, клапандар, сым және су құбыры, құрал-саймандар, оқшаулағыш материал және бояу сияқты тұрақты зауыт құрылысына пайдаланатын сусымалы материалдар.

7.6.1.2. Еңбекақы төлеуге қатысты шығындар – әдетте алаңдағы жұмыс уақытын бағалауды тиімді «еңбек ақының мөлшерлемесіне» көбейту арқылы алынады. Бұл еңбекақы мөлшерлемесі өзімен құрылыс жұмыстарының тиісті жиынтығы үшін орташа еңбекақының мөлшерлемесін білдіреді және жалақы немесе еңбек ақыны, қосымша мерзімінен артық жалақылар, еңбекақыны төлеу қорынан аударымдар және жол жүруге/тұруға ақы төлеуді қамтиды. Бұл тиімді еңбекақы мөлшерлемесіне енгізілген басқа да шығындар құрылыс жабдықтарына, шағын құралдарға және шығын материалдарына, уақытша құрылыс объектілеріне, құрылыс қызметтеріне, далалық (бригадирлік) қадағалауға, сондай-ақ үстеме шығындарға және инженерлік фирма пайдасына жатады.

7.6.1.3. Қосалқы мердігерлерге жұмсалатын шығындар – бұл шығындар жеткізу мен монтаждау шығындарын қамтиды және ғимараттар, орында дайындалған резервуарлар мен сыйымдылықтар, градирнялар, қатты заттарды өңдеу және сақтау жүйелері, сондай-ақ, суды тазалау жүйелері сияқты жергілікті ілеспе мердігерлермен ұсынылатын жабдық және материалдарды қамтиды. Бұл шығындар сонымен бірге қондырғы бойынша барлық еңбекті, жанама шығындарды, сондай-ақ үстеме шығындарды және ілеспе мердігерлердің пайдасын қамтиды. Егер бір фирма белгілі бір зауыттың аумағында құрылыс жасауға қажетті барлық инженерлік, материалдық және құрылыс қызметтерін ұсынса, онда «кілтке» біржолғы шығындар енгізілген.

7.6.1.4. Жанама шығындар – бұл шығындар өзінде бас мердігермен ұсынылатын құрылысқа қадағалау жүргізетін қызметкердің жалпы құнын білдіретін құрылыспен басқаруды қамтиды. Еңбекақы, тәуліктік, жанама шығындар, жеңілдіктер, үстеме шығындар мен халықаралық шығындар енгізілген. Алаңдағы уақытша кеңселер сияқты бас мердігер шығындарымен байланысты өзге де шығындар, сонымен қатар, барлық басқа да қажетті кеңселік қызметтер мен керек-жарақтар енгізілген. Сондай-ақ ауыр техника мен жабдықтарды жылжыту үшін мамандырылған ауыр жабдық және крандарға шығындар енгізілген.

7.6.1.5. Фирма ішіндегі кеңселік шығындар – бұл шығындар жобалау мен сатып алу; кеңселік шығындар, мысалы, компьютерлік қызметтер; ойнату; байланыс және сапарлар;

және кеңселік шығындар, жеңілдіктер, үстеме шығындарды қамтиды.

7.6.1.6. Өзге шығындар. Жоғарыда аталған шығындарға қосымша ретінде мердігердің қаламақысы, қиындықтарды жоюға шығындар, үсті немесе жер асты, ластанған топырақты немесе уытты материалдарды жою немесе учаскені қалпына келтіру, топырақты тығыздау/құрғату, құрылыс салуға, жерді пайдалануға рұқсат, қоршаған ортаны қорғауға рұқсат, құрылыс кезінде мүлікке салынатын салықтар, жобаларды әзірлеу, заңды және қаржылық кеңесшілерге шығындар, кеңселік және зертханалық құрал-жабдықтар, сондай-ақ мобильдік операциялық жабдық.

7.3 кестесіне сәйкес Құндық инжинирингті дамытудың халықаралық қауымдастығы (ҚИДХҚ) 1, 2, 3, 4 және 5 сынып (Dysert, 2001) деп белгіленген сметалық шығындардың бес класстарын бөледі. 1-сынып бағасы анықтаудың ең жоғары деңгейімен немесе жобаның жетілуімен байланысты, сол уақытта 5-сынып бағасы ең төмен деңгеймен байланысты. Бір сынып бағаларын басқасынан айырымы үшін пайдаланылатын сипаттамалар жобаны анықтау деңгейін, бағаның шекті қолдануын, бағалаудың әдіснамасын және дәлдігін, және бағалауды дайындау бойынша жұмысты қамтиды.

7.6.1.7. Қуатты ескере отырып бағалау – бұл бағалау түрі (5-сыныпты бағалау) балама жобалар немесе қондырғы көлемі арасында таңдау үшін техника-экономикалық негіздеме кезеңдерінде әзірленеді. Бұл ерте тексеру әдісі барлық жүйе, ілеспе жүйе немесе жабдықтың жекелеген элементтерінің құнын бағалау үшін пайдаланылуы мүмкін. Қуатқа негізделген бағалар шығындары алдыңғы жұмыстан белгілі жүйе, ілеспе жүйе немесе жабдықтың бағасын жаңа блок қуатының белгілі блок қуаты қатынасына көбейтуге негізделген. Қуат коэффициенттері құрылғы түрі негізінде таңдалған дәреже көрсеткішімен реттеледі. Мысалы, егер $Қуат_1$ қуатымен (негізгі ағын жылдамдығымен не өндірілген қуатпен, не көлеммен, не бірлік түріне байланысты жылу берілім жылдамдығымен сипатталатын) $Құн_1$ бірлігінің құны белгілі болса, онда ұқсас, бірақ үлкен немесе аз бірлік $Қуат_2$ қуатымен $Құн_2$ құны 7.5 теңдеуі бойынша бағаланады:

$$\frac{Құн_1}{Құн_2} = \left(\frac{Қуат_1}{Қуат_2} \right)^n \quad 7.5)$$

n көрсеткіші қуат туралы деректермен құнның корреляциясы арқылы анықталады және әдетте 0,6-ден 0,85 дейін құрайды, бірақ кейбір бірлік түрлеріне бұл мәндер 0,37-ден 1,2 дейін және одан жоғары болады (Petersand Timmerhaus, 1968). Бұл әдіс екі қуат қатынасы 0,5-тен кем немесе 2-ден көп болған кезде айтарлықтай дәлдігін жоғалтады. Жаңа бірлікке жатпайтын кез келген шығындар белгілі бірлік есеп айырысу құнынан шегерілуі керек. Дәл солай жаңа бірлік үшін талап етілетін, бірақ белгілі бірлікке есептік шығындарға енгізілмеген қосымша шығындарды қосу қажет. Содан кейін шығындар еңбек тиімділігі немесе жеткізу құны, нарықтық шарттар және мерзім сияқты айырмашылықтарды ескеретін коэффициентке көбейту арқылы, Engineering News-Record құрылыс индексі сияқты немесе химиялық машина жасау зауыты құнының индексі сияқты жарияланған шығындар индекстерінен алынған қайта есептеу коэффициентін қолдану арқылы орналасқан жер айырмашылықтарын ескере отырып түзетілуі мүмкін.

7.6.1.8. Шығындарды параметрлік бағалау Параметрлік шығындар моделі (сондай-ақ 5-сынып бағаларында пайдаланылуы мүмкін) неғұрлым егжей-тегжейлі бағалау әдістерін пайдалануға негізін қамтамасыз ету үшін шектелген техникалық деректер бар болғанда ерте тұжырымдамалық бағалауды дайындау кезінде пайдалы.

7.3-кесте. Құнды бағалау түрлері

Бағалау сыныбы	Жобаны анықтау (толық анықтаудан %)	Бағалау мақсаты	Бағалау тәсілі	Дәлдік диапазоны	Дайындау бойынша жұмыс (жобаның құнына қатысты индекс)
5	0-2	Тексеру	Қуатты есепке алу, параметрлік модельдер	төмен=-20-дан 50% дейін; жоғары=30-дан 100% дейін	1
4	1-15	Негіздеме	Жабдықтарды есепке алу, параметрлік моделдер	Төмен =-15-тен 30% дейін; Жоғары =20-дан 50% дейін	2-4 аралығы
3	10-40	Бюджетті бекіту немесе шығындарды бақылау	Бағалау ұстанымдарымен бірлік құнын жарты егжей-тегжейлі бағалау	Төмен =-10-нан 20% дейін; Жоғары =10-нан 30% дейін	3-10 аралығы
2	30-70	Ұсыныстарды немесе тендерді бақылау	Болжамды материал таңдауын ескере отырып бірлік құнын толық бағалау	Төмен =-5-тен 15% дейін; Жоғары =5-тен 20% дейін	4-20 аралығы
1	50-100	Сметаны, мөлшерлемені немесе тендерді тексеру	Толық материал таңдауын ескере отырып бірлік құнын жарты егжей-тегжейлі бағалау	Төмен =-3-тен 10% дейін; Жоғары = 3-тен 15% дейін	5-100 аралығы

Бұл жүйенің өткізу қабілеті және оның регрессиялық талдау көмегімен алынған құнымен арақатынас орнататын бірнеше тәуелсіз айнымалыларды қамтитын шығындардың эмпирикалық қатынасы. Қате немесе ауытқыған деректер нүктелері жойылады, және оның деректерді дұрыс түсіндіруіне, сондай-ақ, физикалық мағына барына көз жету үшін ең жақсы математикалық қатынас тексеріледі. Алгоритм сызықтық қатынас болуы мүмкін, мысалы:

$$Құны = C_0 + C_1(Қуат_1) + C_2(Қуат_2) + \dots$$

Немесе бейсызықтық қатынас, мысалы:

$$Құны = C_0 + C_1(Қуат_1)^{n_1} + C_2(Қуат_2)^{n_2} + \dots$$

мұндағы $Capacity_1$ және $Capacity_2$ бірлік сыйымдылығын анықтайтын кіріс айнымалылары болып табылады (физикалық және функционалдық сипаттамалары бар), сол уақытта C_0, C_1 және C_2 тұрақтылары және n_1 мен n_2 көрсеткіштері регрессиялық талдаудан алынған.

7.6.1.9. Жабдыққа негізделген бағалар. Бұл бағалау түрі (4-сыныпты бағалау) сонымен қатар жобалау шамамен 1-15% аяқталған кезде техника-экономикалық негіздеме кезеңдерінде әзірленеді, бірақ алдыңғы әдістер айырмашылығы, ол үдерістің белгілі бір сызбанұсқасына негізделген, бұл әлдеқайда жоғары дәлдікке әкеледі. Ол технологиялық сызбанұсқаларды, содан кейін жабдықтың тізімдерін әзірлеуді талап етеді. Әрбір технологиялық жабдық үшін (мысалы, жылулық қозғалтқыш, отын элементі, реактор, жылуалмастырғыш, компрессор, сорғы, бағаналар, бу және сұйықтық сепараторлары) жабдықтың модельденген бағалары ілеспе жүйеде жабдықтың түрін, мөлшерін, жобалау температурасын және қысымын және металлургияны негізге ала отырып әзірленеді.

Жабдыққа бұл «таза» шығындар жабдықты жобалау немесе дайындаушымен жеткізу арқылы есептелуі мүмкін, бұл жағдайда техникалық сипаттамалар ұсынылуы, немесе 7.5 теңдеуін пайдалана отырып өткізу қуатын ескеретін әдісті қолдануды бағалауы тиіс. Егер металлургия және пайдалану шарттары ерекшеленсе, құнын түзету жасалуы тиіс.

Жабдыққа негізделген бағалау әдісі жабдық элементінің құны немесе қуаты және құбырлар және оқшаулау, бақылау-өлшеу аспаптары және басқару жүйелері, электр (мысалы, электрсымдар жүйесі), құрылыс және құрылымдық (мысалы, фундамент, жабдық құрастырылымы), сонымен бірге зауыт құрылысына қажетті инженерлік, сатып алатын және құрылыс материалдары сияқты жабдыққа жатпайтын байланысқан элементтерге шығындардың арақатынасына негізделген. Осы әдістің көмегімен Aspen Plus және Pro/II сияқты жүйе талдаудың компьютерлік бағдарламалары қондырғыға шығындарды түрлендіре алады. Технологиялық қондырғылар үшін жабдыққа материалдық шығындар жобаның жалпы құнының 20-40% құратындықтан, жабдық құнын барынша нақты бағалау өте маңызды. Жабдықты орнату коэффициенттері мүмкін белгілі бір жоба немесе үдеріс шарттары үшін түзетілуі тиіс. Мысалы, егер учаскені құрастыру жабдықтардың бір-біріне әлдеқайда жақын орналасуын талап етсе, мүмкін қысқа құбыржолдар, сымдар және кабель өткізгіштер үшін реттеу орындауға тура келеді. Сейсмикалық аймаққа бейімделу фундаменттер және конструкциялы болат құны үшін қажет болуы мүмкін. Жабдықтарға шығындарды әзірлеуден кейін жабдықты орнатумен жабылмайтын шығындар қосу керек.

Жанама және фирма ішіндегі кеңселік шығындар сияқты шығындар, сондай-ақ кейде басқа ұқсас қондырғылардан алынған деректерді қолдана отырып жабдық шығындарға факторларды қолдану арқылы ескеріледі.

7.6.1.10. Шығындарды толық бағалау. Егжей-тегжейлі бағалау әдетте бюджетті түпкілікті бекіту, мердігерлердің тендерлік өтінімдерін, жобаны орындау және тапсырыстарды өзгерту кезінде шығындарды бақылауды қолдау үшін дайындалады және өте дәл болуы мүмкін (3 сыныптан 1-сынып бойынша). Алайда жоба дизайнының айтарлықтай нақтылауы талап етіледі. Кем дегенде (1) ТЖӨ және коммуналдық сызбанұсқалар ағындарының сызбалары (ағындардың коммуналдық сызбанұсқасы суыту, технологиялық, ауыз және өрт сөндіру суы, зауыт және бақылау-өлшеу құралдарының ортасы, инертті газдар, бу және қазандық су сияқты коммуналдық жүйелерге арналған ТЖӨ ұқсас ақпаратты ұсынады), (2) құбырлардың және бақылау-өлшеу аспаптарының сызбанұсқалары немесе СТИП идентификаторлары (технологиялық жабдықтардың және басқару элементтерінің өзара байланысын СТП қарағанда толықтай көрсететін, құбырлар өлшемдері және фитингтер, жапқыш клапандар, қорғауыш клапандар, басқару контурлары, жабдықты жобалау шарттары және ілеспе жабдықтар сияқты элементтерді қоса алғанда), (3) жабдықтың техникалық сипаттамалары (оның ағын туралы деректерін қоса жұмыс сипаттамаларына қойылатын талаптарды анықтайтын, сондай-ақ, талап етілетін физикалық және термодинамикалық қасиеттер, жобалық шарттар, сыйымдылық, конструкция материалдары, әзірлену тәсілдері және тәртібі, сынау мен тексерулерге талаптар), (4) қозғалтқыштар тізімі, (5) электр сызбанұсқалары, (6) құбыржолдың изометриясы (изометриялық торға бейімделу үшін түрлендірілген символдармен 60° құрайтын тең қабырғалы үшбұрыш сызықтарымен алдын ала басып шығарылған бетте көрсетілген құбырдың және фитингтің үшөлшемді ұсынуы), (7) жабдық сызбалары мен құбыржолдардың құрастыруы және (8) учаскенің жалпы жоспары. Учаскенің жалпы жоспары макетін әзірлеу кезінде технологиялық бірліктер құбыржолдар желілері логикалық тұрғысынан болашақта қауіпсіз және есепке алу үшін орналасқан болуы тиіс.

7.6.2 Экономикалық талдау

Өндірістік экономиканы әзірлеу кезінде төменде сипатталғандай кез келген жанама өнімге несие алу кезінде жабдық, жер және шикізат шығындарына қосымша басқада шығындар ескерілуі тиіс.

7.6.2.1 Ұйымдастырушылық шығындар және өндіріске іске қосуға шығындар.

Жоба алдындағы әкімшілік шығындарды жабу және операторларды оқыту, жабдықты тексеру, зауыт жабдығының өзгерісі, жоспарланбаған техникалық қызмет көрсету, шикізатты тиімсіз пайдалану және басқада материалдарды зауытқа пайдалану үшін тағайындалған.

Олар әдетте пайдалану және техникалық қызмет көрсетуге 1 ай тиянақталған шығындар, жұмсалатын материалдарға жанармайға шығындарды қоспағанда (толық қуатқа есептелген) 2 ай шығындар, 1 ай отынды тиімсіз пайдалану (толық қуатқа 25% артық отын) және қондырғы жалпы құнының 2% қажет болуы мүмкін өзгерістерді есептеу үшін шығындар сомасы ретінде қабылданады.

7.6.2.2 Айналым капиталы әдетте жұмсалатын материалдарға жанармайға шығындарды қоспағанда (толық қуатқа есептелген) 2 айлық шығындар, толық қуат кезінде 2 айлық отын қоры (егер ол алаңда сақталатын жағдайда, мысалы, көмір немесе биомасса), пайдалану және техникалық қызмет көрсетуге 3 айлық шығындар, қондырғының жалпы құнынан 0,5% мөлшерінде ілеспе бөлшектер қоры және жоғарыда көрсетілген төрт позициялардың жалпы сомасынан 25% мөлшерінде күтпеген шығындар сомасы ретінде қабылданады.

7.6.2.3 Пайдалану және қызмет көрсету шығындары тіркелген және айнымалы құны бар компоненттер болып бөлінеді.

Тұрақты эксплуатациялық шығындар шын мәнінде қондырғының қуат коэффициентіне тәуелді емес және эксплуатациялық еңбек, техникалық қызмет көрсетуге шығындар мен үстеме шығындардан тұрады. Эксплуатациялық еңбек шығындарын есептеу зауытқа қажетті кезектегі қызмет көрсетуші қызметкерлерді еңбекке ақы төлеу қорынан аударымдарды қоса алғанда ескереді. Техникалық қызмет көрсетуге тұрақты шығындар, әдетте, жүйелі зерттеулерде зауыттың белгіленген секция құнынан пайыз ретінде бағаланады, өйткені ол қондырғы түріне байланысты өзгеріп отырады (зауыттың белгіленген секция құнынан шамамен 2-5%). Өнім бірлігіне пайдалануға шығындардың жыл сайынғы коэффициенттері тұрақты және айнымалы шығындар болып бөлінеді (әдетте 65 және 35% сәйкесінше), ал пайдалануға тіркелген шығындар әрі қарай жұмыс күші және материалдарға бөлінеді (әдетте 40 және 60% тиісінше). Үстеме шығындар – бұл әкімшілік және көмекші еңбек үшін төлемақы, ол, әдетте, пайдалану және техникалық қызмет көрсетудің 30% құрайды.

Ауыспалы эксплуатациялық шығындар қондырғының жүктемесіне байланысты өзгеруі мүмкін және шикі суды сатып алуды, оны өңдеу мен айдауға шығындарды, катализаторлар, химикаттар және басқа да жұмсалатын материалдарды, зауыттың қалдықтарын жоюды, сондай-ақ, қызмет көрсетуге және материалдарға әр түрлі еңбек шығындарын (қағида бойынша, зауытқа қызмет көрсетуге жалпы шығындардан 35%-ға қабылданады және жұмыс күші мен материалдарға бөлінеді, әдетте тиісінше 40 және 60%) қамтиды. Шикізатқа шығындар, сондай-ақ, қондырғының жүктемесіне байланысты өзгеріп тұрады, бірақ әдетте бөлек көрсетіледі.

7.6.2.4 Өнімнің құны. Өнім электр энергияны білдіретін кезде жүйені талдауда электр энергиясының түзетілген құны баламалы конструкцияларды салыстыру және олардың салыстырмалы экономикалық тұрақтылығын бағалау үшін жиі қолданылады. Түзетілетін электр энергиясының құны электр энергиясының бірлігіне тұрақты құны (яғни, кВт/сағ) ретінде анықталады, ол инвестициялар шығынсыз болып қалуға әкеледі, яғни нөлге тең дисконтталған құнды алады. Ол қондырғыға шығындар, қаржыландыруға шығындар, салықтар, пайдалануға және қызмет көрсетуге шығындар, шикізатқа шығындар, ілеспе немесе жанама өнімдерді сатудан табыс, таратылу құны, кез келген салықтық жеңілдіктер және жүйе өзінің қызмет ету мерзімі ішінде генерациялайтын электр энергияның таза санын ескереді. Электр энергиясының деңгейлік құнын есептеу әдіснамасы электрэнергетиканы зерттеу институтымен жарияланған техникалық бағалау бойынша нұсқауда сипатталған (Ramachandran, 1993).

Жанама өнім құндылығын бағалау қажет болған жағдайларда бағалаудың тәсілдерінің бірі электр энергиясын бұл жанама өнімсіз өндіру үшін жүйелілік негізде базалық нұсқаны әзірлеу және электр энергиясының нивелирлеу құнын белгілеу болады. Содан кейін жанама өнімді өндіру құны солай анықталуы мүмкін (айталық, сынамалар мен қателер арқылы), нәтижесінде электр энергиясының қорытынды келтірілген құны осы жағдай үшін бірлескен өндірісте базалық өндірістегі сияқты болады.

7.6.2.5 Өтелімділік кезеңін қарапайым есептеу жүйенің конфигурациясы дамуына көмек үшін жиі пайдаланылады. Ол жабдық немесе ілеспе жүйе түрін бәсекелес баламалар санынан таңдау кезінде немесе жүйе жобасына белгілі бір операцияны немесе үдерісті қосу туралы шешім қабылдаған кезде пайдаланылуы мүмкін. Өтелімділік кезеңі – бұл бастапқы инвестицияларды толтыру үшін қажет уақыт және инвестицияларға жылдық табыс біркелкі болса, ол былайша есептелуі мүмкін:

$$\text{Өтелімділік кезеңі, } n_{\text{жыл}} = \frac{\text{Бастапқы инвестиция}}{\text{Инвестициялардан жыл сайынғы табыс}}$$

Егер инвестициялардан жылдық табыстар бірдей емес болса, онда олардың бастапқы инвестицияларға тең уақыт кезеңі өтелімділік кезеңі болып табылады. Өтелімділік кезеңін есептеуді жақсарту ақшаның уақытша құнын есептеуде жасалатын болады және бұл жағдайда ол дисконтталған өтелімділік кезеңі деп аталады. Егер инвестиция амортизацияланса, онда өтелімділік кезеңі үшін жоғарыда келтірілген теңдеудің бөлгішіне оны қосу жолымен жылдық амортизация ескеріледі.

Неғұрлым өтелімділік кезеңі аз, соғұрлым балама тартымдырақ. Өтелімділік кезеңі, сондай-ақ қосымша жабдық орнату керек пе екенін шешуге көмектесуде пайдаланылуы мүмкін. Жүйе жобасына белгілі бір бірліктік операция немесе үдерісті қосу керектігі туралы шешім қабылдау кезінде абсолюттік өтелімділік мерзімі талап етіледі, әдетте алдын ала салық салу негізінде инвестициялардан жылдық табыспен Құрама Штаттарда жобалар үшін 3-5 жылды құрайды. Өтелімділік кезеңі, сондай-ақ 7.3-мысалда көрсетілгендей дифференциалды негізде есептелуі мүмкін.

7.3-мысал. Технологиялық ағын 110-60°C температурасынан °салқындатылуы тиіс. А нұсқасы сумен салқындатылатын жылу алмастырғышты пайдаланудан тұрады, ал В нұсқасы ауамен салқындатылатын жылу алмастырғышты пайдаланудан тұрады. А нұсқасын айналмасы үшін белгіленген құн (соның ішінде тікелей және жанама шығындар) 250 000 АҚШ долларын құрайды, ал В нұсқасының құны – 450 000 АҚШ доллары. А нұсқасы үшін салқындататын суды жеткізуге жылдық шығындар 100 000 АҚШ долларын жылына құрайтын болса, сол уақытта В нұсқасы үшін әуе желдеткіштердің жұмысына жұмсалатын электр энергиясына шығындар 15 000 АҚШ долларын жылына құрайды. Өтелімділік мерзімін есептеуді пайдалана отырып, екі нұсқаның қайсысын таңдау қажет екенін ұсыныс жасаңыздар.

Шешімі

А нұсқасымен салыстырғанда В нұсқасы үшін қосымша бастапқы инвестициялар $= \$450,000 - \$250,000 = \$200,000$.

А нұсқасымен салыстырғанда В нұсқасы үшін қосымша бастапқы инвестициялар $= \$100,000/\text{жыл} - \$20,000/\text{жыл} = \$80,000/\text{жыл}$.

$$n_{\text{жыл}} = \frac{\$200,000}{\$80,000/\text{жыл}} = 2.5 \text{ жыл}$$

Барлығы 2,5 жыл екенін жоғарыда есептелген өтелімділік мерзімі ауа салқындатылатын жылуалмастырғышты пайдаланумен В нұсқасы пайдалану жақсырақ екенін көрсетеді.

7.7 Өмірлік циклды бағалау

1-тарауда талқыландықандай тек экономикалық тұрақтылық негізінде жүргізілетін жүйе талдауы, яғни қоршаған ортаға әсер тигізуге қаржылай маңыздылық бермей, толық емес болып табылады. Өмірлік циклды бағалау (ӨЦБ) қанша энергия және шикізат қажет екенін және шикізатты табудан, оны өндіру, өнімді бөлу кезінде пайдаланатын, оның пайдалану және қайта пайдалану мүмкіндігін немесе оның қайта өңдеу немесе ықтимал кәдеге жарату материалдық өнім жағдайда өнімнің өмірлік циклының әрбір кезеңінде қанша қалдықтар қалатынын сандық бағалауда береді. Осылайша, бұл елеулі талдау үшін негіз.

Зерттелетін жүйенің шекарасы жүйеге кіретін және шығатын әр түрлі ағымдарды

анықтау үшін нақты анықталуға тиіс әрі құрылыс, пайдалану мен жүйені бөлшектеуден тұратын үш кезеңді қарастыру керек. Құрылыс өзіне зауытты салу кезінде қажетті шикізатты, өндірістік үдерістерді, тасымалдауды және орнындағы жұмысты есепке ала отырып, жабдықты жинауды қамтиды. Сондай-ақ салмақ, материалдар түрі, өңдеу мүмкіндігі және әр бұйымды өндірумен байланысты үдерістер сияқты зауыттың физикалық компоненттері туралы деректер талап етіледі. Жүйе жұмысы пайдалану және техникалық қызмет көрсету үшін зауытқа материалдарды жеткізуді қамтуы тиіс. Зауытты түпкілікті бөлшектеу жағдайында оның қызмет мерзімінің соңында тасымалдау және қайта өңдеу немесе материалдарды кәдеге жарату туралы мәселені қарастыру керек. Мысалы, болат, шойын, мыс пен алюминий сияқты материалдардың елеулі бөліктері қайта өңделуі мүмкін, сол уақытта бетон мен асфальт ұсақталып және төмен сапалы қоқыс ретінде қайтадан пайдаланылуы мүмкін. Темірбетонда резеңке және болат қоқыста көмілуі мүмкін, ал пластмасса қайта өңделуі немесе отын ретінде пайдаланылуы мүмкін. SimaPro коммерциялық қол жетімді бағдарламалық жасақтама ӨЦБ жүргізу үшін қажетті айтарлықтай деректер базасын қамтиды.

Компиляцияланған деректерді талдау кейде ғылыми түсіндіруге қосымша бағалауды қажет етеді. Мысалы, егер бір үдеріс басқасынан SOx көп өндірсе, бірақ NOx аз, онда ластаушы заттардың екі түрі «алмаларды алмалармен» қағидасы бойынша салыстыруға болатындай өлшенуі керек. Мүмкін тәсілдердің бірі әр түрлі әсерлерді санаттарға біріктіру болып табылады; мысалы, О₃ қабатына мүмкін әсер немесе қышқылды жауын. Осылайша, жиналған деректерді түсіндіру үшін әдісті стандарттау пайдалы болар еді.

ӘДЕБИЕТ

- Black J. Cost and performance baseline for fossil energy plants, volume 1: Bituminous coal and natural gas to electricity. U.S. Department of Energy Report; 2010. Report nr. DOE/NETL- 2010/1397. Morgantown, WV: U. S. DoE.
- Chilton TH, Drew TB, Jebens RH. Heat transfer coefficients in agitated vessels. *Ind Eng Chem* 1944;36(6):510-516.
- Dysert LR. Sharpen your cost estimating skills. *Chem Eng* 2001;108(11):70-81.
- Emun F, GadallaM, Majozi T, Boer D. Integrated gasification combined cycle (IGCC) process simulation and optimization. *Comput Chem Eng* 2010;34(3):331-338.
- Franco A, Russo A. Combined cycle plant efficiency increase based on the optimization of the heat recovery steam generator operating parameters. *Int J Therm Sci* 2002;41(9):843-859.
- Gundersen T, Naess L. The synthesis of cost optimal heat exchanger networks: An industrial review of the state of the art. *Heat Recovery Syst CHP* 1990;10(4):301-328.
- Hutchins TE, Metghalchi M. Energy and exergy analyses of the pulse detonation engine. *J Eng Gas Turbines Power* 2003;125(4):1075-1080.
- Kern DQ. *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill; 1950.
- Linnhoff B. Pinch analysis: A state-of-the-art overview: Techno-economic analysis. *Chem Eng Res Des* 1993;71(5):503-522.
- Linnhoff B, Polley GT, Sahdev V. General process improvements through pinch technology. *Chem Eng Prog* 1988;84(6):51-58.
- Lombardi L. Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of a semi-closed gas turbine cycle with CO₂ chemical absorption. *Energy Convers Manag* 2001;42(1):101-114.
- Peters MS, Timmerhaus KD. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. 4th ed. New York: McGraw-Hill; 1968.
- Ramachandran G. EPRI TAG—Technical Assessment Guide (electric supply). Electric Power Research Institute Report; June 1993. Report nr. TR-102275, Volume 1, Revision 7. Palo Alto, CA: Electric Power Research Institute.
- Siddique N. *Intelligent Control: A Hybrid Approach Based on Fuzzy Logic, Neural Networks and Genetic Algorithms (Studies in Computational Intelligence)*. Cham: Springer; 2013. Staine F, Favrat D. Energy integration of industrial processes based on the pinch analysis method extended to include exergy factors. *Appl Therm Eng* 1996;16(6):497-507. Tangirala VE, Rasheed A, Dean AJ. Performance of a pulse detonation combustor-based hybrid engine. GT2007-28056. Proceedings of the ASME IGTI Turbo-Expo Conference; May 2007; Montreal, Canada.

8

РЕНКИН ЦИКЛЫ БОЙЫНША ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ЖҮЙЕЛЕР

Бу жұмыс сұйықтығы ретінде қолданылатын **Ренкин циклы** бүкіл әлем бойы шамамен 90% электр энергиясын өндіреді. Бүгінгі күні бұндай электр станцияларының көп бөлігі көмірмен жұмыс істейді. Көптеген геотермальді және күн жылу электр станциялары сияқты заманауи атом электр станциялары да, сондай-ақ Ренкиннің бу циклын қолданады. Цикл Глазго Университетінің профессоры Уильям Джон Маккуорн Ренкиннің құрметіне аталған. Карно циклының 2-тарауда сипатталған орындалмайтын бірқатар аспектілер Ренкин циклының көмегімен жүзеге асырылуы мүмкін. Мысалы, изотермиялық ұлғайтылған (адиабатикалық ұлғаю сатысына дейін) бір фазалық жұмыс сұйықтығын пайдаланатын қозғалтқышты орнату қиынға соғады. Заманауи технологияларды ескерсек, изотермиялық ұлғаю кезінде қажетті жылуберілім піспекті типті қозғалтқыштың қолданылуын талап етер еді, бұл ретте бұндай машиналарда үйкеліс шығыны өте жоғары болады және пайдалы жұмысты шектейді. Дегенмен Ренкиннің негізгі циклы жылуды изотермиялық жеткізу және бұру сатыларына қатысты Карно циклына жақын. Бұл жарамды біркөппоненттік буды жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланудың арқасында мүмкін болды, ол жылуды жеткізу кезеңінде буланып, бұру кезеңінде конденсияланып, аталмыш кезеңдерде фазасын өзгертіп отырады.

Жылуды қосу және бұру кезеңдері үшін жұмыс сұйықтығының температуралары жылу көзінің және жұтқыштың температурасына байланысты болады, бұл ретте жылу бергіш жабдықтың қалыпты көлемін қолдап тұратындай, жылу көзі немесе жұтқыш пен жұмыс ортасы арасындағы температура айырмашылығы жүйелі, яғни қисынды болады. Бұл жұмыс сұйықтығының дұрыс таңдалуы, булану және конденсацияланудың сәйкес қысымының дұрыс болуына байланысты. Жұмыс сұйықтығын таңдауда ескерілетін басқа факторлар булану мен конденсацияланудың жасырын, яғни елеусіз жылылығы болып табылады, олар циклда айналыстағы сұйықтықтың мөлшерін, сонымен қатар өртену мен улылығына қатысты қауіпсіздікке негізделген факторларды анықтайды.

Әрине, жоғарыда аталған қасиеттеріне байланысты бу қалыпты және жоғары температурадағы ($> 150^{\circ}\text{C}$) **Ренкин циклы** үшін таңдалған жұмыс сұйықтығы болды, ал пропан және бутан сияқты органикалық сұйықтықтар төмен температурадағы жағдайларда пайдаланылған.

8.1 РЕНКИН ЦИКЛЫНЫҢ НЕГІЗГІ СИПАТТАМАСЫ

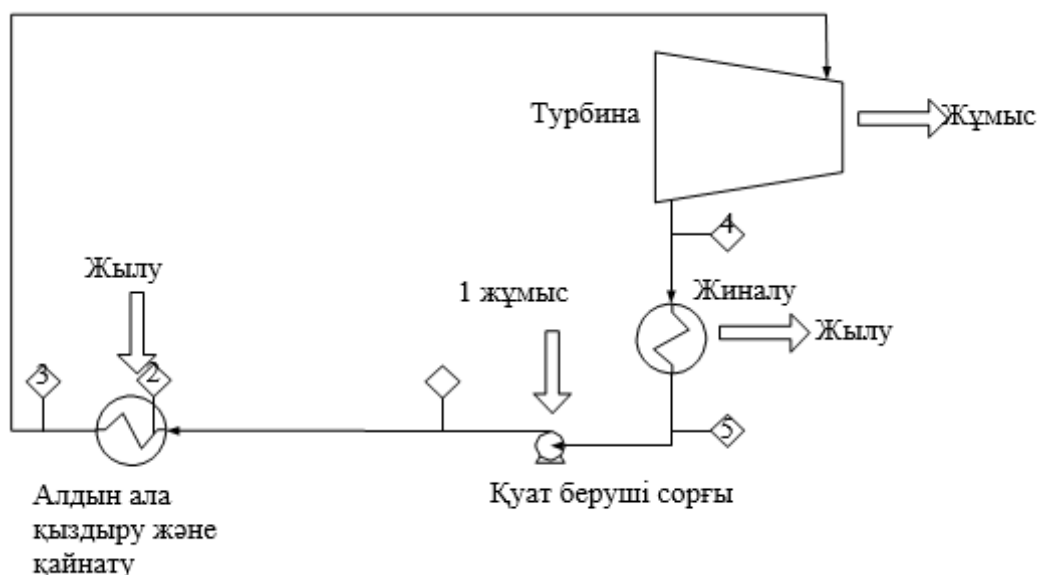
8.1-суретте Ренкиннің идеалдандырылған циклы көрсетілген, бұл циклдың температура-энтропия диаграммасы (T-S) 8.2-суретте бейнеленген.

Цикл келесі кезеңдерден тұрады:

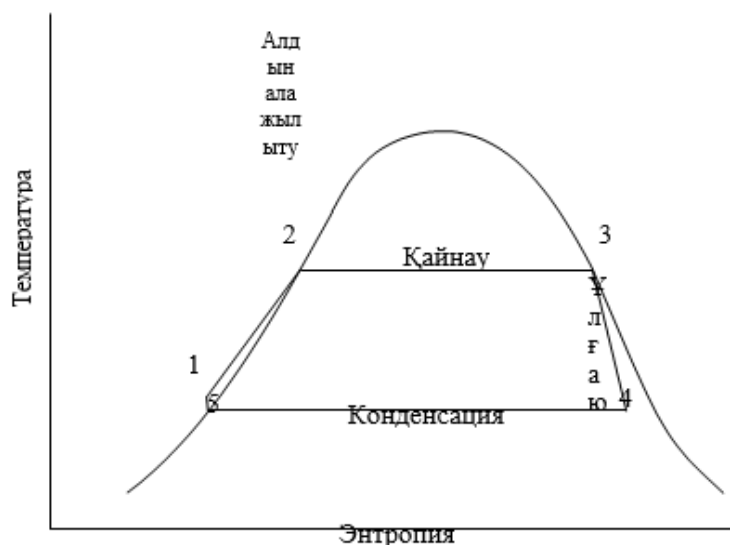
1. Изобарлық жылуды қосу: қуат беруші сорғыштың қысымындағы аса суытылған сұйықтық қанығу температурасына дейін алдын ала жылытылады, содан кейін толығымен буланып, қаныққан бу пайда болады.

2. Адиабаттық ұлғаю: алдыңғы кезеңде пайда болған, қысылған бу жұмысты орындау үшін, мінсіз турбинада адиабаттық ұлғаяды. Будың біршама мөлшері жұмысты сұйықтықтан шығару кезінде турбинаның ішінде жиналып қалуы мүмкін.

3. Жылуды изобарлық бұру: ұлғаю турбинынан шығатын бу-сұйықтықты қоспа бұдан кейін жылуды радиаторға бұрып, топталып жиналады. Фазаның бұндай қажетті өзгерісін қалыптастыру үшін, сұйықтықтың қысымы жылу алмастырғыш көлемінің шегін белгілеу үшін радиатордың температурасынан біршама жоғары болатын, радиаторға берілген температурадағы қаныққан будың қысымына сәйкес болуы қажеттігіне назар аударыңыз.



8.1-сурет. Ренкиннің базалық циклы



8.2-сурет. Ренкиннің негізгі циклының S-T диаграммасы

Осылайша, термодинамикалық көзқараспен алсақ, алдыңғы кезеңнің ұлғаю турбинасының шығысындағы қысымы радиатордың температурасымен шектелген.

4. Қысымның изоэнтропикалық көтерілуі: өткен кезеңде қалыптасқан сұйықтықтың («конденсат») қысымы бұдан кейін жеткізуші сорғыда (мінсіз машина) көтеріледі және циклды аяқтау үшін буландырғышқа беріледі.

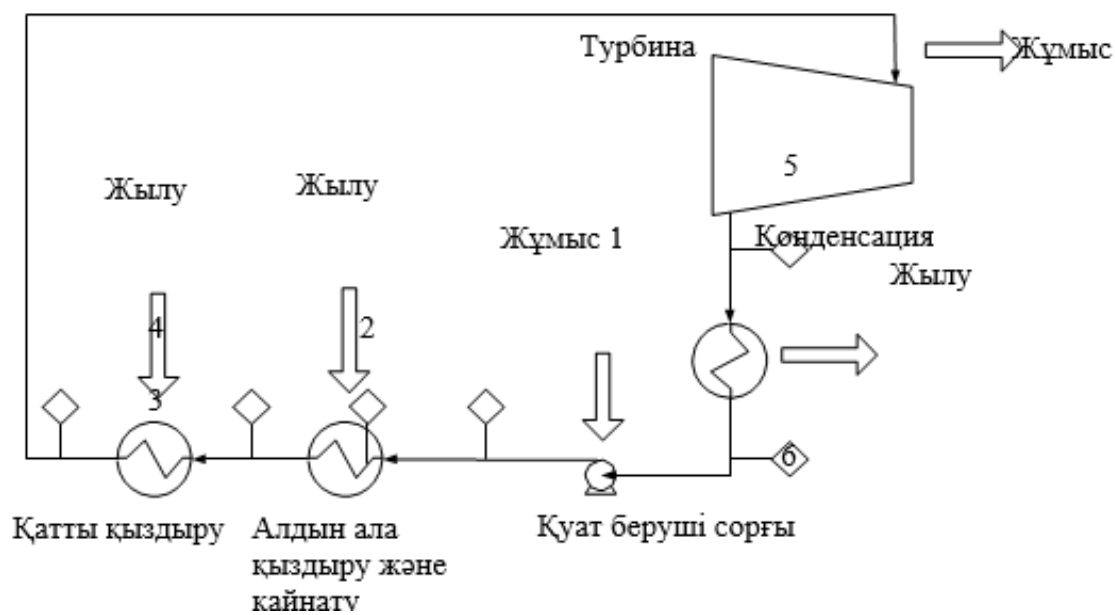
Ренкиннің шын мәнісіндегі (идеалдандырылмаған) циклын талдау барысында қысымның жабдықтағы, құбыр желілеріндегі, клапандардағы және т.б. айырмаларын, сондай-ақ сорғымен тұтынылатын энергия турбина өндіретін энергиямен салыстырғанда әлдеқайда төмен болса да, және циклдың бірінші заңының жалпы тиімділігіне әсері аз болса да, турбина мен сорғының энергия шығынын ескеру қажеттігіне назар аударыңыз. Ескере кететін тағы бір шектеу турбинаның ішіндегі жиналған бу үлесі болып табылады. Алдыңғы тарауда айтылып кеткендей, үлкен қуатты осьтік турбиналық құрылғылар пайдаланылған будың құрамында 10-13%-дан артық сұйықтық болмайтын жағдайда жұмыс істеу керек, өйткені шүмектер мен қалақшалар жоғары жылдамдықтарда конденсаттың тамшыларынан қатты эрозияға ұшырауы мүмкін, сондықтан кіріс алдында будың қысымы мен температурасын дұрыс таңдау қажет, мысалы, буландырғыштан шығып жатқан қаныққан будың қатты қызуы есебінен және ұлғайтқыш турбинаға кірер алдында. Будың асқын қызу температурасы, айталық жылу көзінің температурасымен шектелген кезде ылғалды жоюдың арнайы кезеңдері конструкцияда ескерілуі мүмкін. Бұл жағдайды әсіресе изоэнтропикалық турбиналық тиімділігі жоғары (80%-дан жоғары) және турбинаның ішінде жоғары мөлшерде конденсат туғызатын, сұйықтықтан алынатын жұмыс аса жоғары болатын үлкен бу турбиналарымен байланысты жүйелер үшін ескеру маңызды. Турбиналық тиімділігі әлдеқайда төменірек кішігірім жүйелер үшін қатты қызу деңгейін ең төмен дәрежеге дейін мейлінше қысқартуға болады (егер қажетті жылу алмасу жабдығын оңайлату мақсатында толық шығарылып тасталмаса) және қатты қыздырғыштың, құбыр желісінің, клапандардың, сондай-ақ турбинаның есептік температурасын төмендетуге болады.

Ренкиннің базалық циклының асқын қыздырғышты қосу арқылы модификациясы келесі тарауда талқыланады.

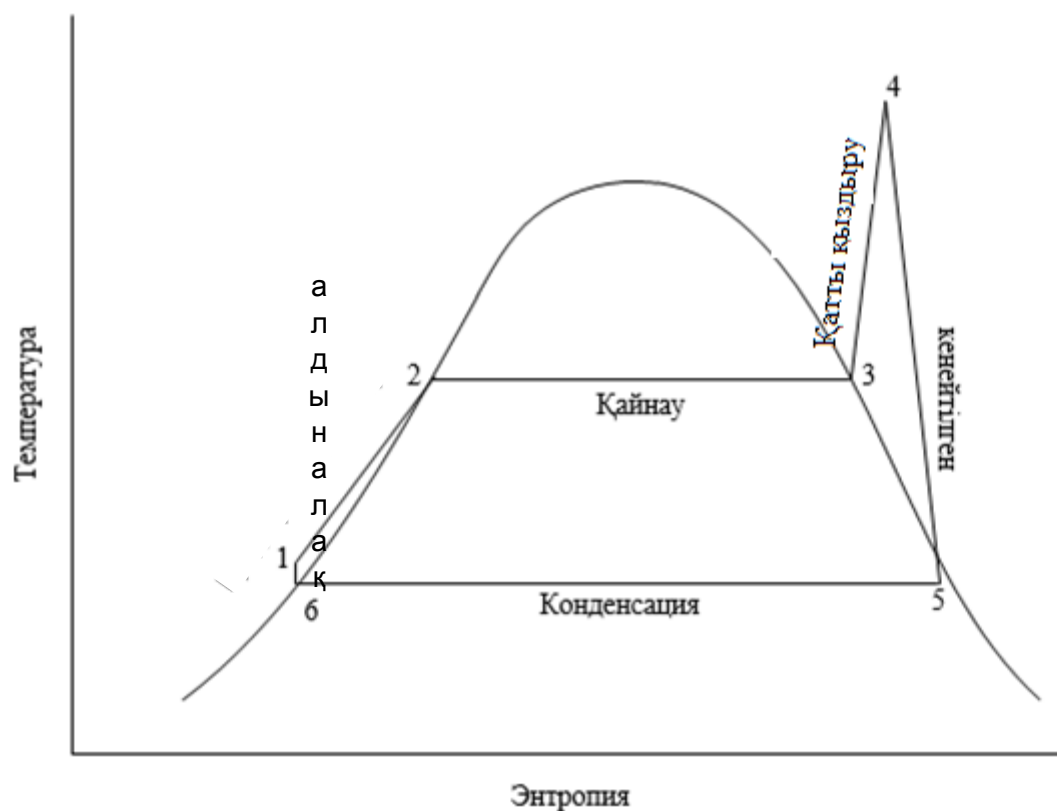
8.2 ҚАТТЫ ҚЫЗДЫРЫЛҒАН ЖҰМЫС СҰЙЫҚТЫҒЫН ҚОСУ

Ұлғайтқыш турбинаға түсер алдында жұмыс сұйықтығын асқын қыздыру үдерісі кіретін Ренкин циклы 8.3-суретте көрсетілген. Бұл цикл үшін энтропияның температураға тәуелділік диаграммасы 8.4-суретте ұсынылған.

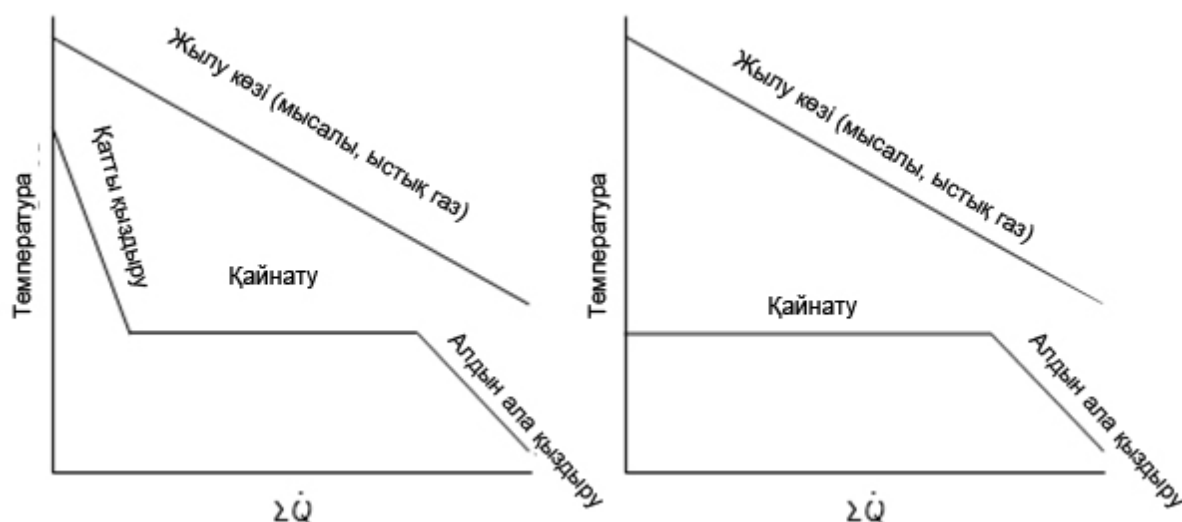
Жоғарыда сипатталған мәселелерге қосымша келесіні айта кетуге болады: егер жылу көзінің температурасы буландырғыштың қолайлы қысымын қолдап тұруға сәйкес келетін, жұмыс сұйықтығын қанықтыру температурасынан біршама жоғары болса, қаныққан буды асқын қыздыру циклдың тиімділігін арттыруы мүмкін. Жылу көзі мен жұмыс сұйықтығы арасындағы жылуберіліммен байланысты қайтымсыздық циклға жеткізілетін жылудың берілген мөлшері үшін азаяды және бұл азаю циклдағы жұмыс сұйықтығы ағынының аса төмен жылдамдығы ретінде байқалады. Демек жылу мөлшерінің азаюы конденсаторда қабылданбайды, және қуаттың артуы турбинамен дамытылады. Бұдан басқа жанармайды жағудан пайда болатын өнімдер сияқты материалдар ағыны немесе фазалық өзгеріске ұшырамайтын ыстық технологиялық ағын жылу көзі болып табылады, оның температурасы тұрақты болып қалмайды. Бұның себебі – жылу циклдың жұмыс сұйықтығына беріледі, ал буландырғыштағы жылудың жұтылуы негізінде тұрақты температурада жүзеге асырылады (буландырғыштың ішіндегі жұмыс сұйықтығы жағындағы қысымның айырмасы фаза өзгерген кезде өте аз болады). Бұл булану кезеңіндегі жылу бөліну мен жылу сіңіру сызықтарында қайшылық тудырады. 8.5-суретте Ренкиннің негізгі циклы үшін екі сұйықтықтың температураларына (Т) байланысты екі сұйықтық арасындағы (ΣQ) кумулятивтік жылу алмасу бейнеленген. Бұл суретте сондай-ақ қатты қызған бу циклы көрсетілген және қатты қыздыруды қосқан кезде жылу берілімнің бұл қайтымсыздығы азаяды.



8.3-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру арқылы жүретін циклы



8.4-СУРЕТ. Ренкиннің қатты қыздыру арқылы жүретін циклы үшін S-T диаграммасы



8.5-СУРЕТ. Ренкиннің қатты қыздыру және қыздырусыз жүретін циклы үшін ΣQ -T диаграммасы

Қатты қыздырғышқа жіберілетін жылу энергиясының маңызды бөлігі турбинадағы жұмыс үшін өзгереді және соңғы кезеңдердің бірінде турбинадан шығарылады. Сондықтан қатты қыздыруды іске қосудың экономикалық негіздемесі Ренкиннің бастапқыда сипатталған базалық циклы бойынша қысымды көтеруді талап етеді, бұл ретте жұмыс сұйықтығы буға айналып кетеді.

Жылу көзі мен радиатордың температурасы тұрақты болып қалмайтын, керісінше, жылудың берілуіне қатысты сызықтық өзгеріп отыратын Карно циклы тиімділігінің өрнегі келесі жолмен алына алады және 2.30. теңдеуінде берілетін классикалық өрнектің орнына қолданылуы тиіс

$T_{G,kip.}$ температурасынан бірқалыпты $T_{G,шығ.}$ температурасына дейін фазалық өзгеріссіз суытылатын түтіндік газ және $T_{W,kip.}$ температурада берілетін және $T_{W,шығ.}$ температурада қайтарылатын суытылған судан тұратын жылу бұрғыш сияқты жылу көздерін қарастырайық. Энтропия = энтропия, яғни энтропия қайтымды үдеріс үшін сақталатындықтан:

$$\frac{d\dot{Q}_{kip.}}{T_G} = \frac{d\dot{Q}_{шығ.}}{T_W}$$

бұл жерде $d\dot{Q}_{kip.}$ – бұл T_G температурада түтіндік газдан берілетін жылудың дифференциалды жылдамдығы, ал $d\dot{Q}_{шығ.}$ – T_W температурада суытылған судан берілетін жылудың дифференциалды жылдамдығы. Егер m_G және m_W түтіндік газдардың және суытылған судың массалық шығындары болса, және түтіндік газдар және суытылған су үшін (масса бойынша $C_{p,G}$ және $C_{p,W}$) салыстырмалы жылытулар осы температуралық диапазондарда тұрақты болып қалса, онда:

$$\dot{m}_G C_{p,G} dT_G / T_G = \dot{m}_W C_{p,W} dT_W / T_W$$

Біріктіру

$$\dot{m}_G C_{p,G} \ln(T_{G,kip.} - T_{G,шығ.}) = \dot{m}_W C_{p,W} \ln(T_{W,шығ.} - T_{W,kip.})$$

8.1)

Бірінші заңнан шығатыны:

$$\dot{m}_G C_{p,G} (T_{G,kip} - T_{G,шығ.}) = \dot{m}_W C_{p,W} (T_{W,шығ.} - T_{W,kip.}) + W$$

Карно циклының тиімділігі келесіні құрайды:

(8.2)

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Карно}} &= \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{kip.}} = \frac{[\dot{m}_G C_{p,G} (T_{G,kip} - T_{G,шығ.}) - \dot{m}_W C_{p,W} (T_{W,шығ.} - T_{W,kip.})]}{[\dot{m}_G C_{p,G} (T_{G,kip} - T_{G,шығ.})]} \\ &= 1 - \frac{[\dot{m}_W C_{p,W} (T_{W,шығ.} - T_{W,kip.})]}{[\dot{m}_G C_{p,G} (T_{G,kip} - T_{G,шығ.})]} \end{aligned}$$

Егер 8.2 теңдеуін 8.1 теңдеуімен алмастырсақ:

(8.3)

$$\begin{aligned} \eta_{\text{Карно}} &= 1 - \left[\frac{(T_{W,шығ.} - T_{W,kip.})}{\ln(T_{W,шығ.} - T_{W,kip.})} \right] \left[\frac{(T_{G,kip} - T_{G,шығ.})}{\ln(T_{G,kip} - T_{G,шығ.})} \right] \\ &= 1 - \frac{(\Delta T_W)_{\ln}}{(\Delta T_G)_{\ln}} \end{aligned}$$

8.3 теңдеуінде берілген бұл өрнек жылу көзі мен радиатор температурасы тұрақты болып қалмайтын, керісінше, жылу берілуіне қарай сызықтық өзгертін жағдайда, тек орташа логарифметикалық температураны пайдалану қажеттігін көрсетеді.

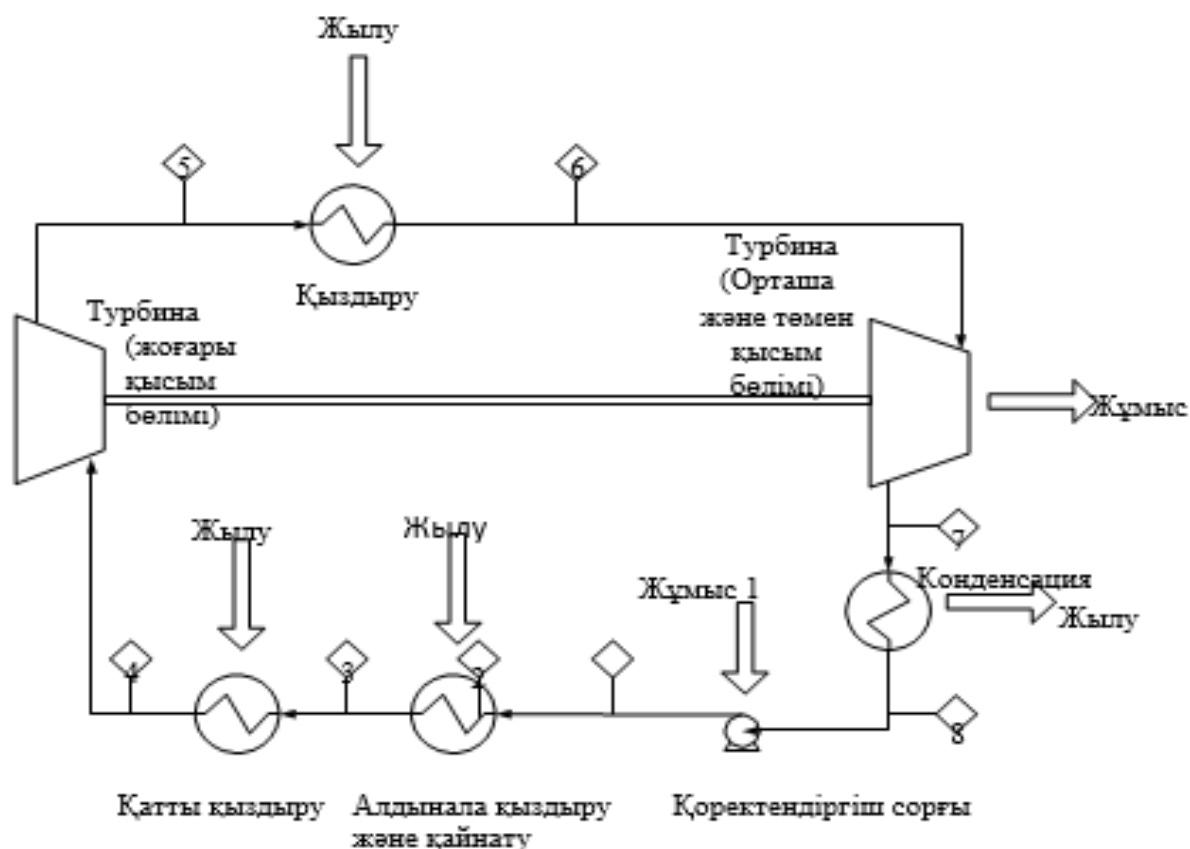
8.3 ҚАЙТА ҚЫЗДЫРУДЫ ҚОСУ

Қыздыру қатты қыздыруды қосу сияқты қосымша кезең болып табылады және әдетте орталық станция типіндегі ірі электр станциялары үшін ақталымды.

Жұмыс сұйықтығын қатты қыздыруға қосымша ретінде қайтадан қыздыру үдерісі кіретін Ренкин циклы 8.6-суретте көрсетілген, ал осы цикл үшін энтропияның температураға тәуелділігінің диаграммасы 8.7-суретте ұсынылған. Суретте көрсетілгендей, бу аралық қысымға дейін ұлғайғаннан кейін ұлғаю үдерісін аяқтау үшін турбинаға оралар алдында қыздырылады.

Бұл циклдың сәйкес Q-T диаграммасы 8.8-суретте ұсынылған. Жылытуды қосудың экономикалық негіздемесі бұдан бұрын суреттелген қатты қыздырылған Ренкин циклы барысында қысымды арттыруды талап етуі мүмкін: бұл циклда жұмыс сұйықтығы буланғанда жылытқышқа қосылатын жылу энергиясының маңызды бөлігі турбинадағы жұмыс үшін өзгереді.

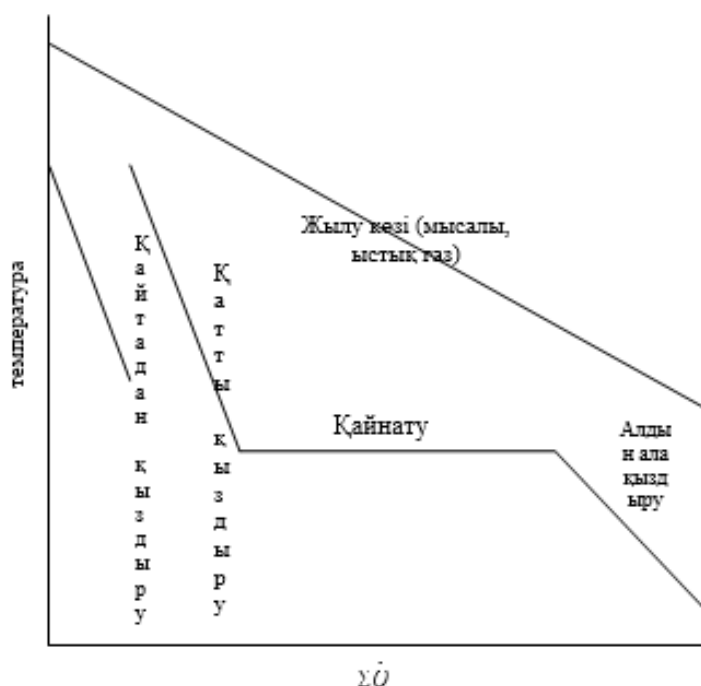
Тиімдірек турбина жылу энергиясының көп бөлігін жұмысқа өзгертеді және қайтадан қыздыру циклы да, сондай-ақ тиімдірек болуға үрдісі бар үлкен турбиналардан құралатын қосымшалардағы үнемді таңдау бола алады. Кішігірім бу турбинасының геометриялық шектеулері де, жылыту циклының қосылуына кедергі келтіруі мүмкін.



8.6-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру және қайтадан қыздыру арқылы жүретін циклы.



8.7-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру және қайтадан қыздыру циклының S-T диаграммасы



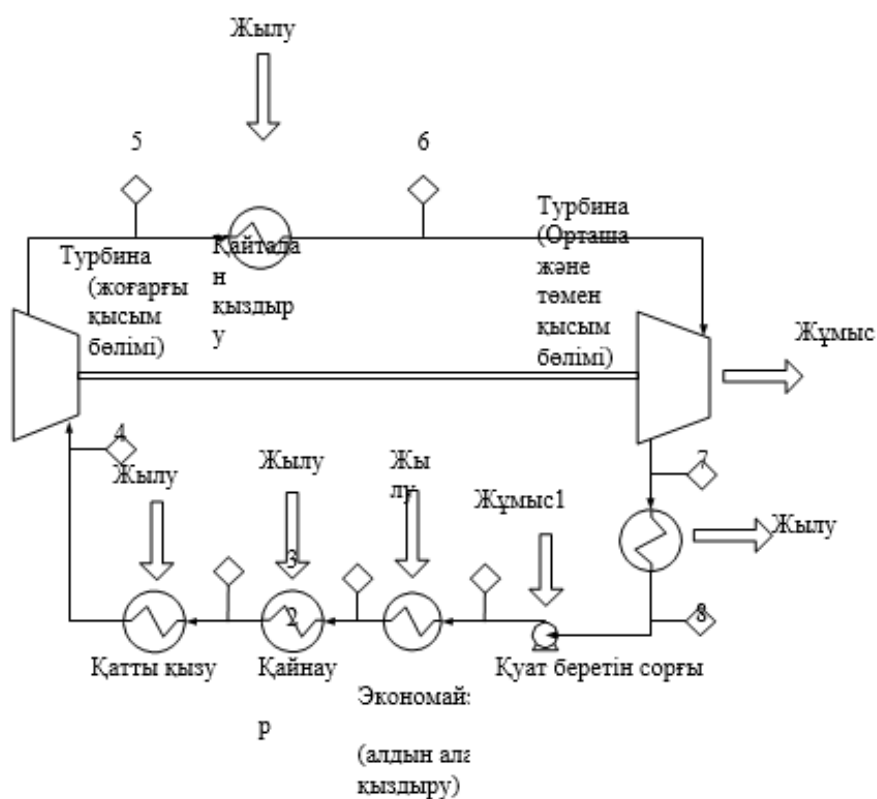
8.8-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру және қайтадан қыздыру циклының ΣQ -T диаграммасы

8.4 ЭКОНОМАЙЗЕРДІ ЖӘНЕ ҚОРЕКТІК СУДЫ РЕГЕНЕРАТИВТІ ҚЫЗДЫРУДЫ ҚОСУ

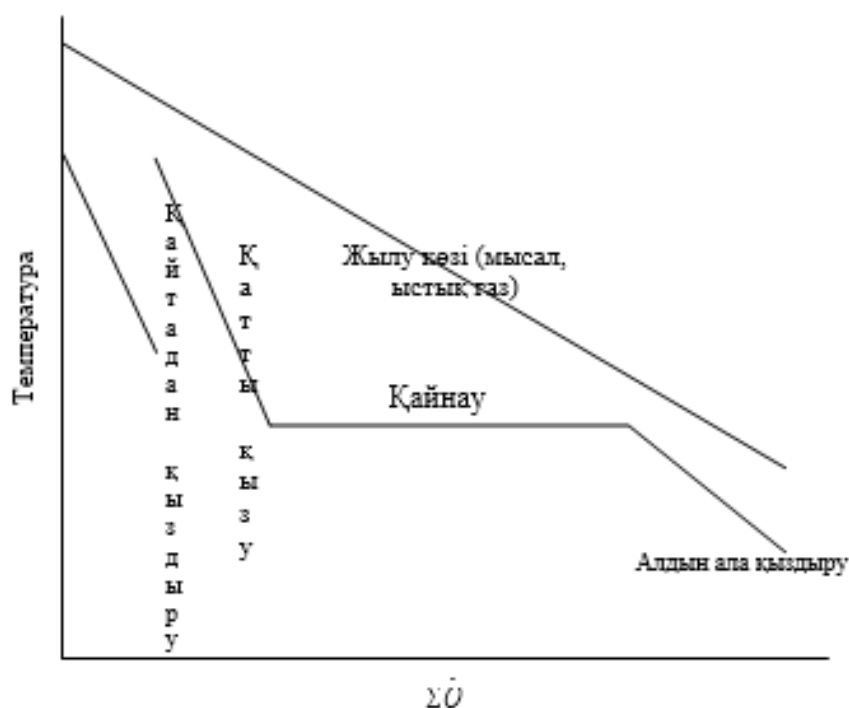
Ренкин циклының алдыңғы тарауларда талқыланды әр түрлі түрлері жеткізуші сорғыдан шығатын сұйықтықты тікелей булағышқа енгізуден тұрды. Егер сұйықтықты алдын ала жылытып, содан кейін булағышқа жіберсе, циклдың тиімділігі артуы мүмкін, өйткені сұйық суды алдын ала жылыту үшін аталған жылуды пайдаланбау арқылы сұйықтықтың көп мөлшерінің булануына қамтамасыз етуге болады. Егер жылу көзі түтіндік газ сияқты ыстық материалдың ағынынан (немесе технологиялық ағыннан) тұратын болса, онда сұйықтықты алдын ала жылыту 8.9-суретте бейнеленген «экономайзерде» жүзеге асырыла алады: бұл ретте булағыштан шығатын түтіндік газда қалған жылу (немесе технологиялық ағын) қолданылады.

Бұл цикл үшін сәйкес T тәуелді Q диаграммасы 8.10-суретте: жылу көзі мен қайнау арасындағы температураның ең аз айырмашылығы көрсетілген.

Дегенмен кейбір жағдайларда экономайзер үшін қолжетімді жылу мөлшері жылуды қамтамасыз ететін және экономайзерден шығатын қышқылдың шықпуктесі, судың шықпуктесі және байланған шлейф сияқты оған қойылған температуралық шектеулерге, немесе ағын үшін немесе түтін құбырына кіреберістегі жүзгіштік (қалқымалылық) талаптарына байланысты шектеулі болуы мүмкін. Экономайзерде құбырлардың тефлондық қабатты түтікшелер сияқты қымбат бағалы материалдарын пайдаланудан құтылу үшін құбыр беттерінің температурасын газдың қышқыл шығының нүктесінен жоғары шамада ұстау қажет.



8.9-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру / экономайзермен жылыту циклы



8.10-сурет. Ренкиннің қатты қыздыру / экономайзермен жылыту циклының ΣQ -Т диаграммасы

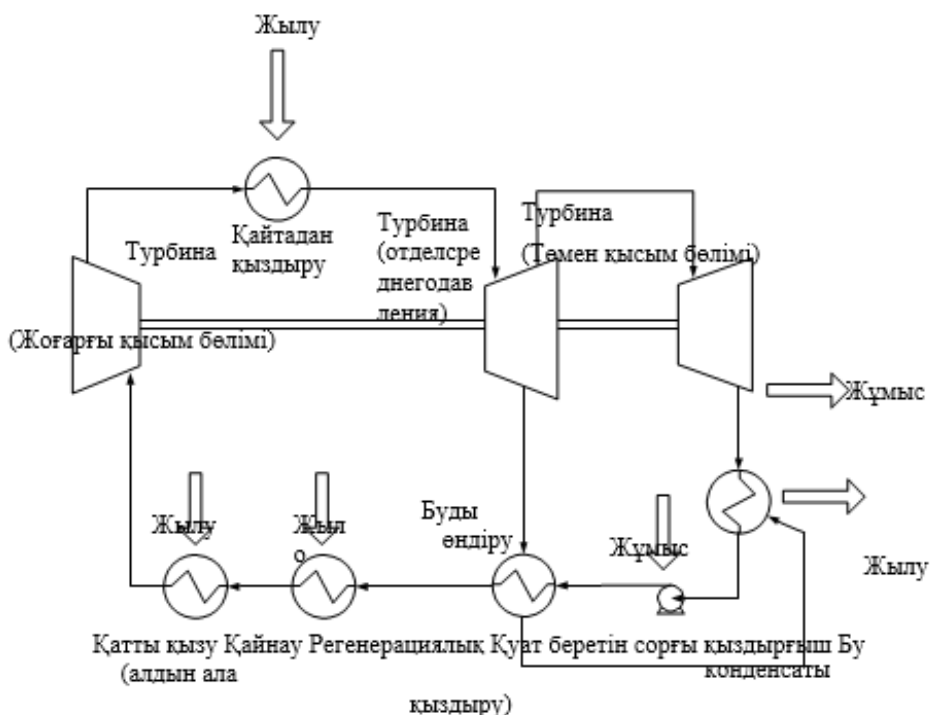
Қышқылдың шығын шектеуші нүкте әдетте күкірт қышқылымен (H_2SO_4) қойылады, ол жанармайдағы күкірттің жанармайдың жануы кезіндегі SO_1 дейін, содан кейін қышқыл құрылғанша су буымен бірге SO_3 дейін тотығуының нәтижесінде пайда болады. Шық нүктесі температурасын TD_p (K) бағалау і әрбір түрінің (H_2O және SO_3 булар) парциалдық қысымы

бойынша P_i (атмосфераларда) 8.1(Pierce,1977) теңдеуінің көмегімен жасала алады:

$$\frac{1000}{T_{DP}} = 1.7842 + 0.0269 \log P_{H_2O} - 0.1029 \log P_{SO_3} + 0.0329 \log P_{H_2O} \log P_{SO_3} \quad 8.1)$$

Сонымен қатар экономайзерде қалып қалған жылу мөлшерін шектейтін жүйенің жалпы тиімділігін арттыру мақсатында, жанатын ауаны әдетте, пеш қазандарында түтіндік газдарға қарсы алдын ала қыздырып алады. Барлық бұндай жағдайларда сұйықтықты, ол буландырғышқа түскенге дейін, алдын ала қыздырып алуға арналған басқа құралдар қажет болуы мүмкін. 8.11-суретте сұйықтықты алдын ала қыздыру үшін жылуды қамтамасыз ету мақсатында, сәйкес қысымдарда турбинадан буларды шығару арқылы бұған жету жолдарының термодинамикалық тиімді тәсілі көрсетілген. Тұрмыстық бу қазандарында, әдетте регенерациялық қыздырғыштар топтамасы (ауасыздандырғышты қосқанда жетеуге дейін) қолданылады, бұл ретте осы қыздырғыштардың әрқайсысына берілетін бу турбинадан тиісті қысым кезінде шығарылады.

SO_3 пайда болуы қазанның құрылымына, отынның қасиеттеріне және пайдалану шарттарына қатты байланысты. Оның кейбір бөліктері қазанның конвективтік өткелінде қалыптасады, және қосымша мөлшерлері NO_x шығарылымын (қалдықтарын) азайту үшін пайдаланған кезде селективті каталитикалық қалпына келтіру (СКК) құрылғысында өндіріле алады (қолданылатын катализатордың түріне байланысты).



8.11-сурет. Регенерациялық қыздыру арқылы жүретін Ренкин циклы

Жылу, негізінде, шығарылған будың конденсациясы есебінен беріледі және сондықтан оны турбинадан шығаратын қысымның қанығу температурасы қыздырылатын сұйықтықтың температурасынан жоғары болуы қажет (тиімділігіне қатысты аса жоғары емес, алайда регенерациялық жылу алмастырғыштардың құнын азайтуға қатысты аса төмен емес).

Бу қазаны будың сыни қысымынан төмен қысымда жұмыс істегенде, экономайзерден немесе регенерациялық қыздырғыштардан шығарылатын сұйықтық (BFW) бу барабанына түседі, ол жерден сұйықтық табиғи конвекциямен, не болмаса айналмалы сорғы арқылы жанудың ыстық өнімдерінің әсеріне ұшырайтын булағыш құбырларға ағып отырады. Бу барабанына ағып келетін судың температурасы оның қанығу температурасынан төмен деңгейде ұсталып тұрады. Бұл BFW фазасының буға қатысты кенеттен өзгеруін болдырмау үшін қажет, ал бұл жағдай BFW бойында бу барабаны мен экономайзердің (регенерациялық қыздырғыштары бар, алайда, BFW температурасы қанығу температурасынан әрқашан төмен

болады) арасында орналасқан басқарушы клапандағы қысымның түсіп кетуіне байланысты орын алуы мүмкін. Бұл жағдай сонымен қатар экономайзердің ішіндегі, әсіресе ішінара жүктеме кезіндегі, сондай-ақ іске қосу кезіндегі қайнауды болдырмауға мүмкіндік береді, өйткені бұл суыту температурасы (сұйықтықтың қанығу температурасы мен іс жүзіндегі температурасының арасындағы айырмашылық) азаяды. Дегенмен бу барабанынан булағыш құбырларына түсетін BFW қанығу температурасында тұр деп есептеуге болады, өйткені барабанға келетін суытылған BFW араласу арқылы осы температураға дейін тез қызады және де булағыш құбырлардан шығатын будың бір бөлігі конденсациямен талап етілетін жылуды қамтамасыз етеді.

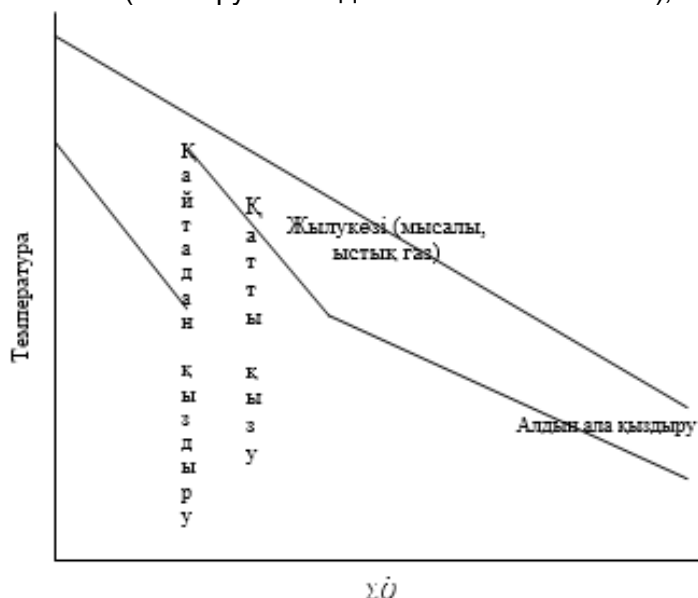
8.5 ШАМАДАН ТЫС РЕНКИН ЦИКЛЫ

Қатты қыздыруды және қайтадан қыздыруды қосу жылу көзі мен жұмыс сұйықтығы арасындағы жылу алмасумен байланысты қайтымсыздықты төмендетеді, әсіресе жылу көзінің температурасы тұрақты болып қалмаған жағдайларда. Дегенмен қатты қыздыру және қайтадан қыздыру бұл қайтымсыздықты мүлдем жоққа шығара алмайды, өйткені жылуды қосудың біршама көп мөлшері буландырғышта іс жүзінде изотермиялық әлі де жүріп жатады. Жоғарыда аталған жұмыс денесінің шектен асқан қысымының жоғары болу циклының жұмысы барысында фазаның изотермиялық өзгерісінің кезеңі болмайды және осылайша шектен кем циклдың буландырғышымен байланысты сәйкес қайтымсыздық болмайды. Бұны 8.12-суретте көрсетілгендей, Ренкиннің T қарсы ΣQ шектен асқан циклының сәйкес диаграммасынан байқауға болады.

8.6 БУ ЦИКЛЫ

Қазіргі беталыс орталық станцияның ірі көмір электр станциялары үшін шектен асқан циклды таңдау болып табылады (номиналды > 500 МВт пайдалы өндірілу қуаттылығы). Типтік цикл келесі шарттардан тұруы мүмкін:

24,1 МПа / 593°C / 593°C (3500 фунт / ш. дюйм / 1100°F / 1100°F), бұл жерде



8.12-сурет. Ренкиннің шектен асқан циклы үшін ΣQ - T диаграммасы

24,1 – жоғары қысымды бу турбинасына түсетін аса қызған бу, 24,1 Мпа қысымында және 593°C температурада тұр және турбинадағы жоғары қысымды ұлғайтқаннан кейін де, аралық турбинаға жіберілер алдында 593°C дейін қыздырылады, ал шектен кем бу циклы үшін әдеттегі шарттар.

16,5 МПа / 566°C / 566°C (2400 фунт ш. дюймге / 1050°F / 1050°F) құрауы мүмкін. Бу циклының 34,5 МПа / 732°C / 760°C (5000 фунт / ш. дюйм / 1350°F / 1400°F) сияқты шектен асқан шарттары үшін материалдар жақын болашақта енгізу үшін жетілдіріліп жатыр. Пайдаланудың бұндай ауыр шарттары жанармайдың коррозиялық белсенділігіне қатысты, әсіресе құрамында күкірт болуына байланысты мәселе туғызуы мүмкін және бұндай қолданулар Паудер өзені алабының жартылай битумдық көмірі сияқты құрамында күкірті аз көмірлермен шектелуі мүмкін. Бұл өзен Монтананың оңтүстік-шығысында және Құрама Штаттардың солтүстік-шығыс Вайоминг аудандарында орналасқан. Битумды Иллинойс № 6 сияқты құрамында күкірті көп көмірлер қатты қыздырғыш мен қыздырғыштардың жоғары температуралық бөліктерінде коррозия салдарынан құбыр материалдары шығындарының жылдамдықтарының экспоненциалды артуын тудыруы мүмкін әрі бұл жағдайда шамамен 10-15 жылдан кейін қысым түсетін бөлшектерді ауыстыру қажет болады және бұл қосымша шығындар ультра шамадан тыс циклдағы жанармайдың үнемделуі мен қалдықтардың азаюы(аса жоғары тиімділік есебінен) арқылы өтеле алады.

Ертеректе қолданыста пайдаланылған үлкен көп сатылы турбиналармен салыстырғанда, бір сатылы машиналар өте аз қолданыс үшін пайдаланылады (<2 МВт), бұл ретте буды беру шарттары біршама аз.

Пайдаланылмайтын (өндірістік) бу турбиналары будың максималды жұмыс температурасы мен кіреберістегі қысымы бойынша сыныптарға бөлінеді:

- I сынып – будың максималды қысымы – 250 фунт / шаршы дюймге (17,2 бар) және температурасы – 500°F (260°C)
- II сынып – будың максималды қысымы – 600 фунт / шаршы дюймге (41,4 бар) және температурасы – 600°F (316°C)
- III сынып – будың максималды қысымы – 250 фунт / шаршы дюймге (17,2 бар) және температурасы – 750°F (399°C)
- IV сынып – будың максималды қысымы – 850 фунт / шаршы дюймге (58,6 бар) және температурасы – 750°F (399°C)

Қажетті металлургияға байланысты турбинаның құны бу циклының шарттарына, демек сыныпқа байланысты болады. Құнындағы аса үлкен алшақтық 750°F (399°C) және әсіресе 950°F (510°C) болған жағдайда орын алады және бұл жағдайда күрекшелер үшін рентгендік сапамен құймалар қажет, олар турбинаның құнын біршама көтереді. Жүйелік талдау бу циклының қолайлы шарттарын таңдау мақсатында тиімділік пен күрделі қаржы шығындары арасындағы ымыраны бағалау үшін қажет. Алайда аса жоғары тиімділік әдетте таза қалыптастырылған қуатта қалдықтардың төмен деңгейін білдіретінін ұмытпау керек (әсіресе, CO₂ қалдықтары) әрі бұл факторды жүйелік талдау барысында ескеру қажет, яғни қалдықтарға қаржылық мағына беру. Бу турбиналары сондай-ақ кішігірім қолданыстарда шаршы дюймге 35 фунтке (3,4 бар) дейін қысымда қаныққан буды жіберу үшін ұсынылады.

8.1.-мысал. Турбина 100 000 кг / сағ жылдамдықпен қатты қыздырылған буды 42 барда жеткізеді. Қалдық шығынды 0,06 барды құрайды. Бір жағдайда қатты қызу температурасы – 400°C, ал екінші жағдайларда 300°C құрайды. Турбинаның изэнтпропикалық тиімділігі екі жағдай үшін де – 80%, ал тікелей қосылған генератордың пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) 95% деп алайық. Механикалық шығындарды ескермеңіз. Қатты қызудың екі жағдайындағы турбинаның қалдығындағы ылғалдылық мөлшерін және өндірілген электр энергиясын анықтаңыз.

Шешім

Бірінші кезеңі – қысым мен температураның берілген шарттарында будың бу кестелерінен кіру шарттарындағы салыстырмалы $\Delta h_{\text{кр.}}^V$ энтальпиясы мен $\Delta s_{\text{кр.}}^V$ энтропиясын есептеу (мысалы, Keenan et al., 1969). Кірудегі шарттарға сәйкес келетін бұл энтропия бу кестелерінен шығудағы қысым көрсеткіштерінде қыныққан буға сәйкес болатын $\Delta s_{\text{ou.}}^V$ энтропиясына қарағанда төмен болып шығады. Бұл дегеніміз шығарылған қалдық бу мен сұйықтықтан тұратын екі фазалық сұйықтық болуы керек. Сондықтан келесі қадам – қаныққан бу мен судың $\Delta h_{\text{ou.}}^V$ және Δh^L салыстырмалы энтальпиясын санау, және $\Delta s_{\text{шығ.}}^V$ энтропиясына қосымша, бу кестелерінен шығудағы қысымда сұйықтықтың фракциясын анықтау үшін, келесі изэнтропикалық жолмен шешу арқылы қаныққан судың $\Delta s_{\text{шығ.}}^L$ энтропиясын санау:

$$\Delta S_{\text{кр.}}^V = (1 - X_L) \Delta S_{\text{шығ.}}^V + r_L \Delta S_{\text{шығ.}}^L$$

t белгілі болған жағдайда, $I - \Delta h_{\text{mix}}$ шығысындағы будың сәйкес энтальпиясы, бұл изоэнтропикалық жол үшін:

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{mix}} = (1 - X_L) \Delta h_{\text{шығ.}}^V + r_L \Delta h_{\text{шығ.}}^L$$

Өңделген будың $\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}}$ жүзіндегі энтальпиясы содан кейін турбинаның изэнтропикалық тиімділігін қолданумен есептеледі:

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}} = \Delta h_{\text{кр.}}^V - (\Delta h_{\text{кр.}}^V - \Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{mix}}) \eta_{\text{турб}}$$

Шыққан қалдықтың іс жүзіндегі ылғалдылығы x^{actual} былай есептеледі

$$\Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}} = (1 - X_L^{\text{белс}}) \Delta h_{\text{шығ.}}^V + X_L^{\text{белс}} \Delta h_{\text{шығ.}}^L$$

Турбинаның электрлік өндірілу қуаттылығы W бұдан кейін будың массалық шығынын m және генератордың ПЭК $\eta_{\text{ген}}$ пайдаланумен былай есептеледі:

$$W = \dot{m} (\Delta h_{\text{кр.}}^V - \Delta h_{\text{шығ.}}^{\text{белс}}) \eta_{\text{ген}}$$

Бұл есептеулердің нәтижелері 8.1-кестеде қатты қыздырудың екі температуралары үшін келтірілген. Көрсетілгендей, қатты қыздырудың аса жоғары температурасы аса жоғары өндірілу қуаттылығына әкеледі, ал турбинадан шыққан қалдықтардың ылғалдылық үлесі, 300°C температурада қатты қыздыру жағдайындағыдай шамадан тыс болып табылмайды.

8.1-кесте. Қатты қыздырудың екі түрлі температурасындағы бу турбинасының өндірілу қуаттылығы

	Бірлік	1-жағдай (400°C қатты қызу)				2-жағдай (300°C қатты қызу)	
		Кіріс	Шығыс		Кіріс	Шығыс	
			Мінсіз күйде	Іс жүзінде		Мінсіз күйде	Іс жүзінде
Ағын жылдамдығы	кг/ч	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000
Қысым	Bar	42	0.06		42	0.06	
Температура	С	400	36		300	36	
Буэнтальпиясы	кДж/кг		2,566.6			2,566.6	
Сұйық энтальпиясы	кДж/кг		151.5			151.5	
Энтальпия	кДж/кг	3,210.6	2,076.5	2,303.3	2,954.4	1,948.7	2,149.8
Бу энтропиясы	кДж/кг-К		8.3290			8.3290	
Сұйық энтропия	кДж/кг-К		0.5208			0.5208	
Энтропия	кДж/кг-К	6.7444	6.7444	7.4777	6.3311	6.3311	6.9814
Ылғалдық	Доля		0.2030	0.1090		0.2559	0.1726
Білік қуаты	МДж/ч			90,730			80,455
Электр қуаты	кВт			23,943			21,231

8.7 КӨМІР ЭНЕРГИЯСЫН АЛУ

Электр энергиясының өндірісі үшін көмірді пайдалану әлемнің көптеген өңірлерінде, әсіресе Қытай мен Үндістан сияқты дамушы нарықтарда артады деп күтілуде, ал Құрама Штаттарында керісінше, көмір табиғи газбен ығыстырылуда. Қазба отындарының барлық түрлері арасында көмірде C-H-H ең жоғарғы ара қатынасы бар және технология зерттеулері мен талдауларының CO₂ қалдықтарын азайту мақсатында электр станцияларының жалпы тиімділігін арттыруға бағытталуы аса маңызды (қайтадан тиімділікке тепе-тең). Сонымен қатар көмір электр станцияларында тұту және CO₂ тұту шаралары біздің планетамыздың тұрақтығын қамтамасыз етуде үлкен маңызы бар тағы да бір сала болып табылады.

Сонымен, жетілдіруді жүзеге асыру үшін, техниканың қазіргі күндегі күйін түсіну керек.

8.7.1 Көмір отыны қолданылатын қазандық

Ренкиннің бу циклы үшін жылуды қамтамасыз ететін көмір отынды қазандар жылу беру әдісімен (мысалы, су немесе ыстық құбырлы), жылу берілім беттерінің орналасуымен (яғни көлденең немесе тік, түзу не майыстырылған құбырлар) және күйдіру тәсілімен (яғни суспензия, 2 оттық немесе жалған сұйықталған қабат) ерекшеленеді. Көмір отынды қазандар үшін жылу берудің ең кең тараған әдісі – бұл жанудың ыстық өнімдерінің әсеріне ұшырайтын су түтікшелерін қолдану, бұл үрдісте қазан суы мен бу құбырлардың ішінде болады. Көмір қолданатын су жылытқыш қазандар тозаң тектес көмір мен циклондық агрегаттарды, оттықтарды және жалған сұйықталған қабаттарды қосады.

Көмірмен жұмыс істейтін, көміртозаңды қазандарда отын ұсақ ұнтаққа дейін майдаланады, қалай болғанда да, бөлшектерінің 70% 200 меш (<74 мкм) ұяшықтары бар елеуіштен өткізіледі және жануға арналған ауаның бөлігімен бірге жанарғылар арқылы пневматикалық түрде пешке бүркіп шашыратылады.

²Отынды темір шілтерге берудің механикалық жүйесі, бұл ретте отын негізінен қозғалыссыз қабатта жандырылады.

Көмір пештің ішінде суспензияда болған кезде жану жүзеге асырылады. Тозаң тектес көмірде жұмыс істейтін қазандардың түптері не құрғақ, не болмаса дымқыл болуы мүмкін, ол жағдай күлдің қатты немесе ерітілген күйде алынуына байланысты (пештен шығарылған ерітілген күл немесе шлак суда суару арқылы қатайды). Жоғары еріту температурасындағы көмірлер түбі құрғақ пештерде, ал төмен еріту температурасындағы көмірлер түбі дымқыл пештерде жандырылады. Тозаң тектес қазандарда жандырудың екі тәсілі бар: қабырғалық және тангенциалдық. Қабырғалық қазандарда пештің қабырғаларының бірінде немесе қарама-қарсы қабырғаларында орнатылған оттықтар көлденеңінен атады, ал тангенциалдық (немесе бұрыштық) қазандардағы оттықтар пештердің бұрыштарында отын мен ауаның тангенциалдық бүркеп шашыратуымен орналастырылады. Тозаң тектес жүйелер ретінде түрленетін, көмірмен жұмыс істейтін циклондық пештер, шын мәнісінде, көмірдің, шамамен 4 ұяшыққа дейінгі (4,76 мм) әлдеқайда ірі бөлшектерін береді, олар алғашқы ауамен көлденең цилиндрлік пешке тангенциалды енгізіледі. Ұсақ бөлшектері суспензияда жанады, ал аса ірі бөлшектері жану камерасының қабырғаларындағы ерітілген шлақтың қабатына жабысып қалады және екінші ауамен жанады.

Жағу жүйелерінде отын негізінен пештің түбінде немесе темір шілтерінде жанады. Бұл агрегаттар кішігірім қолданыстарға (өндірістік) арналған көмір қазандарының көп бөлігін құрайды. Жинақтағыштың үш негізгі түрі бар: жеткіліксіз беріспен, артық беріспен және таратқыштары бар. Жеткіліксіз беріспен жинақтағышта көмір не көлденеңінен беріледі, бұл жағдайда күл шетінен лақтырылады, не болмаса отын өз бетімен беріледі, бұл жағдайда күл артынан лақтырылады. Артық беріспен жинақтағышта қозғалмалы темір шілтері бар түйін бункерден көмірді үздіксіз шілтерге беру үшін пайдаланылады және әрі қарай осы шілтер арқылы отын пешке тасымалданады. Лақтырғыш-таратқышта пневматикалық немесе механикалық қоректендіргіштер отынды жылжымалы темір шілтердің бетінде біркелкі таратады. Отынның тым ұсақ, тым құрғақ және тым белсенді бөлшектерінің жануы ол суспензияда болған кезде, ол қабаттың үстінде болатын жылу бөлінудің үлкен пайызымен пешке және пештің темір шілтеріне бүркіп шашыратылған кезде бастама алады.

Жалған сұйықталған қабаты бар жағу камерасында көмір әктас сияқты сорбентпен бірге SOx және хлоридтерді немесе құм сияқты инерциялы материалды тұту үшін, жағуға арналған ауамен сұйықталатын қабат қалыптастырады. Жалған сұйықталған қабаты бар жағу камералары кішігірім және ірі қолданыс салаларында кең тараған. Олардың көп бөлігі қоршаған ортаның немесе оған жақын ортаның қысымымен жұмыс істейтін, атмосфералық қысым құрылғысы ретінде саналады, ал құрылғы қысыммен 4-тен 30 барға дейін жұмыс істейді. Атмосфералық жалған сұйықталған қабаты бар жағу камералары не көпіршікті, не болмаса айналмалы қабаттармен болуы мүмкін. Жалған сұйықталудың көпіршікті қабаттағы жылдамдығы шығаруды минималдау немесе қатты бөлшектерді шаю үшін салыстырмалы

түрде төмен болады, ал айналмалы жалған сұйықталған қабаты бар жағу камераларындағы жалған сұйықталудың жылдамдығы қатты бөлшектерді ауыстыруды немесе шыр айналдыруды жүзеге асыратындай болады. Аталған кез келген түрде көшірілген қатты заттектері жоғары температуралы циклондармен тұтылады және алғашқы жағу камерасына қайтып оралады. Алайда көшірілген қатты бөлшектердің қайтып оралуы есебінен, айналмалы жалған сұйықталған қабаты бар жағу камерасында қайта айналуының жоғары жылдамдығы қолданып тұрады, бұл жағдай қатты бөлшектердің жағу камерасында болу мерзімін ұлғайтады, және олардың жоғары тиімді жануына және сорбенттің үздік қолданылуына мүмкіндік береді.

8.7.2 Қалдықтар және бақылау критерийлері

1-тарауда айтылғандай, көмірдің жануы бөлінген газдар мен қалған шалакокстың кейінгі тотықтануымен, кептірудің/ұшпалы заттарды жоюдың күрделі үрдісіне ұшырайды, ал күлдің қомақты бөлігі, әдетте мөлшері 10 мкм немесе одан кішкентай болатын бөлшектерді қалыптастырады, олар ұшпалы күл деп аталады. Көмірді жағу барысында пайда болатын негізгі ластаушы заттектер – қатты бөлшектер (ҚБ), SOx және NOx, сонымен қатар кейбір жанбай қалған жанғыш заттар, оның ішінде СО және тіпті, қазанды дұрыс пайдаланғанның өзінде де бөлінетін ұшпалы компоненттерді жою кезеңінде пайда болатын әр түрлі органикалық қосындылар.

8.7.2.1 Қатты бөлшектер (ҚБ)

Бөлінетін ҚБ құрамы мен мөлшері қазанның конфигурациясы мен жұмысына, бақылау жабдығына және көмірдің қасиеттеріне байланысты. Ол ұшпа күлден (күлдің қазанда шөгіп қалмайтын, бірақ түтіндік газбен көшіп жүретін түйірлері) және кез келген жанбай қалған көміртектен тұрады. Жылу бергіштің беттерінен күлді кетіру мақсатында дамыл-дамыл орындалып тұратын күйелерді үрлеу шаралары да, сондай-ақ ҚБ шығарылу көзі болып табылады. ҚБ қалдықтары сонымен қатар булар әсерімен пайда болуы мүмкін (көмір жағдайында негізінен органикалық емес), олар аяғында аэрозольдық бөлшектерге айналады. Жағудан кейін ҚБ қалдықтарын бақылау келесі жабдықтардың біреуі немесе бірнешеуімен орындала алады:

- Циклондар.
- Электростатикалық тұндырғыш (ESP).
- Мата сүзгі (немесе жеңдік сүзгі).
- Ылғалды скруббер.

Циклондар көп жағдайда, мысалы, жалған сұйықталған қабаты бар қазандардағы тым ірі бөлшектерді (PM10) сүзіп алу үшін, электростатикалық тұндырғыштарды, мата сүзгіні немесе ылғал скрубберді пайдалану алдында қолданылады. Сүзіп алудың әдеттегі жалпы тиімділігі 90-нан 95%-ды құрайды.

ESP модульдік құрастырымы бар және, сондықтан құрылғылар көлемінің кең ауқымына жарамды. Мата сүзгілер көмір электр станцияларында кеңінен қолданылады және олар бірнеше сүзгілеу элементтерінен немесе пакеттерден және сыртқы қабығының құрылымына бекітілген, бөлшектерді тұту үшін бункерлермен жабдықталған, қапты тазарту жүйесінен тұрады. Мата сүзгілердің тиімділігі 99,9%-ға дейін жетуі мүмкін және бұл нәтижекөлемдеріне қатысты бөлінуімен қатар, бөлшектердің жабысу сипаттамаларына және мата мен бөлшектердің электростатикалық қасиеттеріне байланысты. Ылғалды скрубберлердің мысалы ретінде вентури скрубберлерін, табақшалы және бүріккіш колонкаларды атауға болады, олар, ең алдымен, SOx бақылау үшін қолданылады, алайда ҚБ сүзу қызметін де атқарады. Скруббердің нәтижелілігі көлемі 2 мкм болатын 95-тен 99%-ға дейінгі бөлшектерді құрайды және ҚБ көлемдері бойынша бөлумен қатар ол газ жағынан қысымның төмендеуіне және бүркіту жағдайында су тамшыларының (немесе скрубберлік суспензияның) көлеміне байланысты болады. Ұшпа күлдермен жұмыс барысында ҚБ бытыраңқы қалдықтары көптеген заманауи қондырғыларда кішігірім мата сүзгілерінің немесе шаңды бақылаудың басқа да құрылғыларының көмегімен пневматикалық жүйелерді немесе желдетпелі және жабық жүйелерді қолдану есебінен минимумға жеткізіледі.

8.7.2.2 SO_x – көмірдің құрамындағы күкірт, ол пириттік, органикалық және сульфаттық пішінде болады және жағу үдерісі кезінде негізінен SO₃ пен сульфаттардың үлесі біршама аз болатын SO₂ қалыптастырады. Күл сілтілік табиғатына байланысты әр түрлі сульфаттық тұздармен пайда болған пештегі күкірттің бір бөлігін тұта алады. Қағида бойынша, жартылай битумды көмірлер күлінің сілтілігі аса жоғары болады және күкірттің 5%-дан аса мөлшерін алуы мүмкін. SO_x қалдықтарын азайту үшін бірнеше әдістер қолданылады, оның ішінде жағу алдында көмірді тазарту шаралары да бар. Физикалық тазарту көмірдің минералды құрамында болатын күкірттің пириттік пішінін азайтады, ал тазартудың химиялық әдістері органикалық күкірттерді жою үшін жасалады.

Жағудан кейін түтіндік газдарды күкіртсіздендіру (FGD) суспензияның немесе сілтілік реагенттің құрғақ ұнтағының көмегімен SO₂ қармай алады, және бұл немесе кең тараған бір реттік, не болмаса қайта қалпына келтіруші үдеріс болуы мүмкін.

Ылғалды жүйелер скруббердегі, қондырма колоннадағы немесе құрамында сілтілік сорбенті бар су суспензиясыменбүркіткішколонкадағы түтіндік газдардың түйістірілуінен тұрады. Сорбент CaO әктас ретінде болуы мүмкін, ол суспензиядағы сумен өзара әрекеттесу барысында гидратталған әктас, не Ca(OH)₂, немесе негізінен CaCO₃ түріндегі әктас, не болмаса MgCO₃ және CaCO₃ түріндегі доломит қалыптастырады. Ылғал жүйелер түтіндік газдардан 90-98% SO₂ жою үшін жобалануы мүмкін, бұл әктастың немесе сульфит пен бисульфиттің қалыптасуымен, реакцияға аса қабілетті әктастың бірінің қолданылуына байланысты. Бұдан кейін жеке операцияда тұрақтырақ сульфатты қалыптастыру үшін ауаны қолдану арқылы сульфит және бисульфит тотықтандырылады. Өнеркәсіпте гипс ретінде де танымал кальций сульфатын CaSO₄, гипсокартондық қабырғаларды жасау үшін, сонымен қатар топырақ кондиционері ретінде пайдалануға болады. ҚБ (ұшпа күлді) мөлшерін 99%-дан аса азайту ылғал скрубберлерді пайдалану барысында мүмкін болады, бірақ әдетте жабдықтың, әсіресе құбырлар мен құбыр желілерінің эрозиясын болдырмау үшін және, бәлкім, ДДГ қондырғысындағы химиялық реакцияларға араласпау үшін, ҚБ ағынмен жоғары қарай ESP немесе жеңдік блокта жинақталады. Сонымен қатар қайта пайдалану үшін өндірілетін қалдықтың мөлшері азаяды. Натрий гидроксиді (NaOH) немесе кальций қосылған сода ретінде танымал натрий карбонаты (Na₂CO₃) табиғатта Тропа минералы түрінде кездеседі, ол реагент құнының тым жоғары болуына байланысты азғана мөлшерде пайдаланылады, алайда ол 96%-дан аса SO₂ қармай алады. Реагенттің құны қос сілтілі жүйені пайдалану арқылы арзандауы мүмкін, бұл жүйеде кальций сульфиті мен сульфаттық қалдықты алу үшін арзанырақ әкті немесе әктасты қолданып регенерациялау жолымен натрийді шығаруға болады.

Құрғақ жүйелер РМ басқару құрылғысынан ағынмен жоғарырақ орналасқан және әкті немесе әктасты құрғақ ұнтақ, не болмаса су суспензиясы түрінде ыстық түтіндік газға енгізеді және 90-95% SO₂ жоя алады. ҚБ басқару құрылғысы ретіндегі кепсер (дуршлаг), қышқыл газды дәл солай жоюға қол жеткізу үшін әдетте электростатикалық тұндырғыштарға (ESP) қарағанда, сорбенттің аз мөлшерін қажет етеді, өйткені ол газ қаптың бетінде пайда болған сорбенттің сүзіндісі арқылы өткен кезде сорбент пен қышқыл газдар арасында қосымша байланыс уақытын қамтамасыз етеді. Егер әктас айдалып жатса, реакциялық қабілеті жоғары CaO пайда болуы үшін түтіндік газдың температурасы оның ыдырауының температурасынан жоғары болуы керек. Әктас, сондай-ақ құрғақ гидратталған әктас сульфиттің және сульфаттың біршама мөлшерін тудыра отырып SO₂ сіңіреді. Бұл реакциялық өнімдер «жауап қатпаған» гидратталған әктаспен, CaO мен CaCO₃ біраз мөлшерімен және ұшпа күлмен бірге, соңынан ҚБ келесі басқару құрылғыларында тұтылады. Бұл қатты бөлшектердің бір бөлігі реагентті пайдалануды азайту үшін айналымда жүруі мүмкін, ал қалған бөлігі қайта пайдалану үшін өндіруді қажет етеді немесе, мүмкін, құрылыс материалдары ретінде пайдаланылады. Қатты бөлшектердің айналымы сондай-ақ айналмалы жалған сұйықтықты қабатты пайдалану арқылы да жүзеге асырыла алады, бұл ретте түтіндік газ бен құрғақ сорбент тығыз байланысқа түседі. Айналмалы жалған сұйықтықты қабатпен құрғақ скрубберді қолдану арқылы SO₂ қамту тиімділігі 98%-ға жетеді.

Коммерциялық қолданысы шектелген болса да, бұдан басқа үдерісте дақылдар үшін аса құнды тыңайтқыштың (NH₄)₂SO₄ пайда болуын көздей отырып, түтіндік газдарда SO₂ - мен реакция үшін сусыз немесе сулы аммиакты қолданады. SO₂ жою тиімділігі 98%-дан асады деп мәлімденеді.

8.7.2.3 NO_x. Жағу ауасының құрамында болатын N₂ тотығу нәтижесінде (термиялық NO_x), азот отынымен байланысты тотығу нәтижесінде (ең бастысы көмірдің ароматтық шығыршығының құрылымында болатын) және ұшпа көмірлерді молекулярлық N₂ жою нәтижесінде (кептірудің бастапқы кезеңінен кейін) пайда болатын CN және CH₂ сияқты әр түрлі көмірсутекті радикалдардың реакциясы нәтижесінде (жылдам NO_x) NO_x пайда болады.

N₂O біраз мөлшері (<1%) де, сондай-ақ көмірді жағу кезінде пайда болады, дегенмен бүгінгі күнгі басым түрі (~ 95%) NO болып табылады, ал қалғаны – NO₂. Жылу No_x пайда болуы экспоненталды температураға байланысты және O₂ шоғырлануының артуына және газ уақытының артуына қатысты ұлғаяды және циклондық қазандардың әдетте жылы NO_x аса жоғары қалдықтарын түрлендіру үрдісі бар. Битумды және жартылай битумды көмірлердің құрамында 0,5-тен 2 мас.%-ға дейін азот болуы мүмкін және ол NO_x жалпы мөлшерінің 80%-ға дейінгі мөлшерін құрауы мүмкін. Тәсілдің екі түрі (көп жағдайда екеуі бірге үйлестікте) кеңінен қолданылатын жағуды бақылау құралдары және жағудан кейінгі бақылау құралдары NO_x қалдықтарын шектеу үшін пайдаланылады. Жағуды бақылау құралдарына ауаның төмен молдығы (LEA), ауа ағыны (OFA), NO_x қалдықтарының төмен деңгейімен оттықтар (LNB) және жағып бітірудің және түтіндік газдың қайта айналымы кіреді, бұл ретте жағудан кейінгі бақылау тәсілдемелері – бұл іріктемелі каталитикалық қалпына келтіру (SCR) және іріктемелі каталитикалық емес қалпына келтіру (SNCR).

Ауа ағынын (OFA) пайдалану барысында жағуға арналған жалпы ауаның бір бөлігі жану үдерісін кідіртіп, мерзімін ұзарту үшін, оттықтардың үстінде басылып тығыздалады, бұл үдеріс төмен қарқынмен жануды және от температурасының неғұрлым төмен болуын қамтамасыз етеді, сонымен қатар отын азотпен байланысты жағу зонасында O₂ шоғырлануын төмендетеді. Тангенциалдық және қабырғалық қазандар үшін, сондай-ақ оттықпен жұмыс істейтін қазандар үшін қолдануға болатын бұл әдіс, NO_x қалдықтарын 20-30%-ға азайта алады. LNB O₂ шоғырлануын, жану үдерісінің температуралық профилін бақылайды, сонымен қатар отынмен байланысты азоттың NO_x және NO_x жылулық құрылымдарына өзгеруін шектеу үшін оттықтың әрбір бөлігінде ең жоғары температурада болу уақытын азайтады. LNB тангенциалдық та, қабырғалық та қазандарда қолданыла алады, алайда циклондық қазандар үшін немесе оттықтарға жарамайды. Бұл әдіс бақыланбайтын деңгейлермен салыстырғанда OFA бірге үйлестікте NO_x қалдықтарын 40-60%-ға азайта алады. Жағып бітіруге отынның бүкіл энергиясының шамамен 60% (толық қуатты іске қосылу барысында) жандырудың негізгі зонасына берілуі кіреді, ал табиғи газ, мұнай немесе тозаң тектес көмір түріндегі қалған бөлігі ауамен немесе түтіндік газбен жағып бітіру үдерісін аяқтау үшін оттықтардың бетінде бүркіліп шашыратылады, жағудың негізгі зонасында қалыптасатын NO_x мөлшерін N₂ және H₂O буларға дейін азайтатын, отынға бай, зонаны құру зонасы. Бұл әдіс тангенциалдық, қабырғалық және циклондық қазандарда қолданыла алады және бақыланбайтын деңгейлермен салыстырғанда NO_x қалдықтарын 50–60%-ға азайта алады. Түтіндік газдардың қайта айналымы түтіндік газ бөлігінің ҚБ басқару құрылғысынан ағын бойынша төмен іріктелуінен және желдеткішті екінші қайтара «жағуға арналған ауаның» бөлігі ретінде пайдалану арқылы қайтадан пешке берілуінен тұрады.

Қоспада O₂ төмен мөлшерде шоғырлануы салдарынан айналымдағы түтіндік газ және таза ауа, жалынның температурасы төмендейді және осылайша No_x пайда болады.

SCR сияқты, SNCR те, N₂ және H₂O буларының қалыптасуымен NO-мен реакциясы үшін (SCR жағдайында катализатордың қатысуымен) түтіндік газға NH₃ айналуын қосады (немесе SNCR жағдайында несепнәрді) Бақылаудың бұл әдістерінің тиімділігі түтіндік газдардың температурасына (әдетте SCR үшін шамамен 400°C және SNCR үшін – 800-1150°C), отындағы күкірттің құрамына, кірістегі No_x шоғырлануына, реакция уақытына және NH₃ (немесе несепнәр) No_x-ға қатынасына байланысты болады. Катализатордың белсенділігі ұшпа күлдің As, Ca, P және K сияқты кейбір компоненттерінің көмегімен азайтылады. NO_x 75-85%-ға төмендетілуі SCR көмегімен көрсетілді, алайда кейбір өте қарапайым, бірақ коммерциялық теңдемелермен SNCR 25–50% диапазонында болатыны дәлелденген. SCR-мен капиталдық шығындар жоғары, алайда реагенттердің құны төмен. SCR кемшілігі – ол SO₂ тотығуын қосымша SO₃ қалыптастыра отырып катализдейді, ал ол өз кезегінде күкірт қышқылын тудырады және ағын бойымен төмен орналасқан ауа жылытқыш, жеңдік құрылғы және ESP сияқты жабдықтарды коррозияға ұшыратады.

SO₃ сондай-ақ түтіндік газдардағы хлоридтермен реакцияға түседі және субмикрондық аэрозольдық бөлшектерді қалыптастырады, ал олар мөлдір емес шлейф құрайды және реакцияға түспеген NH₃ жабыспақ аммоний тұздарды қалыптастырады. Аммоний тұздары жылу алмасу құрылғысының бетінде шөгіп қалады. Осы тұздарды «қармау» үшін SCR ұшпа күлдің ҚБ басқару құрылғысының алдында орналастыру тиімді.

8.7.2.4. СО және органикалық қосылыстар. Жану өнімдеріндегі СО мен органикалық қосылыстардың мөлшеріне әсер ететін үш аса маңызды факторлар – бұл жағу зонасында болу уақыты, температура және турбуленттілік («үш Т»).

СО мен органикалық қосылыстар қалдықтарының артуының негізгі механизмі жағу үдерісі кезінде отын мен ауаның дұрыс араласпауы болып табылады, сондықтан отынға бай облыстар сақталады және қыздыру үшін жеткілікті О₂ таба алмайды, ал бұл жағдайда араластыруды турбуленттілікпен жақсартуға болады. Бұл қалдықтар сондай-ақ ауа молдығының төмен болуына байланысты орын алуы мүмкін. Тым кішкентай қазандар, қыздырғыштар және пештер әдетте жоғары температура облысында болу уақытының аздығына байланысты, осындай ластаушы заттарды көп мөлшерде шығарады. Болу уақыты мен температураны азайтуға негізделген, NO_x қалдықтарын азайту үшін пайдаланылатын, жағуды бақылау құралдарын әзірлеу барысында СО мен органикалық қосылыстардың қалдықтарына әсерін ескеру қажет.

Шығарылатын органикалық қосылыстарға әр түрлі көмір сутектері (алкандар, алкендер және бензол, толуол, ксилол және этилбензол сияқты ароматтық қосылыстар), оксигенаттар (альдегидтер және спирттер сияқты), сонымен қатар диоксиндер және фурандар сияқты хлорланған қосылыстар кіреді. Диоксиндер мен фурандар сонымен қатар ағынымен төмен орналасқан жабдықта, 230-350°C температура диапазонында максималды мүмкіндікпен ауаның ластығын бақылау үшін қалыптасуы мүмкін. Жанудан кейін бұл қосылыстардың пайда болуын түтіндік газдарды тез суыту арқылы және белгілі бір металдардың мөлшерін шектеу арқылы ықшамдауға болады, бұл металдардың ауаның ластануын бақылаушы кейінгі жабдықтарда осы қосылыстардың пайда болуына ықпал ететіні және шапшаңдататыны белгілі.

8.7.2.5. Mn, Be, Co және Cr металдарының іздері ұшпа күлде және шөгінді күлде шамамен біркелкі таратылған, және олардың қалдықтары ҚБ қалдықтарының жалпы көлеміне байланысты. Cd, Pb және Sb өздері де басымырақ ұшпа күлге бөлінетіндіктен, (шөгінді күлмен салыстырғанда), олар бөлшектерінің көлемінің кішіреюімен жоғары деңгейде шоғырланады. Осылайша, бұл ұшпа металдардың қалдықтары ұсақ ҚБ тұту тиімділігіне байланысты болады. Hg және кейбір жағдайларда Se түтіндік газдарда қалады, бұл элементтерді тұту үшін, әдейілеп арналған басқа құралдар қажет. Көмірдегі С мөлшері түтіндік газдардың құрамындағы қарапайым пішіндегі немесе хлорид түріндегі Hg үлесіне әсер етеді. HgCl₂ суда ериді және сондықтан, ылғалды ДДГ сияқты ылғалды тазарту шаралары кезінде жойылып кетеді. Түтіндік газдардан сынапты тұту үшін салыстырмалы түрде қарапайым және тексерілген әдіс – сынапты ҚБ басқару құрылғысынан ағын бойынша жоғары сіңіру үшін түтіндік газдарға белсендірілген көмірді бүркіп шашу және СМ басқару құрылғысында белсендірілген көмірді сіңірілген сынаптық газбен бірге түтіндік газдардан айыру. SO_x, NO_x және H₂O түтіндік газдарда шоғырлануы Hg сіңірілуіне әсер етуі мүмкін. Регенерацияланған сорбенттер, катализаторлар, тазалағыш ерітінділер, жанудың модификациясы және ультракүлгін сәулелену – барлығы, осы «шығару» үдерісін алмастыру үшін зерттеледі.

8.7.2.6. Көмір құрамындағы Cl және F галогендер көп жағдайда HCl және HF формаларында шығарылады, қарапайым Cl және F газдар түрінде шығарылу мөлшері аз болады, ал бұл қалдықтардың кейбіреуі ұшпа күлмен немесе шөгінді күлмен сіңірілуі мүмкін. HCl сияқты HF та суда жақсы ериді және ДДГ сияқты ылғалды тазарту үдерісі кезінде оңай жойылады. Жалған сұйықтықты қабатпен қазандарда (сондай-ақ әктасты әк негізінде пайдаланатын құрғақ ДГГ басқа қазандарда) SO_x қалдықтарын шектеу үшін әктасты қолданудың қосымша артықшылығы – ол осы қышқыл газдардың негізгі бөлігін тұта алады.

8.7.2.7. Жылыжайлық газдар СО₂-ге қосымша, көмірді жағу кезінде пайда болатын

басқа жылыжайлық газдар – N_2O және CH_4 . N_2O қалдықтары жалған сұйықтықты қабатпен қазандар үшін маңызды болады, әдетте басқа көмір қазандары түрлеріне қарағанда екі есе жоғары. Егер жану температурасы жоғары қалыпта болса ($> 850^\circ C$), ал ауа молдығы ең аз деңгейде болса ($< 1\%$), N_2O шығарылуы минималды дәрежеге жеткізіледі. CH_4 қалдықтары көмір қазанын іске қосу немесе істен ажырату кезінде ең жоғары болады, егер жағу үдерісі аяқталмаса, қазанның жұмысы кезінде тоқтаусыз бөлініп тұратын CO_2 ерекше назар аударуды талап етеді. Бұдан кейін аминнің су ерітіндісін қолдану арқылы («аминмен жуу») CO_2 тұту үшін түтіндік газдарды тазалау үдерісі сипатталады (жағудан кейін тұту), алайда құрылғының құны мен өндірімділігіне оның әсері өте маңызды, ол электр энергиясы құнын шамамен екі есеге дейін көтереді. Осылайша, еріткіштердің, мембраналардың және абсорбенттердің басқа түрлерін пайдалануға қатысты технологиялар зерттеледі. Жағу үдерісінде ауаның орнына аса таза оттегін пайдалану («оттегіде жандыру») қазіргі уақытта зерттеліп жатқан тағы да бір тәсілдеме болып табылады. Бұл үдерісті құрамында CO_2 аса жоғары шоғырлануы бар түтіндік газ жүзеге асырады, бұдан кейін ол тазаланады. Дегенмен ауаны бөлу блогы (аса таза оттегі ағынын қамтамасыз ету үшін) мен CO_2 тазарту блогының капиталдық шығындары мен энергияны қолдануы да, сондай-ақ аса маңызды болуы мүмкін. CO_2 бөлімі осы шығаруды (қалдықты) бақылаудың тек бір қадамы болып табылады және оны тұту ол үшін оның «үйде» болуын талап етеді әрі 1-тарауда түсіндірілгендей геологиялық секвестрлену, сонымен қатар оны көмір қабаттарынан метанды бөліп шығару үшін пайдалану зерттеліп жатыр, ал оны мұнайды өндіруде кең көлемде коммерциялық пайдалану бірқатар жылдар бойы тәжірибеде қолданылып келеді.

Аминдермен CO_2 бөлімдерін түтіндік газдардан (Chapeletal., 1999) жуу үдерісінде патенттелген қоспалары бар MEA су ерітіндісі қолданылады. Үдеріс абсорбер / десорбер жүйелерінен тұрады, екі колонна арасында ерітінді айналымда болады, бұл үдеріс 5-тарауда сипатталған және 5.2-суретте көрсетілген. Суытылған түтіндік газ ҚБ жойылғаннан кейін және күкіртсіздендіруден кейін абсорберге жіберіледі, ол жерде МЭА ерітіндісімен реакцияға түседі және шамамен 85-90% CO_2 ерітіндімен сіңіріліп алынады. Мол ерітінді (CO_2 тиелген) буландыратын колоннада атмосфералық қысымға жақын қысымда, аса таза CO_2 ағынын алу үшін, буды пайдаланып, қайта қалпына келтіріледі. Азайып қалған ерітіндінің кішігірім жуу ағыны жоғары қайнамалы ұшпайтын қоспаларды, оның ішінде пайда болған термотұрақты тұздарды, ұшпа қышқылдарды және темір өнімдерін айналмалы еріткіштің ерітіндісінен жою үшін регенераторға беріледі.

Қалпына келтіру көп жағдайда иондық алмасу үдерісі көмегімен жүзеге асырылады. Булаушы колоннада атмосфералық қысымда бөлініп жатқан CO_2 көп сатылы аралық суытқышы бар орталық компрессормен құбыр желісіндегі қысымға дейін қысылады.

8.2-кесте. Битумды көмір мен лигниттен HCl қалдығы

Көмір түрі	битумды	лигнит
Cl, салмақтық үлес	0.0029	0.000012
Жылу шығару қабілеті		
ВГЧ (кДж / кг)	27,135	15,391
NNV (БТЕ / фунт)	11,666	6,617
Мольдік салмақ, Cl	35.45	
Көмірдегі Cl құрамы (фунт моль / 106 БТЕ)	0.007012	0.000051
Шығарылған HCl (фунт / 106 БТЕ)	0.007012	0.000051
HCl мольдік салмағы	36.46	
Шығарылған HCl (фунт / 106 БТЕ)	0.2557	0.001865
HCl шектеулі	0.002	
HCl жою қажет етіледі (%)	99.22	Қажеті жоқ

CO_2 сонымен қатар сорғыту керек, бұған ылғалды CO_2 шөгінділер мен коррозияны тудыратын, кристалдық гидраттардың пайда болуын болдырмау мақсатында CO_2 ағынын сәйкес қысымда соңғы қысымға дейін сығуды аяқтау алдында өңдеу арқылы қол жеткізіледі.

-40°C (-40°F) шық нүктесі әдетте қажет етіледі және ылғалды CO₂ тазарту триэтиленгликольді пайдалану арқылы қол жеткізіледі.

8.2-мысал. Коммуналдық электрстанциясы битумды көмірді 1.4-кестеде берілген талдаудың көмегімен жандырады. Зауыт АҚШ ЕРА қабылдаған, жаңадан ұсынылған AirToxics жаңа ереже туралы хабар алады, ол ережеге сәйкес HCl 0,002 фунт / 106 Btu HHV қалдықтарына шектеу қойылған. Егер олар осы көмірді әрі қарай пайдалана беретін болса, онда HCl қандай жою деңгейі қажет болады? Егер бұл көмірдің орнына олар 1.4-кестедегі талдауға сәйкес қоңыр көмірді пайдаланатын болса, онда HCl қандай жою деңгейі қажет болады? Көмірдегі бүкіл Cl отын газында HCl ретінде табылды деп алайық.

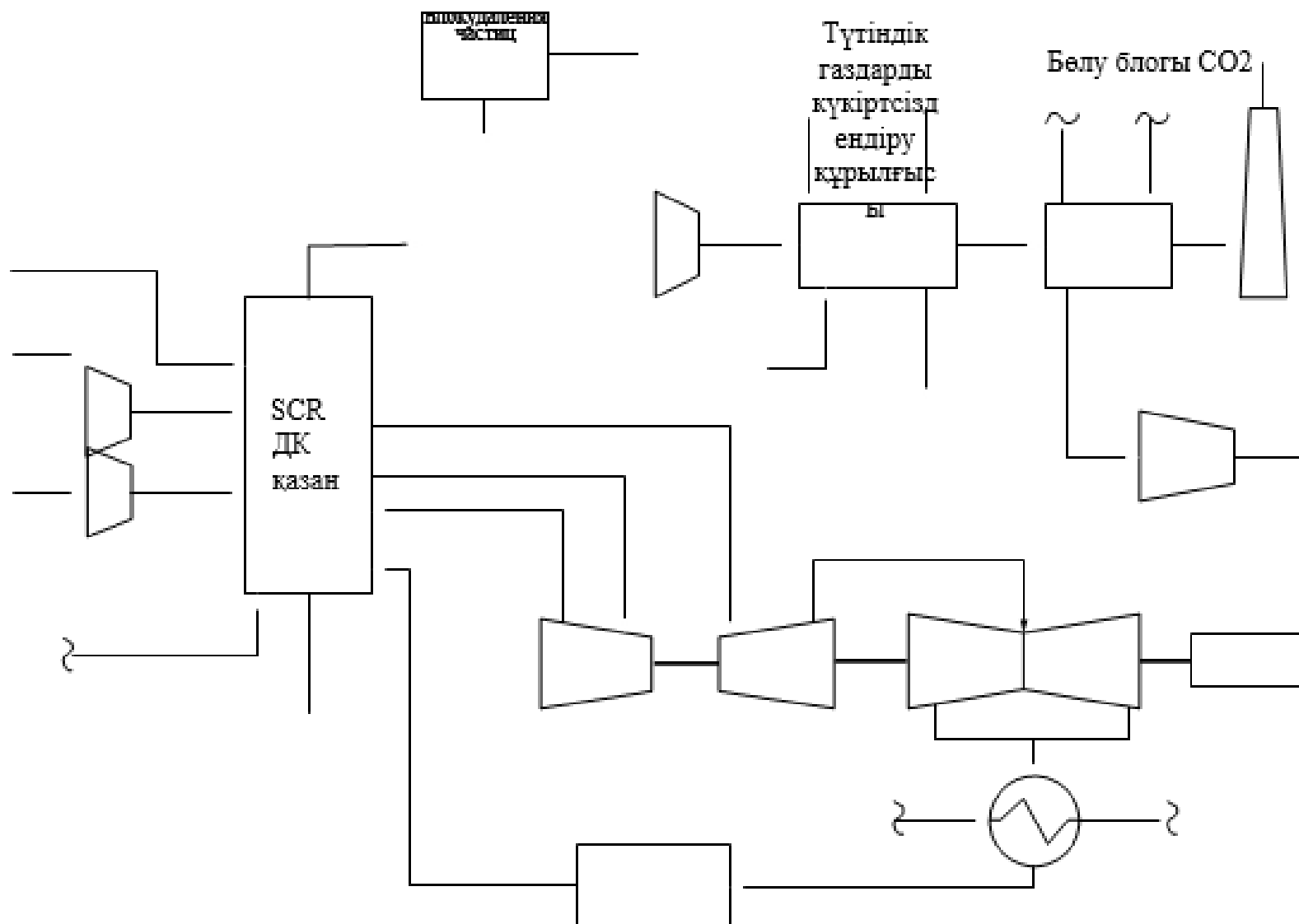
Шешім

Екі көмір үшін есептеме 8.2-кестесінде берілген. Құрамында Cl мөлшері аз лигнитке көшу түтіндік газдардан HCl жою үшін қосымша жабдықты қажет етпейді. Дегенмен қоңыр көмірге ауысу әсері мұқият зерттелуі керек, өйткені бұл жағдайда қазан үшін қажетті қосымша өзгерістер орын алады, сондай-ақ құрылғының жылу сипаттамаларына және шығу қуаттылығына әсері бар. Энергиялық тығыздылығы біршама аз болатын лигнитті тасымалдауға кететін шығындар да ескерілуі керек.

8.7.3 Көлемді қондырғыларға арналған шамадан тыс Ренкин бу циклының сипаттамасы

Төменде Ренкиннің шектен асқан үлкен бу циклының заманауи ірі көмір тозаңдық қазандықтың және орталық станция үшін жағудан кейінгі CO₂ тұтудың негізгі тараулары сипатталған (әдетте пайдалы қуаттылықтың > 500 MBt) (Black, 2010). Технологиялық үдерістің қарапайымданған жалпы блок-кестесі 8.13-суретте берілген.

8.7.3.1. Бойлер. Қазанның конструкциясына байланысты BFW және бойлер арқылы бу контурының әр түрлі кестесі болады, солардың бірі осы жерде берілген.



8.13-сурет. Ренкин циклы бойынша шектен асқан бумен орталық электр станциясы

Қоректік суды регенерациялық қыздырғыштарда деаэрациялау және алдын ала қыздырудан кейін BFW қазанның ішінде орналасқан қосымша экономайзерде қыздырылады. Содан кейін ол пеш мұржасының қабырғаларына түседі де, шектен асқан буға айналады. Шектен асқан қазанда бу-сулы сепаратордың (бу барабаны) қажет болмайтынына назар аударыңыз және BFW бойлер арқылы бір рет ағып өтеді (ал шектен аз қазан жағдайында BFW бу барабанына енеді, ол жерден BFW өз фазасын өзгерте отырып, қазанның құбырлары бойынша таралады және бу буланбаған BFW бірге екі фазаға бөліну үшін бу барабанына қайта оралады). Содан кейін бу конвекциялық өткелде орналасқан бастапқы бу ысытқышқа түседі, оның артынан су шығынын реттеудің бірінші сатысы, одан кейін пештің жоғарғы секциясында орналасқан, құбырлардың жалпақ панельдерінен тұратын, буды қатты қыздырғыш орналасқан. Бұл ретте жоғары температураның ықпалына түсетін газдар жылу алмасу көбінесе, сәулелену есебінен жүзеге асырылатындай жағдайда болады. Содан кейін бу басқарудың екінші сатысы арқылы өтеді, одан әрі аралық температуралық қатты қыздырғышқа түседі, соңында соңғы қатты қыздырғыш болады. Турбинаның жоғары температуралық секциясынан қайта оралатын бу, бастапқы қыздырғыштан өтеді, одан кейін көлденең құбыр желісінде сатылы аралық қызмет көрсету жүзеге асырылады, бұл ретте бу қыздырғыштың соңғы құтыларына беріледі, содан кейін турбинаның аралық қысым секциясына шығады. Қатты қыздыру және қайтадан қыздыру барысында сатылы аралық қызмет көрсету жүктеменің өзгеруі кезінде температураны бақылауды жүзеге асыру үшін қолданылады. Экономайзерден шығатын, шығарылған газ әдетте регенерациялық үлгідегі қыздырғыш ретінде есептелетін жағуға арналған ауа қыздырғышына түседі және бұл қыздырғышта жылу ыстық түтіндік газдан жылуды шоғырландыратын ортаға, содан кейін жағуға арналған ауаға беріледі, бұл – Юнгстормның ротациялық қыздырғышы болып табылатын қыздырудың кең тараған түрі. Сонымен қатар қайтарымдық ауа қыздырғыштары қолданылады, оларда жылуды жылу алмастырғыштың құбырлары арқылы ыстық түтіндік газдан жағуға арналған ауаға тікелей беру жүзеге асырылады. Түтіндік газдар бұдан әрі NOx бақылау үшін SCR блогына түседі, одан кейін РМ бақылау үшін, жеңдік сүзгі қызметі орындалады. Сонан соң түтіндік газ төменгі ДДГ арқылы ағу үшін қажетті қысымды қамтамасыз ету мақсатында тартпа желдеткішіне түседі. Соңында түтіндік газ ауа үрлегіштің энергия тұтынуын азайту үшін, сумен тікелей байланыста суытылады, бұл үдерістің арқасында түтіндік газ түтін мұржасына түсер алдында, CO₂ абсорбері мен жуатын бағана арқылы өтіп шығуы үшін қажетті қысым қамтамасыз етіледі.

Жылу берілім бойынша қызметтердің әрқайсысы үшін металлургия есептік температураға/қысымға және шығарылатын газбен / күлмен де, BFW / бумен де қатысты әрбір қызмет тап болатын, қоршаған ортаның коррозиялық табиғатына байланысты ерекшеленетін болады.

8.7.3.2. Бу турбинасы. Бу турбинасы жоғары қысым секциясынан, орта қысым секциясынан және төменгі қысым конденсациясының екі секцияларынан тұрады, төменгі қысымның сатысы қалақшасының ұзындығын, меншікті көлемін және бу ағынының жоғары болып табылатын жалпы жылдамдығын шектеу үшін, олардың әрқайсысының екі ағыны бар (яғни, бу турбинаның будың екі ағынымен «тығыздалып» салынған, бір бірінен туындайтын және қарама-қарсы беттерінен шығатын екі секциясы арасында бөлінеді).

Қысыммен жеке қаптамаға салынған әрбір секция (жоғары қысым, аралық қысым және төменгі қысым) сутекті суытқышы бар генератордағы ортақ білікте орнатылған. Генератор статорының орамдары тұйық сумен қамту жүйесінің көмегімен суытылады: ол судың айналмалы сорғыларын және жылу алмастырғыштарды (түтікқорапты немесе пластинкалы түрлі) іске қосады.

Турбинаның мойынтіректері кері байланысты сулы суытқышы бар қысыммен май жүйесімен майланады.

Жылуды тұйық жүйелерден қоршаған ортаға бұру тәсілі нақты пайдаланылатын жылу бұру жүйесіне байланысты, ол туралы осы тарауда талқыланады. Турбиналық біліктер ауа немесе бу шығып кетпеу үшін («атылу» болмау үшін), төменгі қысымды тығыздағыш бу жүйесімен біріктірілген шытырман тығыздаманың көмегімен бітеуленіп жабылған. Жоғары қысымды қатты қыздырылған бу қазаннан турбинаның жоғары қысымды секциясына 24,1 МПа / 593°C (3500 фунт / ш. дюйм / 1100°F) жағдайында, ал қыздырылған бу қазаннан турбинаның орта қысымды секциясына 593°C (1100°F) жағдайда келіп түседі. Аралық қысым

секциясы арқылы өткеннен кейін бу айқыш құбырға келіп түседі, ол жерде бу төменгі қысымның екі секциясына беріледі, одан кейін олар вакууммен беттік конденсаторға шығады, бұл ретте бұл теріс қысым суытушы ортаның конденсаторында қолданылатын температурамен реттеледі.

Жылуды беттік конденсатордан және құрылғының басқа секцияларынан бұрудың көптеген тәсілдері бар, олар сол жердегі шарттарға және экономикалық параметрлеріне байланысты, және бұл туралы 7-тарауда талқыланады. Градирнялар (5-тарауда массаға және жылуберілімге қатысты ұсынылған) градирняларды толықтыруға арналған ауыз суы ретінде қолжетімді болатын жерлерде пайдаланылады. Градирня арқылы ауа ағыны механикалық құралдардың көмегімен (желдеткіштердің көмегімен) туындайды немесе табиғи айналыммен жүзеге асады. Табиғи тарту күшімен градирнялармен салыстырғанда, механикалық тарту күшімен мұнаралардың капиталдық шығындары аз болады, бірақ керісінше электр қуаттылығына талаптары (желдеткіштің жұмысы үшін) өте жоғары болады. Қондырғы үлкен көлемді суға жақын орналастырылса, көп жағдайда бір реттік салқындату қолданылады, алайда, егер су тұзды немесе теңіз суы болса, онда жылу алмастырғыштар үшін жарамды материалдарды, мысалы, титан сияқты материалды таңдау қажет. Ауамен салқындату жүйесі бар жылу алмастырғыштар құрғақ жерлерде қолданылады, алайда оларда құрылғының бірінші заңының тиімділігі төмендейді, өйткені беттік конденсатордың жұмыс қысымы салқындатушы ортаның (бұл жағдайда ауаның) одан жоғары температурасы салдарынан және ауаның жылуберілім коэффициентінің төмендігін теңелту мақсатында (салқындатушы сумен салыстырғанда) конденсатордың ішінде жоғары температураның қажеттілігіне байланысты арттырылуы керек.

Қоршаған ортаның ISO жағдайында, құрғақ колбаның температурасы 15°C және салыстырмалы ылғалдылығы 60% болған жағдайда жұмыс істейтін салқындататын су ылғалды градирнялармен берілген кезде, салқындатушы суды берудің сәйкес температурасы бар болғаны 15°C құрауы мүмкін (ылғалды колба температурасының ISO жақындау температурасы $\sim 4^{\circ}\text{C}$ болған кезде, яғни, ылғалды колбаның температурасынан $\sim 4^{\circ}\text{C}$ жоғары). Салқындататын судың температурасының шамамен 11°C орынды көтерілуін және беттік конденсатордың жарамды $5-6^{\circ}\text{C}$ қысу температурасын қолдай отырып, беттік конденсатордың сәйкес жұмыс қысымы 4,8 кПа сияқты өте төмен болуы мүмкін.

BFW бу циклына толықтыру минералсыздандырылған судан тұрады, өйткені бу жоғары қысымда түрленеді. Минералсыздандыру бастапқы картриджтік сүзгіден, оның артындағы кері осмостың мембраналық түйінінен (RO), және соңында, электрлік ионсыздандыру блогынан тұрады, бұл блокта ерітілген қалған иондарды бөліп шығару үшін электрлік ұяшық пайдаланылады. RO блоктарынан шығарылатын, жартылай тазартылған су анод (оң электрод) және катод (теріс электрод) және иондық селективті мембраналар арасынан өтеді, олар оң иондарға теріс электродтар бағытында көшуге мүмкіндік береді, ал теріс иондар оң электродтар бағытында, осының нәтижесінде аса таза ионсыздандырылған суда көшеді.

BFW бұл толықтырылуы аса қажет, өйткені, судың/будың бір бөлігі бу турбинасынан ағып шығады, сонымен қатар будың біраз бөлігі суды төмендегі жабдықтар үшін жегі ететін O_2 және CO_2 сияқты ерітілген газдарды жою үшін пайдаланылатын деаэратордан шығады.

Сонымен қатар BFW үдерісінде O_2 химиялық бейтараптандырғыш бүркіледі, ол сондай-ақ металдың пассиваторы бола алады. Сіңіретін химиялық заттектері ретінде гидразинді (алайда ол канцерогендік сипатына байланысты алынбайды), гидрохинонды, диэтилгидроксиламинді, метилэтилкетоксимді, карбогидразидті және эриторбина қышқылын атауға болады. Ауасыздандырғыш та регенерациялық қыздырғыш ретінде жұмыс жасайды, ол ерітілген газдарды жоятын жою үдерісіне қосымша буды тікелей BFW алдын ала қыздыру үшін пайдаланылады.

8.8 ЖАНУ РЕАКЦИЯСЫ АРҚЫЛЫ ЭНЕРГИЯ АЛУ ҮДЕРІСІ КЕЗІНДЕ ӨСІМДІК БИОМАССАСЫН ҚОЛДАНУ

Өсімдік биомассасын энергияны өндіруде пайдалануды ынталандыратын негізгі ынталандырушы құрамы бойынша CO_2 жақын, тұрақты таратылатын немесе қалдықтар мен

шығындар түрінде шығарылатын биомасса нейтралитеті болып табылады. Құрамында жоғары көлемде көмір сияқты, көміртегі бар қазбалы отынға біздің тәуелділігімізді азайту үшін, бұл ресурстар өте үлкен ауқымда болуы керек. Ренкиннің бу циклын қолдану негізінде жағу үдерісі қазіргі кезде биомассалар негізінде энергетикалық қондырғылар үшін қолжетімді аса жетілдірілген технология болып табылады, және оның тиімділігінің, қалдықтардың және құнының өсуі осы ресурсты қолдануға ықпал етеді.

8.8.1 Берілетін отын құрамының сипаттамасы

Өсімдіктерден алынатын биомасса қарапайым қазба отындарынан физикалық құрылымы, химиялық құрылымы бойынша ерекшеленеді және ол жинау кезінде «тірі» болатындықтан, су тіршілік үшін өте қажет жасушалық құрылымдар мен оның беттерінде болатындықтан, ылғалдылығы жоғары болады. Ылғалдылық құрамы түріне, орналасқан жеріне, жыл мерзіміне және табиғи деңгейлермен айналым тәжірибесіне байланысты 30%-дан 65%-дан аса диапазонда түрленеді. Сонымен, 1.6-кестеде ұсынылған мәліметтерге сәйкес, тіпті аса жоғары дәрежелі көмірлермен салыстырғанда да, биомассаның ылғалдылығы өте жоғары болуы мүмкін. Биомасса 60%-ға дейінгі ылғалдылықпен жана алатын болса да, әсіресе тиімділікті қамтамасыз ету мақсатында жүйенің химиялық энергиясының орнына, жылу энергиясының төменірек температурасын пайдаланып, отынды алдын-ала кептіріп алу шараларын жасау керек, химиялық энергияны қолданғанда, ылғалды биомасса тікелей кептірусіз жандырылады. Лигниттің көмегімен буды сығу сынақтары биомассаға қатысты қолданыла алады. Кептіру операциясы буландырылған су буын сығудан және кейіннен оның жасырын жылуын кептіру үшін жылуды қамтамасыз ету мақсатында пайдаланудан тұрады (Schippers, 2010). Буды сығу үдерісі электр энергиясын тұтынуды арттырады, алайда жүйенің жалпы пайдалы тиімділігі жоғары болуы мүмкін. Сығылған булардың жасырын жылуының сапасы көтеріледі және пайдалы болып келеді. Бұл сығылған бу жалған сұйықталған қабатты кептіргіштердің ішінде орналасқан жылу алмастырғыш түтікшелерге беріледі, және олар кептіру үшін жылуды қамтамасыз етеді. «Жылу сорғысынан» тұратын, кептірудің бұл технологиялық түрі бу компрессорында әлдеқайда сапалы механикалық энергияны пайдалану арқылы буландырылған су буларындағы жылу энергиясының сапасын арттырады. Бұл жүйеден шығатын энергияның жалпы сапасы жүйеге енгізілетін энергия сапасынан төмен болу шартында, 2-тарауда талқыланған термодинамиканың екінші заңымен негізделетініне назар аударыңыз.

Өсімдік тектес биомассада «ұшпа заттектерінің» құрамы жоғары: сүрек құрылымынан салыстырмалы төмен шамамен 260°C немесе 500°F температурада қыздыру барысында бөлініп шығарылатын құрғақ сүреkte – 70-80% (баланс негізінде «белгіленген мөлшерде көміртект» немесе «жартылай кок» кішігірім күл мөлшерімен).

Құрамында ұшпа заттектері мөлшерінің жоғары болуына байланысты, сақтау кезінде құрғақ биомассаның өзінен-өзі тұтануы орын алуы мүмкін, және бункерлерде немесе сақтау бункерлерінде инертті газ жүйесі қажет болуы мүмкін. Қазбалы отынмен салыстырғандағы биомассаның тағы да бір ерекшелік сипаттамасы оның энергиялық төмен тығыздылығы болып табылады (өңделмеген биомассада тіпті төмен), бұл ерекшелігі биомассаны аса үлкен қашықтықтарға тасымалдауды шамадан тыс қымбат етеді, және осы шикізаттағы өсімдіктің ресурсқа жақын (<50 миль) орналасуын талап етеді.

Өсімдік биомассасы күлінің құрамына кіретін К сияқты сілтілер күлдің балку температурасын төмендетеді, бұл жағдай қазандардағы жылу алмастырғыш құбырларының қоқыстануына және ластануына әкеледі. Көптеген көмірлермен салыстырғанда, кейбір өсімдік биомассаларының құрамдарында хлоридтердің әлдеқайда жоғары шоғырлануы болады, олар қазандардағы жылу алмастырғыш құбырларда коррозиялық шөгінділерді қалыптастырады. Көмірлерге қарағанда қатты биомассалардың борпылдақ жұмсақтығы төменірек болады, алайда биомассаны кептіру арқылы оның үгілмелік жұмсақтығын арттыруға және ұсақтау қуаттылығына талабын азайтуға болады. Энергияның күйрегіштігін де, тығыздылығын да арттыруды зерттеуге арналған амалдар торрефация (Tumuluru et al., 2011) деп аталады, оған O₂ болмаған кезде биомасса ыдырау температурасына дейін қыздырылатын жұмсақ пиролиз үдерісі кіреді, бұл үдерісте биомассаны қыздыру барысында ұшпа заттектерінің бір бөлігі жойылады және көмір біршама жұмсақ болып қалады. Бұл амалдық кемшілігі – құрамында гудрондар мен майлар бар газ, газды қысуға және

пайдалануға болатынға дейін өндіріледі және олардың жойылуын талап етеді, бұл ретте гудрондармен және майлармен, олар жанбаса, мысалы, оларды жеке өңдеу деген сияқты шараларды жүзеге асыра алмайды.

Биомассалардың көбінде көмірлерге қарағанда, S және Hg құрамы энергияның бір бірлігіне төменірек болады, және осының салдарынан SOx немесе Hg тұту мақсатында қолданылатын, бір реттік үдерістер нәтижесінде пайда болатын қалдықтарды қайтадан кәдеге жарату үшін төлем қажет болмайды. Ауыл шаруашылық биомассасының құрамында K мөлшері жоғары болады, осының салдарынан қатты бөлшектердің жоғары мөлшерде шығарылуы, күл коррозиясы мен шөгінділерінің күшеюі орын алады. Қатты тұрмыстық қалдықтармен, ағаш қалдықтарымен және сүректермен жұмыс істейтін қазандықтар ауыр металдар және хлордың қосындысы, оның ішінде диоксиндер мен фурандар сияқты уландырғыш ластаушылармен күресу мақсатында, түтіндік газдардардан тиімді тазалау жүйелерімен жобалануы керек.

Отын ретінде биомассаның есептелетін шығындарының компоненттері жинау әдістері болып табылады, бұл ормандық қалдықтарды жинау шығыны аса ірі қаражат жұмсалудардың бірі болып табылады, ал ауыл шаруашылық қалдықтары үшін жеткізу құнынан 20-25% құрауы мүмкін. Сонымен қатар тасымалдау және сақтаумен байланысты шығындарын ескеру қажет, олар жиналған жерлерінде немесе пайдаланылатын жерлерінде сақталуы мүмкін.

8.8.2 Биомасса қазандықтары

Биомасса сипаттамаларының орасан зор түр алуандығына байланысты қазандардың да бірқатар құрылымдары болады, және олардың ішінде жиі қолданылатыны – темір торлары бар және қайнау қабаты бар қазандар, олар көмірді жағуға арналған қазандарға ұқсас болады. Негізінде, жеткіліксіз берілу жүйелері кішігірім жүйелерге және тамызықтар немесе жоңқалар сияқты аз күлді отындарға арналған, олар күлді шығаруда мәселелер тудырады.

Көпіршікті жалған сұйықталған қабаттар әдетте, 10 МВтт асатын қолданулар үшін, ал айналмалы жалған сұйықтықты қабаттар ірілеу қолданыстар (> 30 МВтт) үшін көбірек жарамды болады.

8.8.3 Көмір қазандықтарында биомассаны қоса өртеу

Энергияның (және бөлінген ресурстың) төмен тығыздылығы салдарынан әр түрлі жерлерден жинақталған биомассаны орталық станцияға үлкен арақашықтыққа тасымалдау оны экономикалық тұрғыдан тиімсіз етеді.

Сонымен, биомассамен жұмыс істейтін электр станциясының бастапқы шикізатқа тікелей жақын орналасқаны дұрыс, бірақ бұл құрылғының көлемін шектеуі мүмкін, және ірі құрылғының көлемі есебінен туындайтын экономия меншікті капиталдық шығындарды азайтуға пайдаланыла алмайды. Нұсқалардың бірі биомасса көзінің жанында орналасқан, орталық станция түріндегі электр станцияларында биомассаны көмірмен өтеу болып табылады. Ауыл шаруашылық биомассасын көмірмен бірлесе жағудың артықшылығы – биомассаның бұл ресурсының маусымдық қолжетімділігі оны пайдалану үшін негізгі кедергі болмайды; көмір мен биомассаның әр түрлі пропорцияларын жағуға есептелген қондырғыны құру жолымен, биомасса ресурстарының қоры төмен болған кезеңдерде көмірді қондырғыға беру жылдамдығын ұлғайту арқылы қондырғының қуаттылығын пайдалануды барынша көбейтуге болады (шикізаттың екі түрі үшін өңдеу жүйесінің азығы тиісті көлемде болған жағдайда).

Биомассаның, мысалы, шөптік, сондай-ақ ағаштық түрлері (қалдықтар және энергетикалық дақылдар) сияқты, әр түрлі түрлерін көмірдің (қоңыр, субитумды, битумды), сонымен қатар мұнай коксының әр түрлі түрлерімен бірге жағу өнеркәсіптік масштабта тангенциалды қараусыз, қабырғалық және циклондық қазандар сияқты әр түрлі қазан түрлерінде көрсетілді.

Биомассаны жағуға байланысты техникалық мәселелер энергия тығыздылығының әр түрлілігіне, көмірмен салыстырғанда күлдің сипаттамалары мен нәзіктігіне байланысты болады және коммерциялық пайдалану мақсатындағы жабдықтарды жобалау барысында

мұқият ескерілуі керек. Биомассаның жылу шығару қабілеті де, көлемдік тығыздылығы да, көмірге қарағанда біршама төмен болатындықтан, биомассамен жұмыс істейтін қондырғылар үшін тиеу, сақтау және орнында отынмен жұмыс істеу жүйелері қажет және олар көмірмен салыстырғанда, салыстырмалы жылу салымының негізінде үйлесімсіз жоғары болады. Биомассаны байлау (бөлшектерінің көлемін кішірейту) өте сынғыш және талшықты өнімнің алынуына әкеледі, және іс жүзінде көмірдің бөлшектері сияқты, оның көлемі немесе пішінін өзгерту мүмкін болмайды. Биомассаның бөлшектері тым ірі және үлкен пропорциялы болып келеді, және бұл қасиеті отынның қазанға пневматикалық берілуіне кедергісін келтіреді. Ірі және асфериялық бөлшектер сондай-ақ жағу тиімділігіне кері әсерін тигізуі мүмкін. Ағаш қалдықтарының көптеген түрлері салыстырмалы түрде шағын шөгінділер қалыптастырады, алайда, шөптік материалдардың күлінің шөгу жылдамдығы жоғары болады әрі ол едәуір озбыр, белсенді түрде болуы мүмкін. Сілтілердің (калий тұздарының) және хлоридтердің сумен сілтіленуі күлмен байланысты осы мәселені азайтады, алайда бұдан кейін осы тұздарды шығару үшін суды тазарту қажет, бұл үдеріс су шығынын толықтырудан және түсіруден, сондай-ақ кез келген үрлемелі суды ақпа судан ықшамдайтынын көрсетеді.

Жүйе экологиялық талаптарға сәйкес өңделуі керек. Сонымен қатар кептіру жүктемесі ұлғайып, осы сілтілену үдерісінен өңделген биомасса сумен қанығады.

8.8.4 Қалдықтар құрамы

Әдетте көптеген биомассаларда күкірт құрамының аз болуына байланысты SOx мәселе тудырмайды. Биомассаларда әдетінше көмірге қарағанда ылғалдың көп болуына байланысты, тіпті кептіруден кейін де, оттың ең жоғарғы температурасы төмен болуы мүмкін, бұл NOx жылу құрылымының азаюына әкеледі. Ағаштық биомассада сондай-ақ отынның NOx азайтатын көп көмірлерге қарағанда азоттың құрамы да төменірек болады.

8.3-мысал. 1.4-кестеде көрсетілген отындық сипаттамамен лигниттік отындағы қазандық (FGD жоқ) 1.6-кестеде көрсетілген сипаттамаларымен ағаш биомассасын жағу үшін қайта өңделеді. Отынды ауыстыру салдарынан жанып кеткен HHV негізінде күлде ешқандай күкірт қалмаған жағдайдағы Sox қалдықтарының қысқартылуын есептеңіз.

8.3-кесте. Sox биомасса және қоңыр көмір қалдықтары

Шикізат	Лигниттің ағаш биоқоймалжыңы	
Күкірт, салмақтық үлесі	0.0002	0.0063
Жылу шығару қабілеті, HHV (кДж / кг)	9813	15,391
S молекулалық салмағы	32.07	
Шикізаттағы S құрамы (к моль / 103 МДж)	0.000636	0.012766
Шығарылған (қалдық) SOx (к моль / 103 МДж)	0.000636	0.012766
Sox азаюы (%)	95.02	

Шешім

Шикізаттың екі түрі үшін есептеулер 8.3-кестеде берілген. Құрамында күкірті аз биомассаға көшу Sox қалдықтарының шығарылымын біршама азайтады.

Алайда биомассаға көшу әсері мұқият тексерілуі керек, қазан үшін талап етілетін өзгерістерді, сондай-ақ жылу сипаттамаларына және құрылғының шығу қуаттылығына әсерін ескеру қажет. Сонымен қатар таратылған ресурстар болуы мүмкін және орталық нысан үшін энергиялық тығыздылығы төмен биомассаны жинаумен және тасымалдаумен байланысты шығындар да ескерілуі тиіс.

8.9 ҚАТТЫ ТҰРМЫСТЫҚ ҚАЛДЫҚТАРДЫҢ (ҚТҚ) ЖАҒУ РЕАКЦИЯСЫ АРҚЫЛЫ ЭНЕРГИЯ АЛУ ҮДЕРІСІНДЕ ҚОЛДАНЫЛУЫ

Қатты тұрмыстық қалдықтар (ҚТҚ) отын ретінде минималды қайта өңдеумен тікелей жағыла алады, бұл жаппай жағу болып есептеледі, немесе қалдықтардан алынған (RDF) отын

ретінде пайдалану үшін, тікелей жағу алдында ҚТҚ алдын ала өңдеуден өткізіледі. Бұл технологиялардың екеуі де, электр энергиясын өндіру мүмкіндігін тудырады, және ҚТҚ көму немесе қордалау арқылы жоюдың баламалы таңдауы болып табылады. Отынның көптеген басқа түрлеріне қарағанда, ҚТҚ құны әлдеқайда төмен, ол қоқыс жинайтын жерде қоқысты жоюдың құнымен салыстырмалы.

ҚТҚ тым әртектілік және иістілік сипаттамаларына байланысты, ҚТҚ энергиясын жою бойынша қондырғыдағы азықты қабылдау және өңдеу жүйелері, мысалы, көмір энергетикалық қондырғымен салыстырғанда, біршама ерекшеленеді. ҚТҚ тасымалдайтын жүк көліктері қоқысты шұңқырларға қаттап жинайды, ал крандар қоқысты араластырып, арасындағы, мысалы, ірі құрал-аспаптар сияқты барлық ебедейсіз үлкен немесе кесек, жанбайтын заттарды алып тастайды. Қоқысты жинайтын ғимараттар иістің таралуын болдырмау үшін, вакууммен қуатталады.

8.9.1 ҚТҚ кәдеге жаратушы қазандар (жойғыштар)

Қалдықтар крандардың көмегімен қазандардың тиеу бункерлеріне тиеледі, және бұған арналған қазандар, әдетте торлы жүйелерден тұрады. Айналмалы пештер, бірнеше пештерден тұратын пештер және жалған сұйықтықты қабаттары бар пештер сияқты, жағу камераларының басқа түрлері де қарастырылады немесе қолданылады, бірақ шектеулі деңгейде. Осы тапсырыста қарастырылатын стокер торының бір түрі төмен еңкейтілген және кезектесетін бірнеше қатарлы қозғалмайтын және қозғалатын торлары бар тордан тұрады.

Торлар қалдықтардың төменге қарай қалыпты қозғалысына қарсы жоғары көтеріледі. Осы арқылы жанып жатқан қалдықтар үзіліссіз араластырылып, жағу үшін жаңадан берілетін қалдықтарға төменгі от ретінде қызмет атқару үшін, кейінге ығыстырылады. Мәжбүрлі тарту күші бар желдеткіш жану үшін тордың астына бастапқы ауаны жібереді, ал от арқылы келетін ауа пештің алдыңғы және артқы қабырғалары арқылы бүркіліп шашыратылады. Жанудың газ тектес өнімдері қазан арқылы өтсе, қалдығының күлі баяулап тордың шетіне бағытталады, ол жерде күл сумен суарылу үшін, астаушаға түсіріледі.

8.9.2 Қалдықтар құрамын қадағалау

ҚТҚ жағу жүйелерінің құрылымына SO_x, NO_x, ТЧ және Hg бақылайтын көмір қондырғысына ұқсайтын, ауаның ластануын бақылау жабдығы кіреді, алайда хлоридтерді, фурандарды және диоксиндерді жоюға арналған түрлендірілген немесе жетілдірілген қосымша жабдық қажет.

8.9.2.1 Құрғақ тазарту үдерісі. Әктастық қалдықты түтіндік газға бүркуден тұратын FGD құрғақ үдерісі (PM басқару қондырғысынан ағынмен жоғары) SO_x тұтумен қоса, сондай-ақ сәйкес тұзды қалыптастыру арқылы HCl тұтады. Нәтижесінде шығарылатын ҚБ төменгі жеңмен сүзіліп ұсталады; шығарылған Hg 95% белсендірілген көмірді енгізу жолымен алынады, сонымен қатар белсендірілген көмір диоксиндер мен фурандардың біршамасын алып қала алады. Бұл жағдайларда PM құрамын бақылаудың қолайлы құрылғысы жеңдік сүзгі болып табылады, өйткені FGD сорбентінен және белсендірілген көмірдің қаптардың бетіндегі жинақталуынан тұратын брикет, ластаушы заттарды жою үшін қосымша уақытты қамтамасыз етеді. Бақыланатын 1100°C аса температурада жоғары температуралық жану үдерісі пештегі диоксиндердің маңызды бөлігін жоюы мүмкін. NO_x шығарылуы жануды басқару құралдарының көмегімен ықшамданады, және NO_x қалдықтары SNCR көмегімен қосымша азайтылады. Бұның орнына NO_x қалпына келтіру үшін SCR пайдалануға болады, ол тотықтыру катализаторымен бірлесіп, диоксиндерді де, фурандарды да түтіндік газдардағы қолжетімді O₂-мен каталитикалық реакция жолымен бір мезетте қатар жоя алады (Finocchioetal., 2006). Сонымен қатар диоксиндерді жою үшін арнайы катализаторлар әзірленіп жатыр (Liljelindetal., 2001), оларды SCR қолданылмаған кезде қолдануға болады.

Ұсынылған бір технологиялық тұжырымдамада диоксиндерді жою үшін, мата сүзгінің әрбір бөлігінің үстіне жүздік каталитикалық модульдерді қосу ұсынылады.

Жартылай жанатын өнімдер болып табылатын, CO, CH₄ және басқа органикалық қосындылардың болуы, жағу жүйесінің дұрыс құрылымының арқасында азайтыла алады.

8.9.2.2 Ылғалды тазарту үдерісі. Түтіндік газдарды ылғалды тазарту қышқылды компоненттерді, металдарды және диоксиндерді жою үшін қолданыла алады. Түтіндік газ жылуды рекуперациялаудан (қайтарудан) кейін жеңдік камераға келіп түседі, ол жерде ең алдымен бөлшектерден тазартылады, содан кейін сумен жуу арқылы HCl тазартылады, және HCl-мен қаныққан су HCl қалпына келтіру үшін немесе оны бейтараптандыру үшін қосымша өңделеді. Sox әктасты суспензиямен жуу арқылы жойылады. HCl сияқты, гипс те (БФГ-нансульфиттер мен бисульфиттердің тотығуынан пайда болатын) шығарылған көлем мөлшеріне байланысты тауарлық ілеспе өнімдер болуы мүмкін.

ADIOX® (Anderssonetal., 2003) технологиясы ылғалды FGD сияқты, ылғалды скрубберлерде және HCl тазарту үдерістерінде пайдаланылатын қаптау материалын дайындайды, олар полипропиленнен және қоспалы көміртекті бөлшектерден тұратын полимерлік материалдан жасалады.

Диоксиндерге ұқсастығы бар көміртек бөлшектері, оны абсорбция/адсорбция, яғни сіңіріп алу арқылы қайтарымсыз жойып жібереді.

Жану үдерісінен қалған қатты қалдықтар – бұл жағу камерасының түбінде жиналып қалған күл қалдығы және түтіндік газдармен бірге шығатын ұшпа күл. FGD үдерісі барысында пайда болатын құрамдастырылған күл мен қосымша қатты бөлшектер әдетте, қондырғыға берілген қоқыстың шыққан массасы бойынша 20-25% құрайды, және құрамы тығыздау болады, бұл қоқыс жинайтын жерлерде оны көміп тастау қажеттілігін біршама төмендетеді. Алайда күлдің бұл қалдығының қауіпті материал немесе қауіпсіз материал қатарына жатқызылуы ҚТҚ құрамына байланысты болады, және, егер ол қауіпті болса, осындай қалдықтарға арналған арнайы полигондарда орналастырылуы тиіс.

Цементті қатайту көмірдің ұшпа күлін жою үшін қолданылады, бірақ сілтілік металдардың диоксиндермен/және хлоридтер құрамында болатын хлор қосындысының жоғары шоғырлануы байланысты, ол ҚТҚ алынған ұшпа күл үшін қолданыла алмайды. Қауіпті қалдықтарды тудыратын ҚТҚ-дың жағу көздерінің жүйесіне түсуін болдырмау ең дұрыс амал болып табылады. Күлді сілтісіздендіру және қауіпсіз ету үшін оны өңдеу (мысалы, әйнектеу жолымен) әлі зерттеуді қажет етеді. Егер қалдық қауіпсіз болса, ол қоқыс төгетін жерді жабу құралы ретінде пайдалану үшін немесе, мүмкін, жаяу жолды толтыру құралы ретінде сатылатын болса, ол топырақпен араластырылады.

8.9.2.3 Өңделген отын. RDF әдетте түйіршіктелген немесе ұсақталған («мамық») ҚТҚ тұрады әрі қара металдарды, әйнекті, құмды және басқа ҚТҚ жанбайтын материалдарын бөліп алу сияқты, ресурсты қалпына келтіру операциясының жанама өнімі болып табылады. Қалған материал бұдан кейін RDF ретінде сатылады және әдетте RDF қайта өңдеу құрылғысында, RDF жағу құрылғысы да, бір біріне тікелей жақын орналастырылады, бұл осы отынның тасымалдануының салыстырмалы түрде аз энергиямен жүзеге асырылуын қамтамасыз етеді.

8.10 ТӨМЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫ ЦИКЛДАР

Көптеген ескі химиялық технологиялық қондырғылардың жылуы төмен температуралы «өңделген» жылу болады, ол жай ғана қоршаған ортаға жіберіледі. Энергия тасымалдаушылардың бүгінгі күндегі құны мен экологиялық мәселелерді ескергенде, жіберілетін бұл жылу энергиясының температурасы мен мөлшеріне байланысты осы ресурсты пайдалана отырып электр энергиясын түрлендіру экономикалық тұрғыдан тиімді болады.

Тіпті жаңа қондырғылардың өзінде, тағы да сол жылу энергиясының температурасы мен мөлшеріне байланысты, электр энергиясын өндіру үшін оны қалпына келтіру экономикалық тиімді болуы мүмкін, өйткені жылуды бұру үшін де жабдық қажет және ол тегін болмайды. Тұрақтылығы жағынан қарастырсақ та, өңделген жылуды кәдеге жарату экологиялық тұрғыдан таза электр өндіру мүмкіндігін береді (табиғи ресурстарды сақтай отырып, атмосфераға қалдықтарды шығаруға, оның ішінде жылыжайлық газдармен және жылумен ластануға қатысты).

8.10.1 Ренкиннің органикалық циклы (РОЦ)

Сумен салыстырғанда төмен қайнау температуралы органикалық сұйықтық Ренкиннің циклдарында жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланылады және ол төмен температуралы жылу көздерінен энергия өндіру үшін қолданылады. Бұндай сұйықтықтарда сұйықтықтан буға ауысу фазаларының өзгеруі осы температурадағы судың қысымынан біршама артық болатын қысымдар барысында жүзеге асырылады, бұл жағдай ықшамдау жабдықты (турбина, жылу алмастырғыштар, құбыр желілері және клапандар) пайдалануға мүмкіндік береді, сонымен қатар осы жабдыққа байланысты қысымның айырмалары үшін кеңістікті қамтамасыз етеді.

Сондай-ақ, турбинаның конструкциясы да дұрыс изоэнтропикалық тиімділікті қамтамасыз ету үшін кеңейтудің көптеген кезеңдерін талап етпей-ақ оңтайландырылады, әдетте органикалық қосындыларда орын алатын (көп жағдайда көмірсутектері мен хладагенттер пайдаланылады) аса жоғары молекулалық массамен сұйықтық (H_2O салыстырғанда) пайдаланылған кезде кішігірім қосымшалармен жұмыста ескеру қажет.

Осылайша, Ренкиннің органикалық циклы (ORC) тек төмен температуралы жылу қолданыстары үшін ғана емес, сонымен қатар шағын биомассалар, геотермальді және күн тоғандары үшін де пайдалы болады.

8.10.1.1. Жұмыс сұйықтығын таңдау. Жұмыс сұйықтығы термодинамикалық жағынан ұтымды сипаттамаларына қосымша, сонымен бірге пайдалану барысында қауіпсіз (улылығы және тұтанғыштығы жағынан) және жайылып кеткен жағдайда озон қабатының жұқаруы себебінен және ғаламдық жылыну мүмкіндігі жағынан қоршаған ортаға жағымсыз әсері төмен болуы керек (Турбинаның тығыздалуы біліктен шығып кету қаупін болдырмауды немесе азайтуды қамтамасыз ететіндей жобалануы керек).

Басқа сипаттамаларына қатудың төмен температурасы, химиялық тұрақтылықтың жоғары температурасы, қымбат металлургия қажет болмайтындай, қарапайым көміртекті болатқа қатысты коррозиялық белсенділігі және қажетті ағын жылдамдығы, жабдықтың көлемі және сорғының қуатының тұтынылуы барлығы азаятындай, буланудың жасырын жылулығының жоғарылығы жатады.

Қағида бойынша, ORC турбинаға келіп түсетін жұмыс сұйықтығының минималды қатты қыздырылуымен әзірленген (егер ондай жағдай орын алса), өйткені оны термодинамикалық жағынан дәлелдеу үшін жылу көздерінің температуралық кең диапазоны жоқ не болмаса, құны мен қарапайымдылығы жағынан алсақ, жылу алмастырғыштың басқа жылуын қосу үшін – жылу көздері тым кіші. Дегенмен турбина қалақшаларының эрозиясын болдырмау үшін, турбинаның ұлғаюы кезінде екі фазалық облысына түсіп қалуын болдырмау тиімді. Көп жағдайда жоғарғы шегі турбинаның кіреберістегі қысымы үшін пилотсыз қондырғы үшін максималды жұмыс қысымы (экономикалық тұрғыдан тиімді болу мақсатында, шағын қондырғылар үшін пилотсыз қызмет қажет болуы мүмкін) сияқты өлшемшарттар негізінде орнатылады. Бұндай жағдайларда турбинаның берілген қысымының ара қатынасында турбинадан шығу температурасы, кіріс ағынын қыздырусыз-ақ жылуды бұру үшін қолданылатын температурадан әлдеқайда артық болуы мүмкін, бұл ретте шығу жылуын қалпына келтіретін регенерациялық жылытқыш ақталына алады.

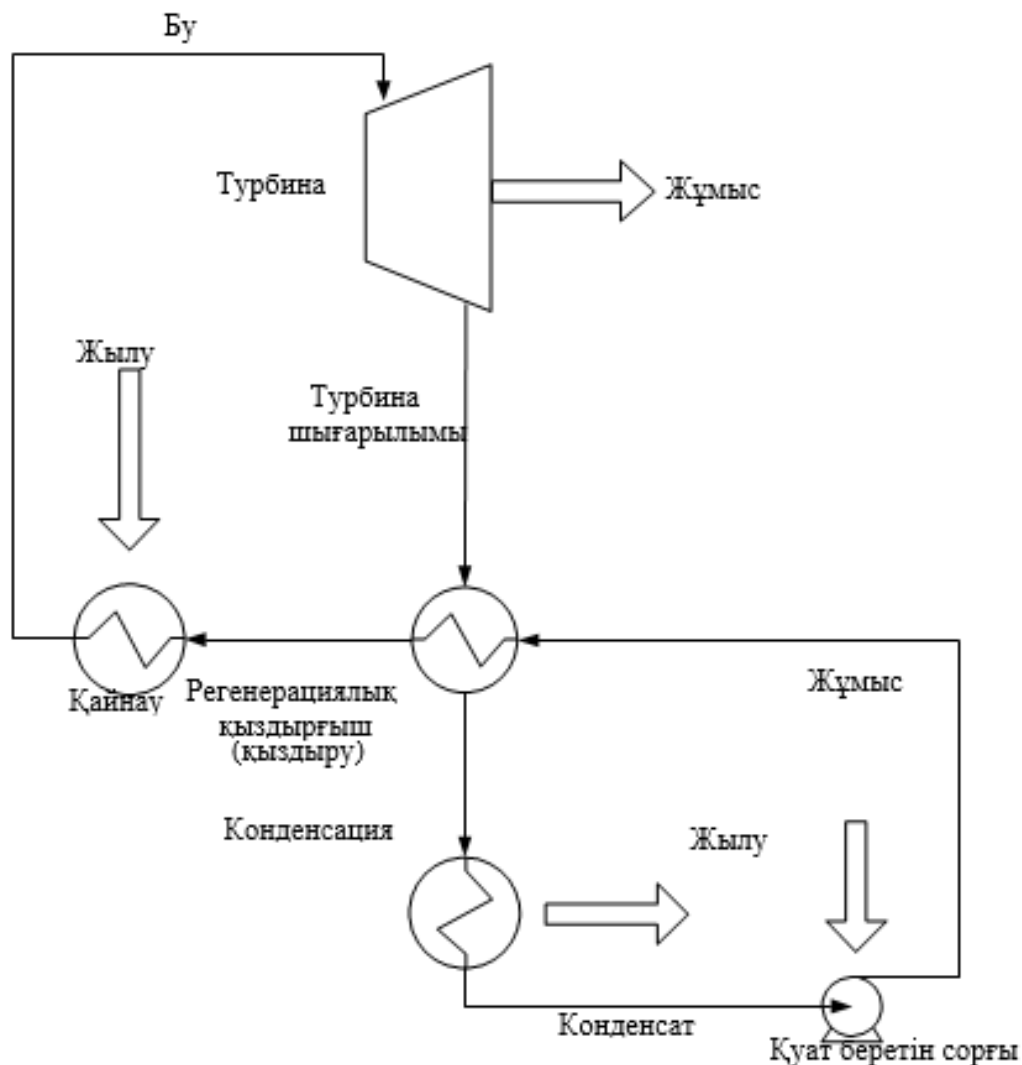
Бұл цикл 8.14-суретте көрсетілген: конденсатордан шығарылған сұйық органикалық сұйықтық турбинадан шығарылу алдында, буландырғышқа түсер алдында алдын ала қыздырылады.

Турбинадан кейінгі жабдықтың көлемін ықшамдату үшін, турбина шығысы қоршаған ортаның қысымынан жоғары тұратындай жағдайда циклдың шарттарын таңдау тиімді (турбинаға кірер алдындағы және қысымға қатысты шарттар).

Жылу көзінің температуралық диапазоны үлкен болған жағдайларда, Ренкиннің шектен асқан циклын немесе қосарланған (бинарлық) қоспаны пайдалануға болады, бұл ретте көпіршіктің температурасы құрамына байланысты өзгереді, бұл жағдай 12-тарауда геотермальдық энергия туралы бөлімде талқыланған.

Сайып келгенде, егер жылу көзінің температурасы түтікше қабырғаларының тым жоғары температурасын тудыратындай және органикалық сұйықтықтың ыдырауына әкелетіндей айтарлықтай жоғары болатын жағдайларда жұмыс сұйықтығы үшін термотұрақтылық қиындығы туындаса, жылу алмасуды немесе термиялық сұйықтықты

пайдалануға болады, бұл ретте жылу көзінің жылуы жылу тасығышқа беріледі, ол өз кезегінде жылуды жұмыс сұйықтығының төменірек температурасында екінші жылу алмастырғышқа өткізеді. Мұнай майларынан, сонымен қатар кремний негізіндегі синтетикалық сұйықтықтардан тұратын осындай әр түрлі сұйықтықтар коммерциялық тұрғыдан қолжетімді болып табылады.



8.14-сурет. Регенерациялық қыздырғыш арқылы жүретін РОЦ

ӘДЕБИЕТ

- Andersson S, Kreis S, Hunsinger H. Innovative material technology removes dioxins from flue gases. *Filt Sep* 2003;40(10):22-25.
- Black J. Cost and performance baseline for fossil energy plants, volume 1: Bituminous coal and natural gas to electricity. U.S. Department of Energy Report; 2010. Report nr. DOE/ NETL-2010/1397. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Chapel DG, Mariz CL, Ernest J. Recovery of CO₂ from flue gases: Commercial trends. Canadian Society of Chemical Engineers Annual Meeting; October 4-6, 1999; Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Finocchio E, Busca G, Notaro M. A review of catalytic processes for the destruction of PCDD and PCDF from waste gases. *Appl Catal B Environ* 2006;62(1):12-20.
- Keenan JH, Keyes FG, Hill PG, Moore JG. *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1969.
- Liljelind P, Unsworth J, Maaskant O, Marklund S. Removal of dioxins and related aromatic hydrocarbons from flue gas streams by adsorption and catalytic destruction. *Chemosphere* 2001;42(5):615-623.
- Pierce RR. Estimating acid dewpoints in stack gases. *Chem Eng* 1977;11:125-128.
- Schippers F. High efficiency with lignite—Experience with lignite drying at Niederaussem. Prepared by RWE Power, IEA Workshop; October 2010; Moscow, Russian Federation. p 25-27.
- Tumuluru JS, Sokhansanj S, Hess JR, Wright CT, Boardman RD. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Ind Biotechnol* 2011;7(5):384-401.

9

БРАЙТОН-РЕНКИН ҚҰРАМДАСТЫРЫЛҒАН ЦИКЛЫ БОЙЫНША ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ЖҮЙЕЛЕР

9.1 Құрамдастырылған цикл

Құрамдастырылған цикл жалпы өнімділікті алу үшін энергетикалық қондырғылардың екі циклын тізбектеп біріктіреді, олар құрамдастырылған циклды құрайтын екі циклдың пайдалы әрекет коэффициентін ішінара айтарлықтай арттырады. 9.1-суретте жүйелердегі энергия ағынының жеңілдетілген бір циклды (мысалы, аралық салқындату, аса қыздыру немесе рекуперациялау сатыларын, яғни қарапайым циклды қамтымайтын 6-тарауда сипатталған газ турбиналық қондырғының негізгі циклы) және жинақталған циклды сұлбалары көрсетілген. Осы сұлбада көрсетілгендей, бірінші заң бойынша өнімділігі 40% қарапайым цикл үшін, отын энергиясының 100 бірлігін беру кезінде электр энергиясының 40 бірлігі өндіріледі, бұл ретте электр энергиясына түрлендірілмеген (негізінен пайдаланылған газ арқылы) энергияның 60 бірлігі бөлінеді. Құрамдастырылған цикл бірінші заң бойынша өнімділігі 30% екінші немесе "кәдеге жарату" циклынан тұрады, өнімділігі 40% алдыңғы циклмен дәйекті біріктіріледі. Бұл қосымша 18 бірлік электр энергиясын береді, нәтижесінде осындай құрамдастырылған циклда бірінші заң бойынша жалпы өнімділік 58%-ға жетеді. Бұл талдауда генератордың шығындары, жылу және механикалық шығындар, сондай-ақ кәдеге жарату циклы үшін жылу рекуперациясына шығарындылар қысым ұлғайған кезде қондырма циклының өнімділігінің елеулі емес өзгерістері ескерілмегеніне назар аударыңыз. Брайтон циклы немесе газ турбинасы қондырма циклы үшін, ал Ренкин бу циклы – осы тарауда талқыланатын құрамдастырылған циклдардағы кәдеге жарату циклы үшін, бұл ретте қондырма циклы үшін пайдаланылады.



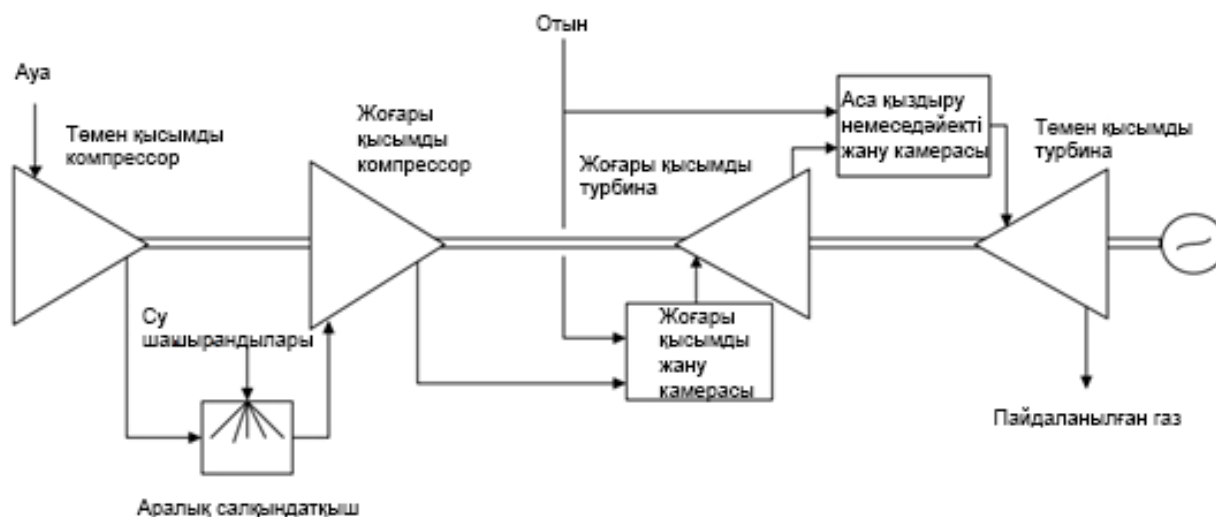
9.1-СУРЕТ. Қарапайым және құрамдастырылған циклдардағы энергия ағыны

Циклға поршеньді қозғалтқышты немесе 12-тарауда сипатталғандай отын элементін, ал кәдеге жарататын қозғалтқышқа Ренкин циклын жатқызуға болады, Ренкин циклында жұмыс сұйықтығы ретінде бу қолданылмайды немесе газ турбинасында қондырма циклы отын элементімен қамтамасыз етілсе, оны да осы циклға жатқызуға болады.

Құрамдастырылған циклдардың мөлшері қолданылатын газ турбиналарының мөлшері мен санына байланысты әр түрлі болады; құрамдастырылған циклдың өлшемдері 10 МВт-тан төмен 500 МВт-тан жоғары болуы мүмкін, мысалы, General Electric Н-сынып 50 бір циклды газ турбинасын пайдалану кезінде қолданылады.

9.1.1 Құрамдастырылған циклдар кезінде газтурбиналық циклды қолдану

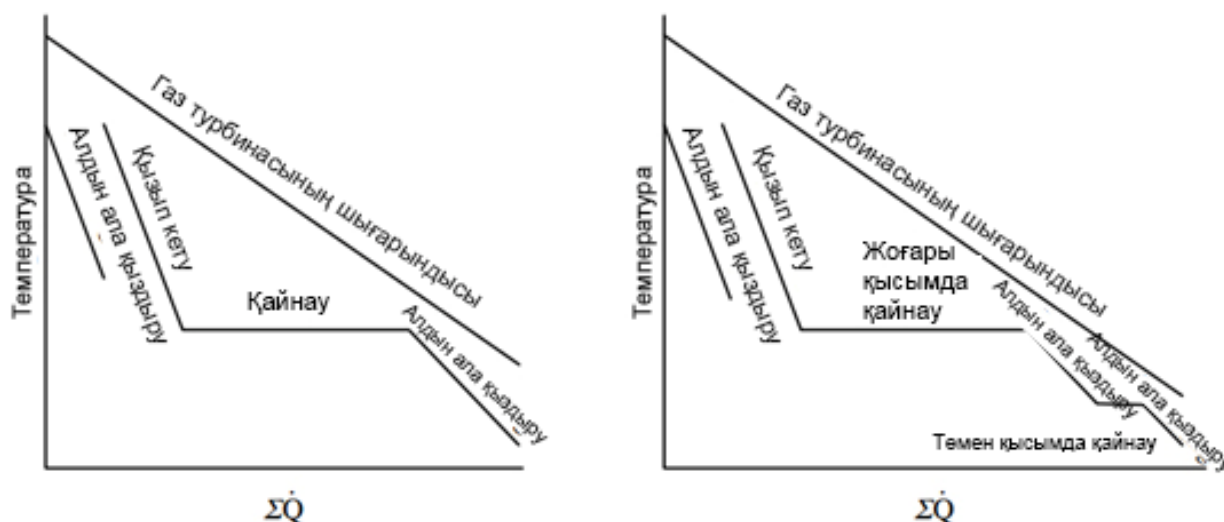
Құрамдастырылған циклды қолданғанда көбіне Брайтон циклының негізгі конфигурациясын немесе адиабатикалық қысудан және кеңейтуден, сондай-ақ іс жүзінде тұрақты қысым кезінде жану камерасына жылу жеткізуден тұратын қарапайым цикл қолданылады. Газ турбинасы қысымының оңтайлы коэффициенті бұл қолданыста қарапайым циклды газ турбинасының ең жоғары жылу ПӘК үшін талап етілетінге қарағанда әлдеқайда төмен. Брайтон циклының негізгі конфигурациясының бірқатар өзгерістері болуы мүмкін және барлық нұсқалардың арасында құрамдастырылған циклды неғұрлым пайдалы қолдану 6-тарауда сипатталғандай, екінші жану камерасы арқылы кеңейту сатысында аса қыздыруды қамтиды, сонымен қатар аралық суыту кейіннен тиімді қолданылуы мүмкін, өйткені аса қыздыру циклы газ турбинасындағы қысымның жалпы жоғары көрсеткіштері кезінде оңтайландырылады. Аса қыздыру не турбина кіре берісіндегі берілген температура үшін турбина циклының өнімділігін арттырады, не турбина кіре берісіндегі берілген жылу ПӘК үшін талап етілетін температураны төмендетеді. Аса қыздыру және шашырату арқылы аралық салқындату кезеңдері 9.2-суретте бейнеленген.



9.2-сурет. Газ турбинында аса қыздыру және шашырату арқылы аралық салқындату кезеңдері

9.1.2 Құрамдастырылған цикл кезінде бу циклын пайдалану

Қаныққан бу генерациясы да, бумен аса қыздыру да (ПЭК арттыру және пайдаланылған бу турбины шығарындысындағы ылғалдылық құрамын төмендету, сондай-ақ қалақтардың және шығару құбырының ылғалдылыққа байланысты тозуын азайту үшін пайдаланылатын үдерістер) газ турбинының шығарындысында бу турбинына берер алдында кеңейту үшін орындалады. Бұдың аса қызуын газ турбинының шығарынды температуралы жоғары қондырғылары үшін әдетте 550°C жоғары және қыздырғышқа түсетін жылу энергиясының едәуір бөлігін жұмысқа түрлендіру үшін жеткілікті тиімділікке ие ірі бу турбиналарында тиімді пайдалануға болады. Жылу мөлшері газ турбинының шығарындысынан рекуперацияланған, демек өндірілетін жұмыс жылу көзі арасындағы температураның ең аз айырмашылығының "секірісімен" шектеледі, бұл жағдайда қазандықты толтыру үшін (BFW) газ турбинының шығарындысы және жылуды бұру арасында. Температуралардың ең аз айырмасының есептік секірісі, әдетте қалпына келтірілген энергияның шамасына байланысты 5-10°C құрайды. Бұдың қысымын төмендету арқылы бұдың көп мөлшерін өндіруге болады, бірақ қалпына келтірілген жылудың термодинамикалық ПЭК-і төмендейді, сондықтан газ турбинының осы температурасы үшін тиімділікті максимумға жеткізетін оңтайлы қысым болады. Баламалы түрде жоғары қысымда жұмыс істейтін екінші бу генераторын қосады, ол көп жылуды рекуперациялауға және тиісінше көп жұмыс жүргізуге мүмкіндік береді. Жоғары қысымды қыздырылған бу да, төмен қысымды бу да (ылғалдың тамшылап кетуін болдырмау үшін аса қыздырылуы мүмкін) бір бу турбинына әрқайсысы тиісті кезеңде келіп түседі. Осылайша, газ турбинының шығарындысынан рекуперацияланған жылу циклының тиімділігі мен мөлшерін максималды мәндерге дейін жеткізу үшін бірнеше төмен қысымда бу алуға болады, бірақ екі немесе үш қысымда бу циклын қолданудың экономикалық негіздемесі газ турбинының шығарылу температурасына және қондырғы өлшеміне байланысты болады. Бүгінгі ірі заманауи құрамдастырылған циклдар үш түрлі қысымда бу генерациясының кезеңін қарастырады. Кестеге жалқы және қосарланған қысымның аса қыздыру-қыздыру бу циклдарына арналған екі жұмыс сұйықтығының T температурасына байланысты екі жұмыс сұйықтықтармен енгізілген екі сұйықтық ΣQ арасындағы жиынтық жылу алмасу кестелері 9.3-суретте көрсетілген. Төмен температура аймағында төмен қысымды бу генерациялауды қосу арқылы қосымша жылу рекуперацияланатынын көруге болады.



9.3-СУРЕТ: Жалқы және қосарланған қысымды бу циклдарына арналған ΣQ және T диаграммалары

9.3-суретте буландырғышқа оның қанығу температурасында келіп түсетін су көрсетілген, бұл идеализация болып табылады. Іс жүзінде экономайзер бұға сұйықтық фазасының кенеттен өзгеруін болдырмау үшін әдетте есептеу нүктесіндегі қанығу температурасынан $5-10^{\circ}\text{C}$ төмен болатын температураға дейін суды қыздыруға арналған. Өзгеру 8-тарауда сипатталғандай, бу барабаны мен экономайзер арасындағы BFW желісінде орналасқан қақпақты бақылау қысымның төмендеуінен болуы мүмкін,

Бұл сондай-ақ экономайзер ішінде, әсіресе ішінара жүктемемен жұмыс істеу, сондай-ақ іске қосу кезінде қайнауды болдырмауға мүмкіндік береді, өйткені "салқындау температурасы" (қанығу температурасы мен сұйықтықтың нақты температурасы арасындағы айырмашылық) азаяды. Алайда булы барабаннан буландырғыш ирек түтікке келіп түсетін BFW ирек түтік буландырғыштан шығатын будың бір бөлігін, бұл жылуды конденсациямен қамтамасыз ете отырып, қанығу температурасында деп есептеуге болады, себебі барабанға түсетін салқындатылған BFW осы температураға дейін қызады.

9.2. Табиғи газ агрегаттары

9.2.1. Көлемді құрылғылар үшін құрамдастырылған циклдың сипаттамасы

Бумен салқындатылатын тұйықталған контуры бар газ турбины (Смит, 2004) үш қысымдағы буды қыздыру циклымен ұштастыра отырып, 9.4-суретте технологиялық сызбанұсқа түрінде көрсетілген, бірақ әдетте технологиялық сұлбаларға енгізілетін жабдық туралы деректер берілмеген. Кейбір заманауи газ турбиналары турбинаның ыстық бөліктерін салқындату үшін буды салқындатудың осы түрін пайдаланады; бу төменгі циклдан (газ турбинының компрессорымен қамтамасыз етілетін ашық контурда өтетін ауаның орнына) беріледі. Ауадағы бөлшектерді жою үшін сүзгі арқылы өткеннен кейін, қоршаған ауа (әсіресе 10 мкм артық) газ турбинының ауа компрессорына түседі. Бұл газ турбины NO_x түзілуін азайту үшін алдын ала араластыру арқылы жанарғыларды пайдаланады. Газ турбинының ыстық шығарындылары жылу рекуперациясы бар бу генераторы арқылы өтеді (HRSG). Бу циклының есептік шарттары газ турбинының пайдаланылған газдарының температурасына және ағын жылдамдығына байланысты, ал төменде ұсынылған бу циклының шарттары Н-сыныпты газ турбины негізінде бу-газ аралас циклына тән.

Бу циклына BFW қоректендіру минералсызданған судан тұрады, себебі будың құрамдастырылған циклы бар үлкен қондырғыларда бу жоғары қысымда генерацияланады. Минералсыздандырығыш бір ыдыста ішкі регенерациясы бар катиондық және аниондық шайырлармен толтырылған аралас қабаты бар ион алмастырғыштардан тұрады. Жүйе әдетте екі блоктан тұрады, олардың біреуі жұмыс режимінде, ал екіншісі регенерацияға ұшырайды. Жүйе сондай-ақ қажетті химикаттар қоймасы мен бейтараптандыру бассейнін қамтиды. Шайырлар HCl немесе H_2SO_4 сияқты күшті қышқылды пайдаланып, катиондарға арналған сутегі иондарының көзі ретінде және аниондарға арналған гидроксильді иондардың көзі ретінде сұйық күйдіргіш NaOH арқылы регенерацияланады.

BFW қоректендіру әдетте тікелей беттік конденсаторға шашырайды. Бұл қоректендіру қажет, себебі бу барабандарындағы судың аз бөлігі қатты бөлшектердің жиналуын шектеу үшін үрленеді. Сондай-ақ будың аз бөлігі деаэратордан шығарылады, оның функциясы төменде сипатталған. Беттік конденсатор бу турбинасының төмен қысымының секциясынан шығатын буды конденсациялайды, бұл теріс қысым беттік конденсаторда пайдаланылатын салқындатқыш **ортаның температурасы арқылы беріледі**. 8-тарауда сипатталғандай, сол орындағы жағдай мен экономикалық параметрлерге байланысты беттік конденсатордан жылуды бұрудың бірнеше жолы бар. 5-тарауда ұсынылған градирнялар тұщы су берілмейтін жерде пайдаланылады, ал судың үлкен көлеміне жақын орналасқан қондырғылар үшін бір реттік суыту қарастырылуы мүмкін. Ауамен салқындатылатын беттік конденсаторлар құрғақ жерлерде пайдаланылуы тиіс, бірақ бүкіл қондырғының бірінші заңының тиімділігі беттік конденсатордың жоғары жұмыс қысымына байланысты төмендейді.

8-тарауда айтылғандай, ISO қоршаған орта жағдайында жұмыс істейтін дымқыл градирнялар пайдаланылған кезде беттік конденсатор үшін жұмыс қысымы салқындатқыш су температурасының шамамен 11°C қалыпты жоғарылауын ұстап тұру нәтижесінде тек 4,8 кПа құрауы мүмкін және беттік конденсатордағы қысымның қалыпты температурасы $5-6^{\circ}\text{C}$ болуы мүмкін. Конденсацияланған будың біріккен ағыны ("вакуумдық конденсат") және қоректендіру BFW беттік конденсатордың ұңғымасынан вакуумдық конденсатты сорғымен алынады әрі алдын ала HRSG ішінде орналасқан экономайзерде қызады. Содан кейін ол HRSG бөлігі болып табылатын екі функциялы "кірістірілген" деаэраторға беріледі және O_2 мен CO_2 сияқты ерітілген газдарды жояды, BFW-да коррозияны тудыруы мүмкін, сондай-ақ HRSG ішінде төмен қысымды бу генераторы ретінде жұмыс істейді, 460 кПа кезінде бу генерациясы жүреді. Сонымен қатар BFW-да металл коррозиясының ингибиторы болуы мүмкін оттегіні алып тастайтын химиялық зат шашырайды. 8-тарауда аталған кәдеге жарататын химиялық заттардың мысалдары гидразин (оның канцерогенді сипатынан шыққан), гидрохинон, диэтилгидроксиламин, метилэтилкетоксим, карбогидразид және эриторбин қышқылы¹⁸ болып табылады¹. Деаэраторға келіп түсетін BFW типтік температурасы әдетте еріген газдарды жою үшін будың жеткілікті мөлшерін қамтамасыз ету үшін деаэратор температурасынан жобамен $10-15^{\circ}\text{C}$ төмен ұсталады. Циклдың ПӘК көтеруден басқа, сондай-ақ будың тамшы конденсациясының алдын алатын, аса қыздырудан кейін кіріктірілген деаэраторда пайда болатын артық бу, бу турбинасының төменгі қысымы секциясына беріледі. Көп сатылы сорғы BFW деаэратордан аралық қысымды BFW ретінде де (сорғының аралық сатысында алынған) және жоғары қысымды BFW ретінде де беру үшін бұрады. Аралық қысымның BFW аралық қысымның экономайзері арқылы HRSG ішіне ағады, содан кейін шамамен 2850 кПа болғанда қаныққан буды алу үшін аралық қысым HRSG бу барабанына түседі. Осылайша генерацияланатын аралық қысым буы HRSG аралық температура секциясында аралық температураға дейін аса қызады, содан кейін бу турбинасының жоғары қысымды секциясынан шығатын бумен біріктіріліп, газ турбинасының шығарындылары температурасына байланысты шамамен 570°C дейін аса қатты қызады. Бұл ыстық бу турбинасының аралық қысым секциясына кері беріледі. HRSG-да 17 400 кПа қысымда генерацияланатын жоғары қысымды қаныққан бу тағыда сол газ турбинасының

¹⁸ Натрий сульфиті (Na_2SO_3) арзандау болып табылады және бу қысымы төмен (42 бар дейін) қазандықтарда пайдаланылады, бірақ түзілген сульфатқа жоғары қысымды қазандықтарда жол берілмейді, өйткені ол BFW-да ерітілген қатты заттардың құрамын арттырады.

шығарындылары температурасына байланысты шамамен 570°C дейін қызады және бу турбинасының жоғары қысымды секциясына беріледі. Жоғары қысымды буландырғыш үшін типтік есептік қысу температурасы 6-9°C құрайды.

Бу турбинасына түсетін аса қыздырылған және қыздырылған будың температурасын реттеу бу басты сорғымен берілетін BFW-мен тікелей байланысқа түсетін кондиционерлердің көмегімен жүзеге асырылады, нәтижесінде бу судың булануы есебінен салқындалады. Жоғары қысымды бу турбинасының пайдаланылған газдарының бір бөлігі жабық контурда салқындалу үшін газ турбинасына беріледі. Газ турбинасынан қайтарылатын бу, сондай-ақ HRSG-да қайта қыздыру алдында аралық қысымның буымен біріктіріледі. Аралық қысымды буландырғыш ирек түтік үшін қысудың типтік есептік температурасы да 6-9°C құрайды.

Жылытқыштың ирек құбырлары әдетте аса қыздырғыштың ирек құбырлары арасында араластырылады, өйткені бу турбинасына түсетін аса қызған, сондай-ақ қызған будың температурасы әдетте бірдей болады. Алдында айтылғандай, бу барабандары еріген қатты бөлшектердің жиналуын шектеу үшін үздіксіз үрленеді және үздіксіз үрлеу жоғары қысымды бу барабанынан орташа қысымды бу барабанына каскадпен жүзеге асырылады, ал орташа қысымды бу барабанынан үрлеу төмен қысымды бу алынатын барабанға жіберіледі. Осы соңғы барабаннан шығатын су төменгі қысымды екінші барабандағы қысымды түсіреді және осы қысымның төмендеуі (бу түзілуі) нәтижесінде алынған бу атмосфераға шығарылады.

Газ турбинасының газ шығаратын газдарында қатты бөлшектер жоқ болса да, HRSG қысымының неғұрлым жоғарыдан төмендеуі есебінен HRSG-да жоғары газ жылдамдығы жылу беруді арттыру үшін HRSG-да сақталуы мүмкін. Қысымның ауытқуы ұлғаюына қарай газ турбинасының өнімділігі мен тиімділігі азаяды және бұл тиімсіздік газ турбинасының шығарындыларының неғұрлым жоғары температурасында көрінеді. Құрамдастырылған циклдың жалпы тиімділігі мен HRSG өлшемі арасында оның құнында да қатысты ымырашылық бар; газ турбинасында пайдаланылатын газдар арқылы кететін осы қосымша жылудың бір бөлігі ғана бу циклына айналады. Үш реттік қайталап қыздырылатын HRSG әдетте сынап бағанасы 28 мм қысымының ауытқуына есептелген. Бұл мәндер түтін газдарына байланысты жылу шығынын қамтиды.

Төменгі циклдан шығатын буды ЖЭО агрегатына экспорттауға болады. Арналық немесе қосымша күйдіру бу өндірісін арттыру үшін пайдаланылуы мүмкін. Ол HRSG арқылы өтетін газ турбинасының шығарындысындағы O_2 пайдалану арқылы арна жанарғыларында отын газын жағудан тұрады. Жүйенің жалпы тиімділігінің төмендетуіне және шығарындылардың ұлғаюына, сондай-ақ газдың жоғары температурасынан құбырлар металлургиясына әсер етуіне назар аудару керек. Арналық жанарғылар буды аса қыздырғыш / қыздырғыш катушкаларынан ағын бойынша немесе HRSG ағынынан жоғары болуы мүмкін, яғни арнада күйдірудің елеулі дәрежесі қажет болған кезде температураның жоғарылауын шектеу үшін газды біраз салқындалу керек. Канал жанарғысындағы қысымның қосымша төмендеуін есепке ала отырып, газ турбинасының шығарынды газдарының мөлшерін арттыру өте төмен, шамамен сынап бағанасы 1 мм қысымының тефлонды жабыны бар түтікшелер сияқты қымбат тұратын құбыр материалдарын HRSG температурасы төмен секцияларында пайдалануды болдырмау үшін құбыр бетінің температурасы газ шығының қышқыл нүктесінен жоғары болуы тиіс. Шықтың шекті қышқылды нүктесі әдетте газ турбинасының жану камерасында (Ганапати, 1989) SO_3 (әдетте 1-5%) дейін отында болатын күкірттің тотығуы нәтижесінде пайда болатын күкірт қышқылымен (H_2SO_4), содан кейін қышқылдың түзілуіне қарай су буымен біріктірілетін SO_3 орнатылады. 8-тарауда сипатталғандай, қышқылдағы шық нүктесінің TD_P температурасын бағалау (К-да) 9.1 теңдеуін (Пирс, 1977) пайдалана отырып, әрбір i түрінің (H_2O және SO_3 жұптары) P_i (атмосферадағы) парциалды қысымы бойынша жасалуы мүмкін:

$$\frac{1000}{T_{DP}} = 1.7842 + 0.0269 \log P_{H_2O} - 0.1029 \log P_{SO_3} + 0.0329 \log P_{H_2O} \log P_{SO_3} \quad (9.1.)$$

Вакуумдық конденсат қыздырғыш катушкасының түтік бетінің температурасы табиғи газды жағу кезіндегі шықтың қышқыл нүктесінен төмен болуы мүмкін, ол күкірт қосылыстарының типтік мөлшерін қамтиды, бұл жағдайда қыздырылған конденсат катушкаға түсетін сұйықтықтың температурасын арттыру үшін рециркуляциялайды және осылайша құбыр бетінің

температурасы қышқыл конденсациясын болдырмауға мүмкіндік береді.

Егер газ турбинының жұмысы жұмыстан тыс бу циклында талап етілсе, газ турбинының шығарындысын айналып өту үшін тікелей түтін құбырына бұру демпферлері HRSG-дан ағын бойынша жоғары берілуі мүмкін. Бірақ мұндай сұлбаларды әдетте қолданбайды, өйткені бұру қақпағы арқылы ағу қиындық туғызады және қалыпты жұмыс кезінде бұл ағып кету ағыны жылуды рекуперациялау үшін қол жетімді болмайды. Бұдан басқа, бу циклында техникалық қызмет көрсетуді немесе жөндеуді орындау кезінде газ турбинының жұмысын жалғастыру үшін HRSG жағына ыстық газдың ағып кетуін болдырмау үшін екі демпфер арасында буферлік газды ұстап тұратын қосымша дәйекті қосылған демпфер талап етілуі мүмкін, бұл қауіпсіздік проблемасын білдіреді.

Бір қысымды HRSG газ турбины қосылған, бірақ бірнеше тізбектей қосылған механизмдердің бірнеше осындай агрегаттары (кейде төрт газ турбиналары/ HRSG дейін) бір бу турбинымен біріктірілуі мүмкін. Осы құрылғыдағы әрбір турбомашинада өзінің жеке электр генераторы бар, ал газ турбиналарының кейбір "бір білікті" етіп жасалған үлгілерінде газ және бу турбиналары бір генератормен қосылған жалпы білікке орнатылған. Алайда мұндай жағдайларда газ турбиналары сияқты сонша бу турбиналары талап етіледі.

9.1-мысал. 7.1-мысал үшін 1 атм жалпы қысымда түтін газы үшін H_2SO_4 шық нүктесін есептеңіз. В қондырғысы, құрамдастырылған цикл үшін отын 1/100 стандартты фут 3 (0,0242 г / Нм³) күкірттен табиғи газ болғанын және отындағы 5% күкірт SO_3 -ке айналатынын болжай отырып. Түтін газдарының шығыны мен құрамы 555 МВт пайдалы шығу қуатына және 6466 кДж / кВтс (LHV) жылу қуатына сәйкес келеді. Табиғи газдағы түтін газы мен отын молекулаларының массасы 28,38 және 17,33 құрайды, ал LHV табиғи газ 47,454 кДж / кг құрайды.

Шешуі:

7.1-мысалынан түтін газдарының шығыны = 3, 230, 636 28 38 = 113, 823 кмольс

Табиғи газдың шығыны = 555 МВт × 1000 кВт, МВт × 6, 466 кДж, кВтс 47, 454 кДж

кг × 17 33 кг кмоль × 22 14 Нм³ кмоль = 96, 613 Нм³ сағ.

Түтін газдарындағы SO_3 = 0 05 × 0 0242 г Нм³ × кг 1000 г 32 06 кг, кмоль × 96, 613 Нм³ сағ = 0 00365 кмоль сағ.

$$P_{\text{SO}_3} = \frac{0,00365 \text{ кмоль/с}}{113,823 \text{ кмоль/с}} \times 1 \text{ атм} = 0,03203 \times 10^{-6} \text{ атм}$$

$P_{\text{H}_2\text{O}} = 0 0867 \times 1 \text{ атм} = 0 0867 \text{ атм}$ (7.1-мысалда көрсетілген H_2O үшін молярлық пайызды қандай да бір реттеу қажеттілігісіз, түтін газындағы күкірт қосылыстарының өте төмен концентрациясына байланысты).

Содан кейін 9.1 теңдеуіне екі алдыңғы парциалды қысымды қоя отырып, $T_{\text{DP}} = 359 \text{ K}$ немесе 85°C .

9.2.2. NOx жойылуы

Қазіргі уақытта табиғи газда қолдану үшін NOx шығарындысы төмен құрғақ жану камералары ұсынылады, ол отынның ауамен алдын ала араластырылуынан және жалын температурасын төмендету үшін аздаған жағдайларда оны жағудан тұрады және осылайша құрғақ негізде көлемі бойынша небары 9 с/млн құрайды және түтін газдарында O_2 құрамының 15% (моль) дейін "түзетілген" кейбір қозғалтқыштар үшін кепілдік беріледі. Сонымен қатар Құрама Штаттардың бірқатар аудандарында 2 с/млн аспайтын мәндер талап етіледі, бұл қоршаған ортаға шығарындының неғұрлым қатаң нормаларына байланысты. Селективті каталитикалық қалпына келтіру блогы (ИКВ) қазіргі уақытта шығарындыларға қойылатын қатаң талаптарға қол жеткізу үшін қажет. Әдетте су түрінде және сақтауы оңай NH_3 , қарапайым N_2 және H_2O тұзумен NOx-мен өзара әрекеттесу үшін HRSG ішінде орналасқан ИКВ алдында шашыратылады. ИКВ-ға қысым түсуін көтеру үшін газ турбинының қысымын көтеріледі, бірақ аралас циклдың жалпы өнімділігіне әсері өте аз, себебі қысымның типтік ауытқуы тек 4-5 мм сынап бағанасын құрайды. HRSG-да ванадий пентаоксидінің (3% V_2O_5 белсенді материал ретінде) негізінде катализатордың негізінде ИКВ

үшін оңтайлы орналасуы әдетте 300-400°C температуралық аймақта орналасады.

ИКВ арқылы сырғитын кез келген реакцияға түспеген NH_3 қоршаған ортаға қауіп төндіруі мүмкін, сондықтан қазіргі уақытта NH_3 қарапайым N_2 және H_2O және N_2 дейін тотығуына арнап, HRSG-ға ИКВ-дан төмен ағын бойымен орнату үшін тотығу катализаторлары әзірленуде. Мұндай блоктар үшін талап етілетін қысымның қосымша ауытқуы ИКВ төмендеуіне ұқсас болады деп күтілуде.

9.2.3. СО және ұшпа органикалық қосылыстардың жойылуы

Әдетте платина тобының металдары бар тотығу катализаторлары СО-ның, ұшатын органикалық қосылыстардың (ҰОҚ), формальдегидтің және басқа да уытты қосылыстардың 90%-дан астам бұзылуын қамтамасыз ете алады және ИКВ сияқты HRSG-да орналастырылуы мүмкін. Конверсия жылдамдығы температурамен артады және осы катализаторды HRSG кірісіне жақын орналастыру тиімді. Катализатордың қызмет ету мерзімі әдетте үздіксіз жұмыс істеу жағдайында 10 жылдан артық болуы мүмкін. Бұл асыл металл негізіндегі катализатор және оның жұмыс сипаттамаларын қолдап отыру үшін мерзімді түрде жуу қажет болуы мүмкін. Жұмыс істеп болған катализатор әдетте бағалы металдардың құндылығы үшін өңделеді. Қысымның типтік ауытқуы тек 3 мм сынап бағана, сондықтан құрамдастырылған циклдың жалпы өнімділігіне әсері өте аз.

9.2.4. СО₂ қалдықтарының құрамын қадағалау

Құрамдастырылған циклды газ турбиналы қондырғыларда СО₂ ұстап қалу үшін, қолжетімді екі негізгі нұсқа бар: күйдіру және жануға дейін ұстап қалу. СО₂ жаққаннан кейін ұстап қалу кезінде ол атмосфераға кіргенге дейін түтін газдарынан ұсталады, ал СО₂ жаққанға дейін ұстап қалу кезінде газ турбинысында жану алдында отыннан алынады. СО₂ бөліп алу осы шығарындыны бақылау қадамдардың бірі ғана, және оны ұстап қалу ол үшін "үй" табуды және 1-тарауда көрсетілгендей, геологиялық қысқартуды талап етеді, сондай-ақ оны көмір қабатынан метан алу үшін пайдалану зерттелуде, әзірге байытылған мұнайда коммерциялық пайдалану, қалпына келтіру бірнеше жыл бойы іс жүзінде қолданылуда. Қолданылатын қысқарту әдісіне және секвестрлеу орны мен электр станциясы арасындағы қашықтыққа байланысты 11-15 МПа диапазонындағы қысымға дейін ұстап алынған СО₂ қысу әдетте қондырғы алаңында талап етіледі.

9.2.4.1. Камера алдындағы жануды бақылау. Табиғи газ сияқты табиғи отын негізінен H_2 және СО жанғыш заттары бар синтетикалық газды қалыптастыру үшін. каталитикалық реформаланады (Ni негізіндегі катализатордың қатысуымен) бумен реакциясы бойынша $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2 + \text{CO}$, немесе ішінара O_2 , $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = 2\text{H}_2 + \text{CO}$ реакциясы арқылы ауаны пайдаланумен тотығады (күйе түзілуін азайту үшін су буының қатысуымен). Риформинг қондырғылары 10-тарауда толығырақ талқыланады. Сосын синтетикалық газ жылу біршама салқындағаннан/регенерациялаудан және бу қосылғаннан кейін, су газының ығысу реакциясы бойынша H_2 құрай отырып, СО-ны СО₂-ге түрлендіру үшін, егер қажет болса каталитикалық жылжиды: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$. Екі реактор арасындағы аралық салқындатумен біртіндеп қосылған екі адиабатикалық реакторлардан тұратын жиынтық осы экзотермиялық реакцияның конверсиясын ұлғайту үшін пайдаланылуы мүмкін. Бірінші реактор мысты қосып, Fe-Cr құрамы сияқты катализаторды пайдалана отырып, неғұрлым жоғары температурада жұмыс істей алады (өйткені конвертацияланатын СО-дан жылу көп мөлшерде бөлінеді). Екінші реактор неғұрлым төмен температурада (бұл термодинамикалық тепе-теңдік тұрғысынан неғұрлым жоғары конверсияға ықпал етеді) Cu негізіндегі неғұрлым белсенді катализаторды пайдалана отырып жұмыс істей алады. Ауыстырып қосу реакторлары да 10-тарауда толығырақ талқыланады. Реактордан шығатын ағын салқындағаннан кейін, жылуды қалпына келтіру кезінде және салқындатқыш суды пайдалана отырып, қоршаған орта температурасына жақын температураға дейін салқындаудың соңғы сатысынан кейін СО₂ бөлу үшін синтетикалық газды абсорбер бағанасында лайықты еріткішпен байланыстарды және СО₂ салынған еріткіш жоғары таза СО₂ ағынын шығару үшін буды пайдалана отырып, буланған бағанада қалпына келтіріледі, ал еріткіш екі баған арасында айналады. Әдетте 85-90% СО₂ абсорбердегі ерітіндіге сіңеді,

ал CO_2 бөлінетін қысым қолданылатын еріткіштің түріне байланысты болады. Полиэтиленгликольдің диметил эфирлерінің қоспалары сияқты физикалық еріткіштер әдетте 4 МПа асатын синтетикалық газдың жоғары қысымына жарамды, ал амин ерітінділері сияқты химиялық еріткіштер синтетикалық газдың төмен қысымына сай келеді. Қазіргі уақытта CO_2 және CO қалдық мөлшерлері бар негізінен H_2 (немесе ауаны пайдалана отырып отынның ішінара тотығуы жағдайында H_2 және N_2 қоспасы) болып табылатын абсорберден шығатын синтетикалық газ көмірсіз отын түрінде қол жетімді және атмосфераға CO_2 шығарындылары азайған газ турбиналарына жағылуы мүмкін Рао мен басқ., 2000). Газдағы CO_2 парциалды қысымы (декарбонизация алдындағы синтетикалық газ) жанғаннан кейін ұстап қалумен салыстырғанда көміртекті ұстап алумен байланысты энергетикалық залалды төмендету мүмкіндігі бар түтін газдарына қарағанда едәуір жоғары. Декарбонизацияланған синтетикалық газдағы H_2 құрамының жоғарылығы, әсіресе отын риформингінің опциясын пайдалану кезінде оны NOx түзілуін шектеу үшін алдын ала араластыра отырып, заманауи есептік өртеу арқылы газ турбиналарында пайдалануға мүмкіндік бермейді, өйткені өздігінен тұтану және кері тұтану негізгі проблемалар болып табылады. Мұндай жағдайларда "диффузиялық" типті жағуды пайдалану кезінде NOx түзілуін шектеу үшін, су буы сияқты термиялық сұйылтқышты қосу талап етіледі. Су буы отын газының ағынына не бу түрінде енгізілуі мүмкін, не төмен температуралы қалдық жылуды алу кезінде тұманға қарсы колоннада отын газының ыстық сумен тікелей байланысы арқылы сол жерде пайда болады. Екінші әдіс зауытта төмен температуралы жылудың едәуір мөлшері болған кезде анағұрлым тартымды. Қанша сұйылтқышты қосу мүмкіндігінің жоғарғы шегі CO шығарындыларын шектеу кезінде тұрақты жануға қол жеткізуге қатысты жану камерасының конструкциясымен ғана емес, сондай-ақ газ турбинасы компрессорының помпаж қорымен де шектеледі. Табиғи газбен жұмыс істеуге арналған газ турбинасы қысымының қатынасы табиғи газға қарағанда әлдеқайда аз жылу шығару қабілеті бар отын газын жағу кезінде артады, себебі турбинаның секциясына түсетін газ ағынының жылдамдығы отынмен байланысты энергияның осындай мөлшерін бір мезгілде енгізгенде ұлғаяды¹⁹. Қысым коэффициентінің ұлғаюы қосылған сұйылтқыштың мөлшері мен сипатына және газ турбинасы компрессорының іске қосу тесігінің бағыттаушы қалақшаларының жабылатын дәрежесіне байланысты болады. Осылайша, компрессорда қол жетімді помпаж бойынша қор қосылуы мүмкін сұйылтқыштың мөлшерін шектеуі мүмкін және NOx шығарындыларының нәтижелік қысқаруын шектеуі мүмкін. Компрессордан ауаны шығару қозғалтқышқа қысым қатынасын ұлғайтуды шектеу үшін, ішінара тотығу сұлбасы жағдайында пайдаланылуы мүмкін, өйткені ішінара тотығу үшін қайта зарядтаудан, жылуды рекуперациялаудан және бустер компрессиясынан кейін пайдаланылған ауаны тиімді пайдалануға болады. Алайда жойылуы мүмкін ауа мөлшері суыту үшін жану камерасы арқылы өту үшін қажетті ең аз ауамен шектеледі. Осы шектеулерге байланысты бір сұйылтқышты пайдалану NOx шығарындыларын 2 ppm-де (құрғақ массаға көлемі бойынша, 15% O_2) қатаң талаптарды қанағаттандыру үшін жеткілікті дәрежеде төмендете алмайды және диффузиялық типті қазіргі заманғы жанарғылар үшін әлі де SCR қажет.

Турбина секциясы арқылы өтетін жұмыс сұйықтығындағы су буының, әсіресе риформинг опциясы бар құрамы газ турбинасында табиғи газды жағу кезіндегімен салыстырғанда синтетикалық газды жағу кезінде айтарлықтай жоғары болады.

Турбинаны күйдірудің төменгі температурасы сұйықтықтың әр түрлі азротермиялық сипаттамаларына және термобарьерлік жабындардың тозуына, сондай-ақ болашақ заманауи газ турбиналарында пайдаланылуы мүмкін кез келген керамикаға байланысты болатын ыстық газ жолының температурасын шектеу үшін қажет болуы мүмкін (керамика су буының жартылай құрамына сезімтал, жоғары температура кезіндегі орта қысымы). Қозғалтқыш қысымының ұлғаюынан туындайтын салқындатқыш ауаның неғұрлым жоғары температуралары, сондай-ақ төмен күйдіру температурасын анықтау кезінде ескерілуі тиіс. Алайда сумен салқындатылатын газ турбиналарында күйдіру температурасының талап етілетін төмендеуі едәуір аз болуы мүмкін, өйткені турбинаны салқындату үшін пайдаланылатын бу температурасы, егер газ турбинасының төмен қысымын ауамен салқындататын сатылар шектемейтін болса, газ турбинасы қысымының қатынасына

¹⁹ "Жабық ағын" шарты ($M = 1$ саны) турбинаның бірінші сатысының шүмегінде басым болады

қарамастан ұстап тұрылуы мүмкін.

Қондырғының тиімділігі мен құны CO_2 жану алдында ұстап қалу кезінде айтарлықтай төмендейді. Табиғи газ тікелей газ турбиналарында жағылатын CO_2 ұсталмайтын қондырғымен салыстырғанда алдыңғыдан қыздыру жылдамдығының 30 пайыздан астамын және қондырғының меншікті құнының екі еседен астамын күтуге болады (АҚШ долл. / кВт) (Rhudy, 2005). 11-тарауда сипатталған H_2 бөлуге арналған жоғары температуралы мембраналар әзірлеу сатысында (Roarketal., 2003) және өнімділікпен, бәлкім, риформинг нұсқасының құнын біршама жақсартуды қамтамасыз етуі тиіс.

9.2.4.2. Отынды жаққаннан кейінгі бақылау. Жанғаннан кейін табиғи газ сияқты қазбалы отын алдымен газ турбинасында жағылады, ал жану үдерісінде пайда болатын CO_2 8-тарауда сипатталғандай (Chapeletal., 1999), патенттелген қоспалары бар МЭА су ерітіндісі сияқты аминді еріткіші бар коммерциялық тексерілген үдерістерді пайдалана отырып, ұстау үшін пайдаланылған HRSG газынан бөлінеді. Қазандық қондырғысының түтін газын ұстауымен салыстырғанда негізгі айырмашылығы газ турбинасынан алынған түтін газы үшін CO_2 концентрациясының едәуір төмендігі болып табылады, 10%-дан асатын көлемге қарсы шамамен 3%, мұның өзінде газ турбинасынан алынған түтін газындағы O_2 концентрациясы едәуір жоғары (газ турбинасында ауаның үлкен артық көлемі турбинаға түсетін жұмыс сұйықтығының температурасын төмендету үшін қолданылады). Бұдан басқа көмір сияқты "лас отыннан" шыққан түтін газында CO_2 ұстайтын еріткішпен өзара іс-қимыл жасау кезінде жағымсыз қосылыстар құрайтын микроэлементтер көп болуы мүмкін, оның үстіне олардың шоғырлануы кіре берісте қабылданған ластануға қарсы күрес жөніндегі шаралар дәрежесіне байланысты. CO_2 бөлу үдерісі екі баған арасында еріткіштің айналуымен жүретін абсорбер/десорбер жүйесінен тұрады (5.2-суретте көрсетілгендей). HRSG шығарындысы, алдымен, қысымның ауытқуын азайту үшін үстіңгі жылу алмастырғышта емес, сумен тікелей байланыста салқындатылады, содан кейін қысымның әр түрлі шығындарын жеңу үшін айдағышта айдалады, содан кейін ол MEA ерітіндісімен байланысқа түседі және абсорберге беріледі, онда CO_2 -нің 85-90% ерітіндімен сіңірілуі мүмкін. CO_2 жүктелген қаныққан еріткіш атмосфераға жақын қысым жағдайында тазалығы жоғары CO_2 ағынын алу үшін буды пайдалану арқылы буланған колоннада регенерацияланады. Жанудан кейін ұстап қалуға қатысты бұл тәсілдің артықшылығы – ол HRSG кейін қосылатын жабдықты қоспағанда, негізгі құрамдастырылған циклдың конструкциясына әсер етпейді. Тағы да қондырғының тиімділігі және оның құны жандыруға дейін CO_2 ұстау кезінде айтарлықтай өтеледі, бірақ қолда бар ұстап қалу технологияларын жануға дейін және одан кейін салыстыру кезінде тиімділіктің төмендеуіне көзқарас қатаң емес. Табиғи газ тікелей газ турбиналарында жағылатын CO_2 ұсталмайтын қондырғымен салыстырғанда қыздыру жылдамдығының 20 пайыздан астамға және тағы да қондырғының меншікті құнының екі еседен артыққа (АҚШ долл.) ұлғаюын күтуге болады (АҚШ доллары/ кВт) (Rhudy, 2005). Газ турбинасына келіп түсер алдында түтін газының фракциясы тиімділікті және шығындарды төмендету және түтін газындағы CO_2 концентрациясын ұлғайту үшін, газ турбинасына қайтарылуы мүмкін. Сондай-ақ жану камерасында NO_x түзілуінің төмендеуін күтуге болады. Егер түтін газдарының рециркуляциясы қосылған болса, аэродинамикалық көзқарас тұрғысынан газтурбиналық компрессорға әсер етуді ескеру қажет, себебі CO_2 молекулалық салмағы мен меншікті жылу сыйымдылығы айтарлықтай жоғары.

Қазіргі уақытта зерттеліп жатқан және ол 8-тарауда аталған көмірді оттегімен жағуға ұқсас жанудан кейінгі ұстап қалуға қатысты екінші тәсілдің мәні газ турбина отынын жағу үшін ауа бөлетін қондырғын O_2 береді, сондықтан салқындатылған түтін газы барлық CO_2 -ден тұрады, ол кейбір өңдеуден кейін байланыстыру үшін қысым астында болуы мүмкін, осылайша CO_2 (аминді қондырғы) бөлу үдерісін болдырмайды. Алайда бұл тәсіл қазіргі уақытта криогендік²⁰ технологияны пайдаланатын ауаны бөлу блогын қосуды талап етеді және оның жұмысы үшін электр энергиясының едәуір мөлшері және күрделі қаражат қажет. Сонымен қатар бұл қолдану үшін, мысалы, Clean Energy Systems (Martinez-Friasetal, 2002)

²⁰ Ауаны криогенді бөлу ауаны сұйылтудан және одан әрі N_2 айдау және жоғары таза O_2 ағынын алу үшін Ar одан аз дәрежеде айдан тұрады.

компаниясы әзірлеген жану камерасының арнайы түрі қажет, онда 10 МПа асатын қысым кезінде жұмыс істейтін зымыран қозғалтқышы технологиясының негізінде жасалған және температурасы 540-760°C жану камерасы пайдаланылады. Рециркуляцияланған су және кейбір жағдайларда бу жану камерасының шығу температурасын бақылау үшін жану камерасына (ол турбинаның кіре берісіндегі температура болып табылады) бүркіледі. Таза энергетикалық жүйелер үдерісінде табиғи газ отын болып табылған кезде жану өнімдері көлемі бойынша шамамен 90% H₂O және 10% CO₂ буларынан тұрады (және аздаған қалдық O₂ мөлшері). Бұл газ ағыны жоғары қысымды турбинаға енгізіледі, ол 1240°C-ден асатын температураға дейін қыздыру үшін 1 МПа-ға жуық қысым кезінде қосымша O₂ құрамы бар қосымша табиғи газды жағу арқылы шығарылады. Содан кейін газ аралық қысым турбинасына келіп түседі, одан кейін төменгі қысым турбинасы тұрады, ол H₂O буының конденсациясы және тазалығы жоғары CO₂ ағынының шығуы үшін атмосфералық немесе атмосфералық қысымнан төмен жағдайда конденсаторға газ шығарады. Конденсаттың көп бөлігі жоғары қысымның жану камерасына турбинаның шығарындысында алдын ала қыздырғаннан кейін қайтарылады. CO₂ ағынындағы O₂ құрамының ерекшелігіне байланысты, кейбір қысудан кейін конденсатордан шығатын ылғалды CO₂ каталитикалық жану камерасында өңделуі мүмкін, онда қалдық O₂ пайдалану үшін қосымша табиғи газ қосуға болады. Оттегінің осы жану циклының нұсқасы Грац Технологиялық университеті (Sanzetal., 2005) әзірлеген цикл болып табылады. Ол бір жану камерасын пайдаланады, яғни қыздырусыз циклды әрі әлдеқайда төмен қысымда жұмыс істейді, шамамен 10 МПа жұмыс істейтін CleanEnergy жоғары қысым камерасымен салыстырғанда шамамен 4 МПа, мұның өзінде жану камерасынан шығу температурасы рециркуляциялаушы бумен бақыланады, CO₂ және H₂O буының сығылған қоспасы да дәл солай.

9.2.5. Құрамдастырылған циклдардың сипаттамалары

Тек Ренкин циклымен салыстырғанда құрамдастырылған циклдың кейбір артықшылықтары (яғни қазандық негізіндегі электр станциясы) келесіде. Алайда құрамдастырылған цикл үшін табиғи газ, синтетикалық газ (көмірден немесе биомассадан алынатын) немесе дистиллят сияқты таза отын талап етілетінін ескерген жөн, ол көмір және биомасса сияқты лас отынға қарағанда едәуір қымбат әрі қазандықтың электр станциясын тікелей жану үдерісінде пайдалана алатын.

9.1-кесте. J^a сыныпты құрамдастырылған газ турбина циклының ерекшеліктері

Турбинаға кірудегі температура	1600 C °
Генератордың жиілігі	60 Гц
Газ турбина қысымының коэффициенті	23:1
Газ турбинаның шығу қуаты	
Құрамдастырылған циклдың шығысы	470 МВт
Құрамдастырылған циклдың тиімділігі	61.5% (LHV табиғи газы)

^aХада және тең авторлардың деректері (2012)

Жоғары жылу тиімділігі, қоршаған орта температурасы 15°C кезінде "J" сыныпты газ турбинасын пайдалана отырып, қазіргі заманғы құрамдастырылған циклды LHV негізіндегі табиғи газ үшін 60%-дан асады (9.1-кестені қараңыз).

- LHV негізінде табиғи газды қолдануы 65%-ға жақындатылған газ турбиналарының озық технологияларын пайдалана отырып циклдың жалпы тиімділігі 2020-2025 жж. (Dennis, 2008) кезеңінде күтілуі мүмкін.

- Салқындатқыш суға қажеттіліктің төмендеуін қоса алғанда тамаша экологиялық сипаттамалар.

- Жел және күн сияқты үзікті жаңартылатын энергия көздерін толықтыратын қарапайым (және жылдам есептелген болуы мүмкін) іске қосу және ажырату, мұнда осындай жаңартылатын энергия көздерінің шығу қуаты төмендегенде электр энергиясын өндірудегі айырмашылықты өтеу үшін құрамдастырылған цикл қажет болады. Алайда жыл ішіндегі іске қосулар саны газ турбинасының жұмыс істеу мерзіміне, сондай-ақ жылу кернеуіне

байланысты HRSG жоғары температуралы секцияларындағы құбырлардың қызмет ету мерзіміне әсер етеді.

- Пайдалану сенімділігі анағұрлым жоғары.
- Персоналға, күрделі шығындарға және құрылыс уақытына қажеттілік едәуір төмен; құрамдастырылған цикл көмірді ұсақтау зауытын салу үшін қажетті уақыттың шамамен үштен бір бөлігін алады.

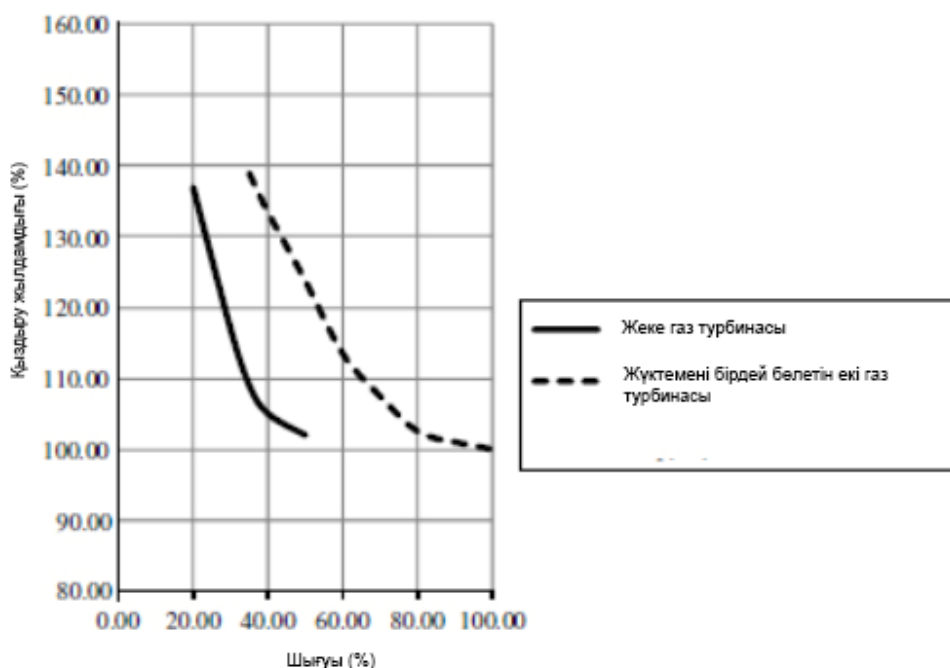
- Участке ауданына және құрылысты кезең-кезеңмен жүргізу үшін мүмкіндіктерге қойылатын талаптар аз, яғни газ турбинысы бастапқы фаза кезінде (су буысыз газ турбинысын пайдаланған кезде) ең жоғарғы жұмыс үшін HRSG қатыстырмай немесе бу циклынсыз орнатылуы мүмкін және базалық жүктемемен электр энергиясын өндіру үшін кейінірек құрамдастырылған циклға түрлендірілуі мүмкін.

Құрамдастырылған циклды қондырғылар табиғи газды берудегі кез келген үзілісті еңсеру үшін резервтік көшіруге арналған дистиллятты мазутты табиғи газда қалыпты жұмыс істеуге арналған. Алайда мазутта болатын күкірттен түзілетін SOx қосымша шығарындыларына байланысты, сондай-ақ көптеген қондырғыларда турбинаның шығарындыларына қосылған CO тотығу катализаторының дезактивациясы мүмкін болғандықтан, мұндай тәжірибе соңғы жылдары өте сирек кездеседі. 8-тарауда талқыланатын көмір қазанына ұқсас газ турбинысының шығарындысында SO₃ болуы SCR арқылы сырғытын NH₃ арасындағы реакцияның нәтижесінде аммоний тұздарының (аммоний бисульфаты, сульфат және бисульфит) қалаусыз пайда болуына алып келеді (ол әдетте турбинаның шығарындысында орнатылады). Бұл тұздар HRSG секцияларында неғұрлым төмен температурамен жиі жууды талап HRSG құбырларында ететін жылу беруге кедергісін арттыра отырып, қатты бөлшектердің шығарылуын туғызады. Газ турбинысының шығыстық қуаты және ПӘК қоршаған орта жағдайына, температураға, атмосфералық қысымға байланысты және ылғалдылығы 6-тарауда сипатталғандай, аз дәрежеде, бірақ булану циклы құрамдастырылған циклдың жалпы тиімділігіне әсер етуді төмендету үрдісіне ие. Барометрлік қысымның құрамдастырылған цикл өнімділігіне әсері 6-тарауда қарастырылған қарапайым цикл газ турбинысының әсеріне ұқсас, мұның өзінде қоршаған орта температурасының құрамдастырылған циклдағы қыздыру жылдамдығына әсері шығу қуатына да және бу циклының құрылымын төменгі бөлігінде оңтайландыру үшін таңдалған газ турбинысының шығарылу температурасына және ағын жылдамдығына (қоршаған орта жағдайларының белгілі бір жиынтығына сәйкес келетін) тәуелді сезімталдықтың дәл шамасына да елеулі емес. Құрамдастырылған циклдың жылу жылдамдығы төменгі цикл конструкциясында қолданылатын қоршаған ортаның температурасында іс жүзінде минимум көрсете алады және төмен температураларда ұлғаяды. Сулы градиентер қондырғыдан жылуды бұру үшін пайдаланылған кезде салқындатқыш судың температурасына салыстырмалы ылғалдылық әсер етеді, ылғалдылық жоғары болған сайын (сулы колба температурасы жоғары болған сайын), салқындатқыш судың температурасы соғұрлым жоғары болады. Суыту температурасының ұлғаюы бу бетіндегі конденсатордың жұмыс қысымын арттырады, содан кейін бу турбинысының және құрамдастырылған циклдың өнімділігін төмендетеді. Станцияның күрделі шығындарына шығыс қуаты тікелей әсер етеді, ал тиімділіктің төмендеуі станцияның пайдалану шығыстарына әсер етеді, киловатт үшін доллармен.

Құрамдастырылған циклдың шығу қуаты газ турбинысының жану температурасын төмендету қажеттілігінсіз ауа шығынын төмендету үшін 6-тарауда талқыланған газ турбинысының компрессорының іске қосу тесігінің бағыттаушы қалақтарын жабу жолымен азайтылуы мүмкін. Мұндай басқару режимінде құрамдастырылған циклдың жалпы жылу қуаты айтарлықтай ұлғаймайды, бірақ шығыс қуатының одан әрі төмендеуі газ турбинысын күйдіру температурасының төмендеуін талап етеді, бұл құрамдастырылған циклдың жылу жылдамдығына елеулі әсер етеді. Электр энергиясына сұраныс оның номиналды мәнімен салыстырғанда 50%-ға төмендеген кезде қыздыру жылдамдығы 20%-ға артуы мүмкін. Құрамдастырылған циклдың булану циклы әдетте ішінара жүктеме кезінде неғұрлым тиімді өзгермелі қысыммен бу жүйесі ретінде әзірленген. Алайда ішінара жүктемемен жұмыс істеу кезінде бу құбырларында ағынның неғұрлым төмен массалық жылдамдығына қарамастан сұйықтық тығыздығының төмендеуін тудыратын будың неғұрлым төмен қысымына сәйкес келетін сұйықтықтың неғұрлым жоғары жылдамдығы үшін тиісті өлшемдері болуы тиіс. HRSG жылу беру беті ішінара жүктемемен жұмыс істеу кезінде "тым үлкен" болады, бұл екі фазалы

ағын үшін осы экономайзерлер мен құбырларды жобалау сияқты тиісті жобалық шаралар қабылданбаса, орташа және төмен қысымды экономайзерлерде будың пайда болуына алып келуі мүмкін.

9.2-мысал. Табиғи газбен жұмыс істейтін, толық жүктеме кезінде 60% ПӘК бар екі газ турбинынан тұратын құрамдастырылған циклдың ішінара жүктемесі 9.5-суретте көрсетілген. Келесі екі сценарий үшін 50% шығыс қуаты кезінде қондырғының тиімділігін бағалаңыз: (1) екі газ турбины жұмыс істейді және (2) бір газ турбины екіншісін сөндіргенде жұмыс істейді.



9.5-СУРЕТ. Құрамдастырылған циклдардың ішінара жүктеме көрсеткіштері

Шешуі:

1. Екі газ турбины жұмыс істейді.

50% жүктеме кезінде базалық бағалауға сәйкес %-бен қыздыру жылдамдығы = 124%.

Тиісті тиімділік = $60\% \times (100\% / 124\%) = 48\%$.

2. Жалғыз турбины жұмыс істейді.

50% жүктеме кезінде қыздыру жылдамдығы %-бен, базалық бағалау = 102%

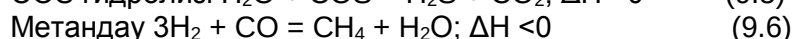
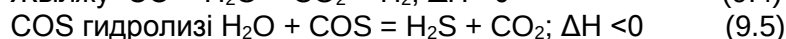
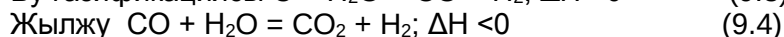
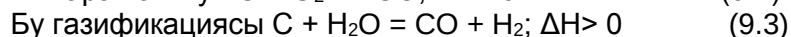
Тиісті тиімділік = $60\% \times (100\% / 102\%) = 59\%$, бірнеше (аз) поездардың бар болу артықшылығын көрсетеді, бұл жалпы жоғары тиімділікті қолдау үшін кейбір поездарды өшіру мүмкіндігін береді, бірақ қондырғының құны бірнеше поездармен ұлғаю үрдісіне ие және экономика мен шығарындылар тұрғысынан ең жақсы конфигурацияны таңдау үшін жүйелік зерттеу талап етіледі.

9.3. КӨМІР ЖӘНЕ БИОМАССАМЕН ІСТЕЙТІН ҚОНДЫРҒЫЛАР

Газ турбинасында тікелей жағу үшін тым "лас" болып табылатын көмір және биомасса сияқты отын түрлері таза отын газына түрлендіруді талап етеді. Конверсияның бұл үдерісі синтетикалық газды алу үшін кедергіден тыс жағдайларда отынның ішінара тотығуынан тұратын газдандыруды қамтиды және мотор отынының ерекшеліктеріне, сондай-ақ қоршаған ортаға шығарындылар нормаларына сәйкес болу үшін мұқият тазартуды талап етеді. "Газдандыру аралын" құрамдастырылған циклдың "қуаттың аралымен" біріктіретін газдандырудың интеграцияланған құрамдастырылған циклы (IGCC) коммерциялық дәлелденген, ал газдандыру үдерісінің өзі 60 жылдан астам уақыт бойы химикаттар немесе синтетикалық отын өндірісінде коммерциялық пайдалануда. IGCC қондырғылары жағу алдында CO_2 ұстау үдерісін пайдалана отырып, нөлдік шығарындыларға жақындайтындай етіп жобалануы мүмкін. Бұдан басқа синтетикалық газдан алынатын күкірт қосылыстары тауарлық қарапайым күкірт немесе күкірт қышқылына түрлендірілуі мүмкін.

9.3.1. Газдандыру

Газификаторда болатын негізгі жалпы реакциялар (пиролиз немесе ұшпа органикалық компоненттерді жою үдерісі нәтижесінде көмірдің немесе биомассаның ыдырауын ескерусіз) мыналардан тұрады:



Барлық алдыңғы реакциялар эндотермиялық болып табылатын (9.3) және H_2O бу немесе сұйық су түрінде газ генераторының температурасын бақылау үшін пайдаланылуы мүмкін екендігін көрсететін реакцияны қоспағанда экзотермиялық болып табылады. Жоғары экзотермиялық гидрогазификация реакциясы $\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$ тек шектеулі дәрежеде¹ жүреді және көптеген газификаторлар өндіретін CH_4 көп бөлігі ұшпа заттың шикізатқа ыдырауына байланысты болады. Шикізатта болатын күкірт негізінен COS кейбір санымен H_2S түрінде бөлінеді, ал CS_2 және меркаптандар сияқты күкірттің басқа қосылыстары газогенератордың жұмыс температурасы жоғары болғанда аз мөлшерде пайда болады ($> 1100^\circ\text{C}$). Шикізаттағы азот негізінен қарапайым N_2 , аз мөлшерде – NH_3 түрінде бөлінеді және газ генераторының жұмыс температурасы жоғары болған кезде HCN әлдеқайда аз мөлшерде бөлінеді. Шикізаттағы Cl негізінен HCl түрінде бөлінеді.

Газификатор, жылжымалы қабаты бар газификатор, жалған сұйытылған қабаты бар газификатор және түсірілген қабаты бар газификатор арқылы қатты бөлшектердің өту тәсілі бойынша жіктелген газификаторлардың үш негізгі түрі бар:

- Жылжымалы қабаты бар газификатор: газификатордың осы түрінің мысалы Lurgi газификаторлары, сондай-ақ BritishGasLurgi (BGL) газификаторлары болып табылады, олар газификатордың жоғарғы бөлігінде қатты бөлшектер беруден тұрады, мұның өзінде тотықтырғыш пен бу газификатордың төменгі бөлігінде енгізіледі, ауырлық күшінің әсерінен газификатор арқылы өтетін қатты заттар. Газ генераторы төрт жеке аймаққа бөлінуі мүмкін: жоғарғы бөлігінде кептіру / алдын ала қыздыру аймағы, одан кейін ұшатын компоненттерді жою аймағы, содан кейін газдандыру аймағы, ал төменгі бөлігінде жану аймағы болады. Газдар қатты заттарға қарсы төрт аймақ арқылы ағады және құрамында негізінен H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 және майлар, шайырлар және оксигенаттар сияқты басқа да көмірсутекті компоненттер бар газификатордан жоғарыға шығады. Төменгі аймақта жану реакциялары нәтижесінде пайда болатын ыстық газдар оның үстіндегі аймақта газдандыру реакцияларына ұшырайды, бұл газдар өз кезегінде ұшпа заттарды қыздырады және жояды, ақырында жоғарыға түсетін газдар шикізатты кептіреді. Синтетикалық газдағы COS, CS_2 , меркаптандар, NH_3 және HCN шоғырлануы жалған сұйытылған қабатқа және тартылған қабаты бар газификаторларға қарағанда анағұрлым маңызды. Күкірт пен азот бөлігі гудрондарда да бөлінеді. Газ генераторының тиімділігі жоғары, бірақ ол гудрондар мен

майды өндіретіндіктен, газды тазарту күрделі болып табылады және газ генераторы шикізатта ұсақ бөлшектердің шектеулі мөлшерін өңдейді. Lurgi түпнұсқа газификатордың нұсқасы – BGL газификаторы синтетикалық газдан газ генераторға бөлінген шайырлар мен майларды ұсақ фракциялармен бірге газ генератордың төменгі бөлігіне осы компоненттерді енгізу жолымен өңдейді. Синтетикалық газдағы CH_4 әлдеқайда жоғары құрамы, егер CH_4 -ті H_2 және CO -ға түрлендіру үшін реформер пайдаланылмаса, IGCC-ке CO_2 шығарындыларын бақылау үшін декарбонизацияланған синтетикалық газ деңгейін шектейді, бірақ бұл қондырғының құны мен күрделілігін арттырады.

- Жалған сұйытылған қабатты газификатор: газификатордың бұл түрінің мысалы жоғары температуралы Winkler және TRIG™ газификаторлары болып табылады және ол кептірілген шикізатты енгізуден тұрады, оның өлшемі әдетте газификатордың төменгі бөлігінде 0,63 см-ден кем болады, ал жалған сұйылтатын орта тотықтырғыш пен бу баяулатқыштың қоспасы болып табылады. Рециркуляциялайтын синтетикалық газ қабаттың материалын жалған сұйылту үшін қажетті газ жылдамдығын қолдау үшін қажет болуы мүмкін, әсіресе тотықтырғыш ауа емес, O_2 (әдетте мольге 95%) болғанда. Тотығу жағдайлары басым газ генераторының төменгі бөлігінде агломераттардың пайда болуымен бірге күл бөлшектерін балқытуы мүмкін температура жеткілікті түрде жоғары болуы мүмкін. Газдандыру реакциялары газ генераторының жоғарғы бөлігінде және $900\text{--}1050^\circ\text{C}$ -ден төмен температурада басым болады. Осы температуралық диапазонның жоғарғы бөлігінде газификатордан шығатын шикізаттық синтетикалық газ жылжымалы қабаты бар газ генераторына қарағанда жоғары және CH_4 қарағанда ауыр көмірсутектері жоқ, бірақ CH_4 құрамы CO_2 шығарындыларын бақылау үшін қажетті синтетикалық газдың декарбонизация дәрежесін шектеу үшін жеткілікті жоғары болуы мүмкін. Алайда биомассамен қолданғанда мұндай газ генераторы әлі де қажет болуы мүмкін, себебі CO_2 ұстап қалу қажет емес. Жасанды қабаты бар газификаторлар биомассаның бастапқы шикізаты үшін өте қолайлы, өйткені биомассаның реакцияға өте қабілетті болу үрдісі бар, ал жалған сұйытылатын қабат үшін бөлшектер мөлшері сияқты қолайлы физикалық сипаттамалары бар шикізатты алу әлдеқайда оңай. Сонымен қатар қатты тұрмыстық қалдықтар сияқты биомассаға арналған шикізаттың кейбір түрлері өте біртекті болу үрдісі бар және газификатордағыи қатты заттардың үлкен қорының салдарынан оның үлкен сыйымдылығы бар жалған сұйытылған қабаты бар газ генераторда тотықтырғыш пен бу ағынының жылдамдығы үшін қажетті кез келген түзетуді жасау үшін өте көп уақыт үнемделеді.

- Қабаты ұлғайтылған газификатор: бір сатылы, қабаты ұлғайтылған газификатор төмен ағынымен Siemens және General Electric газификаторларымен кескінделеді әрі құрғақ ұнтақ түрінде немесе қатты заттар жағдайында газификаторға тотықтырғышпен бірге сулы суспензия түрінде жұқа ұсақталған шикізатты енгізуден тұрады. Шикізат құрғақ ұнтақ түрінде болған кезде бу баяулатушы ретінде тартылған Shell қабаты бар газификатордағы сияқты қосылады. General Electric газификаторы суспензия түрінде беруді енгізеді, бірақ құрғақ беру жүйесі әзірлеу сатысында тұр. Siemens кез келген беру жүйесі бар газификаторларды ұсынады. Құрғақ беру жүйесінде ауа үрлегішпен диірменге беруді ұсақтау операциясымен біріктірілуі мүмкін беруді кептіру талап етіледі. Кептіру операциясы IGCC жүйесі үшін жылу айыппұлын білдіреді, бірақ екінші жағынан, ылғалды суспензия беру жүйесі орында кептіруге қажетті жылуды өндіру үшін газ генераторына қосымша тотықтырғышты талап етеді, мұның өзі IGCC жүйесі үшін жылу айыппұлын алға тартады. Бұл бір сатылы газификаторлардың оның үш түрі ішінде ең жоғары жұмыс температурасы бар, ал газдандыру әдетте 1200°C асатын температураларда жүреді, бұл ретте күл қож түзеді. Жұмыс температурасының жоғары болуына байланысты газификатордан шығатын газдарда CH_4 құрамы өте аз және іс жүзінде ауыр көмірсутектердің ешқайсысы жоқ. E-Gas газификаторы (суспензиялық беру) және Mitsubishi газификаторы (құрғақ беру) басып алу қабаттары болып табылады, бірақ шикізатты берудің екі сатысын қамтиды. Төменгі саты неғұрлым жоғары температурада жұмыс істейді, онда тотықтырғыш енгізіледі және осы сатыдан шығатын ыстық газдар кептіруге, ұшатын заттарды алып тастауға және екінші сатыға енгізілетін шикізатты газдандыруға қажетті жылуды қамтамасыз етеді. Нәтижесінде O_2 үлестік тұтыну азаяды, ал суық газдың ПӘК (синтетикалық газдың химиялық байланысқан энергиясы ретінде сақталатын шикізаттың химиялық байланысқан энергиясының өлшенетін үлесі) артады. Екінші жағынан, CH_4 құрамы жоғары, бірақ жылжымалы қабаты бар газификаторлардағы сияқты жоғары емес.

9.3.2. Газ генераторының отын құрамы

Көмір мен биомассаға қосымша газдандырылуы мүмкін шикізаттың әр түрлі түрлері қағаз фабрикасының қара сілтісін, мұнай коксын, асфальтты, висбрекинг түбін, мұнай өңдеу және мұнай-химия өндірісінің қалдықтарын және мұнай эмульсияларын (мысалы, Orimulsion™) қоса алғанда мұнай өңдеу зауытының қалдықтарын қамтиды. Газификаторды таңдау кезінде шикізаттың ескерілуі қажет маңызды сипаттамалары төменде берілген:

- Реакциялық қабілеті: реакциялық қабілеті неғұрлым төмен шикізатта (әдетте жоғары сапалы көмірлер және мұнай коксы) жалған сұйытылған қабатты газификаторларда көміртегінің шектеулі конверсиясы болады.
- Ылғалдың құрамы: ылғалдың жоғары болуы құрғақ шикізатты газификаторлар үшін де, сондай-ақ суспензия беретін газификаторлар үшін әсіресе термиялық айыппұл болып табылады (шламды беретін газификатор жағдайында, бұл байланысты ылғалдылық болғанда, құрғақ шикізаты бар газифи
- каторларда кептіру үшін қажетті энергияға байланысты). Әдетте төмен дәрежелі көмірлер мен биомассалар жоғары ылғалдылыққа ие.
- Күлділік: жоғарғы күлділік суспензия беретін газификаторлар үшін термиялық айыппұл болып табылады, ал төмен күлділік Shell газификаторлары сияқты мембраналық қабырғаны пайдаланатын газификаторлар үшін проблема болып табылады және күлді қайта пайдалануды талап ете алады.
- Қалпына келтіру жағдайларында күлдің балқу температурасы²¹: Күлді балқытудың жоғары температурасы шлак түзетін газификаторлар үшін термиялық айыппұл болып табылады. Бұл футеровкасы бар газификаторларда отқа төзімділік мерзімін қысқартуы және флюстеуді талап етуі мүмкін. Күлдің төменгі балқу температурасы қож құраушы газификаторлар үшін проблема болып табылады және будың газ генераторына қажеттілігін арттыруы мүмкін.
- Бөлшектер өлшемі: ұсақ бөлшектердің төменгі шегіне байланысты жылжымалы қабаты бар газификаторда қолданылуы ықтимал шикізат үлесін шектеуі және брикеттеуді талап етуі мүмкін.
- Еркін ісіну индексі: жылжымалы қабаты бар газификатордың бітелуін тудыруы ықтимал және агломераттарды бұзу үшін араластырғышты талап етуі мүмкін (битум бұрыштарында әдетте еркін ісінудің көрсеткіштері жоғары).

9.3.3. Көмірдің цикл ішіндегі газдандыруымен құрамдастырылған циклдық жүйелерге арналған аралас негізгі техникалық шешімдер (IGCC жүйелері)

Газификаторға қосымша IGCC жүйесінде басқа да негізгі технологиялар тотықтырғышты газ генераторға беру, газификатор өндіретін тазартылмаған синтетикалық газды оны газ турбинасында пайдаланғанға дейін өңдеуге байланысты жүйелер және газ турбинасының өзі болып табылады.

9.3.3.1. Ауаны бөлу технологиясы. Жоғары температуралы газификатордың суық газының тиімділігі әсіресе артады, ал келесі жабдықтың өлшемі тотықтырғыштағы O_2 концентрациясы ұлғайған кезде кішірейеді. Осылайша, жоғары температуралы газификаторларда ауаны тікелей пайдаланудың орнына ауаны бөлу блогымен (әдетте көлемге есептегенде 95% тазалық) қамтамасыз етілетін тазалықтағы жоғары O_2 ағыны пайдаланылады, ол көлемге есептегенде O_2 -нің шамамен 21% құрайды. Ауамен тотықтырғыш ретіндегі химиялық энергия шикізатымен байланысты айтарлықтай бөлік газ генераторына түсетін N_2 -ні газификатордың шығатын газ температурасына дейін қыздыруы үшін (тотықтырғыштың ауа ағынының бөлігі ретінде) жылу энергиясына ыдырайды. CO_2 ұстап қалу талап етілсе немесе синтетикалық газ H_2 немесе C_2H_5OH сияқты өнімдерді өндіру немесе бірлесіп өндіру үшін пайдаланылуға тиіс болса, ауамен үрленетін газификатордың

²¹Әдетте көмір үшін тотығу жағдайларына қарағанда қалпына келтіру жағдайларында төмен, ал мұнай кокстерінде жоғары.

орнына O_2 үрлеу газификаторы тиімді болмақ. Газификаторда ауаны тотықтырғыш ретінде пайдалану кейбір жағдайларда тартымды болуы мүмкін:

- Биомассаны пайдаланылатын қолдануларда, өндірістік ауқым әдетте аз болғанда, O_2 өндірісінің аз көлемдегі құны тартымды болмайды.
- Температурасы төмен газификаторларда, мысалы, суық газдың тиімділігі аз дәрежеде әсер ететін жалған сұйытылған қабаты бар газификаторлар.

Әсіресе осылайша бөлінетін күкірт қосылыстарын ұстау үшін осындай төмен температуралы газификаторларға әктас бүркілген кезде газификатордан кейін қышқыл газдарды жою жүйесі (AGR) талап етілмейді. Өңделетін синтетикалық газдың көлемі (N_2 байланысты) ұлғаятынына, ал синтетикалық газда болатын күкірт қосылыстарының парциалды қысымының тиісті төмендеуі орын алатынына назар аударыңыз.

Үлкен масштабты қолдануға арналған дәстүрлі ауаны бөлу технологиясы тазалығы жоғары O_2 ағынын алу үшін ауаны криогендік бөлуден тұрады. Газификаторды қолданатын IGCC-те газификаторларда пайдаланылатын O_2 және үрленетін O_2 , NO_x реттеу үшін газ турбинасында пайдаланылатын N_2 жоғары қысым кезінде талап етіледі. Мұндай қолдануларда жоғары қысым кезінде болатын ауаны дистилляциялаумен (тазалығы жоғары O_2 ағынын алу үшін) әзірленген ауаны бөлу блогы (ASU) ауа дистилляциясы атмосфералық қысымға жақын болатын төмен қысымды құрылыммен салыстырғанда қолайлы болып табылады. Шамамен 2%-ға төмендету әдетте қызу жылдамдығы және құны тұрғысынан іске асырылады. АБЖ "суық жәшігіндегі" дистилляция қысымы сұйықтық көпіршігінің температурасына әсер етеді және бұл қысым ұлғайған кезде суық жәшіктегі температура жоғарылайды, яғни қатты суық температура қажет. Тоңазыту камерасындағы қысымның тиісті төмендеуі (келіп түсетін ауа қысымының O_2 және N_2 ағындарының шығыс қысымына қатынасы) IGCC қондырғысының жалпы тиімділігінің таза өсуіне әкеледі. Бұл дистилляцияның қысымы ұлғайған кезде, N_2 мен O_2 арасындағы салыстырмалы ұшқыштық бірге жақындайды, бұл дистилляция операциясындағы сатылардың көп санын талап етеді, сонымен қатар газ генераторының немесе газ турбинасының жану камерасының жұмыс қысымына қарағанда әлдеқайда төмен қысым үшін оңтайлы жоғарғы шегі болады. Осылайша, суық бокстан шығатын O_2 және N_2 ағындары қысуды талап етеді.

IGCC қолдануларындағы O_2 оңтайлы тазалығы ASU жоғары немесе төмен қысымында көлемі бойынша 95% құрайды, бұл ретте тазалық 99,5-тен 95%-ға дейін төмендеген кезде дистилляция сатыларының саны күрт азаяды. Тазалық қосымша төмендегенде оның сезімталдығы мүлдем болмайды, бірақ суық бокстан кейін жабдықтың көп бөлігінің өлшемі (шамалы) артады, ал газдандыру блогының тиімділігі төмендейді, ал O_2 қысу қуаты артады. Demkoles (Hannemann және Kanaar, 2002) зауыттарында да, Полк округінің IGCC зауыттарында да O_2 тазалығы 95% құрайтын жоғары қысымды ASU пайдаланылады, бірақ тазалығы жоғары N_2 (қысымның өзгеруімен адсорбцияны қолдану арқылы), тазалығы аса жоғары O_2 өндіретін қондырғылар сияқты бірлескен өндіріс қондырғыларда Ar құрамын шектеу талап етілуі мүмкін.

Төмен қысымды АБЖ тоңазытқыш камерасына ауа беру қысымы 350-600 кПа шегінде болады, ал ASU жоғары қысымының мәні әдетте ASU талап етілетін жалпы ауаның кем дегенде бөлігін қамтамасыз ету үшін газ турбинасынан ауа шығарылатын газ турбинасы қысымының қатынасымен белгіленеді. Газ турбинасы компрессорының қысымынан ауаны алу артықшылығы, ол NO_x реттеу үшін газ турбинасының жану камерасында қажетті термиялық сұйылтқыштардың көп мөлшерін бүрку үшін орынды қамтамасыз етеді, бұл ретте қысымның помпаж сызығынан төмен қауіпсіз арақатынасы сақталады. Компрессор, газ турбиналары қазіргі уақытта табиғи газ сияқты отынға арналған. Газ турбинасының қысымының қатынасы өте жоғары болған кезде, O_2 мен N_2 арасындағы салыстырмалы ұшу бірге тым жақын болмайтындай етіп, тоңазытқыш камерадағы жұмыс қысымын шектеу үшін қашықтағы ауаны ішінара кеңейту қажет болуы мүмкін.

Криогенді ASU тұтынылатын қуаты әдетте IGCC тұтынатын жалпы қуаттың жартысынан астамын немесе жалпы өндірілген қуаттың 5-10% құрайды. Бұл қатаң жазаны азайту үшін энергияны тұтыну мен күрделі шығындарды 30% төмендету мақсатында 800-900°C кезінде жартылай өткізгіш материалдарды пайдалану арқылы ауа сепарациясы сияқты басқа технологиялар әзірленуде (Армстронг, 2005) және 11-тарауда толығырақ талқыланады. Газ турбинасы бар мембраналық блокты үнемді ету үшін оны біріктіру қажет, өйткені мембранаға берілетін ауа компрессордың айдамасынан мембраналық блоктан

біріктірілген ыстық ауаны (~800°C кезінде) газ турбинасының жану камерасына қайтару арқылы (кейіннен синтетикалық газды тікелей күйдіру арқылы сору ауасын алдын ала қыздыру арқылы) алынады.

9.3.3.2. Синтетикалық газды өңдеу. Келесі параграфтарда синтетикалық газды газ турбиналарында жағу алдында өңдеу үшін "суық газбен тазарту" коммерциялық қолжетімді технологиялары сипатталады. Өзірленуші "жылы газды тазарту" технологиялары неғұрлым жоғары температураларда (300-400°C) жұмыс істейді, бұл ретте синтетикалық газ конденсация нүктесінен жоғары ұсталады, бұл әдетте суық газбен тазартуды пайдалана отырып, газдандыру кезінде талап етілетін ағынды суларды қарқынды тазарту қажеттілігін, сондай-ақ синтетикалық газды суық газбен тазарту үшін қоршаған ортаның температурасына жақын температураға дейін салқындатумен байланысты қайтымсыз минимумға жеткізуді болдырмайды. Жылу газын тазалау үдерістерінің кейбірі көрсетілім фазаларында (Butzet al., 2003; Gangwalet al., 2004; Krishnan et al., 1996).

Суық газбен тазаланған жағдайда газификатордан шығатын тазартылмаған газ буды генерациялай отырып, жылу алмастырғыштармен салқындатылады және/немесе тікелей байланыс арқылы сумен сөндіріледі. Салқындатылған газ макробөлшектер сияқты ластануды және сілтілердің, галогендердің және азоттың еритін қосылыстарын жою үшін сумен тазарту жолымен қосымша тазартылады. Ластаушы заттардың дәл табиғаты және шоғырлануы газификаторлардың типі мен шикізат түріне байланысты, 9.2-кестеде көмірді газдандыру нәтижесінде алынған шикі синтез-газда болуы мүмкін әр түрлі ластаушы заттар көрсетілген. Ауыл шаруашылығы өнімдерінен тұратын биомассасы жағдайында калий тұздары елеулі концентрацияларда болуы мүмкін, ал қатты тұрмыстық қалдықтардан тұратын биомасса жағдайында синтез-газда хлоридтердің елеулі концентрациясы болуы мүмкін.

9.3.3.3. Қышқыл газды жою. Синтез-газдағы күкірттің, сондай-ақ CO₂ қосылыстарының қышқыл табиғаты болады және мұндай компоненттерді жою үшін пайдаланылатын үдерістер қышқыл газдарды жою үдерістері (AGR) деп аталады. Синтез-газдан күкірт қосылыстарын ұстаудың қол жетімді тәсілдері мыналарды қамтиды:

- Аминді су метилдиэтаноламин еріткішін қоспамен селективті тазалау.
- Метанолды еріткіш ретінде пайдаланатын ректизол.

9.2-КЕСТЕ. Көмірден алынған синтез-газдағы ластаушы заттар

Күкірт қосылыстары	H ₂ S COS CS ₂ меркаптаны
Хлоридтер	NaCl, HCl
Азоттық қосылыстар	NH ₃ , HCN
Қатты бөлшектер	Күл (Si, Al, Ca, Mg, Na, K және сульфат иондары) күту
Ұшпа металдар	Hg, As, Cd, Se
Карбонилдер	Ni(CO) ₄ , Fe(CO) ₅

• Селексол™, мұнда еріткіш ретінде полиэтиленгликольдің диметилды эфирлерінің қоспасы пайдаланылады (сұлба 5.1-суретте көрсетілген)

Барлық алдыңғы үдерістерде екі баған арасында айналмалы еріткіші бар абсорбциялық және десорбциялық колоннаны пайдаланады. Қышқыл газдар абсорберде синтетикалық газдан еріткішпен шығарылады, ал стриппер абсорбцияланған қышқыл газдарды еріткіштен шығарады. Әдетте бу тазарту үшін пайдаланылады, ол еріткішті абсорберге қайта циркуляциялау үшін кері регенерациялайды. Аминмен жүргізілетін AGR үдерісі сіңірілген қышқыл газдарды босату үшін будың едәуір мөлшерін талап етеді, өйткені аминдер "химиялық еріткіштер" болып табылады, яғни әлсіз болса да химиялық байланыстар амин мен қышқыл газ компоненті арасында түзіледі. Қоспалар H₂S және CO₂ сіңіру жылдамдығы арасындағы селективтілікті жақсарты алады, сондықтан CO₂ үлесі бірге сіңетін еріткішпен барынша азаяды. AGR үдерісінің бұл түрі алдын ала жануда CO₂ ұстау талап етілмейтін жағдайларда жарамды, ал синтетикалық газдан кететін CO₂ шығыны NO_x бақылау үшін жану камерасымен талап етілетін термиялық еріткіштің санын бір мезгілде

ұлғайта отырып, газ турбинасында кеңейту үшін қысымда қол жетімді жұмыс сұйықтығының мөлшерін азайтуға зиянды әсер етеді. Бұдан басқа еріткіштің айналым жылдамдығы және сыртқа айдау буына қажеттілікті қоса алғанда, коммуналдық қызметтерді пайдалану артады. Күкіртті (SRU) алуға арналған келесі қондырғының және қалдық газды тазалауға арналған қондырғының тиімділігі мен құны AGR буланған колоннасында бөлінетін қышқыл газдағы CO_2 концентрациясының үлкен болуына байланысты теріс әсер етеді. SRU басып алынған H_2S және қышқыл газда бірге жұтылған кез келген COS қарапайым күкіртке түрлендіреді. Қалдық газды өңдеу блогы қарапайым күкірттің іздік мөлшерін, сондай-ақ SRU-дан шығатын газдағы құрамында оттегі бар қосылыстарды гидрациялайды және одан кейін жүйеде күкірттің жалпы шығарындыларын азайту үшін атмосфераға қалдық газды шығару алдында екінші аминді блокта пайда болған қосымша H_2S қалпына келтіреді. Аминді қолдану арқылы жүретін үдеріс АҚШ-тағы екі коммерциялық IGCC зауыттарында қолданылады: полк Каунти, Флорида (McDanielandShelnut, 1999) және Wabash, Индиана (Keeler, 1999). Wabash зауытында қалдық газ гидрогенизациядан кейін газификаторға рециркуляцияланады, ал SRU-да рециркуляциялауға H_2S шығару үшін қосымша амин блогында өңделмейді.

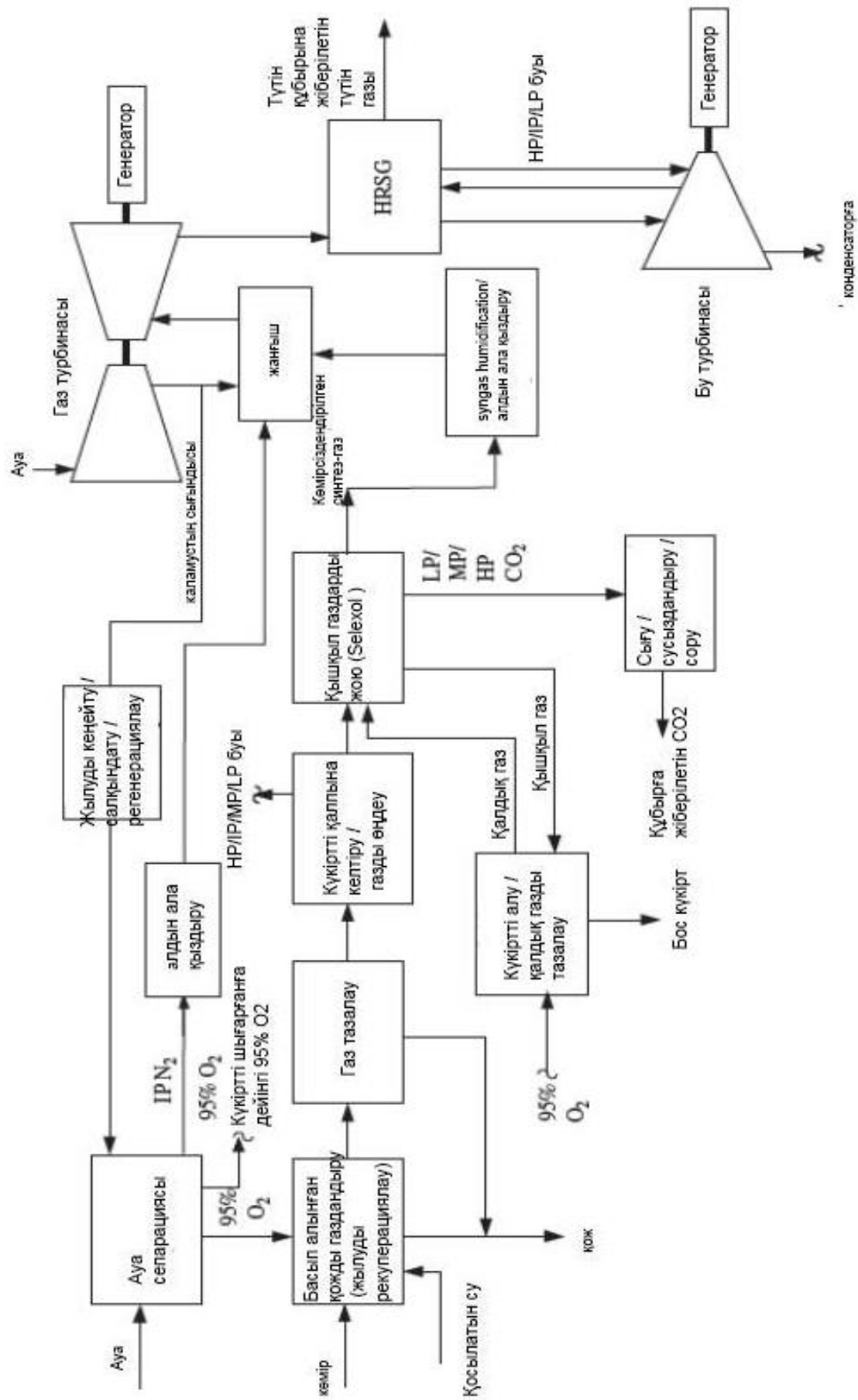
Амин үдерістері де, Селесол™ да осы құрылғылардың алдында COS-ті H_2S -ке айналдыру үшін оның гидролизін талап етеді, өйткені тек COS-тің аз бөлігі осы еріткіштермен сіңіріледі, ал Ректизол үдерісі мұны қажет етпейді, себебі COS оның еріткішімен оңай сіңіріледі. $\text{COS} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2\text{S} + \text{CO}_2$ гидролиз реакциясы құрамында белсендірілген алюминий оксиді немесе титан оксиді негізіндегі катализаторы және жылжымайтын қабаты бар реакторда жүзеге асырылады, көрсетілгендей анағұрлым орнықты болып табылады. Синтетикалық газдың десульфурациясы да, декарбонизациясы да осы үдерістерде біріктірілуі мүмкін, бұл ретте күкірт қосылыстарына бай қышқыл газдың жеке ағыны және сығуға энергия тұтынуды азайту үшін атмосфералық қысымнан едәуір асып түсетін қысым кезінде еріткіштен бөлінетін барлық CO_2 -ден тұратын басқа ағыны да болады. CO_2 ағыны секвестрлеуге қажетті қысымға дейін. Өңделетін синтетикалық газдағы қышқыл газдардың типтік концентрациясы кезінде синтетикалық газдың талап етілетін қысымы әдетте Ректизол үшін 2800 кПа-дан асады және Селексол үшін 4100 кПа-дан асады. Еріткіштің ерігіштігін арттыру үшін оны тоңазытқышта, әсіресе Ректизол үдерісінде салқындатады. Ректизол синтетикалық газдағы күкірт құрамының өте төмен спецификациясы қажет ($0,1 \text{ см}^3/\text{м}^3$ дейін) ететін қолдануларға қолайлы, мысалы, күкірт іздерін жоюдың жеке сатысын талап етпей, күкіртпен улануға сезімтал катализаторлары бар синтездеу үдерістерінде қолдану үшін аса қолайлы. Селексол™ CO_2 шығарындылары бақыланатын IGCC қондырғыларында пайдаланылуы мүмкін, ал күкірт ерекшелігі аса қатаң емес, $0,1 \text{ см}^3/\text{м}^3$ (Raoetal., 2005).

9.3.3.4. Трассалау құрауыштарын жою. Карбонилды металдардың (Ni және Fe сияқты) шамалы тұтықұрамында тазартылмаған синтетикалық газды алып жүретін, газ генераторынан шығатын және синтетикалық газдың тазартылмаған скрубберінен ағын бойынша жоғары орналасқан барьерлік сүзгілерде жиналатын көміртекті бөлшектердегі адсорбция нәтижесінде болуы мүмкін. Ректизол еріткіші карбонилдерді тұтып, оларды тиісті сульфидтерге айналдырады. Құрамында белсендірілген көмір бар қабат карбонилдерді жою үшін AGR-ден жоғары болуы мүмкін. Газификаторға шикізат компоненттері ретінде түсетін Hg, As, Cd және Se газификаторда әдетте металл немесе қосылыстар түрінде ұшып кетеді және шикізаттық синтетикалық газбен шығарылады. Белсендірілген көмірдің сульфидтелген қабаты Теннеси Истман газ өңдеу зауыттарында As-ті синтетикалық газдан химикаттарға шығару үшін пайдаланылды (Trappetal., 2002). Hg сондай-ақ осы қабатпен жойылатыны анықталды. Ол негізінен сульфид түрінде, ал кейбір элемент түрінде алынады. Пайдаланылған көміртекті қауіпті қалдықтар ретінде қарастыру керек, бірақ технология әзірлеушілері қарапайым Hg шығаруға әрекет жасауда. Калгон қоршаған орта температурасына және төмен ылғалдылыққа жақын температурада синтетикалық газдағы $0,01\text{-}0,1 \text{ мкг}/\text{нм}^3$ шоғырлану деңгейіне дейін Hg алып тастау үшін сульфидтелген белсендірілген көмірді ұсынады; оны ұстап алу температура мен салыстырмалы ылғалдылық ұлғайған кезде азаяды. Олардың тәжірибесі сонымен қатар As осы белсендірілген көмірдің қармайтынын көрсетті. SudChemie сондай-ақ As және оның қосылыстарын жою үшін белсендірілген көміртекті ұсынады, ал Cu сіңірілген көміртекті As синтетикалық газда органикалық қосылыс түрінде болған кезде ұсынады. Сонымен қатар Cd және Se қосылыстарын белсендірілген көмірмен бір мезгілде басып алу күтілуде.

9.3.3.5. Газ турбина. Бұдан бұрын талқыланған CO_2 -ні жағуға дейін ұстау арқылы табиғи газбен жұмыс істейтін құрамдастырылған циклдарда газ турбиналарына салынатын шектеулер IGCC қосымшаларында да қолданылады.

9.3.4. IGCC жүйесінің сипаттамасы

Коммерциялық қол жетімді технологияларды нөлдік дерлік шығарындылар үшін пайдаланатын IGCC қондырғысының конструкциясы (яғни CO_2 ұстап тұруды қоса алғанда) 9.6-суретте қысымның жоғары мөлшері бар қабатпен жабыстырылған газификаторларды пайдалана отырып, оңайлатылған блок-сызбанұсқа түрінде көрсетілген. Технологиялық сұлбалармен бірге егжей-тегжейлі сипаттама Raoetal-да табуға болады (2008). O_2 -нің 95% құрайтын тазалығы газификаторлар және SRU арналған криогендік жоғары қысымды ASU көмегімен беріледі. ASU сондай-ақ газ турбиналарына бүрку үшін N_2 аралық қысым жасайды. Көмір суспензиясын сулы өзегі бар диірмендерде дайындайды және 7350 кПа номиналды қысымда жұмыс істейтін газификаторға енгізеді және ыстық газды (шикізаттық синтетикалық газ), қож және көмір бөлшектерін өндіреді. Газдандыру аймағынан шығатын шикізаттық синтетикалық газ сумен тікелей байланыста салқындатылады ("салқындатудың жалпы сұлбасы").



9.6-СУРЕТ. Шығарындылары нөлдік деңгейлі IGCC

Газды салқындатудың бұл әдісі синтетикалық газ үшін тоңазытқыштардың қажеттілігін жояды, олар әдетте қымбат; шынықтыру операциясы синтетикалық газда болатын CO реакциясы үшін қажетті синтетикалық газға су буын енгізеді, ауыстыратын реакторларда H_2 және CO_2 пайда болады. Газ генераторының салқындатқыш секциясынан шығатын газ кез келген басып қалған қатты бөлшектерді жою үшін ылғалмен тазартылады. Сілтілі металдардың еритін тұздары, галогенсутектер және NH_3 шағын үлесі сияқты басқа қоспалар да жойылады. Ластанған су ("қара су") ұсақ қожды жою үшін тазартылады, ал еріген газдар қысымды шығару жолымен шығарылады және SRU-ге жіберіледі. Судың бір бөлігі ("сұр су") скрубберге қайтарылады, ал қалған бөлігі ағызу алдында өңделеді.

Жуылған газды алдын ала каталитикалық жылжу реакциясының өтуі үшін жеткілікті жоғары температураға дейін қыздырылады, содан кейін аралық салқындатумен қозғалмайтын қабаты бар екі адиабатикалық реактордың бірінші сериясына жібереді. Синтетикалық газдағы күкірт қосындыларымен уланбаған қолайлы катализатор Co және Mo оксидтерінен тұратын қышқыл ығысу катализаторы болып табылады. Жылжыту реакторы 10-тарауда толығырақ талқыланады. Газдағы CO -ның көп бөлігі әдетте H_2 және CO_2 пайда болу үшін бу қосуды талап етпей, газбен шынықтыру үдерісінде енгізілетін газдағы су буымен реакцияға түседі. Ығысу экзотермиялық реакциясы нәтижесінде пайда болатын жылу жоғары және орташа қысымды буды генерациялау арқылы қалпына келтіріледі. Ығысу блогынан шығатын жылжытылған газ төменгі қысымды бу генераторынан, синтетикалық газды ылғалдаушының циркуляциялық су жылытқышынан, вакуумдық конденсат жылытқышынан және салқындатқыш судың қарсы тұрған салқындатқыш құрылғыдан тұратын қаптамақұбырлы жылу алмастырғыштардың сериясында қосымша салқындатылады. Салқындатылған синтетикалық газ қуыстықтарды конденсациялауды болдырмау үшін шамамен 11°C (20°F) қызады, содан кейін Hg және басқа микроэлементтерді жоятын сульфидтелген белсендірілген көмір қабатына беріледі. Содан кейін шығатын газды салқындатқыш судан салқындатады және Селексол AGR қондырғысына береді. Газдан бөлінген жоғары температуралы конденсат скрубберге қайтарылады, ал суық конденсат қышқыл суды тазалағышқа беріледі. Судан алынған қышқыл газдар Клаустың SRU-на жіберіледі. SRU және CO_2 ағындарына үш түрлі қысымда (бұрын 5.1.-суретте көрсетілгендей) берілетін таза синтетикалық газды, қышқыл газды алу үшін еріткішпен салқындатуды қолданады. Шамамен 50% CO_2 1034 кПа (шаршы дюймға 150 фунт) қысымы кезінде, шамамен 40% – 345 кПа (шаршы дюймға 50 фунт) қысымы кезінде, ал қалғандары – 115 кПа (шаршы дюймға 16,7 фунт) қысымы кезінде өндіріледі және CO_2 қысу жүйесіне беріледі. CO_2 қоспаның аса сыни қысымына дейін сығылады, сусызданады, содан кейін құбырдағы қысымға дейін 13 800 кПа (2,015 фунт шаршы дюймге) айдалады. Құрамында CO_2 және күкірттің қалдық қосылыстары бар SRU шығатын қалдық газ, сондай-ақ элементтік күкірттің буы күкірт бөлшектерінен H_2S пайда болуы арқылы гидрацияланады. Гидрогенизацияланған қалдық газ одан кейін AGR қондырғысына кері қайтарылады. Бұл рециркуляцияның сұлбасы күкіртсіздендірілген гидрацияланған қалдық газға арналған аминді қондырғының болуын жойып қана қоймайды, сонымен қатар зауыттағы шығарындылардың қосымша көзі болып табылады. Негізінен аз мөлшерлі CO және инертті заттары бар H_2 -ден тұратын таза көмірсіздендірілген синтетикалық газ NO_x бақылау үшін термиялық сұйылтқыш ретінде су буын енгізу үшін ыстық сумен тікелей байланыс арқылы тұманға қарсы бағанада ылғалданады (мұндай операцияларға арналған колонналар 5-тарауда сипатталған). Әдетте су буының жеткілікті мөлшері енгізіледі, сондықтан ылғалданған газдың LHV негізінде 7870 кДж/Нм^3 (200 BTE/SCF) жылу шығару қабілеті бар. Ылғалдағышпен талап етілетін жылу ығыстырылған газдағы төмен температуралы жылудан алынады (төмен температуралы газды суыту саласындағы ығысу блогынан ағындар бойынша төмен қарай). Ылғалды газды газ турбиналарын іске қосар алдында конденсация нүктесінен қауіпсіз жоғары деңгейде қалу үшін алдын ала қыздырады. Жылыту, сондай-ақ жылу түп циклынан алынған кезде қондырғының жалпы тиімділігін арттырады. Алдын ала қыздырылған синтетикалық газ содан кейін әдетте әрқайсысы 200 MBт-тан астам қуаты бар екі блоктан тұратын газ турбиналарына беріледі, сондықтан газдандыру аралының мөлшері ауқым әсерінің артықшылығын пайдалану үшін жеткілікті үлкен. ASU-дан болатын N_2 аралық қысым алдын ала қыздырғаннан кейін газ турбиналарына беріледі, оның едәуір бөлігі жану камераларында жеке форсункалар арқылы өтеді, сондықтан оны жоғары қысымды еңсеруге тиіс синтетикалық газдың қысымына дейін қысудың қажеті жоқ. Отынды бақылау қақпағымен

байланысты құлдырау. N_2 және ылғалдан (синтетикалық газ арқылы) тұратын термиялық сұйылтқыштарды енгізу газ турбинасының жану камерасында NO_x түзілуін азайтуға қосымша (жалын температурасын төмендету жолымен) газ турбинасының пайдалы шығу қуатын арттырады, өйткені бұл сұйылтқыштар турбинаға түсетін жұмыс сұйықтығының мөлшерін арттырады. Синтетикалық газды ылғалдандыру қысым астында жылжитын қосымша сұйықтықты қамтамасыз ете отырып, қондырғыдан шығатын төмен температуралы жылуды тиімді қалпына келтіруге мүмкіндік береді. H_2O үш атомды молекуласының меншікті жылу сыйымдылығы N_2 екі атомды молекуласының меншікті жылу сыйымдылығынан мольге едәуір жоғары, демек қажетті сұйылтқыштардың салыстырмалы мөлшері, яғни көлемді немесе моль негізіндегі N_2 -мен салыстырғанда су буының салыстырмалы саны синтетикалық газдың осы мөлшеріне NO_x қысқартудың осы мақсаты үшін тіптен әр түрлі. Алайда тағы бір фактор газ турбинасының жану температурасына әсер етеді. Табиғи газдағы белгілі бір күйдіру температурасына есептелген газ турбинасы жұмыс сұйықтығының әр түрлі азротермиялық қасиеттеріне байланысты синтетикалық газды ылғалдандыру қолданылған кезде жұмыс сұйықтығындағы H_2O буының жоғары концентрациясына байланысты күйдіру температурасының төмендеуін көретін болады. Бұл күйдіру температурасының төмендеуі қысымның ұлғаюынан туындаған қосымша болады, бұл ретте салқындатқыш ауаның температурасы қысымның ұлғаюымен артады.

Бұрын көрсетілгендей, бумен салқындатылатын газ турбинасы жағдайында қысым қатынасының ұлғаюына байланысты күйдіру температурасының төмендеуі едәуір аз болуы мүмкін (өйткені салқындатқыш будың температурасы газ турбиналарындағы қысымның қатынасына қарамастан ұстап тұрылуы мүмкін). Пайдаланылатын сұйылтқышты, яғни N_2 -мен салыстырғандағы H_2O -ның буларын немесе олардың салыстырмалы мөлшерлерін таңдау газ турбинасының жану температурасына әсер ету сияқты газдандыру аралының конструкциясын ғана емес, сонымен қатар жылу рекуперациясының нұсқалары сияқты газдандыру аралының конструкциясын да назарға ала отырып, компромисс/оңтайландыру жүйелерін зерттеуге қосылуы тиіс.

Газ турбиналарынан шығатын пайдаланылған газдар үш қысымдағы HRSG қондырғыларына түседі (әрбір HRSG газ турбинасына қосылған), олар қыздырылған буды бір конденсациялық бу турбинасына береді. SCR блогы NO_x шығарындыларын одан әрі азайту үшін HRSG топтарының әрқайсысына қосылуы мүмкін. Айта керерлігі, газ турбиналарындағы декарбонизацияланған синтетикалық газда күкірттің өте аз болуы SCR аммоний тұздарының пайда болуына шек қоймай пайдаланылуына мүмкіндік береді. Осы "жергілікті қондырғыларға" қосымша "сыртқы тораптар" қарастырылуы тиіс, сондай-ақ салқындатқыш су жүйесі, құралдық ауа, алаулы қондырғы, ағынды суларды тазалау және т.б. сияқты жалпы объектілер деп қарастырылуы тиіс.

9.3.5. IGCC жүйелерінің артықшылықтары

IGCC-тен атмосфераға шығарындылар АҚШ-тың таза ауа туралы заңының стандарттарынан айтарлықтай төмен, ал SO_x , NO_x , CO , ұшатын металдар мен қатты бөлшектердің шығарындылары шаң тәріздес және айналмалы қайнаған көмір қабатын жағуға арналған скрубберлермен жабдықталған қондырғыларда алынатын шығарындылардан әлдеқайда жақсы болуы мүмкін. Егер атмосфераға түсетін шығарындылардың неғұрлым қатаң нормалары қабылданса, IGCC экономикалық артықшылықтары соғұрлым маңызды болуы мүмкін, өйткені бұл технология аз қосымша шығындармен шығарындыларды көбірек қысқартуды қамтамасыз ете алады. Мысалы, көмірмен жұмыс істейтін IGCC-тен ұшатын Hg -ның 90%-дан артық мөлшерін жою құны шаңкөмір қазандығы құнының шамамен оннан бір бөлігін құрайды (Stiegeletal., 2002). Газдандыру негізіндегі жүйелердегі сынапты жою атмосфералық және сұйылтылған N_2 қысымына жақын қазандықтың пайдаланылған газдарының шығарындыларымен салыстырғанда жанғанға дейін синтетикалық газдың әлдеқайда аз көлемінен (қысымда) жүргізіледі. IGCC тек оның тиімділігіне ғана емес, оның құнына да әсер ететін алдыңғы қатарлы газ турбиналарын пайдалана алады. Электр энергиясының бірлігін өндіруге қажетті синтетикалық газдың мөлшері қуат аралының тиімділігін арттыруға тікелей пропорционалды түрде азаяды, бұл газдандыру аралының мөлшерін және оның құнын азайтады. Алайда

қазандықтардың жылу тиімділігін арттыруға бағытталған технологиялық жетістіктер де орын алуда.

9.3.6. Биомассаны сату мен газдандыруды үнемдеу

Станция өлшемі IGCC экономикасына елеулі әсер етеді және масштабтың әсерін толық көлемде пайдалануға мүмкіндік беретін типтік өлшем, әдетте 400 МВт-тан асады. 8-тарауда көрсетілгендей, биомассаның ресурстары таралу үрдісіне ие және энергияның төмен тығыздығына байланысты, әр түрлі жерлерден алыс қашықтыққа жиналған биомассаны ірі орталық станцияға тасымалдау экономикалық жағынан қиынға соғады. Биомассамен де, көмірмен де (немесе мұнай коксы сияқты басқа да отынмен) қоректенетін және биомассаның ресурсына тікелей жақын орналасқан ауқым әсерінің артықшылықтарын пайдалану үшін үлкен IGCC құру туралы мәселені қараған жөн. Бұл тәсілдің қосымша артықшылығы – биомасса үшін бастапқы шикізатқа қол жетімділік төмен болған кезінде қондырғы биомассадан алынған синтетикалық газдың төмендеуін өтеу үшін көмірді пайдалануды арттыруы мүмкін. Жоғары сортты көмірді (немесе мұнай коксын) биомассамен бірлесіп берген жағдайда, газификаторлардың екі түрі қажет болуы мүмкін, олардың біреуі тозған қабаты бар газификатор сияқты көмір (немесе мұнай коксы) үшін оңтайландырылған және екіншілері биомассаның неғұрлым химиялық белсенді шикізаты үшін қолайлы жалған сұйытылған қабаты бар газификаторлар сияқтылар. Биомассаны газдандыру үшін құрғақ берілісті газификатор қажет.

9.4. ОТЫНДЫ ЖАНАМА ЖАҒУ ЦИКЛЫ

6-тарауда талқыланатын жанама цикл үшін әлеуетті қолдану IGCC сияқты технологиялар құны бойынша бәсекеге қабілетсіз болуы мүмкін шағын электр станцияларына (<250 МВт) арналған. Көмірге отын ретінде қызығушылық сақталуда, бірақ қазіргі уақытта биомассада жұмыс істейтін ЖЭО-ны қолдануға айтарлықтай күш-жігер жұмсалды. Бұл жанама түрде іске қосылатын цикл үшін жылу көзі 12-тарауда қарастырылған айналармен шоғырландырылған күн жылуының энергиясы болуы мүмкін. Сыртқы іске қосылатын құрамдастырылған цикл технологиясы бес онжылдықтан астам уақыт қолданылады, бірақ қазіргі заманғы коммерциялық энергетикалық жүйелер әлі іске асырылмаған. Бұл жүйенің маңызды компоненті жылу алмастырғыш болып табылады, ол "лас" отынды жағу кезінде бөлінетін жылуды беру үшін газ турбинасының жану камерасын газ турбинасының жұмыс сұйықтығына ауыстырады, ол жай ауа болып табылады.

Осы тұжырымдаманы пайдаланатын шағын газ турбинасы бар ауқымды сынақтар біршама ұйымдар тарапынан жүргізілді. Сонымен қатар көмірлік жоғары температуралы жылу алмастырғыштың – негізгі технологияның сынақтары да жүргізілді. Керамикалық және металл жылу алмастырғыштары зертханалық ауқымда әзірленді және сыналды және олардың табыстылық дәрежелері әр түрлі болды. Жылу алмастырғыштар мен материалдар, негізінен металдан жасалғандар үшін мемлекеттік, университеттік және өнеркәсіптік зертханаларда сынақ стенділерінің зерттеулері жалғасуда. 1939 жылдың өзінде жанама іске қосылатын циклдың екі нұсқасы жүзеге асырылды: BrownBoveri AG ашық циклының газ турбинасы және EscherWyss AG жабық циклының газ турбинасы. Буери Браун машинасы турбинаға кіре берістегі 540°C (1000°F) температурамен және қарапайым цикл режиміндегі 17%-дан сәл артық нәтижелі тиімділікпен сипатталатын Брайтонның әдеттегі циклынан тұрды. EscherWyss тұйық циклы бар газ турбинасы Бубери Браун машинасына қарағанда күрделі термодинамикалық циклды қамтамасыз етеді, бұл іс жүзінде турбинаның аэродинамикалық технологиясының сол деңгейінде жоғары тиімділікке әкеледі. Турбинаға кіре берістегі температура шамамен 650°C (1200°F) құрады. Жоғары температурада және анағұрлым күрделі циклда ПӘК 31% (NHV) асты, бу қазандықтарының қолданыстағы жүйелерімен бәсекелеседі. Турбинаға кіре берістегі температура көмір қыздырғышында пайдаланылатын металлургияның шектеулерімен шектеледі. АҚШ Энергетика министрлігінің жоғары өнімді электр станцияларының бағдарламасы 1990 жылдары сол кездегі жұмыс істеп тұрған көмір қазандықтары үшін АҚШ-тың NSPS-тің оннан бір бөлігін құрайтын

шығарындылардың нормаларын бір мезгілде сақтай отырып, жалпы 47% асатын тиімділікке (HHV) қол жеткізуге бағытталған болатын.

9.3.-мысал. Жабық циклдың газ турбинасының бірінші ηI тиімділік заңы үшін $\eta_{\text{комп}}$ компрессордың изэнтропиялық ПӘК, $\eta_{\text{турб}}$ турбинаның ПӘК, $\eta_{\text{ген}}$ генератордың (механикалық шығындармен қоса) ПӘК, $\pi_{\text{комп}}$ және $\pi_{\text{турб}}$ компрессор мен турбина қысымдары коэффициенттерінің (компрессор жағдайында және турбина керісінше жағдайында оның кірісіндегі қысымына дейін айдау қысымының қатынасы, бұл қатынастар жылуды қосу және бұру үшін жылу алмастырғыштардағы қысымның ауытқуы есепке алынатын кезде ерекшеленеді) функциясы ретінде өрнек шығарыңыз, компрессорға кірудегі абсолютті температура $T_{\text{комп,вх}}$, турбинаға кірудегі абсолютті температура $T_{\text{турб,вх}}$, және k – тұрақты қысымның C_p меншікті жылу сыйымдылығының мінсіз жұмыс газы үшін тұрақты көлемнің C_v меншікті жылу сыйымдылығына қатынасы, мұндағы k жылудың тұрақты және елеусіз шығыны болып қалады. Алынған өрнекті пайдаланып, η_I бір атомды (мысалы, He), екі атомды (мысалы, N_2) және үш атомды (мысалы, CO_2) газ үшін жұмыс сұйықтығы ретінде төмендегі параметрлерімен салыстырыңыздар: $\eta_{\text{комп}} = 0.88$, $\eta_{\text{турб}} = 0.9$, $\eta_{\text{ген}} = 0.97$, $\pi_{\text{комп}} = 10$, $\pi_{\text{турб}} = 8$, $T_1 = 310$ K и $T_2 = 1100$ K.

Шешуі:

Газ турбинасы шығаратын пайдалы қуат (3.28) теңдеуге сәйкес өндірілетін турбинаның қуаты мен (3.25) теңдеумен көрсетілген, $\eta_{\text{ген}}$ -ге көбейтілген компрессормен тұтынылатын қуаты арасындағы айырманы білдіреді. Осы теңдеулерде көрініс тапқан көлемді шығын мінсіз газ үшін былай жазылуы мүмкін:

$$\dot{V}_{\text{кпр.}} = \frac{\dot{m} R_u T_{\text{кпр.}}}{M_w P_{\text{кпр.}}}$$

мұндағы m – газдың жаппай шығыны, R_u – әмбебап газ тұрақтысы, M_w – молекулалық масса, ал $T_{\text{кпр.}}$ және $P_{\text{кпр.}}$ – шығыстағы температура және қысым. Бұл қатынасты пайдалана отырып, газ турбинасы шығаратын пайдалы қуаты былай жазылуы мүмкін:

$$\dot{W}_{\text{пайд.}} = \frac{k \dot{m} R_u \eta_{\text{ген}}}{(k-1) M_w} [T_{\text{турб,вх.}} \eta_{\text{турб}} \{1 - \left(\frac{1}{\pi_{\text{турб}}}\right)^{(k-1)/k}\} - \frac{T_{\text{комп,вх.}}}{\eta_{\text{комп}}} \{(\pi_{\text{комп}})^{(k-1)/k} - 1\}] \quad 9.7$$

Циклға қосылған жылу беріледі:

$$\dot{Q}_{\text{вх.}} = (\dot{m} C_p) (T_{\text{турб,вх.}} - T_{\text{комп,вых.}}) \quad 9.8$$

$T_{\text{комп,шығ.}}$ компрессор шығысындағы температура компрессор талап ететін қуат үшін келесі қатынасты шешу жолымен оның кірісіндегі температурасымен байланысты болуы мүмкін:

$$\dot{W}_c = (\dot{m} C_p) (T_{\text{комп,вых.}} - T_{\text{комп,вх.}}) = \frac{k \dot{m} R_u T_{\text{комп,вх.}}}{(k-1) M_w \eta_{\text{комп}}} [(\pi_{\text{комп}})^{(k-1)/k} - 1]$$

нәтижесінде 9.9 теңдеуінде:

$$T_{\text{комп,вых.}} = T_{\text{комп,вх.}} + \frac{k R_u T_{\text{комп,вх.}}}{(k-1) C_p M_w \eta_{\text{комп}}} [(\pi_{\text{комп}})^{(k-1)/k} - 1] \quad 9.9$$

9.7-9.9 теңдеулерін біріктіре отырып, біз $R_u C_p M_w = k - 1$ екенін байқасақ, бірінші заңның тиімділігін былай жазуға болады:

$$\eta_I = \eta_{\text{ген}} * \frac{T_{\text{турб,вх.}} \eta_{\text{турб}} [1 - (1/\pi_{\text{турб}})^{(k-1)/k}] - (T_{\text{комп,вх.}}/\eta_{\text{комп}}) [(\pi_{\text{комп}})^{(k-1)/k} - 1]}{T_{\text{турб,вх.}} - T_{\text{комп,вх.}} \{1 + (1/\eta_{\text{комп}}) [(\pi_{\text{комп}})^{(k-1)/k} - 1]\}} \quad (9.10)$$

Үш газ үшін үлестік жылудың, сондай-ақ бірінші заң бойынша тиімділіктің берілген сандық мәндерді туынды газға қою жолымен есептелген қатынасы.

9.3.-КЕСТЕ. Жабық циклды газ турбины үшін бірінші заңға қатысты тиімділік

Газ түрі (мінсіз)	Бір атомды	Екі атомды	Үш атомды
k үлестік жылу қатынасы	1.67	1.40	1.29
η_I тиімділіктің бірінші заңы	9.99%	24.27%	22.91%

9.10 теңдеуі бұрын 9.3-кестеде берілген. Бұл тиімділік әрбір газ үшін оңтайлы болып табылмайды, өйткені қысым қатынасы тұрақты ұсталып тұрды. Тиімді ПӘК-ке сәйкес келетін қысым қатынасы 9.10 теңдеуін пайдалана отырып, оңай есептелуі мүмкін және бір атомды газ үшін ең төмен болады, сонымен қатар үш газ түрі арасында үш атомды газ үшін ең жоғары болады.

ӘДЕБИЕТ

- Armstrong PA. ITM oxygen: The new oxygen supply for the new IGCC market. Gasification Technologies Conference; October 2005; San Francisco, CA.
- Butz JR, Lovell JS, Broderick TE, Sidwell RW, Turchi CS, Kuhn AK. Evaluation of amended silicates™ sorbents for mercury control. Proceedings of the Mega Symposium; May 2003; Washington, DC.
- Chapel DG, Mariz CL, Ernest J. Recovery of CO₂ from Flue Gases: Commercial Trends. Canadian Society of Chemical Engineers Annual Meeting; October 4-6, 1999; Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Dennis RA. DOE advanced turbine program ceramic material needs for advanced hydrogen turbines. U.S. Advanced Ceramics Association Spring Meeting; May 2008; Arlington, VA.
- Ganapathy V. Cold end corrosion: Causes and cures. Hydrocarb Process January 1989;57-59.
- Gangwal SK, TurkBS, Coker D, Howe G, Gupta R, Kamarthi R, LeiningerT, Jain S. Warm-gas desulfurization process for Chevron Texaco Quench gasifier syngas. 21st Annual Pittsburgh Coal Conference; 2004; Pittsburgh, PA.
- Hada S, Masada J, Ito E, Tsukagoshi K. Evolution and future trend of large frame gas turbine for power generation—A new 1600 degree C, J class gas turbine. GT2012-68574. Proceedings of ASME Turbo Expo; June 2012; Copenhagen, Denmark.
- Hannemann F, Kanaar M. Operational experience of the buggenum IGCC plant and enhanced V94.2 gas turbine concepts for high syngas reliability and flexibility. Gasification Technologies Conference; October 2002; San Francisco, CA.
- Keeler CG. Wabash river in its fourth year of commercial operation. Gasification Technologies Conference; October 1999; San Francisco, CA.
- Krishnan GN, Gupta R, Ayala RE. Development of disposable sorbents for chloride removal from high-temperature coal-derived gases. U.S. Department of Energy Report; 1996. Report nr. DOE/MC/30005-97/C0748. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Martinez-Frias J, Aceves S, Smith JR, Brandt H. Thermodynamic analysis of zero-atmospheric emissions power plant. ASME International Conference; November 2002; New Orleans, LA.
- McDaniel JE, Shelnut CA. Tampa electric company polk power station IGCC project—project status. Gasification Technologies Conference; October 1999; San Francisco, CA.
- Pierce RR. Estimating acid dewpoints in stack gases. Chem Eng 1977;11:125-128.
- Rao AD, Francuz DJ, Scherffius J, West E. Electricity production and CO₂ capture via partial oxidation of natural gas. Prepared by Fluor Daniel Inc., CRE Group Ltd Report; April 2000. Report nr. PH3/21. IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, U.K.
- Rao AD, Verma A, Samuelsen GS. Acid gas removal options for the FutureGen plant. Clearwater Coal Conference; April 2005; Clearwater, FL.
- Rao AD, Francuz DJ, Maclay JD, Brouwer J, Verma A, Li M, Samuelsen GS. Systems analyses of advanced Brayton cycles for high efficiency zero emission plants. Prepared by University of California, Irvine, U.S. Department of Energy Report. December 2008. Available at <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/951990>. Accessed December 4, 2014.
- Rhudy R. Retrofit of CO₂ capture to natural gas combined cycle power plants. Prepared by The International Energy Agency Greenhouse Gas Program for EPRI Report; 2005. EPRI, Palo Alto, CA.
- Roark SE, Machay R, Sammells AF. Hydrogen separation membranes for vision 21 energy plants. 28th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems; March 10-14, 2003; Clearwater, FL.
- Sanz W, Jericha H, Luckel F, Gottlich E, Heitmeir F. A further step towards a Graz cycle power plant for CO₂ capture. ASME Turbo Expo; June 6-9, 2005; Reno-Tahoe, NV.
- Smith D. *H System Steams On*. Modern Power Systems; February 2004, 17-20.
- Stiegel GS, Longanbach JR, Klett MG, Maxwell RC, Rutkowski MD. The cost of mercury removal in an IGCC plant. U.S. Department of Energy Final Report; September 2002. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Trapp W, Denton D, Moock N. Gasification plant design and operation considerations. Gasification Technologies Conference; October 2002; San Francisco, CA.

10

Ілеспе өндіріс және когенерация

Биомассада жұмыс істейтін көмір электр станциялары мен электр станцияларындағы синтетикалық отын мен химиялық элементтердің ілеспе өндірісі электр энергиясын өндіру мен когенерация арасындағы синергияның арқасында, әсіресе желідегі энергияның үлкен үлесін қамтамасыз ететін жаңартылатын энергия көздерінің тұрақсыздығы себебінен өзіне елеулі назар аударады. 12-тарауда үздіксіз қоректендіру көздерінің тұрақсыз жаңартылатын энергия көздерінің шығысы төмендегенде және керісінше пайда болатын сұранысты қанағаттандыру үшін өзінің шығу қуатын тез арттыру немесе азайту мүмкіндігінің маңыздылығы талқыланады. Отын ретінде энергоблокқа түсетін синтез-газдың ыдырауының өзгеруі бірлескен өндіріс блогына көшумен салыстырғанда бұл мүмкіндікті біріктірілген газдандырудың құрамдастырылған циклы бар қондырғыларда (БГҚЦ – integrated gasification combined cycle (IGCC) пайдалануға мүмкіндік береді. Ілеспе өндіріс сонымен қатар отын элементінде электр энергиясына түрлендірілген байланысты отын энергиясының үлесін өзгерту жолымен осы мүмкіндікті көздейтін отын элементі (11-тарауда талқыланады) негізіндегі қондырғыда жүзеге асырылуы мүмкін.

Көміртегі шығарындыларын бақылау үшін газ турбинасында оны жағу алдында синтез-газды декарбонизациялауды талап ететін БГҚЦ қондырғысында H_2 ілеспе өндірісінің үлес құны әсіресе тартымды. Әр түрлі синтезделген ілеспе өнімдер 10.1-суретте көрсетілген. Табиғи газбен жұмыс істейтін электр станцияларын ілеспе өндірісті есепке ала отырып жобалауға болады. Кейбір негізгі ілеспе өнімдерді синтездеу үдерістерімен бірге талқыланатын ілеспе өндірістің басқа да артықшылықтары бар және, ақыр соңында, табиғи газды да, БГҚЦ циклын да пайдаланатын бірлескен өндіріс қондырғыларын интеграциялау тұжырымдамаларының кейбіреулері.

10.2 Ілеспе өндіріс үдерісінде синтетикалық газдарды алу

Көмір мен биомассада жұмыс істейтін зауыттарда, сондай-ақ табиғи газдағы бірлескен өндіріс қондырғыларында синтез-газ алу үшін негізгі реакторлар тиісінше газификаторлар және риформинг қондырғылары болып табылады. Ығысу реакторлары H_2 : CO дұрыс стехиометриялық арақатынасымен синтез блогына газ беруді қамтамасыз ету үшін бірлескен өндіріс қондырғыларының көпшілігінде де қажет (ал синтез-газдағы CO_2 қажетті концентрациясы шығуда қышқыл газды жою кезінде реттеледі (КҚГ acid gas removal (AGR))). Бұл реакторлар келесі тармақтарда талқыланады.

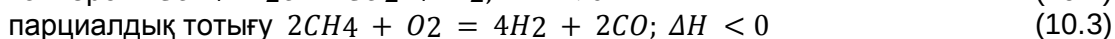
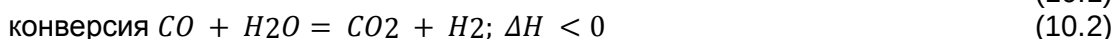
10.2.1 Газ генераторлары

9-тарауда сипатталғандай, отындағы (шикізаттағы) көміртектің ішінара тотығу реакциясы $C + \frac{1}{2}O_2 = CO$ және H_2O экзотермиялық реакцияны білдіреді, бу немесе сұйықтық түрінде $c + H_2O = H_2 + CO$ эндотермиялық реакцияның температурасын елеусіз төмендету үшін газ генераторына енгізіледі. Басқа реакциялар $CO + H_2O = H_2 + CO_2$ су газының ығысуының экзотермиялық реакциясын және гидро-, газдандырудың $C + 2H_2 = CH_4$ жоғары экзотермиялық реакциясын қамтиды, бірақ тек шектеулі дәрежеде ғана және көптеген газ генераторларының өндіретін CH_4 көп бөлігі ұшпа заттардың шикізатқа ыдырауынан болады. Күкірт негізінен COS кейбір санымен H_2S түрінде бөлінеді, ал басқа күкірт қосылыстары, мысалы CS_2 және меркаптандар сияқтылар газогенератордың жұмыс температурасы жоғары болған кезде ($> 1100\text{ C}$) болмашы мөлшерде пайда болады. Азот негізінен элементті N_2 , аз мөлшерде NH_3 , және газ генераторының жұмыс температурасы жоғары кезде HCN түрінде әлдеқайда аз мөлшерде бөлінеді. Шикізат бар Cl негізінен HCl түрінде бөлінеді.

Қатты бөлшектердің газ генераторы арқылы қалай өтетініне байланысты жіктелген газ генераторларының үш негізгі түрі бар: жылжымалы қабаты бар газ генераторы, жалған сұйытылған қабаты бар газ генераторлар және 9-тарауда толығырақ сипатталғандай, ұлғайтылған қабаты бар газ генераторы. Синтез-газдағы CH_4 құрамының неғұрлым жоғары болуы бірқатар себептер бойынша (табиғи газды алмастырғышты немесе TGA – substitute natural gas (SNG) қоспағанда) көптеген ілеспе өнімдерді синтездеу үшін оны пайдалануды шектейді. Бірлескен өндіріс қондырғыларында декарбонизация дәрежесі (CO_2 шығарындыларын бақылау үшін) газ турбинасы үшін отын ретінде пайдаланылатын синтез-газ CH_4 нақты құрамымен шектелген. CO және H_2 көптеген ІӨ-өнімдер (ілеспе өнімдер) үшін құрылыс блоктары болып табылады, ал CH_4 C және H атомдарын, "байланыстырады", әйтпесе CO және H_2 әрі демек іө-өнімін алу үшін пайдаланылуы мүмкін. Бұдан басқа CH_4 құрамы инертті газдың жинақталуын шектеу үшін синтез блогынан үрлеу буының санын арттыруды талап ете отырып, реагенттердің парциалды қысымын (H_2 , CO, және CO_2) төмендетеді, себебі үдерістердің көпшілігі жалпы конверсияны арттыру үшін синтездеу реакторына газ кері қайтады. H_2 және CO CH_4 түрлендіру үшін синтез-газды тазартқаннан кейін, риформингті қолдануға болады, алайда оны қосу қондырғы құны мен жұмыс күрделілігін арттырады.

10.2.2 Риформинг-қондырғылар

Табиғи газдан синтез-газды алу үшін қолданылатын каталитикалық риформинг қондырғылары бұл – бу метан реформаторы (БМР – steam methane reformer (SMR), автоотермиялық реформатор (АТР – auto-thermal reformer (ATR) және олардың комбинациясы. Ni негізіндегі катализатор қолданылады және БМР-да болатын негізгі жалпы реакциялар (10.1) және (10.2) реакцияларымен анықталады, ал келесі реакциялардың барлық үшеуі АТР-да болады:



10.2.2.1 БМР.

Риформинг-қондырғының бұл түрі эндотермиялық реакция (10.1) үшін талап етілетін жылуды қамтамасыз ету үшін қыздырылатын реактор болып табылады және оттықта орналасқан бірнеше катализатормен толтырылған құбырлардан тұрады.

Алдын ала қыздырылған (500-650°C дейін) десульфурленген табиғи газдың қоспасынан (никель катализаторымен улануды болдырмау үшін) және будан тұратын шикізат құбырларға беріледі және риформинг-қондырғы реакциясы негізінен 700-ден 1100°C дейін температура диапазонында болады. Бу катализатордың бетінде $2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$ Будуар реакциясын қолдану арқылы күйе түзілуін және көміртектің шөгуін болдырмау үшін, сондай-ақ жабдықтар мен құбырларда 400-750°C жуық сындарлы температура диапазонында ағын бойынша төмен шаң түзілуін болдырмау үшін қосылады. Металл шаңы коррозияның маңызды мәселесі болуы мүмкін. От жағу отын (табиғи газ) жағу үшін жанарғылармен жабдықталған және жылу құбырға беру сәулелену және конвекция есебінен жүргізіледі. Оттықтан ағын бойынша төмен қарай конвективті секция орналасқан, онда реформаланатын табиғи газ алдын ала қыздырылады, бу генерацияланады және қыздырылады, бу қазандығы алдын ала қыздырылады және риформинг-қондырғыдағы шикізат (алдын ала реформатор қосылған кезде, әсіресе табиғи газ құрамында жоғары көмірсутектердің едәуір мөлшері бар кезде) қыздырылады. Алдын ала риформинг-қондырғы (түрлендіргіш) адиабаттық төмен температуралы бу реформаторы (қозғалмайтын қабаты бар реактор) болып табылады және жоғары көмірсутектерді алдын ала түрлендіру БМР үшін тұрақты және қатаңдығы аз жұмыс жағдайларына алып келеді, осылайша оның сенімді жұмысын қамтамасыз етеді және реформатор құбырының қызмет ету мерзімін ұлғайтады. Будың мөлшері (әдетте берілетін қоспадағы H_2O -ға C молярлық қатынасы ретінде көрінеді), сондай-ақ азаяды және осылайша, отынның жалпы шығыны азаяды.

Аз масштабты қолдану үшін қолайлы кейбір конструкцияларда сәулелену секциясы алынып тасталды және реформатордың реакциялары үшін қажетті барлық жылу "жылу алмасу реформаторында" конвекциямен қамтамасыз етіледі. Ол құбырлардың әрбір жиынтығы үш концентрлік құбырлардан тұратын құбыр шоғырынан тұрады. Жану камерасынан түтін газы ең сыртқы құбыр мен екінші ішкі құбыр арасындағы сақиналы кеңістік арқылы өтеді, алдын ала қыздыру және риформинг реакциялары үшін жылуды қамтамасыз етеді, ал реформаланатын газ екінші ішкі құбыр мен құбыр арасындағы катализатормен толтырылған сақиналы кеңістік арқылы өтеді, ал жылуды алдын ала қыздырылған және реформаланған газдармен бере отырып. Бұл конструкцияның артықшылығы Отын жағу кезінде бөлінетін жылудың едәуір жоғары үлесі алдыңғы БМР конструкциясына қарағанда түрлендіру үдерісі үшін пайдаланылады, онда жылудың едәуір үлесі бу жүйесіне беріледі.

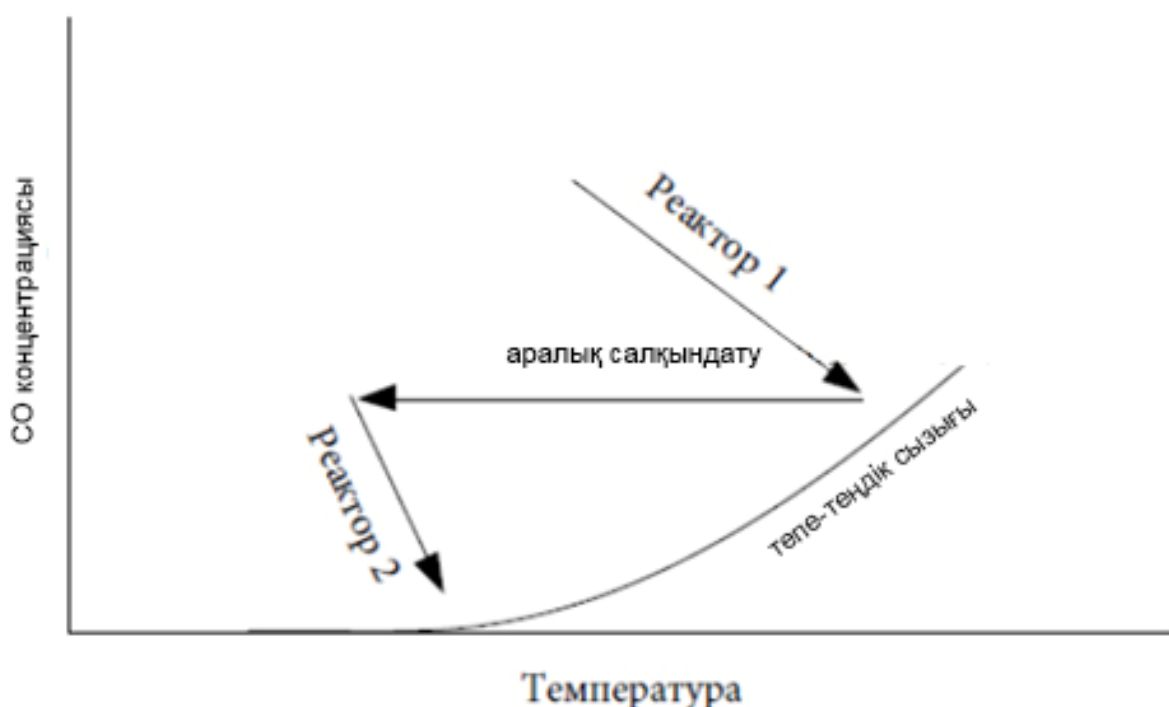
10.2.2.2 АТР. Риформинг-қондырғының бұл түрі жоғарыда жану аймағын және катализатормен толтырылған төменде қозғалмайтын қабатты қамтиды. Суб-стехиометриялық O_2 санымен (немесе NH_3 синтезі жағдайында ауа) араласқан табиғи газ жану аймағында жағылады және аралық рециркуляция секциясы арқылы өтеді, онда ыстық газ ден қоюды жалғастырады. Содан кейін газ катализаторы бар төменгі бөлікке келіп түседі және химиялық тепе-теңдікке жақындап, әдетте 850-ден 1000°C дейінгі температурада қабаттан шығады. АТР синтез-газды үлкен көлемде алу үшін қолайлы, әсіресе Фишер-Тропш сұйықтықтарын синтездеу үшін қажетті H_2 -нің CO -ға деген салыстырмалы түрдегі төмен қатынасына ие (1,5-3 моль) газ алу үшін қолайлы. CO_2 , синтез-газдан ауысымды қондырғыдан ағынмен төмен бөлінген, сондай-ақ H_2 CO -ға төмен арақатынасына қол жеткізу үшін қайта өңделуі мүмкін.

10.2.2.3 Құрамдастырылған БМР және АТР. Риформинг-қондырғылардың екі түрі қолданудың белгілі бір жағдайларында H_2 -ге қажетті қарым-қатынасына байланысты біріктірілуі мүмкін, бұл ретте БМР талап етілетін жылу БМР-ға отынды жағу қажеттілігінсіз АТР-дан ыстық қалдық газбен беріледі. Бұл конфигурация метанол синтезі үшін H_2 немесе синтез-газ өндіру үшін пайдаланылды. Мұндай жағдайларда газмен жылытылатын БМР – бұл, ең алдымен, жылу алмастырғыш. Көміртекті және металл шаңды шөгумен байланысты проблемаларды болдырмау үшін будың дұрыс мөлшері, сондай-ақ жұмыс қысымын шектеу қажет.

10.2.3 Конверсия реакторлары

Адиабатикалық ығысу реакторы газ генераторы немесе риформинг-қондырғымен генерацияланатын синтез-газдағы H_2 -ге CO қатынасын өзгерту үшін $Co + H_2O = CO_2 + H_2$ су газының ығысу реакциясы болатын катализатордың жылжымайтын қабаты бар тік ыдыстан тұрады. Әдетте конверсияны барынша азайту үшін ауаны салқындатумен бір-бірімен байланысқан екі адиабатикалық реактор қолданылады, себебі реакция экзотермиялық болып табылады және тепе-тең конверсия температураның ұлғаюымен азаяды. Екінші реактордан шығу температурасы әлдеқайда төмен, бұл химиялық тепе-теңдік тұрғысынан неғұрлым жоғары конверсияға ықпал етеді. Үдеріс 10.2-суретте CO концентрациясының температурасына байланысты кестеде көрсетілген. CO тепе-теңдігінің концентрациясы температураға байланысты кестеде белгіленген және бірінші реактордағы конверсия оның шығу кезіндегі температурамен шектеледі. Осылайша, ол екінші реакторға түспес бұрын бірінші реактордан шығатын ағысты салқындату кезінде екі реакторда конверсияның жалпы үдерісін жүргізе отырып, анағұрлым жоғары конверсияға қол жеткізуге болады, бұл ретте екінші реактордың шығысындағы температура әлдеқайда төмен және тиісінше оның жоғарғы шегі ретінде CO -ның тепе-теңдік концентрациясы едәуір төмен көрінеді.

Ішкі салқындатқыш ирек құбырлары бар бар "изотермиялық реактор" сияқты адиабатикалық емес реакторлар, сондай-ақ сингазға кіре берістегі CO концентрациясы өте жоғары болғанда пайдаланылады, бірақ синтез-газ өте таза болуы тиіс. Мұндай реакторлар төменде талқыланатын жеңіл жылжуы бар төмен температура кезінде қолданумен шектеледі. ирек құбырлары



10.2-СУРЕТ. Температураның CO концентрациясына тәуелділігі

Конверсия реакторлары әдетте шығатын ағыннан жылудың бір мезгілде қалпына келтірілуі кезінде берілетін газды алдын ала қыздыру үшін беру/ағызудың бірін-бірі алмастыратын компоненттерімен құрастырылады (7.2-мысалды қараңыз) және талап етілетін жылу беруге байланысты электр қыздырғышты немесе жылу алмастырғышты будан қамтамасыз ете отырып, іске қосу кезінде берілетін газды алдын ала қыздыру үшін жылу көзін қарастыру қажет. Бұл қыздырғыштың өлшемі сингаз ағынының толық есептік жылдамдығына сәйкес келуі міндетті емес, себебі қондырғы ағынның жылдамдығы төмен болған кезінде іске қосылуы мүмкін, айталық, ағынның есепті жылдамдығының 25%.

10.2.3.1 Бейтарап конверсия. Синтез-газда күкірт бөлшектері ("бейтарап газ")

болмаған кезде, ол Ni-катализатор негізіндегі әдеттегі риформинг-қондырғымен немесе оның концентрациясы өте төмен болған жағдайда (бейтарап конверсияның кейбір катализаторлары шамамен 100 ppmv алып жүреді), Fe_2O_3 және Cr_2O_3 бар катализаторлар жоғары температура жағдайында (жұмыс ауқымы $\sim 350-480^\circ\text{C}$) қолданылады. Кейбір құрамдарда CuO бар, бұл Фишер-Тропш реакцияларымен көмірсутектерді алудың осыған байланысты проблемасыз будың газға қатынасын төмендетуге мүмкіндік береді. Орташа (жұмыс ауқымы $\sim 200-320^\circ\text{C}$) немесе төмен (жұмыс ауқымы $\sim 200-260^\circ\text{C}$) температуралық режимдер үшін CuO , ZnO және Al_2O_3 бар катализаторлар қолданылады. Жүйенің конструкциясы реакцияны бастау үшін қажетті кіре берістегі ең аз температураның ұлғаюын және катализатордың қартаюына қарай CO конверсиясының төмендеуін (біртіндеп дезактивацияланады) ескеруі тиіс. Реактор(лар) мен жылу алмастырғыш(тар) синтез-газ фракциясы реакторды (ларды) айналып өтетіндей етіп құрастырылуы мүмкін, сондықтан катализатордың тозуына қарай байпас фракциясы CO жалпы конверсиясын бақылау үшін азайтылуы мүмкін, яғни конверсия блогынан шығатын синтез-газдағы CO және H_2 белгілі бір арақатынасын ұстап тұру мүмкін. Реакторға берілетін газ катализатор бойынша H_2O буының конденсациялануын болдырмау үшін, өзінің шық нүктесінен жеткілікті түрде жоғары қызуы тиіс, бұл көп катализаторлар мен қатты адсорбенттер үшін типтік талап болып табылады. $20-25^\circ\text{C}$ дейін қызып кету жеткілікті болуы мүмкін, бірақ осы катализаторға қатысты ұсыныстар бойынша катализаторды жеткізушімен кеңесу керек.

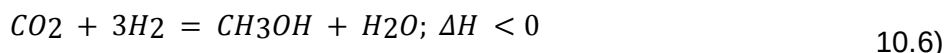
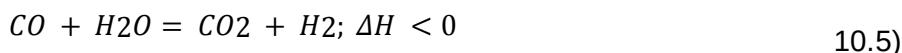
Адиабатикалық емес реакторлардың немесе (дерлік) изотермиялық реакторлардың көмегімен, яғни буды генерациялау үшін реакцияның жылуын беруге арналған ішкі құбырлармен, бірнеше реакторлардың қажеттілігін жоюға болады (аралық салқындатумен), бірақ мұндай реактордың құны жоғары болу үрдісі бар және осы қолданыс түрі үшін реактор(лар)дың дұрыс түрін таңдау үшін ымырашылық жағын мұқият зерттеу талап етіледі.

10.2.3.2. Қышқыл конверсия. Синтез-газ құрамында күкірттің H_2S және COS ("қышқыл газ") сияқты түрлері бар кезде, синтез-газ көмірді немесе құрамында күкірті бар басқа шикізатты газдандыру нәтижесінде пайда болған жағдайда, күкірттің осы түрлерімен уланбаған катализаторлар COO , Mo_2O_3 және Al_2O_3 алынған құрамда патенттелген промоторлары бар және сульфидтеумен белсендірілген құрамында пайдаланылады. Мұндай катализаторлар үшін жұмыс температурасының диапазоны өндірушіге байланысты; ең төменгі кіру температурасы шамамен 200°C болуы мүмкін, ал шығу температурасы нақты рецептіге байланысты шамамен 430°C жетуі мүмкін. "Бейтарап конверсия" бөлімінде түсіндірілгендей, кіруде қажетті температураның өзгеруін және катализатор жасына байланысты CO конверсиясын жүйені жобалау кезінде ескеру керек. Тағы да реактор(лар) мен жылу алмастырғыш(тар) реакторды айналып өтіп, катализатордың ескіру шамасына қарай синтез-газдың бір бөлігі CO конверсиясын бақылайтындай етіп құрастырылуы мүмкін. Сульфидтелген катализаторлар үшін олардың көлемі бойынша шамамен 100 ppmv құрайтын белсенділігін қолдауға арналған синтез-газдағы күкірт бөлшектерінің ең аз концентрациясы талап етіледі, бірақ неғұрлым жоғары концентрациялар катализаторды оңтайлы сульфидтелген күйде ұстап тұру үшін қолайлы болуы мүмкін. Синтез-газда болатын кез келген COS көптеген жұмыс жағдайларында H_2S дейін гидрацияланады немесе гидролизденеді, ал HCN , CH_4 және NH_3 дейін гидрацияланады. Синтез-газдағы H_2O ең аз концентрациясы Буда реакциясы (Boudouard reaction) арқылы катализатор бетінде көміртектің түзілуі мен шөгуін болдырмау үшін, сондай-ақ көмірсутектер түзілген Фишер-Тропш реакцияларын болдырмау үшін талап етіледі. Бұл H_2O және CO арасындағы моллярлы қатынас арқылы анықталатын H_2O -ның ең аз концентрациясы 2,0 (CO конверсиясы үшін стехиометриялық талаптан екі есе көп) жетуі мүмкін. Тағы да, реакторға берілетін газ катализатор бойынша H_2O конденсациясын болдырмау үшін, H_2O еру температурасынан $20-25^\circ\text{C}$ жоғары температураға дейін қызады.

10.3 БІРНЕШЕ НЕГІЗГІ ІЛЕСПЕ ӨНІМДЕГІ СИНТЕТИКАЛЫҚ ГАЗДЫҢ КОНВЕРСИЯСЫ

10.3.1 Метанол

Төменде метанол синтезі үшін қарастырылатын барлық реакциялар ұсынылған (Тиджн және бірлескен авт., 2001):



Егер тек реакция (10.4) қарастырсақ, онда H_2/CO мольдерімен анықталатын стехиометриялық қатынас немесе сан 2,0 болады. Сондай-ақ су газының конверсия реакциясы (10.5) болған кезде, стехиометриялық санды түзету керек, өйткені H_2 молі CO алу үшін CO_2 әрбір молине жұмсалады.

Тиісті стехиометриялық арақатынас немесе есепке алынатын сан (H_2 мольдері – CO_2 мольдері) / (CO мольдері + CO_2 мольдері) артады және стехиометриялық талаптан аздаған асу, әдетте, синтездің қарапайым газфазалық реакторларында 2,05 артуы пайдаланылады. Алдыңғы реакциялардың тек екеуі ғана термодинамикалық тәуелсіз болып табылатынына назар аударыңыз; реакция (10.6) (10.4) және (10.5) реакцияларының комбинациясы арқылы алынуы мүмкін. (10.4) реакциясы тепе-тең конверсияға төмен температура мен жоғары қысымның ықпал ететінін көрсетеді. Шамадан тыс жоғары қысым қымбат жабдықты талап етеді (жабдықтың геометриялық өлшемі қысымның ұлғаюымен азаяды және әдетте мөлшері мен ыдыс әлде құбыр қабырғасының қалыңдығы арасында ымыра болады). Жылдар бойы метанол синтезі реакторларындағы жұмыс қысымы негізінен белсенді болған Cu және Zn -дан тұратын катализаторларды қолдану есебінен төмендеді. Жаңа катализатор мыс оксидінен тұрады, ол кейін CO көмегімен оның белсенді металл түріне дейін қалпына келтіріледі. Метанол каталитикалық синтезінің реакторына CO байытылған синтез-газ берілгенде, металл бөлшектерінің (Куртц және бірлескен авт., 2003) күшті бірігуін туғызу мүмкін.

LPMEOH технологиясы бойынша Air Products компаниясы әзірлеген метанолдың сұйық фазасын синтездеу үдерісі 10.3-суретте (Гэйдорн және бірлескен авт., 2003) кескіндеу мақсатында көрсетілген. Теннесси Штатындағы Кингспортта Eastman Chemical кешенінде салынған демонстрациялық қондырғы көмірден алынған синтез-газды конверсиялау кезінде күніне 80 000 галлон (303 м^3) метанол өнімділігі кезінде табысты жұмыс істеді. Жұмыс істеу үшін не үздіксіз базалық жүктеме режимінде, не үзілістермен процес жеткілікті тұрақты екені көрсетілді және оны тез өсіруге және азайтуға болады, бұл мезгіл-мезгіл жаңартылатын энергия көздерін толықтыратын бірлескен өндірісті орнату үшін қажет. LPMEOH технологиясында инертті минералды майда суспензияланған ұсақ дисперсті ұнтақ түріндегі коммерциялық қол жетімді метанол катализаторы қолданылады. Бұл технологияның басқа ерекшелігі таза синтез-газды H_2 , CO , және CO_2 арасындағы қатынас үшін талап етілетін қандай да бір түзетулерсіз тікелей синтез блогына беруге болады, бұл су газының ығысуына және CO_2 жою блоктарына байланысты шығындарды төмендетуі мүмкін. Демонстрациялық зауытта жиналған деректер H_2 CO -ға молярлық қатынасы 1-ден төмен болған кезде дезактивацияның ерекше жылдамдығы байқалмағанын көрсетті. Осы H_2 -нің CO -ге қатынасы үшін синтез-газдағы CO_2 құрамы жоғары болған сайын тазартылмаған метанолдағы ылғал мөлшері соғұрлым жоғары болады, бұл тазартылмаған метанолды тазарту үшін қажетті төмендеу дистилляциясын орнатуға пайдалану және күрделі шығындарды арттырады. Мұқият жүйелік талдау осы компромисс негізінде синтез-газдағы CO_2 оңтайлы құрамын анықтау үшін қажет, әсіресе көміртекті ұстап қалу және алып тастауды қамтитын бірлескен өндіріс қондырғыларында, өйткені кез келген жағдайда синтез-газды декарбонизациялауды орнату қосылған, бірақ оның мөлшері ұлғайтылуы мүмкін. Синтез газ табиғи газдан БМР-ға

алынған кезде БМР-дан шығатын түтін газынан CO_2 алу тиімді (9-тарауда сипатталған аминмен үдерісті пайдалана отырып) және оны H_2 , CO , және CO_2 арасындағы арақатынасты оңтайландыру үшін синтез блогының бастапқы газына қосу керек. Табиғи газ сутегіне бай шикізат болып табылады, яғни жанудан кейін ұстап қалу үшін қол жетімді немесе әзірленетін CO_2 ұстау технологияларын пайдалану жолымен .

H_2 , CO , және CO_2 арасындағы қажетті арақатынасы бар десульфурленген сингаз синтез блогына беріледі, онда ол алдымен кез келген карбонилдерді жою үшін қорғаныс қабаты арқылы өтеді (9-тарауда көрсетілгендей), синтез-газ көмір және мұнай коксы сияқты шикізаттан түзіледі, кейіннен синтез сұлбасындағы қажетті қысымға дейін сығылады (56 бар шамасында).

Содан кейін ол синтез-циклдың рециркуляциясы кезінде синтез-газбен біріктіріледі; бірлескен өндіріс қондырғысында үрлеумен және газ турбинасына берумен салыстырғанда қайта өңделген синтез-газ үлесі жүйелік талдауды жалпы зерттеу нәтижесінде алынған нәтижелерге байланысты болуы немесе тәуелді болмауы мүмкін. Біріккен ағын кейіннен беру / шығару алмастырғышында алдын ала қыздырылады және содан кейін синтез-газға қалған кез келген COS түрлендіру үшін COS гидролиз реакторы арқылы H_2S -ге өткізеді, көмір және мұнай коксы сияқты күкірті бар шикізаттан синтез-газ генерацияланады. Содан кейін оны инертті көмірсутекті сұйықтықта өлшенген катализатордың ұсақ бөлшектері бар шлам реакторына (минералды май) береді. Минералды май ішкі құбырлы жылу алмастырғышта қайнаған суда сұйық суспензия арқылы катализатордың бетінен жылу реакциясын бере отырып, температураны баяулатушы және жылуды бұру құралы ретінде әрекет етеді. Орташа қысымның буы жылудан жасалады. Берілетін газдағы CO құрамы жоғары болғанда, реакторда бөлінетін жылу мөлшері де жоғары болады, бірақ сұйық фазалы реактордағы неғұрлым тиімді жылу алмасу бүкіл реактор бойынша біркелкі температураны ұстап тұруға мүмкіндік береді. Бұл сондай-ақ конверсияның анағұрлым жоғары дәрежесін қамтамасыз етеді, ал рециркуляцияның өту жолдарының қажетті саны газ фазалы реакторларды пайдалана отырып, әдеттегі синтезімен әдеттегі 5:1-ден тек 1:1-ге дейін азаяды. Реактордан шығатын ағын $260^{\circ}C$ температурада бірқатар жылу алмастырғыштарда, оның ішінде беру/шығару жылу алмастырғыштарында салқындатылады. Жиналған конденсат содан кейін метанолды тазалау қондырғысына беріледі. Метанол мен судан басқа көмірсутектер (C_{12} дейін), жоғары спирттер (C_2-C_5), күрделі эфирлер, кетондар, қарапайым эфирлер мен аминдер сияқты әлдеқайда аз фракцияларда басқа қосылыстар пайда болады. Тазалау блогы еритін жеңіл компоненттерді (негізінен газдарды) жоюға арналған жарық ұштары бар колонкадан және талап етілетін ерекшеліктерге сәйкес метанол өндіру үшін энергия үнемдейтін интеграцияланған жылу дистилляциялайтын колонкалардың жиынтығынан (төмен қысымды колонканың қабырғасы үшін жылуды қамтамасыз ететін жоғары қысымды баған) тұрады. 10.1-кестеде ол өзі (м-100) пайдаланғанда, яғни бензинмен араластырмай, автомобиль отыны үшін талап етілетін заттар көрсетілген, ал 10.2-кестеде химиялық тазалықтағы метанолдың жиынтық мәліметтері келтіріледі.

10.3.2 Несепнәр

Несепнәр синтезі жүргізілетін үдерістің сатысы Fe катализаторының қатысуымен N_2 мен H_2 өзара әрекеттесуі арқылы NH_3 синтезінен тұрады, бұл ретте H_2 су газының конверсия реакциясының көмегімен, кейіннен десульфуризациялау және H_2 таза ағының қалыптасуымен CO_2 бөлу арқылы синтез газдан алынады. NH_3 синтезіне жалпы реакция



CCS-мен O_2 үрлеумен газдандыру негізінде бірлескен өндірістік қондырғыға келетін болсақ, көмірсіз сингаздың бір бөлігі жоғары таза H_2 алу үшін айнымалы қысыммен (pressure swing adsorption PSA) адсорбцияға беріледі, ол содан кейін ауаны бөлу блогымен қамтамасыз етілетін N_2 стехиометриялық санымен біріктіріледі. Қоспаны дезоксигендеу қажет, өйткені N_2 -де аз мөлшерде O_2 бар. Дезоксигенирлеу реакциясы асыл металдан жасалған катализатордың қатысуымен O_2 мен H_2 өзара әрекеттесуі арқылы жүзеге асырылуы мүмкін.

10.1-КЕСТЕ. Автомобиль отындарының ерекшелігі (Калифорния әуе ресурстары кеңесі белгілеген М-100)

Ерекшелік	мәні	тестілеу әдісі
Метанол	≥ 96 об. %	дистилляция диапазонымен анықталады
Дистилляция ауқымы	$4.0^{\circ}C$	ASTMD1078-86; 95% -тік дистилляцияланған көлемде; $64.6 \pm 0.1^{\circ}C$ қамтуы тиіс
Басқа спирттер мен	≤ 2 мас. %	ASTMD4815-89

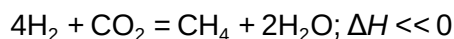
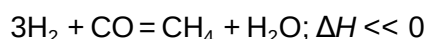
эфирлер		
Көмірсутектер, бензин немесе туынды дизель отыны	≤ 2 мас. %	ASTMD4815-89, содан кейін көмірсутектер пайызын алу үшін 100-ден спирттер, қарапайым эфирлердің және судың концентрациясын шегеріңіз
20°C кезіндегі үлес салмағы	0.792 ± 0.001	ASTMD891-89
Сірке қышқылы түріндегі қышқылдық	≤ 0.01 мас. %	ASTMD1613-85
Хлорид түріндегі жалпы хлор	≤ 0.0002 мас. %	ASTMD2988-86
Қорғасын	≤ 2 мг/1 (без доб. Pb)	ASTMD3229-88
Фосфор	≤ 0.2 мг/1 (тез доб. P)	ASTMD3231-89
Күкірт	≤ 0.002 мас. %	ASTMD2622-87
Гептанмен жабылған тас	≤ 5 мг/л	ASTMD381-86
Барлық бөлшектер	≤ 5 мг/л	ASTMD2276-89, ацетатцеллюлоза сүзгісін тесіктер көлемі 0,8 мкм мембраналық сүзгілермен ауыстыру үшін модификацияланған
Су	≤ 0.3 мас. %	ASTME203-75
Сыртқы пішім	Өлшенген заттар мен шөгінділердің лайсыздығы	25C ASTMD4176-86 болғанда көзбен анықтау
Биттерант	Адамның мақсатты немесе кездейсоқ тұтынуын болдырмау мақсатында қоршаған орта жағдайында тән және жағымсыз дәмі болуы тиіс	
Одорант	Қоршаған орта жағдайында буланған кезде оның болуын ауада тұтанудың төменгі шегінің бестен бір бөлігінен аспайтын концентрацияға дейін анықтауға болатындай жеткілікті күшті сәйкес иісі болуы тиіс.	

10.2-КЕСТЕ. Метанол химиялық сұрыптамасының (AA) техникалық шарттары (АҚШ Федералдық спецификациялары)

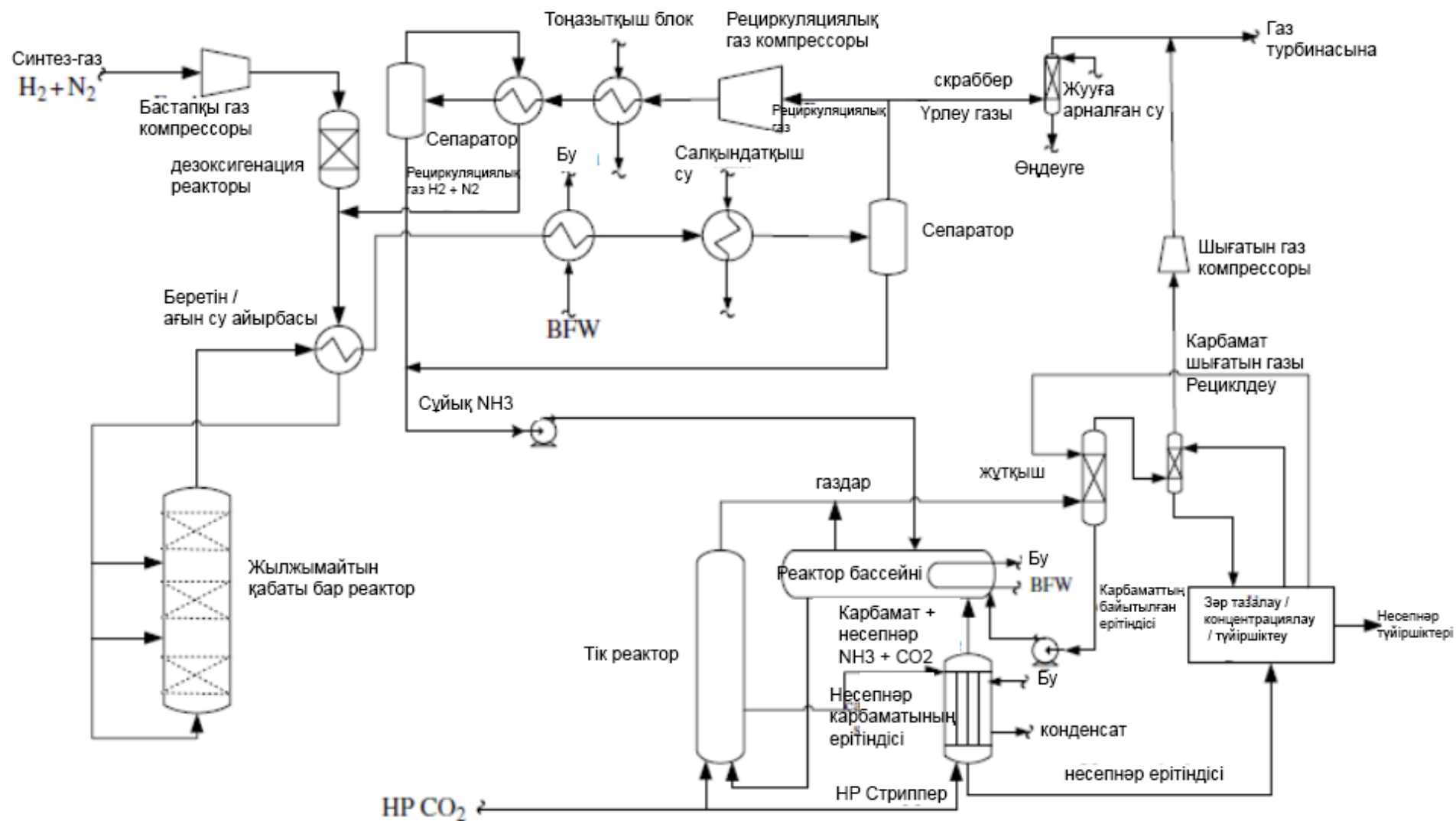
Ерекшелік	мәні	тестілеу әдісі
Метанол	≥ 99.85 масс%	ASTME-346
Су	≤ 1000 ppmw	ASTME-1064
Этил спирті	≤ 10 ppmw	ASTME-346
Ацетон	≤ 20 ppmw	ASTMD-1612

Қышқылдық (сірке суы)	≤30ppmw	ASTMD-1613
Сілтілік (аммоний)	≤30ppmw	ASTMD-1614
Темір	≤0.05ppmw	ASTME-394
Ұшпайтын заттар	≤10mg/100ml	ASTMD-1353
Перманганат (телім. түстер)	≥30min	ASTME-1363
Түсі (pt-Co бағамы)	≤5	ASTMD-1209
25°C кезіндегі үлес салмағы	≤0.7928	ASTMD-891
Бастапқы қайнау нүктесі	64.7±0.2C	ASTMD-1078
760 мм Hg кезіндегі дистилляция диапазоны	≤1.0C	ASTMD-1078 мынаны енгізу тиіс 64.6±0.1C
Еру нүктесі	63.7–65.7C	ASTMD-1078
Арнайы иісі	Тән, қалдық емес	ASTMD-1296
Сыртқы түрі	Айқын	ASTME-346
Көмірсутектер	пасс	ASTMD-1722
Карбонизацияланатындар (pt-Co бағамы бойынша)	<30	ASTME-345

Бастапқы шикізат табиғи газ болып табылса, синтез-газды генерациялау үдерісіне БМР, одан кейін, ауамен үрленетін АТР кіреді, сондықтан NH_3 синтездеу блогына берілетін газ H_2 мен N_2 арасындағы дұрыс стехиометриялық арақатынасы болады. Fe негізіндегі катализатор көміртегі оксидін тасымалдай алмайды және егер ол синтез-газда болса, оны жалпы (қатты экзотермиялық) реакциялар нәтижесінде H_2 -мен реакциялар жолымен метанирлеу керек:

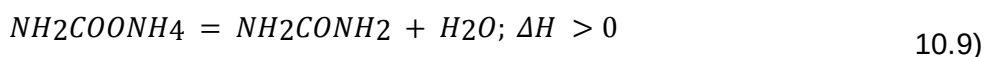
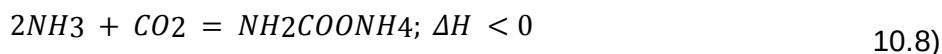


10.4-суретте көрсетілгендей, H_2 -ден N_2 -ге молярлық қатынасы бар синтез-газ 3-тен 1-ге дейін синтез сұлбасындағы қысымнан асатын қысымға дейін қысылады (ол шамамен 120 бар температурада жұмыс істейді) және N_2 ағын ауаны бөлу блогымен берілетін дезоксигенирлеу реакторы арқылы беріледі, содан кейін синтездеу сұлбасындағы рециркуляциялық газбен біріктіріледі. Содан кейін біріккен ағын алдын ала беру / шығару алмастырғышында қыздырылады, содан кейін құрамында Fe негізіндегі катализаторы бар NH_3 синтездеу реакторына беріледі. Реактор реакторға қосылған неғұрлым суық шикізат газымен тікелей араластыру арқылы алдыңғы қабаттан ағыстарды салқындату және осылайша кейінгі қабатқа кіретін газ температурасын шектеу үшін тікелей әрбір қабаттың алдында бірнеше жерлерде енгізілетін шикізат газы бар катализатордың жекелеген қабаттарын қамтиды ("Суық ату" реакторының конфигурациясы). Реактордан шығатын ағын шамамен 400°C температурада, содан кейін беру / шығару аралық жылу алмастырғышты және ақырында салқындатылған жылу алмастырғышты қоса алғанда, жылу алмастырғыштардың қатарында салқындатылады. Жиналған NH_3 конденсаты



10.4-СУРЕТ. Несепнәрге арналған Avanscore технологиясы

конденсаттар 158 бар қысымға дейін айдалады, содан кейін оны кескіндеу мақсаттары үшін таңдалған Stamicarbon ұсынатын Avancore технологиясынан тұратын несепнәр синтезін қондырғыға берер алдында буланады. NH_3 , алдымен, конденсацияның экзотермиялық реакциясы (10.8) нәтижесінде аммоний карбаматы ($\text{NH}_2\text{COONH}_4$) түзіліп, (10.9 бар) синтезді-газды декарбонизациялау, содан кейін карбаматтың несепнәр мен суға дейінгі эндотермиялық дегидратациясы сатысынан берілетін сығылған CO_2 -мен (сондай-ақ 158 бар кезінде) реакцияға түседі (10.9 бар):

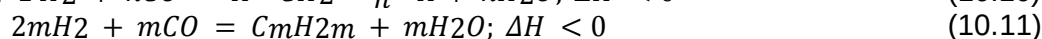
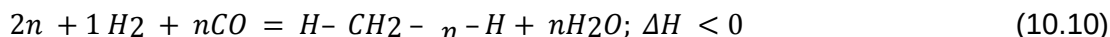


Егер көміртектің сутегіне төмен қатынасы бар табиғи газ сияқты бастапқы шикізат пайдаланылған жағдайда, синтез-газды декарбонизациялау кезеңінен алынған CO_2 жеткіліксіз болуы мүмкін және 9-тарауда сипатталғандай амин технологиясын пайдалана отырып, BMP-ға түтін газынан қосымша CO_2 шығару талап етілуі мүмкін.

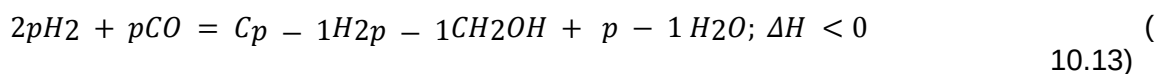
10.4-суретте көрсетілген Avancore (Soemardji және Engineer, 2012) несепнәр жасау технологиясында сығылған NH_3 беру ағын бойынша төмен рециркуляция секциясынан түсетін карбамат ерітіндісімен бірге бассейн реакторына енгізіледі. Карбаматтың диссоциациясы кезінде пайда болатын NH_3 және CO_2 -ден тұратын жоғары қысымды буланған колоннадан шығатын газ, сондай-ақ бассейн реакторына (газ сұйықтық пулы арқылы көпіршік түрінде көтеріледі) беріледі. NH_3 және CO_2 конденсацияланған карбаматтың пайда болуымен реактор бассейнінде ден қояды, сонымен қатар несепнәрге едәуір конверсия жүреді. Реакция кезінде бөлінетін жылу төмен қысымды буды генерациялау арқылы қалпына келтіріледі. Қондырғыға келіп түсетін CO_2 қысымындағы көп бөлігі тік реактордан шығатын карбамид ерітіндісінің несепнәрімен қарсы түйісуі үшін стрипперге түседі. Түсіргіш (құлайтын үлдірдің түрі) оқшаулауды алу үшін жылу энергиясын қамтамасыз ету арналған қаптаманың жағында конденсацияланатын бумен қаптаманың конструкциясынан және түтіктен тұрады. Синтез блогына түсетін жаңа CO_2 фракциясы несепнәр карбаматты сұйықтығымен бірге тік реакторға бассейндік реактордан келіп түседі, несепнәр эндотермиялық реакциясы үшін жеткілікті жылу бөледі және несепнәрге түпкілікті түрленеді. Реактордан шығатын несепнәр карбаматының ерітіндісі стрипперге түседі. Тік реактордан шығатын газдар бассейндік реактордан шығатын газдармен бірге скрубберге жіберіледі, онда олар төмен қысымды рециркуляция сатысынан карбамат ерітіндісімен түйіседі. Осылайша байытылған карбаматты ерітіндіні содан кейін бассейн реакторына береді. NH_3 және CO_2 инертті газдарды желдету алдында үрлеу газынан шығарылады. Стрипперден шығатын несепнәр ерітіндісін түйіршіктеу үдерісінің талаптарын ағын бойынша төмен қанағаттандыру үшін тазалайды және шоғырландырады.

10.3.3 Фишер-Тропш сұйықтығы

Көмірсутектер синтезіндегі жалпы реакциялар:



Оксигенаттар түзілетін жағымсыз реакция орын алса да, оның дәрежесі катализатордың түріне және жұмыс жағдайына байланысты:



Метан ($n=1$) түзілуі де қажет емес. Өндірілетін алкандардың көпшілігі дизельдік отын ретінде қолайлы болуы үрдісі бар. Алкандардың пайда болуына қосымша бәсекелес реакциялар алкендердің аз мөлшерін реакция бойынша (10.11), сондай-ақ спирттер мен

реакциялар бойынша басқа да оттегі бар көмірсутектер береді (10.13).

Қазіргі уақытта коммерциялық қол жетімді катализаторлар Fe немесе Co негізделген, ал Ru негізінде реакцияның төмен температурасында жұмыс істеуге мүмкіндік беретін ең жоғары белсенділігі бар, бірақ олар күкіртпен улануға өте сезімтал, ал бағасының жоғарылығы оларды пайдалануды шектейді. 10.3-кестеде Fe және Co негізіндегі катализаторлардың сипаттамалары келтірілген. Co негізіндегі катализаторлар H_2 -ге жоғары қатынасы бар синтез-газ үшін қолайлы, өйткені олар CO H_2 -ге айналдыру үшін су газының ығысу реакциясына қатысты аз реакциялық қабілеті бар. Co негізіндегі катализаторлар Фишер-Тропштың (200-240°C) төмен температуралы үдерістерінде қолданылады, өйткені жоғары температураларда CH_4 артық пайда болады.

Көмірсутектер ауқымы катализатордың түріне және жұмыс жағдайларына байланысты жүргізіледі. Жоғары температура (~ 350°C) бензин мен жеңіл олефиндерге қолайлы, ал төмен температура (~ 250°C) дистиллят және балауыз (бөлме температурасында қатты көмірсутектер) сияқты ауыр көмірсутектерді артық көреді. 10.4-кестеде Co (Бертноччини және бірлескен авт., 2009) негізінде катализаторы бар суспензиялық реактормен жұмыс істейтін эксперименттік қондырғыдан өнімнің шығуы туралы деректер берілген. Егер көмірсутек тізбегінің түзілуі кезең-кезеңмен енгізу немесе α өсуінің тұрақты ықтималдығымен C_1 аралық қосылыстарын қосу жолымен жүргізілсе (ол негізінен катализатор түріне және жұмыс жағдайларына байланысты), онда Андерсон-Шульц-Флоридің бөлісі бойынша тізбек ұзындығына бөлу жүргізіледі (Камали және бірлескен авт., 2012):

$$r_n/n = (1 - a_p)^2 a_p^{n-1} \quad (10.14)$$

10.3-КЕСТЕ. Фишер-Тропш сұйықтығының синтезіне арналған Fe және Co негізіндегі катализатор

Қасиеті	Fe	Co
Бағасы	төмен	жоғары
Тіршілік кезеңі	қысқа	ұзақ
Типі	тұндырылған/конденацияланған	қолдау кезінде
H_2 -нің CO -ге сингаз қатынасы	0.7 (сулы газ конверсиясының жоғары белсенділігі)	2.0+ (сулы газ конверсиясының төменірек белсенділігі)
Көтеруі	S және NH_3 көтеруі	S пен NH_3 үшін жоқ
улылығы / жою	усыздық/бір реттік	усыздық / Co
Өнім түрлері	Олефиндер көбірек	Парафиндер көбірек
Өнімдердің мольдік салмағы	жоғарырақ	төменірек
Ілеспе өнімдер	CO_2 , бу және оксигенат	бу және аз оксигенат

10.4-КЕСТЕ. Шлам реакторындағы Co катализаторын пайдалана отырып Фишер-Тропш өнімінің шығуы

Көміртек мөлшері	Парафиндер	Олефиндер	Оксигенаттар	Барлығы
C_1	8.17		0.14	8.32
C_2-C_4	5.18	4.68	0.49	10.35
C_5-C_9	11.62	4.42	0.61	16.64
$C_{10}-C_{13}$	12.10	1.72	0.61	14.43
$C_{14}-C_{21}$	22.73	1.09	0.68	24.49
$C_{22}-C_{24}$	4.58	0.07	0.12	4.78
C^{25+}	20.91	0.06	0.02	20.99
Барлығы	85.29	12.04	2.67	100.00

$$y_n = (1 - \alpha_p) \alpha_p^{n-1} \quad (10.15)$$

мұнда Jn және уn – n көміртегі атомдарымен көмірсутегінің салмақтық және мольдік үлесі, ал ар – тізбектің өсу ықтималдығы. Эксперименталды деректердің көпшілігі C4-C12 саласында Андерсон-Шульц-Флори таралуы көмірсутектер тобы үшін орын алатынын көрсетеді, және ар Фишер-Тропш синтезінің катализаторларын сипаттау үшін пайдалануға болады. Әдетте жоғары ар балауыз үлесінің өсуіне әкеледі (>C20), ол дизель отынының (C13-C17) немесе керосиннің (реактивті қозғалтқыштарға арналған отын) (C11-C13) пайда болуымен гидрокрекингке ұшырауы мүмкін. Көміртегі атомдары аз фракциялардан көп тізбекті сұйық көмірсутектердің түзілуінен тұратын α мәні төмен болған кезде олигомеризация олефинді бензинді және дизель отынының кейбір мөлшерін алу үшін қолданылады. Катализаторлардың промоторлары және алу тәсілдері катализатордың селективтілігін жоғары немесе төмен ар жағына қарай өзгерте алады. Зерттеушілер көрсеткендей, парафинді және олефинді көмірсутектерден басқа оксигенаттары да Андерсона-Шульц-Флори бөлісін қадағалайтынын көрсетті (Берточини.авт., 2009).

Жылжымайтын қабаты бар құбырлы реакторлар коммерциялық пайдаланылды, бірақ жалған сұйытылған қабаты бар реакторлар және шлам реакторлары белгілі бір артықшылықтарға ие, реакторлардың осы үлгілерінің әрқайсысының сипаттамалары төменде жиынтықталған.

10.3.3.1 Жылжымайтын қабаты бар түтікті реактор. Катализаторды (шөгінді ~ 2,5 мм) 220-250°C жұмыс жағдайында синтез-газ және 27 бар өтетін құбырларға орналастырады, бұл балауыздың жоғары шығуына әкеледі. Жоғары экзотермиялық реакция жылуын жою реакторлардың осы түрі үшін маңызды проблема болып табылады. Синтез контурында реактор ішіндегі изотермиялықты жақсарту және жалпы конверсияны ұлғайту үшін үлкен рециркуляция пайдаланылады, бірақ бұл энергия тұтынуды, сондай-ақ үлкен рециркуляциялық компрессор талап етілетіндіктен, қондырғыға күрделі шығындарды арттырады. Реакторда сондай-ақ ішкі түтікшенің конструкциясымен механикалық күрделі болу үрдісі бар, ал катализаторды ауыстыру реакторлардың басқа түрлерімен салыстырғанда анағұрлым күрделі болып табылады.

10.3.3.2 Жалған сұйытылған қабаты бар реактор. Катализатордың бөлшектері (балқытылған күйінде <70 мкм) газбен суспензияланады және нәтижесінде көлемді жылдамдық қозғалмайтын қабатқа қарағанда әлдеқайда жоғары болады. Жұмыс шарттары әдетте рециркуляция коэффициенті 1,5 бар 320 және 27 бар, бұл жалған сұйыту, изотермиялықты жақсарту, жылу беру коэффициентін арттыру және жалпы конверсия үшін қажетті реактор арқылы газ жылдамдығын арттыру үшін қолайлы. Жеңіл көмірсутектердің неғұрлым жоғары фракциялары неғұрлым жоғары жұмыс температурасынан өндіріледі. Реактордың бұл түрінің артықшылығы – катализаторды ауыстырмай, блокты тоқтатусыз онлайн режимінде жүргізілу мүмкін. Сондай-ақ катализаторды онлайн регенерациялауға болады.

10.3.3.3 Шламды реактор. Реактордың осы түрінде реакторға ұқсас Ipmeoh ТМ үдерісінде жоғары қайнайтын балауыз сияқты бу қысымы төмен сұйықтықта катализатордың өлшенген шағын бөлшектері (<40 мкм балқытылған немесе тұндырылған 40-150 мкм) пайдаланылады. Шлам қабатына орнатылған ирек түтік ішіндегі қайнаған су температураны бақылайды, бұл жергілікті ыстық нүктелердің түзілуінсіз жоғары орташа реакциялар температурасымен (және реакция жылдамдығымен) жұмыс істеуге мүмкіндік беретін іс жүзінде изотермиялық жұмысқа әкеледі. Жоғары реакция температурасы балауыздың аз пайда болуына себеп болады. Реакторды салу оңай және онлайн режимінде катализаторды ауыстыру мүмкіндігі бар, ал реттеу коэффициенті жақсы болып табылады, бұл кезең-кезеңімен жаңартылатын энергия көздерін толықтыратын ілеспе өндірістің қондырғылары үшін маңызды.

10.3.3.4 10.5-суретте көрсетілгендей, синтез сұлбасындағы рециркуляциялаушы газ CH_4 және басқа да қажетсіз көмірсутектерді H_2 және CO -ға қайта түрлендіру үшін автотермиялық риформерге беріледі. Ол жаңа десульфурацияланған синтез-газбен біріктіріледі және негізінен автоотермиялық риформинг-қондырғыда пайда болатын CO_2

үлкен бөлігін жою үшін аминалармен жууға арналған қондырғыда өңдеу алдында жылу алмастырғыштар сериясында салқындатылады. Содан кейін біріктірілген ағын алдын ала жылу алмастырғыштарда, оның ішінде беру/шығару жылу алмастырғышында реакторға синтезді беру алдында қыздырылады. Реактордан шығатын ағын бірқатар жылу алмастырғыштарда, оның ішінде беру / шығару аралық жылу алмастырғыштарында салқындатылады, ал шикі өнімнің жиналған конденсаты тұрақтандыру блогына беріледі, ол Фишер-Тропш сұйықтықтарынан ерітілген жеңіл ұштарын жоюға арналған колоннадан тұрады. Құрамында CH_4 және басқа да көмірсутектер бар рециркуляциялаушы газ автоотермиялық риформингке берер алдында қысылады.

10.1-мысал. Фишер-Тропш өнімінің молярлық негізде H_2 -нің CO_2 -ге қатынасымен синтез-газға және екі түрлі температурада Co катализаторына шығуы бойынша деректер 10.5-кестеде келтірілген (Джонсон және бірлескен авт. графикалық деректері бойынша бағаланған, 1991). Екі деректер жиынтығы үшін әр тізбегінің өсу ықтималдығын есептеу қажет.

Шешуі:

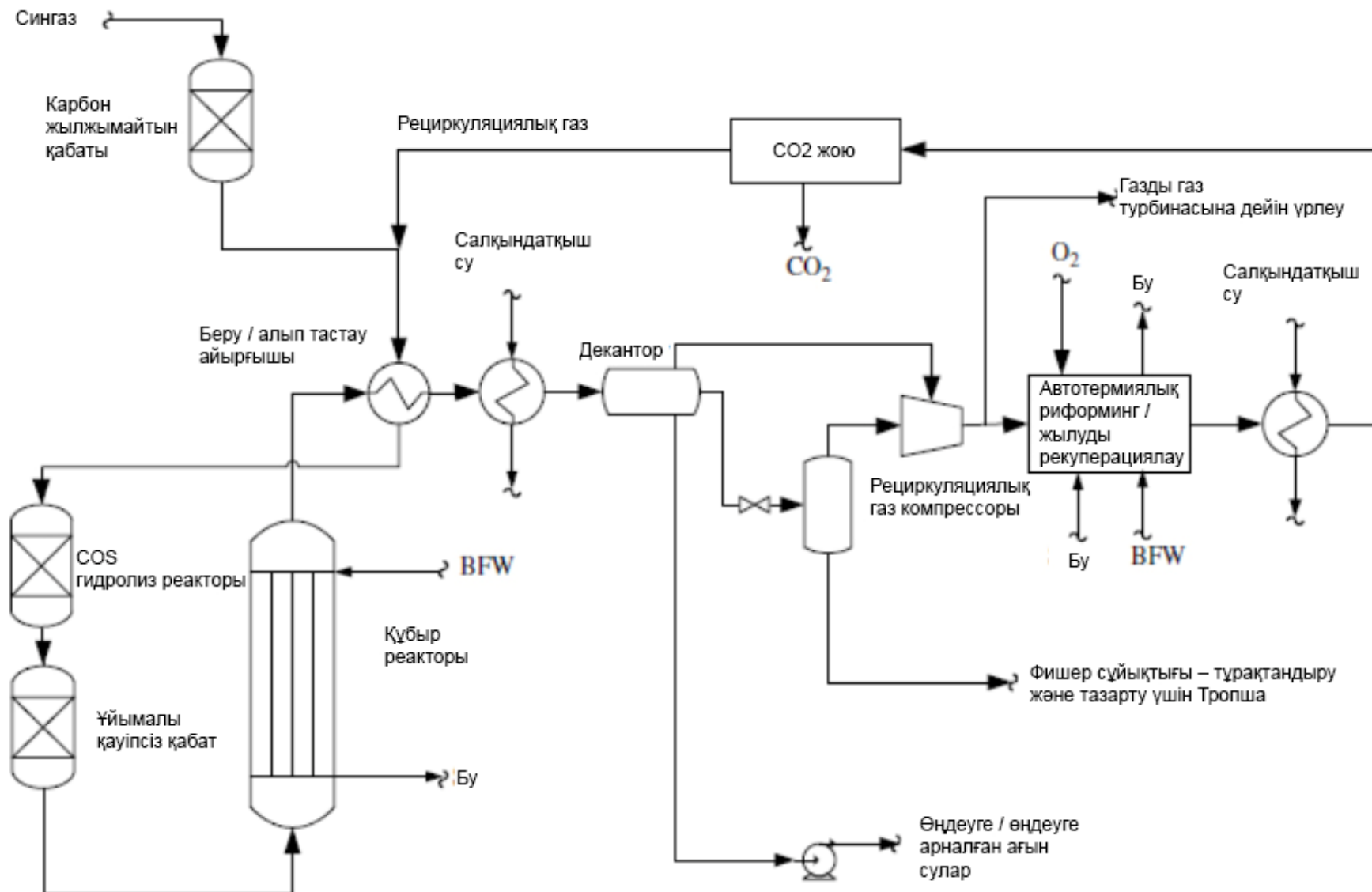
10.15 теңдеуінде натурал логарифмдерді қолдану және ауыстыру

$$\ln y_n = (\ln a_p)n - [(\ln a_p) - \ln(1 - a_p)] \quad (1016)$$

Егер Андерсон-Шульц-Флорияның бөлінуі әділ болса, $\ln y_n$ -нің n -нен тәуелділік кестесі $\ln a_p$ көлбеуі бар түзу сызық беруі тиіс екенін көрсетеді. 10.6-суретте екі деректер жиынтығы үшін кестелер көрсетілген, ал әрбір жиынтық үшін ең жақсы сәйкестіктің түзу сызығының еңсі мынаған тең :

$$\begin{aligned} \text{At } 456 \text{ K, } \ln a_p &= -0.411 \text{ or } a_p = 0.66 \\ \text{At } 484 \text{ K } \ln a_p &= -0.661 \text{ or } a_p = 0.52 \end{aligned}$$

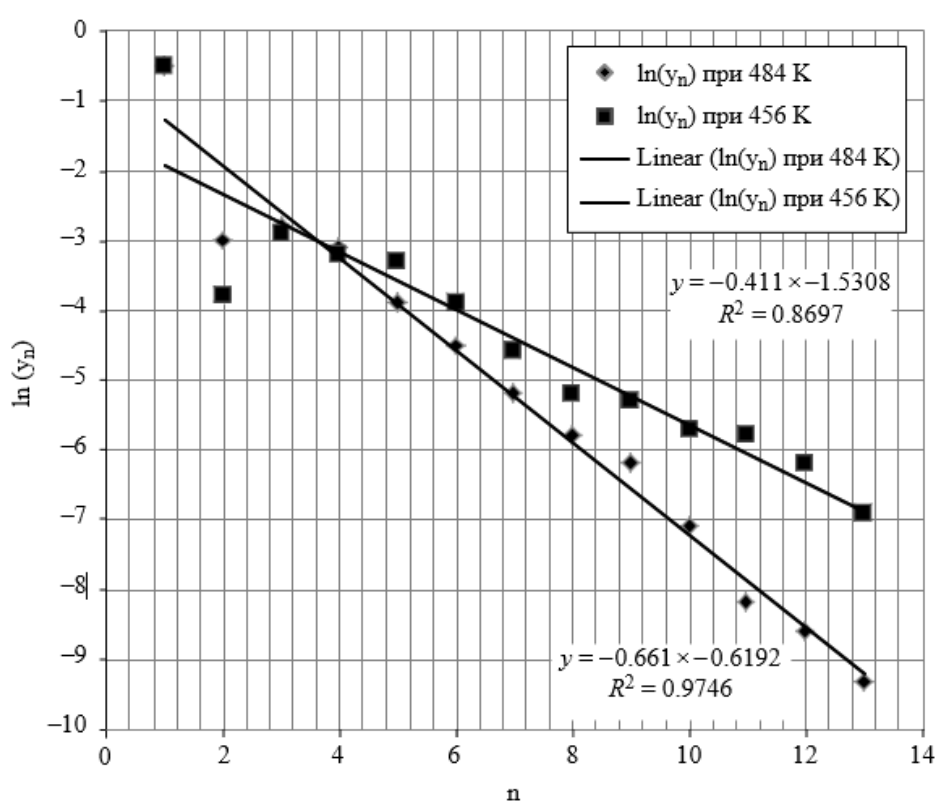
Бұл нәтиже неғұрлым жоғары температурада a_p төмен болатынын көрсетеді.



10.5-СУРЕТ. Құбырлы реактордағы Фишер-Тропш сұйықтығының синтезі

10.5-КЕСТЕ. Фишер-Тропш синтезінің шығу деректері

Көміртек мөлшері (n)	484K болғандағы мольдік үлес(y_n)	456K болғандағы мольдік үлес(y_n)
1	0.6065	0.6065
2	0.04979	0.02237
3	0.06081	0.05502
4	0.04505	0.04076
5	0.02024	0.03688
6	0.01111	0.02024
7	0.005517	0.01005
8	0.003028	0.005517
9	0.002029	0.004992
10	0.000825	0.003346
11	0.000275	0.003028
12	0.000184	0.002029
13		0.001008



9.6-СУРЕТ. Андерсон-Шульц-Флоридің бөлу учаскелері

10.4 КӨМІР МЕН БИОМАССАДАН ІЛЕСПЕ СУТЕГІН АЛУ

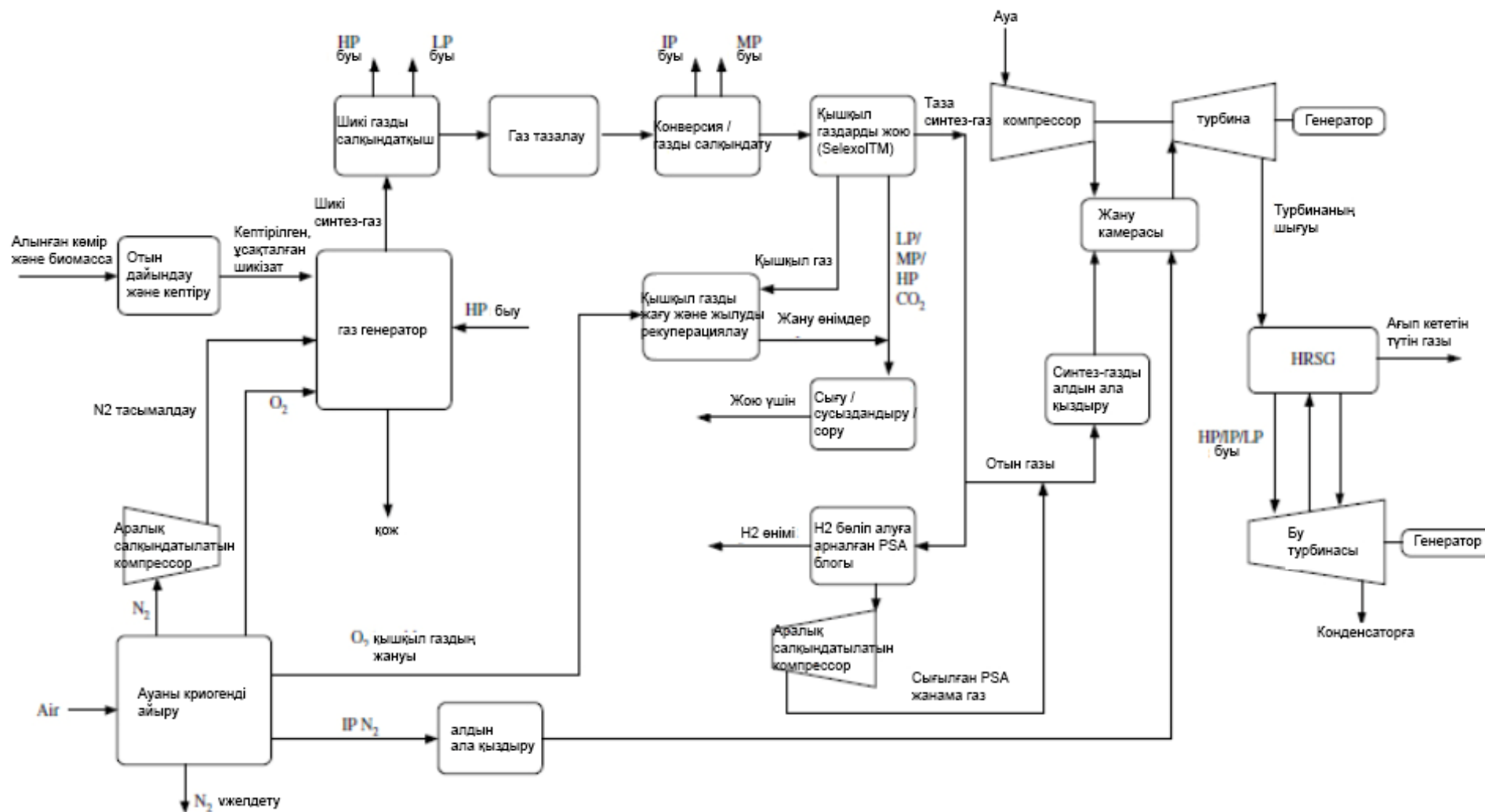
Көлік секторына CO_2 жаһандық шығарындыларының бесінші бөлігі (Kirtay, 2011 ж.) келеді. Ол үшін отын ретінде жоғары таза H_2 талап етілетін, егер H_2 тұрақты түрде қамтамасыз етілген болса, парниктік газдар шығарындыларын төмендетуге көмектесе алатын, Протон алмасу мембранасы бар отын элементтерін пайдаланатын гибриді көлік құралдарын әзірлеу және өрістетуге. Бұдан әрі көмір мен биомассада жұмыс істейтін, CO_2 ұстап тұратын және (i) БГҚЦ қазіргі заманғы технологиясын және (ii) интеграцияланған гидрогенизатордан және қатты тотықты отын элементінен, интеграцияланған газдандыру отын элементінен (ИГОЭ) – integrated gasification fuel cell (IGFC) тұратын алдыңғы қатарлы технологияны пайдалана отырып, H_2 ілеспе өндірісіне арналған қондырғы конфигурациясы

сипатталады. ИГОЭ жағдайының жылу және экономикалық сипаттамалары есептелген және осындай қазіргі заманғы газ генераторлары мен ірі ауқымды отын элементтерін зерттеу мен әзірлеудің қажеттілігін көрсететін БГҚЦ жағдайынан елеулі жақсы болып шықты. (Ли және бірлескен авторлар, 2012). ИСО шарттарына сәйкес, Юта штатынан 66% битум көмірінен тұратын, жүгері сабағының және дәнді сабанының (барлығы құрғақ массаға қайта есептегенде) тең мөлшерлерінен және H₂ экспортының HHV негізіндегі отыннан энергия үлесінің 23% тең қалдықтарымен ИГТЭ қондырғысы электр энергиясынан 70% артық өндіреді, ал ИГОЭ жағдайы үшін H₂ ілеспе өнімін өндіру құны БГҚЦ жағдайы үшін құнның жартысынан кемін құрайды.

10.4.1 ҚОЛДАНЫЛАТЫН ЖОҒАРЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР МЕН ҮДЕРІСТЕР

Қазіргі уақытта қол жетімді электр энергиясын өндіру технологиясы және H₂ бар ИГОЭ 10.7-суреттегі жалпы блок-сұлбамен суреттеледі. Газдандыру қондырғысы құрғақ шикізат қабатымен газ генераторына негізделген (шикізат құрамында ылғалдың жоғары биомасса бар). Алынған көмір мен биомасса (бұл жағдайда жүгері сабаны және дән сабаны) коммутациялық жабдыққа беріледі және содан кейін жалған сұйытылған қабаты бар кептіргіште кептіріледі. Биомассада әдетте көмірге қарағанда ылғалдың жоғары юолады және көп жылу энергиясын талап етеді. Жалған қабаты мен будың рекомпрессиясы бар кептіру қолданылады. 8-тарауда көрсетілгендей, технологияда кептіргіште пайда болатын будың жасырын жылуы бу қысымын арттыру және оны жалған сұйылтқыш қабаты бар кептіргіш ішінде орналасқан жылу алмасу түтікшелеріне беру жолымен пайдаланылады. "Жылу сорғысынан" тұратын кептіру технологиясының бұл түрі ылғалдың жоғары құрамы бар қоңыр көмірді кептіру кезінде сәтті қолданылады.

Жылу сорғысы бу компрессорындағы механикалық энергияны пайдалана отырып, буланатын су буындағы жылу энергиясының сапасын арттырады, бұл үдеріс термодинамиканың екінші заңына сай келеді, өйткені жүйеден шығатын энергияның жалпы сапасы жүйеге түсетін энергиядан аз. Алайда бу компрессоры зауытына арналған жоғары сапалы электр энергиясына қажеттілік будан алынатын энергия санымен салыстырғанда өте аз, ол олай болмаған жағдайда жоғалады. Кептірілген шикізат одан кейін басып алынған қабаты бар газ генераторының ерекшеліктеріне сәйкес келуі үшін қосымша мөлшерде азайтылады. Осы операциялар үшін қажетті жұқа ұнтақтау энергиясы биомассаның бастапқы шикізаты алдын ала кептірілген кезде айтарлықтай төмендейді. Жоғары қысым кезінде жұмыс істейтін ауаны бөлу блогы O₂ көлемі бойынша 95% газ генераторына береді және қышқыл газды жағу, яғни синтез-газдан бөлек оны газ генератордан кейін төмен түсетін ағын бойынша тазарту кезінде береді және NO_x бақылау үшін термиялық сұйылтқыш ретінде газ турбинасына бұрку үшін аралық қысым кезінде N₂ шығарады.



10.7-СУРЕТ. Электр және H₂ ілеспе өндірісіне арналған қондырғы

N_2 аралық қысымның бір бөлігі газды генераторға шикізатты пневматикалық беру үшін көліктік газ ретінде пайдалану үшін қосымша сығылады.

Газ генераторы номиналды температура мен 1370°C және 43 бар қысымда жұмыс істейді және көмір мен биомассаны ыстық шикі сингаз, қож бен жартылай кокс түзумен O_2 көмегімен ішінара тотықтырады. Шикі синтез-газ бу жүйесін жылумен қамтамасыз ету үшін, және жоғары және төмен қысымды бу генерациялау үшін жылу алмастырғыштарда салқындатылады. Шикі синтез-газ содан кейін макро-бөлшектер, сілтілер, хлоридтер және NH_3 жою үшін сумен тазартылады. Жоғары қысымды бу H_2O буының құрамын келесі төмендеу конверсиясының реакторлары үшін жеткілікті деңгейге дейін арттыру үшін синтез-газға бүркіледі. Содан кейін синтез-газ ауысымдық қондырғыға түседі, онда синтез-газда болатын CO көп бөлігі H_2O буымен H_2 және CO_2 түзілуі арқылы әрекет етеді. Экзотермиялық конверсия реакциясымен генерацияланатын жылу реакторлардан ағын бойынша төмен орналасқан жылу алмастырғыштардағы аралық қысымның буын және орташа қысымның буын генерациялау жолымен қалпына келтіріледі. Осы блоктан шығатын ілгерілетілген газ бу циклынан вакуумдық конденсат үшін қосымша жылуды қамтамасыз етеді және содан кейін салқындатқыш су деңгейіне дейін салқындатылады. Салқындатылған синтез-газ содан кейін қуыстар конденсатын болдырмау үшін шамамен 11°C дейін қызады, содан кейін H_2 жою үшін сульфидтеліп белсендірілген көмір қабатына беріледі. Содан кейін кері қайтатын газ соңғы салқындатқышта салқындататын судың деңгейіне дейін салқындатылғады да Selexol™ AGR блогына беріледі. Газдан бөлінген жоғары температуралы конденсат скрубберге рециркуляцияланады, ал NH_3 -тен суық конденсат қышқыл су тазалағышына беріледі. Судан алынған қышқыл газдар қышқыл газдардың жану камерасына жіберіледі.

Selexol™ технологиясы бойынша таза көмірсіз синтез-газ (негізінен CO , CO_2 , CH_4 , N_2 және Ar аз мөлшерде H_2 қышқыл газ және CO_2 ағындары (әр түрлі қысымда) өндіріледі. CO_2 ағындары CO_2 салқындататын судың температурасына дейін сұйытылатын қысымға дейін қысылады, сусыздандырылады, H кейін құбырдағы 152 бар қысымға дейін айдалады. CO_2 ағыны бір жерде қатар жойылуы мүмкін жағдайларда, Selexol™ үдерісінен қышқыл газдармен бірге стриппер-краннан ауа бөлу блогында жанудан кейін берілген O_{2-i} CO_2 бірге жойылуы мүмкін. Қышқыл газды жағу үшін қондырғыда генерацияланатын жылу орташа және төмен қысымды бу өндіру арқылы қалпына келтірілуі мүмкін, сонымен қатар бұл опцияны қарапайым күкірт (9-тарауда сипатталған) немесе H_2SO_4 сияқты жанама өнімдер өндірісіне қарағанда әлдеқайда тиімді етеді. Бұл жану қондырғысынан шыққан газ қысылып, содан кейін CO_2 қысымдағы ағынымен біріктіріледі. Егер оның орнына қышқыл газды тауарлық жанама өнімдерді алу үшін өңдесе, онда CO_2 ағыны өзінің неғұрлым жоғары тазалығын сақтайды, бұл оны мұнай беруді ұлғайту немесе құбыр арқылы қандай да бір арнайы металлургиялық қолдаусыз үлкен қашықтыққа тасымалдау кезінде пайдалануға жарамды етеді.

Selexol™ қондырғысынан шыққан көмірсіз таза синтез-газдың бір бөлігі жетілдірілген жағдайда (IGFC) өндірілетін H_2 ағынының қысымына сәйкес келетін 46 барға дейін сығылған H_2 тазалығы жоғары өнім алу үшін PSA қондырғысында өңделеді. PSA отын газының қалған компоненттерінен (негізінен CO , CO_2 , H_2 , N_2 , және Ar) тұратын қалдық газ ағынын өндіреді. PSA қалдық газы сығылады, содан кейін таза көмірсіз сингаз қалдықтарымен біріктіріледі. Бұл отын газының біріккен ағыны аралық қысымның буымен алдын ала 290°C дейін қызады және содан кейін газ турбинасының жану камерасына беріледі. ASU-дан N_2 аралық қысым (алдын ала аралық қысымның буымен қыздырылған) газ турбинасының жану камерасына да беріледі. Кіріс синтез-газ және N_2 қосынды LHV $4730 \text{ кДж} / \text{Нм}^3$ болатын етіп қосылған N_2 аралық қысым ағынының жылдамдығы. N_2 енгізу F класты газ турбинасының жану камерасында NO_x түзілуін жалынның температурасын төмендету есебінен азайтады (қазіргі уақытта синтез-газдан отын үшін қол жетімді). H_2 экспортына байланысты ауа бөлу блогымен генерацияланатын және газ турбинасын бүрку үшін қол жетімді N_2 сұйылтқыштың салыстырмалы саны жоғары екенін ескеріңіз; осылайша, IGCC (Black, 2010) қондырғысының кейбір конфигурацияларындағы сияқты отын газын ылғалдаудың қажеті жоқ.

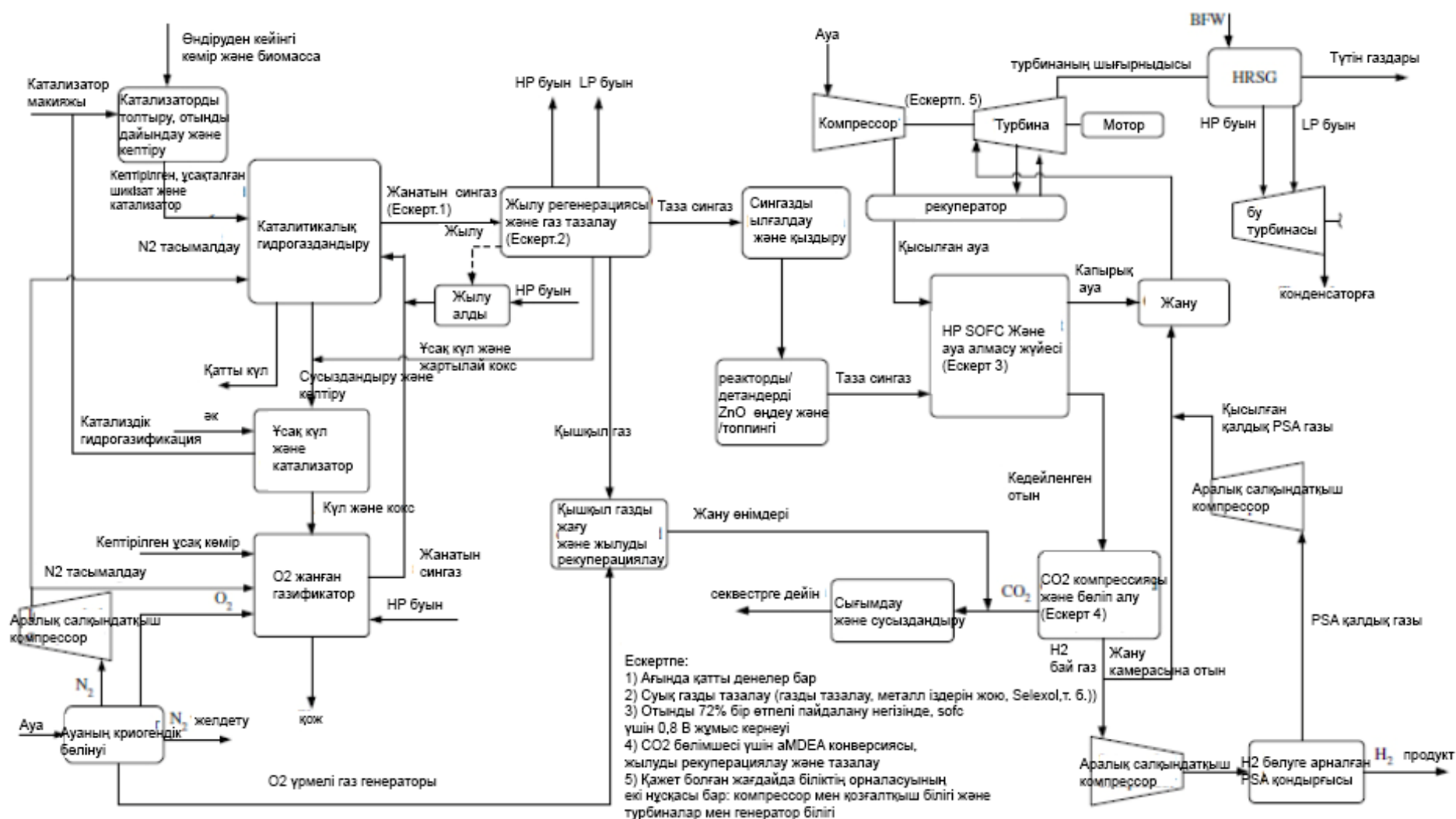
Жұмыс жасалған газ 564°C температурада газ турбинасынан шығып, Ренкиннің төменгі циклына жылуды қамтамасыз ету үшін жылу рекуперациясы бар бу генераторына (HRSG – heat recovery steam generator) келіп түседі. Содан кейін түтін газ қондырғы суағары арқылы шығарылады. Қондырғының ішінде генерацияланатын будың негізгі бөлігі электр

энергиясын өндіру үшін бу турбинасында, ал қалған бөлігі технологиялық будың қажеттілігін қанағаттандыру үшін пайдаланылады. Бұл жергілікті блоктарға қосымша суыту жүйесі, құралдық ауа, алау, ағынды суларды тазалау және т.б. сияқты бөгде блоктар қарастырылған.

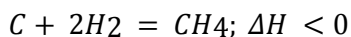
10.4.2. ЖОҒАРЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР МЕН ҮДЕРІСТЕР

Болашақта электр энергиясын бірлесіп өндіру және H_2 үшін коммерциялық қол жетімді болатын технологиямен бірге IGFC 10.8-суреттегі жалпы блок-сұлбада бейнеленген. O_2 үрлеу қабаты тартылған газ генераторлары газдандырудың ең тексерілген және кемелденген технологиялары болып табылса да, мұндай газ генераторлары өндіретін синтез-газ құрамында CH_4 мөлшері ал, ал CO және H_2 жоғары концентрацияланған, ал қатты тотықты отын элементін (SOFC – solid oxide fuel cell) немесе балқытылған карбонаты бар отын элементі (MCFC – molten carbonate fuel cell) пайдаланатын IGFC және CH_4 бай. Бұл, негізінен, CH_4 отын элементінде эндотермиялық түрлендіруге ұшырауы мүмкіндігіне байланысты болып отыр. Термодинамикалық эндотермиялық реакциялар химиялық жылу шығару рөлінде болуы мүмкін және салқындату мақсатында отын элементтерінің батареяларына ауа ағынының жылдамдығын төмендетуі ықтимал, осылайша ауаны қысу үшін паразиттік энергия тұтынуды үнемдейді. Осылайша химиялық байланыс энергиясына түрлендірілген жылу энергиясы, содан кейін тиімділігін арттыруға алып келетін отын элементінің анодына қайтарылуы мүмкін. Бұдан басқа синтез-газдағы CH_4 неғұрлым жоғары құрамы әдетте салыстырмалы төмен температураларда жұмыс істейтін газ генераторларына және отынмен (көмірмен немесе биомассамен) байланысты энергиясы аз осындай газ генераторларға байланысты, ол газ генераторының жұмыс температурасын ұстап тұру үшін жылуды бөледі, бұл неғұрлым жоғары температураларда жұмыс істейтін газ генераторларына қарағанда суық газдың тиімділігін арттыруға әкеледі. Алайда мәселе мынада, егер қолайлы катализатор пайдаланылмаса, реакция жылдамдығы салыстырмалы баяу, ал көміртегінің конверсиясы төмен жұмыс температурасына байланысты төмен болады.

Газдандыру екі секцияда жүргізіледі: "жоғарғы сатыдағы" каталитикалық гидро-газ генераторы және отынның көп бөлігі (көмір және биомасса) H_2 , H_2O және CO бар жоғары температуралы газ ағынымен O_2 қабатымен жоғары температуралы каталитикалық гидро-газ генераторында газдандырылады. Газификатордың бұл түрін әзірлеу 1970 жылдары Еххон (Kalina and Moore, 1974) калий катализаторының (KOH және K_2CO_3) қатысуымен ұсақталған көмірді пайдалана отырып, реакция үшін жалған төмендетілген қабаты бар газификаторға берілетін будан, H_2 және CO -дан тұратын газификациялық агентті пайдалана отырып жүргізілді. Соңғы жылдары GreatPoint Energy (Kang and Lee, 2013) осындай "гидро-газ генераторын" әзірлеуді олардың меншікті катализаторын пайдалану арқылы қайта жандандырды.

10.8-СУРЕТ. Электр және H₂ ілеспе өндірісіне арналған IGFC

CH₄ көмірдегі С мен Н₂ арасындағы жалпы экзотермиялық реакцияның нәтижесінде пайда болады:



CH₄ сондай-ақ көміртегі мен бу арасындағы жалпы эндотермиялық реакция нәтижесінде алынуы мүмкін:



Газ генераторында орын алатын басқа экзотермиялық реакция конверсия реакциясы болып табылады. Экзотермиялық және эндотермиялық реакциялар арасындағы мұқият жасалған теңгерімге тиісті жұмыс температурасы кезінде газификаторды қолдауға Н₂ буға дұрыс қатынасы бар газдандырушы агентті қамтамасыз ету жолымен қол жеткізіледі. Мұндай газификатормен үйлескенде тағы да үлкен синергияны қамтамасыз ететін SOFC-тің басқа сипаттамасы анодтың шығарндысы газ генераторы талап ететін Н₂ көзі болу мүмкіндігі болып табылады.

Өндіруден кейін өңдеуге ұшырамаған көмір мен биомасса мөлшері азайтылғаннан кейін калий катализаторы (KOH және K₂CO₃ нысанында) сіңдіріледі. Мұнда тағы да биомассада ылғалдың жоғары болуына байланысты будың ре-компрессиясы бар қайнаған қабатта кептіру қолданылады. Катализаторға қажеттілік (K₂CO₃ негізінде) енгізілетін құрғақ көмір мен биомассаның жалпы мөлшерінен шамамен 15% құрайды. Биомассадан көп калий алуға болады. Катализаторды регенерациялау үшін аз әк қажет. Конверсияға ұшырамаған көміртегі және каталитикалық гидро-газ генератордан тұратын "ұсақ күл" катализаторды қалпына келтіргеннен кейін О₂ үрленген қабаты бар жоғары температуралы шламды газ генераторына түседі. Осы екінші газ генераторының негізгі функциясы Н₂ және СО бай ыстық газ ағынын алу болып табылады, содан кейін каталитикалық гидро-генераторда газдандырушы агент ретінде пайдаланылады. Жоғары сатыда газ генератор көмірінде қалған, реакцияға түспеген көміртегінің құрамы жоғарғы сатының қажеттілігін қанағаттандыру үшін Н₂ және СО жеткілікті мөлшерде бере алмайды және осылайша, О₂ үрленген қабаты бар газификатор сипаттамаларына сәйкес келетін мөлшерде қосымша азайтылған құрғақ көмірдің бір бөлігі қосымша беру ретінде ұсынылады. Төменгі сатының газдандырғышына берілетін жартылай кокс және "ұсақ күл" көміртегінің құрамы салыстырмалы түрде төмен болғандықтан, төменгі сатының газ генераторына көмір ғана беріледі (биомассаға қарағанда көміртегінің құрамы жоғары). Бұл газ генераторы газдандыру үдерісінде көміртектің жалпы конверсиясын ұлғайтуға көмектеседі, сонымен қатар күлдің құрамын шыныланған сілтіленбейтін қатты түрге айналдырып, оны кәдеге жарату оңай. N₂ ASU блогымен өндірілген, одан әрі сығылғаннан кейін шикізатты газ генераторларына пневматикалық беру үшін тасымалдау газы ретінде пайдаланылады.

Тазаланбаған сингазбен тасымалданатын бөлшектерді алып тастағаннан кейін шамамен 690°C және 70 бар температура мен қысымда синтез-газ жылуды рекуперациялау және газды тазалау жүйесіне түседі. Шикі синтез-газ бастапқыда каталитикалық гидро-газ генераторда қолданылатын жоғары қысымды буды алу үшін салқындатылады. Бу жүйесі үшін қосымша жылу қамтамасыз етілгеннен кейін шикі синтез-газ төмен температураларда синтездеу / жылуды регенерациялау кезінде суыту жүйесіне беріледі, ол бөлшектерді, сілтілерді, хлоридтерді және NH₃ жою үшін сумен шаюды, Н₂O + COS = Н₂S²²⁺ + СО₂ реакциясы бойынша COS каталитикалық түрлендіру үшін карбонилсульфид гидролиз реакциясын және Hg ұстау үшін белсендірілген көмірдің сульфидтік қабатын, содан кейін күкірт қосылыстарын жою үшін SelexolTM қондырғысын қамтиды.

Содан кейін Н₂O булары SelexolTM қондырғысынан шығатын CH₄ жоғары құрамы бар таза синтез-газға енгізіледі. Қосылған ылғал келесі реакторлар мен SOFC анод бөлімшесінде көміртектің шөгуін болдырмайды. Ылғалдандыру үшін жоғары қысымды буды пайдаланудың орнына, мұнда қарсы ағыс бағанасы арқылы синтез-газдың тікелей байланысы бойынша енгізіледі (мұндай операцияларға арналған бағаналар 5-тарауда баяндалған), бұл қондырғы ішінде бөлінетін төмен температуралы жылуды қалпына келтіруге мүмкіндік береді. Бұл

²² Н₂S жою кейінгі күкіртсіздендіруді орнатуда оңай. Катализатор мына формулалардан тұрады: Co-Mo немесе Ni-Mo

ылғалдатқыш үшін су ретінде қондырғының ішінде жиналған таза технологиялық конденсат қолданылады.

Содан кейін таза синтез газы реакторға / эффогенді жанармай құю циклына (Рао, 1991) беріледі, онда синтез газы экзотермиялық конверсия реакциясы арқылы қызады; содан кейін қуатты қалпына келтіру үшін турбоагрегатта жоғары температуралы синтез газы кеңейтіледі.

SOFC F-класты газ турбинасына қарағанда синтез-газдағы ластанушы заттарға қатысты неғұрлым қатаң талаптар қойғандықтан, қорғау қабаты 0,1 ppmv кем хлоридтер мен күкірт қосылыстарының аз мөлшерін шектеу үшін тазартудың қорытынды сатысы ретінде кеңейткіштен ағындар бойымен жоғары қосылған. Қорғаныс қабаты H_2S және хлоридтерді ұстау үшін COS және ZnO гидролиз катализаторының ауыспалы қабаттарынан тұрады.

Детандерден шығатын синтез-газды алдын ала $650^{\circ}C$ дейін қыздырады және SOFC пакеттерінің анодты жағына береді, ал қоршаған ауа 11,3 барға дейін қысылады, сондай-ақ алдын ала $650^{\circ}C$ дейін қыздырады және содан кейін SOFC катодты жағына жібереді. Бұл қосымша үшін SOFC модулінің конструкциясы бірізді ауа ағынымен және отынды параллель берумен қатар SOFC ұқсас әйнектерінің төрт сатысын каскадтаудан, сондай-ақ модульдегі әрбір ағыс²³ үшін шамамен бірдей операцияларды алу мақсатында ағыс ішіндегі таза ауаны беруден тұрады. Мұндай конфигурацияда SOFC шыныларының әрқайсысында бір өту үшін ауаны жоғары пайдалануға (осылайша sofc шыныларын тиімді салқындату ұсталады) және ауаны жалпы төмен пайдалануға (осылайша, ауаның парциалды қысу қуаты төмендейді) (Ли және авт., 2011) қол жеткізілуі мүмкін. Синтез-газдағы отынның 70%-ға жуығы SOFC дестелерінде тотығады. $705^{\circ}C$ температурада SOFC ағыстарынан шығатын анод шығулары алдын ала қыздыру мақсатында (i) SOFC үшін синтез-газды, (ii) конверсия реакторының бастапқы газын (реакторды / детандерді толтыру циклында) және (iii) COS гидролиз реакторы үшін шикі газды рекуперациялау жолымен салқындатады. Содан кейін газ ағыны су газын конверсиялау реакциясы үшін каталитикалық реакторға жіберіледі, онда анодтың шығарындысындағы CO құрамының үлкен бөлігі CO_2 -ге айналады, сонымен бірге H_2 -ні өндіреді. Конверсия реакторынан шығатын ағын жылуды әрі қарай қалпына келтіріп және салқындатылғаннан кейін CO_2 бөлу үшін белсендірілген метилдиэтаноламині (aMDEA) бар жуу қондырғысына беріледі. Алдыңғы жағдайдағыдай, SelexolTM-нен шығатын тотыққан қышқыл газ aMDEA еріткішінен алынған CO_2 -ден бірге алынып тасталады немесе элементтік күкірт немесе H_2SO_4 сияқты тауарлық жанама өнімдерді алу арқылы одан әрі өңдеуге ұшырайды.

aMDEA блогынан шығатын көмірсіз анодтық шығарындының үлкен бөлігі PSA блогына беріледі, ал қалған бөлігі SOFC әйнектерінен төмен жану камерасына жіберіледі. PSA қондырғысы 46 бар қысым кезінде H_2 жоғары өнімін және отын газының қалған компоненттерінен тұратын қалдық газды өндіреді, ол сығылады (аралық салқындатумен) және жану камерасына беріледі. Бұл жану камерасына арналған тотықтырғыш SOFC әйнектерінен жасалған катодты шығару құбырынан тұрады. Жану камерасынан шығатын шығарынды ішінара турбинада кеңейтіледі, компрессор беретін катод кірісінде ауаны алдын ала қыздыру үшін рекуператорға беріледі, содан кейін HRSG-ға түсер алдында қосымша қуатты генерациялау үшін турбинада атмосфералық қысымға жақын қысымға дейін қосымша кеңейтіледі. HRSG-дан пайдаланылған газ отынды кептіру операцияларында қыздыру үшін де пайдаланылады.

10.5 ЭЛЕКТР ЭНЕРГИЯСЫ МЕН ЖЫЛУДЫҢ АРАЛАС ӨНДІРІСІ

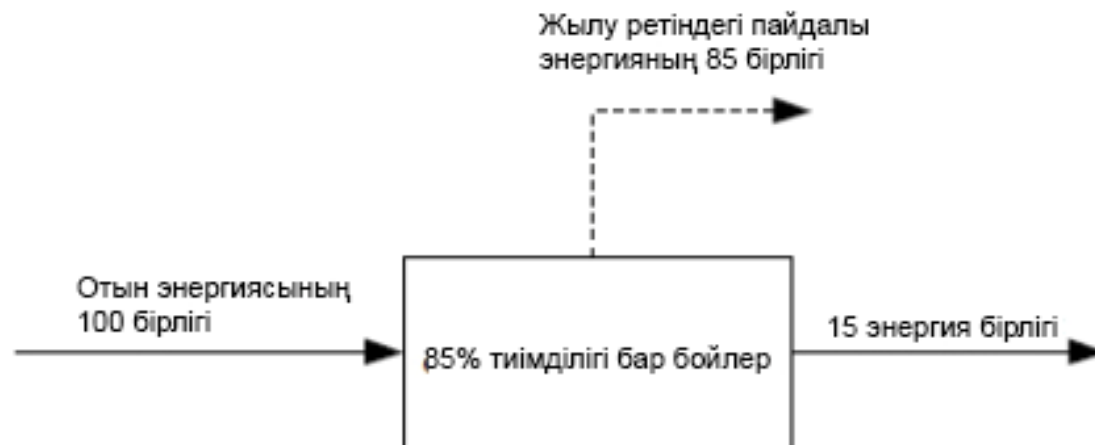
Қарсы қысымды бу турбиналары, дизельді қозғалтқыштар, газ турбиналары және отын элементтері сияқты Іштен жану қозғалтқыштары, электр энергиясын өндіруден басқа, сондай-ақ пайдаланылған газдағы энергияны рекуперациялау жолымен жылу энергиясын

²³ Отын элементтерінің блогы бірнеше бөлек элементтерден тұрады, ол бөлек элементтердің электрлік қосылуына (тізбекті немесе параллель) байланысты айтарлықтай кернеуді және / немесе тоқты тудыру үшін бірге салынған.

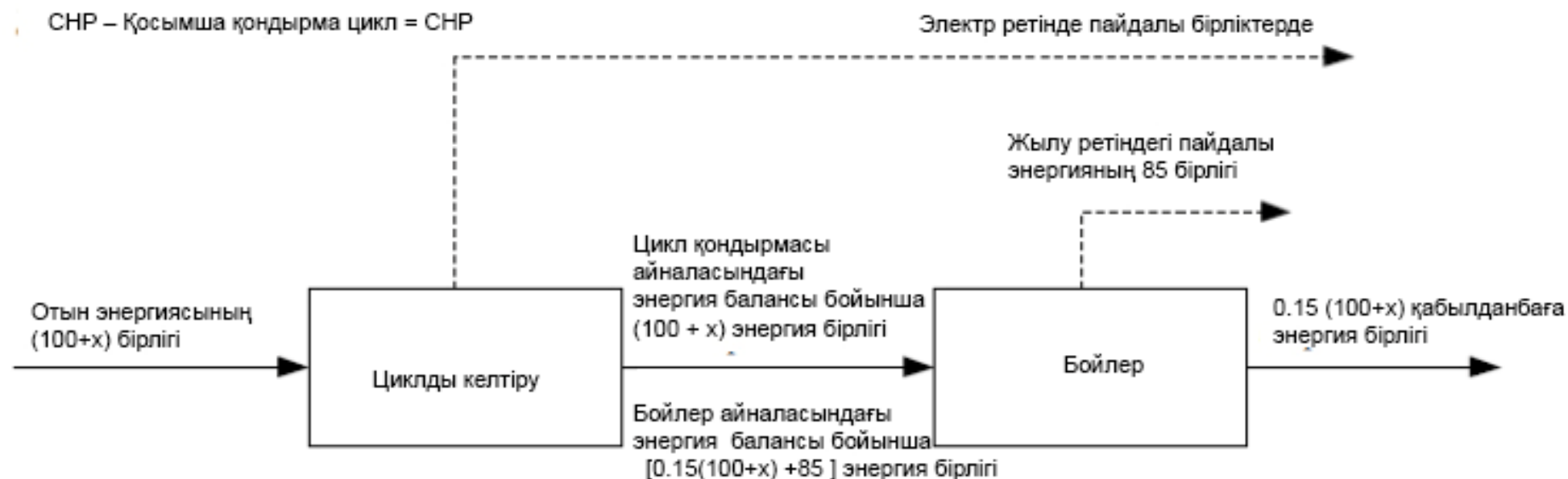
қамтамасыз ету үшін пайдаланылуы мүмкін. Екі мақсатпен мұндай қолдану когенерация немесе жылу мен энергияны аралас өндіру (ЖЭО – combined heat and power (CHP) деп аталады және отынмен байланысты энергияны өте тиімді пайдалануды қамтамасыз етеді. Ауаны кондиционерлеу, сондай-ақ осы бөлімде бұдан әрі сипатталғандай қалыпты температурада салқындату үшін литий бромидінің циклы (LiBr) немесе төмен салқындату температуралары үшін NH_3 сіңіру циклы сияқты абсорбциялық тоңазыту циклінде жылу көмегімен қамтамасыз етілуі мүмкін. ЖЭО-ның термодинамикалық артықшылығы 10.9-суретте көрсетілген, онда отын жылу энергиясын тасымалдаушы ретінде будың пайда болуымен тікелей жанатын қазандықтың жылу сипаттамалары және оның орнына бу генераторы алдында қосылатын отын қондырма циклінде пайдаланылатын ЖЭО (мысалы, Іштен жану қозғалтқышы, газ турбины немесе отын элементі) сипаттамалары салыстырылады. Қондырма циклында отын жанады (айталық, қосымша x энергия бірлігі), сондықтан жылу энергиясының бірдей мөлшері бу генерациясы үшін қондырма циклынан алынады, ал газ олар атмосфераға шығар алдында сол соңғы температураға дейін салқындатылады. Қондырма циклы бойынша электр энергиясын өндіру (айталық, энергияның y бірлігі) өте жоғары тиімділікпен жүретінін көруге болады: $yx=85$ бұл жағдайда (теңестірумен алынды $100+x - y$ және $0.15100+x+85$) жасалған жорамалдарды жеңілдетумен.

10.2-мысал. ЖЭО-да 400°C кезінде $100\,000\text{ кг/сағ}$ бу және 42 бар қысым 8 бар шығуда қысымы 8 бар бу турбинына қарсы қысымымен беріледі. Бу турбинының изоэнтропикалық тиімділігі 80% құрайды, ал механикалық және генераторлық шығындар бұмен өндірілетін қуаттың 5% құрайды. Турбинаның барлық шығыс қуаты экспортталатынын және жылытуға қажеттілікті қамтамасыз ету үшін экспортталатын бу 7 бар қысымда конденсацияланатынын болжай отырып, жылу энергиясының экспортталатын электр энергиясына қатынасын есептеңіз..

Бойлер



CHP – Қосымша қондырма цикл = CHP



10.9-СУРЕТ. CHP зауытының термодинамикалық артықшылықтары

Шешуі:

Бірінші қадам будың бу кестесінен (мысалы, Кинан және бірлескен авторлар, 1969) шығыс жағдайындағы $\Delta h_{\text{турб,кір.}}^V$ және $\Delta s_{\text{турб,кір.}}^V$ энтропиясын берілген қысым мен температура жағдайына оқып шығу. Себебі кіре берісте энтропия қаныққан буға арналған шығыс қысымындағы энтропия қарағанда артық, шығарындыда барлық булар (бір фазалы) болуы тиіс.

Сонымен, келесі қадам сәйкес кіріс энтропияның $\Delta s_{\text{турб,кір.}}^V$ нақты энтальпиясын $\Delta h_{\text{турб,кір.}}^V$ бірақ шығыс қысымында есептеу болып табылады.

Шығарынды будың шынайы энтальпиясы $\Delta h_{\text{турб,шығ.}}^{\text{белс.}}$ турбинаның исентропты тиімділігін $\eta_{\text{турб}}$ пайдалану арқылы есептеледі және мына түрде:

$$\Delta h_{\text{турб,шығ.}}^{\text{белс.}} = \Delta h_{\text{турб,кір.}}^V - (\Delta h_{\text{турб,кір.}}^V - \Delta h_{\text{турб,шығ.}}^V) \eta_{\text{турб}}$$

Турбинаның шығыс электр қуаты W содан кейін m будың массалық шығыны және $h_{\text{ген}}$ генераторын ПӘК арқылы есептеледі:

$$\dot{W} = \dot{m} - (\Delta h_{\text{турб,кір.}}^V - \Delta h_{\text{турб,шығ.}}^V) \eta_{\text{ген}}$$

Келесі қадам экспортталатын бу конденсацияланғанда Q жылу жүктемесін есептеу. Конденсацияланған будың үлестік энтальпиясы $\Delta h_{\text{конд,шығ.}}^L$ будың кестесінен 7 бар қысым жағдайындағы қаныққан сұйықтыққа сәйкес келетін етіп есептелуі мүмкін. Сонда жылу жүктемесі былай есептеледі:

$$\dot{Q} = \dot{m}(\Delta h_{\text{турб,кір.}}^V - \Delta h_{\text{турб,шығ.}}^V)$$

нәтижесінде Q W коэффициенті 10.6-кестеде жиынтықталғандай, белгілі болғандай, бұл коэффициент будағы үлкен жасырын жылу оның толық энтальпиясының үлкен бөлігін құрайды.

10.6-КЕСТЕ. Кері қысымды бу турбинасынан энергияның шығуы

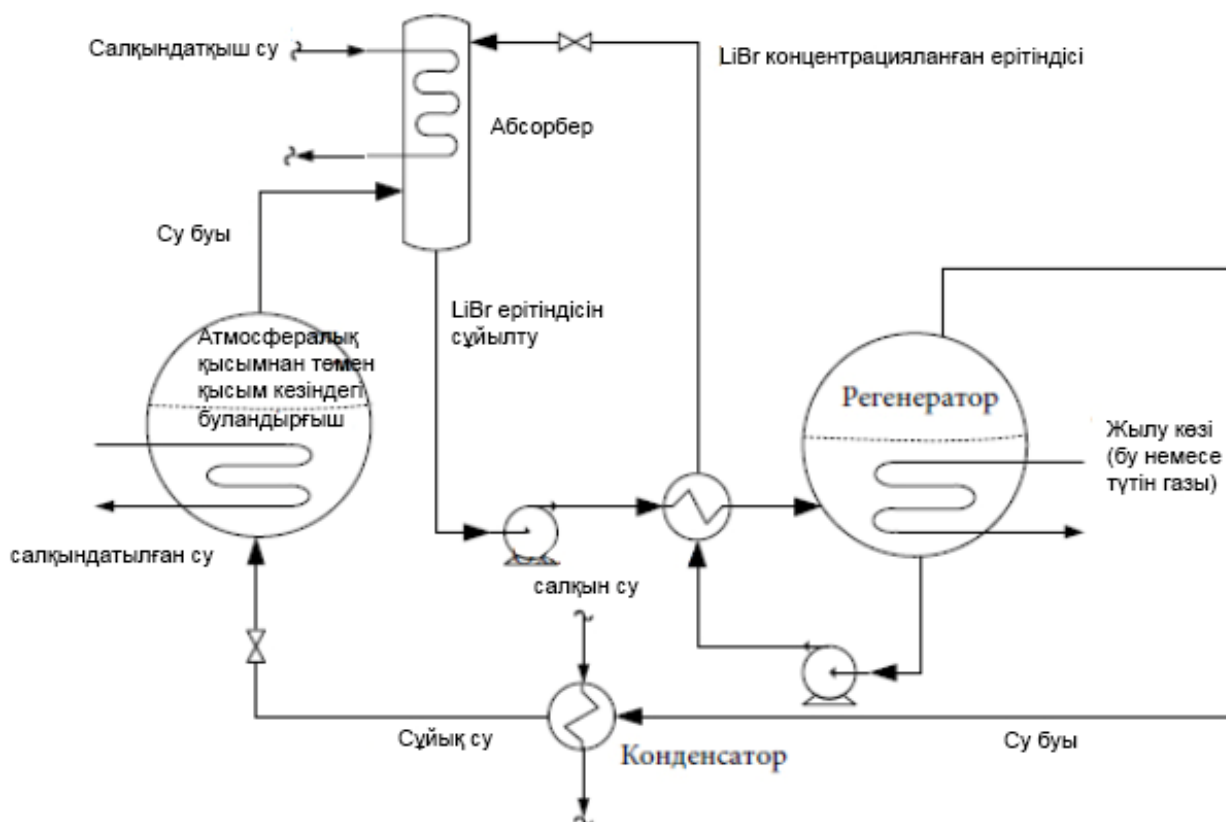
Турбина	Бірлік	Кіріс	Шығыс	
			мінсіз	Нақты
Ағын жылдамдығы	кг / с	100,000	100,000	100,00
температура	С	400	186	221
қысым	Бар	42	8	8
энтальпия	кДж / кг	3,210.6	2,805.6	2,886.
энтропия	кДж / кг	6.744	6.744	6.915
Қаныққан бу энтропиясы	кДж / кг		6.662	
Білікке қуат	кДж / ч		32,399,00	
электр энергиясы	кВт		8,550	
Пайдаланылған бу конденсаторы (жылу беру температура	С			219
қысым	Бар			7
Қаныққан будың	кДж / кг			2762.8
Қаныққан сұйықтық	кДж / кг			697.00
Жылу жүктемесі	МДж / с		206,575	
	Үлес		6.71	

Осылайша, ЖЭО-ны қолдану осы жасырын энергияны қалпына келтіру және пайдалану үшін тиімді стратегия болып табылады, ал тек электр энергиясын өз өнімі ретінде өндіретін станцияда жасырын жылудың көп бөлігі қоршаған ортаға бөлінеді.

10.5.1 Литий бромидімен абсорбциялық салқындату

2-тарауда талқыланғандай, жылу неғұрлым төмен температурадан жоғары температураға берілуі тиіс жылудан туындайтын осындай тоңазыту үдерісінде энергияның жалпы сапасының кенеттен ұлғаюын болдырмау үшін неғұрлым жоғары температурада қосымша жылу талап етіледі. Бұл жоғары жылу температурасы ЖЭО-дағы қондырма циклының шығарындыларымен қамтамасыз етіледі.

10.10-суретте бір сатылы абсорбциялық салқындату циклы көрсетілген, ол атмосфералық қысымнан төмен кезінде жұмыс істейтін екі ыдыстан, буландырғыштан және басқа регенератордан тұрады. Циклға берілетін жоғары температураның жылуы LiBr ерітіндісінің концентрациясы кезінде суды буландыру үшін регенератордағы сұйылтылған LiBr су ерітіндісіне беріледі. Пайда болған су буы конденсаторға келіп түседі, онда салқындатқыш орта су буын сұйық суға конденсациялау үшін пайдаланылады. Содан кейін су әлдеқайда төмен қысымда ұстап тұратын буландырғышта құбырлар (корпус жағы) бойынша ағады және сұйықтық төмен қысымға сәйкес келетін төмен температурада буланады. Салқындатылған ағынды орта (әдетте су) буландырғыштың құбырларымен ағып, корпусының жағына буланатын судың жылуын бере отырып, ағып өтеді. Буланған су содан кейін LiBr концентрацияланған су ерітіндісімен араластыру үшін абсорберге түседі, ал бөлінген жылу салқындатқыш суға беріліп отырады. Ерітіндінің күші әлсіз болады, өйткені ол су буын сіңіреді және бұл әлсіз ерітінді циклды шоғырландыру және қайталау үшін регенераторда (алмастырғышта алдын ала қыздырғаннан кейін) айдалады. 7°C температурада салқындатылған су 30°C температурада берілетін салқындатқыш суды пайдалану кезінде 2 бар төмен қысыммен қаныққан буды пайдалана отырып алынуы мүмкін. Пайдалы әсер коэффициенті немесе ПӘК (салқындатудың жылу режимінің жоғары температурадағы жылу режимінің сомасына қатынасы су берілетін және тұтынылатын қуат) шамамен 0,65-тен 0,7-ге дейін құрауы мүмкін. ПӘК өзара алмасушылықтың болуы есебінен ұлғайтылуы мүмкін және ПӘК одан әрі жақсарту екі сатылы циклды пайдалана отырып іске асырылуы мүмкін, бұл циклда екі генератор пайдаланылады, бұл ретте жоғары температураның жылуы бір регенераторға беріледі, мұның өзінде екінші регенератордағы жылу бірінші регенераторда пайда болған су буының конденсациясы арқылы қалпына келтіріледі. Сонымен қатар жүйенің құны, екінші жағынан, артады. Компрессормен басқарылатын салқындату үдерісімен осы абсорбциялық салқындату үдерісін салыстырдық (механикалық салқындату). Екі үдеріс те жоғары қысым кезінде осы будың салқындауының төмен температурасына және конденсациясына қол жеткізу үшін төмен қысым кезінде сұйықтықтың булануын талап етеді және қоршаған ортаға жылуды бұру үшін тиісінше жоғары температураны сұрайды. Төмен қысымды бу конденсация сатысының алдында қысым астында болатын әдіс екі салқындату түріне бөлінеді, олардың бірі – буды сұйық фазаға сіңіруді және осы сұйықтықты одан әрі жоғары қысымға дейін соруды қамтиды және кейіннен буды шығару үшін механикалық салқындату жағдайында төмен қысымды будың бір сатылы механикалық қысуымен салыстырғанда жылу энергиясын пайдалану.



10.10-СУРЕТ. Салқындатылған суға арналған LiBr бір сатылы абсорбциялық салқындату

10.3-мысал. ЖЭО-да 400°C және 18 бар жағдайында бу конденсациялық 10 000 кг/сағ буды айдау тесігі бар конденсациялау бу турбинасына береді. Бу турбинасының изоэнтропикалық тиімділігі алу нүктесіне дейін 65% құрайды, ал алу нүктесінен шығаруға дейін – 70%, ал механикалық және генераторлық шығындар бұмен өндірілетін қуаттың 5% құрайды деп аламыз. Будың талап етілетін мөлшері бір сатылы LiBr абсорбциялық тоңазытқыш қондырғысының жұмысы үшін 2,43 бар қысымдағы турбинадан алынады (бу жағында қысымның төмендеуін есепке ала отырып, конденсация температурасы 110°C болғанда жылу беру негізінде). Бұл бір сатылы жүйенің ПӘК-і тоңазыту қондырғысына қайтарымды судың температурасы 13°C болғанда, 7°C температурада салқындатылған судың 50 000 кг/с экспорты үшін 0,65 құрайды. Суытатын су суыту қондырғысынан жылуды бөледі және будың циклы 30°C кезінде беріледі және 40°C кезінде градирняға оралады (яғни 10°C жоғарылағанда), осы кезде будың вакуумдық конденсаторында 5°C температура қысылады (конденсатордан шығатын салқындатқыш су температурасының айырмашылығы және конденсацияланатын будың температурасы) деп алайық. Егер оның орнына екі сатылы LiBr абсорбциялық тоңазытқыш қондырғысы пайдаланылса, өндірілген электр энергиясының таза мөлшерінің проценттік өзгеруін есептеңіз. Бұл екі сатылы жүйенің ПӘК анағұрлым жоғары, 1,0-ге тең, бірақ бу 5,74 бардан жоғары қысымда турбинадан шығарылуын талап етеді (бу жағында қысымның төмендеуін ескере отырып, 150°C тең конденсацияның жоғары температурасы кезінде жылу беру негізінде). Қондырғыны пайдалану үшін қажетті электр қуатына, сондай-ақ берілген ПӘК қолдану арқылы тоңазытқыш қондырғыларын пайдалану үшін қажетті жылу энергиясын есептеу кезінде назар аудармаңыз.

Шешуі:

Бірінші кезең қажетті суыту режимін есептеу болып табылады, содан кейін турбинадан шығаруға жататын бу мөлшерін есептеу кезінде пайдаланылуы мүмкін. Бұл есептеулер 10.7 және 10.8-кестелерде жинақталған.

Содан кейін бу турбинасы үшін есептеу турбинаны екі жеке турбина ретінде модельдеу жолымен орындалады, біріншісі экстракция қысымына дейін (1-турбина), ал екіншісі ағынның жылдамдығын алып тастағанда (тоңазытқыш қондырғы үшін бу беру үшін) конденсаторға (2-турбина) кіретін қысым деңгейіне дейін. Конденсатордағы қысым 45°C

кезінде қаныққан бу қысымына сәйкес келеді, ол шығыста салқындатқыш судың 40°C берілген температурасына 5°C қысымның берілген температурасын қосу жолымен есептеледі. Бұл есептеулер 10.9-кестеде келтірілген. Екі жағдайда да генерацияланатын жалпы қуат мәні бойынша бірдей, екі сатылы тоңазытқыш шкаф үшін алынған бумен қамтамасыз етілетін жылу энергиясын үнемдеу талап етілетін жылу энергиясының жоғары сапасымен (яғни бу неғұрлым жоғары қысым кезінде алынуы тиіс) мүлдем жоқ қылады десе болады. Бұл нәтиже сәйкес келмейді; егер бу циклы мен тоңазытқыш қондырғы мінсіз болса (екінші заң тұрғысынан), онда екі балама конструкцияның тиімділігі бірдей болар еді, себебі жалпы жүйелердің әрқайсысынан кіретін және шығатын жылу энергиясының сапасы мен саны (тұтастай алғанда, жүйе тоңазытқыш қондырғымен бірге бу циклын білдіреді) тұрақты (тіркелген).

10.7-КЕСТЕ. Тоңазытқышқа түсетін жүктеме

	Бірліктер	Суытуға түсетін су	Тоңазытқыштан келіп түсетін суытылған су
Ағын жылдамдығы	кг/ч	$m = 50,000$	
Температура	°C	13	7
Энтальпия	кДж/кг	$h_{\text{суыт.су}}^a = 54,0$	$h_{\text{вых}}^{\text{суыт.су}} = 28,8$
Тоңазытқыш жүктемесі	кДж/ч	$Q_{\text{тоңаз}} = m \times (h_{\text{кір}}^{\text{суыт.су}} - h_{\text{шығ}}^{\text{суыт.су}}) = 1,259,000$	

10.8-КЕСТЕ. Бөлінген бу көлемі

	Бірліктер	Бір фазалы салқындату	Екі фазалы салқындату
БЖБ (COP)	Үлес	0,65	1,00
Жылу режимі $Q_{\text{heat}} = Q_{\text{refrig}} / \text{COP}$	кДж/ч	$\frac{1,259,000}{0.65} = 1,937,000$	$\frac{1,259,000}{1.0} = 1,259,000$
Бу конденсациясының температурасы	°C	1110	150
Қаныққан будсұйықтықтың энтальпиясы	кДж/кг	$h_{\text{in}}^{\text{steam}} = 2690.8$ $h_{\text{out}}^{\text{condensate}} = 460.8$	$h_{\text{in}}^{\text{steam}} = 2745.7$ $h_{\text{out}}^{\text{condensate}} = 631.5$
Талап етілетін бу $= \frac{Q_{\text{heat}}}{h_{\text{in}}^{\text{steam}} - h_{\text{out}}^{\text{condensate}}}$	кДж/ч	868	595

10.9-КЕСТЕ. Турбиналар шығаратын энергия

1-турбина (конденсатордың қысымына дейін)	Бірліктер	Бір фазалы салқындату			Екі фазалы салқындату		
		Кіру	шығу	Іс жүзінде	Кіру	шығу	Іс жүзінде
Ағын жылдамдығы	кг/ч	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000	10,000
Температура	°C	400	149	233	400	244	295
Қысым	Бар	18	2.437	2.437	18	5.743	5.743
Энтальпия	кДж/кг	3251.3	2763.8	2934.4	3251.3	2946.0	3052.9
Энтропия	кДж/кг-К	7.181	7.181	7.550	7.181	7.181	7.378
Энтропияның қаныққан буы	кДж/кг-К		7.06			6.77	
Қуат	кДж/ч		3,169,000			1,984,000	
2-турбина (конденсатордың қысымына дейін)		шығу			Шығу		
		кіру	мінсіз	Іс жүзінде	кіру	мінсіз	Іс жүзінде

Ағын жылдамдығы	10,000–	9,132		10,000–	9,405	
(алғаннан кейін қалған)	қДж/ч	868 =	9,	595 =	9,	
Температура	°C	9,132	132	9,405	405	
Қысым	Бар	233	45	295	45	
Бу энтальпиясы	қДж/кг	2.437	0.095	5.743	0.095	
Сұйық энтальпиясы	қДж/кг		2582.2		2582.2	
			187.8		187.8	
Энтальпия	қДж/кг	2934.4	2386.2	2550.7	3052.9	2331.5
Булы энтропия	қДж/кг-K		8.166			8.166
Сұйық энтропия	қДж/кг-K		0.637			0.637
Энтропия	қДж/кг-K	7.550	7.550	8.067	7.378	7.378
Сапалы			0.918	0.987		0.895
қуат	қДж/ч		3,504,000			4,749,000
1 мен 2						
турбиналардағы элект қуаты, кВт			1,761			1,777

Осылайша, бір сатылы тоңазытқыш қондырғымен салыстырғанда үлкен күрделі шығындары бар екі сатылы тоңазытқыш қондырғыны таңдау жүйені мұқият зерттеуді талап етеді, оның шеңберінде осы конструкцияларға жалпы көзқарас тарапынан әр түрлі ымыраға келушілік жақтарына баға беріледі.

Әдебиет

- Bertoncini F, Marion MC, Brodusch N, Esnault S. Unravelling molecular composition of products from cobalt catalysed Fischer-Tropsch reaction by comprehensive gas chromatography: Methodology and application. *Oil Gas Sci Technol Revue IFP* 2009;64(1):79-90.
- Black J. Cost and performance baseline for fossil energy plants, volume 1: Bituminous coal and natural gas to electricity. U.S. Department of Energy Report; 2010. Report nr. DOE/NETL- 2010/1397. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Heydorn EC, Diamond BW, Lilly RD. Commercial-scale demonstration of the liquid phase methanol (LPMEOH™) process, Vol. 2. U.S. Department of Energy Final Report; June 2003. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- Johnson BG, Bartholomew CH, Goodman DW. The role of surface structure and dispersion in CO hydrogenation on cobalt. *J Catal* 1991;128(1):231-247.
- Kalina T, Moore RE, inventors; Exxon Research and Engineering Company, assignee. Catalytic coal hydrogasification process. US patent 3,847,567. November 12, 1974.
- Kamali MR, Sundaresan S, Van den Akker HEA, Gillissen JJJ. A multi-component two-phase lattice Boltzmann method applied to a 1-D Fischer-Tropsch reactor. *Chem Eng J* 2012; 207:587-595.
- Kang WR, Lee KB. Effect of operating parameters on methanation reaction for the production of synthetic natural gas. *Korean J Chem Eng* 2013;30(7):1386-1394.
- Keenan JH, Keyes FG, Hill PG, Moore JG. *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor, Liquid, and Solid Phases*. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 1969.
- Kirtay E. Recent advances in production of hydrogen from biomass. *Energy Convers Manage* 2011;52:1778-1789.
- Kurtz M, Wilmer H, Genger T, Hinrichsen O, Muhler M. Deactivation of supported copper catalysts for methanol synthesis. *Catal Lett* 2003;86(1-3):77-80.
- Li M, Brouwer J, Rao AD, Samuelsen GS. Application of a detailed dimensional solid oxide fuel cell model in integrated gasification fuel cell system design and analysis. *J Power Sources* 2011;196:5903-5912.
- Li M, Rao AD, Samuelsen GS. Performance and costs of advanced sustainable central power plants with CCS and H₂ co-production. *Appl Energy* 2012;91(1):43-50.
- Rao AD, inventor, Fluor Corporation, assignee. Reactor expander topping cycle. US patent 4,999,993. March 19, 1991.
- Soemardji A, Engineer P. January 2012. How green is the stamicarbon urea process? Available at <http://www.stamicarbon.com/documents/ot/how-green-is-the-stamicarbon-urea-process-v2-w.pdf>. Accessed February 8, 2014.
- Tijm PJA, Waller FJ, Brown DM. Methanol technology developments for the new millennium. *Appl Catal A General* 2001;221(1):275-282.

11

ЖОҒАРЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ ЖҮЙЕЛЕР

Бұл тарауда мембраналық сепараторлар және реакторлар, сонымен қатар отындық элементтерді қолданатын қоспалы циклмен қатар отындық элементтер сияқты энергетикалық және қондырғылардың экологиялық қауіпсіздігіне және экономикалық тұрақтылыққа елеулі ықпал ететін кейбір перспективалық жоғары технологиялы жүйелер қарастырылады. Сонымен қатар басқа да келешегі бар технологиялар, химиялық циклдар мен магнитті гидродинамикалық (МГД) қондырғылар туралы қысқа талқылау келтірілген.

Жану үшін қажетті (көміртекті сезу және байланыстыру (CCS)) немесе көміртекті шикізатты газдандыруға арналған химиялық оттегі тарату үшін металл тасығыш қолданылатын химиялық циклдарды ұйымдастыру, қымбат (шығындар мен тиімділік тұрғысынан) ауа бөлгіш қондырғыларды (ASU) алып тастау тұрғысынан артықшылығы бар. Қондырмалық цикл ретінде МГД қазба отынмен жұмыс істейтін энергетикалық қондырғылардың тиімділігін айтарлықтай арттыру әлеуетіне ие және назар аударады, себебі циклдың отындық газы CCS үшін неғұрлым қолайлы, өйткені отынды жағу үшін ауаның орнына O_2 пайдаланылады, бұл қажетті өте жоғары температураға қол жеткізуге мүмкіндік береді.

11.1 ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ МЕМБРАНА-СЕПАРАТОРЛАР

Жоғары температуралы мембраналарды пайдалана отырып сепарациялау технологиялары көмірді газдандырумен құрамдастырылған циклда (IGCC) O_2 беру үшін ауаны сепарациялау немесе оттекті жағу үшін, мысалы, IGCC кезінде синтетикалық газ ағынынан H_2 айыру үшін немесе H_2 ілеспе өндірісі, не CO_2 шығарындыларын шектеу үшін газ турбинасында жағу үшін декарбонизацияланған оттық газды генерациялау үшін жүйенің тиімділігін арттыру және қондырғы құнын төмендету мақсатында әзірленеді.

Керамикалық материалдар жоғары температуралы мембрана ретінде ғылыми және инженерлік қауымның негізгі назарын аудартады. Және керамикалық мембраналардың өте тар қолданысын талқылауға кіріспес бұрын, бұл тарауда негізгі материалдардың ғылыми негізделген қасиеттері қарастырылады. Керамикалық мембранадағы ауаны айыру үшін оттегі иондары тасымалданады, ал сутегін айыру үшін протондар тасымалданады. Оттегі иондарын тасымалдау материалдары, сондай-ақ осы тарауда қарастырылған, қатты тотықты отын элементінде (ҚТОЭ) де қолданылады. Сонымен қатар H_2 бөлуге арналған тығыз фазалы керамикалық және металл мембраналары әзірленуде және қысқаша талқыланады.

11.1.1 Керамикалық мембраналар

11.1.1.1. Жартылай өткізгіштердегі өткізгіштік. Мінсіз оқшаулағыш пен өткізгіштер арасында жартылай өткізгіштер деп аталатын материалдар класы бар. Олар өткізгіштік қасиеттерінің осы екі кластар арасындағы аралық болып табылады. Жартылай өткізгіштер ковалентті кристалдардан тұрады. Ковалентті кристалдың атомы ковалентті байланыстармен бірге ұсталады, типтік мысал алмаз болып табылады. Көміртек атомының сыртқы қабығындағы төрт электронның әрқайсысы төрт жақын көршілес атомдарымен ковалентті байланыс жасайды. Валенттік электрондардың әрқайсысы байланысқа қатысатындықтан, электрондардың ешқайсысы тез жылжымалы емес. Алайда өте жоғары температураларда өткізу аймағында бос энергетикалық деңгейге дейін электрондардың көпшілігі қозғалады.

Жартылай өткізгіштердің өткізгіштігін айтарлықтай арттыру үшін олардың материалдарын ең аз концентрациядағы «қоспасыз» элементтердің белгілі бір түрімен қоспалауы мүмкін. Қоспалаушы қоспа атомдарының екі түрі бар: n-типті жартылай өткізгіштерді тудыра отырып, сыртқы қабықтардан электрондарды оңай босата алатындар және р-типті жартылай өткізгіштерді тудыра отырып, валенттік аймақта бос орындарын қалдырып, жартылай өткізгіштердің бастапқы атомдарынан электронды алатындар. Кейін мұндай бос орын («тесік») электронның өтуіне мүмкіндік беретін тоқ ағынын жеңілдету үшін еркін энергетикалық деңгейге «еркін қозғала алады». Электрондық тесіктер, электрон валенттік аймақтан өткізгіштік аймаққа ауысқан кезде пайда болады. Ол өзінен кейін валенттік аймақта еркін энергетикалық деңгейді қалдырады және осылайша пайда болған электрондық тесік бос деңгейге жақын энергетикалық деңгейі бар басқа электронмен толтырылады.

11.1.1.2 Бос орындар және қатты денелердегі диффузия. Кристалды торлар атом жоқ бос торлар сияқты ішкі кемшіліктерге ие болуы мүмкін. Бұл бос орындар атомға (ионды түрдегі оттегінің атомы) қатты дене арқылы тасымалдауға мүмкіндік береді, бұл ретте оттегінің ионы бір бос орыннан басқа орынға «секіріп өтеді». Егер біз р-типті жартылай өткізгіш туралы айтатын болсақ, бос орын қоспалаушы элемент жасаған оң заряд болуы мүмкін. Диффузияланушы атом бос орынға ауысқан кезде кристалл торда басқа атомдармен химиялық байланыс жасайтындықтан, қайта секіру химиялық сипатқа ие. Қатты денелердегі өздік диффузия кездейсоқ кезбе арқылы жүреді (диффузияланушы түрдің жекелеген атомдары бір-бірімен өзара іс-қимыл жасамаған жағдайда). Бұл ретте ион немесе атом бір бос орыннан (келесі қайта секіретін ионды немесе атомды қабылдау үшін бос орын қалдыра отырып) басқасына секіріп кетеді. Егер өзара әрекеттесетін атомдарды қарастырсақ, онда химиялық әлеует қозғаушы күш жүктейді және белсенділік коэффициентінің шамасына (немесе күшейту коэффициентінің) байланысты диффузияның (химиялық реакция кинетикасы) кинетикалық үдерісінің жылдамдығы өздігінен диффузиямен салыстырғанда тәртіпке ұлғайтылуы мүмкін. Қатты дененің ішіндегі диффузия үдерісі ұшатомды химиялық реакциясына ұқсас. Секіретін ион немесе атом өздерінің көршілес атомдарымен химиялық байланысын үзіп, жаңа көрші атомдармен жаңа химиялық байланыс жасайтын бос орынға секіреді. Қозғаушы күш аз болғанда диффузия жылдамдығы химиялық белсенділіктің сызықтық пропорционалды градиенті ретінде қабылдануы мүмкін, сол екі арада диффузия коэффициенті үдерістің химиялық табиғатына байланысты Аррениус санының температураға тәуелді екенін көрсетеді.

11.1.1.3 Оттегіні тасымалдау мембраналары. Перовскит²⁴ ABO_3 химиялық құрылымы бар, әрі А-учаскесі және / немесе В-учаскесі екі немесе одан көп элементтердің қоспасын білдіруі мүмкін. $\text{La}_{0.4}\text{Ca}_{0.6}\text{Fe}_{0.75}\text{Co}_{0.25}\text{O}_{3-\delta}$ -д оттегі жетіспеушілігімен немесе δ ұсынылған бос орны бар оттегі иондарының көлігі үшін жарамды Перовскит мысалы болып табылады. Осындай перовскиттер керамикалық торлар арқылы электрондар мен оттегінің иондарын да өткізе алады. Бұл кезде 700-1000⁰С температура диапазонында O_2 жоғары ағындары болады. Керамикалық мембрана арқылы оттегінің өтуіне байланысты бірқатар процестер бар. Газ-мембрана шекарасындағы газ қабыршағы арқылы диффузия жолымен

²⁴ CaTiO_3 Перовскит минералы тәрізді құрылымы кристалдық типтегі материалдар.

мембранаға жеткеннен кейін, ол жер бетіне адсорбцияланады және содан кейін талап етілетін жоғары температураларда оттегі иондарының бос орындары бар керамикалық тор арқылы үймелі жолмен тасымалданады. Температуралары $>700^{\circ}\text{C}$ болғанда мембрана арқылы оттегі ағынын Нернст-Эйнштейннің теңдеуімен алуға болады (Foyand McGovern, 2005):

$$j_{\text{O}_2} = \frac{\sigma_i R_u T}{4 L n_e^2 F^2} \ln \left(\frac{P_{\text{O}_2, \text{кір.}}}{P_{\text{O}_2, \text{шығ.}}} \right)$$

мұндағы j_{O_2} – аудан бірлігі арқылы өтетін оттегі ағыны, σ_i – материалдың иондық өткізгіштігі, T – абсолютті температура, L – мембрананың қалыңдығы, n_e – оттегі иондары үшін үнемі 2-ге тең қуат тасушының заряды, F - тұрақты Фарадей = 96,487 Кл/моль электрон (г-моль электрондарына кулон, әрбір г-моль, Авогадро саны бар электрондар немесе 6.022×10^{23} электрон), P_{O} – оттегінің парциалдық қысымы беру жағында, және P_{O_2} – оттегінің парциалды қысымы ену жағында.

11.1.1.4 Сутегі көлігінің мембраналары. Тығыз жоғары температуралы керамикалық мембраналар арқылы өтетін сутегі көлігі протондар мен электрондардың аралас өткізгіштігімен шектелген. Электрон-өткізгіш керамикалық екінші фазасы бар протон-өткізгішперовскит фазасын қамтитын керамикалық / керамикалық композиттер әзірленеді (Роарк және авторлас., 2002). Протонды және электрондық өткізгіштердің мұндай үйлесіміне өтпелі металдардың тиісті тотықтарымен қоса бастапқы перовскиттің шамадан тыс қоспалауы арқылы қол жеткізуге болады. Қоспалауыш өтпелі металл оттегіне арналған бос орындарды генерациялайтын және протондық өткізгіштікке ықпал ететін кальцийлеу кезінде перовскит торына енгізіледі, ал өтпелі металдың қалған бөлігі әдетте жоғары электрондық өткізгіштігі бар металл тотығының пайда болуына әкеледі. Сонымен қатар металл фазасымен (сутекті-өткізгіштігі жоғары металдармен және балқымалармен) протон-өткізгіш керамикалық фазасын біріктіру арқылы пайда болған металл керамикалары зерттеледі. Оларда шағын мөлшердегі металдың өте жоғары электрондық өткізгіштік артықшылығы бар. Осылайша протон-өткізгіштік фазасының санын көбейтеді. Сутегі ағынын Нернст-Эйнштейн теңдеуі арқылы алуға болады (Роарк және авторлас, 2002):

$$j_{\text{H}_2} = \frac{\sigma_{amb} R_u T}{4 L n_e^2 F^2} \ln \left(\frac{P_{\text{H}_2, \text{кір.}}}{P_{\text{H}_2, \text{шығ.}}} \right)$$

мұндағы j_{H_2} – аудан бірлігі арқылы өтетін сутегі ағыны, σ_{amb} – амбиполярлық өткізгіш деп аталатын протондар мен электрондардың аралас өткізгіштігі, T – абсолюттік температура, L – мембрананың қалыңдығы, n_e – протондар үшін үнемі 1-ге тең болатын қуат тасушының заряды, P_{H_2} – сутегінің беру кезіндегі парциалдық қысым және P_{H_2} , шығу – сутегінің енудегі парциалдық қысымы.

Әзірленетін жоғары температуралы мембраналардың басқа түрлері:

- Микро кеуекті бейорганикалық мембраналар (Джудкинз және Бишоф, 2004), олар арқылы сутегі молекулалық түрде енеді және оның ағыны мембрана арқылы парциалды қысымның градиентіне тура пропорционал.
- Pd-Cu қорытпа мембраналары (Эник, авторлас, 2003) көмегімен сутегі атомдық түрінде келесі кезеңдермен енеді: металл бетіндегі H_2 диссоциативті адсорбция, көлемді металл арқылы атомдық сутегінің диффузиясы және, ақырында, металл бетіндегі H_2 ассоциативті десорбция. H_2 ағымы мембрананың әрбір жағынан H_2 парциалдық қысымның квадрат түбіріндегі айырмашылыққа пропорционалды.

11.1.2 Ауаның мембранамен бөлінуі

9-тарауда айтылғандай, ауаны сұйылту қондырғысының энергияны тұтынуы жалпы тұтынылатын қуаттың жартысынан астамын немесе IGCC өндіретін жалпы қуаттың 10-20%-ын құрайды.

AirProductsandChemicals, Inc. (Армстронг пен авторлас, 2002) және Praxair, Inc. (Прасад пен авторлас, 2002) газдандыруда пайдалану үшін ауадан O_2 ірі масштабты өндіріске арналған оттегі-ионды көлік мембраналарын, сондай-ақ сондай-ақ энергия тұтынуы да, күрделі шығынды даәдеттегі криогенді ASU-мен салыстырғанда шамамен 30%-ға төмендету перспективасымен тотықтыратын өртеу қондырғыларында әзірлейді. Оттегі иондары мен электрондары 800-900°C температурада кері бағытта кеуекті емес, аралас ионды-электронды өткізгіш мембрана арқылы өткізеді. Мембрананың екі жағы арасындағы O_2 парциалды қысымның айырмашылығын арттыру үшін ауа температурасы 800-900°C және мембрананың бір жағының қысымы 15-20 бар болу керек, бұл кезде оттегінің сіңірілу жағында, тіпті суб-атмосфералық қысымға дейін төмен қысым сақталады. Ігсс қолдануында интеграцияланған жүйе газ турбинасының компрессорынан алынатын ыстық ауадан тұрады, оны мембрананың қабырғасы арқылы ионды нысанда ауыстыру арқылы O_2 бөлігін бөліп тұратын мембрананың блогына жеткізу үшін қысым астында сарқылған ауа газ турбинасына қайтарылады. Компрессор-бустерден кейінгі алынған ауа температурасы осы ауа ағынында синтездің тікелей тұтану жолымен мембраналық-сепаратордың қажетті жұмыс температурасына дейін ұлғайтылған кезде алынған ауа үшін газ турбинасына қарай сарқылған ыстық ауаның кері қысымын арттыру қажет. Газ турбинасы ыстық сарқылған ауаны (800-900°C) қабылдауға қабілетті, ал осындай қажетті қуаттылығы бар газ турбиналары қазіргі уақытта қолжетімсіз болуы тиіс. Жалпақ және құбырлы мембраналық құрылымдары әзірленуде және осы жүйелердің коммерциялық ұсынысы 10-15 жылдан кейін орындалуы мүмкін.

11.1.3 Сутегі алуға қажетті мембрана технологиялары

H_2 ажырату мембраналары сулы газдың конверсиясын біріктіретін немесе бір блоктағы ажырату өнімімен бірге риформинг реакторын «мембраналық реакторларды» пайдалану үшін зерттеледі. Бұл жабдықтың саны мен оның өлшемдерін қысқартуына ғана емес, сондай-ақ реакция өнімі реакциялық қоспадан үздіксіз алынып тасталатындықтан, жылу тиімділігі мен конверсиясын жоғарылануына әкеледі. Катализатормен толтырылған құбырлы құрылымдарда, құбырлар тиісті құрылымдық материалы бар мембрана материалынан жасалған, оның пайда болуына қарай H_2 келіп түсетін қажетті беріктікті қамтамасыз ету үшін жасалған. Осы жүйелердің коммерциялық ұсынысы 10-15 жылдан кейін орындалуы мүмкін.

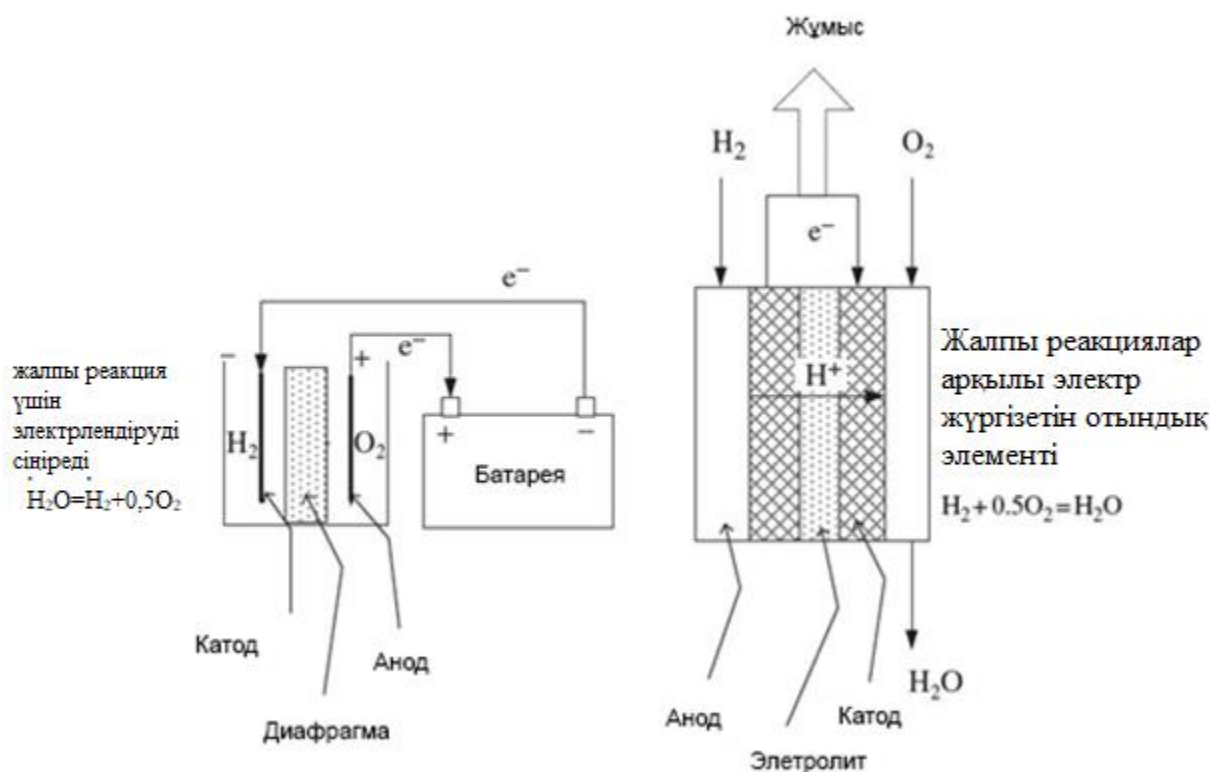
11.2 ОТЫН ЭЛЕМЕНТТЕРІ

Жылу қозғалтқыштарының кемшілігі, олар ластаушы заттарды шығаратын жану үдерісіне байланысты болады. Ал отынмен байланысты энергияның қайта түрлендіру тиімділігі жануына байланысты аралық кезеңмен электр энергиясына байланысты термодинамиканың екінші заңының салдарынан жылу пайдаланылуы мүмкін температурамен шектеледі. Жылу қозғалтқышында конструкция материалдары жылу қуатына түрлендірілетін температураны шектейді. Энергия сапасының айтарлықтай төмендеуі отындағы химиялық байланысты энергия едәуір төмен температурада жылу қозғалтқышының жұмысшы сұйықтығына бөлінетін және берілетін кезде орын алады. 2-тарауда талқыланды, энергия сапасының төмендеуі (неғұрлым төмен температурада жылу энергиясын пайдалану есебінен) энтропияны генерациялауға, энергияны жоғалтуға және тиімділіктің төмендеуіне барабар. Материалдар жоғары температурада жұмыс істеу үшін әзірленген болса да тиімділігі шектеулі, өйткені жану үдерісінен циклға жылу қосу тұрақты температурада болмайды. Мысалы, H_2 типіндегі отынды алайық. Оның жалынның адиабатикалық температурасы 2483 K құрайды, ал Карно циклының тиімділігі $>80\%$ осы температураны жылу көзінің температурасы және қоршаған ортаның әдеттегі температурасы ретінде жылуды бұру температурасы ретінде пайдалана отырып есептелуі мүмкін. Дегенмен осы есептелген тиімділік шатастырады. Брайтон, Дизель немесе Отто циклдары сияқты тікелей қыздырылатын циклдарда жұмысшы сұйықтығына жылу қосу тұрақты температурада болмайды, ал әлдеқайда төмен температурада басталады (қысу қадамының соңындағы температура). Жылу жеке жұмысшы сұйықтығы берілетін Ренкин циклы сияқты жекелеген

циклдар жағдайында жылу экономайзерге кіре берістегі температурада жылу тек қосылып қана қоймай, сонымен қатар жылу көзінің температурасы тұрақты болып табылмайды, өйткені жану өнімдері (оттық газдар) жылудың жұмысшы сұйықтығына берілуіне қарай салқындатылады. Осы циклдардың Карноның шынайы тиімділігі жылу қосудың айнымалы температурасын ескеруі тиіс және ол 80%-дан айтарлықтай төмен екенін анықтауға болады. Отынмен байланысты осы энергияны түрлендірудің неғұрлым тиімді және экологиялық жауапты тәсілі осы тарауда талқыланатын технологиялық проблемаларды жеңгеннен кейін отын элементтерін пайдалану болып табылады. Отын элементтері отынмен байланысты энергияның едәуір бөлігін жылу қозғалтқыштарындағы сияқты жылу энергиясына түрлендірудің аралық кезеңсіз тікелей (электрохимиялық) электрге түрлендіреді. Алайда отын элементтері табиғи газ сияқты таза отынды талап етеді. Көмір және биомасса сияқты отынның лас түрлері газдандыру жолымен, осылайша алынған синтез-газды кейіннен тазарту, ал кейін отындық элементін таза синтез-газбен толтыру арқылы отынның таза түрлеріне түрлендірілуі мүмкін.

Электр химиялық құрылғы сияқты отын элементі химиялық байланысқан энергияны тікелей электр энергиясына түрлендіретін батареяға ұқсас, бірақ әдеттегі батареялардан айырмашылығы элементке химиялық энергия табиғи газ немесе синтез-газ сияқты отын түрінде тұрақты негізде беріледі, ал тотықтырғыш (ауа) да үздіксіз беріліп отырады.

Отындық элементінде болып жатқан конверсия үдерісін кері бағытта жұмыс істейтін электролиз ретінде қарастыруға болады. 11.1-суретте көрсетілгендей, электролиз кезінде бөлуге арналған электр тоғын қолданады.



11.1-сурет. Электролиздегіш және отын элементі

Мысалы, H₂O суды H₂ және O₂ бөлгендей, бұл кезде осында көрсетілген отын элементінің түрі H₂O және электр тоғын алу үшін O₂ тотықтырғышы бар H₂ отынды кері біріктіруді өндіреді. Отын отындық элементтің анодына (болымсыз электродқа) келіп, электрондарды сыртқы тізбекке шығара отырып тотығады. Тотықтырғыш катодтың үстімен ағады, ал сутегінің иондары энергияны тудырғаннан кейін сыртқы тізбектен түсетін электрондарды тұтына отырып, O₂-мен өзара байланысу үшін отындық элементтің электролиті арқылы ағады.

1800 жылдары отындық элементтер таңғажайып болып саналатын алғашқы отындық элементі 1839 жылы заңгер және ғалым Уильям Гроув мырзамен салынған еді. Электр

энергиясының тәжірибелік генераторлары ретінде отындық элементтеріне елеулі қызығушылық тек 1960-шы жылдары ғана пайда болды, ол кезде АҚШ ғарыштық бағдарламасы ядролық энергияның аса қауіпті отын элементтерін және қымбат күн энергиясын таңдады. Отын элементтері «Джемини» және «Аполлон» ғарыш кемелерін энергиямен қамтамасыз етті. Олар сондай-ақ ғарыш кемесі үшін электр және су берді.

Отындық элементтің отынға байланысты электр қуатын энергияға түрлендіруін шектейтін шығындары бар. Бұл шығындар негізделген:

1. Реакцияның температурасына дейін реагенттерді қыздырудан және реакция температурасынан өнімдерді салқындатудан туындаған қайтымсыздық.
2. Реакция энтропиясының өзгеруі.
3. Элементтің поляризациясынан туындаған қайтымсыздық.

Отындық элементтердің шығындары жүйенің тиімділігін төмендетуіне сәйкес отындық элементтер жүйесі істен шыққан қабылданбаған немесе жұмсалған жылу түрінде көрінеді. Ақаулы жылудың елеулі бөлігі жүйенің жалпы тиімділігін айтарлықтай арттыру үшін жылу қозғалтқышын пайдалану арқылы когенерация немесе қосымша қуат алу үшін пайдаланылуы мүмкін. Отындық элементтердің отындық қоздырғыштармен бірігуін «гибридті цикл» деп атайды. Дұрыс құрастырылған гибридік цикл төмен жылу шығару қабілеті негізінде табиғи газды пайдалана отырып, жүйенің тиімділігін 60%-дан артық арттыра алады.

Тиімділіктің артықшылығына қосымша өлшемге қатысты тәуелсіз, басқа энергия түрлендіргіш аспаптармен салыстырғанда отын элементтерінің басқа да басты артықшылықтары келесідей көрсетілген:

- Ішінара жүктеме кезінде жақсы жұмыс сипаттамалары.
- Модульдік жобалау және өлшем икемділігі.
- Қоршаған ортаға әсерінің төмендігі.
- Қолайлы экологиялық сигнатураның арқасында жақсы орналастыру қабілеті.
- Жүктемені өзгертуге жылдам реакция.

Дегенмен отындық элементтері белгілі бір кемшіліктерге ие:

- күкірт және хлоридтер қосылыстары сияқты отында болуы мүмкін белгілі бір лаптағыштарға сезімталдығы;
- төзімділік / сенімділік туралы далалық деректердің болмауы;
- \$ / кВт негізінде жабдықты орнатуға арналған ағымдағы шығындар жоғары.

11.2.1 Электрохимия негіздері және тасымалдау құбылыстары.

Отындық элементтердің әр түрлі түрлері бар, бірақ отындық элементтердің кез келген негізгі компоненттері анод, катод және анод пен катодты бөліп тұратын электролит болып табылады. 11.1-суретте көрсетілген отындық элементтің түрінде отын электрондарын босата отырып, анодта әрекеттеседі немесе «тотығады», O_2 «қалпына келтіру» (әдетте ауадан) катодта жүреді, ал электролит элементтің ішінде бір электродтан басқасына иондарды жүргізеді.

Осылайша, реакция өту үшін отын (H_2 делік) мен тотықтырғыштың (ауаның құрамындағы O_2) тығыз араластырылады, отынның жану орнына қарағанда, отындық элемент жағдайында жалпы реакция екі «жартылай реакция» болып бөлінеді. Төменде көрсетілгендей, қарастырылып отырған отындық элементтің түріне арналған қалпына келтіру реакциясы және тотығу реакциясы кеңістікте анодта шығарылған және электрондармен бөлінген катодты енгізгенге дейін пайдалы жұмыс жасау үшін сыртқы тізбек арқылы реттелген тәртіппен жүреді.

Катодты секцияның тотығуы: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$

Катодты секцияның кемуі: $\frac{1}{2}O_2 + 2e^- + 2H^+ \rightarrow H_2O$

Жалпы реакция: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$

Қайтымды отындық элементтің атқарып отырған жұмысы жалпы реакцияға арналған Гиббс еркін энергиясының өзгеруі ретінде көрсетілуі мүмкін. Кері отын элементі жылу беру /

көзімен қоршалғанда, сондай-ақ T температурасы кезінде Q жылу беру кері жүреді, бірақ жылу қозғалтқышының жұмысы отын элементі мен жылу беру/көз арасындағы температураның нөлдік айырмасына байланысты жүргізіле алмайды. Отын элементі кері жұмыс істейтіндіктен, отын элементі + жылу беру / көзінің энтропиясының жалпы өзгеруі нөлге тең болуы тиіс. Энтропияның өзгеруі жылуды әкету / көзі = Q/T және энтропиядағы отындық элемент = $-Q/T$ болуы тиіс. Бірінші заңнан, $W = \Delta H - Q = \Delta H - T\Delta S$, мұнда ΔH және ΔS – энтальпия және энтропия отындық элементке (реагенттер мен өнімдер) кіретін және шығатын ағындар арасындағы өзгерістер. Басқа ешқандай жұмыс түрі іске асырылмайтындықтан, бұл электрлік жұмыс болуы тиіс. Отындық элементтің атқарып отырған жұмысы жалпы реакцияға арналған Гиббс еркін энергиясының өзгеруі ретінде көрсетілуі мүмкін.

$$W_e = \Delta H - T\Delta S = \Delta G$$

ΔG – реакцияның нақты жағдай кезінде реагенттер мен өнімдердің әрқайсысының ұшпалылығына, олардың стандартты күйіндегі бірлік ұшпалылығындағы реагенттермен (мысалы, H_2 мен O_2) және өнімдермен (мысалы, H_2O) T температурасы кезіндегі реакцияға арналған ΔG^0 Гиббс еркін энергиясының қолжетімді стандарттық өзгеруі негізінде есептелуі мүмкін. Мысалы, жалпы реакция үшін $aA + bB \rightarrow cC + dD$,

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT \ln(Q) \quad (11.1)$$

Мұндағы

$$Q = \frac{f_C^c f_D^d}{f_A^a f_B^b}$$

f_i – i түрінің фугитивтілігі.

Электр тоғының жұмысы заряд ауысып жүретін заряд пен кернеудің өнімі болып табылады, сондықтан алатынымыз:

$$\Delta G = n_e F \quad (\text{мыс.}) \quad (11.2)$$

мұндағы n_e – жартылай реакцияға қатысатын электрондар саны.

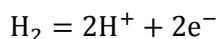
Шартты газдардың қатысуымен ұяшықтың өте жақсы шамасы (E «ажыратылған тізбектің шамасы», яғни тоқсыз) теңдеуді 11.2 теңдеуіне қою арқылы 11.1 теңдеуіндегі парциалдық қысыммен фугитивтілікті ауыстырғанда есептелуі мүмкін, бұл Нернст теңдеуіне әкелуі мүмкін:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \frac{R_u T}{n_e F} \ln \left(\frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \right) \quad (11.3)$$

Мұндағы E_0 – тіректі шама, ал P_i – i түрінің қысым шамасы.

11.1-мысал. Отындық элементтегі 1.0 А (амп) тоқты түрлендіру үшін қажетті H_2 шығынын есептеу.

Шешімі:



Жоғарыда келтірілген жарты реакциядан көрініп тұрғандай, отындық элементке әсер ететін анодтағы 2 электрон H_2 молекуласына немесе 2 моль H_2 моль электрондарына босатылады, ал электрондардың тасымалданатын заряды $F = 96$ Фарадей тұрақтысымен,

487 С/моль константамен беріледі. Отындық элементтегі 1.0 А (amp) тоқ генерациясы үшін қажетті H_2 шығынын есептеңіз.

$$\dot{M}_{H_2} = \frac{\text{моль } H_2}{2 \text{ моль } e^-} \times \frac{\text{моль } e^-}{96,487 \text{ C}} \times \frac{\text{C/s}}{1 \text{ A}} \times \frac{3600 \text{ сек.}}{\text{сағ}} = 0.01865 \frac{\text{мол. сағ}}{\text{А}}$$

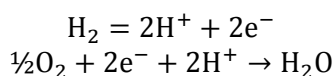
11.2-мысал. 298 К (H_2O сұйықтық ретінде өнімімен) кезінде жұмыс істейтін отындық элементтің стандартты шамасын (E_0) есептеңіздер.

Шешімі

11.2 теңдеуінен: $11.2, \varepsilon_0 = -\Delta G^0 / (n_e F)$

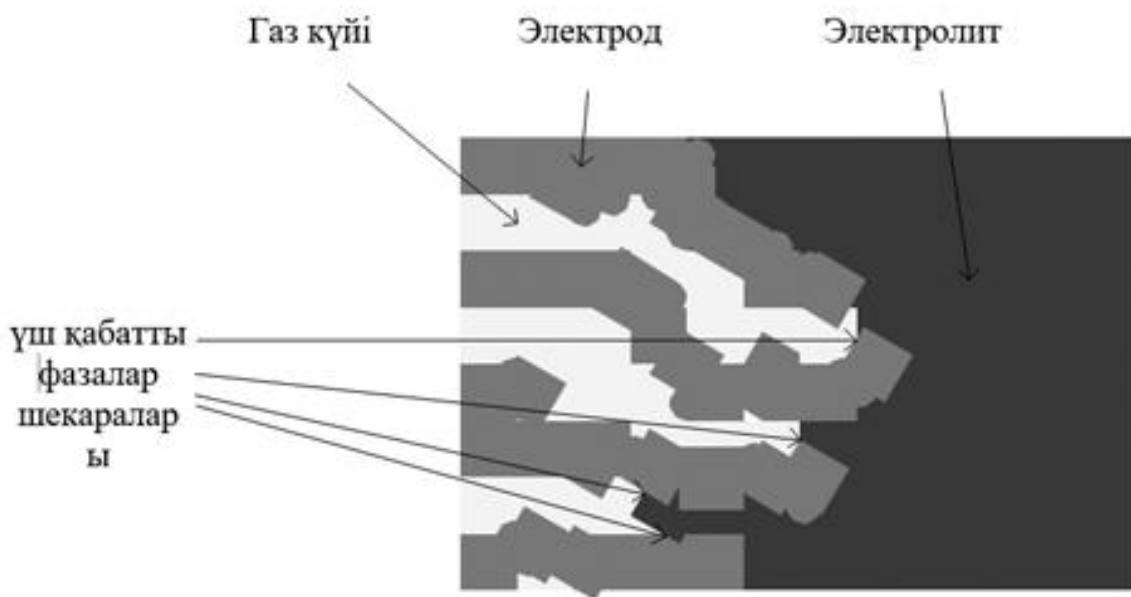
Жалпы реакция үшін $H_2(g) + \frac{1}{2}O_2(g) \rightarrow H_2O(l), \Delta G^0 = -237,141 \text{ Дж/моль } 298 \text{ К}$ болғанда.

Бұл реакция $n_e = 2$ деп көрсететін екі жартыкеш реакция сияқты жазылуы мүмкін.



$$\varepsilon_0 = -\frac{\Delta G^0}{(n_e F)} = 237,141 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}} / (2 \times 96,487 \text{ C/моль}) = 1.229 \text{ Дж/С} = 1.229 \text{ V}.$$

Егер H_2O өнімін бу ретінде қарастыратын болсақ, онда $\Delta G^0 = -228,582 \text{ Дж/моль } 298 \text{ К}$ болғанда, ал содан кейін 184 В төмен мағына шығады.



11.2-сурет. Үш қабатты фазаның шекарасы

11.2.2 Отын элементтерінің іс жүзіндегі әрекеті

Отындық элемент жұмыс істеген сәттен бастап (электрондар ағып жатқанда, тізбек тұйықталғанда), қайтымсыз үдерістерге байланысты ажыратылған тізбектің кернеуімен салыстырғанда әлеуеттің немесе кернеудің төмендеуі байқалады және отындық элементтің нақты жұмысы осы шығындардан төмен, бұрын аталған үш негізгі шығындар байқалып отыр.

Ұяшықтарды поляризациялаудан туындаған шығындар төменде сипатталған осы

процестерді практикалық жылдамдықпен басқару үшін қажетті қозғалғыш күштерді құрбан етуді талап ететін отын элементінде болатын әр түрлі тасымалдау үдерістері мен химиялық үдерістерге байланысты:

- Ішкі реформинг пен жылжыту реакциясына арналған анод тарапынан және, керісінше, (бұл қолданылатын жерде) шапшаңдатқыш бетіне реагенттер мен өнімдерді конвективтік массалық тасымалдау;
- Риформинг: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2 + \text{CO}$, $\text{ДН} > 0$
- Жылжыту: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$, $\text{ДН} < 0$
- Электрод бетінен реагенттер мен өнімдердің конвективтік массалық тасымалдау;
- Кеуекті электродтар арқылы реагенттер мен бұйымдардың массалық алмасуы;
- Газ фазасы, электрод беті және электролит беті шекара арасындағы бөлу шекарасындағы электрохимиялық реакциялар, сондай-ақ фазаның немесе ТРВ²⁵ бөлімінің үштік шекарасы ретінде белгілі (11.2-суретті қара) массалық тасымалдаудың бірқатар механизмдерін қосатын электронды электродтар үшін (электронды өткізетін электрондық өткізгіштер, бірақ иондар емес):
 - Адсорбция.
 - Десорбция.
 - Беттік көшу.
- Электродтар мен тоқалғыштар арқылы электрондық тоқтың өткізгіштігі.
- Электролит пен электродтар (егер қолданылса) арқылы иондардың өткізгіштігі.

11.2.2.1 Белсендірім поляризациясы ($\eta_{\text{белс}}$). Бұл потенциалдар айырымы таза ток алу үшін қажетті тепе-тең мәннен жоғары және электрод әлеуетінің бір бөлігі электрондарды тасымалдау кезінде жоғалады. Катод та, анод та бір-бірінен қатты өзгеше болуы мүмкін, бірақ екеуі де жұмыс температурасының артуы, электрод бетінің белсенді ауданы, шапшаңдатқышты пайдалану және аралас ионды/электрондық өткізгіш электродты пайдалану есебінен электродтың белсенділігі есебінен азайтылуы мүмкін (электрондарды тасымалдауға ғана емес, сонымен қатар иондарды тасымалдауға мүмкіндік беретін материалдар).

Катод сияқты анодтың да белсендірім поляризациясы бар. Бұл шығын Тафель теңдеуі деп танымал болған 11.4 теңдеуін пайдалану арқылы бағалануы мүмкін, бұл кезде эксперимент ретінде нақты тұрақтысы $\eta_{\text{белс}} > 50 - 100$ мВ.

$$\eta_{\text{белс}} = \frac{R_u T}{\alpha_e n_e \mathcal{F}} \ln \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (11.4)$$

Мұндағы:

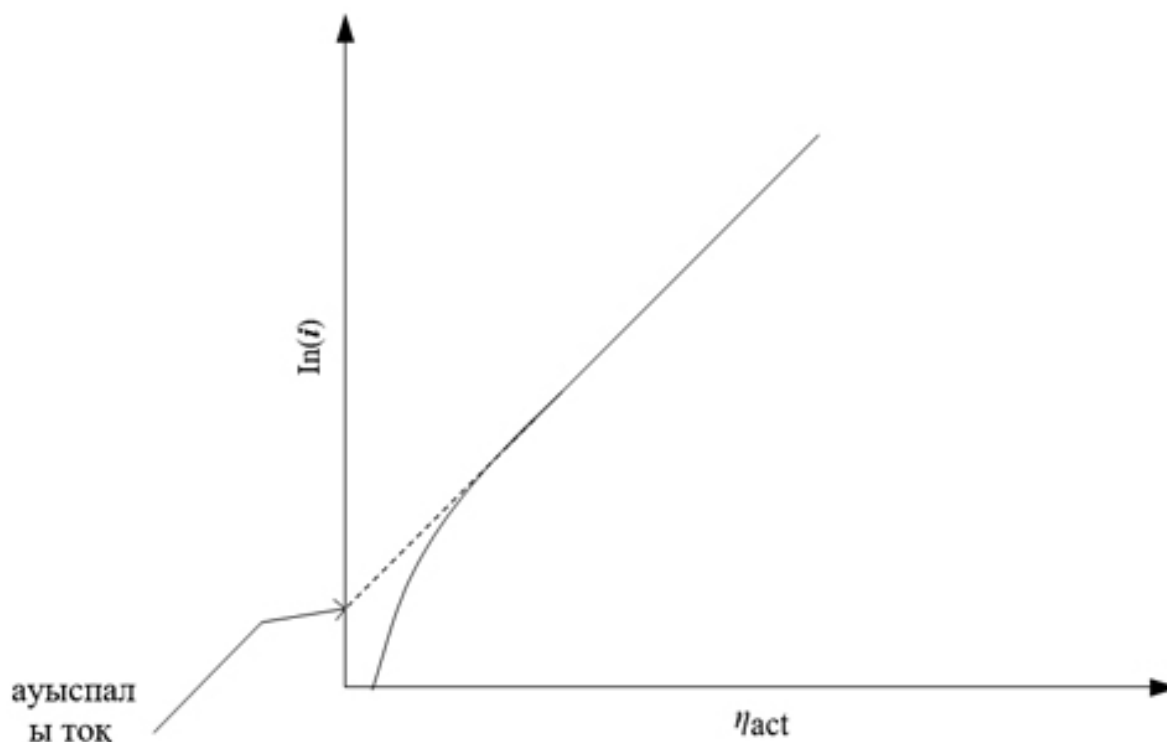
$\eta_{\text{белс}}$ – электрондарды тасымалдау коэффициенті, электрондарды тасымалдауға арналған энергетикалық кедергі симметриясының өлшемі болып табылады, әдетте $\eta_{\text{белс}} = 0,5$ (яғни барьердің екі жағынан сәйкес потенциалдың өзгеру әсері);

i – ток тығыздығы (ток бірлігіне электрод бетінің аумағы);

i_0 – *тоқтың айырбастау тығыздығы*, таза электр тоғы болмаған жағдайдағы ток тығыздығы (әрбір электродтың екі бағытында да электрондардың ауыстыру үдерістері ағады және бір бағыттағы ток қарама-қарсы бағыттағы токпен теңдескен кезде, яғни тепе-теңдік болған кезде, бұл электродта әрбір осы ток тығыздығында $= i_0$ таза ток жоқ);

i_0 жоғары болған сайын, кинетикасы жылдам болады. Эксперименттік түрде ол Тафель (11.3-суретте көрсетілгендей, өлшенген белсендірім поляризациясы ток тығыздығының табиғи логарифмі бойынша құрылған) графигін құру және потенциал бойынша нөл болатындай графиктің желілік бөлігінің экстраполяциясы арқылы анықталады.

²⁵ Қолжетімді ТРВ ұлғайту дайындау әдістерін жақсартуды талап ете отырып, қуаттың тығыздығын және отындық элементтердің өнімділігін арттырады.



11.3-сурет. Тафель графигі

11.2.2.2 Омдық поляризация (η_{ohm}). Бұл поляризация ұяшықтағы электрондық және иондық ағындармен туындатылған кедергінің омдық шығындарымен негізделген. Электролит – бұл иондар мен электрондарға арналған өткізгіш, бірақ электрондық қарсылық жоғалту өте аз; электродтар әдетте электрондардың өткізгіштері болып табылады (бірақ иондық өткізгіштігі бар материалдар әзірленеді), ал отындық элементтегі терминалдық қосылыстар электрондардың өткізгіштері болып табылады. Омдық поляризация жоғары ионды өткізгіштігі және/немесе электролиттің жұқа қабаты бар электролиттердің, сондай-ақ жоғары электрондық өткізгіштігі және / немесе қалыңдығы бар электродтардың көмегімен азайтылуы мүмкін (электрондар ағынына көлденең қимада). Ом заңының 11.5-теңдеуін пайдалана отырып, оны бағалауға болады.

$$\eta_{om} = i \sum R \quad (11.5)$$

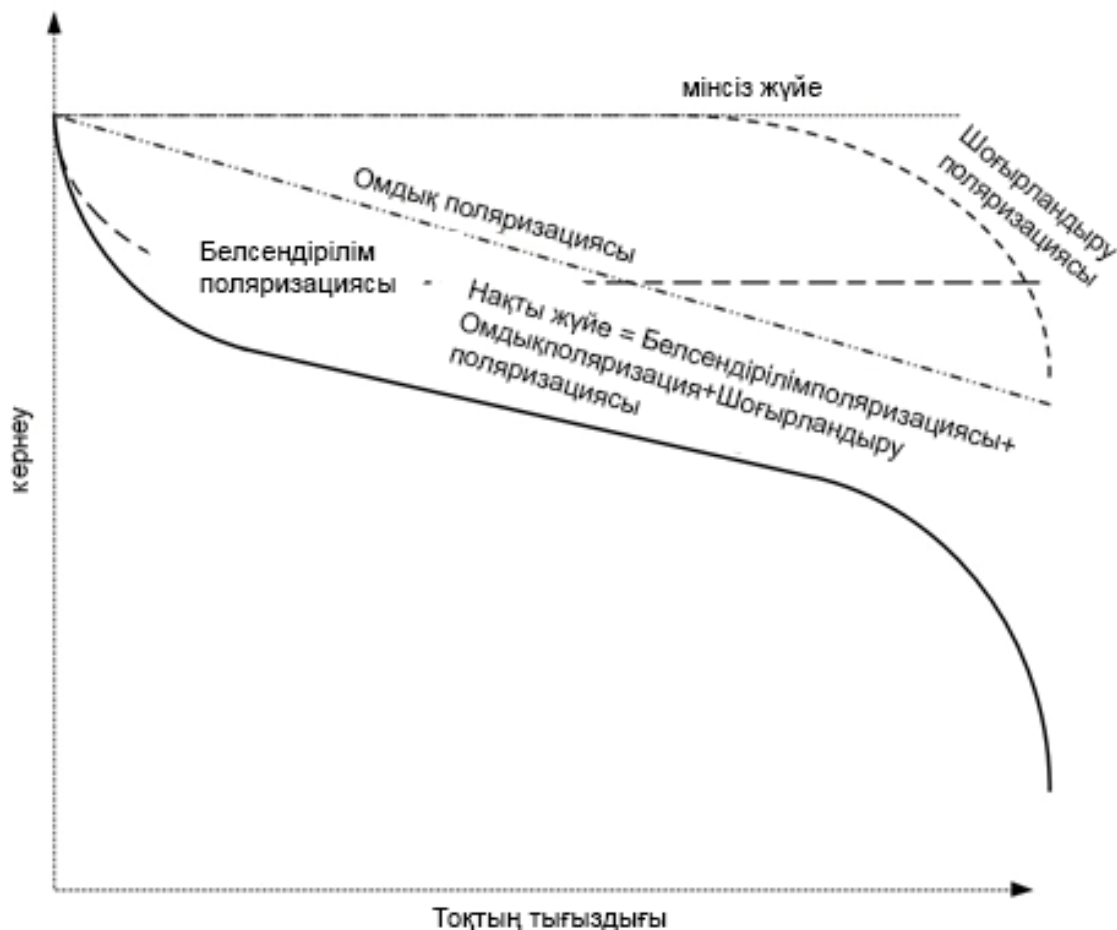
мұндағы i – ток, ал $\sum R$ – электродтардың, электролит пен терминалдық қосылыстардың температурасына байланысты эксперименталды түрде анықталатын электрондық және иондық ұяшықтардың кедергілерінің қосындысы.

11.2.2.3 Шоғырландыру поляризациясы (η_{diff}). Көлемдік газ арасындағы және реагентке және өнім түріне арналған реакциялық алаңдарда катодты және анодты бөліктердегі массалық тасымалдау концентрациясы. Бұл поляризация ұяшықтың кернеуін есептеу үшін Нернст теңдеуінде газдың көлемдік концентрациясын қолдану үшін әрбір электрод бөлігі үшін қажет түзету болып табылады. Шоғырландыру поляризациясы ең жоғары қуаттың тығыздықтарында маңызды және аса төмен ток тығыздықтарында жұмыс істеу жолымен электродтар маңындағы концентрацияның өсуін азайту үшін аса нормалы (жеткілікті) реагенттерді жеткізу жолымен олардың концентрациясын реагенттердің, аса жұқа және/немесе аса кеуекті электродтардың сарқылуына қарай масса алмасудың кедергісін азайту үшін олардың концентрациясын ұлғайту үшін азайтылуы мүмкін. Бұл шығын 11.6 теңдеудің көмегімен бағалануы мүмкін

$$\eta_{\text{шог.}} = \frac{R_u T}{n_e \mathcal{F}} \ln \left(\frac{i}{i_L} \right) \quad (11.6)$$

мұндағы

i_L – реагентті немесе өнімді электродқа немесе одан тасымалдаудың ең жоғары жылдамдығының өлшемі болып табылатын тоқтың шекті тығыздығы. Ол катодты және анодты бөліктердің әрқайсысында немесе эксперименталды деректерді пайдалана отырып, масса тасымалдау үдерістерін модельдеу жолымен анықталуы мүмкін.



11.4-сурет. Поляризация қисығы

11.2.3 Отын элементтерінің жалпы сипаттамалары

Тоққа байланысты өзгертін элементтің жалпы кернеуі 11.7 теңдеуімен, яғни 11.2 теңдеуін, Нернст теңдеуін (реагенттер мен өнімдер үшін көлемді газдың парциалды қысымымен) пайдалана отырып есептелген кернеуден әр түрлі поляризацияны азайту жолымен анықталады және 11.4-суретте «поляризация қисығы» ретінде графикалық түрде көрсетілген.

$$V_{\text{ұяшық}} = V_{\text{Нернст}} - \eta_{\text{белс,катод}} - \eta_{\text{шог,катод}} - \eta_{\text{белс,анод}} - \eta_{\text{шог,анод}} - \eta_{\text{ом}} \quad (11.7)$$

Отын элементінің өнімділігі температура, қысым, отын мен тотықтырғыштардың концентрациясы, сондай-ақ оларды элемент ішінде пайдалану сияқты пайдалану шарттарына байланысты.

11.2.3.1 Температураның тәуелділігі. Себебі $n_e F E = \Delta G = \Delta H - T \Delta S$, T температурасына (яғни оларды T қатысты тұрақтысы ретінде ескере отырып), ΔH және ΔS

қатты байланысты емес екенін ұғыну арқылы P қысым тұрақтысы үшін аламыз:

$$\left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial T}\right)_P = \frac{\Delta S}{n_e \mathcal{F}}$$

Сонымен, ұяшық әлеуетіне жұмысшы температурасының термодинамикалық әсері $\Delta S > 0$ немесе < 0 байланысты, яғни оның тиімділігінің шамасы болып табылады. Дегенмен реакция үшін $\Delta S < 0$ бірге T ұлғайған кезде термодинамикалық азаюдың E орнын толтыруы мүмкін, әдетте біраз артық әлеуеттердің азаюы байқалады.

11.2.3.2 Қысымға тәуелділік. 11.2 теңдеуі, Нернст теңдеуі мольдік үлес u_i және толық қысым P терминдерімен жазылуы мүмкін:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 - \frac{RT}{n_e \mathcal{F} P} \ln \left[\left(\frac{y_C^c y_D^d}{y_A^a y_B^b} \right) (P)^{(c+d-a-b)} \right]$$

Мұнда келесі пропорционалдылық көрсетілген:

$$\left(\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial P}\right)_T = \frac{RT}{n_e \mathcal{F} P} (c + d - a - b)$$

Осылайша, жұмысшы қысымның клетканың әлеуетіне термодинамикалық әсері (сондай-ақ оның тиімділігінің өлшемі) жалпы реакция кезінде мольдің ұлғаюы немесе азаюына байланысты болады, бұл ретте әсер қысымның ұлғаюына қарай айтарлықтай кем болады. Алайда газдың ерігіштігі және масса тасымалдау жылдамдығы қысыммен бірге ұлғаяды, ал кейбір осы үдерістермен байланысты артық әлеуеттер азаяды. Бұдан басқа булану нәтижесінде электролиттің жоғалуы әдетте балқытылған электролит осы тарауда сипатталған балқытылған карбонатты отындық элементінде қолданылады. Алайда материалдар мен басқару элементтеріне қойылатын талаптар жоғары қысым кезінде неғұрлым күрделі болуы мүмкін. Элементтің бір жағындағы қысымның ауыспалы секірулері жоғары жұмысшы қысымдарында отындық элементінің үлкен зақымдануына әкелуі мүмкін.

11.2.3.3 Газдың шоғырлануы және кәдеге жаратылуы. 11.2 Нернст теңдеуі отындағы және тотықтырғыштағы реагенттердің шоғырлануы отындық элементтің (және тиімділігі) электрлік әлеуетіне күшті әсері барын көрсетіп отыр. Кәдеге жарату тұтынылатын реагенттің бөлшек саны ретінде анықталады. Пайдалану коэффициенті жоғары болған сайын, соншама рет отындық элементтегі реагенттің орташа шоғырлануы соғұрлым төмен және Нернст әлеуеті соғұрлым төмен болады. U_{Fu} отынын құрамында H_2 және CO бар отын ағыны үшін пайдалану, бұл ретте кіріс CO Жоғары температуралы отын элементтерінде болатын жылжу реакциясымен H_2 барлық «әлеует» болып табылады, содан кейін беріледі (M_i кіру және M_i , шығу, I түрдің молі, отындық элементке кіретін және шығатын)

$$U_{Fu} = \frac{\dot{M}_{H_2, \text{кір.}} - \dot{M}_{H_2, \text{шығ.}} + \dot{M}_{CO, \text{кір.}} - \dot{M}_{CO, \text{шығ.}}}{\dot{M}_{H_2, \text{кір.}} + \dot{M}_{CO, \text{кір.}}}$$

H_2 және CO -дан басқа құрамында отындық ағыны бар ішкі риформингі бар отындық элемент, сондай-ақ CH_4 болған жағдайда, бұл ретте түрлендірілген CH_4 әрбір молі H_2 төрт моліне баламалы, отынды кәдеге жарату мынадай формула бойынша анықталады:

$$U_{Fu} = \frac{\dot{M}_{H_2, \text{кір.}} - \dot{M}_{H_2, \text{шығ.}} + \dot{M}_{CO, \text{кір.}} - \dot{M}_{CO, \text{шығ.}} + 4(\dot{M}_{CH_4, \text{кір.}} - \dot{M}_{CH_4, \text{шығ.}})}{\dot{M}_{H_2, \text{кір.}} + \dot{M}_{CO, \text{кір.}} + 4\dot{M}_{CH_4, \text{кір.}}}$$

U_{Ox} тотығын пайдалану да былай айқындалуы мүмкін:

$$U_{Ox} = \frac{\dot{M}_{O_2,kip} - \dot{M}_{O_2,шығ.}}{\dot{M}_{O_2,kip.}}$$

Әдетте U_{Fu} реакцияны жүргізу үшін анод жағы мен катод тарапы арасындағы реагенттер шоғырлануының соңғы градиенті қажет екенін ескере отырып, қуаттың практикалық тығыздығын қолдау үшін 80-85% айналасында сақталады. Бірде U_{Fu} бірде U_{Ox} ешқашан 100% болуы мүмкін емес және жылу беру бетінің шексіз үлкен ауданын талап ете отырып, нөлге тең жылу алмастырғыштың екі ағынының арасындағы температураның айырмасымен жылу алмастырғышқа балама болмайды. Екінші жағынан, U_{Fu} немесе U_{Ox} кемуі талап етілетін отынды немесе тотықтырғышты ұлғайтады және ымыраны бағалау үшін жүйелік талдау қажет, өйткені отындық элементтен шығатын отынның жетілмеген компоненттері отындық элементінің кіруіне рециркуляцияланатын жылу немесе фракция сияқты басқа мақсаттар үшін немесе H_2 немесе синтез-газ ко-өнімі үшін пайдаланылуы мүмкін. Электрхимиялық тұрғысынан жоғары температуралы отындық элементтерде, тіпті егер отын құрамында CO және CH_4 болса да, негізінен реакцияға H_2 қатысады. Төменде сипатталған ҚТОЭ көмегімен жиналған деректер негізінде осыны растайтын практикалық дәлелдер бар және көптеген сарапшылар балқытылған карбонатты электролиті бар отындық элементі (MCFC) сияқты басқа жоғары температуралы отын элементтеріне қатысты дұрыс деп санайды, сондай-ақ бұл да төменде сипатталған. Пайдаланудың тәжірибелік жағдайларында осындай газ ағынымен қоректенетін жоғары температуралы отындық элементі будың / автомобильдің отындағы арақатынасы Будауар реакциясының айналымы арқылы көміртектің шөгуін болдырмау үшін жеткілікті жоғары деңгейде сақталады. Мұндай жағдайларда Мацузаки мен Ясуда (2000) CO тікелей электрохимиялық тотығу маңызды емес екенін эксперименттік көрсетті. CO жанама түрде CO және H_2O арасындағы су буының тасымалдау реакциясы арқылы тотығады. Отындық элементтің жоғары жұмысшы температураларында жылжу реакциясы H_2 және CO_2 түзілуімен газ фазасында оңай өтеді және осылайша пайда болатын H_2 анодтың тотықтанатын бетіне диффузиялайды, бұл ретте оның диффузия жылдамдығы CO -ге қарағанда айтарлықтай жоғары. Ихара және авторласы (1999) будың көміртекке жоғары қатынасымен жұмыс істеудің практикалық жағдайларында CH_4 тікелей электрохимиялық тотығуы да маңызды емес екенін эксперименттік көрсетті. Тиісті катализатор анод секциясының ішінде CH_4 және риформингті пайдалану үшін немесе отын элементінен тыс пре-риформинг үшін қажет.

11.3.-мысал. Тұрақты тоқтың отын элементтерінің стегі үшін қажетті отын және тотықтырғыш (ауа) шығынын есептеу қуаттылығы 1,0 МВт (стек бірнеше жеке элементтерден тұрады, ол бірнеше бөлек элементтерден құралады, ол бірнеше маңызды кернеуді және/немесе тоқты алу үшін бөлек элементтердің электрлік қосылуына байланысты, яғни дәйекті немесе параллель) болатын тұрақты тоқтың отындық элементтерінің стегі үшін 0,75В ұяшықтың кернеуімен отынды пайдалану арқылы таза H_2 , $U_{Fu} = 85$ тотықтырғышты пайдалану арқылы, $U_{Ox} = 30$ жұмыс істейді.

Шешімі

Стек кернеуі 0,75 в, онда қуаты $W=10$ MW N ұяшығына және V ұяшығына параллель болады деп болжай отырып, отындық элементтердің стегі арқылы I тоғы ретінде мынадай түрде есептелуі мүмкін:

$$I = \frac{\dot{W}}{V_{ұяшық}} = \frac{(1.0 \text{ MW})/N}{0.75 \text{ V}} \times \frac{1,000,000 \text{ W}}{\text{MW}} \times \frac{1(\text{VA})}{W} = \left(\frac{1,333,000}{N} \right) \text{ A.}$$

11.1-мысалдан алынған нәтижені қолдана отырып, N ұяшықтарына арналған $U_{Fu} = 85$ талап етілетін отынның саны, онда

$$\dot{M}_{H_2} = \frac{0.01865 \frac{\text{моль}}{\text{сағ}}}{A} \times \frac{(1,333,000/N)A}{0.85} \times N = 29,260 \frac{\text{моль}}{\text{сағ}} = 29.26 \text{ кмоль/сағ.}$$

онда ауаның шығыны $U_{Ox} = 30$ болғанда, ол шамамен 21% O_2 және 79% N_2 тұрады

(жоғарыда есептелгендей тотықтыру үшін 85% отын),

$$\dot{M}_{\text{Ox}} = \frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{0.21} = \frac{(0.5n_{\text{H}_2} \times 0.85)/0.3}{0.21} = \frac{(0.5(29.26(\text{кмоль/сағ})) \times 0.85)/0.3}{0.21} = 197.4 \text{ кмоль/сағ}$$

Егер барлық элементтер тізбектеліп орналасқан деп шамалайтын болсақ, онда бірдей нәтижелер алынатынына назар аударыңыз.

11.2.3.4 Отындық элементтің тозуы. Отындық элементтің сипаттамалары уақыт өте келе нашарлауы мүмкін және құрылымының түріне байланысты айтарлықтай түрлене алады. Элементтің кернеуі тұрғысынан өлшенетін тозу жылдамдығы стационарлық қолдану үшін 1000 сағатқа шамамен 0,1% шектелуі тиіс (Отындық элементтер жөніндегі нұсқаулық, 2004 жыл). Отындық элементтің түріне байланысты отын немесе тотықтырғыш ағындарындағы ластаушы заттар мембрананың не шапшаңдатқыштың сипаттамаларының нашарлауын, не болмаса жоғары температурада жұмыс істейтін керамикалық материалдардың морфологиялық өзгерістерін тудыруы ықтимал. Бұл белгілі бір уақыт кезеңі ішінде жүргізілуі мүмкін. Бұл тақырып отындық элементтердің әрбір түріне нақты сілтеме жасап, одан әрі осы тарауда талқыланады.

11.2.4 Отын элементтерін қолдану арқылы электр энергиясын өндіру.

Табиғи газдағы отындық элементтердің жүйесі негізгі үш ілеспе жүйеден тұрады:

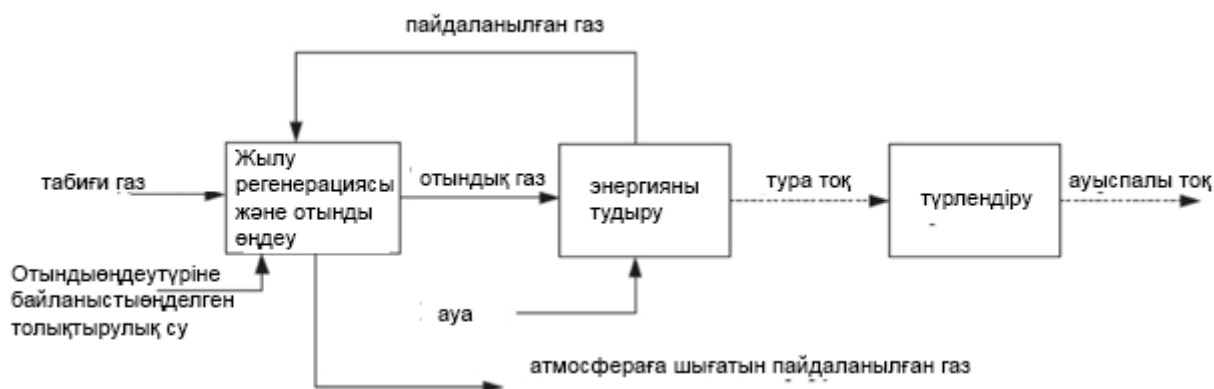
1. Отындық процессор мыналардан тұрады:

- a. Күкіртсіздендіргіш қоршаған ортаның температурасына жақын жұмыс істейтін белсендірілген көмір қабаты немесе газ алдын ала қызған жағдайда ZnO қабаты сияқты (риформер үшін), өйткені ол 400°C-ге жақын неғұрлым тиімді жұмыс істейді. Күкірттің құрамы Ni негізінде ағын бойынша кейінгі әдеттегі риформинг шапшаңдатқышын қорғау үшін көлемі бойынша миллионға 0,1 бөлікке шектелуі тиіс. Табиғи газдағы кез келген еркін O₂ газдағы жанғыш заттармен өзара әрекеттесуі үшін Ni ағыны бойынша төмен шапшаңдатқыштың тотығуын болдырмау үшін асыл металдардан жасалған шапшаңдатқыштан тұратын қышқылдатқыш қажет болуы мүмкін. 1-тарауда айтылғандай, шекті сұраныс кезеңінде Құрама Штаттардың кейбір аудандарындағы (солтүстік-шығыс) табиғи газ көлемі бойынша O₂-ден 4%-ға дейін болуы мүмкін, өйткені табиғи газдың жетіспеушілігі пайда болуы мүмкін, маусымда газ компаниясы отын жеткізуді кеңейту үшін пропан немесе бутанды араластыра алады, ал ауа Воббе индексін ұстап қалу үшін сұйылтқыш ретінде қосылады. Осы қышқылсыздаушы шапшаңдатқыштың көлемі газ беру температурасының өсу шамасына қарай азаяды.
- b. Табиғи газ отынын ішкі реформалауға қабілетсіз отындық элементтері жағдайында сыртқы реформатор (отын отындық элементінде электрохимиялық тотығуға ұшырайтын H₂ алумен реформаланады), отын газы қол жетімді болатын қысымға байланысты жылу алмасу жабдығымен және отын газына арналған айдағышпен немесе компрессормен қатар. Отын процессорындағы сыртқы реформатор отынды реформалау үшін табиғи газды бұмен (генерация секциясында қалпына келтірілген жылудан қалпына келтірілген) ұштастырады. Ішкі реформерлері бар кейбір отын элементтері, сондай-ақ ішкі реформатордың шапшаңдатқыштың кокстануын тудыратын жоғары көмірсутектерді түрлендіру үшін реформер кезінде талап етеді.
- c. Қысым ауытқуымен адсорбция (PSA) отындық элементтерге H₂ жоғары тазалығы қажет болғанда (мысалы, қалдық CO отындық элементі протондық алмасу мембранасы немесе осы тарауда бұдан әрі сипатталған PEMFC отын элементі ретінде жіберілмеуі мүмкін), ол қоршаған ортаның температурасына жақын салқындатылғаннан кейін реформерден жоғары таза H₂ ағыны бөлініп шығады. PSA («қалдық газ») жарамсыз газ құрамында риформингэндотермиялық реакциялары үшін

қажетті жылудың кем дегенде бір бөлігін қамтамасыз ету үшін пайдаланылуы мүмкін жанғыш заттардың едәуір мөлшері бар.

2. Отындық элементтерін және отындық элементтері үшін талап етілетін қысым кезінде сүзілген тотықтырғышты (ауаны) қамтамасыз етуге арналған қажетті айдағышты немесе компрессорды және катодты шығару ағынында қалатын O_2 анодты шығару ағынында қалатын отынды жағуға арналған жабдықты және риформер үшін және/немесе бу және/немесе ыстық су өндіруге арналған жылуды қамтамасыз етуге байланысты жабдықты қамтитын энергетикалық секция.
3. Тұрақты тоқ (DC) айнымалы тоқ (AC) (инвертор деп аталатын) түрлендіргішінен тұратын қуат кондиционері, өйткені отын элементтерінде өндірілетін тоқ тұрақты болып табылады. Отындық элементтердің аз ағындарымен генерацияланатын тұрақты тоқ кернеуі <50 төмен шамаға ие 5-10 кВт жүйесі үшін және <350 жүйе үшін 300 кВт, және осындай жүйеде жоғарылатушы түрлендіргіш тұрақты тоқ/тұрақты тоқ, маңызды болып табылады (пайдалы айнымалы тоққа конверсияға дейін), тұрақты тоқтың жоғары кернеулерін генерациялау үшін, 400 В, бұл 120/240 В айнымалы тоқ шығыстарына арналған норма болып табылады.

11.5-суретте көрсетілген осы ілеспе жүйелер (отындық элементтерге арналған отын ретінде H_2 таза ағынды талап етпейтін жүйелерге арналған).



11.5-сурет. Табиғи газдағы отындық элементтер жүйесінің сызбасы

Сутекті салқындатуды талап ететін отындық элементтер жағдайында, егер кәдеге жаратылатын жылу энергиясы когенерацияны қолданудың қандай да бір нысанында толық көлемде пайдаланылмаса, жылу бөлуді басқарудың қосымша кіші жүйесі (салқындатқыш модуль) талап етіледі. Биореакторды немесе қоқыс газын пайдаланған жағдайда, газ турбиналары үшін өңдеу әдістері 6-тарауда сипатталған күкірт қосылыстарын жоюға қосымша хлор мен силоксандардың қосылыстарын жою қажет, бірақ отындық элементін қолдануға арналған ерекшеліктер неғұрлым қатаң болып табылады. Хлорлы қосылыстар Ni -шапшаңдатқыштары үшін улы болып табылады, ал силоксандар ТЖ шығарындыларына қосымша катализаторлар мен жабдықтардың ластануын тудыруы мүмкін. Төгілетін газ жағдайында, жүктемені азайту үшін табиғи газды қолданған жағдайда, газды өңдеу жүйесі Ni шапшаңдатқышының тотығуын болдырмау үшін газдағы жанғыш заттармен кез келген еркін O_2 реакциясы үшін асыл металдан жасалған шапшаңдатқышты қамтуы тиіс. Осы ашыту шапшаңдатқыштың көлемі газ беру температурасының өсу шамасына қарай азаяды.

11.2.5 Отын элементтері түрлерінің негізгі сипаттамалары

Соңғы 50 жылда отындық элементтердің әр түрлі типтері эволюцияланды және пайдаланылатын электролит түрімен сипатталатын негізгі түрлерінің сипаттамасы төменде ұсынылған. Қазіргі уақытта отындық элементтеріне негізделген бұл жүйелер коммерциялық ғимаратты электр энергиясымен қамтамасыз ету сияқты шағын қондырғыларға арналған, бірақ ҚТОЭ және MCFC гибридік режимде (>40 МВт) жұмыс істеу кезінде неғұрлым ірі қолдану үшін зерттеледі.

11.2.5.1 Фосфор қышқылының отындық элементі немесе ФҚОЭ.

Электролит қоюланған фосфор қышқылынан және платинадан немесе оның қорытпаларынан жасалған катализаторлар ретінде әрекет ететін екі электродтың да қышқылын ұстап тұру үшін пайдаланылатын кремний карбидінің матрицасынан тұрады. Жұмыс температурасы 150 және 220°C диапазонында сақталады; төмен температураларда фосфор қышқылы нашар ионды өткізгішке айналады, анодта Pt электр шапшаңдатқыштың СО улануы нашарлайды.

Фосфорлы қышқылды отын элементінде болатын электрохимиялық реакциялар (ФҚОЭ):

Анодта: $\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (H^+ кейін электролит арқылы тасымалдау)

Катодта: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Ұяшықтағы жалпы реакциямен: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

ФҚОЭ H_2 отынымен жұмыс істейді, бұл кезде СО концентрациясы 0,5% астам кезінде улы болып табылады. Егер отын ретінде табиғи газ сияқты көмірсутек пайдаланылса, онда отын бойынша риформингі мына реакция бойынша: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2 + \text{CO}$ және реформаттың ауытқуы мына реакция бойынша: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ ұяшыққа арналған қажетті отынды алу үшін керек.

Отындық элементтің өзі күкірт қосылыстарының көлемі бойынша миллионға ең көп 50 бөлікке төтеп бере алады. Төмен температураларда ФҚОЭ шығаратын жылуы жылу қолдану үшін пайдалы болуы мүмкін және Ренкиннің төмен температураға, жүйенің мөлшеріне және оның экономикасына байланысты қосымша электр энергиясын өндіру кезінде төмен температуралы циклдары үшін пайдалы болуы мүмкін.

«United Technologies» корпорациясы оның электр станцияларының тиімділігі өмір басында табиғи газ негізінде 40%-ды құрайтынын хабарлайды, бірақ тиімділігі тұрақтанғанға дейін 38%-ға дейін және күтіліп отырған қызмет мерзімі ішінде (~40 000 сағат) орташа есеппен 37%-ға дейін төмендейді (Отындық элементтер жөніндегі нұсқаулық, 2004). ФҚОЭ 100-400 kW модульдерінде отындық элементтің ең жетілген түрлерінің бірі және бірінші коммерциялық пайдалану қажет. Оның шағын стационарлық энергетикалық қосымшаларда қолданылуы, мысалы, электр энергиясын бөлу үшін кейбір ФҚОЭ қалалық автобустар сияқты ірі көлік құралдарына қуат беру үшін пайдаланылған.

11.2.5.2 Балқытылған карбонаттық электролитті отындық элементі немесе MCFC. MCFC электролиті, әдетте литий алюминий оксиді (LiAlO_2) керамикалық матрицада ұсталатын сілтілі Na және K карбонаттарының комбинациясынан тұрады. Балқытылған карбонатты электролиті бар отындық элементі ионды өткізгіштікті қамтамасыз ете отырып, карбонат-иондары бар жоғары өткізгіш балқытылған тұз нысанында сілтілі карбонаттарды сақтау үшін 600-700°C температурада жұмыс істейді. Карбонат-иондардың (CO_3^-) пайда болуы үшін CO_2 катодының бетінде тотықтырғышпен (әдетте ауамен) берілуі тиіс. Анод никельден жасалған, ал катод никель оксидінен жасалған.

Элементте болатын электрохимиялық реакциялар:

Анодта: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$

Катодта: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^-$ (оттегі анодқа CO_3^- =карбонатты иондарымен электролит арқылы тасымалданады)

Ұяшықтың жалпы реакциясы: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$.

СО – бұл у емес, дәлірек айтқанда MCFC үшін отын. СО қандай да бір елеулі дәрежеде электрохимиялық тотығады, бірақ анодтық бөлімшенің газ фазасында сулы газға ($\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$) ығысу реакциясымен қосымша H_2 өндіреді. Отын табиғи газ сияқты H_2 және СО реакциясын қалыптастыру үшін қолайлы шапшаңдатқыштың қатысуымен элементтің сыртында немесе ішінде реформаланады: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}$. MCFC жоғары жұмыс температурасы ішкі реформалауға және реформация реакциясының эндотермиялық реакциясына мүмкіндік береді отын элементінің ішінде өндірілген жылуды бұруды

қамтамасыз етеді. MCFC өзі әдетте күкірттің миллион қосылыстарына 0,5-тен көлемді бөліктен артық шыдауы мүмкін, бірақ лимитті реформер және преформердің шапшаңдатқышы белгілейді.

Жоғарыда айтылғандай, CO_2 тотықтырғыш ағынына (катод кірісі) берілуі тиіс. Әдетте анодта түзілетін CO_2 катодқа немесе CO_2 -ге рециркуляцияланады, анодтық газды жағу кезінде пайда болады және катодтық қосқыш газбен араластырылады. Бұл қосымша жабдықты талап етеді немесе анод газынан CO_2 ауыстыру немесе оны өндіруді талап етеді. Сұйық электролитті басқару да пайдалану мәселелерін туындатады. Олардың электр станциясының тиімділігі 43-тен 47%-ға дейін ауытқиды, табиғи газдың төмен жылу шығару мүмкіндігі (FuelCellEnergyInc., 2013) негізінде және ұсақ масштабты электрлік жалпы мақсаттағы немесе бөлінген электр энергиясын өндіруге бөлінген 300 кВт-тан 3 кВт-қа дейін желілердегі модульдер қолжетімді, – деп хабарлайды FuelCellEnergyInc.

11.2.5.3 Протонды-алмасу мембранасы бар отындық элемент немесе PEMFC.

PEMFC Pt сіңірілген екі кеуекті электродтар арасында орналасқан протон өткізгіш мембранадан тұрады. Перфторсульфон қышқылының полимері – жақсы протондық өткізгіштік қасиеті бар мембрананың типтік материалы.

Электродтардың артқы бөлігі гидрофобтық қоспамен жабылған, мұндай Teflon°, шапшаңдатқыш қабатына газ диффузия жолын қамтамасыз ететін гидрофобтық қақпақ қалыптастырады. Ұяшықтың ішінде, анодта H_2 протондар қамтамасыз етеді және катодқа жету үшін сыртқы тізбек арқылы өтетін электрондарды босатады. Протондар су молекулаларымен бірге құйылады және электрондарды жинай отырып, суды қалыптастыра отырып O_2 әсер ету үшін катодқа қарай мембрана арқылы диффузияланады. Сонымен, элементте болатын электрхимиялық реакциялар:

Катодта: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ (H^+ зәтем транспортировка через электролит)

Катодта: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Ұяшықтың жалпы реакциясымен: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

PEMFC H_2 -мен жұмыс істейді, ал Pt катализаторы тек бірнеше бөліктерді оның жұмыс температурасы 80°C кезінде миллион СО-ға ауыстыра алады. Табиғи газ сияқты көмірсутекті отын PAFC сияқты реформалануы тиіс, кейіннен реформатты ығыстырып, қайтарылмаған СО-дан көлемі бойынша миллионға 10 бөлікке дейін алып тастау керек. Pt шапшаңдатқышқа қосылған Ru көміртегі тотығынан қорғауды қамтамасыз етеді (Ralphand Hogarth, 2002). Зерттеу протон алмасу мембранасымен отын элементтерінің (ТЭПМ) құнын төмендету мақсатында Pt санын азайту үшін жүргізіледі. ТЭПМ артықшылықтарының кейбірі олар жылдам іске қосылу мүмкіндігіне ие, ықшамды және салмағы жеңіл әрі коррозиялық сұйықтықтың ағып кету қаупі жоқ, себебі торда бар жалғыз сұйықтық, бұл су. Осылайша, ТЭПМ ілеспе қуат, портативті қуат және таратылған генерация сияқты шағын (<1-ден 100кВт дейін) қосымшаларға қосымша көлік құралдарында пайдалану үшін жақсы жарамды. Алайда отындық элементтің осы түріне байланысты бір кемшілігі – қымбат Pt-шапшаңдатқышты пайдалану болып табылады. Электролиттің иондық өткізгіштігі су құрамымен артады, сондықтан мембрананың сусыздануын болдырмау және тиісті ионды өткізгіштікті сақтау үшін электролиттегі судың жеткілікті жоғары мөлшерін, су басып кетпейтіндей етіп сақтау қажет. Осылайша, H_2 тотығымен су өндіру жылдамдығы және оның булану жылдамдығы теңдестірілуі тиіс. ТЭПМ 0,10-дан 1,0 МПа-ға дейінгі қысымда жұмыс істеуге қабілетті. Отынмен байланысты энергияны ТЭПМ электр энергиясына түрлендіру тиімділігі отын (табиғи газ) негізінде (Отындық элементтері жөніндегі нұсқаулық, 2004) 25-тен 32%-ға дейін ауытқиды, ал отындық элементі төгілетін жылу төмен температурада болады және қосымша электр энергиясын өндіру үшін пайдалы емес.

11.2.5.4 Қатты тотыққан отындық элемент немесе ҚТОЭ.

ҚТОЭ-дағы электролит қатты, кеуекті емес металл оксидінен әдетте кобальттан немесе цирконий никелінен (CoZrO_2 немесе NiZrO_2) дайындалған аноды бар иттрий тотығы (Y_2O_3) тұрақтандырылған цирконий диоксиді (ZrO_2), металкерамикалық орындалған (керамика-металл материал), ал катод стронциймен (LaSrMnO_3) қоспаланатын перовскиттен

тұрады. Элемент $> 650^{\circ}\text{C}$ температурада жұмыс істейді, бұл анодтың бетіне оттегі иондарының диффузиясына әкелуі мүмкін. ҚТОЭ өзінің жартылай өткізгіш компоненттерімен кез келген конфигурацияда салынуы мүмкін. Элементтер құбырлы, жалпақ пластиналы және монолитті конфигурацияларда әзірленеді. Ағымдағы жобалар электродтардан, электролиттен және қабаттарда салынған және бірге пісірілген дәнекер материалдан тұрады және жасушалардың құрылымын құрайды; алайда дайындау әдістері жасушалардың конфигурациясы мен әзірлеушінің түріне байланысты ерекшеленеді. Отын ретінде H_2 үшін ұяшықта болатын электрохимиялық реакциялар:

Катодта/электролитте: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{=}$ ($\text{O}^{=}$ электролит арқылы тасымалдануы)

Катодта/электролитте: $\text{H}_2 + \text{O}^{=} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$

с элементтің жалпы реакциясы: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

CO және көмірсутектері CH_4 сияқты ҚТОЭ-дағы отын ретінде де қолданылуы мүмкін. Ұяшықтың ішіндегі жоғары температураларда, су газын тасымалдау реакциясы үшін: $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ газ фазасында және табиғи газ болған жағдайда, будың риформинг реакциясы: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = 3\text{H}_2 + \text{CO}$ анодта оңай тотығатын H_2 алу үшін қолайлы шапшаңдатқыштың қатысуымен жүреді. Отын элементінің өзі H_2S концентрацияларында Маркеспен ұсынылған деректер негізінде көлемі бойынша миллионға 69 бөлікке дейін жеткізуі мүмкін (2006), ол H_2S осы концентрацияларда H_2 тотығуға тежеуші әсер етпейтінін көрсетті, бірақ пре-риформингтің реформаторы мен катализаторы шектерді белгілейді. ҚТОЭ артықшылығы коррозия мен электролитті басқару проблемаларымен байланысты сұйық электролиттің болмауынан және жұмыс температурасы 650°C -тан жоғары тиісті шапшаңдатқышты қоса отырып, ішкі риформингке қол жеткізуге болады. Отынның (табиғи газдың) байланысты энергиясын төмен жылу шығару қабілеті бар электр энергиясына айналдыру үшін жалпы тиімділік 40-тан 50%-ға дейін ауытқиды және мынадай пайдалы мақсаттар үшін қалпына келтірілуі мүмкін:

- Отын риформингі (мысалы, табиғи газ), онда пайдаланылған газдар жылуының көп бөлігі химиялық энергия мен байланысқан қайта қалпына келтірілген отын риформингтің («химиялық рекуперациялау») эндотермиялық реакциялары есебінен химиялық тұрғыдағы қайта жаңартылған отынның энергиясына айналады.
- Қалдықтарды өңдейтін циклды жылу энергиясымен қамтамасыз ету және / немесе
- Когенерациялық мақсатта бу шығару үшін қалпына келтіріледі.

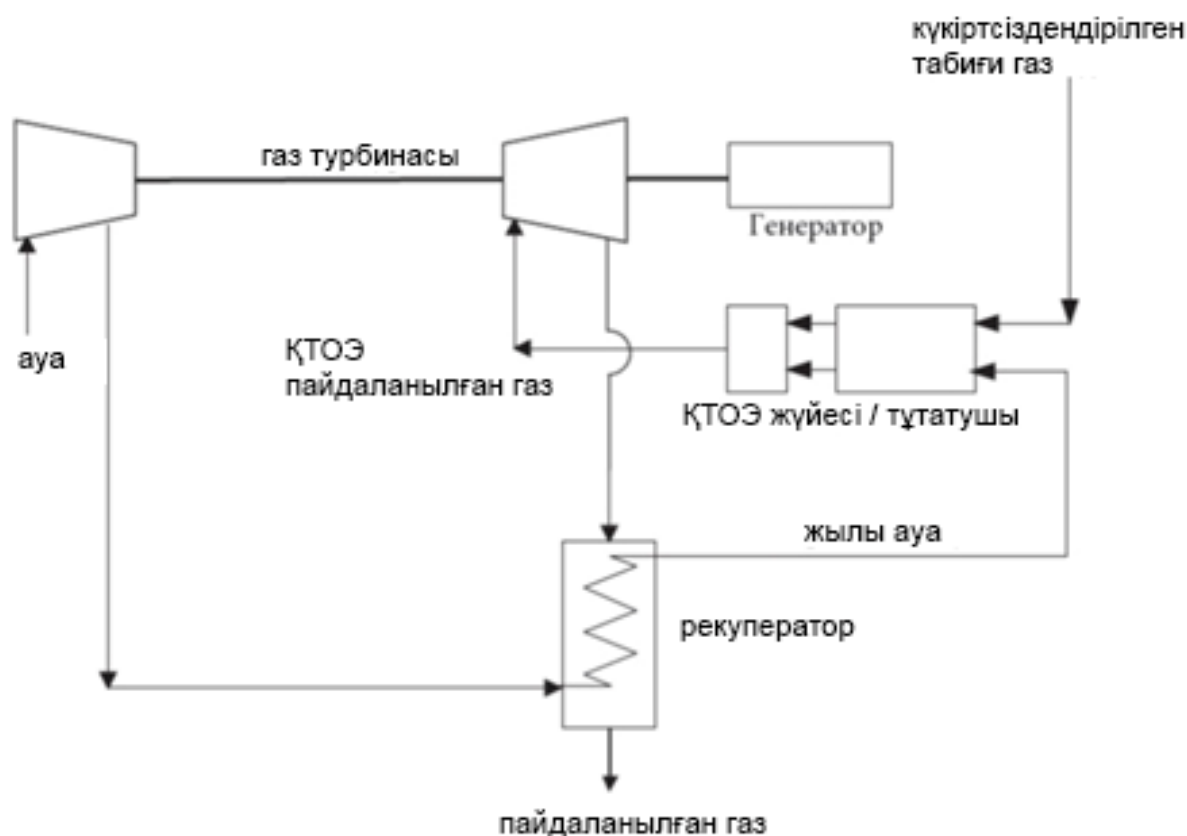
Қалдықтарды өңдейтін цикл, осы тарауда төменде сипатталғандай, жоғары қысыммен жұмыс істейтін ҚТОЭ жағдайында газ турбинасынан тұруы мүмкін. Жоғары жұмысшы температурасының басқа артықшылығы, асыл металдан жасалған шапшаңдатқышсыз реакция дәрежесі анағұрлым жоғары болуында. Алайда ҚТОЭ жоғары температурасы құрылым материалдарына арналған арнайы талаптарды белгілейді. Шекаралардағы олардың ағымдағы 1 кВт дейін 2 МВт мөлшері бөлінген электрмен қоректендіру сияқты электр энергиясын өндіретін ұсақ масштабты қондырғыларға дейін олардың қолданылуын шектейді. ҚТОЭ құнын төмендетуге бағытталған зерттеулер мынадай салаларда өткізіледі: i) ең төменгі жұмысшы температурасында жоғары иондық / электрондық өткізгіштігі (аралас өткізгіштігі үшін иондар мен электрондар) бар материалдар әзірлеу ii) дайындау әдістері және iii) құру, үлкен ауқымды стектерді құру.

11.2.6 Гибридті циклдар

Отындық элементтер жүйелерінің жоғарғы бастапқы құны кеңінен тарату және коммерцияландыру үшін елеулі кедергі болып табылады. Гибридті циклдағы отындық элементті баптау кезінде жалпы тиімділігін одан әрі арттыру потенциалымен қатар орнату шығындарының үлес салмағын азайту да бар (\$/кВт). Отындық элементтері негізіндегі гибридтік циклы жүйенің жалпы тиімділігін максималды арттыру үшін, жылу қозғалтқышымен бірге отындық элементті біріктіруден тұрады. 60%-дан астамы табиғи газбен болғанда жылу шығару мүмкіндігі төмен болуы негізінде жүйенің жалпы тиімділігіне қол жеткізілуі мүмкін.

ҚТОЭ және КЭБОЭ сияқты жоғары температуралы отындық элементтері осындай қолданыстарға ең қолайлысы болады. Жоғары қысымды отындық элементтерінің гибриді циклы кезінде газ турбинының жану камерасы отындық элементтер жүйесімен ауыстырылады. Ал төмен (атмосфералыққа жақын) қысымды отындық элементтердің гибриді циклы жағдайында отындық элементтермен тасталатын жылу алмастырғыш арқылы (жанама бағыт) газ турбинымен жұмысшы сұйықтыққа берілуі мүмкін. Ұсақ гибриді циклдар, аралас циклды ірі электр станциялардан тиімділігі және ластаушы заттар шығарындылары мен парниктік газдар тұрғысынан қарағанда, пайданы асыра қамтамасыз ете алады. Отындық элементтің және газ турбинының интеграциясы түрлі жолдармен қол жеткізілуі мүмкін, бірақ базалық тұжырымдамада жоғары қысымды Брайтонның (газ турбина) жану камерасымен бірге циклын анод газының тотығу жүйесімен бірге жоғары қысымды отындық элементтерге ауыстыруға талпыныс жасалған. 11.6-суретте көрсетілгендей онда отындық элемент ҚТОЭ тұрады. Пайдаланған отыны бар анодты пайдаланылған газ катодты пайдаланылған газда қалған O_2 -мен тотығады. Жүйеге пайдаланылған газ турбинындағы жылуды пайдалана отырып отындық элементке кірер алдындағы жылу алмастырғыштар, отынды қыздыру циклы мен ауа кіреді. Осындай жүйенің қайталап таныстырмалы өнімділігі 11.1-кестеде көрсетілген. Негізгі жобалау параметрлерімен бірге табиғи газдың төмен жылу шығару мүмкіндігі негізінде 60%-ға жуығы жүйенің таза тиімділігін көрсетеді. Бұл шағын жүйе үшін керемет болады. Көріп отырғанымыздай, электр энергиясының үлкен бөлігі (>60%) отындық элементпен өндіріледі, ал қалған бөлігі газ турбиналарынан (оның компрессормен талап етілетін қуаттылықты қамтамасыз еткеннен кейін) түседі. Табиғи газ негізінде тиімділігі >70% гибриді конфигурация анықталған болатын (Rao and Samuelsen, 2003). Төмен қысыммен жұмыс істейтін КЭБОЭ-мен конфигурацияланған гибрид (жақын атмосфералық) 11.7-суретте көрсетілген. Ол әлдеқайда күрделі жылу алмасу жабдығын талап етеді. Анодтың газ тотығынан өңделген жылуды оның катодты жағына қарай қайта айналымы алдында жылу алмастырғыштағы CO_2 -ні қамтамасыз ету үшін, турбинада оны кеңейту алдында жұмысшы сұйықтықты (ауа) қыздыру үшін қалпына келтіріледі. Катодта пайдаланған жылуды, сондай-ақ газ турбинының компрессорынан шығатын жұмысшы сұйықтықты (ауаны) алдын ала қыздыру үшін қалпына келтіріледі.

Қысымы бар гибриді отындық элементті төмен қысымды гибриді отындық элементпен салыстырғанда артықшылықтары сияқты кемшіліктері де бар. Қысымы бар отындық элементтер негізіндегі жүйе газ турбины мен отындық элемент арасындағы қысым сәйкестігін талап етеді, бұл арнайы газ турбиналарын дамытуды талап ете алады. Бұдан басқа қондырғыны басқаруда, отындық элементтің қысымы кенеттен жоғалуына әкелетін, әсіресе жоспарланбаған кезде газ турбинысын ажырату анағұрлым күрделі болуы мүмкін. Екінші жағынан, жоғары жылу тиімділігі мен қуат тығыздығы Нернсттің жоғары потенциалының есебінен герметикалық отындық элементтердің және азайтылған белсендірім поляризациясының және шоғырлану көмегімен қол жеткізіледі.

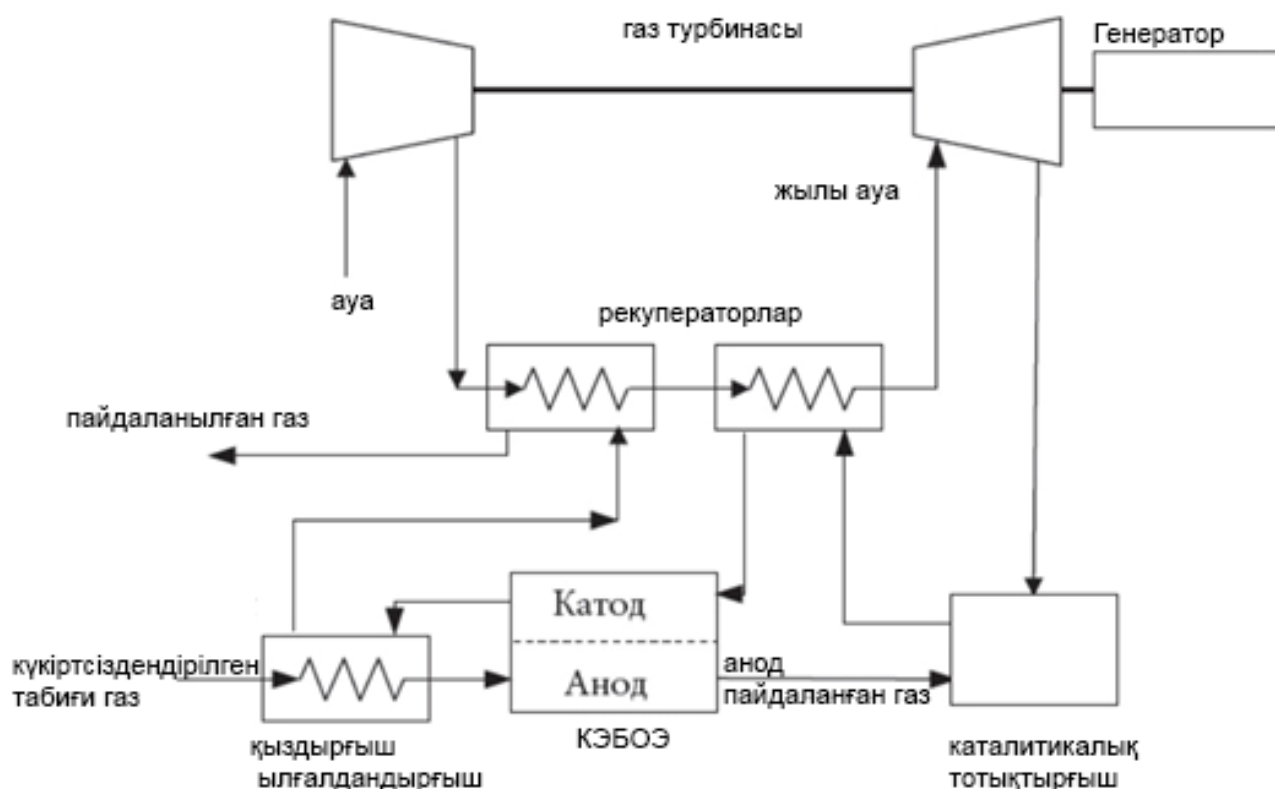


11.6-сурет. Қысымы бар отындық элементтердің гибриді жүйесі

11.1-кесте. Қысымы бар отындық элементтердің гибриді жүйесі тиімділігінің қысқаша сипаттамасы*

Компрессордағы ауаны қабылдайтын ағынның жылдамдығы	16.6 кг/с
Компрессордағы қысымның коэффициенті	9.5:1
Газ турбиначындағы жану камерасының пайдаланылып шыққан температурасы	1160 С
ҚТОЭ ауыспалы тоқтың толық қуаты	7.9 МВт
Газ турбиначындағы ауыспалы тоқтың толық қуаты	4.8 МВт
Энергетикалық блоктағы ауыспалы тоқтың таза қуаты	12.3 МВт
ҚТОЭ-дегі отынның шығыны	0.31 кг/с
Газ турбиначындағы отынның ағыс жылдамдығы	0.14 кг /с
Электр жүйесінің тиімділігі (Таза ПТ / НТ)	59.9%
CO ₂ шығарылуы	340 кг/МВтч
NO _x шығарылуы	0.04 кг/МВтч
SO _x шығарылуы	NiS қалыптастыруынан никельді реформалаушы шапшаңдатқышты және анодты қорғауға арналған отын күкіртсіздендіреді
Қондырғылардан пайдаланып шыққан газдың температурасы	360°C
Қондырғылардағы жұмысын атқарып болған газ ағысының жылдамдығы	16.9 кг/с

* Лунберг және авторласының деректері (2003).



11.7-сурет. Атмосфералық гибриді жүйе КЭБОЗ

Сонымен қатар отындық элемент пен жылу алмастырғыш жабдықтары ықшамды болады. Сондай-ақ кіші диаметрлі құбырлардың есебінен үнемдеу жүзеге асырылуы мүмкін. Атмосфералық қысымның отындық элементі газ турбинасының қысымдық коэффициентін отындық элементтерден ажыратады. Екінші жағынан, жылу алмасу жабдығының жұмысшы температурасы аса талапшыл болуы мүмкін.

11.2.6.1 Коммерцияландыру статусы. Siemens Power Generation, Southern California Edison және Advanced Power and Energy Program 1999 жылдан бастап 2003 жылға дейінгі аралықта ҚТОЭ негізінде Калифорниядағы Ирвин университетімен әлем бойынша гибридік жүйені бірінші болып әзірлеу мен тестілеу жұмыстарын бірлесіп жасаған. Бұл жүйе 2900 сағаттан астам уақыт бойы жұмыс істеп, **табиғи газдың таза тиімділігі** 53% дейінгі 220 кВт-қа жуық өндірген, осылайша гибридік тұжырымдаманы көрсете отырып, болашақ жобаларды жақсарту қадамдарын ашты әрі бұл салыстырмалы түрдегі аз мөлшерде жоғары дәрежелі тиімділік пен шығарындылардың болмашы көлемде түзілетінін дәлелдеп берді. Бұл гибридік жүйе дайын газ турбинасын пайдалана отырып құрылған. Ол тиімділіктің толық потенциалын шектеді. Роллс-Ройс отындық элементтерінің жүйесі газ турбиналарының ҚТОЭ-нің жүйелерімен 10 жылдан астам жұмыс істейді. Олардың тұжырымдамасы ауа ағынының **жылдамдығы** қос сатылы турбокомпрессор арқылы негізделген. Оның қуаты 1 МВт гибридік жүйесіне арналған ҚТОЭ шамамен 900 кВт талап етілетін ауа ағынының жылдамдығына сәйкес келетіні ақылға қонымды. "Роллс-Ройс" жұқа жазық тордан тұратын, жазық тірек құрылымында басылып шығатын ҚТОЭ-ның планарлық жаңа технологиясын әзірледі. Rolls Royce-тің гибридік дизайн ұсақ масштабы (250 кВт) прототиптері 2008 және 2010 жылдары Ұлыбританияда сәтті көрсетілді. 2007-2009 жылдары ҚТОЭ-ны және гидротурбиналық генераторды қамтитын LHV негізінде табиғи газдың таза тиімділігі 52% астамға жеткен Mitsubishi ауыр өнеркәсіп салаларында қуаты 229 кВт гибридік жүйесі сынақтан табысты өткен.

2009 жылдың қарашасында олардың гибридік жүйесі 3000 кумулятивті сағатқа дейін жетті. Отындық жүйелердің энергиясы мен турбиналардың Capstone компаниясымен Монтана штатының университеті, 11.7-суретте көрсетілген және жоғарыда сипатталғандай, ауруханаға электр қуатын беруге арналған КЭБОЗ пайдаланатын гибридік жүйесін бірлесіп

сынақтан өткізді. Жүйе табиғи газ негізінде таза шығатын қуаты 300 КВт-қа дейін 56% тең болатын таза тиімділікке жетті. Газ турбиналары үшін үлкен гибридтің қажеттілігін әзірлеу үшін мыналар қолданыста:

- Тікелей газ турбиналарының жану камерасына емес компрессордағы айдалатын ауа жылу алмастырғышқа берілгендегі рекуперация (қазіргі уақытта генераторлық жетекке арналған қалпына келтірілетін қозғалтқыштар ретінде шағын газ турбиналары ғана ұсынылады, яғни <15 МВт).
- Турбинаны салқындату үшін арамтамақтық ауаны талап етпейтін кемінде 1000 С турбинаға²⁶ төмен температура жіберу.
- 4-12 диапазонындағы қысым қатынасы.
- Газ турбинасының жану камерасында анодтың отындық элементіндегі пайдаланылған газдардың тотығуы үшін пайдаланылғанда ыстық және пайдаланылған отынды және ауаны жану камерасы қабылдайды.
- Отындық элементтің анодты блогында көміртек шөгінділерін болдырмау үшін майсыз мойынтіректер.

11.2.7 Көмір негізіндегі гибридті жүйелер

ҚТОЭ және КЭБОЭ сияқты жоғары температуралы отындық элементтермен синергиялық біріктірілуі мүмкін каталитикалық гидрогазандырудан тұратын ішкі циклдық көмірді газдандыру арқылы отындық элементтердің кешенді жүйесінің тұжырымдамасы (ІЦКГОЭ) H_2 бірлескен өндіріспен байланыстыру деген 10-тарауда сипатталған. Тек электр энергиясын өндіретін қондырғы үшін (яғни H_2 бірлескен өндіріспен байланыстыру), ISO жағдайында битум сияқты жоғары дәрежелі көмірмен CO_2 90% сезуі көмірдің жоғары жылу шығару мүмкіндігі негізінде 50%-дан астам тиімділігін болжайды (Ли және авторласы, 2010.). ТЭВГУ қондырғыларының осындай жалпы блок-сызбасы 11.8-суретте көрсетілген. Осындай қондырғыларды енгізу, қазіргі уақытта қолда бар бірнеше МВт немесе одан кем қуатты құрайтын қондырғылармен салыстырғанда 100 МВт диапазонындағы отындық элементтердің ірі модульдерін әзірлеуді талап етеді.

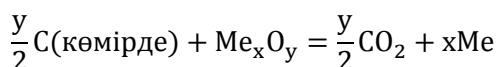
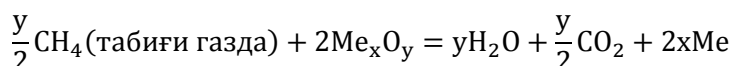
²⁶ Жалпы тиімділік тұрғысынан қарағанда отынды отындық элементте барынша пайдалану тиімді (бірақ Нернст жалпы әлеуетінің айтарлықтай төмендеуінсіз). Отындық элементтен (және газ турбинасы үшін қол жетімді) шығып жатқан конвертерленбеген отынды жағу арқылы алынған тиісті температура әдетте 1000°C кем болмайды.

11.3 ХИМИЯЛЫҚ ЦИКЛДАРДЫҢ ҰЙЫМДАСТЫРЫЛУЫ

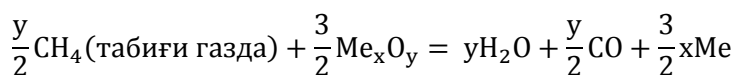
Химиялық циклдарды ұйымдастыруда металл (Me_xO_y) тотығы көміртек құрамды шикізатты жағу немесе ішінара тотығу үшін оттегі тасымалдаушы ретінде жұмыс істейді (мысалы, табиғи газды, көмірді мен биомассаны). Жану жағдайында, ауа O_2 беру үшін пайдаланған жағдайдағы сияқты, өндірілген газ тәріздес қалдық тұста N_2 араластырусыз CO_2 қатты қоюланады, бұл оны CCS-мен қолдану үшін неғұрлым қолайлы етеді.

O_2 -мен ішінара тотығу немесе газдандыру жағдайында, қымбат ASU болмайды, бұл синтез-газды CCS үшін, сондай-ақ бірлескен химиялық заттарды өндіру мен синтез-отын үшін неғұрлым сәйкес болады. Me_xO_y металл тотығының CH_4 және бастапқы шикізат көміртегімен бірге жалпы реакция былай жазылуы мүмкін:

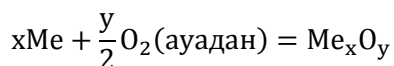
Жану:



Ішінара тотығу:



Металл тасығыштың тотығуы:



Жану немесе ішінара тотығу реакциясы, сондай-ақ металл тасығыштың тотығу реакциясы екі бөлек ыдыстарда жүзеге асырылады. Жалған сұйықталған қабатты реакторлар осы қолданыстар үшін зерттеледі, бірақ реакторлардың арасындағы бөлшектердің қажалуы және ыстық қатты денелердің (Me және Me_xO_y) ауыстырылуы техникалық проблемалардың кейбірі болып табылады. Қаралып отырған металл тасымалдаушылары Cu , Fe , Mn және Ni қамтиды.

11.4 МАГНИТТІ ГИДРОДИНАМИКА

Ашық циклдың МГД-генераторы отынның қазбалы түрлерінен тұратын электр энергиясын өндіру үшін әзірленеді. Жану өнімдерінің құрамында зарядтар барын, өткізгіш ағынды газ ағынында орналасқанын қоспағанда қарапайым генератор сияқты ол да электр тогын тудыру үшін магнит өрісі арқылы өткізгіштің орнын ауыстырудан тұрады. Ионизация кезінде оң зарядталған иондарды құра отырып, атомдардан немесе мольдерден электрондар бөлінеді, сондықтан газ плазмалық күйде орналасқанда жану өнімдері өте жоғары температураларда (>2700 бастап) болуы тиіс. Қажетті жоғары температуралар отынды жағу ауамен емес, оттегі арқылы жүзеге асырылуы мүмкін, бұл КСБ үшін үдеріс неғұрлым достас болады. Егер ауа пайдаланылатын болса, онда ауаны өте жоғары температураға дейін алдын ала қыздыру (МГД-генераторынан пайдаланылған жылуды қолдана отырып) талап етіледі. Зарядталған бөлшектер мен тұздар түріндегі сілтілер газ ағынына сыртқы көзден енгізілуі мүмкін. Бұл шамамен 2500°C -ге дейін температураны төмендету үшін олар оңай иондармен қанықтырылады (олар қазірдің өзінде көмір күлде болуы мүмкін, сілтілерге қосымша қатыса алады). МГД-генераторы буды тудыру үшін қосарланған немесе гибридті циклға әкелетін Ренкин циклы үшін пайдаланылуы мүмкін.

Тұйық циклдың МГД-генераторы Cs егілген немесе сұйық металмен игі газды (He сияқты немесе Ar) пайдаланады. МГД-генераторының бұл түрі негізінен атом электр станцияларында қолданылу үшін зерттеледі және аз жұмыс температурасын талап етеді. МГД-генераторымен өндірілетін электр тоғы, отындық элементтердегі сияқты тұрақты ток болып табылады. Әрі оны желіге берер алдында оны айнымалы тоққа түрлендіру үшін инвертор қажет. Қондырғының жалпы тиімділігі бу циклы енгізілген зерттеулерде мүмкін болатындай, көмірдің жоғары жылу шығару мүмкіндігінен 60%-ға асады деп көрсетілген. Энергия жүйесі энергиясын АҚШ-қа, сондай-ақ бұрынғы КСРО-ға бірдей таратып отырғанда 1980-ші жылдары МГД тұжырымдамасы дәлелденген болатын. Бірақ кейінгі жылдары бұл саладағы ғылыми-зерттеу және тәжірибелік-конструкторлық қызметі нашарлап құлдырай бастады. Қазіргі қазба энергия өндірісіндегі CCS-ға баса назар аударылу кезеңінде тотықтырылған жану негізіндегі МҚД-нің өндірілуі жаңа қызығушылық тудырады.

ӘДЕБИЕТ

- Armstrong PA, Bennett DL, Foster EP, Stein VE. Ceramic membrane development for oxygen supply to gasification applications. Proceedings of the Gasification Technologies Conference; October 2002; San Francisco, CA.
- Diethelm S, Van Herle J, Middleton PH, Favrat D. Oxygen permeability and stability of $\text{La}_{0.4}\text{Ca}_{0.6}\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x\text{O}_{3.5}$ ($x = 0, 0.25, 0.5$) membranes. *J Power Sources* 2003;118:270-275.
- Enick RM, Cugini AV, Killmeyer RP, Howard BH, Morreale BM, Ciocco MV, Bustamante F. Towards the developments of robust water-gas-shift reactors. *Am Chem Soc* 2003;48(2).
- Foy K, McGovern J. Comparison of ion transport membranes. Proceedings of the 4th Annual Conference on Carbon Capture and Sequestration; May 2-5, 2005. Morgantown, WV: U.S. Department of Energy.
- FuelCell Energy, Inc. 2013. Types of fuel cells. Available at <http://www.fuelcellenergy.com/why-fuelcell-energy/types-of-fuel-cells/>. Accessed October 3, 2013.
- Fuel Cell Handbook*, seventh edition (EG&G Services, Inc). Morgantown, WV: U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory; November 2004. Contract nr DE-AM26-99FT40575.
- Ihara M, Yokoyama C, Abudula A, Kato R, Komiyama H, Yamada K. Effect of the steam- methane ratio on reactions occurring on Ni/yttria-stabilized zirconia cermet anodes used in solid-oxide fuel cells. *J Electrochem Soc* 1999;146(7):2481-2487.
- Judkins RR, Bischoff BL. Hydrogen separation using ORNL's inorganic membranes. Proceedings of the 29th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems; April 18-23, 2004; Clearwater, FL.
- Li M, Rao AD, Brouwer J, Samuelsen GS. Design of highly efficient coal-based integrated gasification fuel cell power plants. *J Power Sources* 2010;195:5707-5718.
- Lundberg WL, Veyo SE, Moeckel MD. A high-efficiency solid oxide fuel cell hybrid power system using the Mercury 50 advanced turbine systems gas turbine. *J Eng Gas Turbines Power* 2003;125(1):51-58.
- Marquez AI, Abreu YD, Botte GG. Theoretical Investigations of NiYSZ in the Presence of H_2S . *Electrochem Solid-State Lett* 2006;9(3):A163-A166.
- Matsuzaki Y, Yasuda I. Electrochemical oxidation of H_2 and CO in a H_2 - H_2O -CO-CO₂ system at the interface of a Ni-YSZ cermet electrode and YSZ electrolyte. *J Electrochem Soc* 2000;147(5):1630-1635.
- Prasad R, Chen J, van Hassel B, Sirman J, White J, Apte P, Shreiber E. Advances in OTM Technology for IGCC. Nineteenth Annual International Pittsburgh Coal Conference; September 2002; Pittsburgh, PA.
- Ralph TR, Hogarth MP. Catalysis for low temperature fuel cells. *Platin Metals Rev* 2002;46(3):117-135.
- Rao AD, Samuelsen GS. A thermodynamic analysis of tubular solid oxide fuel cell based hybrid systems. *J Eng Gas Turbines Power* 2003;125(1):59-66.
- Roark SE, Mackay R, Sammells AF. Hydrogen separation membranes for VISION 21 energy plants. *Proc Intl Tech Conf Coal Utilization Fuel Syst* 2002;27(1):101.

12

ЖАҢҒЫРТЫЛАТЫН КӨЗДЕР ЖӘНЕ ЯДРОЛЫҚ ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ

Энергияны пайдалану бойынша алаңдаушылықтың маңыздылығы артуда, өйткені жылыжайлық газдардың әсерінен климаттың өзгеруі ғаламдық проблемаға айналууда. Нақты айтқанда, қазба жанармай және көмір энергияның негізгі көзі болып табылады; 2012 жылы көмірдің тұтынуы 162 x 1015 кДж жетті, бұл энергияны әлемдік тұтынудың шамамен 30% құрайды және болжамдарға сәйкес энергияны жалпы тұтыну үлесі сақталған жағдайда, 1,3% орташа жылдық өсу қарқынымен 2040 жылы 232 x 1015 кДж дейін артады. Көмір электр станцияларындағы электр энергиясының өндірісі секторында 2012 жылы 8,4 x 1012 кВт-с өндірілді, бұл әлемдік электр энергиясы жалпы көлемінің 40% құрайды (Конти және Холдберг, 2013). Көмір электр станциялары CO₂ мен (NO_x және N₂O) Н₂ сияқты басқа да түрлі ластағыштардың шығару көздері болып табылады. Мысалы, 2012 жылы Құрама Штаттарда CO₂ 5290 x 106 тоннаны құрады, оның ішінде электр энергиясы өндіруге 40% тиесілі (АҚШ-тың Энергетикалық ақпарат жөніндегі басқармасы, 2013). Осы кітапта сипатталған қазба отында жұмыс істейтін қондырғыларда CO₂ шығарындыларын қысқарту нұсқалары көміртегінің тұтылу және сақталу тиімділігін арттыруды қамтиды. Жаңғыртылған және ядролық энергияны пайдалану CO₂ шығарындыларын қысқартудың басқа жолын ашады және біздің планетамыздың экологиялық қауіпсіздігін қамтамасыз етуде оның жалпы энергетикалық құрылымға қосар үлесі артуы тиіс. 12.1-кестеде (Эденхофер және авторластар, 2011) өмірлік кезеңді бағалау (LCA) негізінде жылыжайлық газдар шығындыларының салыстырмалы қарқындылығы көрсетілген, ал жел, күн, геотермальді және ядролық энергия ең төменгілердің қатарында әрі келешектегі жылыжайлық газдардың қысқартылуынан тұратын мақсатқа біршама ықпал жасайды.

12.1-КЕСТЕ. Электр станцияларынан шығатын жылыжайлық газдар шығарындыларының салыстырмалы қарқындылығы (Эденхофер, авт., 2011)

Технология	г эквиваленті CO ₂ /кВтч
Гидроэлектрлік	4
Жел	12
Ядролық	16
Биоқоспа	18
Күн жылуы	22
Геотермальді	45
Табиғи газ (CCS жоқ)	469
Көмір (CCS жоқ)	1001

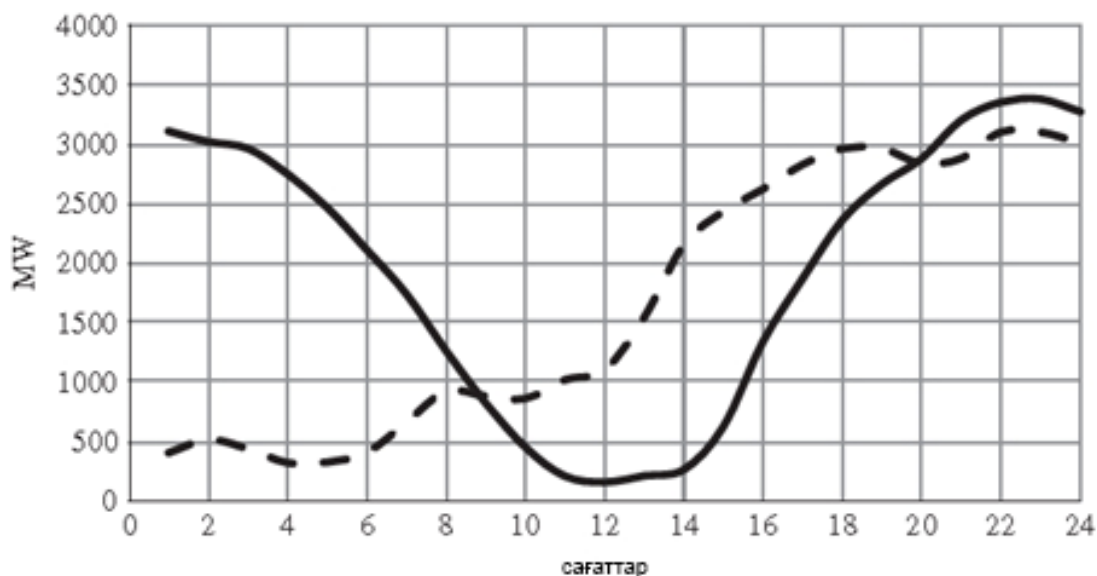
Жаңғыртылған энергия көздерінің Ұлттық зертханасы (NREL) LCA жарияланған нәтижелерге жан-жақты шолу жасады, кестеде берілген деректер шығарылым қарқындылығының 50-пайыздық деңгейіне сәйкес келеді.

Биоқоспа да маңызды жаңғыртылған энергия ретінде көмірмен қатар қарастырылды әрі осы тараудың мақсаты – жаңғыртылған және ядролық көздердің энергияларын пайдалану жөнінде түсінік беру. Сондай-ақ тарауға күн энергиясы мен жел сияқты тұрақсыз жаңартылатын энергия көздерінің ең болмағанда таяу болашақта, энергияны жинақтаудың ірі ауқымды құрылғылары коммерциялық қолжетімді болғанға дейін электр желісінің тұрақтылығын ұстап тұру үшін кендік отынмен жұмыс істейтін электр станцияларына тәуелділігін талқылау енгізілген. Тарау желілерді жобалау түрлеріне электр энергиясын өндірудің экологиялық қолайлы әдістерімен біршама үйлесімді ету үшін қарастырылатын жаңаша дүниелерді енгізумен аяқталады.

12.1 Жел

Желдің кинетикалық энергиясын механикалық энергияға түрлендіру үшін орнатылған турбиналарды әлемнің түрлі елдерінен кездестіруге болады әрі қондырғылардың жалпы саны 1999 жылы 14 ГВт-дан 2009 жылдың аяғында 160 ГВт-ға дейін өскен (Эденхофер және авторлас., 2011). Бұл ұлғаюдың көп бөлігі жел турбиналары бағасының төмендеуі ымен мемлекет қолдауына байланысты болды. Шығатын электр қуаты 1 кВт-тан қуаты 2,5 МВт ірі агрегаттарға дейінгі турбиналар бар, сондай-ақ қуаты 6 МВт болатын анағұрлым ірі агрегаттар сынақтан өткізілуде. Электр желісіне қосылған бірнеше осындай нысан «жел саябағын» құрып, бір жерде орналаса алады. Олар құрлықта, сондай-ақ желі күштірек және аз құбылмалы әрі ландшафтқа ықпал ету деңгейі төмен ашық теңізде орналасуы мүмкін, бірақ мұндай теңіз нысандарының құрылысы мен оған қызмет көрсету шығындары біршама жоғары. Жел энергиясының тұрақтылығына қарамастан, оны жыл бойы қарастырсақ, ол біршама қысқа мерзім ішінде айтарлықтай түрленуі мүмкін, мұны 12.1-суреттен көруге болады, онда Калифорния электр жүйесінің 80% және Невада энергия жүйесінің аз бөлігін құрайтын калифорниялық тәуелсіз жүйе операторлары (CAISO) басқаратын жел саябақтарының электр желілері шегіндегі бір күнгі өндірілетін қуаттарының өзгерулері көрсетілген.

жел



12.1 СУРЕТ. Жел саябақтарымен өндірілетін қуаттың құбылмалығы (2013 жылдың 27 сәуіріндегі және 2013 жылдың 27 қазанындағы CAISO деректері – үзік сызықты)

Осы құбылулардан желден алынатын энергияның немесе жел энергиясы енуінің ең жоғарғы мөлшері (өндірілетін жалпы қолжетімді қуат ішіндегі желмен өндірілетін энергия пайызы) желі тұрақтылығының проблемасы туындағанға дейін шектелуі мүмкін. Энергия тұтынуды басқару әдістері қолданылуы мүмкін, яғни: энергияны сақтау, артық қуатты басқа

үлгідегі электр станциялары (мысалы, қазба отында жұмыс істейтін құрылғылар, бұл одан ары осы тараудың «Электр жүйесінің тұрақтылығы және қазба отынға тәуелділігі» бөлімінде талқыланады) немесе айырмашылықтың орнын толтыру үшін диспетчерлермен басқарылатын басқа да түйіндер, мысалы газ трубиналарының пикеры сынды әдістер. Шын мәнінде, энергожүйелер жабдықтың істен шығуын есептеуге арналған өндірілетін және жіберілетін қуаттардың резервіне ие әрі бұл қуат жел энергиясы мен күн энергиясының үлесіне қарай кейіннен жел саябақтарымен өндірілетін кейбір ауыспалы қуаттың орнын толтыру үшін пайдаланыла алады. Осылайша, үлес шегі нақты желіге байланысты, зерттеулер бойынша, шын мәнінде, жел энергиясының үлесі 20-30%-ға оңай қосыла алады, бірақ экономикалық шектеулер бұл деңгей ауқымынан шығуды тежеуі мүмкін. Жел жылдамдығын болжау коммуналдық шаруашылық операторы үшін маңызды, себебі диспетчермен бақыланатын жедел бірліктерді жинастыруға қатысты алдын ала жоспарлау мүмкіндігіне ие болады.

12.1.1 Жел ресурсы және алаңшаны таңдау

Жел жер атмосферасындағы жоғарғы және төменгі қысым аумақтарында күннің ауытқымалы қыздыруы әсерінен шыққан температура градиентінен пайда болады әрі Жер бетіне түсетін күн шуақтарының бұрышы тәулік пен ендік уақытының функциясы болып табылады. Сонымен қатар Жер бетімен жұтылатын жылу энергиясының мөлшері және беткі қабат түрі, яғни ашық жерлер немесе өсімдікпен көмкерілген аумақ, не үлкен су қойманың болуы аталған температуралық градиенттерге әсер етеді.

Желдің кинетикалық энергиясын пайдаланудың дүниежүзілік техникалық әлеуеті өте ауқымды: бағалау бойынша 140 ЭДж/жыл бастап 3050 ЭДж/жылға дейін құрайды.

12.2-КЕСТЕ. Дүние жүзі бойынша жел ресурстарын бөлу (Эденхофер және авторлас., 2011; Лю және авторлас., 2009)

Аумақ	%
Еуропа ЭСДҰ	4
Солтүстік Америка	22
Латын Америкасы	9
Еуропа ЭСДҰ және бұрынғы Кеңестер Одағына енбейтін	26
Африка және Таяу Шығыс	17
Океания	13
Қалған Азия	9
Барлығы	100

12.3-КЕСТЕ. Жел энергетикасының санаты (Жаңғыртылған энергияның ұлттық зертханасы, 2014)

Қуат санаты	50 м (м/с) кезіндегі жел жылдамдығы	Ресурс сапасы
1	0,0-5,6	Жұтаң
2	5.6-6.4	Мардымсыз
3	6.4-7.0	Қалыпты
4	7,0-7,5	Жақсы
5	7,5-8,0	Өте жақсы
6	8,0-8,8	Ерекше
7	> 8,8	Керемет

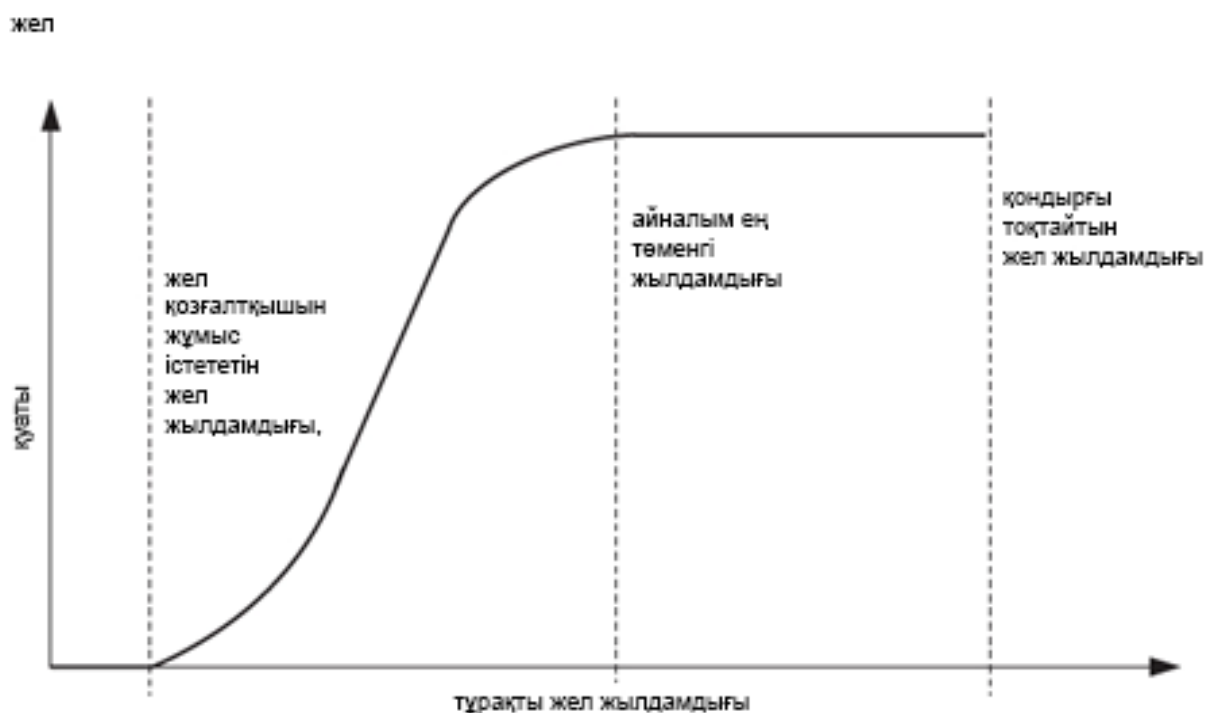
(39 000–840 000 ТВтч/жыл) жер үсті және теңіз қондырғыларына орын таңдауды шектеуге қатысты берілген рұқсаттарға байланысты (Эденхофер және автор., 2011). Жел ресурсы жер үстенде ауытқымалы күйде таралған, бұл ұсынылған кестедегі деректерден байқалады (Эденхофер және автор., 2011; Лю және автор., 2009), әрі ол әрқашанда елді

мекендерге жақын орналаспайды, осы орайда техникалық әлеует қолданысының шектелуі ықтимал.

12.3-кестеде жел ресурстарының олардың жылдамдығына сәйкес жіктелуі берілген (Жаңғыртылған энергия көздерінің ұлттық зертханасы, 2014 ж.), ал ірі жел электр станцияларында экономикалық тұрғыдағы тиімділігі үшін биіктіктегі жел турбиналарындағы күшкердің жел жылдамдығы 7 м/с артық болғаны дұрыс. Назар аударыңыздар, жел турбинымен қайтарылатын W қуаты жел жылдамдығы кубына пропорционалды болады, бұл теориялық жағынан қалпына келтірілетін ең жоғарғы қуат және ρ ауа тығыздығы, v жел жылдамдығы мен ол арқылы ауа өтетін жел бағытына перпендикуляр A турбина қалақшалардың жайылу аумағы арасындағы өзара қатынастан көрінеді (Бетц, 1920):

$$\dot{W} = \frac{16}{27} * \left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right)$$

Әр түрлі аэродинамикалық және механикалық ысыраптарға байланысты төмен турбина күшейтетін нақты қуат COP өнімділік коэффициенті мен механикалық (берілу қоса) тиімділікті η_{mech} және $\eta_{\text{ген}}$ генератор тиімділігін 12.1 теңгеріммен есептеледі.



12.2-СУРЕТ. Жел қондырғысы қуатының қисық сызығы

$$\dot{W} = COP * \eta_{\text{мех}} \eta_{\text{ген}} * \left(\frac{1}{2} \rho A v^3 \right) \quad (12.1)$$

COP ие бола алатын ең жоғарғы мән 16/27 немесе 0,596 болмақ әрі ең жоғарғы мәнге қол жеткізу үшін бастапқыда винттің біркелкі жылдамдығына қатысты ұлғаятын, артынан біршама жоғарғы қатынастарда азаятын осы турбина құрылымына арналған винттің біркелкі жылдамдық функциясы болып табылады (қалақша винтінің тангенциалды жылдамдығы және желдің нақты жылдамдығының қатынасы).

Жел электрстанциясының орналасатын орнын таңдаған кезде келесі факторларға назар аудару қажет: қуат жеткізілуі тиіс ара қашықтық, жердің пайдаланылумен үйлесімдік, тиімді шу деңгейі, визуалды көрініс және құстар популяциясына әсері.

12.1.2 Негізгі құрал-жабдықтар

Көптеген ірі көлемді жел қондырғылары индукциялы генераторды қозғалысқа келтіретін үш қалақшалы тік білікке ие, ол 3-4 м/с «жел қозғалтқышы жұмыс істей бастайтын жел жылдамдығымен» желден электр энергиясын өндіре бастайды. 12.2-суретте генерациялайтын турбина мен жел жылдамдығының типтік қуат қатынасы көрсетілген. Жел арқылы турбина қалақшаларымен жасалатын желдің тым төменгі жылдамдығы кезіндегі айналу сәті турбинаны айналдыру үшін тым аз. Турбинамен күшейтілетін қуат жел жылдамдығы текшесіне байланысты қосылу жылдамдығынан жылдам көбейеді. Алайда жоғарғы шек бар, әдетте 12-17 м/с жел жылдамдығы диапазонында болады, мұнда электр генераторымен шектелген қуаттың шығуы қуаттың нақты шығуына жеткізіледі. Турбиналық жүйе қуатты оның нақты қуатына дейін шектеуге арналған, мысалы, үлкен турбиналар жағдайында қалақшалар (қадам) бұрыштарын реттеу арқылы. Ақырында, желдің тым жоғарғы жылдамдықтарына арналған тежеу жүйесі қолданылады, «жел қондырғысын тоқтататын жел жылдамдығы» ретінде белгілі, жел арқылы пайда болатын шектен тыс күштен ротордың зақымдануына жол бермеу үшін әдетте 25 м/с артық болды.

Кіші көлемді жел турбиналары желдің біршама төмен жылдамдығында жұмыс істеуге арналған болса, біршама жоғары қуат коэффициенттеріне қол жеткізе алады, бірақ қатты жел кезінде жұмыс тиімділігі азаяды, сондай-ақ қондырғыға кететін үлесті шығын (\$/кВт) да артады, өз кезегінде үлкен турбиналар жоғарғы инерция арқасында желдің төменгі жылдамдығында тоқтатылады, бірақ көлеміне қатысты экономиялық артықшылыққа ие болады.

Үлкен жер үсті турбиналары әдетте 50-100 метрлік мұнараларда орнатылады, олардың ротор диаметрі 50-100 м, бірақ ротор диаметрі 125 м агрегаттар да жұмыс істейді, ал бұдан да үлкен машиналар зерттелу сатысында тұр. Назар аударыңыздар, v жел жылдамдығы мөлшермен мына биіктікпен ұлғаяды:

$$v \propto (\text{биіктік})^{1/7} \quad 12.2)$$

Алайда белес жоталары $1/7$ қуат ережесіне сай емес. Ауа тығыздығы, бір жағынан, биіктіктен төмендейді және өндірілетін қуатты есептеуде ескерілуі тиіс. Жел электр станциялары схемасын дайындау кезінде ескерілетін тағы бір фактор көрші турбиналар әсерінен қалыпқа келтірілетін энергия ағым өрісінің төмендеуі болып табылады. Жел электр станцияларындағы турбиналар, жолшыбай ағымның әсерін минимумға жеткізу үшін тиімді орналасуы тиіс. Бұдан басқа жобаны дайындау кезінде жергілікті топография, сондай-ақ логистиканың құрылыс және басқа да мәселелері ескерілуі тиіс.

Электрлік түрлендіру жүйесі жалпы жүйе сенімділігінің маңызды бөлігі болып табылады. Үлкен жел турбиналарына арналған ең жиі қолданылатын генератор – бұл айнымалы тоқ генераторы, өз кезегінде тұрақты тоқ генераторлары шағын жел турбиналары үшін қолданылады әрі батареяларды қуаттандыру кезінде жақсы жұмыс істейді. Үлкен турбиналарда қалақшалар орналасқан білік генератормен редуктор арқылы қосылған, ал кіші турбиналар әдеттегі тікелей жетекке ие. Редуктор генератор жылдамдығының турбина айналымы жиілігімен ең жақсы үйлесімдігін қамтамасыз етеді, бірақ тозуға шалдығады, ал өз кезегінде тікелей жетек жағдайында генератор білігі мен подшипниктер қалақшаларға әсер ететін желмен пайда болатын толық айналым сәті ықпалына ұшырайды. Жалпы пайдалану энергия жүйесімен байланысты ілеспе генератор бұл жүйе жиілігіне ілесу үшін тұрақты жылдамдықта жұмыс істеуі керек және мұндай бір жылдамдықты жұмыстың негізгі кемшілігі – турбина жел жылдамдығы өзгергенде үнемі максималды тиімділікпен жұмыс істемейді. Алайда күштік электроника айнымалы жылдамдықтағы жел турбиналарын орнатуға мүмкіндік туғызды.

12.1.3 Қаржылық мәселелер

Қазіргі кезеңде жел энергетикасы күрделі қаржыны талап ететін сала болып табылады әрі жергілікті, штаттық және федералдық үкіметпен ұсынылатын

ынталандырулар көптеген елдерде экономикалық өміршеңдігі үшін маңызды. Электр энергиясының теңестірілген бағасы электрстанция қуаты коэффициентіне байланысты әрі жел парктері жағдайында 15-тен 50% дейінгі аралықта өзгеріп отырса, әдеттегі қазба отынмен жұмыс істейтін, айталық, көмір электр станциялары сияқты қуат коэффициенттері 85% дейін жетеді. Технологияның одан ары дамуы жер үсті жел энергетикалық қондырғылардан шығатын электр энергиясы құнының 10-30%, төмендеуіне әкеледі, ал теңіз жел энергетикалық қондырғылары үшін электр энергиясы құнының төмендеуі 2020 жылға қарсы 10-40% құрайды деп күтілуде (Эденхофер және автор, 2011). Жетістіктердің кейбіреулері үлкен крандардың қажеттілігін төмендететін және материалдарды қысқартатын мұнара конструкциясының жақсаруына жол ашады: ротор қалақшаларының, жетектің және генератордың біршама тиімді конструкциялары; конструкция материалдарын жасаудың заманауи тәсілдері; қолданылатын материалдар көлемінің шектелуі кезіндегі қажыту күші азайтылған қалақшаларды енгізу арқылы сыйымдылықтардың жақсартылған коэффициенттері. Айнымалы қадамға ие роторлар да жел әсері бұрышын оңтайландыру мақсатында зерттелуде, бірақ бұл өте күрделі мәселе, себебі жел жылдамдығы (бағыт және жылдамдық) біршама өзгеріп отыруы мүмкін.

12.1.4 Қоршаған орта мәселелері

Жел энергиясы біршама азғантай экологиялық ізге ие, алайда оның салдары жоқ емес. 12.1-кестесінде (Эденхофер және автор., 2011) көрсетілгендей, LCA негізіндегі жылыжайлық газдардың салыстырмалы шығарылымдары жел энергиясы үшін ең төменгілердің бірі болып табылады, бірақ жел энергиясы құстардың және жарғанаттардың қақтығысулары сияқты кейбір зиянды ықпалдарды тудырады. Теңіз жел энергетикалық қондырғылары үшін сонымен бірге балық аулауға және теңіз флорасы мен фаунасына әсері ескерілуі тиіс. Ландшафтқа, шуға ықпал ету және болуы мүмкін радиолокациялық кедергілер де ескерусіз қалмауы керек.

12.1-мысал. Диаметрі 20 м және ПЭК 40% болатын жел турбины жел жылдамдығы 25 м/с кезінде 2,5 МВт өндіреді. Диаметрі 44 м және ПЭК 50% жел жылдамдығы 20 м/с кезіндегі жел турбинының шығу қуаты қандай? Екі жағдайда да жел тығыздығы, механикалық және генераторлық шығындар бірдей деп шамалайық.

Шешім

Теңгерімнен (12.1) $(\dot{W}_1/\dot{W}_2) = (COP_1/COP_2) * (D_1/D_2)^2 * (v_1/v_2)^3$

Тапсырылған мәндерді қойып, $(\dot{W}_1/2.5) = (50/40) * (44/20)^2 * (20/25)^3$

Онда үлкен турбинаның шығу қуаты, $\dot{W}_1 = 7,74 \text{ МВт}$

12.2 КҮН

Күн энергиясы ыстық су немесе ғимаратты жылыту үшін қажетті төмен температуралы жылуды тікелей қамтамасыз ету үшін, не күн **батареяларын пайдаланып**, электр тоғына айналдыру жылу қозғалтқышының я болмаса термохимиялық үрдістің жұмысына қажетті жоғарғы температуралы жылуды қамтамасыз ету үшін қолданылуы мүмкін. Назар аударыңыз, жел мен мұхиттың жылу энергиясы да күн энергиясын пайдаланады, бірақ ол үшін, алдымен, аталмыш энергия жермен сіңіріліп алыну керек. Бұл тарау ірі көлемде электр энергиясын өндіруге арналған жылу қозғалтқышының жұмысы үшін жылу тасымалдағыш көмегімен жұмыс сұйықтығын тура немесе жанама жылыту мақсатында күн энергиясы шоғырланғанда кезде оны тікелей пайдаланумен шектелген. Мұндай байытылған күн электр станциялары 2014 жылы 10,8 ГВт қуат жиынтығына ие болады, 2009 жылмен салыстырғанда 0,29 ГВт болады деп күтілуде. Жаңадан қосылатын бірқатар станцияларындағы қуат коэффициенттері қосылған жылу сыйымдылығымен 25% бастап 75% дейін аралықта түрленетін болады деп күтілуде.

КЕСТЕ 12.4. Дүние жүзіндегі күн энергиясының техникалық әлеуетті қорлары (Эденхофер және авторластар, 2011; Рогнер және авторластар, 2000)

Өлке, аймақ	Болжам	
	Мин. (ЭДж/жыл)	Макс. (ЭДж/жыл)
Солтүстік Америка	181	7410
Латын Америкасы және Кариб алабы	113	3385
Батыс Еуропа	25	914
Орталық және Шығыс Еуропа	4	154
Бұрынғы Кеңес Одағы	199	8655
Орта, Шығыс және Солтүстік Африка	412	11060
Сахарадан оңтүстікке қарай	372	9528
Тынық мұхиты Азиясы	41	+994
Оңтүстік Азия	39	1339
Орталық Азия	116	4135
Тынық мұхиты ЭСДҰ	73	2263
Барлығы	1575	49837

12.2.1 Күн ресурсы және алаңшаны таңдау

Күн сәулелендіруіне күннен келетін тура компонент («сәулелі радиация») және бұлттардан, атмосфералық ылғал буларынан («шашыранды радиация»), сондай-ақ жер бетінен («жер бетінен шағылысқан радиация») шағылысқан шашыранды компонент енеді. Жер бетіне жететін барлық энергияның шамамен 40% тікелей немесе сәулелі радиацияны құрайды. Күн сәулесінен электр энергиясын өндіруге арналған әлеует зор, болжам бойынша 1575-тен 49 837 ЭДж/жыл дейін, бұл 2008 жылғы әлемдегі бастапқы энергияны тұтынудан мөлшермен 3-100 рет артық (Эденхофер және авторл., 2011). Бірақ жылу қозғалтқышы жұмысы үшін күн энергиясын тікелей пайдалану кезінде күн сәулелендірудің тікелей сәуле компоненті ғана қолданылады, міне, сондықтан да шектелген географиялық аймақтар осы технологияның барлық артықшылықтарын жүзеге асыра алады. Жер бетіне түсетін күн сәулесінің бұрышы енділік функциясы болып табылады. Күн энергиясының әлемдік қоры 12.4-кестесінде келтірілген (Эденхофер және авторл., 2011; Рогнер және авторл., 2000).

12.2.2 Басты құрал-жабдықтар

Негізгі жабдықтарға кіретіндер – күн сәулелерін құрамында жылу алмастыру жабдықтары және жылу қозғалтқышы бар қабылдағышқа немесе сіңіргішке шағылыстыратын концентратор. Күн сәулелерін шағылыстыратын концентраторлардың екі түрі бар, біреуі – тарелкелер жүйесін қолданатын нүктелі фокус, ал екіншісі – астауша немесе Френель жүйесін қолданып жасалған сызықты фокус.

12.2.2.1 Нүктелі фокусты шағылыстырғыштар. Орталық қабылдағыш немесе «күш мұнарасы» көптеген айналарға немесе гелиостаттарға ие, олар мұнара басында орналасқан қозғалмайтын аударылған астау немесе түтікшелерден тұратын күн сәулелерінің қабылдағышқа күндік фокусталуын қадағалайды, ол айналарға немесе гелиостаттарда жылу тасымалдағыш айналымға түседі және 1000°C температураға дейін қызады, бұл бағытты фокусталуы бар жүйеден біршама жоғары. Жылу тасымалдағыш кейіннен Ренкин циклы үшін бу сипатты жұмыс сұйықтығын қыздыру мақсатында пайдаланылады. Бұл жүйенің негізгі артықшылығы будың қыздырылуын біршама жоғары температураға қыздыруға мүмкіндік беретін жоғарғы температурамен жасалынады (немесе тіпті будың шектен асқан циклын қолдану арқылы), бұл өз кезегінде біршама жоғары тиімділікке қол жеткізуге мүмкіндік береді. Сондай-ақ қондырғылар құрылысында икемділік те орын алған, себебі гелиостаттарды жазық бетке орнатуға болады.

Шағын қолданыстар үшін (электр қуаты 10-25 мөлшеріндегі диапазонда) бір парабола тектес қадағалаушы сәулелерді шағылыстырғыш қабылдағышқа бағыттайды, ол тарелкеден бір диаметрге дейінгі қашықтықта тұрады да тарелкемен бірге жылжып отырады, сөйтіп 900°C температураға дейін жетеді. Жылу фокуста орналасқан Стирлинг қозғалтқышының жұмыс сұйықтығына тікелей беріле алады. Бұл қосылғыш тіке емес рекуперативті қозғалтқыш шағын қолданыстарға арналған, қысымды жұмыс сұйықтығын пайдаланады, ал мінсіз цикл тұрақты көлем жылуын қосудан және таратудан тұрады (Уолкер, 1980). Қысым мен кеңею кезеңдері не жылу алмастырғыш ретінде қызмет атқаратын әрбіреуі поршеньмен жабдықталған екі бөлек цилиндрларда, не цилиндрдың қыздырылған және суытылған кесіндісі арасында жұмыс сұйықтығын алға және артқа итеріп шығаратын бір поршеньді цилиндрда орындалады.

Калифорнияда 2013 жылы қуаттылығы 400 МВт станция іске қосылды. Бу турбиналары қолданылатын ірі көлемді конструкцияларға солтүстік ендіктердегі электр станциялары үшін орталық қабылдағыш немесе көрсетілімдік блок енгізілген, Германияның солтүстік-батысында 1,5 МВт өндіруге мүмкіндігі бар жүйе 2009 жылы пайдалануға берілді, онда бу турбинасы үшін енуінде 27 бар және 480°C жағдайында бу өндіреді.

12.2.2.2 Сызықтық фокусқа ие шағылыстырғыштар. Парабола тәрізді шағылыстырғыштардың немесе астаулы концентраторлардың ұзын қатарлары 70-100 рет күн сәулесін күңгірттенген⁴³ бөліктерге шоғырландырады. Ішкі болат түтік аралары сақиналы конвективті және өткізгіш жылу шығындарын ең аз мөлшерге жеткізу үшін сорылып алынған сақиналы бос орны сыртқы шыны түтікке енгізілген. Астаулар бір өзек бойы әдетте солтүстіктен оңтүстікке қарай күнді қадағалайды. Жылу тасымалдағыш болат түтік арқылы айналымға түседі, онда ол мөлшермен 400°C дейін қыздырылады да өз кезегінде жұмыс сұйықтығын, мысалы, буды Ренкин циклы үшін өндіруге қолданылады. Май сияқты жылу алмастырғыш сұйықтықтарды пайдалану түтіктердің есептік қысымын шектеуге мүмкіндік береді, бірақ оның тұтанғыштығынан қауіпсіздік мәселесі туындайды. Басқа да жылу тасымалдағыштар жасалу үстінде, мысалы, балқытылған тұздар, оларды қолайсыз ауа-райы жағдайында немесе түнгі уақытта буды өндіруге қажетті жылуды қамтамасыз ету үшін сақтауға болады, сондай-ақ тікелей емес жылу таратқыштың сұлбасын өзгерту үшін тікелей түтік ішінде бу өндіріледі. Бұл астаулық коллектор конструкциясы 20 жылдан астам коммерциялық пайдалану тәжірибесі бар біршама кең тараған үлгі болып табылады, бірақ қозғалыссыз бағыттық қабылдағышта күн сәулесін шоғырландыруға арналған ұзын параллельді қадағалаушы жайдақ жолақты айналар қолданылатын Френельдің бағыттық жүйесі қарапайым орналастырылуы және негізінен пайдалану шығындары мен техникалық қызмет көрсету шығындары төмендігінің арқасында кеңінен таралған. Шағылыстырғыш конструкциясы үлкен апертуралы және қысқа фокустық қашықтықты шоғырландырғыш айна (немесе линза) жасауға мүмкіндік беретін Френель линзасының әсеріне негізделген. Жайдақ айналар парабола тәрізді шағылыстырғыштарға қарағанда арзанырақ, бұл ретте құрылыс шығындары, жел жүктемесі мен энергия шығыны төмен әрі Френель бағыттық жүйесінің температурасы бойынша шектеудің төменгі шегінен асып түседі.

Парабола тәрізді астаулар қолданылатын ең алғашқы қондырғылар Калифорнияда 1985 және 1991 жылдар аралығында орнатылған болатын, олардың 354 МВт электр энергиясын өндіруге мүмкіндігі бар. Біршама таяу уақытта орнатылған парабола тәрізді астаулар негізіндегі қондырғыларға АҚШ-тың Невада штатында 2007 жылдан бері жұмыс істейтін номиналды өндірілетін электр энергия қуаты 64 МВт болатын жүйені жатқызуға болады. Ол термомайды, жылу тасымалдағышты 390°C температураға дейін қыздыратын 180 000 айнадан тұратын 760 астауға ие, өз кезегінде бу турбинасына 90 бар және 371°C кезінде буды жеткізу үшін қолданылады. Осы технологияны пайдаланатын Испанияда жұмыс істейтін екі блоктың өндірілетін электр энергия қуаты – 50 МВт, әрбіреуінің бу турбинасына кіру шарты бірдей: 100 бар және 377°C. Испаниядағы мұндай қондырғылардың әрбіреуі 1,95 км² аумаққа орналасқан, айналық алаң көлемі шамамен 510 000 м². Парабола тәрізді астау негізіндегі қондырғының басқа мысалы 2010 жылдан

⁴³ Мысалы, сыртқы бет іріктелуін оңтайландыруға арналған электрохимиялық күйеленген қара хром (сіңірілетін энергияның шашырайтын энергияға қатынасы).

бастап Египетте жұмыс істейтін интеграцияланған құрама күн циклы болып табылады. Ол күн өрісінен тұрады, табиғи газ негізіндегі құрама циклды турбина бу үшін қосымша буды қамтамасыз ету үшін 400°C температура кезінде шамамен 110 МВт жылу энергиясын өндіруге қабілетті. Газ турбиасы 74 МВт өндіреді, ал бу турбиасы 77 МВт өндіре алады. Күн қондырғысынан қосымша бу, газ турбиасымен ЖУБГ өндірілетін байытылған бумен біріктіріледі әрі 92 бар мен 560°C кезіндегі ЖУБГ бу турбиасына ену үшін қыздырылады. Осындай интеграцияланған қондырғының артықшылығы екі жүйе арасындағы бөліктерді бөлу есебінен жалпы негізгі шығындардың төмендігі болып табылады. ЖУБГ-да сонымен қатар күн энергиясының қарқындылығы төмен немесе қол жетімді болмаған сәттердің орнын толтыру үшін каналдық от алдыру қосылуы мүмкін, бірақ онда ЖУБГ-ны қосымша буды қамтамасыз ету үшін арттыру қажет болады. Күн энергиясымен өндірілетін буларды көмірмен немесе биоотынмен жұмыс істейтін қазандық буымен біріктіру де осындай тәсілмен орындала алады.

1,4 МВт электр энергиясын өндіруге қабілетті Френельдің бағыттық көрсетілімдік қондырғысы 2009 жылдан бастап Испанияда жұмыс істейді. Әрбір та жалпы аумағы 18 662 м² құрайтын 16 паралельді бағыттық айналар пайдаланылады. Бу турбиасы 55 барлы (270°C) қаныққан буда жұмыс істейді. Ыстық судан және қаныққан будан тұратын жылу жинақтау жүйесі бумен буферлеу үшін қолданылады. 2012 жылдан бастап Испанияда қуаттылығы 30 МВт болатын аталған технологияны қолданатын коммуналдық кәсіпорын жұмыс істейді.

12.2.3 Экономикалық тұрғыдағы мәселелер

Қазіргі кезде күн энергиясын шоғырландыратын электр станциялары үлкен көлемді қаржыны қажет етеді, сондықтан да жергілікті, штаттық және федералдық үкіметпен ұсынылатын ынталандыратын факторлар көптеген елдерде экономикалық өміршеңдік үшін маңызды, әйтсе де қазіргі кезде электр энергиясы құны күн фотоэлектрлік элементтерімен өндірілетін энергия құнының шамамен жартысын құрайды. Электр энергиясы құнын теңестіру электростанция қуатының коэффициентіне тәуелді, ал күн электр станциялары жағдайында осы қуат коэффициенттері, бұрын да аталып өткендей, жылу жинақтауды есепке алмағанда 20-дан 30% дейін болуы мүмкін, ал қазба отынмен жұмыс істейтін электростанция (көмірді жағу негізінде) жағдайында болса, бұрын аталып өткендей, қуат коэффициенті 85% жетеді. Күн жылу қондырғысының қуат коэффициенті қосылған жылу аккумуляциясы көлеміне байланысты артуы мүмкін, бірақ бұл да қаржы көлемін арттырады әрі мәмілені мұқият талдау қажет болады. Технологияның одан ары дамуы станцияның үлестік құнының төмендеуіне (АҚШ долл/кВт) және қуат коэффициентінің артуына, ал бұл өз кезегінде 2020 жылға қарай электр энергиясы құнының үштен екіге төмендеуіне әкеледі деп күтілуде.

Зерттеу және дайындау аумағына қатаң сыртқы жағдайда үлкен айналық шағылыстырғыш қабілеттілігін сақтау кезінде төменгі бағаға ие болатын шағылыстырғыш материалдарды, тасымалдауға арналған аралық жұмыс сұйықтығы қолданылмайтын СО₂ шектен тыс циклына арналған қабылдағыштар, тым жоғарғы температура кезінде (650°C), балқытылған тұзды сақтау кезіне қарағанда жылу энергиясын тасымалдау және сақтау үшін жалған жандырылған қабатты бөлшекті жоғары температуралы қабылдағыштарды сәйкестендіру мен талдау, күн сәулесін тұтуды арттыру әрі сәулелендіру қабілетін азайтуға арналған қабылдағыш үшін қолданылатын алдыңғы қатарлы жабындылар жатады.

Қазба отынды ішінара немесе толықтай күн сәулесімен алмастыру Брайтонның «жанама» циклында бірқатар зерттеушілер қолданатын үлкен үміт күттіретін технология болып табылады. Газ турбиналарын арналған сыртқы жану камералары бар жаңа жылу алмастырғыштар әзірленуде, олар кеңейту алдында қысылған ауаны 1000°C жетерлік температураға дейін қыздырады (Хеллер және авторл., 2006). Табиғи газ сияқты отынның жану мүмкіндігін қосып, күн энергиясы жеткіліксіз болғанда қондырғы өнімділігі бірнеше кезең бойы сақталып тұра алады. Күн энергиясы және қазба отын ауаны оның жану камерасына түскенге дейін алдын тала қыздыру үшін жылу энергиясын қамтамасыз ететін күн энергиясымен бірге пайдаланылса, NO_x пайда болуы жалын температурасының тым жоғарылығынан біршама артуы мүмкін, сондай-ақ СКВ-ны немесе NO_x төменгі деңгейлі

жану камерасының жаңа конструкциясын қолдану сияқты жанғаннан кейінгі бақылау қажет болады.

12.2.4 Қоршаған ортаны қорғау

Күн энергиясы салыстырып қарағанда қоршаған ортаға аз ғана ықпал жасайды, дегенмен оның да салдары бар. 12.1-кестесінде көрсетілгендей, LCA негізіндегі жылыжайлық газдар шығарылымдары күн энергиясы үшін ең төменгілердің бірі болып табылады, бірақ күн энергиясының технологиясы басқарылуына байланысты ауаға, суға, жер және экожүйеге деген ықпалдың басқа түрлерін жасауы мүмкін. Мысалы, экологиялық сезімтал жерлерге жоламау керек. Себебі бұл технология жылу энергиясын қайта жаңғырту үшін жылу қозғалтқышын пайдаланады, екінші заң нәтижесі ретінде жылудың бір бөлігі қоршаған ортаға тасталуы тиіс. Жылуды бөліп алудың түрлі әдістері бар, олар 8-тарауда сипатталған әрі олар жылуды бөлу тәсіліне байланысты қоршаған ортаға ықпал жасай алады. Мысалы, егер жылу көл, мұхит немесе өзен сияқты үлкен су қоймасына тасталатын болса, судағы тіршілік ортасына деген ықпалы ескерілуі қажет. Енгізілетін суытатын судағы экрандар арқылы өте алатын шағын су фаунасын (олардың дернәсіл күйінде) сору мен жою, суды қайтару кезіндегі тіршілік етудің судағы ортасының бұзылуы – 7-тарауда талқыланған проблемалар. Ылғалды градирняны қолданған жағдайда, құнды ресурс, судың айтарлықтай бөлігі, ауада жоғалады.

12.2-мысал. Қабылдағышпен жұтылатын Q_u энергияның пайдалы қуаты, яғни одан күн коллекторларының шоғырлануымен шағылысқан жылу шығындары энергиядан алынып анықталады (Kalogirou, 2004):

$$\dot{Q}_u = F' [\eta_{\text{коллектор}} A_{\text{коллектор}} \dot{q}_{\text{кір}} - U_{\text{жоғалу}} A_{\text{қабылдағыш}} (T_{\text{қабылдағыш}} - T_{\text{қорш.орта}})] \quad (12.3)$$

F – коллектордың осы құрылымына және сұйықтық ағымының жылдамдығына шын мәнінде тұрақты болып табылатын коллектор тиімділігі. $\eta_{\text{коллектор}}$ – коллектор апертурасы аумағына (коллектордың пайдалы аумағы) құлайтын энергияға арналған қабылдағыштың жұтылған энергия мөлшерінің қатынасын анықтайтын оптикалық тиімділік әрі ол материалдардың оптикалық сипатына, коллектор геометриясына, күн сәулеленуінің құлау бұрышын қоса алғанда, коллекторды дайындау кезінде пайда болатын кемшіліктерге байланысты $\dot{q}_{\text{кір}}$ – коллектор апертурасы аумағының бірлігіне келетін тікелей күн сәулеленуі, $A_{\text{коллектор}}$ – коллектор апертурасының жалпы аумағы, $U_{\text{жоғалу}}$ – қабылдағыштан қоршаған ортаға дейін жұмсалатын энергия шығыны үшін жылу берілімінің жалпы коэффициенті, $A_{\text{қабылдағыш}}$ – қабылдағыш аумағы, $T_{\text{қабылдағыш}}$ – қабылдағыш температурасы, $T_{\text{қорш.орта}}$ – қоршаған орта температурасы.

9.3-мысалдан тұйық циклды газ турбинасын қолданып, тура күн сәулеленуінен $\dot{q}_{\text{кір}}$ электр энергиясын өндіруге арналған бірінші заң бойынша тиімділік өрнегін алады. Кейіннен 9.3-мысалдағы сол циклда жұмыс істейтін жұмыс денесі ретінде екі атомды газды қолданып, бірінші заң бойынша тиімділікті есептейді:

$$\begin{aligned} F' &= 0.9, \\ \eta_{\text{коллектор}} &= 0.8, \\ \text{концентрация көрсеткіші} &= A_{\text{коллектор}}/A_{\text{қабылдағыш}} = 10, \\ \dot{q}_{\text{кір}} &= 300, \\ (W/M^2), U_{\text{жоғалу}} &= 2.7 (W/M^2 K), \\ T_{\text{қабылдағыш}} &= 1150 \text{ K}, \\ T_{\text{қорш.орта}} &= 25 \text{ K} \end{aligned}$$

Шешім

12.3 теңдеуін мына түрде жазуға болады:

$$\dot{Q}_u/A_{\text{коллектор}} = F'[\eta_{\text{коллектор}}\dot{q}_{\text{кір.}} - U_{\text{жоғалу}}\left(\frac{A_{\text{қабылдағыш}}}{A_{\text{коллектор}}}\right)(T_{\text{қабылдағыш}} - T_{\text{қорш.орта}})]$$

Артынан 9.10 теңдеуінен жоғарыда белгіленген алмастыру арқылы қуат алынады:

$$\frac{\dot{W}}{A_{\text{коллектор}}} = F' \left[\eta_{\text{коллектор}}\dot{q}_{\text{кір.}} - U_{\text{жоғалу}}(T_{\text{қабылдағыш}} - T_{\text{қорш.орта}}) \left(\frac{A_{\text{қабылдағыш}}}{A_{\text{коллектор}}} \right) \right] * \eta_{\text{ген}} \\ * \frac{T_{\text{турб.кір.}}\eta_{\text{турб.}}[1 - (1/\pi_{\text{турб.}})^{(k-1)/k}] - T_{\text{комп.кір.}}/\eta_{\text{комп.}}[(\pi_{\text{комп.}})^{(k-1)/k} - 1]}{T_{\text{комп.кір.}} - T_{\text{комп.кір.}}\{1 + (1/\eta_{\text{комп.}})[(\pi_{\text{комп.}})^{(k-1)/k} - 1]\}}$$

Артынан жоғарыда ескерілген өрнекті $\dot{q}_{\text{кір.}}$ бөлу арқылы бірінші заң тиімділігі беріледі:

$$\eta_I = F' \left[\eta_{\text{коллектор}} - U_{\text{жоғалу}}(T_{\text{қабылдағыш}} - T_{\text{қорш.орта}}) \left(\frac{A_{\text{қабылдағыш}}}{A_{\text{коллектор}}} \right) / \dot{q}_{\text{кір.}} \right] * \eta_{\text{ген}} \\ * \frac{T_{\text{турб.кір.}}\eta_{\text{турб.}}[1 - (1/\pi_{\text{турб.}})^{(k-1)/k}] - T_{\text{комп.кір.}}/\eta_{\text{комп.}}[(\pi_{\text{комп.}})^{(k-1)/k} - 1]}{T_{\text{турб.кір.}} - T_{\text{комп.кір.}}\{1 + (1/\eta_{\text{комп.}})[(\pi_{\text{комп.}})^{(k-1)/k} - 1]\}}$$

9.3-мысалда есептеуде берілген сандық мәндерді және цикл ПӘК-ін алмастырсақ, $\eta_I=9,2\%$

12.3 ГЕОТЕРМАЛЬДІ КӨЗДЕР

Геотермальді энергия тау жыныстарында, сондай-ақ жер қабаты астындағы ұсталған бу немесе сұйық су түрінде жинақталады әрі ғимаратты жылыту үшін ыстық сумен тікелей қамтамасыз етуге пайдаланылады немесе қор температурасына байланысты жылу қозғалтқышы көмегімен электр энергиясына қайта түрлендіреді. Геотермальді энергия 2008 жылы энергияға деген әлемдік сұраныстың шамамен 0,1% ғана қамтамасыз етті, алайда 2050 жылға жасалған болжамдар бойынша энергияға қатысты әлемдік сұраныстың мөлшермен 3%, ал жылыту және суыту қажеттілігі сұранысының 5% қамтитын болады (Эденхофер және авторлар, 2011). Бұл тарау жылу қозғалтқышының жұмысы үшін геотермальді энергияны пайдаланумен шектелген, мұнда сұйық су немесе бу күйіндегі геотермальді энергия тікелей жұмыс сұйықтығы ретінде не жұмыс сұйықтығын жанама қыздыру үшін пайдаланылады. Мұндай электр станциялары жел мен күнге қарағанда негізгі жүктемені қамтамасыз ету үшін пайдаланыла алады, сонымен қатар жел мен күн энергиясын толықтыратын шарықтаулы қажеттіліктерді қанағаттандыру үшін пайдаланылады.

12.3.1 Геотермальді ресурс және алаңшаны таңдау

Геотермальді қорлар түрлі күйде қолжетімді, мысалы, өздігінен ыстық суды (минералданған қыртысты су) және/немесе буды (тереңдігі < 3 км) қамтамасыз ететін табиғи геотермальді жүйелер, литостатикалық қысымдағы ыстық кеуекті сұйықтыққа ие шөгінділермен толтырылған сұйыққоймалар түріндегі артық қысымды жүйелер, ол гидростатикалық қысымның жергілікті биіктігінен үлкен не өтімділігі төмен, не табиғи сұйықтықсыз құрғақ тау жынысы (3-10 км тереңдікте) болып табылады, олар шағын тереңдікте қолжетімді және ішінара немесе толықтай балқыған жынысты магма түріндегі сұрыптығы аса төмен жүйелер болады. Температурасы 5000°C асатын Жер өзегі энергия бөліп тұратын Th, U және K (планетаның құрылуынан қалған жылу болып табылмайды, себебі есептеулерге қарағанда жер баяғыда суыған) элементтерінің тұрақсыз изотоптарының баяулаған радиоактивті ыдырауы кезінде бөлінетін жылумен сақталып тұрады. Осы тұста **геотермальді энергияны** жаңғыртылады деп санауға болады, Эйнштейннің белгілі $E = mc^2$ теңдеуіне бағынған өте үлкен көлемде Е энергияны алу үшін

қажетті шағын мөлшердегі т салмақты айналдыру, мұндағы с өте үлкен мәндегі жарық жылдамдығы болып табылады. Жылу тасымалдау ыстық өзектен жоғарғы бетке қарай өткізгіштік пен конвекциялы тоқтар арқылы үздіксіз жүріп жатады, олар жер қыртысы астындағы балқытылған мантия және тектоникалық плиталар шекарасы бойында біршама күштірек болу үрдісіне ие. Жанартаулық белсенділік үлкен көлемдегі материалдарды Жер бетіне қарай тасымалдайды, бірақ балқытылған жыныстың тек шағын бөлігі ғана беткі қабатқа жетеді, көп бөлігі 5-20 шақырым тереңдікте қалып қояды. Жер асты суларының гидрологиялық конвекциясы бұл энергияны жоғарғы бетке жақындатуы мүмкін. Ыстық көздер (сұйық күйдегі су), гейзерлер (сұйықтық пен будың қоспасы) және фумаролдар (бу) гидрологиялық конвекцияға негізделген. Жер асты сулары жауын-шашын суларымен толықтырылады, бірақ геотермальді қор аяққы қарқындылықпен және осылайша табиғи геотермальдік жүйеден алынған кезде толықтыру мен қалпына келтіру арасында тұрақты жағдай сақталатын қарқындылықпен пайдаланылуы тиіс.

Ыстық құрғақ жыныстардан алынатын жылу энергиясы 3 шақырымға дейінгі тереңдік үшін 34×10^6 ЭДж түрленеді, 5 шақырымға дейінгі тереңдік үшін 56-дан 140×10^6 ЭДж дейін, ал 10 шақырым төмен тереңдік үшін 110-нан 403×10^6 ЭДж дейін түрленеді; электр энергиясын өндіру үшін гидротермальді қор 118-ден 146 ЭДж/жыл (3 км тереңдік) болып бағаланады.

12.5-КЕСТЕ. Электр энергиясын өндіруге арналған түрлі тереңдіктегі геотермальді энергияның жаһандық әлеуеті (Эденхофер және авт., 2011)

Аймақ	3 км		5 км		10 км	
	ЭДж/жыл (төмен)	ЭДж/жыл (жоғ.)	ЭДж/жыл (төмен)	ЭДж/жыл (жоғ.)	ЭДж/жыл (төмен)	ЭДж/жыл (жоғ.)
Солтүстік Америка ЭСДҰ	25,6	31,8	38	91,9	69,3	241,9
Латын Америкасы	15,5	19,3	23	55,7	42	146,5
Еуропа ЭСДҰ	6	7,5	8,9	21,6	16,3	56,8
Африка	16,8	20,8	24,8	60	45,3	158
Өтпелі елдер	19,5	24,3	29	70	52,8	184,4
Орталық Азия	3,7	4,6	5,5	13,4	10,1	35,2
Дамушы Азия	22,9	28,5	34,2	82,4	62,1	216,9
Тынық мұхит аймағы елдері ЭСДҰ	7,3	9,1	10,8	26,2	19,7	68,9
Барлығы	117,5	145,9	174,3	421	317,5	1108,6

318-ден 1109 ЭДж/жыл дейін (10 км тереңдікте) және тікелей пайдалану үшін (жылу ретінде) 10-нан 312-ге дейін ЭДж/жыл диапазонында түрленеді деп болжануда (Эденхофер және авт., 2011). 12.5-кестеде геотермальді энергияның әлемдік масштабтағы төменгі және жоғарғы бағалануының қысқаша сипаттамасы берілген, ол біршама үлкен болып табылады. Белсенді геотермальді қорлардың үлкен бөлігі негізгі плиталар шекарасы бойында орналасқан және Жапония шекарасымен Тынық мұхитының бойымен, Филиппин, Алеут жерлері мен «Тынық мұхитындағы Отты сақина» ретінде белгілі Орталық және Оңтүстік Америкада шоғырланған.

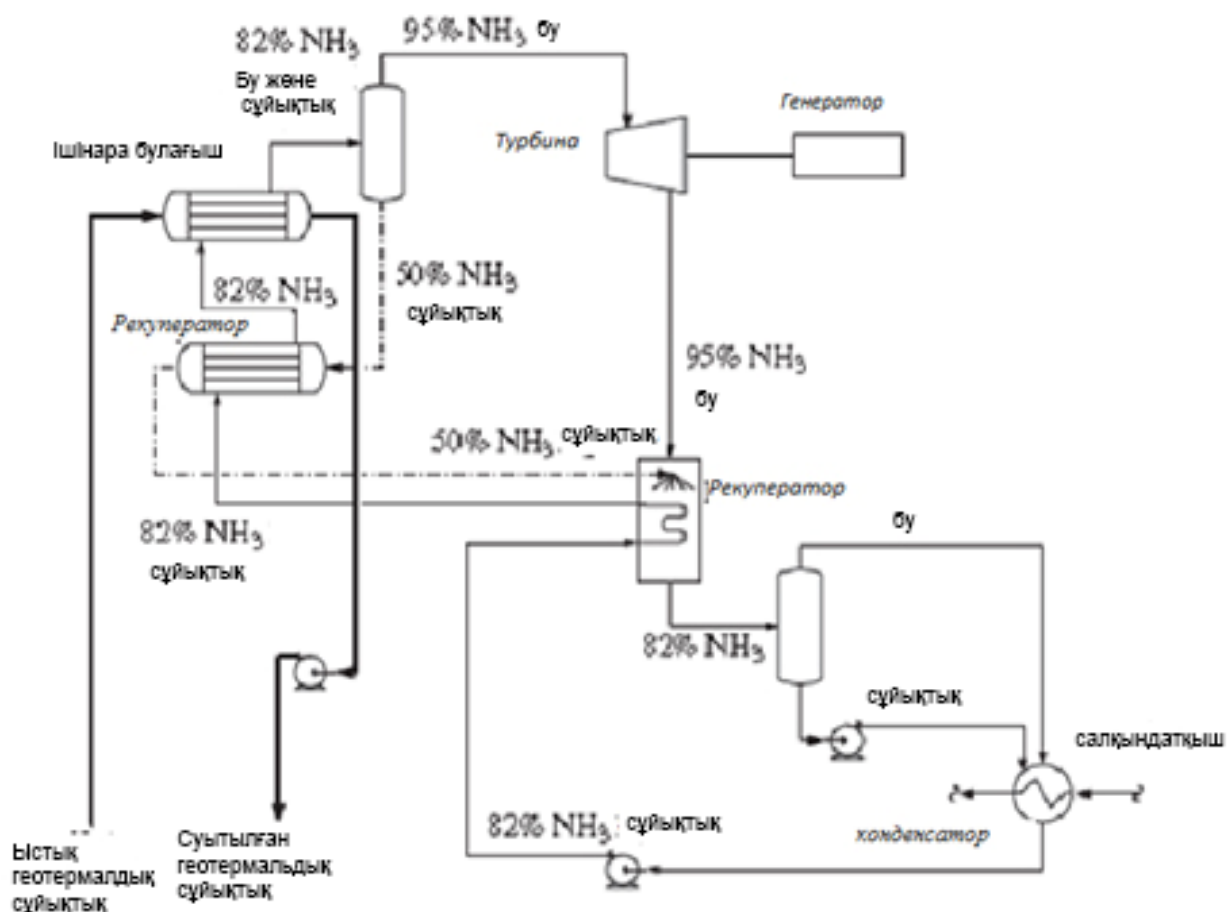
12.3.2 Негізгі құралдар

Қазіргі кезде геотермальді энергия негізінде мұнай-газ өндірісінде қолданылатын бұрғылау әдістерін пайдалана отырып, 5 шақырымға дейінгі тереңдікте бұрғыланған ұңғымаларды пайдаланып өндіріледі. Гидротермальді сұйық қоймалардан электр энергиясын өндіру жүз жыл бойы жоғарғы өтімділікпен қолданылады және жоғарғы бетке шығарылатын табиғи ыстық сұйықтықтан жылу энергиясы қайтара шығарылады. Жетілдірілген немесе техникалық геотермальді жүйелер әзірлену сатысында, геотермальді энергияны жоғарғы температуралы жыныстық аймақтар арқылы қалпына келтіру үшін өндірістік ұңғыманы (ыстық сұйықтық жіберу) және қысымды ұңғыманы (жылу

қайтарылғаннан кейінгі жылу қайтарымы) біріктіретін сұйықтық ағымының желісін құру үшін шектелген пішіндегі сұйықтықты (су, сондай-ақ CO_2) қарастырылады) жасанды жолмен сорғылаудан тұрады. Табиғи сұйық қоймадан шығарылып алынған ыстық сұйықтық бу күйінде тұрғанда («құрғақ буды орнату», әдетте 4-8 МПа және 180-225°C кезінде) ол энергия өндіру үшін конденсатты бу турбинасына жіберіледі, бұл ретте конденсаторда конденсациялаудан кейін жүктеу қайта жерге жіберіледі. Температураның орташа және үлкен қорларында орнатылған бұл қондырғылар 20 және 110 МВт аралығындағы қуатқа жиі ие болады. Ыстық сұйықтық ыстық су немесе су мен бу қоспасы күйінде тұрғанда бу қысымы мен ағым жылдамдығының оңтайлы комбинациясын жасау үшін бір реттік булану не екі реттік булану пайдаланылады. Будың түзілуі сұйықтық қысымы тез төмендейтін беткі қабатта орналасқан сауыттарға флюидтер қоспасының енуінен тұрады, сондықтан да сұйық судың бір бөлігі тым жылдам бу сатысына ауысады (су «буланады»). Бу судан сол ыдыста бөлініп шығады (барабан КО), ал бу бу турбинасында қолданылады. Мұндай қондырғылар құрылысының үлестік құны (АҚШ долл./кВт) құрғақ бу қондырғыларына қарағанда жоғары, себебі минералданған жыныстық судың булануымен байланысты, сондай-ақ қордың тым төмен температурасынан қосымша жабдықтар талап етіледі. Булану сұйық қоймасынан шығатын конденсатталған бу сумен бірге қайтадан жерге айдалады. Қосымша бу өндіру үшін, бірақ төмен қысымда екінші булану ыдысына енетін сұйықтық жоғарғы қысымды булану ыдысынан ығысып шыққанда екі реттік булануы бар жүйеде екінші булану біріншіге қарағанда біршама төмен қысымда жүреді. Бұл төмен қысымды бу да бу турбинасына енеді, бірақ ол біршама төмен қысымның сәйкес сатысында болады. Қор температурасына байланысты екі реттік булану жүйесі зауыт құрылысы құнын шамамен 5% арттыру үшін шығу қуатын 20-25% арттыра алады. Басқа нұсқа Ренкиннің екі жүйелі цикл әрекетін пайдаланумен жасалады, оның біріншісі буды жұмыс сұйықтығы ретінде, ал екіншісі органикалық сұйықтықты жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланады. Осындай циклда қолданылатын бу турбинасы пайдаланылған газ қысымына ие болады, бұл атмосфералыққа (әдеттегі вакуум орнына) қарағанда біршама жоғары, осылайша, жылу энергиясын Ренкиннің утилизациялық органикалық цикл (ORC) сұйықтығын қамтамасыз етуге экономикалық тұрғыда жарамды болу үшін оның разряды жеткілікті температура кезінде конденсатталады. Осы біріктірілген циклдан жылуды түпкілікті бұру органикалық булар турбинасынан ағым бағыты бойынша төменгі органикалық булар конденсаторынан пайда болады. 12.3-суретте осындай біріктірілген цикл көрсетілген.

Ренкин циклындағы жұмыс сұйықтығы ретіндегі бу қауіпсіздік тұрғысынан (тұтанбайды, уытты емес) және жоғарғы температуралар кезінде жылулық тұрақтылығы жағынан қолайлы жұмыс сұйықтығы болып табылады. Дегенмен турбиналық конструкция және изэнтропикалы тиімділігі көзқарасынан (мысалы, талап етілетін сатылар саны) алғанда төменгі молекулярлық салмаққа қатысты (ORC сұйықтықтарына қарағанда) кемшілік бар, бұл шағын көлемді турбиналар үшін мәселеге айналып отыр. Сондай-ақ будың біршама төмен қысымынан конденсатордағы вакуум жағдайы жылудың бұруын қалыпты температура кезінде ұстап тұрады (қолданылатын жылуды бұру режиміне байланысты салқындататын сумен немесе қоршаған ауамен орнатылады). Жабдықтар мен құбыр желісі үшін құрылымдық материалдарды мұқият таңдау талап етіледі, өйткені геотермальді сұйықтықтар құрамында оттегі (әдеттегідей азрациядан), сутегі иондары (рН-ге ықпал жасайды), хлоридты иондар, сульфидты қосындылар, CO_2 , карбонатты және бикарбонатты иондар, NH_3 пен амоний түрлері және сульфат-иондар бар. Қақтың пайда болуы ескерерлік тағы бір фактордың бірі болып табылады, өйткені геотермальді сұйықтықтар құрамында CaCO_3 және силикат $\text{Ca}(\text{Ca}_2\text{SiO}_4)$ жиі кездеседі. Силикатты металл (Zn, Fe, Pb, Mg, Sb және Cd) мен сульфидті шөгінділер біршама жоғарғы температуралық қорларда, сондай-ақ басқа катиондармен байланыспаған кремнийдің аморфты қостотығы шөгінділерінде жиі байқалады. Температура ерітілуге ықпал ететіндіктен, минералданған қыртыстық судың қыртысқа оралу температурасы, сәйкесінше алынатын жылу энергиясының көлемі шектелуі мүмкін. Шөгінділерді бақылау үшін қоспалар жиі қолданылады.

Бұл ластағыштарға қоса бу турбиналары қаныққан немесе аздап артық қыздырылған төменгі қысымды будан тұратын будың геотермальді жағдайына шыдауы керек. Төменгі қысымды турбиналар сатысы үшін су тамшысынан пайда болатын



12.4-СУРЕТ. Геотермальді электростанциядағы Калина циклы, Хусавик, Исландия

Артынша буландырғышқа түседі де, онда ол жыныстық сұйықтықпен 121°C дейін қыздырылады, сөйтіп $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ -ның 75%-ы буланып кетеді. Осы екі фазалы сұйықтық кейіннен булы-сұйықтықты сепараторға түседі, NH_3 -пен қаныққан H_2O -ның бу фракциясы турбинаға келіп түседі, ал салмағы бойынша 50% NH_3 -ті құрайтын сұйықтық фракциясы алдын ала қыздыруға арналған жылу қамтамасыз етілген соң NH_3 -тің 82%-ын құрайды. Жоғарғы температуралы рекуператордағы ағын төменгі температуралы ағынға түседі, онда ол турбинаның қайтарылған газдарымен бірігеді. Төменгі температуралы рекуператорда шыққан сұйықтық жиналады және оны тозаңдандыру ретінде сумен салқындатылатын конденсаторға айдайды. Байытылған NH_3 буын азайған NH_3 сұйықтығына сіңіру конденсаторда жүреді, ал ерітінді жылуы суыту суы арқылы бөлініп шығарылады.

Осылайша, мұндай сіңіру циклының негізгі идеясы мынадан тұрады:

1. Жоғары қысымды буға ие жұмыс сұйықтығын пайдалану (қайнаудың төменгі температурасы), мысалы, төменгі температуралы жылу көзін пайдалану арқылы өндірілетін NH_3 .
2. Өте жоғарғы қысым кезінде (Ренкин циклында жасалатындай) буды өндіру алдында өте жоғарғы қысымға дейін конденсатты айдау үшін турбинадағы кеңейтуден кейінгі бу конденсациясының орнына келесі тәсілде абсорбент пайдаланылады, ол да төменгі температурада (қоршаған ортаға қарағанда төмен) жылу бұрғышты қажет етуші еді.
3. Осы жағдайда сұйық H_2O түріндегі абсорбент кейіннен сұйықтықты (NH_3 -тің судағы ерітіндісін) біршама жоғарғы қысымға дейін айдаумен абсорбациялану үшін NH_3 -пен біріктіреді.
4. Кейіннен қысымы өте жоғары су ерітіндісінен бу қысымы өте жоғары жұмыс сұйықтығы – NH_3 түзіледі (циклды аяқтайтын жоғарыда көрсетілген 1-саты).

NH_3 уытты зат болып табылады, сондықтан оның ағып кетуіне, әсіресе турбиналардағы будың (біліктің айналасындағы нығыздық) шығуына жол бермеу керек.

12.3.3 Экономика мәселелері

Басқа жаңғыртылған энергия көздері сияқты геотермальді электр станциялар әдетте жоғарғы бастапқы инвестициялық шығындарды қажет етеді, ал өз кезегінде пайдалану шығындары төмен. Геотермальді қондырғылар электр станциясына қажетті жабдықтарды сатып алу және орнату шығындарына қоса жалпы бағаның 10-15% құрайтын барлау және қорды растаумен, сондай-ақ жалпы бағаның 20-35% құрайтын ұңғыманы бұрғылаумен байланысты шығындар бар (Эденхофер және авт., 2011). Нәтижесінде электр энергиясының құны нақты аймақ үшін өзіндік қыр-сыры бар және геотермальді қордың сапасы мен көлеміне тәуелді, бірақ геотермальді электр энергиясын пайдаланатын электр станциялары дәстүрлі электр станцияларымен жиі бәсекеге түседі. Қазіргі кезде демонстрациялық сатыдағы инженерлік геотермальді қондырғыларды пайдаланатын қондырғылардың бағасы гидротермальді қондырғыларға қарағанда жоғары.

Энергия құнына ықпал ететін қуат коэффициенті де 2008 жылы әлем бойынша қолданыстағы геотермальді электр станциялары үшін 74,5% деңгейінде болды, бірақ біршама жаңа қондырғыларда сұйық қойма коэффициенттері біршама жоғары болды, яғни 90% артық (Эденхофер және авт., 2011). Геотермальді қондырғыларды ынталандыру, жетілдірілген құрылыс материалдарын қолдану, сондай-ақ шөгінділер мен коррозияны баяулату қуат коэффициентін арттырады әрі электр энергиясының бағасын төмендетеді. Жел мен күн энергиясына қарағанда қуат коэффициенті біршама жоғары геотермальді электр станциялары негізгі жүктеме кезіндегі электр энергиясымен қамтамасыз етеді, осылайша, жаңа геотермальді қуаттың қолданыстағы электр жүйесімен бірлесуі ешбір қиындықсыз жүзеге асуы мүмкін.

Шығындарды төмендетуге бағытталған зерттеу және әзірлеу саласына, геологиялық барлау жұмыстарының тиімділігін арттыруға, қатты жыныстарды бұрғылау кезіндегі ену жылдамдығын арттыру үшін бұрғылау технологиясы мен ұңғыма құрылысын жетілдіруге, сонымен қатар CO_2 -ні жылу тасымалдағыш ретінде және, бәлкім, инженерлік геотермальді қондырғылар жұмыс циклының жұмыс сұйықтығы ретінде пайдалануға (бұл да қыртысқа айдалатын CO_2 фракциясын минералдау жолымен CO_2 ұстап қалатын құралдарды қамтамасыз етуі мүмкін) арналған алдыңғы қатарлы геофизикалық зерттеулер жатады.

12.3.4 Қоршаған ортаны қорғау жөніндегі мәселелер

Геотермальді энергияны пайдаланумен байланысты қоршаған ортаны қорғау жөніндегі мәселелердің нақты жергілікті жер және технологиялар үшін өз ерекшеліктері бар. Мысалы, геотермальді қондырғыларды пайдаланумен тікелей байланысты CO_2 шығарылымы орын алуы мүмкін, себебі геотермальді сұйықтық та CO_2 -ге ие бола алады. Тағы бір мәселе жерді пайдалану болып табылады, бұл өсімдіктер мен топырақ эрозиясы шығынына әкеліп, ал бұл өз кезегінде көшкінге соқтыруы мүмкін. Сонымен қатар H_2S , NH_3 пен Hg шығарылулары болуы мүмкін, сөйтіп қондырғы осы ластағыштарды ұстап қалатындай түрде жобалануы тиіс. Сейсмикалық кейбір жерлердің сілкінулерге әкелетін проблемаларына айналды. Күннің жылу электр станциялары сияқты ылғалды градирияларды пайдалану кезінде суды қолданудың да өзіндік ерекшеліктері бар. Кез келген нысанмен өндірілетін қондырғы қалдықтары тиісті тәртіппен сақталуы тиіс, бірақ геотермальді қондырғылар жағдайында жиналған қалдықтарды дұрыс сақтау алыс қашықтыққа тасымалдауды қажет етеді.

12.3-мысал. 250°C геотермальді сұйықтықтың ағатын жылдамдығы 40 г/с және жерге қайтарылатын 150°C кезінде геотермальді сұйықтық қанша мөлшерде электр энергиясын өндіреді? Суытылатын су 150°C күйінде беріледі және градирияға 10°C температурадан тым жоғары күйде оралады. Геотермальді сұйықтықтың жылу

сыйымдылығы таза судың жылуына тең деп ұйғарайық (4,184 кДж/кг К). Жоғарыда есептелген ең жоғарғы қуатты жүзеге асыруын шектейтін қондырғының тиімсіздігін атаңыз.

Шешім

Карноның мінсіз циклына сәйкес келеді, ең жоғарғы шығарылым қуаттылығына ең жақсы тиімділікпен қол жеткізіледі, қорек көзі және ағын температурасы тұрақсыз болған жағдай үшін бұл 8.3-теңдеуімен анықталған.

Берілетін геотермальді сұйықтықтың абсолютты температурасы = $250 + 273 = 523$ К

Қайта оралатын геотермальді сұйықтықтың абсолютты температурасы = $150 + 273 = 423$ К

Жылу көзінің логарифмдік орташа температурасы

$$(\Delta T_H)_{\ln} = (523 - 423) / [\ln(523/423)] = 471 \text{ К}$$

Берілетін суыту суының абсолютті температурасы = $15 + 273 = 288$ К

Қайтарылатын суыту суының абсолютті температурасы = $15 + 10 + 273 = 298$ К

Жылуды әкетудің орташа температурасы

$$(\Delta T_C)_{\ln} = (298 - 288) / [\ln(298/288)] = 293 \text{ К}$$

Карно циклындағы ПӘК

$$= 1 - (\Delta T_C)_{\ln} / (\Delta T_H)_{\ln} = 1 - 293/471 = 0.378$$

Ең жоғарғы шығарылым қуаттылығы = $0,378 \times 40 \text{ кг/с} \times 4,184 \text{ кДж/кг К} \times (523 - 423) \text{ К} \times 10^{-3} \text{ МВт (кДж/с)} = 6,33 \text{ МВт}$

Жоғарыда есептелген ең жоғарғы қуатты жүзеге асыруды шектейтін қондырғының тиімсіздігі мыналарға негізделген:

- ΔT жылу алмастырғыштардағы жылу көзі және жылу тасымалдағыш арасында (геотермальді сұйықтық немесе суытатын су).
- Жылу қозғалтқышы/генераторының изэнтропикалық және механикалық тиімсіздігі.
- Сорғылардың изэнтропикалық және механикалық тиімсіздігі.
- Басқа да ілеспе энергияның тұтынуы мен шығындары, мысалы, желдеткіш, градирианның механикалық жетегі қолданылғанда трансформатор істен шығады.

12.4 ЯДРОЛЫҚ ЭНЕРГИЯ КӨЗДЕРІ

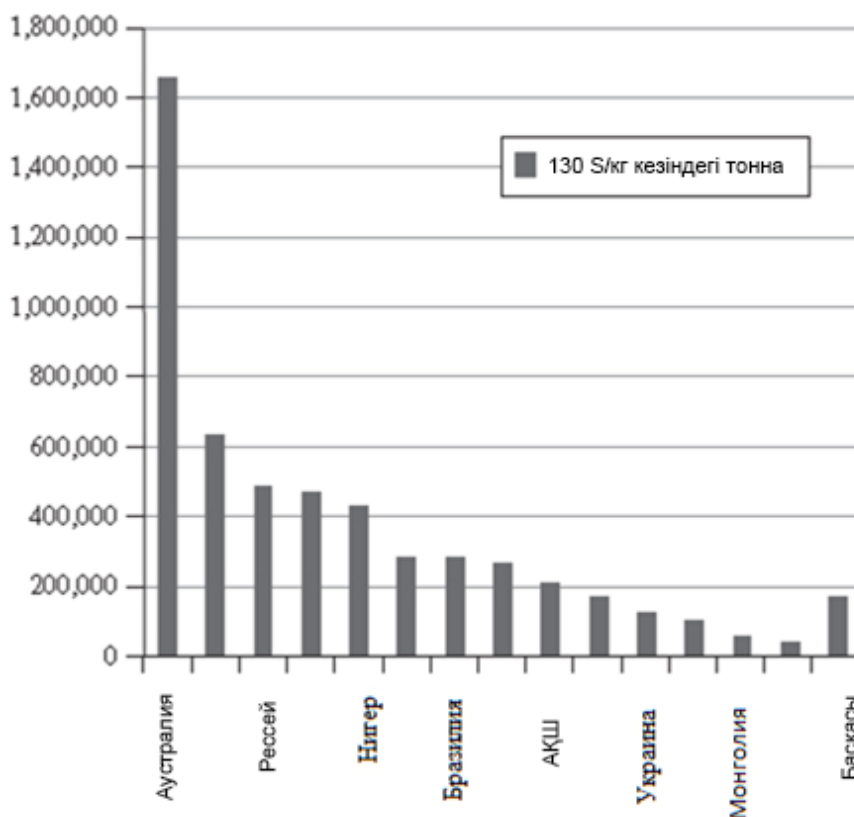
Ядролық бөліну реакциясы негізіндегі энергиядан алынатын электр энергиясы бірнеше жыл бойы коммерциялық тұрғыда қолданылуда. Бұл бөліну реакциясы былайша жүреді, уран (U), плутоний (Pu) және торий (Th) сияқты элементтердің кейбір изотоптарының ядросы нейтронды басып алады. U-233 (мұндағы 233 ядроғағы нейтрондар мен протондардың санын көрсетеді), U-235, Pu-239 және Pu-241 барлығы да бөлінеді, бұл ретте U-238, Th-232 жылдам (кинетикалық энергиядан біршама жоғары) нейтрондарды талап етеді. Басып алынған нейтрондар нейтрондар мен протондар арасындағы ішкі тепе-теңдікті бұзады, нәтижесінде ядро біршама жеңіл екі ядроға ыдырайды. Екі немесе үш нейтрон да сәулеленеді, бұл ретте $E=mc^2$ Эйнштейн теңдеуіне сәйкес үлкен көлемдегі энергия бөлініп шығады, бұл туралы алдағы геотермальді тарауда айтылған болатын. Ядролық реакцияда өндірілетін нейтрондардың артығы тізбекті реакцияға түседі, ал онда қосымша ядролар бөлшектенеді, бұл өз-өзін сақтап жұмыс істейтін ядролық реакторлардың жасалуына мүмкіндік тудырады. Тұрақты бөліну деңгейіне әкелетін бір бөліну орташа алғанда қосымша бір бөліну тудырғанда ядролық реактор шарықтау шегіне жетеді деп айтылуда. Нейтрондарды жұта алатын басқарушы өзекшелер ядролық бөлінудің тізбекті реакциясын реттеу үшін ядролық реакторға орнатылады. Ядролық қаруда, бір жағынан, бөліну реакциясының бөлінуі артады (экспоненциалды) әрі бұл жағдай шарықтау шегі деп аталады. Ядролардың бөлінуі

үрдісінде өндірілетін жылу Ренкиннің бу циклы жұмысына арналған жұмыс сұйықтығына айналады. Отыздан астам елде 400-ден аса ядролық реактор жұмыс істейді, олар электр энергиясының әлемдік тұтынуының шамамен 15% өндіреді. Көптеген жаңа атом электр станцияларын негізінен Азияда салынып не жоспарланып отыр.

Ядролық реакцияның басқа түрі синтез болып табылады, бұл да жоғарыда аталып өткен Эйнштейннің теңдеуіне сәйкес үлкен көлемде энергия бөліп шығарады, мұнда Fe-ден төмен біріктірілген массалы екі ядро тұтасады. Сутегінің екі изотопы: дейтерий (H-2) және тритий (H-3) нейтрон бөлініп шыққан кезде He түзіліп синтезге ұшырайды. H-2 судан айырылып алынуы мүмкін, бұл салмақтың орташа мөлшерін түрленген кездегі энергияның үлкен көлемі қарастырылғанда оны сарқылмайтын отын қорына айналдырады. H-3 ядролық реактор ішінде Li-ден өндіріледі, бірақ жер қыртысында Li-дің белгілі ауқымды қоры бар, тіпті егер барлық әлемдік электр жүйесі термоядролық реакторлармен қанағаттандырылатын болса да олар мың жыл бойы қажетті отынмен қамтамасыз ете алады. Алайда ядролық синтез әлі де зерттеу сатысында тұр, ол үшін қажетті аса жоғары температуралар кезінде плазманы тежеу негізгі мәселе болып табылады. Бөлінумен салыстырғанда бірқатар артықшылығы бар үлкен көлемде энергия өндіру әлеуеті бар, атап айтқанда белсенділігі ұзақ радиоактивті материалдардың және басқарылмайтын реакциялардың жоқтығы.

12.4.1 Ядролық отын көздері және алаңшаны таңдау

Қазіргі нарықтық баға бойынша (зерттелген дәлелді қорлар немесе RAR), экономикалық тұрғыда қалпына келтірілуі мүмкін дәлелденген әлемдік ядролық отын қоры 12.5-суретте көрсетілген (Уран 2011: қорлар, өндіріс және сұраным, 2012) және 80 жылдық сұраныс қажеттілігін қамтамасыз ету үшін жеткілікті қордың барын көрсетеді. Алдағы барлау және нарықтағы бағаның артуы қосымша қорларды игеруге жол ашуы тиіс.



12.5-СУРЕТ. Уранның жүйелі негізделген қорлары (RAR)

Оксидтер ретінде құрамында U-235 және де U-238 бар кенді игеру ураннан отын жанарғысын өндіру үрдісінің бірінші қадамы болып табылады. Кен ұнтақталады, кейіннен оксидтерді салмағы бойынша шамамен 0,1%-дан 80%-ға дейін шоғырландыру үшін H_2SO_4

немесе кейде күшті сілтілі ерітінді көмегімен сілтіден арылтылады. Алынған концентрат құрғақ «сары сүзінді» түрінде одан ары өндеуге жіберіледі. Қуаттылығы 1000МВт, 1 жыл бойы жұмыс істейтін АЭС үшін шамамен 200 тонна қажет. Құрамында белсенділігі ұзақ мерзімді радиоактивті материалдардың төменгі шоғырлануына ие қалдықтар, кеннің басқа да бөліктері, сондай-ақ ауыр металдар қоршаған ортадан оқшаулануы керек, олар шахта маңындағы нысандарда орналастырылуы тиіс.

Дәл U-235 кәдімгі ядролық реакторларда уранның бөлшектенетін изотопы болып табылады және байыту үрдісі U-235 шоғырлануын, екі изотоптың молекулярлық таразыдағы айырмашылығынан туындаған тығыздық айырмашылығын қолданумен HF реакциясы әрі газды центрифугалау уран оксидін фторидке алдын ала түрлендіру жолымен шамамен 0,7%-дан 3,5-5% дейін арттыру үшін пайдаланылады. Реакторлардың аздаған саны, айталық канадалық пен үнділік жаңартылған және ауыр суда (дейтерий оксиді) суытылатын реакторлар байытылған уранды қажет етпейді.

Керамикалық отын таблеткалары пішіндес реакторлық отын 1400°C жоғары температура кезіндегі престелген уран диоксидінің бірігуі арқылы пайда болады, ал кейіннен цирконий қоспасынан жасалған түтікке орнатылып, отын өзектері жасалады. Бұл цирконды қоспа жоғары температураға, ядролық сәулеленуге және коррозияға төзімді. Жыл сайын өзектердің шамамен үштен бірі бір жарым жылға ауыстырылады, бұл реактордың тиімді жұмысын бірқалыпты ұстауға қажет. U-238 бір бөлігі Pu-ға айналады, ол өз кезегінде (шамамен жартысы) дәл солай бөлінуге ұшырайды.

12.4.2 Басты жабдықтар

Коммерциялық ядролық реакторлардың екі түрі – бұл сулы ядролық реактор (PWR) және қайнаған сумен жұмыс істейтін ядролық реактор (BWR), бұлар жылудың реактордың белсенді аймағында жұмыс ағынына берлумен негізделген. PWR жылу, алдымен, алғашқы пішім арқылы қайнаудың (~ 140 бар) алдын алу үшін ауыр суға қарай жеткізіледі. Ауыр судың өзі қосымша ретінде реактордың жылу тасымалдағышы болып табылғандықтан, нейтронды баяулатып, баяулатқыш ретінде әрекет етеді, олар U-235 ядролық тізбекті реакцияны қолдай алады. Кейіннен ауыр судан шыққан жылу Ренкин циклына қажетті бу өндіру (~70 бар) үшін Ренкин циклының жұмыс сұйықтығына жылу алмастырғышқа жеткізіледі. BWR-да бу реактордың өзінде екі бөлек сұлбасыз өндіріледі. Жоғары жиіліктегі су жылуды жұтып әрі сатысын өзгертіп, жүрекше арқылы жоғары көтеріледі де, су мен будың қоспасы жүрекшенің жоғарғы бөлігінен шығады және ылғалды бөлудің екі сатысына енеді, мұнда су тамшылары бу құбырына кірер алдында жойылады. Осылайша алынған қаныққан бу бу турбинасына енгізіледі.

Мұндай ядролық реактордың негізгі бөліктері: отын жиынтығы тұратын ядро, сондай-ақ жылу тасымалдағыш айналасындағы тізбекті ядролық реакцияны басқаруға арналған басқарушы өзектер (Cd, Hf немесе В-дан дайындалған) – реактордың белсенді аймағы мен тежегіш/жылу тасымалдағышты қамтитын қысым астындағы берік болат ыдыс, ал PWR жағдайында – түзелетін немесе суыту жүйесінің бір бөлігі ретіндегі бу. PWR төрт сұлбаға дейін ие бола алады, әрбіреуінің өз бу генераторы бар. Реактор және бу генераторлары ішінде кез келген елеулі іркіліс болған жағдайда сыртқа шығуға мүмкіндік бермейтін радиоактивті материалдарды сақтау үшін салынған қалыңдығы бір метр болатын темірбетонды қорғаныс конструкциясында орналастырылады, сондай-ақ кез келген тысқары басып алудан реактор жүйесін қорғайды. Реактор корпусы жұмысшыларды радиациядан қорғау үшін ішкі және сыртқы беттері болатпен құрсаулы қалыңдығы бір метр темірбетонді қабырғадан тұратын биоқорғанысты экранмен қоршалуы мүмкін.

PWR артықшылығы – ол бос қуыстықтың күшті теріс коэффициентіне ие, яғни егер ауыр су қайнай бастаса (бу көпіршіктері қуыстық тудырады), реактор суытылады және де су бәсеңдеткішке айналады. Оның тағы бір артықшылығы – ол Ренкин циклының жұмыс сұйықтығынан бөлек (ауыр судан тұратын) ішкі сұлбаға ие, бұл кез келген радиоактивті материалдардың бу турбинасына түсуіне кедергі болады, ал бұл өз кезегінде техникалық қызмет көрсетуді жеңілдетеді. Жоғарғы қысым астындағы суытқыш сұйықтықтың резервті суыту жүйесін қажет ететін құбырдың жарылуы жағдайында тез арада ағып кету мүмкіндігі кемшілік болып табылады. BWR артықшылығы – оңай өзгеруі мүмкін қуаттылық құны мен

деңгейін төмендететін біршама қарапайым құбыр. Қуаттылық деңгейінің өзгеруіне су берілуінің өзгеруі арқылы қол жеткізуге болады, бұл бу көпіршіктері туындататын бос қуыстықтың өзгеруіне, нәтижесінде бәсеңдеуіне әкеп соқтырады.

Бу турбинасына түсетін қаныққан булы атом электр станциялары турбинаның жоғары қысым секциясынан шығуында 15% дейін ылғал үлесіне ие болуы мүмкін. Будағы ылғалдың артық құрамы турбинаның төмен қысымды секциясын коррозия мен эрозияға ұшыратуы мүмкін, төменгі қысымды ылғалды бу турбинаның жоғарғы қысымды секциясынан шыққан кезде ылғал сепараторы арқылы өтеді (мысалы, ылғал тамшылары соғылатын және одан бөлініп шығатын қалақшаларды қолданып) де жылу алмастырғышта жоғарғы қысымды бу бөлігіне қарсы алдын ала қыздырылады.

12.4.3 Экономикалық мәселелер

Ядролық отын бағасы әлемдік масштабта отынның үлкен қорларымен салыстырғанда біршама төмен болып саналады. Соған қарамастан реттеудің іркіліп қалуы, сондай-ақ станцияның қолданыстан шығарылу себебінен станция құрылысы мерзімі біршама ұзақ болғандықтан, қаржылай шығын көп болады. Мұндай факторларға қарамастан атом станцияларында өндірілетін электр энергиясы, әрине, белсенділік деңгейі жоғары түзілген радиоактивті қалдықтарды (осы тарауда «Қоршаған ортаны қорғау мәселелері» тарауында одан ары талқыланады) үнемі ұзақ мерзімді сақтау шығындарын және сирек болса да кездесетін басқа кез келген апаттарды, әсіресе электр станцияларындағы апаттарды, ескермегенде ең арзан қуат түрлерінің бірі болу үрдісіне ие. Қазіргі кездегі конструкциялар негізгі жүктемесі бар ірі көлемді электр энергиясын өндіруге арналған және энергияның үзілмелі көздерін толықтырмайды.

Бүгінгі күнгі BWR-мен салыстырғанда тиімділігін үштен бір есе арттыруға болатын су деңгейінің шарықтау шегіндегі реактор сияқты реакторлардың жетілдірілген конструкциялары дайындалуда. Егер жабдықтар мен құрылымдық материалдары тым сирек кездесетін болмаса, электростанцияның тиімділігін арттыру әдетте \$/кВт есептегенде оның күрделі қаржы шығынын төмендетеді. Халықаралық күштер Жапония басшылығымен жүйені жобалаудағы ең өзекті материалдар мен мәселелерді шешуге ұмтылуда. Суық агент ретінде He, сондай-ақ аралық суытуға ие Брайтонның рекруперативті циклындағы жұмыс сұйықтығы ретінде пайдаланылатын газбен суытылатын жоғарғы температуралы реактор жетілдірілген конструкцияның бірі болып табылады. Оның басты артықшылығы теріс реактивтілік температурасының коэффициентіне (яғни температура артқанда реакция бәсеңдейді) ие екендігінде, оның негізінен біршама қауіпсізінде. Отынды пиролизтік графиттен (бәсеңдеткіш ретінде) әзірленген көлемі теннис шарындай сфералық қалыптарда дайындайды, мысалы, бөліну өнімінің құрылымдық тұтастығын және ұстап қалуын қамтамасыз ету үшін U-235 арнайы SiC қабатымен көмкерілген. Артықшылығы қондырғының жоғары тиімділігі және қауіпсіздік тұрғысынан реактор графиттік бәсеңдеткіштің арқасында үлкен жылу инерциясына ие әрі сатылы ауысы жүрмейді, бұл қысымның артуын тудыруы мүмкін, себебі суық агент газ болып қалады. Оның нейтрондарды жұту қимасы жоқ (құлап бара жатқан нейтрон мен ядро-нысананың өзара әрекеттесу ықтималдық өлшемі) және реактивтілік әсерінсіз инертті болып қалады. He пайдаланудың өзге де артықшылығы: газ турбинасының үлестік қуаты (кВт/кг/с) қысымның төменгі қатынасында өте жоғары, себебі He екі атомды (N_2O_2) немесе үш атомды (CO_2) газдармен салыстырғанда He Cr-ның Cv-ға (9.3-мысалды қара) қатынасы жоғары мәнге ие.

Өндіруші реактор тұтынуына қарағанда бөлінетін материалдарды көбірек шығарады. U-238 және Th-232 сияқты құнарлы материалдардан бөлінетін материалдар (кәдімгі бөліну реакторларына арналған отын ретінде) өсіріп, ол ядролық отын көлемін арттыруға уәде береді. Реактор өте жоғарғы температурада жұмыс істейді әрі реактордың жұмыс қысымын шектеу үшін төмен қысымға ие булары бар сұйық металды Na лайықты жылу тасымалдағыш болып табылады.

12.4.4 Қоршаған ортаны қорғау мәселелері

Заманауи реакторлар белсенді аймағын орналастыру арқылы үлкен ұшақтардың соқыларына, нақтылап айтсақ негізгі аймақ деңгейінен төменірек төтеп беретіндей болып жобаланған және темірбетонды қорғаныс қабатының қалыңдығы 3 метрден артық болып жобаланған. Реактор ғимараты қабырғаларының қалыңдығы орта есеппен 2 метрге жуықтайды. Басқару кабинеттері де жер деңгейінен төмен орналасқан, реактордың апаттық суыту жүйесіне гравитациялық суыту орнатылған, сондықтан апатты жағдайда электр энергиясынан немесе отыннан айырылып қалатын қозғалтқыштан шығатын жетегі бар қозғалтқыштар мен сорғыларға тәуелді емес.

Ядролық энергия, 12.1-кестеде көрсетілгендей (Эденхофер және бірлескен авторлар, 2011), қазба отынымен жұмыс істейтін электр станцияларына қарағанда жылыжайлық газдарды азырақ шығарады, LCA негізіндегі CO_2 ұстап қалуды және жұтуды қажет етпейді. Рұқсат етілген құрамы белгіленген ауадағы ластағыш заттар жұмыс кезінде шығарылмайды, келесі буын реакторлары өздерінің бейтарап қауіпсіздік функцияларымен ең жоғарғы қауіпсіздікті қамтамасыз етеді, себебі радиоактивті заттардың қоршаған ортаға шығарылуы өзекті мәселе болып табылады. Дегенмен қолданылған радиоактивті отынды көму және онымен жұмыс істеу елеулі қиындыққа айналып отыр. Қалдықтар төменгі деңгей, ортаңғы деңгей және жоғарғы деңгей болып жіктеледі. Оның сақтау процедурасы оларды үлкен темір контейнерлерде (теңіз контейнерлеріне ұқсас) орналастыру, цементпен толтыру, сонымен қатар бетонмен бекітілген қоймаларда сақтау жұмыстарымен байланысты жүргізіледі. Құрамына реакторлық отынның қабықшалары мен реакторды қолданыстан шығарудан шыққан ластанған материалдар кіретін ортаңғы деңгей қалдықтары тот баспайтын болат бөшкелерде немесе жәшіктерде цемент негізіндегі материалдармен қимылсыздандырылады. Пайдаланудан кейін қалатын белсенділігі жоғары отын мен қалдықтар мың жылға дейін зиянды болып қала береді. Реактордан шығарылып алынған отын ядролық сәуле мен жылу шашып, реактордың жанындағы суытатын су айналымы бар су қоймасына тасымалданады және тұрған жерде құрғақ сақталу ықтималдылығымен суыту мен радиация деңгейін төмендету мақсатында сақталады. Ақырында, қолданыстан шыққан отын қайта өңделуі немесе түпкілікті көмілуге дайындалуы тиіс. Қазіргі уақытта үнемі көмілуге арналған қолданыстағы қондырғы жоқ, бірақ терең радиоактивті материалдарды қимылсыздандырғаннан кейін геологиялық қоймаларды пайдалану мүмкіндігі пайда болады, сондықтан да ол жер асты суларымен шайылып кетпейді. Шыны тәрізді материалдардың жасалуы арқылы сұйықтықты шыныға айналдыру радиоактивті материалдарды қимылсыздандырудың тағы бір жолы болып табылады, өз кезегінде керамика жасауға саятын тәсіл де бар. Франция үкіметі өзінің халқы сирек қоныстанған қаласында жер асты қоймасын (жер бетінен шамамен 500м. тереңдікте) сынақтан өткізуде. Пайдаланылған отынды қайта өңдеу бағалы U мен Pu элементтерін шығарып алғаннан кейін түпкілікті ұзақ сақтау үшін оның көлемін төмендетеді. U және Pu өздерін қышқылда ажыратып ерітуден кейін отын өзекшелерінен қайта қалпына келітірілуі мүмкін. U, U-235 байыту үшін қайта өңделуі, ал Pu және U бірігіп аралас оксидті отынды реакторларда қолданылуы мүмкін, мұндағы Pu мен U-235 ауыстырады.

12.4-мысал. Пайдаланылған қатынасы $E = mc^2$ болатын 1 г затты қайта өңдеу кезіндегі энергияны есептеу керек, ал кейіннен оны 1.4-кестеде көрсетілген LHV пайдаланып, 1 гр тас көмірді жағу арқылы бөлініп шығатын энергиямен салыстыру керек.

Шешім

Жарық жылдамдығы $c = 299\,792\,458$ м/с

Қайта есептеудегі $m = 0,001$ кг

Шығатын энергия $E = 0,001$ кг $\times (299,792,458$ м/с)² = $89,88 \times 10^{12}$ Дж немесе 89,88

ТДж

Тас көмірдің LHV = 26 172 кДж/кг = 26 172 Дж/г

Затты энергияға қайта жаңғырту кезіндегі энергия қатынасы жанған көмір энергиясына $89,88 \times 10^{12}$ Дж/26 172 Дж, бұл үш миллиард есе артады!

12.5 ЭЛЕКТР ЖҮЙЕСІНІҢ ТҰРАҚТЫЛЫҒЫ ЖӘНЕ ҚАЗБА ОТЫНҒА ТӘУЕЛДІЛІГІ

Күн мен жел энергиясынан өндірілетін электр энергиясы айнымалы болып табылады және болжануы мүмкін емес үрдіске ие, әсіресе жел жағдайында сұраныс пен ұсыныс бір-біріне сәйкес келмегенде желілік жүйе арқылы айнымалы тоқ кернеуінің рұқсат етілген ауытқулары қиындық тудырып тұр. Нұсқалардың бірі тұрақсыз жаңғыртылған энергия көздерінің кемшіліктерін толтыру үшін қосымша «айналатын резервті» сақтаудан тұрады. Айналымды нұсқа – электр станциялардың пайдаланылмаған, бірақ қолжетімді қуаты, олар желіге электр энергиясын береді және олардың өнімділігі тез арада арттыруға мүмкіндік тудырады. Қуаттылығы артық мұндай электр станциялары әдетте қазба отынымен жұмыс істейді. Дистилятты отында немесе табиғи газда жұмыс істейтін газ турбиналарынан тұратын қарапайым циклды пикерлер, сондай-ақ табиғи газда жұмыс істейтін газ турбиналары негізіндегі жылдам іске қосылу мүмкіндігі бар арнайы дайындалған құрама циклдар пайдалы болуы мүмкін, дегенмен айырмашылықтың орнын толтыру үшін олар айналу қорында көп уақыт алуы мүмкін.

Оларды қажетті жылдам қосылуға дайын күйде ұстап отыру үшін мұндай құрама циклдар жағдайында арнайы құрылымдық ерекшеліктер қосылған. Жүйені алдын ала үрлеу, ал артынан ЖОБГ оқшаулағышы қолданылады, бұл ретте ағу автоматты демпфермен жабдықталған, ол жылу шығынын төмендету үшін қондырғыны тоқтату кезінде жабылады, ал бұл іске қосу кезіндегі жылу жүктемесін төмендетеді. Арнайы әзірленген бу барабандары мен бу қыздырғыштардың аспалы жылу алмастырғыштары және дестелегіштің бір жоғарғы серіппесімен ұсталған қыздырғыш бар ЖОБГ сонымен қатар жылу кернеуін төмендету үшін қолданылады.

10-тарауда сипатталғандай, бірлескен өндіріс қондырғысы жағдайында отын ретінде қорек блогына келіп түсетін синтез-газдың бөлінуі, қосалқы өнімнің блок синтезіне ауысуымен салыстырғанда желіге берілетін қуатты арттыруға немесе азайтуға болады, бірақ блок синтезі, оның тұрақтылығы мен қосалқы өнімнің тазалығы тәуекелге ұшырамауы тиіс, өйткені оның сыйымдылығы жылдам төмендеп артады.

Күн мен жел энергиясы кейбір географиялық аймақтарда бір-бірінің орнын толтырып, бір-бірін толықтыруы мүмкін. Күн сайынғы және апта сайынғы негізде жоғарғы қысым аумағы әлсіз жер бауырлаған жел шақыру, сондай-ақ күн энергиясына жол ашатын ашық аспан орнату үрдісіне ие. Бір жағынан, төмен қысымды аймақтар жел энергетикасын қамтамасыз ететін желкем болу үрдісіне ие, алайда бұл аймақтар біршама бұлтты болып келеді. Кейіннен мезгілдік негізде күн энергиясы жаз айларында ең жоғарғы шегіне жетеді, ал жел өз кезегінде көптеген жерде төмендеу үрдіске ие болады, ал қыс айларында кері үрдіс байқалады. Коммуналды шаруашылықтар мұндай электр станцияларын жоспарлаған кезде жаңғыртылған екі энергия көзі арасындағы ымыраны байқаулары тиіс.

Айналымды резерв энергия тапшылығын қамтамасыз ету үшін әрдайым жеткілікті дәрежеде жылдам бола бермейді, мұнда да жаңғыртылған энергияның жоғарғы дәрежеде енуі кезінде немесе оқшауланған әрі қашықтықтағы желілер үшін энергия жинақтау қажеттігі болады. Энергия жинақтауға арналған қондырғылар, айталық, қарбалас емес сағаттарда желіден артық қуатты алып, оны энергия тапшылығы пайда болған кезде қайтарады. Қазіргі кезде энергияны ірі көлемде жинақтауға арналған, атап айтқанда суды және қысым астындағы ауаны сору арқылы бірқатар нұсқаларға қол жеткізіліп отыр.

Сорғылы гидрожүйе түрлі биіктіктегі суға арналған екі сұйыққоймадан тұрады. Желіден бір мезгілде энергия тұтыну үзілмей, төменгі сұйық қоймадан жоғарғы сұйық қоймаға суды айдау арқылы потенциалды энергия ретінде энергия суда жинақталады. Энергия тұтыну кезінде жоғарғы сұйық қоймадан су өздігінен гидравликалық турбина арқылы энергияны желіге беру үшін төменгі сұйық қоймаға құлайды. Өзін жақсы қырынан танытқан осы технология энергияны ірі ауқымда сақтауға арналған.

Қысылған ауа энергиясын сақтау үшін жоғарғы қысымдағы ауаны қысуға арналған қозғалтқышты жетекті компрессор пайдаланылады және оны тұзды үңгір немесе сулы кеңістік сияқты үлкен жер асты аумағында сақтайды. Энергия тұтыну кезінде қысымды ауа энергияны желіге тарататын турбина арқылы ағады. Турбина дистилятты май немесе табиғи газ сияқты отынмен жұмыс істейді және рекуператор, турбина іске қосылды ма не қосылмай ма, осыған байланысты тиімділікті арттыру үшін оның турбинаға не болмаса

жану камерасына түсу алдында ауаны алдын ала қыздыру үшін турбинадан ағын бойымен төменірек орнатылады. Мұндай қондырғылар қыздыру үшін жану камерасы пайдаланылған кезде оңтайлы құрылады және пайдаланылады.

Жинақтағыш H_2 , батареялар мен электрохимиялық конденсторлар («суперконденсаторлар») – бұл ірі масштабты сақтауды қолдану үшін экономикалық тұрғыда пайдалы зерттелетін өзге нұсқалар. H_2 су электролизі арқылы алынуы мүмкін, электр энергиясы кезінде отын элементінде сақталған H_2 пайдаланып алынады, олар сонымен қатар электролиз ретінде де қызмет атқарады, ал бұл уақытта ҚООЭ электролизер ретінде қызмет атқарады, жеке блоктардың бағасын төмендету үшін олар дайындық сатысында тұр. Сақтау мен берудің екі тәсілі H_2 мен сұйық H_2 сақтау үшін құйманы пайдаланудан тұрады, бірақ бұның өзіндік қиындықтары бар; сақтауға арналған H_2 қолданыстағы құймалар сақтаудың төмен тығыздығына ие, ал сұйық H_2 суытуды қажет етеді. Зерттелетін H_2 сақтаудың өзге тәсілдеріне NH_3 синтез бен органикалық гидридтер қосылады, NH_3 кемшілігі оның ұйыттығы болып табылады.

12.5.1 Аса жоғары және аса төмен кернеулі электр жүйесі

Тағы бір нұсқа тұрақты тоқ желісінің үлкен аумағымен жоғары кернеудегі «супержелі» жасаумен ерекшеленеді, бұл ретте тұрақты тоқты беру кәдімгі айнымалы тоқты беруге қарағанда баға мен шығындардың біршама төмен болуына байланысты артықшылыққа ие. Бұл үлкен қашықтықтағы орналасуы мүмкін жүктемелерге жаңғыртылған энергия көздерін қосуға мүмкіндік береді. Өткізгіштігі аса жоғары желілер оны бірнеше жүздеген шақырым арқылы еш шығынсыз тасымалдай алады.

Тағы бір жағынан микроторлар тағайындалған энергияны ұсақ өндірушілерге қосымша ретінде ұсыну тұрғысынан назарға алынууда. Отын элементтері, газ турбиналары (немесе шағын турбиналар) және табиғи газбен не биоқоспадан алынған газбен жұмыс істейтін поршеньді қозғалтқыштар, биоқоспамен жұмыс істейтін қазандықтардағы бу турбиналары, сондай-ақ жел турбиналары мен күн фотоэлектрлік элементтері, сонымен қатар күн жылу энергиясында жұмыс істейтін жылу қозғалтқыштары осындай тағайындалған энергия өндірушілерінің мысалы болып табылады. Табиғи газ негізіндегі отын элементтері мен жаңғыртылған энергиямен жұмыс істейтін өндірушілер қазба отын негізінде өндірілетін кәдімгі энергияға қарағанда жағымдылау көміртекті әсерге ие болғандықтан (яғни CO_2 -ні аулау мен ұстау қажетінсіз), реттеуші органдар олардың орнатылуын қолдау мен шағын қондырғылар үшін экономикалық айыппұлдарды алып тастау мақсатында ақшалай ынталандыру шараларын жүргізеді. Көптеген шағын жылу электр орталықтарының жалпы электр желісіне қосқан үлестері артуда. Шағын генераторлардан тұратын тағайындалған өнімнің пайда болатын әлеуетін жүзеге асыруға зерделі қарау кедергілер кезінде пайдалы болатын генераторларға бақылауды қамтамасыз ететін микрожелілерді қалыптастыру үшін жүйе бөліктерінде генераторлар мен жүктемелерді бірге қарастырудан тұрады. Қазіргі кезде микрожелілерге қосылған аккумуляторлар шағын сақтауға икемді және генераторлар мен жүктемелер арасындағы кез келген сәйкессіздіктің орнын толтырады.

ӘДЕБИЕТ

- Betz A. Das Maximum dertheoretisch moglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren. Z Gesamte Turbinenwesen 1920;26:307-309.
- Conti J, Holtberg P. International Energy Outlook 2013. Washington, DC: Energy Information Administration (EIA); 2013.
- Edenhofer O, Madrugá RP, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Zwickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, von Stechow C, (eds.) *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge: Cambridge University Press; 2011.
- Heller P, Pfander M, Denk T, Tellez F, Valverde A, Fernandez J, Ring A. Test and evaluation of a solar powered gas turbine system. Solar Energy 2006;80(10):1225-1230.
- Kalina AI, Leibowitz HM. Application of the Kalina cycle technology to geothermal power generation. Geothermal Resources Council Transactions 1989;13:605-611.
- Kalogirou SA. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science 2004;30(3):231-295.
- Lu X, McElroy MB, Kiviluoma J. Global potential for wind-generated electricity. Proceedings of the National Academy of Sciences 2009;106(27):10933-10938.
- Milcak H, Mirolli M, Hjartarson H, Husavlkur O, Ralph M. Notes from the North: a report on the debut year of the 2 MW Kalina Cycle® geothermal power plant in Husavlk, Iceland. Transactions of the Geothermal Resources Council 2002;26:715-718.
- National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy. 2014. Available at http://www.nrel.gov/wind/facilities_site_tour.html. Accessed May 28, 2014.
- Rogner HH, Barthel F, Cabrera M, Faaij A, Giroux M, Hall D, Kagramanian V, Kononov S, Lefevre T, Moreira R, Notstaller R, Odell P, Taylor M. Energy resources, world energy assessment, energy and the challenge of sustainability. World Energy Council Report. New York: United Nations Development Programme, United Nations Department of Economic and Social Affairs; 2000.
- Sones R, Krieger Z. Case history of the binary power plant development at the Heber, California geothermal resource. Proceedings of the World Geothermal Congress; May 28-June 10, 2000; Kyushu-Tohoku, Japan. Bochum, Germany: International Geothermal Centre, Bochum University of Applied Sciences. p 2217-2219.
- U.S. Energy Information Administration, Office of Energy Analysis, U.S. Department of Energy. 2013. September 2013 monthly energy review. Available at <http://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/#environment>. Accessed October 10, 2013.
- Uranium 2011: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency; 2012.
- Walker G. *Stirling Engines*. Oxford: Clarendon Press; 1980.

Қосымша

ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН АББРЕВИАТУРАЛАР, БЕЛГІЛЕР МЕН ӨЛШЕМ БІРЛІКТЕРІ

ҚЫСҚАРТУЛАР МЕН АББРЕВИАТУРАЛАР

ҚИДХҚ (AACE)	Құндық инжинирингті дамытудың халықаралық қауымдастығы
AC	Айнымалы ток
ҚГЖ (AGR)	Қышқыл газдарды жою
aMDEA	Белсендірілген метилдиэтаноламин
АНИ (API)	Американдық мұнай институты
АОИМ (ASME)	Американдық инженер-механиктер қоғамы
АБҚ (ASU)	Ауа бөлу қондырғысы
ATR	Автотермиялық түрлендіргіш
ВАСТ	Ең жақсы қолжетімді бақылау технологиясы
ТБС (BFD)	Технологиялық блок-сызбанұсқа
BGL	«Бритиш Гэз Лурги» фирмасы
CCS	Көміртекті ұстау және сақтау
CF	Пайдалану коэффициенті
ШЛШ (CFLs)	Шағын люминесцентті шамдар
CHP	Жылу мен электр энергиясын аралас өндіру
COP	Өнімділік коэффициенті
DC	Тұрақты ток
EAF	Дайындықтың баламалы коэффициенті
EOR	Жүрілген жолдың соңы
U.S.EPA	АҚШ-тың қоршаған ортаны қорғау жөніндегі агенттігі
ESP	Электростатикалық электр сүзгісі
ТГД FGD	Түтін газдарының десульфурациясы
(g)	Газ фазасы
HNLL	Сұйықтықтың апаттық жоғары деңгейі
HNHV	Отынның жоғары жылу шығару қабілеті (кДж / кг)
HLL	Сұйықтықтың ең жоғары деңгейі
КҚ (HRSG)	КҚ - кәдеге жаратқыш қазан
IGCC	Кешенді газдандырудың аралас циклы
IGFC	Көмірді циклішілік газдандыру сызбанұсқасында пайдаланылатын отын элементтері
ISO	Стандарттау жөніндегі халықаралық ұйым
KO	Сепарациялау (бу / сұйықтық бөлу)
LAER	Ең аз рұқсат етілген үлестік шығарындылар
ӨЦБ (LCA)	Өмірлік циклды бағалау
СИД (LEDs)	Сәуле шығаратын диодтар
LHV	Төменгі жылу шығару қабілеті (кДж / кг)
LLL	Сұйықтықтың төмен деңгейі
LLLL	Сұйықтықтың ең төмен деңгейі
LMTDLog	Температуралық каротаж кезіндегі орташа температураның айырмашылығы (K немесе C)
LPMEOH TM	Төмен қысымды метанол
MCFC	Балқытылған карбонатты отын элементі
MHD	Магнитогидродинамика
ТҚК(MSW)	Тұрмыстық қатты қалдықтар
MWI	Воббеның модификацияланған саны
M-100	Автокөлік отын метанолы
NAAQS	Атмосфералық ауа сапасының ұлттық стандарты
NASA	Аэроғарыш және ғарыш кеңістігін зерттеу жөніндегі ұлттық басқарма
NERC	Электр энергиясымен сенімді қамтамасыз ету жөніндегі Солтүстік Америка штаттарының кеңесі
NLL	Сұйықтықтың қалыпты деңгейі

NO _x	NO және NO ₂
NPSH	Сору сорғысының таза оң биіктігі
NPSH _R	Сорғының жұмыс істеуі үшін соруға талап етілетін ең төменгі тиімді оң қысым
NSPS	Жаңа жабдыққа арналған шығарындылардың стандарттары
NSR	Жаңа көздерді сараптау
ЭЫДҰ(OECD)	Экономикалық ынтымақтастық және даму ұйымы
POC (ORC)	Ренкиннің органикалық циклы
P&ID	БӨА және құбыр байламының сызбанұсқалары
PAFC	Қышқыл электролиті бар ОЭ
PEMFC	Протон алмастырғыш мембраналары бар отын элементі
PFD	Ағындардың технологиялық сызбанұсқасы
ПИД (PID)	Пропорционалды-интегралды-дифференциалды реттеу / ПИД реттеуіш
PM	Қатты бөлшектер
Ppb	миллиард ішіндегі бөлшектер
Ppm	миллион ішіндегі бөлшектер

ТАҢБАЛАР МЕН БІРЛІКТЕР

Ppmv	көлем бойынша бөліктер, млн.
PSA	Қысқа циклды адсорбция
PSD	Елеулі бұзушылықтардың алдын алу
PV	Реттелетін шама
RDF	Қатты тұрмыстық қалдықтардан жасалған отын
RO	Реверсивті осмос
(s)	Қатты фаза
ИКВ (SCR)	Таңдамалы каталитикалық қалпына келтіру
SMR	Метанның бу риформинг пеші
SOR	Циклдың басталуы
Sox	SO ₂ және SO ₃
ҚТОЭ (SOFC)	Қатты тотықты отын элементі
УПС (SRU)	Күкірт алу қондырғысы
ҚЖАӨКҚ	Құбырлы жылу алмастырғыштарды өндіру жөніндегі кәсіпорындар қауымдастығы
TOC	Барлық органикалық біріктірулер
TRIG TM	Көліктік интеграцияланған газдандыру
T/T	Жанасудан жанасуға дейінгі ұзындығы
TVC	Жану камерасының құйынды тұзағы
VOCs	Ұшпа органикалық қосылыстар
Wg	Су бағанының биіктігі бойынша манометриялық қысым

ТАҢБАЛАР МЕН БІРЛІКТЕР ¹

A	Қаптама көлемінің бірлігіне келетін контактілеу беті (м ² / м ³)
A	Ауданы (м ²)
B	Бүйірлік сорғыштардың молярлық жылдамдығы (кмоль / с)
C	Жарық жылдамдығы (299 792 458 м / с)
c ₁	Константа (экспонента)
c ₂	Константа (экспонента)
C	Константа
C ₋₁	Константа
C ₀	Константа
C ₁	Константа
C ₂	Константа
CD	Тежеу коэффициенті (өлшемсіз)
C _F	Пайдалану коэффициенті
CF	F сұйықтықтағы масса немесе молярлық концентрация (кмоль / м ³)

	немесе $\text{кг} / \text{м}^3$)
C_p	Тұрақты қысым кезіндегі үлестік жылу сыйымдылығы ($\text{кДж} / \text{кг} / ^\circ\text{K}$)
C_{pi}	i түрінің тұрақты қысымы кезіндегі үлестік жылу сыйымдылығы ($\text{кДж} / \text{кг} / ^\circ\text{K}$)
C_v	Тұрақты көлем кезіндегі үлестік жылу сыйымдылығы ($\text{кДж} / \text{кг} / ^\circ\text{K}$)
C_{vi}	i түрінің тұрақты қысымы кезіндегі үлестік жылу сыйымдылығы ($\text{кДж} / \text{кг} / ^\circ\text{K}$)
D	Диаметр (м)
D_i	Ішкі диаметр (м)
D_o	Сыртқы диаметр (м)
D_p	Тамшы немесе бөлшектер диаметрі (м)
D	Дистилляттың молярлық жылдамдығы ($\text{кмоль} / \text{с}$)
D_{ij}	Дж-дағы i түрінің диффузия коэффициенті ($\text{м}^2 / \text{с}$)
E	Энергия (кДж)
$\mathcal{E}$	Ұяшықтың немесе ажыратылған тізбектің мінсіз әлеуеті (В)
$\mathcal{E}_o$	Ұяшықтың тірек әлеуеті (В)
F	Фэннинг үйкеліс коэффициенті (өлшемсіз)
f_T	Толық турбуленттілік аймағындағы Фэннинг үйкеліс коэффициенті (өлшемсіз)
f'	Дарси (немесе Муди) үйкеліс коэффициенті (өлшемсіз)
f'_T	Толық турбуленттілік аймағындағы Дарси (немесе Муди) үйкеліс коэффициенті (өлшемсіз)
f_i	i түрінің ұшуы (өлшемсіз)
F	Күш (Н)
F	LMTD түзету коэффициенті (К немесе С)
$\dot{F}$	Молярлық беру шығыны ($\text{кмоль} / \text{с}$)
F_{ij}	A_i және A_j облыстар арасындағы конфигурация немесе көру коэффициенті (өлшемсіз)
F'	Күн коллекторының тиімділігі (өлшемсіз)
G	Гиббстың еркін энергиясы ($\text{кДж} / \text{кмоль}$) немесе жергілікті гравитациялық жеделдету ($\text{м} / \text{с}^2$)
g^o_i	i компонент ($\text{кДж} / \text{кмоль}$) үшін Гиббс еркін энергиясының стандартты жағдайы
G_c	Ньютонның қозғалыс заңындағы түрлендіру коэффициенті ($\text{кгм} / \text{с}^2 / \text{Н}$)
G	Гиббстың еркін энергиясы (кДж)
G^o	Гиббстың еркін энергиясы (кДж)
Gr	Грасгоф саны (өлшемсіз)
H	Үлестік энтальпия ($\text{кДж} / \text{моль}$ немесе $\text{кДж} / \text{кг}$)
H^o	Стандартты күйдің энтальпиясы ($\text{кДж} / \text{моль}$ немесе $\text{кДж} / \text{кг}$)
h^o_i	i түрдегі стандартты жай-күй энтальпиясы ($\text{кДж} / \text{кмоль}$ немесе $\text{кДж} / \text{кг}$)
h	Жылу беру коэффициенті ($\text{кДж} / \text{м}^2 / \text{с} / ^\circ\text{C}$)
h_r	Сәулелену мен жылу алмасу коэффициенті ($\text{кДж} / \text{м}^2 / \text{с} / ^\circ\text{C}$)
H	Энтальпия (кДж)
H_i	i түрдің энтальпиясы (кДж)
H_p	p (кДж) күй нүктесіндегі энтальпия
ΔH_{expan}	Кеңейту кезінде энтальпияның өзгеруі (кДж)
ΔH_{chem}	Химиялық реакцияға байланысты энтальпияның өзгеруі (кДж)
H^o	Энтальпияның стандартты жағдайы (кДж)
H^o_i	i түрі үшін энтальпияның стандартты жағдайы (кДж)
H_{pump}	Сорғы немесе компрессор арыны (м)
H_i	Константа Генри (кПа)
I	Тоқ тығыздығы ($\text{А} / \text{м}^2$)
I_o	Тоқтың алмасу тығыздығы ($\text{А} / \text{м}^2$)
I	Тоқ (А)

jH	Жылу беруге арналған Чилтон-Колборн коэффициенті (өлшемсіз)
jM	Масса алмасуға арналған Чилтон-Колборн коэффициенті (өлшемсіз)
JA	Аудан бірлігіне арналған молярлық шығын (кмоль / м ² / с)
K	C_p/C_v үлесті жылу сыйымдылығы коэффициенті
K	Жылу өткізгіштік (кДж / м / с / оК) немесе жылдамдық тұрақтысы (кмоль / с)
k_L	Сұйық фазадағы масса алмасу коэффициенті (кмоль / м ² / с)
k_V	Бу фазасындағы масса алмасу коэффициенті (кмоль / м ² / с)
K	Кедергі коэффициенті немесе бу сұйықтықты бөлу (өлшемсіз)
K_i	Реакцияға немесе i жүйеге арналған реакция не тепе-теңдік тұрақтылығының коэффициенті
K_{rump}	Сорғы үшін ерекше константа
K_{sonic}	Константа
K_y	Мольдік үлестерге негізделген тепе-теңдік константасы
K_p	Парциалды қысымдар негізіндегі тепе-теңдік константасы
KE	Жалпы жүйенің макроскопиялық кинетикалық энергиясы (кДж)
K_p	Пропорционалды күшейту
K_i	Интегралды күшейту
K_d	Дифференциалды күшейту коэффициенті
L	Ұзындығы немесе биіктігі (м)
L_e	Тік құбырдың эквивалентті ұзындығы (м)
$\dot{L}$	Сұйықтықтың молярлық шығыны (кмоль / с)
P	Қысым (кПа)
p^o	Эталондық қысым (кПа)
P_i	i үлгідегі парциалды қысым (кПа)
Pr	Прандтль саны (өлшемсіз)
M	Масса (кг)
$\dot{M}$	Массалық шығын (кг / с немесе кг / сағ)
$\dot{M}_i$	i түрінің массалық шығыны (кг / с)
$\dot{m}$	Массалық жылдамдық (кг / с / м ²)
$\dot{M}_i$	i түрі ағынының молярлық жылдамдығы (кмоль / с)
M_w	Молекулалық масса
N	Моль саны (кмоль)
n_1	Константа
n_2	Константа
N_{years}	Өтімділік мерзімі (жыл)
N	Интеркулерлер саны (өлшемсіз)
N	Қатты бөлшектердің немесе жасушалардың саны (өлшемсіз)
N_i	Стационарлық координаттар бойынша i түрдегі молярлық ағындар (кмоль / м ² / с)
N_s	Сорғы жылдамдығы (өлшемсіз)
N_{suct}	Сорғының сору жылдамдығы (өлшемсіз)
N	Түтік саны (өлшемсіз)
$\dot{N}$	Айналу жылдамдығы (с ⁻¹)
Nu	Нуссельт саны (өлшемсіз)
P	Құбыр қадамы (м)
P_o	Толық өтеу кезіндегі қысым (кПа)
PC	Сыни қысым (кПа)
P_i	i компонент буының қысымы (кПа)
PE	Жалпы жүйенің макроскопиялық потенциалды энергиясы (кДж)
Q	Жылу(кДж)
Q	Жылу беру жылдамдығы (кДж / с немесе кДж / сағ)
Q	Реакция коэффициенті
Q_{in}	Аудан бірлігіне жылу беру (кДж / м ² / с)
R	Радиалды қашықтық (м)
R_i	i түрін түрлендіру жылдамдығы (кмоль / с)
R	Мінсіз газды жеке тұрақты (кДж / кг / °K)
Re	Рейнольдс саны (өлшемсіз)
RH	Гидравликалық радиус (м)
R_u	Әмбебап мінсіз газ тұрақты (8,314462 кДж / кмоль / °K)
R	Электрондық және иондық элементтердің кедергі сомасы (Ом)

S	Үлесті энтропия (кДж / кмоль / °K немесе кДж / кг / °K)
S	Энтропия (кДж / °K)
Sc	Шмидт саны (өлшемсіз)
Sh	Шервуд саны(өлшемсіз)
Sp	Жекеленген бөлшектердің беткі жағының орташа ауданы (m^2)
SG	Үлес салмағы (өлшемсіз)
T	Уақыт (с) немесе қалыңдығы (м)
T	Температура (°K)
T_0	Температура кезінде толық өтеу жағдайы (°K)
U	Үлесті ішкі энергия (кДж / кмоль немесе кДж / кг)
U	Жүйенің ішкі энергиясы (кДж)
U_{Fu}	Отын шығыны (өлшемсіз)
U_{Ox}	Тотықтырғышты пайдалану (өлшемсіз)
U	Жылу берудің жалпы коэффициенті (кДж / m^2 / с / °K)
V	Жылдамдық шамасы (м / с)
v_e	Эрозиялық жылдамдық шамасы (м / с)
v_{sonic}	Дыбыс жылдамдығы шамасы, яғни Маха саны = 1 (м / с) болғанда
v_V	Бу үшін рұқсат етілген жылдамдық шамасы (м / с)
v_T	Тамшылардың шекті жылдамдығы (м / с)
v_S	Сұйықтықтың беткі жылдамдығының шамасы(м / с)
V	Үлес көлемі (m^3 / кмоль)
V_p	Жекелеген бөлшектердің орташа көлемі (m^3)
V_{cell}	Элемент кернеуі (В)
V_{Nernst}	Ұяшықтың тамаша кернеуі (Nernst) (В)
V	Көлемдік шығын (m^3 / с) немесе будың молярлық шығыны (кмоль / с)
W	Жұмыс (кДж)
W	Қуат (кВт)
W_S	Білік жұмысы (кДж)
W_e	Электрохимиялық жұмыс (кДж)
W_f	Энергияның үйкелуден механикалық жоғалуы (кДж)
X	Қашықтық немесе ұзындығы (м)
X_i	Түрдің мольдік үлесі (кмоль / кмоль), i
X	Массалық үлесі (кг / кг)
X	Молярлық конверсия фракциясы (өлшемсіз)
Y_i	Түрдің мольдік үлесі (кмоль / кмоль), i
Z_i	Түрдің мольдік үлесі (кмоль / кмоль), i
Z	Биіктігі немесе қашықтығы (м)
Z	Сығылу коэффициенті (өлшемсіз)

ГРЕК СИМВОЛДАРЫ МЕН БІРЛІКТЕРІ

α	Жұтылған сәулелену энергиясының үлесі (өлшемсіз)
α_c	Бернулли теңдеуіндегі түзету коэффициенті(өлшемсіз)
α_e	Электрондарды тарату коэффициенті (өлшемсіз)
α_p	Тізбектің өсу ықтималдығы (өлшемсіз)
α_{ij}	j компонентіне қатысты i компонентінің салыстырмалы құбылмалылығы
β	Жылудың кеңею коэффициенті ($1 / ^\circ K$)
β_{ij}	Еріткіштің селективтілігі (өлшемсіз)
ε_S	Жоғарғы беттің сәулелену коэффициенті (өлшемсіз)
ε	Құбырдың кедір-бұдырлығы (м) немесе кабаттың кеуектілігі(m^3 / m^3)
η	Тиімділік (өлшемсіз)
η_I	Тиімділіктің бірінші заңы (өлшемсіз)
η_{II}	Тиімділіктің екінші заңы (өлшемсіз)
$\eta_{белс}$	Іске қосу поляризациясы (V)
$\eta_{шог}$	Концентрациялық поляризация (V)
$\eta_{Карно}$	ПӘК Карно циклы (өлшемсіз)
$\eta_{ген}$	ПӘК генераторы (өлшемсіз)
$\eta_{ом}$	Омдық поляризация (V)
δ	Қалыңдығы (м)
Δ	Айырмашылығы
γ_i	i компоненті үшін белсенділік коэффициенті (өлшемсіз)

λ	Бөлшекті артық ауа (өлшеусіз)
λ_p	Бөлшектер нысанының коэффициенті
λ_{con}	Жасырын конденсация жылуы (кДж / кг)
λ_{vap}	Жасырын булану жылуы (кДж / кг)
λ'	Бу мен сұйықтық арасындағы жылу құрамындағы тиімді айырмашылық (кДж/кг)
μ	Тұтқырлық ($\text{H} \cdot \text{с} / \text{м}^2$)
π	Қысым коэффициенті (өлшемсіз)
ρ	Сәулелену энергиясының шағылысқан үлесі (өлшемсіз) немесе тығыздығы ($\text{кг} / \text{м}^3$)
ρ_p	Қатты бөлшектердің тығыздығы ($\text{кг} / \text{м}^3$)
σ	Сұйық және бу фазалары арасындағы беткі беттің керілуі ($\text{Н} / \text{м}$)
σ_i	Иондық өткізгіштік ($\text{См} / \text{м}$)
σ_{amb}	Аралас протонды және электрондық өткізгіштік ($\text{См} / \text{м}$)
σ_{SB}	Стефан-Больцман тұрақтылығы ($5,67 \times 10^{-11} \text{ кДж} / \text{с} / \text{м}^2 / ^\circ\text{K}^4$)
T	Сәулеленетін энергия үлесі (өлшемсіз)
τ	Уақыт тұрақтылығы (с)
θ	Жылу энергиясының сапасы (-1 T)
Θ	Тепе-теңдікте адсорбцияланған молекулалармен жабылған учаскелердің үлесі (өлшемсіз)
Φ_i	Жұмыс дөңгелегі өлшемі (м)
$\varnothing_i$	i компонентке арналған ұшу коэффициенті
χ	Эксергия (кДж)
X	Эксергия жылдамдығы (кДж / с)
V	Кинематикалық тұтқырлық ($\text{м}^2 / \text{с}$)
Ψ_A	Адсорбентте оның тепе-тең мәнін бөлшек жүктеу (өлшемсіз)
Ξ	Индексі (немесе шара) біртекті емес (өлшемсіз)

ӘЛІППЕЛІК КӨРСЕТКІШ

А

абиогенді теория, 15
 автотермиялық (ATR), 300, 307
 ағаш биомассасы, 27, 235
 ағаш қалдықтары, 234
 ағызу науасы, 137
 ағын режимдері, 67, 72-75
 ағынды су, 80, 291
 ағынның екі фазалы жылдамдығы, 81
 Ағынның тығын режимі, 72
 ағып жатқан, 106, 144
 адвекция, 95
 адиабатикалық қысу, 35
 адиабаттық, 272
 адиабаттық реактор, 162, 164, 166, 273, 289, 300
 адсорбат, 150
 адсорбция, 151-153, 316
 азайған қоспаның жану жүйесі, 193
 азайту, 341, 349
 азеотроп, 132, 135
 азот тотығы, 31
 азоттың шала тотығы, 24
 айналмалы, 74
 Айналмалы бұранда, 88
 айналмалы қор, 383, 384
 Айналмалы пеш, 236
 айыру, 9-10
 Акерман коэффициенті, 146
 аласа-төмен, 75
 алға қарай қайырылған, 87
 алғашқы, 253
 алдын ала араластыру, 167, 244
 алдын ала араластыру оттығы, 176
 алдын ала араластырылған, 32
 алдын ала оталдыру, 181
 алдын ала өңдегіш, 299
 алынатын, 11, 147
 алынатын байлам, 119
 алынатын кен, 17
 алынбайтын байлам, 121
 алып кету, 137
 Аминді қолдану, 260
 аммоний тұздары, 227, 253, 264
 Андервуд, 148
 Андерсон-Шульц-Флори таралуы, 284
 анод, 319
 антрацит, 21
 ара салмақ, 172, 177
 аралас ағын, 82
 аралас ионды және электронды, 333, 340
 аралас қабатты ион алмасу, 269
 аралас оксидті отын, 383
 аралас цикл, 8, 167, 172, 186, 190, 198, 244, 248, 321

араластырығыш құрылғысы, 199
 аралық салқындату, 94, 136, 171, 183, 184, 193, 265
 арақабырға, 109-110, 113-115
 арна, 119-120
 арналық, 247
 арналық немесе қосалқы тұтандыру, 128, 270
 артқа итеріп шығаратын, 335
 артық ауа, 32
 артық салқындату, 240
 асқын қыздырғыш, 128
 аспа, 244
 аспанның сәулеленуі, 366
 ауа, 81
 ауа бөлу, 290
 ауа үрлегіш, 93
 ауа-реактивті, 195
 ауа-стандартты циклы, 158
 ауамен салқындататын, 269
 ауамен салқындату, 117, 127
 ауасыздандырығыш, 115, 232
 ауқым, 111
 ауыр, 147
 ауыр рамалы қозғалтқыш, 172
 ауыр су, 380
 ауыспалы адымды ротор, 365
 ауытқу функциясы, 62
 ашық, 82
 ашық тізбек, 338
 ашық тізбек кернеуі, 339
 ашық тізбекті ауамен салқындату, 174
 ашық цикл, 170
 аэродинамикалық көтерілу, 79
 аэродинамикалық қозғалтқыш, 159

Ә

әйнектеу, 260
 әлеует, 26
 әлеуетті, 53

Б

бағана, 128
 бағыттаушы қалақ, 89, 250, 253
 базалық жүктеме, 166, 253, 275
 байланыс, 304
 байытылған қоспамен жұмыс істейтін, 193
 байытылған уран, 346
 бақылау, 87, 94
 балқытылған карбонаты бар отын элементі (MCFC), 291
 балқыған тұз қоймалары, 369
 барабан, 76, 240, 267
 барлығы, 148
 барометрлік қысым, 252
 бастапқы қозғалтқыш, 169

бастапқы шикізат, 200
 Басып алынған құйынды камера (TVC), 170
 батарея, 32, 332, 349
 батырылған қабат, 280, 282
 баяулатқыш, 255, 345
 бекітілген, 21
 бекітілген қабат, 162, 311
 белгіленген ластаушы зат, 30
 белсенділік коэффициенті, 304
 белсендіру, 340
 белсендірілген көмір, 33, 263, 293, 316
 белсендірілген метилдиэтаноламин (аМДЕА), 294
 бензин, 10
 Бернулли теңдеуі, 68
 беру, 148
 беру/суағарлар, 212, 301
 беріліс, 140
 беріліс блогының биіктігі (HTU), 157
 беткей кернеу, 107
 беткі жылыстау (таралу), 159, 339
 беткі конденсатор, 111, 123, 269, 278
 беткі қабат, 14
 биогенді теория, 15
 биомасса, 234-235
 битум, 257, 288
 блок, 108
 блок-сызбанұсқа, 261
 блоктық жұмыс, 117
 бойлер, 251-253
 бойлық, 109-110
 болжау, 361
 борпылдақ, 233
 бөлік, 16, 378
 бөлінген электр энергиясын өндіру, 319
 бөлінетін, 16
 бөлінетін изотоптар, 16
 Брайтон циклы, 242
 "Бритиш Гэз Лурги" фирмасы, 280
 бу, 63
 бу жылдамдығы, 81
 бу мөлшері, 299
 бу түзілу, 247
 бу-сұйықтық, 64
 бу-сұйықтық үлестіру коэффициенті, 140
 Будуар реакциясы, 272
 буды салқындату, 161
 буландырғыш, 10
 булану есебінен салқындату, 183
 булы, 132
 бұдырлық, 69
 бұзу, 17
 бүлкілдеуді тоқтатқыш, 92
 бүрку, 176
 бүріккіш, 121, 224
 бір мезгілді, 153

бір реттік, 139
 бірге жағу, 234
 бірлік (HTU), 156
 бірліктер орнында, 290
 бірнеше пеш, 21
 бірігу, 274, 345
 біріктіру, 73
 Біріктіруші тарту, 110
 бірінші заң, 41, 337

В

Ван-дер-Ваальс, 62
 Ван-дер-Ваальс күштері, 134
 ванадий пентаоксиді негізіндегі шапшаңдатқыш, 272
 вакуум, 81, 83
 вакуумдық айдау, 10
 Вентури скруббері, 247
 винттің біркелкі жылдамдығы, 330
 Воббе саны, 5, 180, 346

Г

газ, 119, 347
 газ температурасы, 46
 газ түріндегі реагент, 46, 225
 газ-сұйықтық сепараторы, 74
 газбен қыздыратын SMR, 300
 газбен салқындату, 381
 газдандырғыш, 298
 газдандыру, 12, 13, 18, 24, 203, 280-291, 296-302, 315, 318, 320
 газды, 346
 галоген, 259
 гейзерлер, 29, 339
 гелиостат, 367
 Генератордың жиілігі, 252
 Генри заңы, 63
 Геотермальді, 338-344
 Гиббс еркін энергиясы, 309
 гибридті тал, 26
 гибридті терек, 26
 гибридті цикл, 330, 336
 гидравликалық, 20, 195, 196
 гидравликалық ПӨК, 86
 гидравликалық радиус, 67
 гидрогаздандырғыш, 315
 гидрокрекинг, 311
 гидролиз, 305, 320
 гидрологиялық конвекция, 21, 371
 гидротазалау, 10
 гидротерм, 371, 372
 гидроэлектрші, 19-20
 гипс, 225
 глобулярлық, 73-74
 Грасгоф саны, 97
 графит, 346
 Грац, 252

Д

дайындау цехы, 201
 Дарси, 69
 дәстүрлі емес, 6
 дереккөз, 185
 десорбция, 128-129, 305, 311
 Джордж, 158
 диаметр, 69
 дизель, 14
 Дизель циклы, 174
 Джоуль-Томпсон коэффициенті, 182
 диафрагма, 84
 динамикалық, 8, 200
 динамикалық модельдеу, 195-198
 диоксин, 26, 236-237
 дистиллят, 10, 19
 дистилляция, 18, 142
 Диттус-Боэлтердің келесі корреляциясы, 98
 диффузия, 124, 319
 диффузия коэффициенті, 126
 диффузиялы, 132
 диффузор, 81
 диірмен, 20-21
 диірмен қалдығы, 17
 диэтаноламин (DEA), 18
 домалақ, 87
 домна газы, 166
 допант, 331, 332
 Дроссельденген, 71
 дыбыс жылдамдығы, 72
 дымқылдану, 136, 143, 290, 321
 Дюлонг-Пти формуласы, 14

Е

екі жақты сору, 80
 екі фазалық ағын, 72-77
 Екілік, 126, 145, 146
 екінші заң, 50
 елек, 144
 ең жоғарғы энергия жүктемесі, 347
 еркін кеңею, 54
 еркін ісінудің көрсеткіштері, 257
 еріткіш, 285
 ерітінді, 34, 41, 63

Ж

жазық бет, 103-104
 жағуды үдету, 128, 270
 жалған сыни, 61
 жалған сұйылту, 75-77
 жалған сұйытылған қабат, 80, 255-258
 жалпақ көлденең құбыр, 103-104
 жалпы коэффициент, 109
 жан басына шаққанда, 29
 жанама өнім, 297

жанарғы, 32
 жанармайдың жануы, 158
 жанартау белсенділігі, 29
 жану, 14-15
 жану камерасы, 13
 жану турбины, 157
 жаңартылатын энергия көзі, 17-22
 жапқыш клапандар, 205
 жаппай жылдамдық, 71
 жарқыл уақыты, 75
 жартылай ашық, 82-3
 жартылай битумды, 225
 жартылай өткізгіш, 331
 жасау, 7
 жаһандық жылыну, 13
 жел, 21, 337, 347-348
 жел энергиясы енуі, 361
 желдеткіш, 344
 жеңдік сүзгі, 231, 236
 жеңіл, 147
 жеңілдету, 77
 жер асты сулары, 29
 жер бетінен шағылысқан радиация, 333
 жобалау негіздері, 182
 жоғары, 3-4, 76
 жоғары-биік, 75
 жолақ, 219
 жуу, 278
 жұдырықша, 83
 жұмыс, 34
 жұмыс дөңгелегі, 81, 91
 жұту қимасы, 346
 жұтылу, 103
 жүйе, 348-349
 жүйелік қисық, 86
 жүйелік талдаудағы ағын, 199
 жүктемені ұстану, 204, 297
 жүктеу, 173, 277
 жылдам, 30, 348
 жылдам NO_x , 248
 жылдамдық, 84
 жылжымалы қабат, 280-281
 жылжыту, 78, 219
 жылжыту бірлігі, 290
 жылу, 380
 жылу алмастырғыш, 348
 жылу алмасу, 52
 жылу жинақтау, 335
 жылу жоғалту, 114-116
 жылу қозғалтқышы
 жылу сорғысы, 209, 255, 315
 жылу сұйықтығы, 261
 жылу сіңіру, 3
 жылу ұлғаюы, 111
 Жылуды қайтару арқылы бу шығаратын генераторлар (HRSG), 76, 117, 128-9, 267, 272, 278, 290

жылулық, 32
 жылулық жетек, 46
 жылулық сұйылтқыш, 144, 173, 274, 284, 286, 289, 290, 315
 жылыжайлық газдар, 13, 228, 328, 333, 337, 348
 жіктеме, 196

И

изотермиялық, 42
 изоэнтроп, 84
 импульс, 161
 импульстік, 170
 индукцияланған, 17
 инертті арттыру, 298
 интегралды, 201
 интегралды реттеуіш, 201
 интеграцияланған газдандыру отын элементі (ИГОЭ), 289-290
 инфракызыл, 102
 иондық өткізгіштік, 332
 Ирвин, 322
 ирек, 121
 иттрий тотығы (Y_2O_3) тұрақтандырылған цирконий диоксиді, 318
 иістендіргі, 3

К

Казени-Карман теңдеуі, 77
 калибрлеу, 146
 Калина циклы, 63, 340
 Калифорния университеті, калифорниялық тәуелсіз жүйе операторлары (CAISO), 329
 кальций қосылған сода, 247
 Камера алдындағы жануды бақылау, 249
 канализация, 17
 Карно циклы, 28, 344
 Каскадтық басқару, 201
 катализдік, 151
 каталитикалық ішінара тотығу, 273, 299
 катод, 232
 кедергі коэффициенті, 70
 кездейсоқ, 146
 кезең-кезеңмен салу, 277
 келтірілген жылдамдық, 77
 кемшілік, 340
 кеңею, 98-9
 кептіргіш, 27, 288
 керамикалық/керамикалық композит, 305
 керамикалық матрицалық композит, 169
 кернеу, 309
 кероген, 16
 керосин 10
 кері, 13
 кері байланысты, 231
 кері осмос, 254

кері тұтану, 167
 кесте нөмірі, 87
 кеуекті, 78-79
 кеуекті қабат, 77
 кешенді газдандырудың құрама циклы (IGCC), 13, 27, 91, 136, 143, 155, 164, 183, 203, 203, 205, 208, 280-291, 296, 315-318
 кинетикалық, 81, 330
 клапан, 145
 Клаус, 289
 Кнудсен, 149
 коваленттік байланыс, 127
 кокс, 11, 282
 кокстау, 14
 коллектор, 335
 компрессиялық құрғату, 255, 315
 компрессор, 87
 конвективті салқындату, 169
 конвективтік, 133-4
 конвекция, 96, 106, 122
 конденсатор, 103, 114, 141
 конденсатты, 246
 конденсация, 14
 конденсацияланатын бу, 186
 конструкция, 345-346
 конфигурация коэффициенті, 105
 корпус, 128
 коэффициент, 62-63, 103-109
 көбіктену, 138, 148
 көбікті, 72
 көлденең, 16
 көлденең ағын, 71
 көлденең құбыр, 104-105
 көлем, 335
 көлемдік тепе-теңдік, 152
 көлік, 29
 көмірқышқыл газы, 33
 көмірмен, 324, 329
 көмірмен жұмыс істейтін, 292
 көмірсутек, 320
 көмірсіз сингаз, 278
 көміртек, 21
 Көміртек мөлшері, 283
 көміртек тотығы, 30
 көміртексіздендіру, 129
 көп компонентті, 46
 көп сатылы, 79, 82
 көпіршікті, 223
 көрсетілімдік қондырғы, 335
 көріну коэффициенті, 113
 көтерілу, 111
 криогенді, 258
 кристалдар, 304
 кристалды тор, 304
 күй функциясы, 39
 күйдіру температурасы, 190, 250, 264
 күйе ауа үрлегіші, 246

күйінің теңдеуі, 62
күкірт, 263
күкірт алу, 286
күкіртсіздендіру, 20, 228
күл қож, 256
Күлді балқыту, 257
күн сәулеленуі, 336
күрекше, 221
күрекшелер, 220
кідіріс уақыты, 76

Қ

қабық, 80
қабырғаның тиімділігі, 101
қабыршақ, 111, 119, 168
қағаз өнеркәсібінің қалдықтары, 17
қажеттілік, 172
қазан, 4
қазанның қоректік суы (BFW), 82
қазба отын түрлері, 13
қайнаған қабат, 76
қайнап бастау температурасы, 100
қайнау қабаты, 234
қайнау температурасының қисығы, 19
қайта айналуы, 35
қайта бөлу, 138
қайта қайнау жылдамдығы, 147
қайта қалпына келтіру, 226
қайта өңдеу, 245
қайтымды, 54, 83
қайтымды реакция, 60
қайтымды ілгерілеме қозғалыс, 81, 83-86
қайтымсыз, 46
қалақтар, 83, 91
қалақшалы сепаратор, 76
қаланың ағаш қалдықтары, 25-26
қалдықтар, 10
қалдықтарды жою, 201
қалқыма бастиек, 119-120
қалқымалы заттар, 110
қалпына келтіру, 337
қалыпты, 75
қанықтыру, 212
қапталған, 4
қаптама, 82
қарапайым цикл, 171-172, 265
қармау, 142, 144, 145
қарсы ағын, 103
қарсылық, 312
қару, 378
қатайту, 237
қатты бөлшектер, 75
қатты тотықты отын элементі (SOFC), 290, 292-293
қатты тұрмыстық қалдықтар, 17-18, 256, 258-259
қатты-сұйық жүйе, 77-81

қатынас, 302
қауіпсіздік, 348
қауіпті, 308
қисық, 86
қисық цикл, 21, 31, 170, 291-292, 335
қозғалмайтын қабат, 65, 284
қоқыс газ, 179, 346
қоқысты отын, (RDF), 258, 260
қолжетімді үстіңгі бет, 128
қолжетімділік, 7
қорап, 102
қорғаныс, 178
қорғасын, 32
қоректендіру тізбегі, 29-31
қоректік суды ысыту, 238
қоршаған, 309
қос құбыр, 123
қос қысым циклы, 266-267
қос тактілі қозғалтқыш, 192
қоспа, 44, 63
қуат, 85-86
қуаттылық, 172
құйынды камера, 170
құбыр, 289
құбыр блогы, 105-106
құбыр желісі, 81
құбыр табақ, 119-21
құбырлар, 69, 72, 74
құбырлы, 162
құйынды үзгіш, 76
Құндық инжинирингті дамытудың
халықаралық қауымдастығы (ҚИДХҚ),
203
құнын бағалау, 182, 203
құрам, 91, 316
құрама қисық, 191-192
құрамдастырылған SMR және ATR, 300
құрғақ, 28
құрғақ тазарту, 236
құрғату, 124
құрсауланған, 82-83
құрсаулы, 86
құрылымдалған, 146
қызған газды тазартқыш, 285
қыздырғыш, 121
қыздыру жылдамдығы, 250
қыздырып жіберу, 233, 261, 270
қырлы құбырлар, 108
қыртыс, 21, 338
қысқару, 159, 250
қысымды көтеру, 193
қысымның артуы, 65, 177
қысымның төмендеуі, 71, 152, 158, 167,
180, 247
қыш, 331
қышқыл, 289, 302

қышқыл газ, 3, 225, 227, 258, 260, 263, 271, 288, 290
 қышқыл су, 139, 289, 317
 қышқылдық, 17, 280
 қышқыл жаңбыр, 31

Л

ламинарлы ағын, 67
 Ленгмюр, 134-135, 161
 Ленгмюр-Хиншелвуд, 164
 лигнит, 185
 литостатикалық, 337

М

магма, 337
 магнит өрісі, 325
 магнитті гидродинамика (МГД), 330, 256-257
 макроскопиялық, 134, 159
 мақсат, 334
 мал шаруашылығы, 10
 мал шаруашылығы қалдықтары, 15
 масса алмасу, 124
 масса тасымалдау, 126
 масштаб есебінен үнемдеу, 185
 мата сүзгі, 224
 мәжбүрлі, 96-98
 мәжбүрлі күш, 254
 мембрана, 303-306
 мембраналық, 8
 металл карбонилы, 287
 металл пассиваторы, 255
 металл тозаңдату, 299, 300
 металлик, 331
 метан буы (SMR), 143, 299, 300, 303, 307, 309
 метанол, 277
 меншікті, 136
 меншікті жылу сыйымдылығы, 46, 96-98
 меншікті салмақ, 166
 мерзімді жұмысқа қабілетті
 жаңартылатын энергия көздері, 8
 металл іздері, 249-251
 металлик, 331
 микроарна, 163
 микроскопиялық, 134, 159
 микротор, 350
 микротурбина, 163
 минералданған қыртыс, 338, 340
 минералсызданған су, 254
 минералсыздандыру, 232
 минимум, 148
 модель, 164
 молекулалық, 20
 молярлық флюс, 133
 монокристалды, 168-169
 монокристалды оксидті талшық, 183

моноэтанолламиндер (МЕА), 8, 136, 275
 Монтана штатының университеті, 322
 мұнай өндіру, 121
 мұнай өнімі, 9-11
 мұнай өңдеу шығындары, 282
 мұнайлы тақтатас, 16
 мұнара, 35, 76, 172, 232, 332-334

Н

нафта, 10
 негізгі компонент, 138
 нейтрондар, 343
 Нернст-Эйнштейн теңдеуі, 332, 333
 несепнәр, 305-9
 нөлдік эмиссия, 280, 287
 Нуссельт критерийі, 103
 нығайту, 219
 нысан, 346
 Ньютон сұйықтықтары, 67
 Ньютонның екінші заңы, 68

О

озон, 32
 октандық сан, 190, 195
 олигомерлеу, 311
 олқылық, 10
 Ом, 340
 Ом заңы, 340
 оң кіріс, 34
 оптикалық, 91
 орман қалдықтары, 25
 орнату құны, 220-225
 ортадан тепкіш, 23, 81-83
 ортаңғы, 133
 орташа логарифмдік температура айырмасы (LMTD), 110
 осьтік, 79
 оттект, 22
 Отто циклы, 190
 оттектің жануы, 250, 276
 оттегі иондарын тасымалдау, 331, 332
 Отто циклы бар қозғалтқыштар, 175
 отын, 200
 отын электр станциясы, 49
 Отын элементінің өнімділігі, 312
 отындағы (шикізаттағы), 271
 отынды пайдалану, 343
 отындық элемент, 303
 отынмен байланысты азот, 226
 отынның екі сатылы жануы, 248

Ө

өзгермелі геометриялы жану камерасы, 177
 өздігінен тұтану, 256
 өзекше, 348
 өлшемсіз сандар, 98

өлшенген шөгінді қабат, 162, 163, 305, 312
 өлі нүкте, 178
 өмірлік циклді бағалау (LCA), 29-31, 227-228,
 өнім, 42, 36
 өңдегіш, 298, 345
 өсімдік, 232-233
 өткізгіштік, 89, 305
 өткізгіштік аймақ, 304
 өтпелі, 67, 305
 өтпелі бөлік, 162

П

пайдалану коэффициенті, 186, 314
 пайдаланушы жағында жасалған, 35
 Пал сақиналары, 146
 Парабола тәрізді шағылыстырғыш, 334
 паразиттік, 161
 параллель ағын, 110
 параметрлер, 67
 пайдалы әрекет коэффициенті, 241
 Пенг-Робинсон, 62
 перовскит, 303-304, 319
 пинч, 111, 266
 пинч-талдау, 207-212
 пиролиз, 256
 плазма, 325, 344
 пневматикалық көлік, 78
 политроптық, 90
 поляризация, 311-312
 полярлық жүйе, 61
 поршенді үлгі, 84
 потенциал, 310
 Прандтль саны, 103
 пропорционал, 11
 пропорционалды, 23
 протондық алмасу, 315
 пула, 309
 піспек, 87-88
 піспекті, 174
 пішін факторы, 79

Р

радиал, 98, 187
 радиалды, 93
 радиалды ағын, 79
 радиатор, 119
 радиациялық секция, 122
 радиоактивті қалдықтар, 37, 346
 Райс Дж.Д., 152
 Рауль заңы, 63
 Рашиг сақиналары, 146
 реактивті, 31
 реактивті қозғалтқыш, 270
 реактивті отын, 10

реактор, 166, 273, 289, 298, 300-301, 317, 321
 Реактор корпусы, 345
 реакторлар, 124, 325
 реакторды/детандерді толтыра құю циклы, 321
 реакция, 8, 58
 реакция коэффициенті, 164
 ребойлер, 123-127
 реверсивтік, 49
 регенеративті цикл 178
 Рейнольдс саны, 67, 79
 рекуперативті цикл, 171, 178
 рекуперация, 171, 178, 322
 Ренкиннің органикалық циклы (ORC), 62, 260-262
 ресурс, 20
 ретке келтіру, 220
 реттегіш, 89
 реттеуші саты, 172
 рефлюксті байланыс, 148
 ротор кіре берісіндегі температура, 174
 Рэлей саны, 104

С

сазды минерал, 17
 Сақиналы жану камерасы, 162
 сақтау, 349-350
 салқын, 80
 салқындатқыш, 35
 салқындатқыш сұйықтық, 115
 салқындату, 14
 салқындату жүйесінің жалпы құрылымы, 287
 салқындатылған су, 171
 салыстырмалы құбылмалылық, 139, 284
 саңылау өлшеуіш, 87-89
 сапа, 52
 сарқылу, 11
 саты, 92
 сатыдағы ПӘК, 142
 сатылы жағу, 25
 сатылы өзгеріс, 218
 сәуле ұзындығы, 113
 сәуле шығару коэффициенті, 355
 сәулелендіру, 101, 112-116
 сәулелену, 272
 сегменттік, 110
 сейсмикалық аймақ, 202
 селективті өршіткілік емес тотықсыздау (SNCR), 248, 259
 селективті өршіткілік тотықсыздау (SCR), 248, 259, 272, 290
 селективтілік, 143
 Селлексол, 263
 сепаратор, 76
 сепарация, ажырату, 330

силоксан, 182, 346
 синтез, 300, 302-305
 синтетикалық отын, 297
 сипаттама, 261, 306, 307
 сипаттамалар, 86, 139,
 соңғы жылдамдық, 75
 сорбция, 134
 сорғы, 79, 81-90
 сорғының соруындағы тиімді оң қысым (NPSH), 84-85
 сору жылдамдығы, 85
 сорып алу, 124-126
 стандартты, 338
 стандартты жағдай, 46
 стандартты күй, 37
 стационарлы күй, 205, 215
 стек, 344
 Стерлинг қозғалтқышы, 67
 Стефан-Больцман теңдеуі, 104
 Стефан-Больцман тұрақты шамасы, 105
 стехиометриялық сан, 302
 стокер торы, 235
 стратификацияланған, 73
 стронциймен қосындыланған лантан манганиті, 319
 су басу, 28
 су құбырлы, 122
 суағар, 144
 судың аса қауіпті қысымы, 346
 көліктік үлгі, 164
 судың қысымы, 345
 сулы шар, 200
 сумен толтыру, 176
 сульфидтелген, 33, 260, 274
 сульфат бөлшектері, 24
 супер, 168
 супер шамадан тыс, 241
 суперконденсаторлар, 349
 суық ату реакторының конфигурациясы, 307
 суық газ, 256, 259, 291
 Суық газбен тазаланған, 259
 сұйық, 348-349
 сұйық қоспа, 78
 сұйық табиғи газ әлеуеті, 54
 сұйық фаза, 63
 сұйықтық, 7
 сұйықтық деңгейі, 74, 136
 сұйықтық жылдамдығы, 81
 сұйықтықтың бөлінуі, 122-123
 сұйықтықтың сорғалап ағатын қабаты, 162, 163
 сұйытылған мұнай газы (СМГ), 10
 сұр, 104
 сұрыптама, 113
 сұрыптау, 23
 Сығылатын сұйықтық, 71

сығылған ауа, 175
 сығылу коэффициенті, 62
 сынап, 21
 сыни жылдамдық, 75
 сыни температура, 60-61
 сыншылдық, 43
 сырғымалы күрекшелер, 83
 сыртқы, 28
 сырттық циркуляция, 124-126
 сілтіленбейтін, 260, 320
 сілтілік, 225
 сілтілік сорбент, 225
 сіңіру, 128, 155
 Сіңіру қабілеті, 106

Т

табандық, 115
 табақшалы, 224
 табиғи газ, 4-8
 табиғи күш, 254
 Табиғи немесе адами, 11
 тазарту, 34, 275
 Таза энергия жүйесі, 10
 тақтатасты, 16
 тақтатасты газ, 17
 талдаудың екінші заңы, 53-57
 тамшы, 19
 тамшылардың жылжуы, 73
 тарифтік мөлшерлемелерге негізделген есептеу, 152
 тартылған қабат, 255
 Тафель теңдеуі, 340
 тәтті, 166, 300-302
 тектоникалық плита, 29, 338
 температураның төмендеуі, 55
 Теннеси Истман, 287, 303
 теңгерім, 43
 теңселу аймағы, 338
 тепе-теңдік, 147
 термиялық NO_x, 247, 248, 257
 термодинамикалық, 55, 296, 314
 термометр, 200
 термосифон, 124-126
 Термофлекс, 207
 тері, 31
 теріс, 345-356
 тесік, 137-138
 тесілген, 144
 тефлонмен қапталған құбыр, 238, 271
 техникалық талдау, 21-22
 технологиялар, 343
 технологиялық өзгермелі (PV), 219
 типтік үдеріс, 117
 тиімді, 11, 333
 тиімділік, 3, 145
 тозаңдану, 14
 ток тығыздығын шектеу, 341

топография, 201
 топтама, 19
 тор, 112
 тосқауыл жабын, 183, 274
 тотығу, 337
 тотықтырғышты пайдалану, 343
 төмен, 3-4, 75
 төмен жылдамдық, 114
 төменнен беру, 245
 төрт тактілі қозғалтқыш, 176
 трансмиссия, 348
 тура ағынды, 128
 тура ағынды салқындату, 254
 турбиналар, 21
 турбомашина, 81-99
 турбоурлем, 193
 турбулентті ағын, 67
 туынды, 201
 тұйық жүйе, 231
 тұйық контуры бар бұмен салқындату, 168
 тұйық цикл, 325
 тұмандану, 169
 тұмандануды жасау, 250
 тұманды жою, 74-75
 тұндырылған, 283, 284
 тұрақты, 7
 тұрақты көлем, 46
 тұтқырлық, 66, 102
 тұтыну, 11
 тұщыландырушы, 10
 түйіндесу, 190
 түйіршіктелген, 78
 түрлері, 121, 122-124, 119
 түсу, 349
 түтікше, 117-127
 Түтікшелі жылу алмастырғышты өндірушілер қауымдастығы (ТЕМА), 117
 түтін газдарын тазалау, 20
 түтін құбыры, 217, 248
 түтіндік газдарды күкіртсіздендіру (FGD), 225, 235-237
 түтіндік науа, 146
 тығыз жыныстардағы газ, 6
 тығыз фаза, 78
 тығыздалған қабат 79
 тығыздық, 12
 тығындар, 72
 Тынық мұхитындағы Отты сақина, 338
 тізбекті реакция, 344
 тізбектің өсу ықтималдығы, 284
 тік ағын, 78
 тілім, 124, 253
 тіркелген, 121

У

уақыт тұрақтысы, 219

уран, 16
 уран диоксиді, 345

Ұ

ұйымдастырылмаған шығарылым CH_4 , 6
 ұсақ қож, 263
 ұсақ саңылаулы, 333
 Ұсақ тесіктер конденсациясы, 289
 ұсақталған көмір қабаты, 159
 ұстау және сақтау, 33-34
 ұшқынды тұтандыру қозғалтқышы, 190
 ұшпа зат, 233, 255
 ұшпа органикалық қосылыстар, 249
 ұшпалылық, 55

Ү

үдеріс, 20, 298
 үдеу, 77
 үздіксіз, 339
 үйкеліс, 11
 үрлемелі газ, 299
 үрлеу, 170
 үш реттік қысым циклы, 266-71, 290
 үш Ts, 249

Ф

фазааралық аймақ, 153
 Фаннинг, 68
 Фарадей тұрақтысы, 310
 Фенске, 140
 физикалық, 27, 273, 286
 физосорбция, 134
 Фиктің бірінші заңы, 126
 фитингтер, 70, 72, 74
 Фишер-Тропш сұйықтығы, 270, 282
 флегма, 139, 140, 147-9, 157
 флюгерленген, 21
 флюстеу, 257
 фокустық қашықтықты шоғырландырғыш, 334
 фосфор қышқылы, 318
 Френель, 334, 336
 Френель линзасы, 334
 фумарол, 371
 фуран, 18, 23, 249
 Фурье заңы, 96

Х

хемосорбция, 127
 химиялық, 325
 химиялық әлеует, 126, 304
 химиялық зат, 254, 269
 химиялық заттар, 22
 химиялық еріткіш, 27, 274, 286
 химиялық машина жасау зауыты құнының индексі, 203
 химиялық тепе-теңдік, 60

химиялық циклдарды ұйымдастыру, 303, 326
хлоракне, 31

Ц

цетан саны, 178
циклдың аяғы (EOR), 195
циклдың басы (SOR), 213
циклон, 23
циклондық пеш, 223
циркони́й диоксиді, 318

Ч

Чилтон-Колберн ұқсастығы, 145

Ш

шағылыстыру қабілеті, 113
шағын тесіктер, 136
шайнек, 124-126
шамадан тыс, 241, 261
шапшаңдатқыш, 311
шартты газ, 50
шашыраңқы, 72
шектемелі саңылау, 72
шектен асқан, 333
шеткері, 81
шоғырландырғыш, 334
шоғырландыру, 340, 341
шоғырлану, 321
шүмек, 175, 180, 182, 185
шыбық тәрізді, 27
шыбық тәрізді тары, 26
шығу, 91
шығын, 74
шың, 158, 186
Шық нүктесі, 16

Ы

ылғал, 17
ылғалды градирня, 28, 269
ылғалды скруббер, 246, 259-260
ықпал, 23
ыстық қайнаркөз, 21
ыстық құдық, 123
ыстық тұздық, 21
ысытқыш, 121, 230
ысыту, 98, 175, 236, 265-266

І

ілгері, 163
ілгерілеу, 66
ілеспе ағын, 102
ілемкті клапан, 87
ішкі ағын, 169
ішкі реформинг, 310
ішінара, 21, 63

Э

эвтрофताу, 37
эжектор, 86
эквивалентті ұзындық, 70
эквимольярлы контрдиффузия, 145
экономайзер, 217-220, 231, 244, 246, 254, 307
экономика, 254
экономикалық талдау, 205
экоуыттылық, 37
эксергия, 191-191
экспоненциалды өзгеріс, 200
экстракция, 124, 135
эксцентрілі коэффициент, 62
электр станцияларының бағдарламасы, 265
электр энергиясы мен жылудың аралас өндірісі, 294
электр энергиясының нормаланған құны, 226, 364
электрлік ионсыздандыру, 232
электрод, 311-312
электролиз, 307
электролит, 307
электромагниттік спектр, 95
электрондарды тасымалдау
коэффициенті, 311
электрондық өткізгіштік, 333
электростатикалық тұндырғыш (ESP), 224
элементтік талдау, 21-22
энергетикалық тосқауылдың
симметриясы, 340
энергия көзі, 55
энергия тұтыну, 28
энергиясы енуі, 328
энтальпия, 41
энтропия, 52
эрозия жылдамдығы, 81
Эргун теңдеуі, 77
эталонды, 338

Я

ядролық, 16-17, 344-347
ядролық реактор, 25

A-Z

API градустары, 66
Aspen Plus®, 205
Avancore®, 282
Brown DM, 302
Capstone, 323
Demkolec, 258
EscherWyss тұйық циклы, 265
GateCycle™, 188
General Electric, 282
GreatPoint Energy, 291
Grove, W., 336

- H сыныбы, 244
 H₂ сақтау, 349
 Heber геотермальді қондырғысы, 340
 теориялық қақпаққа сайма сай биіктік (HETP), 147
 intelox ершіктері, 146
 J сыныбы, 277
 LiBr жұтылуы, 322, 325-328
 LPMEOH™, 303
 Lurgi, 280
 Mitsubishi, 255
 Moody's, 70
 n-тип, 331
 NH₃ жұтылуы, 322
 NO отын, 24
 NO_x қалдықтарының төмен деңгейі, 226
 NO_x отыны, 247, 257
 Orimulsion™, 282
 p-тип, 331
 Polk county IGCC, 284, 286
 Praxair, 333
 Pro/II®, 205
 Pt сіңірілген, 319
 Pu-241, 343
 Rachford, HH, 152
 Rectisol®, 285
 REFPROP, 61
 Rolls Royce, 322
 Selexol™, 27, 136, 139, 286-9, 317, 321
 Shell, 282
 Siemens, 282
 SimaPro, 228
 Southern California Edison, 322
 Stamicarbon, 309
 SudChemie, 287
 Th-232, 343, 346
 TRIG™, 281
 U-233, 343
 U-235, 25, 343
 U-238, 25, 343, 346
 U-тектес түтікше, 119
 United Technologies, 317
 Wabash зауыты, 259
 Weyburn мұнай кен орны, 28
 Winkler, 281
 ZnO, 274