

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы
Қазақ ұлттық техникалық университеті

С. Б. Баймаханова

МЕТАЛЛУРГИЯ ЖЫЛУТЕХНИКАСЫ

Университеттің Ғылыми-әдістемелік кеңесі оқу құралы ретінде
ұсынған

Алматы 2014

ЖОК 621.1(075.8)

ББК 31.36 я 73

Б 20

Б 20 Баймаханова С. Б. Металлургия жылу техникасы. Оқу құралы.
– Алматы: ҚазҰТУ, 2014. – 210 б.

Сурет – 65. Кесте – 13. Библиогр. тізімі – 36 атау.

ISBN 978-601-228-612-0

Оқу құралында жылу техникасының теориялық негіздері бойынша материалдар берілген. Оның құрамына келесідей негізгі бөлімдер кіреді: отын және оның жануы, жылу беріліс негіздері мен заңдылықтары, газдар мен сұйықтар механикасы, ұқсастық теориясының негіздері, қара және түсті металлургия, машина жасау салаларында қолданылатын пештер құрылымының элементтері мен қосалқы жабдықтары, құрылыс материалдары, қайтарма энергетикалық және материалдық ресурстарды пайдалану әдістері мен жылуды қолданудағы экологиялық мәселелер.

Оқу құралы металлургия, машина жасау және басқа жылу техникасымен байланысты мамандар дайындайтын оқу орындарының студенттеріне арналады.

ЖОК 621.1(075.8)

ББК 31.36 я 73

Пікір жазғандар:

А.Р. Қосмұхамбетов – техн., ғыл., докторы, «Казмеханобр»

ӨЭБҒӨБ ЕМК директорының ғылыми жұмыс жөніндегі орынбасары;

Е.Е. Дильмухамбетов – Жану проблемалары институтының

жетекші ғылыми қызметкері, хим., ғыл., канд., доценті;

Д.Ұ. Смағұлов – Қ.И. Сәтбаев атындағы ҚазҰТУ, техн., ғыл.,

докторы, профессор.

Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің
2014 жылғы жоспары бойынша басылды.

ISBN 978-601-228-612-0

© Баймаханова С.Б., 2014

© ҚазҰТУ, 2014

АЛҒЫ СӨЗ

Қазіргі өнеркәсіптің өркендеуінің жалпы бағыты өндіріс тиімділігін арттыруды оларға жұмсалатын энергияның мөлшерін үнемдеуді, қоршаған ортаны ластауды төмендетумен қатар жүргізуді болжайды. Бұл бірінші кезекте өнеркәсіптің әртүрлі жылулық агрегаттар қолданатын салаларына қатысты. Өнеркәсіптің мұндай салаларына жататындар: қара және түсті металлургия, мұнай және газ, машинажасау, құрылыс және отқа төзімді материал өндірістері және т.б. Осыған байланысты еліміздің оқу орындарында өнеркәсіптің осы салаларына мамандар дайындау барысында теориялық және қолданбалы бөлімдерден тұратын өндіріс жылу техникасы бойынша курстар оқылады.

Бұл пән бойынша, осы уақытқа дейін мемлекеттік тілде шыққан оқу құралдары мен әдістемелік нұсқаулардың өте аз болуы, қазақ тілінде оқитын студенттерге курсты толық түсініп, терең игеруге мүмкіндік бермейді. Сондықтан осы оқу құралына оқырмандар атынан сын, пікір, ақыл – кеңес беріліп жатса, автор оны алғыс айта қабылдайды.

Оқу құралы Білім және ғылым министрлігі бекіткен, пәннің типтік және жұмыс бағдарламаларына сәйкес металлургия, машинажасау өндірісінің мамандықтары үшін жазылған, және жылу техникасы мен жылу энергетикасы бағытында оқитын студенттерге пайдалы бола алады.

Бүгінгі күні оқу процесін ұйымдастыруда студенттердің өз бетінше жұмыс орындауына ерекше көңіл бөлінеді. Сонымен қатар, дәрістік курстар қысқарып, көп жағдайда қысқа анықтамалар мен шолу жасаудан аса алмайды немесе проблемалық сипатта болады. Бұл жағдайда осы ғылыммен жаңадан таныса бастаған студенттердің түсінуі үшін, оқу материалының тұтасты, бірізді және түсінікті баяндалуы, ғылымның ішкі логикасының айшық көрсетілуі, олардың дұрыс таңдалуы және жеткізілуі күрделі жұмыс.

Оқу құралы автордың көптеген жылдар бойында екінші, үшінші курс студенттерімен жүргізген жұмысының тәжірибесін көрсетеді және жазу барысында, автор өзінің студенттерге

оқыған қолжазба лекцияларын, орыс тілінде жазылған оқулықтарды, өндірістердің жылулық процестері мен жабдықтары, аппараттары бойынша баспа бетінде жарық көрген ғылым мен техниканың соңғы жетістіктерін пайдаланды.

Автор өзінің осы еңбегі, жылу энергиясы қатысатын барлық машиналардың, аппараттардың және құрылғылардың жұмыс істеу принципін, конструкциялық негіздерін және есептелу ерекшеліктерін қарастыратын, шын мәнінде шексіз ғылым, жылу техникасының теориялық негіздерін студенттердің игеруін біршама жеңілдетеді деп сенеді.

Бұл еңбекте ары қарай оқулықтармен, монографиялармен, анықтамалармен және т.б. өз бетінше дайындалуына мүмкіндік беретін, теориялық білім деңгейін игеруге қажетті оқу материалдары берілген.

КІРІСПЕ

Бүгінгі күні инженерлік қызметтің кез келген саласы энергия сақтау, ресурс сақтау технологияларын әзірлеу, енгізу және қолдану проблемаларымен, энергияның түрленуі мен берілуі мәселелерімен байланысты. "Металлургия жылу техникасы" оқу құралы келешек мамандарды, жылу энергиясының алынуы, түрленуі және кеңістікте таралуы кезінде туындайтын, жалпы заңдар мен осы заңдылықтарға негізделетін процестерді есептеудің инженерлік әдістемелерін игеруде білім беруге бағытталған. Құрылымы бойынша оқу құралына үш жеке ғылым саласы енуі керек: "Термодинамика", "Жылуберіліс" және "Жану теориясының негіздері".

Термодинамика энергияның әртүрлі түрінің жылуға (және керісінше – жылудың энергияның басқа түрлеріне) түрлену заңдарын, сонымен қатар осы түрленулер өтетін физикалық процестердің ерекшеліктерін зерттейді. Көптеген принципиалдық ережелерінің, жалпы физикалық теория саласында бұрынырақ ашылғаны және тұжырымдалғанына қарамастан, термодинамика жеке ғылым ретінде XIX ғасырдың басынан бастап қарастырылды. Термодинамиканың іргетасын қалаушылар және дамуына үлкен үлес қосқан ғалымдар қатарынан М. В. Ломоносовтың, Д. Джоульдің, В. Томсонның, Р. Клаузиустың, С. Карноның, Г. Гессінің, Л. Больцманның, Н. В. Гиббстің, М. П. Вукаловичтің, А. А. Гухманның және басқалардың есімдерін кездестіреміз. М. В. Ломоносов өзінің 1744 жылы жазған «Размышления о причинах тепла и холода» атты еңбегінде жылу мен зат құрылымының бірыңғай теориясын ұсынды және масса мен энергияның сақталу заңын тұжырымдады. Термодинамиканың даму тарихы мен жеке ғалымдардың осы ғылымға қосқан үлесі туралы жан-жақты баяндалған материалдарды әдебиеттерден оқуға болады. Даму тарихы жүз елу жылдан асатын, бұл ғылым

әдістемелік тұрғыдан мінсіз нысанға және қатаң аксиоматикаға ие болды, сондықтан қазіргі кезде оның классикалық термодинамика деп аталуы өте лайықты.

Жылуберілім, нақтырақ айтсақ жылу- және массаалмасу теориясы – бұл кеңістікте жылудың (немесе массаның) таралу процестерін зерттейтін ғылым. Жылу тасымалдың негізгі ұғымдары мен заңдары жалпы физикалық теорияның қарқынды дамуы кезінде, соның шеңберінде тұжырымдалған. Мысалы, жылу өткізгіштіктің талдамалы теориясын Ж. Фурье 1822 жылы айқындаған. XIX ғасырдың ортасында ұқсастық теориясының негіздері тұжырымдалды, ал 1915 жылы оны алғаш рет, жылу алмасу процестерін зерттеу кезінде, В. Нуссельт қолданды. Одан да ертерек, жеке жылулық және гидродинамикалық құбылыстар арасындағы ұқсастық идеясын айқындай отырып, О. Рейнольдс осы теорияны гидродинамикалық процестерді зерттеу кезінде пайдаланды.

Жылу беріліс жеке ғылым ретінде XX ғасырдың басында ғана қалыптасты және соғыстан кейінгі жылдары қарқынды дами бастады. Ғылымның бұл бағытында көптеген ғалымдар шешуші үлес қосты, арасынан академиктер В. М. Кирпичевтің, М. А. Михеевтің, С. С. Кутателадзенің, Г. Н. Кружиллиннің және басқалардың жұмысын атап көрсетуге болады.

Жану теориясы негіздерінде, Нобель сыйлығының лауреаты академик Н.Н. Семенов және оның ісін жалғастырушылар ашқан жанудың химиялық реакциялары механизмі, сонымен қатар ең кең тараған отындарды жағудың әртүрлі жағдайларындағы жану процестерінің физикалық ерекшеліктері қарастырылады.

Қазіргі уақыттың алға қоятын жаңа талаптарына жауап беріп, жаңа салаларды игеріп (атомдық энергетика, ғарыш техникасы және т.б.), туындайтын проблемаларды шешуде өзінің тәсілдері мен әдістерін кеңейте отырып, бұл ғылым қарқынды дамуда. Қазақстан Республикасында да бұл ғылым саласына үлкен көңіл бөлінген. 1990 жылы Қазақ ССР Министрлер Кеңесінің №295 қаулысымен «Жану проблемалары институты» ұйымдастырылды. Өз кезеңінде институтта алынған ғылыми нәтижелерге Нобель сыйлығының лауреаты академик

Н.Н. Семенов, академиктер Я. Б. Зельдович, В. Н. Кондратьев, Н. М. Эммануэль көңіл аударған. Әл-Фараби атындағы ҚазМУ-нің химия факультетінің деканы, профессор Б.А. Беремжановтың қолдауымен химиялық кинетика және жану кафедрасы ұйымдастырылды. Кафедраның дамуына университеттің ректоры, академик Ө.А. Жолдасбеков көп үлес қосты. Кафедраға 1979-1989 жж. профессор Г. И. Ксандопуло, 1990-1997 жж. – профессор Б. Я. Колесников, ал 1998-2002 жж. – профессор З. А. Мансуров жетекшілік етті. Алғашында салалар аралық ғылыми-техникалық орталық болып құрылған бұл ұйым, 1991 жылы Қазақстан Республикасы Білім Министрлігінің жану проблемалары институты болып қайта құрылды. Институттың директоры болып техника ғылымдарының докторы профессор Г. И. Ксандопуло тағайындалды. Институт қабырғасында жүргізілетін іргелі және қолданбалы зерттеулердің нәтижелері, жану процестерінің бірқатар өзекті мәселелерін шешуде зор үлес қосты. Бұл шешімдер Қазақстанда, жақын және алыс шетелдерде тәжірибелік қолданыс табуда. Бүгінгі таңда да осы ғылымның ары қарай дамуына көптеген беделді ғалымдар, солармен қатар өздерінің дипломдық және диссертациялық жұмыстарын осы бағыттағы теориялық және тәжірибелік міндеттерді шешуге арнаған жас ғалымдар үлкен үлес қосуда. Оннан аса ғылыми бағытта зерттеу жұмыстарымен айналысатын бұл институт жану проблемаларынан өзге, өздігінен таралатын жоғары температуралық синтездеу әдісіне негізделетін, жаңа отқа төзімді материалдарды әзірлеуде де көп ғылыми еңбектер жасауда.

Осы үш ғылымның тағы бір ерекшелігін атап өтейік: олар нақты инженерлік тәжірибеге бағдарланған және әрқашан өзінің тұжырымдары мен қорытындыларын бірмәнді тәжірибелік ұсынысқа және есептеу әдістемелеріне дейін жеткізеді.

Компьютерлік техника мен ақпараттық технологияның қарқынды дамуы, зерттеушілер үшін зерттелетін құбылыстарды сандық модельдеуді салыстырмалы жеңіл жүргізуге мүмкіндік беретін қуатты құрал болуда. Жылу берілістің көптеген мәселелерін шешуде тура осындай тәсілдеме негізгілердің бірі болады, өйткені бұл кезде қойылған міндеттерді шешудің еңбек және қаржы шығындары едәуір қысқарады.

Біз оқитын пәннің осы үш үлкен бөлімі бойынша терең білімді игермейінше, инженерлік қызметпен табысты айналысу мүмкін емес, сондықтан жылу техникасының теориялық негіздерін оқуға өте үлкен мән беріледі, әсіресе металлургия және жылу энергетикамен байланысты келешек мамандар үшін.

Жоғарыда айталғандай осы оқу құралына техникалық термодинамика, жылу беріліс және жану теориясының негіздерімен қатар, металлургиялық пештер мен пеш жабдықтары және жылуды қолданудың экологиялық аспектілері бойынша дәрістік материалдарды енгізу жоспарланды. Жұмыс барысында оқу құралына тек дәрістік материалдар емес, сонымен қатар студенттердің өз бетінше дайындалуына шығарылған материалдарды енгізу қажеттігі айқындалды. Оқылатын барлық материалдардың бір жерден табылғаны дұрыс, керісінше жағдайда баяндау логикасы үзіледі. Дегенмен, бұл кезде оқу құралының көлемі 1,5-2 есеге дейін артып кететін болды. Осы себепті техникалық термодинамика бөлімін жеке оқу құралы ретінде баспаға ұсыну шешімі қабылданды және орындалды.

Одан өзге, автор, түпкілікті талдамалы теңдеулерді алуда ресми математикалық өрнектермен материалды жүктемей, процестердің физикалық сипаттамаларына ерекше көңіл аударуға тырысты.

Дегенмен, сипатты баяндалуына қарамастан оқу құралында жеке тапсырмаларды, курстық немесе дипломдық жұмыстардың есептеулерін орындау үшін қажетті негізгі теңдеулер келтірілді (жылу өткізгіштіктің дифференциалдық теңдеуі, отынның жануын есептеу теңдеулері, пештегі газ қозғалысының, түтін арналарының есептелу жолдары, металлургиялық пештегі жылу балансын құру тәртібі және т.б.).

Жоғарыда келтірілген жеңілдіктерді ескергенмен, жылу техникасын толығымен оқу құралында баяндау оңай емес. Автор, егер оқу құралы әрбір студентке жетсе, олардың дәрістік сабақты игеруі жеңілденер еді деп сенеді.

1 ТАРАУ

ОТЫНДАРДЫҢ СИПАТТАМАСЫ ЖӘНЕ ОТЫННЫҢ ЖАНУ ТЕОРИЯСЫНЫҢ НЕГІЗДЕРІ

1.1. Отынның сыныптамасы мен құрамы

Жердегі жылу энергиясының негізгі көзі – Күн, бірақ оның сәулелі энергиясы аз пайдаланылады. Желдің, су қозғалысының энергиясы, атомдық энергия үлкен мөлшерде қолданылады. Дегенмен, жылу энергиясының басты бөлігі, қазбалы отындарды (көмірді, шымтезекті, мұнайды, табиғи газды) пайдалану нәтижесінде алынады.

Өнеркәсіптік қондырғыларда жылу өндірудің келесідей әдістері бар: жанатын отынның химиялық энергиясынан жылу өндіру; электр энергиясынан жылу өндіру; бастапқы материалдардың жанғыш компоненттерінің тотығуынан жылу өндіру. Заманауи металлургиялық жылу агрегаттары энергияның үлкен мөлшерін пайдаланады. Қолданылатын энергияның негізгі түрлері – жылулық және электрлік, шикізат материалдарының химиялық энергиясы салыстырмалы аз көлемде пайдаланылады.

Жануы кезінде жылудың үлкен мөлшерін бөлетін және энергетикалық, өнеркәсіптік, жылытқыш қондырғыларда жылу энергиясын алу көзі ретінде пайдаланылатын жанғыш зат *отын* деп аталады.

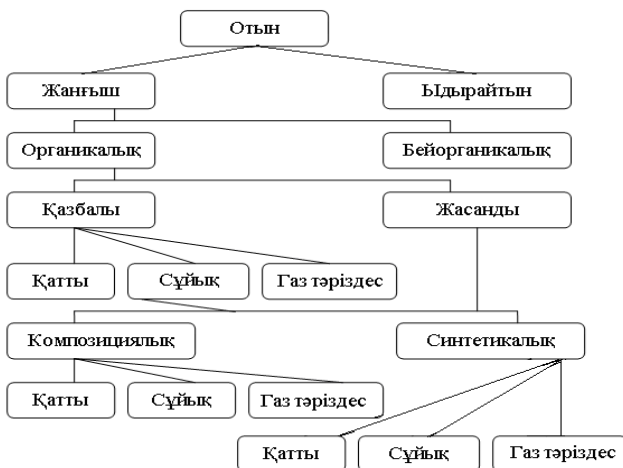
Тағайындалуы бойынша отын энергетикалық және технологиялық болып бөлінеді. *Технологиялық* отынға жылу көзі ғана емес, технологиялық процестің компоненттері де бола алатын отын түрлері, ал *энергетикалыққа* – берілген технологиялық процесті жүзеге асыру үшін қажетті, энергияның жұмысшы түрі ретіндегі тек қана жылу көзі болатын отын түрлері жатады.

Жылу бөле жүретін реакцияның типіне қарай, отын органикалық және ядролық болып бөлінеді. Органикалық отындарда жылу оның жанғыш құрамдастарының оттегімен тотығуының химиялық реакциясы, ал ядролық отындарда – ауыр элементтер (уранның, плутонидің және т.б.) ядроларының ыдырауы (бөлінуі) нәтижесінде бөлінеді. Біз өнеркәсіп пен

энергетикада қолданылатын органикалық отынды қарастырамыз. Отынның жалпы сыныптамасы 1 – суретте келтірілген.

Органикалық отын қазбалы табиғи және жасанды болып бөлінеді. Қазбалы табиғи отын – бұл, миллиондаған жылдар бұрын болған өсімдіктер мен микроорганизмдердің биологиялық және химиялық түрленуінің өнімі. Ол жер қойнауында шоғырланған.

Жасанды органикалық отынды табиғи қосылыстарды сәйкес өңдеуден өткізу жолымен адам жасайды. Жасанды отын композициялық және синтетикалық болып екіге бөлінеді. Композициялық отын жанғыштардың механикалық қоспасын көрсетеді (мысалы, пропан-бутан), синтетикалық отын – бұл жанғыш заттарды термохимиялық өңдеуден алынатын өнім. Өңдеу нәтижесінде олар тұтынушыларды қанағаттандыратын жаңа қасиеттер алады, оларға жататындар: мұнайды өңдеу өнімдері, көмірден алынатын сұйық отын, өсімдіктен алынған этанол және т.б.



1-сурет. Отынның жалпы сыныптамасы

Дегенмен, оттегімен әрекеттескенде жылу энергиясын бөлуге қабілетті барлық заттарды отын деп есептеуге болмайды.

Отын ретінде келесідей ерекше талаптарды қанағаттандыратын затты атау қабылданған:

1) отынның қоры экономикалық және экологиялық тұрғыдан алуға, ұзақ уақыт сақтауға және пайдалануға жеткілікті болуы қажет;

2) жану өнімдері газ тәріздес күйде болуы қажет;

3) жану өнімдері адам мен қоршаған орта үшін зиянсыз болуы қажет;

4) тасымалдануы және тұтынушыларға жеткізілуі механикаландыруға және автоматтандыруға икемді болуы қажет;

5) жану процесі бақылануы және басқарылуы қажет.

Бұл – құрамында көміртегі, оттегі және олардың қосылыстары болатын органикалық заттар. Олар табиғатта ағаш, шымтезек, тақтатаас, көмір, мұнай, жанғыш газдар және басқа түрінде кездеседі.

Отын жаралуы және агрегаттық күйі бойынша сыныпталады. Жаралуы бойынша отын табиғи және жасанды болып бөлінеді. Табиғи отын барлық уақытта оған қойылатын талаптарды қанағаттандыра алмайды, сондықтан отынның қасиетін жақсарту немесе агрегаттық күйін өзгерту үшін оны өңдеуден өткізеді. Өңдеу нәтижесінде алынатын отын жасанды деп аталады. Агрегаттық күйі бойынша отын қатты, сұйық және газ тәріздес болып бөлінеді. Отынның жаралуы және агрегаттық күйі бойынша бөлінуі 1-кестеде келтірілген.

1-кесте

Жаралуы және агрегаттық күйі бойынша отынның сыныпталуы

Агрегаттық күйі	Жаралуы	
	табиғи	жасанды
Қатты	Ағаш, шымтезек, қоңыр және тас көмір, жанғыш тақтатастар	Ағаш көмірі, брикеттер, кокс, көмір шаңы
Сұйық	Мұнай	Бензин, керосин, мазут, шайырлар, майлар, спирт
Газ тәріздес	Табиғи газ, қосалқы газ	Кокстық, домналық, конвертерлік, генераторлық және су газы

Отынның сапасы оның химиялық құрамымен, жану жылуымен, қыздыруға қатынасымен анықталады.

Отынның құрамын анықтау үшін техникалық және химиялық талдаулар жүргізіледі.

Техникалық талдаумен отын құрамындағы ылғалдықтың, күлдің, ұшпа заттардың мөлшерін; кокстық қалдықтың қасиеттерін және жану жылуының шамасын анықтайды. Химиялық талдау отынның құрамында қандай заттардың барын және қандай мөлшерде болатынын анықтауға мүмкіндік береді. Қатты және сұйық отындар, молекулярлық құрылымы жеткілікті зерттелмеген және минералдық қоспалар мен ылғалдық кіретін жанғыш элементтердің күрделі қосылыстарынан тұрады. Қатты және сұйық отынды химиялық талдау ерекшелігіне байланысты, талдау олардың құрамын отынның осы түрлеріне кіретін элементтер түрінде береді.

Бұл отындарды элементарлық химиялық талдау олардың құрамындағы қосылыстардың химиялық табиғатын ашпайды, сондықтан олардың қасиеттері туралы толық көрініс бере алмайды, дегенмен отынның жану есептеулерін жүргізуге мүмкіндік береді.

Газ тәріздес отындардың құрамы осы отынды құрайтын қосылыстар түрінде беріледі.

Отынның құрамын анықтау үшін газ талдағыштар мен хроматографтар қолданылады.

Енді отынның құрамын қарастырайық.

Отынның сапалық көрсеткіштері – оның химиялық құрамы, жану жылуы және жану температурасы.

Кез келген отынның компоненттері жанғыш элементтер, жанбайтын қосылыстар немесе балласт болады (2 – сурет). Отынның жанғыш элементтеріне жататындар: көміртегі – C , сутегі – H және ішкі балластпен (оттегі – O және азот – N) күрделі химиялық қосылыс түзейтін, жанғыш күкірт – S . Сыртқы балластты күл – A мен ылғалдық – W құрайды. Газ тәріздес отын жанғыш газдардың (CO , H_2 , метан CH_4 және басқа күкіртсутектер C_mH_n), жанбайтын газдардың (CO_2 , O_2 , N_2) және су буының H_2O механикалық қоспасынан тұрады.



2-сурет. Отын компоненттерінің бөлінуі

Көміртегі (С) – отынның негізгі жанғыш элементі, еркін күйде де, қосылыс түрінде де болады. Бір килограмм С жанғанда 33,9 МДж жылу бөлінеді. Бірақ, жану процесін дұрыс ұйымдастырмаған жағдайда (мысалы, ауаның жетіспеуі кезінде) жану өнімі көміртегінің өте улы оксиді СО болады және бар-жоғы 9,2 МДж жылу бөлінеді, мұны білу керек. Көміртегінің мөлшері 50 %-дан (ағашта) 95 % дейін (антрацитте), сұйық отында – 85-90 % дейін. Отынның геологиялық жасының артуымен С мөлшері жоғарылайды.

Сутегі (Н) маңыздылығы бойынша отынның екінші жанғыш элементі. Отынның құрамында еркін күйде немесе оттегімен, күкіртпен, көміртегімен қосылыс түрінде болады. Оттегімен байланысқан күйде, ол жануға қатыспайды, бұл кезде ол – балласт. Оның қатты және сұйық отындағы мөлшері – 1-15 %, табиғи газда – ондаған пайызға жетеді. Отынның құрамында сутегінің мөлшері салыстырмалы төмен болғанымен, оның тотығуы кезінде энергияның үлкен мөлшерде бөлінуіне байланысты, пештегі қажетті температураны алуда сутегінің үлесі маңызды. Экологиялық тұрғыдан қарағанда, сутегі отынның ең қауіпсіз компоненті.

Оттегі (О) мен **азот (N)** отын құрамындағы балласт, өйткені олардың болуы жанғыш элементтер мөлшерін азайтады. Одан өзге, оттегі отындағы сутегімен және көміртегімен қосылып, осы элементтерді жану процесінен аластатады, ал отынның жану жылуы төмендейді. Ағаш пен шымтезекте оттегінің мөлшері жоғары (44 % дейін), сұйық отында – 1,5 % жуық. Атмосфералық ауада отынды жаққан кезде азот тотықпайды, жану өнімдеріне еркін түрде өтеді. Қатты

отындағы мөлшері 0,5-1,0 % шегінде ауытқиды, газ тәрізді де – 60 % дейін болады. Азот барынша зиянды компонент, өйткені азотқұрамды қосылыстар жанған кезде, жоғары температуралы оттықтарда өте улы оксидтер NO және NO₂ түзіледі, экологиялық қауіпті қосылыстар көзі десе болады.

Күкірт (S) қатты отында үш түрде бола алады: 1) көміртегімен, сутегімен және оттегімен күрделі жоғары молекулярлы органикалық қосылыстар түрінде (S_о); 2) темірмен және мыспен қосылыс түрінде (FeS₂-темір колчеданы, CuS - мыс колчеданы), бұл колчедандық күкірт (S_к); 3) сульфаттық қосылыстар түрінде – сульфаттық күкірт (S_с): $S_{жал} = S_o + S_k + S_c$

Органикалық және колчедандық күкірт отынның жануы кезінде жылу бөле отырып, тотығады, сондықтан жанғыш болып табылады. Сульфаттық күкірт отынның минералдық бөлігіне CaSO₄, FeSO₄ және басқа сульфаттар түрінде кіреді, сондықтан жану процесінде ары қарай тотықпайды. Күкірттің сульфаттық қосылыстары күлге өтеді. Қатты отындарда күкірттің мөлшері жоғары емес. Мұнайда күкірт бейорганикалық қосылыстар құрамында, мұнай кен орындарының ілеспе газдарында күкіртсутек H₂S және күкіртті газ SO₂ түрінде аз мөлшерде болады, табиғи газдар құрамында жоқ дерлік.

Отынның жануы кезінде түзілетін SO₂ және әсіресе ілеспе SO₃ газдары конструкциялардың металдық бөліктерін коррозияға ұшыратады және қоршаған ортаны улайды. Сондықтан күкірт отынның зиянды және жағымсыз қоспасы болады.

Күл (А) – отынның толық жануынан соң алынатын жанбайтын қалдық. Бұл отындағы әртүрлі минералдық заттардың қоспасы: саздың, кремнеземнің, темір тотықтарының, әктің және т.б. Оның тас көмірдегі мөлшері 4-25 %, ағашта 0,6 %. Сұйық отындардың күлділігі онда еріген тұздар мен механикалық қоспалардың мөлшеріне тәуелді болады. Газдар қалдықсыз жанып кетеді.

Ылғалдық (W) – отынның зиянды қоспасы, өйткені отынның бір килограммындағы жанғыш заттардың үлесін төмендетеді. Отынның жануы кезінде бөлінген жылудың бір бөлігі ылғалды буландыруға жұмсалады. Отын ылғалдығы сыртқы және ішкі болып бөлінеді. Сыртқы ылғалдық отынды

казып алу, тасымалдау және сақтау жағдайларына тәуелді, ал ішкі ылғалдық тек қана отынның қасиеттеріне тәуелді. Ол отынның микроскопиялық кеуектерін толтырады және жай кептіру арқылы оны аластау мүмкін емес. Отынның ішкі ылғалдығын кетіру үшін, оны 103-105 °С дейін қыздырып, жуық шамамен 4 сағатқа дейін ұстау қажет. Отын құрамындағы ылғалдық мөлшері 5-60 % болады.

Отынның маңызды құрамаларының бірі – ұшпа заттар мен кокс. Ұшпа заттар – бұл, отынды ауасыз қыздыру кезінде бөлінетін газ тәріздес өнім. Қатты қалдық кокс деп аталады. Ұшпа заттардың шығысы отынның жану процесіне үлкен әсер етеді: шығыс жоғары болғанда отын жеңіл тұтанады, жарық жалынмен жанады. Кокс біріккен, балқып қосылған және ұнтақ тәрізді болады. Отын мен кокстың бірігуі оның жануының мүмкіндігі мен әдістерін анықтайды.

Қатты және сұйық отынның құрамы

Отынның тұтынушыға түсетін түрі жұмысшы деп, ал оның массасы жұмысшы масса деп аталады. Отынның химиялық құрамы күрделі және әдетте белгісіз болатындықтан, отынды оны құрайтын элементтердің пайызбен берілген массалық мөлшерімен сипаттайды. *Жұмысшы массаға* келтірілген элементарлық құрамы «жұ» индексімен белгіленіп, келесі түрде жазылады:

$$C^{\text{жұ}} + H^{\text{жұ}} + S^{\text{жұ}} + N^{\text{жұ}} + O^{\text{жұ}} + A^{\text{жұ}} + W^{\text{жұ}} = 100 \% ; \quad (1.1)$$

Егер отыннан ылғалдықты толығымен кетірсе, онда мұндай массаны құрғақ деп атайды. Құрғақ массаның элементарлық құрамы «к» индексімен белгіленіп, келесідей жазылады:

$$C^{\text{к}} + H^{\text{к}} + S^{\text{к}} + N^{\text{к}} + O^{\text{к}} + A^{\text{к}} = 100 \% ; \quad (1.2)$$

Егер осыдан күлді де ойша кетірсек, онда жанғыш массаны аламыз, «жа» индексімен белгіленеді:

$$C^{\text{жа}} + H^{\text{жа}} + S^{\text{жа}} + N^{\text{жа}} + O^{\text{жа}} = 100 \% . \quad (1.3)$$

Отынның әртүрлі массасының құрамын салыстырған кезде, әрбір компонент мөлшерінің жұмысшы массада органикалық өтуі кезінде жоғарылайтынын байқауға болады. Жылу техникалық

жабдықтарда массасы жұмысшы болатын отын қолданатындықтан және оның құрамы кез келген басқа массаның пайыздық мөлшерімен беріле алатындықтан, отынның жануын есептеу үшін құрамды жұмысшы массаға қайта есептеуді білу керек. Элементарлық құрамды қайта есептеу сәйкес пропорцияларды құру жолымен орындала алады. Отын құрамын бір массадан екіншісіне қайта есептеу коэффициенттері 2-кестеде келтірілген.

2-кесте

Отын құрамын бір массадан екіншісіне қайта есептеу
коэффициенттері

Отынның берілген массасы	Отынның қайта есептелетін массасы		
	жанғыш	күрғақ	жұмысшы
жанғыш	1	$\frac{100 - A^K}{100}$	$\frac{100 - (A^{жұ} + W^{жұ})}{100}$
күрғақ	$\frac{100}{100 - A^K}$	1	$\frac{100 - W^{жұ}}{100}$
жұмысшы	$\frac{100}{100 - (A^{жұ} + W^{жұ})}$	$\frac{100}{100 - W^{жұ}}$	1

Жылутехникалық есептеулер жұмысшы масса және соған қатысты құрам бойынша есептеледі.

Газ тәріздес отынның құрамы

Газ тәріздес отын жанатын және жанбайтын газдар қоспасынан тұрады. Жанатын бөлігі көмірсутектерден C_mH_n , сутегіден H_2 , көміртегі тотығынан CO және күкіртті сутегіден H_2S тұрады. Жанбайтын элементтер құрамына азот N_2 , көмір қышқыл газы CO_2 және оттегі O_2 кіреді. Газ тәріздес отынның құрамы көлемдік үлеспен беріледі және жалпы түрде келесідей жазылады:

$$C_mH_n + H_2 + CO + H_2S + O_2 + N_2 + CO_2 + \dots = 100 \%. \quad (1.4)$$

Табиғи және жасанды газ тәріздес отындардың құрамы әртүрлі. Табиғи газ метанның CH_4 жоғарғы мөлшерімен

(93÷98 % дейін) сипатталады, одан өзге аз мөлшерде басқа көмірсутектер болады: этан C_2H_6 , пропан C_3H_8 , бутан C_4H_{10} , этилен C_2H_4 және пропилен C_3H_6 . 1 м^3 CH_4 жанған кезде 35 800 кДж, этилен C_2H_4 – 59 000 кДж жылу бөлінеді. Кокстық газ құрамында 50–60 % дейін сутегі H_2 болады, ол ауадан 14,5 ретке жеңіл. 1 м^3 H_2 жанған кезде 10 800 кДж жылу бөлінеді. Негізінен жанғыш газдардың құрамында аз мөлшерде сутегі болады. Домналық газда 30 % дейін, кейде одан жоғары көміртегі тотығы CO болады, бұл газдың 1 м^3 жанған кезде 12 770 кДж жылу бөлінеді. Бұл газ түссіз және иіссіз, өте улы. Құрамында 0,5 % CO бар ауамен 5–6 минут демалу өлім қауіпін тудырады.

Кейбір газдардың құрамында күкіртті сутегі H_2S бар – жағымсыз иісті, жоғары уытты ауыр газ. Ол пештің металдық бөліктерінің және газ құбырларының коррозиясын тудырады, газда оттегі мен ылғалдық болған кезде коррозия күшейе түседі. 1 м^3 H_2S жанған кезде 23 400 кДж жылу бөлінеді.

Қалған газдар $O_2 + N_2 + CO_2$ және су буы W балласт болып табылады. Олардың болуы отынның жану температурасын төмендетеді. Жасанды газдарда жанғыш құрамдастар мөлшері (сутегі мен көміртегі тотығы) 25÷45 % жетеді, балластта азот пен көмір қышқылы басым – 55÷75 %. Газ құрамындағы шаңның, күйенің, шайырлардың, кейде ылғалдықтың мөлшерлері $г/м^3$ беріледі. Газдағы ылғалдық мөлшері оның температурасына тәуелді болады, бұл тәуелділік 3 – кестеде келтірілген.

3-кесте

Газдағы ылғалдық пен температураның тәуелділігі

$t, ^\circ C$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$g, \frac{г}{м^3}$	4,8	9,8	18,9	35,1	63,1	111,4	196	361	716

Газдағы ылғалдық көлемін (%) анықтау үшін, келесі әрекеттер орындалуы қажет. 1 г·моль H_2O $22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3$ көлемді алады.

Белгілейік:

$H_2O^{bl.2}$ – ылғалды отындағы ылғалдың көлемдік мөлшері, %;

$g_{H_2O}^{bl.2}$ – ылғалдың массалық мөлшері, г/м³.

Судың грамм-молі 18 г болады. 1м³ ылғал газдағы су буы массасын анықтайды.

$$g_{H_2O}^{bl.2} = \frac{18}{22,4 \cdot 10^{-3}} \times \frac{H_2O}{100} = 8,036 H_2O, \text{ г/м}^3. \quad (1.5)$$

Құрғақ газға келтірілген су буының массасы:

$$g_{H_2O}^{қз.} = g_{H_2O}^{bl.2} \frac{100}{100 - H_2O} = \frac{803,6}{\frac{H_2O}{H_2O} - 1}, \text{ г/м}^3 \quad (1.6)$$

Осылай, газдағы ылғалдық көлемін теңдеу арқылы (5) анықтауға болады

$$H_2O^{bl.2} = \frac{g_{H_2O}^{bl.2}}{8,036}, \text{ \%}, \text{ егер } g_{H_2O}^{bl.2} \text{ белгілі болса,}$$

немесе (6) теңдеуден

$$H_2O^{қз.} = \frac{100 g_{H_2O}^{қз.}}{8,036 + g_{H_2O}^{қз.}}, \text{ \%} \text{ егер } g_{H_2O}^{қз.} \text{ белгілі болса.}$$

Су буының белгілі көлемі бойынша ылғалды газ құрамын есептеуге болады:

$$X_{ыл.г} = K \times X_{құр.г}, \quad (1.7)$$

мұндағы $X_{ыл.г}$ және $X_{құр.г}$ – ылғал және құрғақ газдағы қандай да бір құраманың, мысалы метанның CH_4 , мөлшері;

K – қайта есептеу коэффициенті.

$$K = \frac{100 - H_2O^{bl.2}}{100} \quad (1.8)$$

1.2. Отынның жану жылуы

Кез келген отынның негізгі сипаттамаларының бірі – жану жылуы, яғни отын массасының немесе көлемінің бір бірлігі толық жанған кезде бөлінетін *жылу мөлшері*. Отынның жанғыш компоненттерінің C , H және S оттегімен толық тотығуы толық жану деп аталады. Жану жылуы Q әріпімен белгіленеді, оның өлшем бірлігі кДж/кг (қатты және сұйық отын үшін), кДж/м³ (газ тәріздес отын үшін) және отынның тек қана химиялық құрамына тәуелді болады.

Отынның жануы кезінде түзілетін су бу тәріздес немесе конденсатталған күйде бола алады, бұл алынған жылудың шамасына әсер етеді. Сондықтан жану жылуы *төменгі* $Q_{\text{ж}}^{\text{жү}}$ және *жоғарғы* $Q_{\text{жог}}^{\text{жү}}$ болып бөлінеді. Жанудың жоғарғы жылуына отынның жану өнімдеріндегі су буының конденсатталуы кезінде бөліне алатын жылу мөлшері кіреді. Отынның жану өнімдеріндегі ылғалдық $H^{\text{жүм}}$ және $W^{\text{жүм}}$ жануы кезінде түзіледі. Жану өніміне ауа ылғалдылығы да түседі, бірақ оны ескермейді. Отында $H^{\text{жү}}$ кг сутегі болғанда, жану кезінде $9H^{\text{жү}}$ кг ылғалдық түзіледі. Бұл кезде жану өнімдерінде $(9H^{\text{жү}} + W^{\text{жү}})$ кг ылғалдық болады және 1 кг ылғалдықты бу күйіне келтіру үшін 2 500 кДж жылу жұмсалады. Егер су буы конденсатталмаса, онда ылғалдықты буландыруға жұмсалған жылу пайдаланылмайды. Бұл кезде жанудың төменгі жану жылуын аламыз. Тәжірибе жүзінде, барлық уақытта солай болады. Сондықтан отынның негізгі сипаттамасы ретінде $Q_{\text{ж}}^{\text{жү}}$ қабылданады. Жану жылуын отынның кез келген массасына қатысты есептеуге болады, бірақ көбінесе оны жұмысшы массаға қатыстырады.

$$Q_{\text{ж}}^{\text{жү}} = Q_{\text{жог}}^{\text{жү}} - 25(9H^{\text{жү}} - W^{\text{жү}}), \text{ кДж/кг.} \quad (1.9)$$

Қатты және сұйық отынның элементарлық құрамы белгілі болған жағдайда, олардың жану жылуын (кДж/кг) Д.И. Менделеев ұсынған теңдеу барынша дәл нәтиже береді:

$$Q_{\text{ж}}^{\text{жү}} = 340C^{\text{жү}} + 1035H^{\text{жү}} - 109(O^{\text{жү}} - S^{\text{жү}}) - 25W^{\text{жү}}, \text{ кДж/кг.} \quad (1.10)$$

мұндағы $C^{жұ}$, $H^{жұ}$ және т.б. отынның жұмысшы массасының компоненттері, массалық %.

Бұл теңдеудегі коэффициенттер эмпирикалық алынған, жеке элементтердің жану жылуынан бірнеше ерекшелікті болады.

Құрғақ газдың жану жылуын ($кДж/м^3$) көлемдік құрамда (%) және компоненттерінің белгілі жану жылулары бойынша анықтайды:

$$Q_{ж}^{жұ} = 358C_{H_4} + 640C_{C_2H_6} + 915C_{C_3H_8} + 1190C_{C_4H_{10}} + 1465C_{C_5H_{12}} + 127CO + 108H_2 + 234H_2S, кДж/м^3. \quad (1.11)$$

Газ тәріздес отынның маңызды компоненттерінің жану жылуы 4-кестеде келтірілген.

4-кесте

Кейбір газдардың жану жылуы

Газ	Теңдеуі	$Q_{ж}^{жұ}$ ($кДж/м^3$)
Көміртегі оксиді	CO	12770
Сутегі	H_2	10800
Метан	CH_4	35800
Этан	C_2H_6	63600
Пропан	C_3H_8	91300
Бутан	C_4H_{10}	118500
Пентан	C_5H_{12}	146500

Тәжірибе жүзінде отынның жануынан бөлінетін жылу оның жану жылуынан төмен болуы мүмкін. Бұл отынның толық жанбауын көрсетеді. Әрине, мұндай жағдайларда отынның шығыны оның есептелген мәнінен бірқатар көп болады.

Отынның толық жанбауы химиялық, физикалық және механикалық болып жіктеледі. Химиялық және физикалық толық жанбаудың орын алуын шығатын жану өнімдерінің құрамы бойынша айқындай аламыз.

Егер жану өнімдерінде жанғыш қосылыстар болып (CO , H_2 , CH_4 , ауыр көмірсутектердің біршама мөлшерлері), ал оттегі

болмаса, онда химиялық толық жанбау туралы айтуға болады. Бұл құбылыстың негізгі себебі – оттегінің жетіспеуі.

Отынның қандай түрін қолдану тиімді екенін салыстыру және өнім бірлігін өндіруге отын шығынын бағалау үшін *шартты отын* деген ұғым енгізілген.

Шартты отын деп жану жылуы 29330 КДж/кг тең отынды атау қабылданған (мысалы, жақсы тас көмір бола алады). Қатты және сұйық отынды шарттыға есептеу үшін *калориялық эквивалент* ұғымы қолданылады:

$$\Delta_k = Q_{\text{ж}}^{\text{ж\у}} / Q_{\text{ш.о}} = Q_{\text{ж}}^{\text{ж\у}} / 29330, \text{ кг ш.о./кг.} \quad (1.12)$$

ал газ тәріздес отынды есептеу үшін – *жылу тығыздығы коэффициенті*:

$$\Delta_t = Q_{\text{ж}}^{\text{ж\у}} / Q_{\text{ш.о}} = Q_{\text{ж}}^{\text{ж\у}} / 29330, \text{ м}^3 \text{ ш.о./кг.} \quad (1.13)$$

Жылу тығыздығы коэффициенті ұғымы отынның қорын, тасымалдануын және сақталуын бағалауда жиі қолданылады. Шартты отын ұғымы әртүрлі жағдайларда немесе әртүрлі режимде жұмыс істейтін бір типті жабдықтардың жұмысының тиімділігін бағалауға мүмкіндік береді.

1.3. Жану теориясының элементтері

Жану – бұл қарқынды жылу бөлумен және температураның жоғарылауымен жүретін, отынның жанғыш элементтерінің тотықтырғышпен қосылуының химиялық реакциясы. Үздіксіз жану үшін, жану аймағына отын мен тотықтырғыштың үздіксіз келтірілуі, олардың қарқынды араласуы және жану өнімінің шығарылуы қажет.

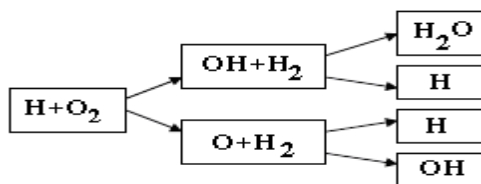
Жану процесі гомогенді және гетерогенді болып бөлінеді. Гомогендік жану кезінде отын мен тотықтырғыш газ тәріздес күйде беріледі (яғни, «газ+газ» жүйесімен сипатталады), ал гетерогендік жану кезінде – реакция әртүрлі агрегаттық күйдегі заттардың арасында өтеді ("қатты дене+газ" немесе "сұйық+газ" жүйесімен сипатталады).

Тотығу реакциясы жанғыш молекулаларының оттегі молекулаларымен соқтығысуы кезінде ғана жүреді. Бірақ

соқтығысатын барлық молекулалар реакцияға түсе бермейді, ішкі молекулярлық байланыстарды бұзу үшін энергиялық қоры жететін молекулалар ғана әрекеттесе алады. Төменгі температурада молекулалар энергиясы активтену энергиясына біршама аз, температураның артуымен молекулалар энергиясы жоғарылайды және барлық химиялық реакциялар үлкен жылдамдықпен өтеді, өйткені активтенген молекулалар саны көбейеді.

Жану реакциясының негізгі ерекшеліктері, академик Н.Н. Семенов тұжырымдаған, тізбекті реакциялар теориясымен түсіндіріледі. Бұл теорияға сәйкес, жану реакциялары үздіксіз қалпына келетін активтендірілген орталықтар тізбегінің түзілуімен өтеді. Жану кезіндегі еркін радикалдардың, стехиометрияны ескерусіз, тізбекті реакциясының түзілу механизмі 3 – суретте келтірілген.

Тізбекті реакцияларды қоздырушылар – активтенген атомдар және аралық кешендерді түзеп, басқа атомдармен жеңіл қосыла алатын еркін валентті бөлшектер (оларды радикалдар деп атайды). Бұл кешендердің басқа атомдармен немесе топтармен ары қарай өзара әрекеттесуі реакцияның түпкілікті өнімін түзеді және саны көшкіндей артатын, жаңа радикалдардың бөлінуіне келтіреді.



3-сурет. Тізбекті реакциялар сұлбасы

Сұлбадан байқағандай, сутегінің жалғыз радикалы оттегі молекуласымен соқтығысып, екі аралық түрленуден соң екі радикал береді, содан соң олар төртеу болады және т.с.с. Яғни реакция, массалық қатынасқа сүйеніп жазылатын, келесі теңдеу бойынша өтпейді:



Бастапқы өнімдер мен реакциялар нәтижесін ғана көрсететін, бірақ жанудың химизмі мен кинетикасын көрсете алмайтын, мұндай теңдеулерді стехиометриялық қатынастар деп атайды. Тізбекті реакциялар өте жоғары жылдамдықпен өтеді.

Химиялық реакцияның жылдамдығы w_x әрекеттесетін заттардың концентрациясына, реагенттер температурасы мен қысымына тәуелді болады

$$w_x = k C_A^a C_B^b, \quad (1.15)$$

мұндағы C_A және C_B – концентрациялар;

k – реакция жылдамдығының константасы;

a және b – әрбір концентрацияның әсерін сипаттаушы тәжірибелік константалар.

Реакция жылдамдығының константасы температура жоғарылаған кезде, Аррениус заңы бойынша артады:

$$k = k_0 e^{-E/(RT)}, \quad (1.16)$$

мұндағы E – активтену энергиясы (газ қоспалары үшін 85-170 МДж/кг).

Тізбекті реакциялар тармақтанумен өтетін қоспа температурасы қоспаның тұтану температурасы деп аталады. Газдар үшін бұл 500-750 °C.

Отынның жану уақыты екі бөліктен тұрады:

$$\tau = \tau_{\text{физ.}} + \tau_{\text{хим.}} \quad (1.17)$$

$\tau_{\text{физ.}}$ уақытта отынның тотықтырғышпен түйісуі өтеді, ал $\tau_{\text{хим.}}$ – химиялық реакцияның тікелей өту уақыты. Егер $\tau_{\text{физ.}} \ll \tau_{\text{хим.}}$ болса, онда жану *кинетикалық* деп аталады. Кинетикалық жану газдық қоспалар үшін сипатты, бұл кезде оттегі отынның жануы үшін теориялық қажетті мөлшерден жоғары болады. Егер $\tau_{\text{физ.}} \gg \tau_{\text{хим.}}$ болса, онда жану – *диффузиялық*. Жанудың бұл жағдайы отын мен тотықтырғышты даралап беріліп, ал олардың араласуы өзара диффузия арқылы жүзеге асырылғанда орын алады.

Жанудың тікелей өтетін аймағы жалын деп аталады. Егер газ қоспасы ұқыпты дайындалған (араластырылған) болса, онда жалын аз қалыңдықты (0,003-тен 0,6 мм дейін) – бұл жалын

аймағының сипатын көрсетеді. Жалын аймағының орын ауыстыру жылдамдығы 6-30 м/с құрайды. Қысымды жоғарылатқан кезде жалын аймағының жылдамдығы күрт артады және жану детонацияға өтеді – бұл, тәжірибе жүзінде жарылысты жану, жалынның жылдамдығы секундына бірнеше километрге жетеді.

Жалынның жылдамдығы қоспадағы жанғыш газдың пайыздық мөлшеріне тәуелді. Кедей (жанғыш бөлігі аз) және өте бай қоспалар кәдімгі әдіспен тұтанбайды және жанбайды (5 – кесте). Қоспа температурасы артқан кезде, жалынның жылдамдығы жоғарылайды.

5-кесте

Газ-ауалы қоспалардың концентрациясы мен температурасының мәндері ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p = 0,1\text{ МПа}$)

Газ	Химиялық тендеуі	Концентрация шегі, төменгі-жоғарғы, %		Тұтану температурасы
Сутегі	H_2	4,0-9,5	65-75	580-590
Көміртегі тотығы	CO	12-15,6	71-75	644-658
Метан	CH_4	4,9-6,3	12-15,4	650-750
Этан	C_2H_6	3,1	12,5	
Пропан	C_3H_8	2,4	9,5	
Бутан	C_4H_{10}	1,9	8,4	
Этилен	C_2H_4	3,0	28,6	542-547
Ацетилен	C_2H_2	2,5	80,0	406-440
Табиғи газ	–	5,1-5,8	12,1-13,9	

Балласт N_2 және CO_2 болуы жалын жылдамдығын оның пайыздық мөлшеріне пропорционал төмендетеді. Қоспаның жануы ламинарлық (тыныш, сорғалаған түрде) және турбуленттік (хаостық қозғалысты) болып бөлінеді, тәжірибеде турбуленттік көп кездеседі. Егер қоспа жылдамдығы w_k жалын жылдамдығынан $w_{ж}$ үлкен болса, онда жалынның шілтерден үзілуі мүмкін, ал $w_k < w_{ж}$ болса – жалынның шілтер ішінде секірісі пайда болады, екі құбылыс та қатерлі.

Гетерогендік жану бірқатар ерекшелікте өтеді. Сұйық

отынның жану процесі бүріккіштер көмегімен отынды тозаңдатудан, отынның булануы мен термиялық ыдырауынан, алынған газ тәріздес өнімдердің ауамен араласуынан, тұтануынан және жануынан тұрады. Тоzaңдату сұйықтың газбен жанасу беттігінің мыңдаған ретке артуына мүмкіндік береді. Жану кезінде түзілетін шырақта үш фазада болады: сұйық, қатты (сұйық көмірсутектің ыдырауынан алынған дисперстік көміртегі, күл) және газ тәріздес (ыдырау өнімдері). Жану жылдамдығы жағу шартына тәуелді: қоспаның түзілуіне, аэрация дәрежесіне, шырақтың турбуленттік дәрежесіне, жану камерасының температурасына.

Қатты отынды жағудың өздік ерекшеліктері бар. Жалпы, жану қабатта өтеді. Кокс желтартқыш торда, ал ұшқыштар жағу кеңістікте жанады. Процестің негізгі сатылары 4-суретте келтірілген.



4-сурет. Қатты отынның жану сатылары

Гетерогендік реакцияның жылдамдығы температураға, қысымға және тотықтырғыштың көміртегіге диффузиясы жылдамдығымен анықталатын, әсерлесуші заттар концентрациясына тәуелді болады. Шекаралық ламинарлық қабатта тотықтырғыш жанғыш элементтерге тек қана диффузиямен беріледі. Қатты отынның тотықтырғыш ағынында жануының сұлбалық сипаты 5-суретте берілген.



5-сурет. Қатты отынның ауа ағынында жану сұлбасы

Шекаралық қабаттың қалыңдығы δ ағынның жылдамдығына тәуелді және оның артуымен азаяды. Реакцияның жылдамдығы қандай процестің лимиттеуші болуымен анықталады.

Техникалық қатты отынның жануы қожды аластау әдісіне де тәуелді болады, өйткені көміртегінің жану шамасына қарай отын бөлшектерінің беттігінде күлдік қабықша түзіледі, ол тотықтырғыштың келуін қиындатады. Жоғары температура әсерінен күл жұмсарады, тіпті балқуы да мүмкін. Отын пісіп жентектелгендей болады (қождалады). Қождану, бөлінетін жанғыш ұшпаларға да тотықтырғыштың келуін қиындатады. Отынның қождану қабатын түзуге бейімділігі туралы оның күлінің сипаттамасы бойынша білуге болады: деформацияның басталу температурасынан, жұмсару температурасынан, балқу температурасынан.

Отынның жану қасиеттерімен және ерекшеліктерімен таныса отырып, тағы да бір маңызды мәселеге көңіл аударуымыз қажет. Жылу машиналары мен жылу өндіруші жабдықтар, және солармен байланысты отындарды қазып алу, тасымалдау және өңдеу жағдайлары қазіргі кезде қоршаған ортаны жану өнімдерінің зиянды лақтырындыларымен ластаудың негізгі көздерінің біріне айналып отыр. Жылу техникалық ғылым осы зиянды әсерлерді төмендетуге бағытталған әртүрлі ұсыныстар, әдістер мен техникалық қондырғылар әзірледі және ұсынды. Осы мәселеге қатысты материалдар оқу құралының 6 тарауында беріледі.

1.4. Отынның жануын есептеу

Кез келген отынның жануы үшін тотықтырғыш қажет, ол таза оттегі немесе ауа құрамындағы оттегі түрінде қатыса алады. Тотықтырғыштың мөлшері отынның құрамымен, қасиеттерімен, оны жағу жағдайларымен анықталады және ауаның құрамына да тәуелді болады.

Атмосфералық ауа ауыспалы құрамды болатыны белгілі. Ауада, көлемі бойынша орта шамамен, 0,03 % жуық көмір қышқылдар бар, басқа газдардың мөлшері (инерттік, пайдаланылған газдар, сутегі және т. б.) көп төмен. Жер шарының бүкіл атмосферасы үшін, су буларының мөлшері жуық шамамен 0,9 % тең, яғни барлық компоненттер үлесі бір пайыздан төмен болады. Осы жағдайды ескерумен, отынның жануын инженерлік есептеу кезінде, қалыпты жағдайларда құрғақ ауаның құрамы: көлемі бойынша 21 % O_2 және 79 % N_2 , массасы бойынша 23,2 % O_2 және 76,8 % N_2 деп қабылданады. Бұл кезде, оттегінің бір көлеміне 3,76 азот көлемі, ал массасы бойынша – 3,31 азот массасы келеді.

Тәжірибе жүзінде отынның жануы үшін оттегі мөлшері жоғары ауа қолданылады, мұндай ауа байытылған деп аталады.

Отынның жануын есептеу – жылу техникалық жабдықтар есептеулерінің құрама бөлігі, ол келесі есептеулерден тұрады:

- 1) отынның жану жылуын анықтау;
- 2) оттегімен байытылған ауа шығынын немесе газ үрлеуді анықтау;
- 3) жану процесінде түзілетін жанудың газ тәріздес өнімдерінің мөлшері мен құрамын анықтау;
- 4) жану температурасын есептеу.

Есептеудің бастапқы мәліметі ретінде отынның химиялық құрамы; қолданыстағы отын жағатын құрылғының конструкциясы, және осы құрылғы үшін сипатты ауа шығыны коэффициентінің мәні; жануға түсетін ауа мен отынның температураларының мәндері алынады.

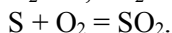
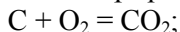
Барлық есептеулер қатты немесе сұйық отынның 1 килограммына және ылғалды газ тәріздес отынның 1 м³ орындалады. Жану

өнімдерінің газ тәріздес компоненттерінің көлемі мен тығыздығын қалыпты физикалық жағдайларда анықтайды.

1.4.1. Ауа шығынын анықтау

Отынды жағуға ауа емес, оның құрамындағы оттегі қажет болғандықтан, есептеу оттегі шығынын анықтаудан басталады (қалыпты жағдайда: $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P = 101,3\text{ кПа}$). Есептеу отын компоненттерінің жануының стехиометриялық реакциялары бойынша жүргізіледі. Қатты (сұйық) және газ тәріздес отындардың құрамы өзіндік ерекшелікте берілетіндіктен, бұл отындардың жану есептеулері жеке-дара орындалады.

Қатты немесе сұйық отынды жазуға қажетті оттегінің (ауаның) шығынын анықтау. Отынның бұл түрлерінің құрамындағы барлық компоненттердің ішінде жанғыш болатындар: көміртегі, сутегі және күкірт. Жану реакциялары келесі түрде жазылады:



Жану реакциясының теңдеуі процестің барлық күрделі аралық құбылыстарын айқындамайтынын, ал тек қана бастапқы заттар мен химиялық реакцияның соңғы өнімдері арасындағы түпкілікті мөлшерлік қатынасты сипаттайтынын айта кету қажет.

Жану процесін есептеу үшін ауа құрамы 21 % O_2 және 79 % N_2 тұрады деп қабылданады, онда $k = 3,76$ (79:21). 1 к·моль көміртегінің жануына көлемі $22,4\text{ м}^3$ 1 к·моль оттегі жұмсалады. 1 кг көміртегіге кететін оттегі шығынын анықтаймыз – $22,4/12 = 1,867\text{ м}^3/\text{кг}$. Тура осылай күкірт үшін – $22,4/32 = 0,7\text{ м}^3/\text{кг}$, сутегі үшін – $22,4/2 \times 2 = 5,6\text{ м}^3/\text{кг}$. Отынның құрамындағы оттегі де ескеріледі: $V_{\text{O}_2}^{\text{от}} = \frac{22,4}{32} O^{\text{жұ}}$. Отындағы оттегіні ескерумен, 1 кг

отынның толық жануына қажетті оттегінің шығынын өрнектеуге болады:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ауа}} = 0,01(1,867C^{\text{жұ}} + 5,6H^{\text{жұ}} + 0,7S^{\text{жұ}} - 0,7O^{\text{жұ}}), \text{ м}^3. \quad (1.18)$$

Бұл өрнекке отынның құрамы пайызбен алынады. Оттегі шығынының мөлшерін $\text{м}^3/\text{кг}$ алу үшін жақша алдына 0,01 көбейткіші қойылады.

1 кг отынның толық жануы үшін қажетті құрғақ ауаның теориялық шығыны

$$L_o = (1 + k) V_{O_2}, \text{ м}^3. \quad (1.19)$$

Егер жану үшін ылғалды ауа қолданылса, онда ауа ылғалдығының көлемі теңдеумен анықталады:

$$V_{H_2O}^{ауа} = \frac{22,4}{18 \times 1000} \cdot g_{H_2O}^{к.а.} = 0,00124 g_{H_2O}^{к.а.}, \text{ м}^3 \quad (1.20)$$

Ылғалды ауаның теориялық шығыны құрайды:

$$L_o^{bl.a} = (1 + 0,00124 \cdot g_{H_2O}^{к.а.}) L_o, \text{ м}^3. \quad (1.21)$$

Газ тәріздес отын үшін ауа шығыны стехиометриялық реакциялардың қолданылуымен, газдың жанғыш компоненттерінің көлемдік үлесімен анықталады:

$$C_m H_n + CO + H_2 + H_2S + CO_2 + SO_2 + O_2 + N_2 + \dots = 100 \%. \quad (1.22)$$

Толық жану реакцияларын жазайық:

$$C_m H_n + (m+n/4) (O_2 + kN_2) = m CO_2 + n/2 H_2O + (m+n/4) kN_2 + Q_1,$$

$$CO + 0,5 (O_2 + kN_2) = CO_2 + 0,5kN_2 + Q_2,$$

$$H_2 + 0,5 (O_2 + kN_2) = H_2O + 0,5kN_2 + Q_3,$$

$$H_2S + 1,5 (O_2 + kN_2) = H_2O + SO_2 + 1,5kN_2 + Q_4.$$

Отынның бір бірлігін жағу үшін теориялық қажетті оттегі шығыны:

$$V_{O_2} = 0,01 \left[0,5 (CO + H_2 + 3H_2S) + \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \text{ м}^3. \quad (1.23)$$

1 м^3 отынның толық жануы үшін қажетті құрғақ ауаның теориялық шығыны:

$$L_o = (1 + k) V_{O_2}, \text{ м}^3. \quad (1.24)$$

Ілғалды ауаның теориялық шығыны:

$$L_o^{bl.a} = (1 + k)(1 + 0,00124 \cdot q_{H_2O}^{k.a}) V_{O_2}, \text{ м}^3. \quad (1.25)$$

Берілген (21) және (25) теңдеулер бойынша есептелген ауа мөлшері *теориялық қажетті ауа мөлшері* деп аталады. Яғни, $L_o^{bl.a}$ 1 кг (1м³) отынның толық жануын қамтамасыз ететін ауаның минималь мөлшерін көрсетеді, бұл кезде жануға отындағы және ауамен бірге берілетін оттегі толығымен қолданылу шарты орындалуы қажет.

Нақты жағдайларда техникалық қиындықтарға байланысты тотықтырғыштың (ауаның) жергілікті жетіспеуі немесе артықшылығы байқалады, нәтижесінде отынның толық жануы нашарлайды. Сондықтан ауа оның теориялық мөлшерімен L_o салыстырғанда артық беріледі. Ауаның нақты шығынының L_α теориялық қажетті мөлшеріне L_o қатынасы *ауа шығынының коэффициенті* α деп аталады:

$$\alpha = \frac{L_\alpha}{L_o} \quad \text{немесе} \quad L_\alpha = \alpha \cdot L_o. \quad (1.26)$$

α – отынның түріне, отын жаққыш құрылғының конструкциясына (жанарғы немесе бүріккіш), ауа мен газдың қыздыру температурасына тәуелді. Ауа шығынының коэффициенті оңтайлы болуы керек. Егер $\alpha > \alpha_{opt}$, онда ауа шығыны, жану өнімдерінің көлемі артады. Олардың пештің газ арнасы жүйесімен өтуі үшін энергияның қосымша шығыны қажет. Пештен шыққан газбен кететін жылу жоғалымы артады, температура төмендейді. Егер $\alpha < \alpha_{opt}$ – отынның толық жанбағаны (жану өнімдерінде – CO , H_2 , CH_4). Жоғары температураларда жану өнімдерінің кейбір құрамдастары ыдырайды ($CO_2 \rightarrow CO^+ + O$). Толық жану кезінде жану өнімдерінде CO , $H_2O_{бь}$, SO_2 , N_2 болады.

1.4.2. Отынның жану өнімдерінің құрамы мен мөлшері

Газ тәріздес отынның жану өнімдерінің құрамы мен мөлшері. Газдардың жану реакциясы теңдеуінен толық жану өнімдерінде $RO_2 = (CO_2 + SO_2)$, су буы және азот, m^3 болады.

$$V_{RO_2} = 0,01(mC_m H_n + CH_4 + CO + SO_2 + H_2S + CO_2). \quad (1.27)$$

Су буы көмірсутектер, сутегі және күкіртсутек жанған кезде түзіледі. Сонымен қатар, жану өнімдеріне газ бен ауаның ылғалдығы да өтеді.

$$V_{H_2O} = 0,01 \left[\frac{n}{2} C_m H_n + H_2 + H_2S + 0,124(g^{к.г.} + g^{к.а.} L_o) \right]. \quad (1.28)$$

Азоттың көлемі (түтінге өтетін газ азотының көлемі және ауа азотының көлемі ескеріледі):

$$V_{N_2} = 0,01 N_2 + kV_{O_2}, m^3 \quad (1.29)$$

Онда жанудың ылғалды өнімдерінің көлемі $\alpha = 1$ кезінде:

$$V_o^{bl.m.} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad (1.30)$$

Егер $\alpha > 1$, онда жану өнімдерінде қосымша O_2 , N_2 және H_2O артықшылығы болады.

$$V_{\alpha}^{bl.m.} = V_o^{bl.m.} + (\alpha - 1)V_{O_2} + k(\alpha - 1)V_{O_2} + 0,00124g_{H_2O}^{к.а.}(1 + K)(\alpha - 1)V_{O_2}. \quad (1.31)$$

Сұйық отынның жану өнімдерінің құрамы мен мөлшері. Мазуттың жану реакциясы теңдеуінен толық жану өнімдерінде $RO_2 = (CO_2 + SO_2)$, су буы және азот болатыны белгілі. 1 к·моль С жануы кезінде, көлемі $22,4 m^3$, 1 к·моль CO_2 түзіледі. Сондықтан 1 кг көміртегіге $\frac{22,4}{12} = 1,867 m^3 CO_2$ түзіледі. 1 кг күкірт жанған кезде – $0,7 m^3 SO_2$ ($22,4:32$). Онда, V_{RO_2} көлемі:

$$V_{RO_2} = 0,01 \left(1,867 C^{жсy} + 0,7 S^{жсy} \right) \cdot M^3. \quad (1.32)$$

Жану өнімдеріндегі ылғалдық мөлшерін анықтаймыз. Ылғалдық отынмен $W^{жсm}$ және ауамен келеді. Егер мазут бумен бүркілетін болса, жану өнімдеріне мазутты бүркуге жұмсалған ылғал W^{ϕ} енеді. 1 кг мазутты бүрку үшін $1,24 \text{ м}^3$ бу ($22,4/18$) жұмсалады. Егер ауада $g \text{ г/м}^3$ бу болса, онда ауамен енетін ылғалдың мөлшері:

$$V_{H_2O}^{ауа} = \frac{22,4 g}{18 \times 1000} (1 + k) V_{O_2} = 0,00124 (1 + k) g V_{O_2}, \text{ м}^3. \quad (1.33)$$

Отынмен енетін ылғал:

$$V_{H_2O}^{om} = 0,01 \left[1,24 \left(W^{жсy} + W^{\phi} \right) \right]. \quad (1.34)$$

Сутегі H_2 жанған кезде 2 моль H_2O түзіледі. 1 кг H_2 $\frac{2 \times 22,4}{2 \times 2} = 11,2 \text{ кг}$ бу түзіледі. Онда жану өніміндегі су буының қосынды мөлшері:

$$V_{H_2O} = 0,01 \left[11,2 H^{жсy} + 1,24 \left(W^{жсy} + W^{\phi_{из}} \right) + 0,124 g (1 + k) V_{O_2} \right], \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (1.35)$$

RO_2 мен H_2O өзге, жану өнімдерінде отын және ауамен келетін азот та болады:

$$V_{N_2}^{om} = 0,01 \times \frac{22,4}{28} N^{жсy} = 0,01 \times 0,8 N^{жсy}, \quad V_{N_2}^{ауа} = k V_{O_2}. \quad (1.36)$$

Жану өнімдеріндегі азоттың көлемі:

$$V_{N_2} = 0,01 \times 0,8 N^{жсy} + k V_{O_2}. \quad (1.37)$$

Онда ылғалды жану өнімдерінің көлемі, $\alpha = 1$ кезінде,

$$V_o^{bl.m} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} \quad (1.38)$$

$\alpha > 1$ кезіндегі жану өнімдерінің көлемі, артық O_2 , N_2 және H_2O қосымша енгізілуі нәтижесінде артады.

$$V_{\alpha}^{bl.m} = V_0^{bl.m} + (\alpha - 1)V_{O_2} + k(\alpha - 1)V_{O_2} + \quad (1.39)$$

$$+ 0,00124 g_{H_2O}^{k.a.ya} (1 + K)(\alpha - 1)V_{O_2}.$$

Отынның жануының материалдық балансы. Ауа шығыны мен алынған жану өнімдерін есептеу отынның бір бірлігін жағудың материалдық балансын құрумен аяқталады. Осы балансқа сәйкес, отынды жағуға кеткен отынның және ауаның қосынды массасы бүкіл жану өнімдерінің қосынды массасына теңесуі керек. Осылай, материалдық балансты құру баланстың кіріс және шығыс бөліктерін анықтаумен қорытындыланады. Бұл есептеуді кесте түрінде көрсету оңтайлы. Қатты және сұйық отын үшін отынның материалдық балансы 6 – кестеде, ал газ тәріздес үшін 7 – кестеде келтірілген.

6-кесте

Қатты (сұйық) отынның жануының материалдық балансы

Кіріс статъялары	Масса, кг	Шығыс статъялары	Масса, кг
Отынның массасы M_o	1	Түтін массасы M_T	$V_T \cdot \rho_o^T$
Ауаның массасы M_a	$L_a \cdot \rho_o^a$	Күл массасы M_K	0,01 $A^{жү}$
Кіріс массасы M_K	$M_o + M_a$	Шығыс массасы $M_{ш}$	$M_T + M_K$

7-кесте

Газ тәріздес отынның жануының материалдық балансы

Кіріс статъялары	Масса, кг	Шығыс статъялары	Масса, кг
Отынның массасы M_o	$1 \cdot \rho_{ауа}^{газ}$	Түтін массасы M_T	$V_T \cdot \rho_o^T$
Ауаның массасы M_a	$L_a \cdot \rho_o^a$		
Кіріс массасы M_K	$M_o + M_a$	Шығыс массасы $M_{ш}$	M_T

Кіріс массасының шамасы шығын массасына тең болады, егер айырмашылық орын алса, баланстың теңеспеуіне жатқызылады. Теңеспеу шамасының 0,5 % артық болуы, алдыңғы есептеулерде қателік жіберілгенін көрсетеді.

1.4.3. Отынның жану температурасын есептеу

Отынның жану температурасы ретінде жану камерасында алынатын жылу нәтижесінде жану өнімдерінде (түтінде) болатын температура қабылданады. Жану процесінен бөлінетін жылу жану өнімдерінің температурасын жоғарылатуға шығындалады, бірақ жану процесі барлық уақытта жану аймағынан қоршаған беттіктерге сәулелену және конвекция арқылы жылу берумен қатар жүреді. Бұл жылуберу түтіннің температурасын төмендетеді. Егер теориялық тұрғыдан, жылуберу болмайды және барлық жылу түтіннің температурасын арттыруға жұмсалады десек, онда түтіннің температурасы ең жоғарғы мәнге ие болады және *калориметриялық* $t_{\text{кал}}$ деп аталады. Калориметриялық температура 1 м^3 отынды жағуға арналған жылу балансынан анықталады.

$$B \cdot Q_m^{\text{ж}} + B \cdot L_a^{\text{н}} \cdot i_{\text{ф.а.}} + B \cdot i_{\text{ф.о.}} = B \cdot V_m \cdot i_{\text{ф.т.}} - B \cdot q_{\text{х.т.ж.}} \quad (1.40)$$

мұндағы $Q_m^{\text{ж}}$ – отынның төменгі жану жылуы, кДж/м³ немесе кДж/кг;

$i_{\text{ф.а.}}$, $i_{\text{ф.о.}}$, $i_{\text{ф.т.}}$ – ауаның, отынның және түтіннің меншікті энтальпиясы, кДж/м³;

$q_{\text{х.т.ж.}}$ – отынның толық жанбауы кезіндегі химиялық толық жанбау жылуы (отынның толық жануы кезінде $q_{\text{х.т.ж.}} = 0$), кДж/м³.

Энтальпия $i = c \cdot t$ (c – 0-ден t -ға дейінгі температура интервалындағы меншікті жылусыйымдылық) болғандықтан, жылу балансының теңдеуін келесі түрде жазуға болады:

$$Q_m^{\text{ж}} + L_a^{\text{н}} \cdot c_a \cdot t_a + c_o \cdot t_o = V_m \cdot c_m \cdot t_m - q_{\text{х.т.ж.}} \quad (1.41)$$

Қоршаған ортаға жылу жоғалымы болмаған кезде $t_m = t_{\text{кал}}$ және $c_m = c_{\text{кал}}$. Осыдан $t_{\text{кал}}$ үшін теңдеу аламыз:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_m^{\text{жс}} + L_a^{\text{н}} \cdot c_a \cdot t_a + c_o \cdot t_o - q_{\text{х.т.жс.}}}{V_{\text{н}} \cdot c_{\text{кал}}} \quad (1.42)$$

$t_{\text{кал}}$ есептеу күрделілігі жылусыйымдылықтың $c_{\text{кал}}$ температураға $t_{\text{кал}}$ тәуелділігімен байланысты. Сондықтан $t_{\text{кал}}$ анықтау үшін, мысалы, графикалық әдіс қолданыла алады. Бұл жағдайда $i_{\text{кал}} = c_{\text{кал}} \cdot t_{\text{кал}}$ теңдеуінің $t_{\text{кал}}$ графикалық тәуелділігі тұрғызылады, осы график энтальпияның есептелген мәні бойынша $t_{\text{кал}}$ табуға көмектеседі.

$$i_{\text{кал}} = \frac{Q_m^{\text{жс}} + L_a^{\text{н}} \cdot c_a \cdot t_a + c_o \cdot t_o - q_{\text{х.т.жс.}}}{V_{\text{н}}} \quad (1.43)$$

Есептеу техникасын қолданған жағдайда стандартты математикалық әдістердің бірін қолданған қолайлы, мысалы, интерполяциялық әдіс немесе бірізді жақындау әдісі (қарапайым итерация әдісі). Мысалы, бірізді жақындау әдісі бойынша калориметриялық температураның еркінше мәні беріледі (мысалы, 2000 °C), сол арқылы анықтамадан жылусыйымдылықты табады. Жылусыйымдылықты $t_{\text{кал}}$ есептеуге арналған теңдеуге қойып, калориметриялық температураның анықталған мәнін табады. Енді осы мән арқылы жылусыйымдылықтың жаңа мәнін тауып, қайтадан теңдеу бойынша $t_{\text{кал}}$ анықталады. Осылай, $t_{\text{кал}}$ температураның алдыңғы және артқы мәндері берілген шамадан ең аз айрықшылыққа жеткенге дейін (мысалы, 1 °C).

Отынның табиғи сапасын бағалау үшін *нормалы (әдеттегі) калориметриялық температура* ұғымы қолданылады, әдебиеттерде оны *стандартты калориметриялық температура* немесе ыстық өнімділік деп те атайды:

$$t_{\text{кал}}^{\text{см}} = \frac{Q_m^{\text{жс}}}{V_m^{\text{н}} \cdot c_{\text{кал}}^{\text{см}}} \quad (1.44)$$

мұндағы $V_m^{\text{н}}$ – отынды ауаның теориялық шығынымен жаққан кездегі түтіннің шығысы ($n = 1$);

$c_{\text{кал}}^{\text{см}}$ – 0 °C-дан $t_{\text{кал}}^{\text{см}}$ дейінгі интервалдағы түтіннің меншікті жылусыйымдылығы.

Стандартты калориметриялық температура отынды стехиометриялық жағу кезінде ($n = 1$) және келесі шарт орындалғанда орын алады: отын мен ауа жағу алдында $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурада болады, ал жану өнімдерінің ыдырауы болмайды. Жуық шамамен табиғи газ, кокстық газ және мазут үшін $t_{\text{кал}}^{\text{см}} = 2000\text{--}2100\text{ }^{\circ}\text{C}$, ал домна газы үшін $1350\text{--}1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ тең.

Калориметриялық температура отынның жану реакциялары қайтымсыз болуынан шыға отырып есептеледі. Дегенмен, нақты жағдайларда жану өнімдерінің температурасы $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ -дан жоғары болғанда диссоциация реакциялары басталады, яғни CO_2 мен H_2O диссоциация жылуын ($q_{\text{дис.}}$) сіңірумен CO , H_2 және O_2 ыдырауы байқалады. Сонымен, жоғары температураларда отынның бүкіл химиялық энергиясы жану өнімдерінің температурасын арттыруға жұмсалмайтыны айқындалды. Көміртегі диоксиді мен су буының ыдырау жылуын ескерумен есептелген жану өнімдерінің температурасы теориялық деп аталады. Ол $q_{\text{дис}}$ шамасын ескерумен, калориметриялық температура теңдеуімен есептеледі, яғни:

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_m^{\text{ж}} + L_a^{\text{н}} \cdot c_a \cdot t_a + c_o \cdot t_o - q_{\text{х.т.ж.}} - q_{\text{дис.}}}{V_n \cdot c_{\text{кал}}}. \quad (1.45)$$

Қоршаған денелерге жылу беруі арқылы, түтіннің нақты температурасы калориметриялық температурадан төмен болады. Оны, нақты және калориметриялық температураларды байланыстыратын, пирометриялық коэффициент $\eta_{\text{пир}}$ көмегімен бағалауға болады

$$t_n = \eta_{\text{пир}} \cdot t_{\text{кал}}, \quad (1.46)$$

мұндағы $\eta_{\text{пир}} \approx 0,65\text{--}0,75$.

$\eta_{\text{пир}}$ шамасы жану камерасының құрылымына, отын жаққыш құрылғының типіне, отынның шығынына тәуелді және жану камерасының жылулық балансымен анықталады.

1 тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Отынның анықтамасы.
2. Алыну және агрегаттық күйі бойынша отынның сыныптамасы. Мысалдар келтіріңіз.
3. Отынның элементарлық құрамы.
4. Шартты отын ұғымын қалай түсінесіз?
5. Отынның жану жылуы дегеніміз не?
6. Отынның құрамындағы жанғыш элементтерге сипаттама.
7. Отынның массасы бойынша жіктелуі және есептелу коэффициенттері.
8. Балластты не құрайды?
9. Күлдің құрамы неден тұрады?
10. Отынның сапасы қандай сандық көрсеткіштермен бағаланады?
11. Отынды жағуға қолданылатын ауа қандай мақсатта қыздырылады?
12. Отынның құрамында ылғалдылық қандай нысанда болады?
13. Жоғарғы және төменгі жану жылуларының айырмашылығы.
14. Жану деген не? Жанудың қандай түрлерін білесіз?
15. Жанудың тізбекті реакцияларының маңызын түсіндіріңіз.
16. Жану жылдамдығы неге тәуелді?
17. Отынның жануының нақты температурасы қандай факторларға тәуелді?
18. Не үшін ауа оттегімен байытылады?
19. Ауа шығыны коэффициенті деген не?
20. Гетерогендік жанудың ерекшеліктерін сипаттаңыз.
21. Кокс деген не?
22. Жанудың техникалық есептеулері неге негізделеді?
23. Ауаның артықша коэффициентінің шамасы нені сипаттайды?
24. Отынның жану температураларын есептеу жолдары.
25. Отынның жануының материалдық балансы қалай құрылады?

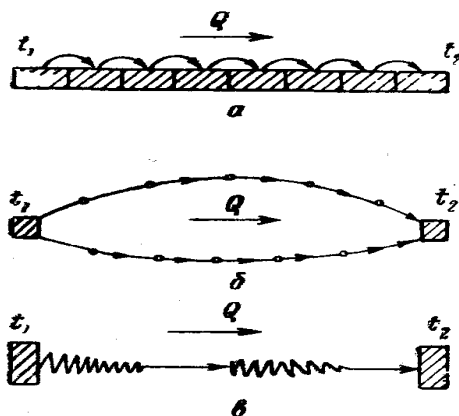
2 ТАРАУ

ЖЫЛУАЛМАСУ ТЕОРИЯСЫНЫҢ НЕГІЗГІ ҰҒЫМДАРЫ МЕН ЗАҢДАРЫ

2.1. Жылуалмасу процестерінің сыныптамасы

Заманауи тұрғыдан қарағанда, жылу температуралар айырмашылығы болған кезде кеңістіктің бір бөлігінен екіншісіне өз бетінше берілетін ішкі энергия деп қабылданады. Жылудың тасымалы өте күрделі процестермен байланысты және оны оқу кезінде физикада, термодинамикада, гидродинамикада және химияда қолданылатын жылуалмасу теориясының заңдары мен талдау әдістерін білу керек.

Жылуды тасымалдаудың күрделі процесін бірқатар жеке процестерге бөліп қарастырады. Мұндай тәсіл оны оқып, зерделеуді жеңілдетеді. Жылудың берілуінің үш қарапайым әдісі бар: жылуөткізгіштік, конвекция және жылулық сәулелену (сәуле шығару) (6-сурет). Жылу тасудың әрбір қарапайым процесінің тасымалдау механизмінің өзіндік ерекшеліктері және тасымалдау процесін математикалық сипаттауға арналған өз заңдары бар.



6-сурет. Жылу берілістің түрлері:
а – жылуөткізгіштік; б – конвекция; в – сәулелену

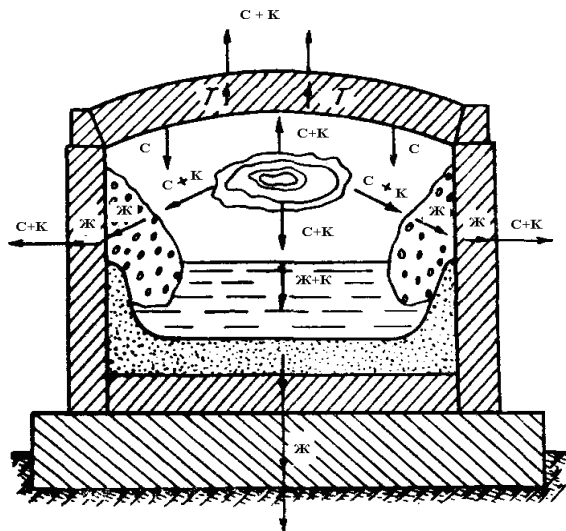
Жылуөткізгіштік – зат молекулаларының жылулық қозғалысы кезінде, олардың арасындағы тікелей жанасу нәтижесінде жылудың тасылуы. Бұл кезде «ыстық» бөлшектердің энергиясы көрші бөлшектерге беріледі, нәтижесінде жылу энергиясының кеңістікте таралуы жүреді. Жылудың жылуөткізгіштікпен берілуі қатты денелерге барынша сипатты (6 а – сурет). Жылу, қатты денелерде (диэлектриктерде) және сұйықтарда серпімді толқындармен, металдарда электрондар диффузиясымен, газдарда – атомдар мен молекулалардың диффузиясымен тасымалданады.

Конвекция (конвективті жылу тасымал) тек қана сұйықтарда, балқымаларда және газдарда байқалады (6 б-сурет). Конвекция – бұл, заттың макроскопиялық көлемімен жылудың тасылуы. Ол барлық уақытта жылуөткізгіштікпен қатар жүреді. Дегенмен, конвекция анықтаушы болып табылады, өйткені ол жылуөткізгіштікке қарағанда қарқынды. Конвекциямен жылуды өте үлкен қашықтықтарға жеткізуге болады (мысалы, газдың құбырлармен қозғалуы). Жылуды тасу үшін қолданылатын қозғалушы орта (сұйық немесе газ) жылу тасымалдағыш деп аталады, яғни сұйық пен газ қозғалысының күйі мен сипатының үлкен маңызы бар.

Жылулық сәуле шығару (жылулық сәулелену) – бұл жылу энергиясының белгілі бір ұзындықты (инфрақызыл спектр) электромагниттік толқынмен таралуы (1 в-сурет). Жылуалмасу кезінде жылуалмасуға қатысатын денелерден сәуле шашатын және сіңіретін фотондар, энергия тасығыштар ролін атқарады. Жылулық сәулелену барлық денелерге тән, негізінен дененің беттік қабатының температурасымен және қасиеттерімен анықталады. Жылу кез келген температурада сәулеленеді ($T > 0\text{ K}$).

Көптеген жағдайларда жылудың тасымалы бірнеше әдіспен қатар жүзеге асырылады. Мысалы, газдан қабырғаға конвективті жылу тасымалы барлық уақытта дерлік жылулық сәулеленумен параллель жүреді.

Металлургиялық пештерде жылу берілістің барлық үш түрі, кейде өте күрделі комбинацияларда кездеседі. Осыны шарпыма балқыту пешіндегі жылуалмасу сұлбасы мысалында түсіндірейік (7-сурет).



7 – сурет. Шарпыма пештегі жылуалмасу сұлбасы:
С – сәулелену; К – конвекция; Ж – жылуөткізгіштік

Жалынды жоғары температуралы пештерде, газдан шикіқұрамға, қабырға қалауына және былауға берілетін жылу сәулеленумен және конвекциямен жүреді. Пештің қабырғасы мен күмбезі газдан алынған жылудың бір бөлігін шикіқұрам мен былауға сәулелену арқылы береді. Шикіқұрамның қабатының қалыңдығы мен қабырғаның қалауы арқылы, пеш күмбезі мен оттығы арқылы жылу жылуөткізгіштікпен таралады.

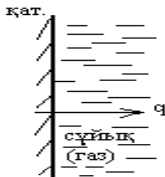
Былауда жылу балқымалардың жылуөткізгіштігі мен конвекциясы арқылы таралады. Пештің сыртқы бетінің қоршаған ортамен жылуалмасуы сәулелену мен конвекция арқылы өтеді. Осылай, шарпыма пеште жылу берілістің барлық үш түрі жүреді.

Газдар мен қабырға қалауынан шикіқұрам мен былауға жылудың берілуінің негізгі түрі сәулелену болып табылады. Жылуөткізгіштік, пеш пен қоршаған орта (жылу жоғалымы) арасындағы жылу алмасуда, сонымен қатар шикіқұрам мен былаудың тереңдете қызуында маңызды рөл атқарады. Конвекцияның, шарпыма пештің жұмысшы кеңістігіндегі

маңызы шектеулі.

Төменгі температуралы пештер мен газ ағынының үлкен жылдамдығындағы жылу қондырғыларында конвекция маңызды орын алады және онымен барлық жылу мөлшерінің 50-70 % беріледі. Сонымен қатар, конвекция шахталық пештердегі газдар мен шикіқұрам арасындағы жылуалмасу процестерінде де үлкен мәнге ие болады.

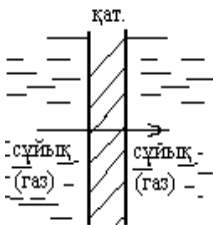
Балқытылған қождың қалың қабатына батырылған электродтармен жұмыс істейтін электрлік кен балқытқыш пештерде, шикіқұрамға жылудың берілуі негізінен қождың конвекциясымен жүреді. Муфельді пештерде, ауа қыздырғыштарда және бу қазандарында муфельдің немесе құбырдың қабырғасы арқылы жүретін жылу өткізгіштік үлкен рөл атқарады.



8-сурет.
Жылу беру

Сонымен, жылу беру өте күрделі құбылыс екен. Дене бетімен тікелей жанасқан жұқа қабатта жылу жылуөткізгіштікпен беріледі, ал беттен жеткілікті алшақ қабаттарда конвективті жылуалмасу өтеді (8-сурет). Жылу берудің қарқындылығы көптеген факторларға тәуелді, негізінен – жылу тасымалдаушы ағынының қасиеттері мен

ерекшеліктеріне.



9-сурет. Жылу тасу

Бір сұйық немесе газтәріздес ортадан тура сондай екінші ортаға оларды бөліп тұрған қатты қабырға арқылы жылудың берілуі *жылу тасу* деп аталады (9-сурет). Жылу тасымалының одан да күрделі процесс екені түсінікті. Ол екі жылу беруді (қабырғаның екі жағынан) және қабырға арқылы жылуөткізгіштікті қамтиды. Бұл процестер табиғатта және техникада кеңінен кездесетіндіктен, жылуалмасу процесінің ерекшеліктері мен заңдылықтарын зерттеуші бүкіл ғылымды *жылу тасымалы* деп атай бастады.

2.2. Фурье заңы – жылуөткізгіштіктің негізгі заңы

Жылуөткізгіштіктің негізгі заңына кіретін бірқатар математикалық ұғымдарға сипаттама беріп, түсіндіріп өтейік.

Жылуалмасудың кез келген процесі барлық уақытта кеңістікте және уақыт бойында температураның өзгеруімен қатар жүреді. Жылу энергиясы, кез келген басқа энергия сияқты, жоғарғы потенциалдан төменгіге бағыттала беріледі. *Жылу энергиясының потенциалы температура* болатындықтан, жылудың таралу процесі температураның бөлінуімен тығыз байланысты, яғни температуралық өріспен. *Температуралық өріс* деп зерттелетін кеңістіктің әрбір нүктесі үшін температуралардың сол сәттегі мәндерінің жиынтығын атайды.

Жалпы жағдайда температура t кеңістіктің кез келген нүктесінде x , y , z координаталарының және уақыттың τ функциясы болып табылады, демек, температуралық өрістің теңдеуі келесідей болады:

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (2.1)$$

Техникада машиналар мен жабдықтар жұмысының орныққан режимі жиі кездеседі, яғни жүктеме, шығындар, арын және т.б. ұзақ уақыт тұрақты болып қалады. Орныққан режимдерде уақыт бойында кеңістіктің жеке нүктелеріндегі температуралар да өзгермейді, мұндай температуралық өріс *орныққан* немесе *стационарлық* деп аталады. Бұл жағдайда температура тек қана координаталардың функциясы болады:

$$t = f(x, y, z); \quad \partial t / \partial \tau = 0 \quad (2.2)$$

Уақыттың өзгеруімен температура да өзгереді өріс *орнықпаған* немесе *стационарлық емес* деп аталады. Мұндай өрістер циклдік әрекеттегі машиналар мен агрегаттар үшін, ал стационарлық өрістер – үздіксіз өндірістік процесі жабдықтар үшін сипатты.

Температуралық өрістің ең қарапайым жағдайы стационарлық, бір мөлшерлі өріс, оның теңдеуі келесі түрде жазылады:

$$t = f(x). \quad (2.3)$$

Орныкпаған температуралық өріс жағдайында жылудың берілуі *орныкпаған режим кезіндегі жылу беріліс* деп, ал орныкқан өріс жағдайындағы – *орныкқан режим кезіндегі жылу беріліс* деп аталады.

Температуралық өрісті изотермиялық беттер көмегімен сипаттауға болады. *Изотермиялық бет* деп берілген уақыт кезеңінде бірдей температурада болатын нүктелердің геометриялық орыны аталады. Әртүрлі температураға сәйкес келетін изотермиялық беттер өзара қиылыса алмайды, олар өзінде тұйықталады немесе дене беттігінде шектеледі (10 – сурет). Әртүрлі температураға әртүрлі изотермалар сәйкес келеді. Изотермалар бойлығында температура өзгермейді, яғни жылуалмасу болмайды. Температура тек қана изотерманы қиып өтетін бағыттарда айырмашылықты болады. Ұзындық бірлігінде температураның ең үлкен құламасы изотермиялық бетке нормал n бағытында орын алады. Изотермиялық бетке нормал бағытында температураның жоғарылауы температура градиентімен сипатталады.

Температура градиенті – нормал бойынша изотермиялық бетке бағытталған және сан жағынан осы бағыттағы температура туындысына тең вектор.

$$\text{grad}t = n_0 \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \left[\frac{K}{m} \right]. \quad (2.4)$$

мұндағы n_0 – изотермиялық бетке дұрыс және температураның жоғарылау жағына бағытталған бірлік векторы.

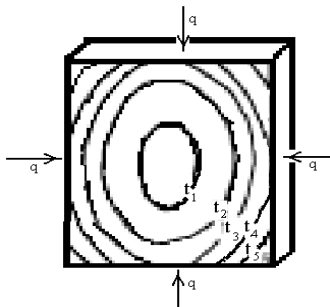
Температура градиентінің скалярлық шамасы изотермиялық беттің әртүрлі нүктесі үшін бірдей емес. Оның максималь шамасы изотермалар арасындағы қашықтықтың ең төменгі жерінде байқалады.

Жылу беріліс үшін маңызды шамалардың бірі, *жылу ағынының тығыздығы q векторы*. Био гипотезасына сәйкес жылу ағыны температура градиентіне пропорционал:

$$q = -n_0 \cdot \lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n} \left[\frac{Bm}{m^2} \right] \quad (2.5)$$

Берілген теңдеу әдебиетте Фурье заңы ретінде белгілі.

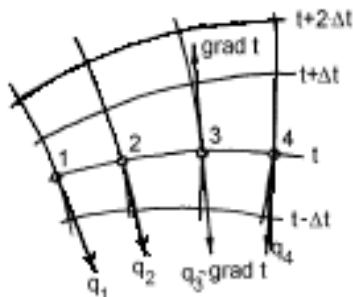
Жылу ағыны тығыздығының векторы нормал бойынша изотермиялық бетке температураның төмендеу жағына бағытталған вектор (11-сурет).



10-сурет. Симметриялық қыздырылған дене ішіндегі изотермалар:

$$(t_5 > t_4 > t_3 > t_2 > t_1)$$

q – дене бетіне келтірілген жылу ағыны



11-сурет. Изотермалар және оларға перпендикуляр дене ішіндегі жылу ағынының сызықтары

Сонымен, q және $\text{grad } t$ векторлары бір сызықтың бойында жатыр, бірақ қарама-қарсы бағытталған. Теңдеудің оң бөлігіндегі «минус» белгісі осымен түсіндіріледі. Жылу ағыны үшін Фурье заңының математикалық өрнегі:

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } t \quad (2.6)$$

Осы өрнектегі пропорционалдық көбейткіш λ жылуөткізгіштік коэффициенті деп аталады, ол заттың физикалық қасиетін көрсетеді және оның жылуды өткізу қабілеттілігін сипаттайды. Эксперименттік жолмен анықталған жылуөткізгіштік коэффициенті λ микробөлшектердің түйісуі кезінде жылудың берілуінің күрделі механизмін айқындайды. Болат үшін $\lambda = 30-50$ Вт/(м·К), отқа төзімділер (динас, шамот) үшін $\lambda = 0,7-1,0$ Вт/(м·К), жылуоқшаулаушы материалдарда $\lambda < 0,2$, ең төменгі жылуөткізгіш коэффициент газдарда байқалады.

$$\lambda = -\frac{\left| \vec{q} \right|}{\text{grad } t} = \frac{Q}{F \tau \Delta t / t}, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ \text{C}). \quad (2.7)$$

Демек, жылуөткізгіштік коэффициенті – бірге тең температура градиенті кезінде бет бірлігі арқылы уақыт бірлігінде өтетін жылу мөлшері. Жылуөткізгіштік коэффициенті заттың физикалық табиғатына, құрылымына, көлемдік салмағына, ылғалдығына, қысымына және температурасына тәуелді. Жылуөткізгіштік коэффициентінің мәнін есептеу кезінде есептеуге алынған материалдың физикалық сипаттамаларының және анықтама кестелерінде келтірілген сипаттамалардың барынша толық сәйкестенуінің сақталуын таңдайды. Әсіресе материал температурасын ескерген жөн, өйткені λ мәні келесі теңдеу заңдылығы бойынша температураға тәуелді көп өзгереді:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot [1 + b(t - t_0)]. \quad (2.8)$$

мұндағы $\lambda_0 - 0^\circ \text{C}$ кезіндегі жылуөткізгіштік коэффициентінің мәні;

b – оң немесе теріс белгілі тұрақты шама, тәжірибе жолымен анықталады.

Беттік бірлігі арқылы уақыт бірлігінде өтетін жылу мөлшері *жылу ағыны* Q , кДж/м² • сағ деп аталады. Бет F , м² арқылы t , сағ уақытта берілетін жылудың жалпы мөлшері Q , кДж мына теңдеумен анықталады:

$$Q = qF\tau. \quad (2.9)$$

2.3. Жылудың жылуөткізгіштікпен берілуі

Жылуөткізгіштің дифференциалдық теңдеуі. Құбылысты зерттеу дегеніміз, бұл оны сипаттайтын физикалық шамалар арасындағы тәуелділікті орнықтыру. Жылуөткізгіштік процестерін де жатқызуға болатын, күрделі құбылыстарды талдау үшін ғылымда математикалық физика әдістерін қолданумен байланысты жалпы тәсілдеме айқындалған. Тәсілдеменің мәні – белгілі физикалық заңдардың негізінде дене ішіндегі шексіз аз көлемнің және шексіз аз уақыт аралығының

шектеулерінде ізделіп отырған байланыстың белгілену мүмкіндігі. Нәтижесінде зерттелетін құбылыстардың бүкіл сыныбын сипаттайтын дифференциалдық теңдеу (немесе осындай теңдеулердің жүйесі) алынады. Нақты есептерді шешу үшін зерттелетін кеңістік шектерінде және берілген уақыт интервалы үшін, дифференциалдық теңдеуді интегралдайды. Осылай есептің талдамалы шешімін алуға болады және теңдеудің күрделі болуына байланысты оларды квадратурада интегралдау мүмкіндігі болмағанда, шешімнің сандық әдістеріне жүгінеді.

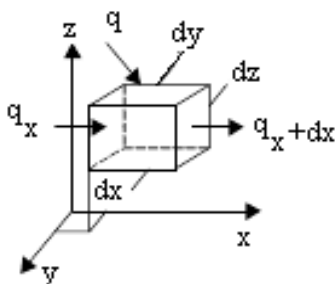
Жылу жеткізетін қатты дененің ішінен, ойша, жақтары dx , dy және dz элементарлық кіші параллелепипед бөліп алайық (12 – сурет) және элементарлық аз уақыт аралығында dt өтетін жылуөткізгіштік процесі үшін термодинамиканың бірінші заңының өрнегін жазайық:

$$dU = dQ^* - dL. \quad (2.10)$$

мұндағы dU – бөліп алынған көлемдегі ішкі энергияның өзгерісі;

dQ^* – көлемге жылуөткізгіштікпен енетін жылу мөлшері;

dL – сыртқы күштерге элемент орындаған жұмыс.



12-сурет. Элементарлық көлемнің жылуөткізгіштігі

$dL = pd(dV) = 0$; ($dV = dx dy dz$), шексіз аз шаманың дифференциалы да аз шама болатыны белгілі және оны ескермеуге болады. Онда (2.10) теңдеу келесідей түрлене алады:

$$dU = dQ^*. \quad (2.11)$$

Термодинамикадан белгілі:

$$dU = c dm d_t t = c p dV \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau. \quad (2.12)$$

dQ^* шамасын үш қосындымен көрсетуге болады:

$$dQ^* = dQ_x^* + dQ_y^* + dQ_z^*, \quad (2.13)$$

және x бағытындағы құрамды ғана егжей-тегжейлі қарастырайық. Егер x осі бойынша бағытталған меншікті жылу ағынының элементке кіретінін q_x және одан шығатын q_{x+dx} деп белгілесек, онда бөліп алынған көлемдегі x бағыты бойынша жиналған жылу мөлшері:

$$dQ_x^* = q_x dydzd\tau - q_{x+dx} dydzd\tau = (q_x - q_{x+dx}) dydzd\tau. \quad (2.14)$$

$q_x = f(x)$ функциясы үздіксіз болғандықтан (жылудың таралуы үшін кедергі болмайды), онда функцияның алдыңғы мәні мен кейінгі мәні арасындағы байланыс Тейлордың белгілі теңдеуімен анықталады:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} dx^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 q_x}{\partial x^3} dx^3 + \dots \quad (2.15)$$

Қатардың алдыңғы екі мүшесімен шектелетін болсақ (шексіз аз шама ретінде, үшінші мүшеден бастап барлық қосындыларды ескермеуге болады), онда (2.14) теңдеу келесідей жазылады:

$$dQ_x^* = - \frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz d\tau = - \frac{\partial q_x}{\partial x} dV d\tau \quad (2.16)$$

Егер осы тұжырым бойынша y және z бағыттарында қарастырсақ, онда dQ_y^* және dQ_z^* үшін ұқсас теңдеулер жазуға болады. Көлем элементінде қалған жылудың жалпы мөлшері үшін теңдеу (2.13) келесі түрде беріледі:

$$dQ^* = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) dV d\tau. \quad (2.17)$$

Жақшамен бөлінген, вектор проекциясының жеке

туындыларының қосындысын вектор дивергенциясы деп атайды және div деп белгілейді. Сондықтан алдыңғы теңдеуді көбінесе басқаша жазады:

$$dQ^* = - \text{div} q - dV d\tau. \quad (2.18)$$

Фурье заңын қолданып, координаталар осіндегі өрнектерді жазайық:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x}; \quad q_y = -\lambda \frac{\partial t}{\partial y}; \quad q_z = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}.$$

Осы өрнектерді (2.17) теңдеуіне қойып, аламыз:

$$\begin{aligned} dQ^* &= - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right] dV d\tau = \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dV d\tau. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Енді (2.11) теңдеуіне (2.12 және 2.19) теңдеулеріндегі dU және dQ^* мәндерін қойып, қысқартулардан соң аламыз:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \text{ немесе } \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (2.20)$$

Егер (2.18) теңдеуді түрлендірсек, жылуөткізгіштіктің дифференциалдық теңдеуін келесі түрде аламыз:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c} \text{div}(\lambda \cdot \text{grad } t). \quad (2.21)$$

Теңдеуде жылуөткізгіштік коэффициентінің температураға және жылудың ішкі көзінің жылу ағынының (джоул жылуы, кристалдық түрлену немесе химиялық реакциялар жылуы) болуына тәуелділігі ескерілген. Бұл жылуөткізгіштіктің сызықты емес, біртекті теңдеуі.

$\lambda = \text{const}$ және $q_v = 0$ кезінде жылуөткізгіштіктің сызықты, біртекті теңдеуін аламыз, яғни оның канондық нысанын:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t. \quad (2.22)$$

Бұл (2.22) теңдеудегі a – температура өткізгіштік

коэффициент, оның шамасы $a = \lambda/(c\rho)$ теңдеумен есептеледі.

Соңғы теңдеу (2.22) жылуөткізгіштіктің барлық есептерін шешуде негіз болып саналады, бұл теңдеуді көбінесе Фурье теңдеуі деп те атайды.

Жылуөткізгіштік есептеріндегі бірімділік шарттары. Кез келген дифференциалдық теңдеу сияқты, Фурье теңдеуінің де шексіз көп шешімдері бар. Осы көп шешімнің ішінен нақты шешімді табу үшін және оның толық математикалық сипаттамасын беру үшін, дифференциалдық теңдеуге қарастырылатын процестің бүкіл жеке ерекшеліктерінің математикалық сипаттамаларын қосу қажет. Нақты есеп ерекшеліктерінің мұндай сипаттамасы бірімділік шарттары немесе шеттік шарттар деп аталады. Бірімділік шарттарына кіреді:

- геометриялық шарттар – процесс өтетін дененің пішіні мен мөлшерін сипаттайды;

- физикалық шарттар – орта мен дененің физикалық қасиеттерін сипаттайды;

- уақыттық (бастапқы) шарттар – зерттелетін денеде уақыттың бастапқы кезеңінде температураның таралуын сипаттайды;

- шекаралық шарт – қарастырылатын денелердің қоршаған ортамен өзара әрекеттесуін сипаттайды.

Геометриялық шарттармен процесс өтетін денелердің пішіні мен сызықтық мөлшерлері беріледі.

Физикалық шарттармен дененің λ , c , ρ және т.б. жылуфизикалық параметрлері және жылудың ішкі көздерінің бөліну заңдары беріледі.

Бастапқы шарттар орнықтаған процестері қарастыру кезінде қажет және жалпы жағдайда келесідей жазыла алады: $\tau = 0$ кезінде $t_0 = f(x, y, z)$. Температура денеде бірқалыпты таралған жағдайда, бастапқы шарт $\tau = 0$ кезінде $t = t_0 = \text{const}$ болады.

Шекаралық шарттар бірнеше әдістермен беріледі:

- *бірінші текті шекаралық шарт*, уақыттың әрбір кезеңі үшін дене бетінде температураның t_k таралуын қарастырады: $t_k = f_2(x, y, z, \tau)$.

Жеке жағдайларда бұл температура уақыт бойында тұрақты бола алады, сонымен қатар дененің бүкіл беттігінде өзгеріссіз

болады;

– *екінші текті шекаралық шарт*, беттіктің әрбір нүктесі және уақыттың кез келген кезеңі үшін жылу ағыны тығыздығының шамасын қарастырады. Оны келесідей көрсетуге болады: $q_6 = \varphi(x, y, z, \tau)$, мұндағы q_6 – дене бетіндегі жылу ағынының тығыздығы. Қарапайым жағдайда жылу ағынының тығыздығы бет және уақыт бойынша тұрақты болып қалады $q_6 = \text{idem}$. Жылуалмасудың мұндай жағдайы, мысалы, әртүрлі металдық бұйымдарды жоғары температуралы пештерде қыздыру кезінде орын алады;

– *үшінші текті шекаралық шарт*, қоршаған ортаның температурасын t_c және дене беті мен қоршаған орта арасындағы жылуалмасу заңын қарастырады. Дене беті мен қоршаған орта арасындағы жылуалмасу процесін сипаттау үшін Ньютон заңы қолданылады. Ньютон заңына сәйкес дене беті бірлігінен бір уақыт бірлігінде берілетін жылу мөлшері дене t_k мен қоршаған орта температурасы t_c айырымына пропорционал $q = \alpha(t_k - t_c)$.

Жылуберу коэффициенті дене беті мен қоршаған орта арасындағы жылуалмасудың қарқындылығын сипаттайды. Сандық мәні бойынша ол, дене беті мен қоршаған орта арасындағы температуралар айырмасы бір градусқа тең кезде, бет бірлігінің уақыт бірлігінде берген (немесе қабылдаған) жылу мөлшеріне тең. Энергияның сақталу заңына сәйкес, жылуберу салдарынан уақыт бірлігінде бет бірлігінен кететін жылудың мөлшері жылуөткізгіштік арқылы дененің ішкі көлемдерінен уақыт бірлігінде бет бірлігіне келтірілетін жылуға тең болуы керек, яғни

$$\alpha(t_k - t_c) = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c, \quad (2.23)$$

мұндағы n – дене бетіне түсетін нормал; « c » индексі температура мен градиенттің дене ($n = 0$ кезінде) бетіне жататынын көрсетеді.

Түпкілікті үшінші текті шекаралық шартты келесі түрде жазуға болады:

$$\left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_c = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_\kappa - t_c). \quad (2.24)$$

Теңдеу (2.24), мәні бойынша, дене беті үшін энергияның сақталу заңының жеке өрнегі болып табылады;

– *төртінші текті шекаралық шарт*, денелер жүйесінің немесе дененің жылуөткізгіштік заңы бойынша қоршаған ортамен жылуалмасу шарттарын сипаттайды. Денелер арасында идеал жанасу жүзеге асырылады (жанасатын беттердің температуралары бірдей) деп болжанады. Қарастырылатын шарттарда жанасу беті арқылы өтетін жылу ағындарының теңесуі орын алады:

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right)_c = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right)_c. \quad (2.25)$$

2.4. Орныққан режим кезіндегі жылуөткізгіштіктің жеке есептеулері

Техникада дененің температуралық өрісі мен жылу берілістің заңдарын белгілеу есептеулері жиі туындайды. Жылуөткізгіштіктің дифференциалдық теңдеуін бірмәнділік шарттарымен қосарлы шешу нәтижесінде температуралық өрісті, ал Фурье заңы негізінде – сәйкес жылу ағынын табуға болады. Жылуөткізгіштіктің жеке есептерін шешуді дұрыс геометриялық пішіндегі денелер үшін және орныққан процестерден бастаған дұрыс, өйткені осындай денелер мен режимдер тәжірибеде көптеп кездеседі. Басқадай жағдайларда есеп сандық немесе эксперименталдық әдістермен шешіледі.

Жылуөткізгіштік теңдеуінің едәуір оңайлатылған түрін қолдануға болатын, жылудың стационарлы таралуы жағдайындағы бірнеше қарапайым пішіндегі денелерді қарастырайық – (бір- және көпқабатты жазық қабырға, бір- және көпқабатты қуыс цилиндр қабырға, ...).

Бірқабатты жазық қабырға арқылы жылу беріліс. Біртекті, жазық бірқабатты қабырғаны қарастырамыз (13-сурет), қабырғаның сыртқы беттеріндегі температура t_1 және t_2 тұрақты

ұсталады. Қабырғаның жылуөткізгіштік коэффициенті тұрақты, λ тең. Стационарлық режим кезінде $\partial t / \partial \tau = 0$, ішкі жылу көздері болмағанда $q_v = 0$ және осы жағдайда температура тек қана OX осі бағытында өзгереді ескеріп, жылу ағынын анықтайық. Фурье заңын қолданайық $Q = -\lambda F \text{grad} T$, онда аламыз:

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{Q}{\lambda F} = \text{const}. \quad (2.26)$$

Тендеуден (2.26) температураның түзу сызық бойымен өзгереді байқаймыз. Ауыспалыларды бөліп және интегралдап,

$$\text{аламыз: } dt = -\frac{Q}{\lambda F} dx, \quad \int_1^2 dt = -\frac{Q}{\lambda F} \int_1^2 dx,$$

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{\lambda F} (x_2 - x_1), \text{ бірақ } (x_2 - x_1) = S.$$

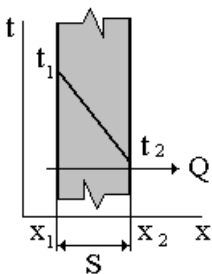
Онда:

$$Q = \frac{\lambda F}{S} (t_1 - t_2) \quad (2.27)$$

$$\text{мұндағы } \frac{S}{\lambda F} = R - \text{қабырғаның}$$

жылулық кедергісі.

$$Q = \frac{(t_1 - t_2)}{R}. \quad (2.28)$$



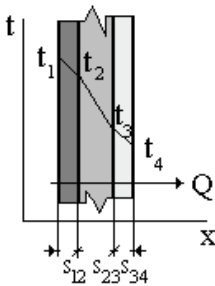
13-сурет. Жазық
бірқабатты қабырғада
температураның
таралуы

Бұл тендеуді шығару кезінде $\lambda = \text{const}$ деп қабылданды, бірақ тәжірибе жүзінде $\lambda = f(t)$, сондықтан $dt/dx \neq \text{const}$ және қабырғадағы температура қисық бойымен өзгереді. Егер алдыңғы тендеуге (2.26) $\lambda = \lambda_0(1+bt)$ қойсақ, жылу ағынын есептеудің нақты тендеуін алуға болады. Бірақ, көп жағдайларда техникалық есептеулерде жылуөткізгіштік коэффициентінің орташа арифметикалық мәнін

$\lambda_{opt} = 0,5(\lambda_1 + \lambda_2)$ колданумен, (2.27) тендеуі алынады, яғни

$$Q = \frac{\lambda_{opt} F}{S} (t_1 - t_2).$$

Көпқабатты жазық қабырға арқылы жылу беріліс



14-сурет. Жазық көпқабатты қабырғада температураның таралуы

Айталық, қабаттар бір-біріне идеал түрде термиялық жанасқан (14-сурет), яғни жанасқан беттерінің температуралары бірдей. Температуралар (t_1 және t_4) – тұрақты. Жылу ағыны (Q) мен жанасу беттеріндегі температураларды (t_2 және t_3) анықтайық.

Алдыңғы жағдайдағыдай (бір-қабатты қабырға), жылу ағыны жеке қабаттар арқылы X осі бойымен бағытталған және бірдей ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4$) деп қабылдайық. Теңдеуден (2.28) температуралар айырмаларын анықтайық:

$$t_1 - t_2 = QR_{12}$$

$$t_2 - t_3 = QR_{23}$$

$$t_3 - t_4 = QR_{34}$$

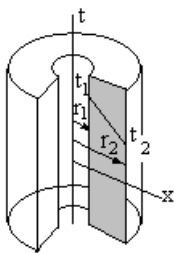
Теңдеулерді қосып, аламыз: $t_1 - t_4 = Q(R_{12} + R_{23} + R_{34})$. Онда, жылу ағыны:

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} = \frac{(t_1 - t_4)F}{\frac{S_{12}}{\lambda_{12}} + \frac{S_{23}}{\lambda_{23}} + \frac{S_{34}}{\lambda_{34}}} \quad (2.29)$$

Жанасу беттерінің температуралары: $t_2 = t_1 - QR_{12}$; $t_3 = QR_{34} + t_4$.

Цилиндр қабырға арқылы жылу беріліс

Үлкен ұзындықты қуыс цилиндр қабырғасын қарастырайық (15-сурет), мұндағы цилиндр ұзындығы l , қабырғаның екі бетінің температурасы t_1 және t_2 белгілі және тұрақты. Жылу ағынын анықтайық Q , $t = f(r)$.



15-сурет. Бірқабатты цилиндр қабырғада температураның таралуы

Фурье заңын қолданамыз

$$\frac{dt}{dr} = -\frac{Q}{\lambda F}, \quad \text{мұндағы } F = 2\pi r l.$$

Беттің мөлшері радиусқа тәуелді, радиус үлкен болған сайын, бет те үлкен болады.

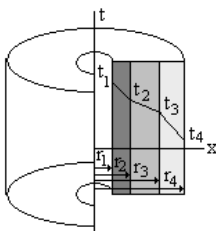
$$\frac{dt}{dr} = -\frac{Q}{\lambda 2\pi r l}, \quad dt = -\frac{Q}{\lambda 2\pi r l} dr,$$

$$\int_1^2 dt = -\frac{Q}{\lambda 2\pi r l} \int_1^2 \frac{dr}{r}. \quad \text{Онда}$$

$$Q = \frac{2\pi l \lambda}{\ln \frac{r_2}{r_1}} (t_1 - t_2) = \frac{2\pi l \lambda}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2) = \frac{l}{R} (t_1 - t_2) \quad (2.30)$$

мұндағы $R = \frac{\ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l \lambda}$ – цилиндр қабырғаның жылулық кедергісі.

Көпқабатты цилиндр қабырға үшін жазық көпқабатты қабырғада өтетін құбылысқа ұқсас тұжырымдауға болады (16-сурет).



16-сурет. Көпқабатты цилиндр қабырғада температураның таралуы

$$t_1 - t_2 = QR_{12},$$

$$t_2 - t_3 = QR_{23},$$

$$t_3 - t_4 = QR_{34}.$$

Теңдеулерді қосып, аламыз

$$t_1 - t_4 = Q(R_{12} + R_{23} + R_{34}), \quad \text{онда:}$$

$$Q = \frac{t_1 - t_4}{R_{12} + R_{23} + R_{34}}. \quad (2.31)$$

Жанасу беттерінің температураларын анықтаймыз:

$$t_2 = t_1 - QR_{12}; \quad t_3 = QR_{34} + t_4.$$

Шар қабырға арқылы жылу беріліс. Ішкі радиусы r_1 сыртқы радиусы r_2 біртекті қуыс шарды қарастырайық. Шар қабырғасы біртекті материалдан жасалған, жылу өткізгіштік коэффициенті λ тұрақты. Шардың ішкі және сыртқы температуралары (t_1 және t_2) белгілі және $t_1 > t_2$.

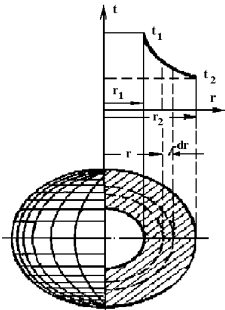
Фурье заңына сәйкес изотермиялық беттермен шектелген dr қабат үшін жылу ағынының теңдеуін жазайық:

$$Q = -\lambda F \frac{dt}{dr} = -4\pi r^2 \frac{dt}{dr}, \quad (2.32)$$

Қарастырылған жағдайда шекаралық шарт:

$r = r_1$ кезінде $t = t_1$; және $r = r_2$ кезінде $t = t_2$.

Интегралдап температуралық өріс пен температура градиентін анықтағаннан соң, алдыңғы теңдеуге қабырға шекарасындағы ауыспалы шамалардың мәнін қойып, аламыз:



$$Q = \frac{4\pi\lambda(t_1 - t_2)}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{2\pi\lambda\Delta t}{\left(\frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right)} = \pi\lambda\Delta t \frac{d_1 - d_2}{\delta}. \quad (2.33)$$

осы теңдеудегі $\delta = (d_1 - d_2)/2$ – қабырғаның қалыңдығы.

17-сурет. Шар қабырғада температураның таралуы

2.5. Конвекция. Конвективті жылуалмасуға әсер етуші факторлар

Конвекция – жылудың бір кеңістік аймағынан екіншісіне газдың немесе сұйықтың массасымен бірге тасылу әдісі және ортаның өзінің тасымалдануымен үздіксіз байланысты. Сондықтан, конвекция бөлшектері жеңіл тасымалдана алатын сұйықтар мен газдарда ғана мүмкіндікті. Конвекция еркін және мәжбүрлі болып бөлінеді.

Еркін конвекция – газдық ортаның қысым айырмашылық-тары арқылы жылудың тасымалы. Мысалы, ыстық батареялармен

қыздырылатын бөлмедегі ауа қозғалысы. Еркін қозғалыс *табиғи конвекция* деп те аталады.

Мәжбүрлі конвекция – газдың немесе сұйықтың сыртқы күштер әсерінен (желдеткіш, компрессор, сорғылар, т.б.) еріксіз қозғалуымен жылудың тасымалдануы. Мысалы, газұрлеу арқылы пештің жұмысшы кеңістігіндегі газ қозғалысы және т.б.

Жылудың конвекциямен тасымалдану механизмі жылу-өткізгіштік процесімен байланысты. Жылудың конвекциямен және жылуөткізгіштікпен бір мезгілде тасылуы *конвективті жылуалмасу* деп аталады. Инженерлік есептеулерде көбінесе, сұйықтың немесе газдың және қатты дене бетінің арасындағы конвективті жылуалмасу анықталады. Конвективті жылуалмасудың мұндай процесі *конвективті жылуберу* немесе жәй *жылуберу* деп аталады.

Жылуберу процесіне әсер етуші негізгі факторлар болатындар:

1. Қабырға бетінің бойлығымен сұйық қозғалысының туындау табиғаты. Сұйықтың (газдың) ыстық және суық қабаттарының тығыздықтары айырмасына негізделген және олардың ауырлық өрісіндегі өз бетінше қозғалысы – еркін қозғалыс немесе табиғи конвекция. Сорғымен, желдеткішпен және басқа құрылғылармен жасалатын қысым айырмасынан туындайтын қозғалыс – мәжбүрлі қозғалыс немесе мәжбүрлі конвекция.

2. Сұйық қозғалысының режимі. Тәртіпті, қабатты, тыныштықты, араласпайтын, лүпілсіз қозғалыс *ламинарлық* (лат. *lamina* – жолақ, қабат) деп аталады, ал тәртіпсіз, хаостық, құйынды қозғалыс *турбуленттік* (лат. *turbulentus* – қарқынды, тәртіпсіз) деп аталады.

3. Сұйықтар мен газдардың физикалық қасиеттері. Конвективті жылуалмасу процесіне келесі физикалық параметрлер үлкен әсер етеді: жылуөткізгіштік коэффициенті (λ), меншікті жылуsыйымдылық (c), тығыздық (ρ), температура өткізгіштік коэффициенті ($a = \lambda / c_p \cdot \rho$), динамикалық тұтқырлық коэффициенті (μ) немесе кинематикалық тұтқырлық ($\nu = \mu / \rho$), көлемдік кеңеюдің температуралық коэффициенті ($\beta = 1/T$).

4. Беттің пішіні (жазық, цилиндрлік), мөлшерлері және жайғасу жағдайы (көлденең, тік, т.б.).

2.5.1. Гидродинамикалық және жылулық шекаралық қабаттардың маңызы

Конвективті жылуалмасу процесін зерттеу кезінде жылу тасымалдаушының қабырғаға жақын аймақтағы беталысының ерекшеліктері маңызды.

Тағы да қозғалыс режимдеріне тоқталайық. Сұйық қозғалысының режимі сұйықтың орташа жылдамдығына, құбыр диаметріне және сұйықтың кинематикалық тұтқырлығына тәуелді. Бұл шамаларды Рейнольдс критериясы біріктіреді:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} \quad (2.34)$$

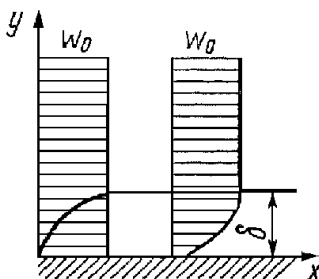
Қозғалыстың бір түрінен екіншісіне өтуіне Рейнольдс критериясының шамасы Рейнольдс критериясының ауыспалы мәні деп аталады, және түзу құбыр үшін $Re_{ay} \cong 2300$. Түзу құбырдағы $Re < 2300$ кезіндегі сұйық қозғалысы тұрақты ламинарлы, ал $Re > 2300$ кезінде қозғалыс – турбулентті, дегенмен тұрақты турбуленттік сипатқа ол $Re > 10000$ кезінде ие болады. Рейнольдс санының $2300 < Re < 10000$ аралығында орнықпаған турбуленттік немесе өтпелі режим айқындалады.

Сұйықтың ағуы негізгі ағын мен шекаралық қабаттан тұрады. Қатты бетте тұтқырлық үйкеліс күшінің әсер етуінен тежелген сұйықтың жұқа қабаты түзіледі. Тұтқырлық күшінің артуымен, демек, Re санының азаюымен, шекаралық қабат қалыңдайды. Re саны артқан сайын ағынның қабырғаға жанасқан аймағы да, соған байланысты шекаралық қабатта жұқарады. Шекаралық қабаттың жұқа болуына қарамастан, ол конвективті жылуалмасуда үлкен рөл атқарады.

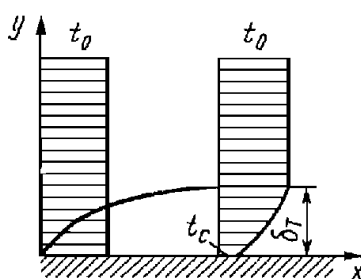
Шекаралық қабат гидродинамикалық және жылулық болып бөлінеді. Қабырға бетінде тұтқырлық күшінің әсер етуі нәтижесінде тежелген сұйықтың жұқа қабаты *гидродинамикалық шекаралық қабат* деп аталады және қабырғаға параллель қозғалады. Сұйықтың қабырғада тежелуі мен шекаралық қабат туралы гипотезаны 1904 жылы Л. Прандтль ашқан. Шекаралық қабат ішіндегі жылдамдық дене бетіндегі нөлден *сыртқы ағын* жылдамдығына дейін өзгереді. Бұл қабат шегінде жылудың

берілуі жылуөткізгіштікпен жүреді. Сыртқы ағын деп инерциялық күшке қарағанда тұтқырлық күші өте төмен әсер ететін сұйық ағынының аймағы аталады, бұл кезде шекаралық қабатта тұтқырлық күші мен инерция күші шамалас болады. Шекаралық қабаттың қалыңдығы δ – шартты шама, өйткені шекаралық қабаттан сыртқы ағынға өту кенеттен жүретін процесс емес. Шекаралық қабаттың қалыңдығы ретінде қабырға бетінен, сыртқы ағын жылдамдығынан аз шамаға болса да ерекшеленетін, сұйық қабатына дейінгі қашықтық алынады.

Жылулық шекаралық қабат үлкен температуралық градиентпен сипатталады және соның әсерімен жылудың көлденең тасымалдануы жүзеге асырылады. Жылуалмасу бетіне тікелей жанасқан аймақта температура негізгі ағын температурасынан (t_c) қабырға температурасына дейін (t_k) өзгереді. Жылулық шекаралық қабат шегінің сыртында температура біртекті және онда жылудың тасымалдану құбылысы жоқ. Жылулық шекаралық қабат қалыңдығы бойынша $\delta_{ж}$ гидродинамикалық қабат қалыңдығымен δ дәл келеді немесе дәл келмейді (18 және 19-суреттер).



18-сурет. Динамикалық шекаралық қабаттың сұлбасы



19-сурет. Жылулық шекаралық қабаттың сұлбасы

Жылулық және гидродинамикалық қабаттар қалыңдығының қатынасы Прандтль санының мәнімен анықталады ($Pr = \nu/a$).

2.5.2. Ньютон-Рихман заңы

Жоғарыда айтылғандай, процестің үлкен күрделілігіне қарамастан, жылу беру есептеуі, яғни дене беті мен орта арасындағы жылуалмасу процесі Ньютон-Рихман заңымен сипатталады. И. Ньютон дене мен орта арасындағы жылуалмасу процесінде шешуші фактор, ол температуралар айырмасы болатынына алғашқы болып көңіл аударды. XVIII ғасырда орыс физигі Г. Рихман қыздырылған дененің ауада суу процесіне жан-жақты талдау жасау арқылы олардың тек температура айырмасына емес, сонымен қатар беттік ауданы мен дене көлеміне де тәуелді екенін дәлелдеді. Содан кейінгі жүргізілген зерттеулер жылуалмасу процестерінің өте күрделі және гидродинамикалық процестермен тығыз байланысты екенін көрсетті.

Ньютон-Рихман заңының тұжырымы: конвективті жылу алмасумен берілетін жылудың мөлшері дене беті (t_k) мен қоршаған ортаның (t_c) температураларының айырымына тура пропорционал:

$$Q = \alpha \cdot (t_k - t_c) \cdot F, \quad (2.35)$$

немесе

$$q = \alpha \cdot (t_k - t_c), \quad (2.36)$$

мұндағы α жылу беру коэффициенті [$\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$], дене беті мен қоршаған орта арасындағы жылуалмасудың қарқындылығын сипаттайды. Конвективті жылуалмасу процесіне әсер етуші факторлар осы коэффициентке кіреді. Онда жылу беру коэффициенті келесі параметрлердің функциясы болады және бұл тәуелділік келесі теңдеумен көрсетіледі:

$$\alpha = f(X; \Phi; l_0; x_c; y_c; z_c; w_0; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; \nu; \beta), \quad (2.37)$$

мұндағы X – орта қозғалысының сипаты (еркін, мәжбүрлі);

Φ – беттің пішіні;

l_0 – беттің сипатты мөлшері (ұзындық, биіктік, диаметр және т.б.);

$x_c; y_c; z_c$ – координаталар;

w_0 – ортаның жылдамдығы (сұйық, газ);

$\theta = (t_k - t_c)$ – температуралық арын;

λ – ортаның жылуөткізгіштік коэффициенті;

α – ортаның температура өткізгіштік коэффициенті;

c_p – ортаның изобаралық меншікті жылусыйымдылығы;

ρ – орта тығыздығы;

ν – ортаның кинематикалық тұтқырлық коэффициенті;

β – ортаның көлемдік кеңеюінің температуралық коэффициенті.

Теңдеу (2.37) жылуберу коэффициентінің күрделі шама және оны анықтау үшін жалпылама теңдеу жазу мүмкін емес екенін көрсетеді. Сондықтан жылуберу коэффициентін анықтау үшін, зерттеудің эксперименттік әдісін қолданады. Эксперименттік әдістің құндылығы: алынатын нәтижелердің анықтығы; негізгі ықыласты тәжірибелік мүдделігі жоғары шамаларды зерттеуге аударуға болады. Бұл әдістің негізгі кемшілігі, ол берілген эксперименттің нәтижелерінің басқа ұқсас құбылыстарға қолданылу мүмкіндігін болмауы. Сондықтан берілген эксперименттік зерттеу нәтижелерін талдау негізінде жасалған қорытындылар, басқа құбылыстар үшін таратыла алмайды. Демек, зерттеудің эксперименттік әдісі кезінде әрбір нақты жағдай зерттеудің дербес объектісі болуы қажет және жылуберу процесінің математикалық жазылуы жылуөткізгіштіктің, қозғалыстың, тұтастықтың және жылуалмасудың дифференциалдық теңдеулері мен бір мәнділік шарттарына негізделеді. Бұл дифференциалдық теңдеулердің шешімі өте күрделі және көлемді және ол тек шектеулі қарапайым жағдайларда мүмкіндікті. Сондықтан конвективті жылуалмасу процесін зерттеуде ұқсастық теориясы әдісі қолданылады.

2.5.3. Ұқсастық теориясының негіздері және модельдеу

Жобаланатын машинаның немесе агрегаттың конструкциясын әзірлеу сатысындағы жаңа техниканы жасау кезінде туындайтын проблемаларды шешудің оңтайлы әдісі физикалық модельдеу әдісін қолдану болып табылады. *Физикалық модельдеу* – ғылыми зерттеу әдістерінің бірі, *физикалық модель* – зерттелетін объектінің қандайда бір дәрежеде физикалық мәнін көрсететін

құрылғы. *Математикалық модель* – зерттелетін объектінің заңдылықтарын сипаттайтын теңдеуді шығаратын құрылғы. Ары қарай *үлгі* деп аталатын, кез келген зерттелетін объектінің моделіне негізгі қойылатын талап, модель мен үлгінің ұқсастығымен қорытындыланады.

Күрделі жүйелер мен процестердің ұқсастық шарты: екі жүйе бір-біріне физикалық ұқсас болады, егер олар сапа жағынан бірдей, ал олардың біртекті шамаларын сипаттайтын қатынастар сәйкесті нүктелерде және уақыттың сәйкесті кезеңдерінде тұрақты сандармен (ұқсастық тұрақтыларымен) көрсетілетін болса. Физикалық жүйелер мен процестердің міндетті ұқсастық шартының бірі – олардың геометриялық ұқсастығы, яғни мөлшерлік шамаларының пропорционалдығы.

Екі газ ағынының жылулық ұқсастығы үшін, олардың геометриялық ұқсастығы және көлеміндегі жылдамдық, тығыздық, тұтқырлық, температура және басқа физикалық шамалар ұқсас (пропорционалды) болуы керек.

Сонымен, *ұқсастық критериясы* деп берілген процесс үшін маңызы бар шамалардан құралған мөлшерсіз комплекс аталады. Әдетте, олар ғылымның сәйкес саласындағы зерттеулерге үлкен үлес қосқан ғалымдардың атымен аталып, олардың фамилиясының бастапқы екі әріпімен белгіленеді.

Ұқсастық теориясының негізгі идеясы – құбылыстың алғашқы жеке шешімін (заңдылығын) модельде эксперименттік жолмен алу, нәтижесін критериалдық түрде көрсету және оны тез және жеңіл мәліметтер алу үшін, сол модельге ұқсас басқа құбылыстарда қолдану мүмкіндігі.

Процестердің (құбылыстардың) ұқсастығының негізін қалаушы белгілері үш теоремада тұжырымдалған. Бірінші теоремаға сәйкес, *ұқсастық сандары бірдей процестер (құбылыстар) өзара ұқсас*. Ньютон-Бертран теоремасы деп аталатын бұл теорема тәжірибелер жүргізу кезінде өлшеуді қажет ететін физикалық шамаларды бөлуге мүмкіндік береді. Олардың қатарына ұқсастық санының құрамына кіретін шамалар жатады.

Ұқсастық теориясының дамуындағы екінші қадамды орыс ғалымы А. Фредман (1911ж.) мен америка физигі Дж. Бэкингем

(1914 ж.) жасады, олар бір-біріне тәуелсіз ұқсастықтың екінші теоремасын ұсынды: *берілген физикалық құбылысты сипаттаушы негізгі математикалық теңдеу, барлық уақытта осы құбылысты сипаттайтын ұқсастық критериялары арасындағы тәуелділік түрінде көрсетіле алады. Бұл тәуелділік ұқсастық теңдеулері немесе критериялық теңдеулер деп аталады.*

Аталған екі теорема динамикалық ұқсастықтың қажетті және жеткілікті шарттарын белгілеуге мүмкіндік бермейтінін атап айту керек. Көрсетілген шарттар ұқсастықтың үшінші теоремасында (Кирпичев-Гухман теоремасы) тұжырымдалған: *бірмәнділік шарттары ұқсас және бірмәнділік шартынан құрылған ұқсастық критериялары сан мәнінде тең құбылыстар ғана ұқсас бола алады. Бірмәнділік шарттары ретінде қарастырылатын құбылыстың негізгі заңдылықтары тәуелді болатын шамалар мен параметрлер алынады, яғни температура, қысым, жылдамдық және т.б. Бұл теорема қандай құбылыстардың бір-біріне ұқсас екенін анықтайтын белгілерді айқындайды және модельде алынған тәжірибе нәтижелерін басқа құбылысқа келтіру мүмкіндігін береді.*

Теоремалардың тұжырымдамалары бойынша, алдыңғы екеуі ұқсас құбылыстардың қасиеттерін сипаттайды, ал үшіншісі – екі құбылыстың (жүйенің) ұқсастығына жету үшін қажетті шарттарды анықтайды. Ұқсастық теориясы, құбылысты сипаттаушы дифференциалдық теңдеуді интегралдамай-ақ, олардан ұқсастық критерияларын алуға және эксперименттік мәліметтерді қолдана отырып, өзара ұқсас құбылыстар үшін дұрыс болатын критериялық тәуелділіктерді белгілеуге мүмкіндік береді. Бұл қорытындыланған тәуелділіктер ұқсас құбылыстар шекарасында ғана дұрыс, және оларды шекарадан тыс таратуға болмайды. Сонымен, ұқсастық теориясы тәжірибелік мәліметтерді қорытындылауға және оларды ұқсас құбылыстар мен процестерге таратуға мүмкіндік береді екен.

Жылулық, механикалық және гидромеханикалық құбылыстардың барлық негізгі ұқсастық критериялары осы процестерді сипаттайтын математикалық теңдеулерден алынады. Мысалы, инерция күші мен ауырлық күшінің қатынасы беретін мөлшерсіз

комплекс Фруда критериясын береді:

$$Fr = \frac{gl}{\omega^2} \quad (2.38)$$

мұндағы g – ауырлық күшінің үдеуі;

l_o – анықтаушы сызықтық мөлшер.

Инерция күші мен қысым күші арасындағы байланыс Эйлер критериясымен сипатталады:

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho \omega^2} \quad (2.39)$$

мұндағы Δp – орта қозғалысын тудыратын, статикалық қысым айырымы.

Гидродинамика және мәжбүрлі конвекция есептерін шешу үшін ең маңызды мөлшерсіз комплекс инерция күші мен тұтқырлық күші арасындағы байланысты көрсететін комплекс Рейнольдс критериясы деп аталады:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} \quad (2.40)$$

Re , Fr , Eu мөлшерсіз комплекстерінің құрамында жылдамдық ω болғандықтан, олар өзара алмасушылық қасиеттеріне ие бола алады, осыған байланысты оларды бір-біріне көбейтіп немесе бөліп, жаңа критериялар алуға болады. Мысалы, Рейнольдс саны мен Эйлер санын көбейтіп, қысым күшінің тұтқырлық күшіне қатынасын сипаттайтын Лагранж санын алады:

$$La = Re \cdot Eu = l \cdot \Delta p / (\eta \cdot \omega). \quad (2.41)$$

Жылу ұқсастығы критериялары да жылуберілістің басты теңдеулерінен (жылуөткізгіштіктің, жылуалмасудың, дене массасымен қабылданатын жылу теңдеулерінен) алына алады.

Ұқсастық теориясында кеңінен қолданылатын критериялар 8-кестеде келтірілген.

Жылулық және гидродинамикалық процестердің негізгі
мөлшерсіз критериялары

Теңдеуі	Критерия- ның атауы	Критерияға кіретін шамалар	Критерияның мәні
$Pr = \frac{\nu}{a}$	Прандтль критерийі (сұйықтың физикалық қасиеттері- нің критерийі)	ν -кинематикалық тұтқырлық коэффициенті, $\text{м}^2/\text{с}$; a -температура өткізгіштік коэффициенті, $\text{м}^2/\text{с}\cdot\text{град}$	Сұйықтың физикалық қасиеттерін және жылудың сұйықта таралу қабілетін сипаттайды
$Pe = \frac{\omega d}{a}$	Пекле критерийі	ω -жылдамдық, $\text{м}/\text{сек}$;	Жылудың ағындағы молекулярлық және конвективті тасылу қатынасының шамасы
$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$	Нуссельт критерийі (жылуберу критерийі)	α -конвективті жылуберу коэффициенті, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$	Ағынның шекаралық кабатында жылуберу қарқындылығы мен температуралық өріс арасындағы қатынасты сипаттайды
$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda_m}$	Био критерийі	l -дененің сипатты мөлшері, м ; λ_m -қатты дененің жылуөткізгіштік коэффициенті, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$	Ішкі және сыртқы термиялық кедергілер арасындағы қатынасты сипаттайды
$Fo = \frac{a \tau}{l^2}$	Фурье критерийі (мөлшерсіз уақыт)	τ – уақыт, сек	Температуралық өріс өзгерісінің жылдамдығы, физикалық константалар және

			дене мөлшері арасындағы байланысты сипаттайды
$Gr = \frac{\beta g l^3 \Delta t}{\nu^2}$	Грасгоф критерийі (көтергіш күш критерийі)	β —көлемдік кеңею коэффициенті, 1/град; Δt —температуралар айырмасы, град	Сұйықтың еркін қозғалысы кезіндегі кинематикалық ұқсастықты сипаттайды
$Ho = \frac{\omega \tau}{l}$	Гомохрондық критерийі	l —дененің сипатты мөлшері, м;	Қозғалыстағы ортаның уақыт бойындағы жылдамдық өрісінің өзгерісін сипаттайды
$Ga = \frac{g l^3}{\nu^2}$	Галилей критерийі	g —еркін түсу үдеуі, м/сек ²	Еркін ағыс өрісінің ұқсастығын сипаттайды

Конвективті жылуалмасуды экспериментті зерттеу кезінде ізделетін шама болып Nu критериясына кіретін, конвекциямен жылу беру коэффициенті α табылады. Сондықтан конвективті жылуалмасудың критериалдық теңдеуін келесі функционалдық тәуелділіктер түрінде көруге болады:

$$Nu = f(F_0, Re, Pe, Gr) \text{ немесе } Nu = f(F_0, Re, Gr, Pr). \quad (2.42)$$

Өртүрлі жүйелер мен процестерді модельдеу тәжірибесі, ұқсастық теориясынан шығатын ұқсастықтың барлық шартын сақтау өте қиын, ал кейде мүмкін емес екенін көрсетеді. Сондықтан ұқсастық шарттарын бірнеше жеңілдетуге және жуықтама модельдеуге тура келеді, бұл көптеген зерттеулердің көрсетуінше, техника үшін жарайтын дәлдікті береді. Газдар мен сұйықтар қозғалысының және жылуалмасу процестерінің жуықтама модельденуі, ағындардың тұрақтылығы мен автомодельдігімен қорытындалатын және де жергілікті жылулық модельдеудің қолданылу мүмкінділігімен, тұтқыр

газдар мен сұйықтар қозғалысының ерекшеліктері әсерінен мүмкін бола алады.

Тұрақтылық деп газ бен сұйықтың әртүрлі пішінді каналдар бойынша қозғалуы кезінде, газ бен сұйықтың осы каналға кіру шартына тәуелсіз және тек қана қозғалыс сипатымен анықталатын, жылдамдықтардың белгілі бір таралуын қабылдау қасиетін атайды, яғни *Re* критериясымен. Каналға кірер жерде жылдамдықтардың таралу жағдайы қалай бұрмаланғанмен, ары қарай каналмен қозғалу кезінде кірістен алыстаған сайын бұрмалану тегістеледі және ағын, қозғалыстың ламинарлық немесе турбуленттік режиміне қатаң сәйкестенген жылдамдық эпюріне ие болады.

Газдық және сұйықтық ағындардың автомодельдігі (өздігінен ұқсау) қозғалыстың ламинарлық немесе турбуленттік режимінің кең шектерінде жылдамдықтар эпюрі (егер олар қозғалыс сипатының өзгерісін туғызбаса) *Re* сандық мәніне тәуелді болмайды.

Металлургиялық пештердегі газ қозғалысын жуықтама модельдеу осы пештердің ауалы және сулы модельдерінде, келесі шарттардың сақталуымен жүргізіле алады:

- модель үлгіге геометриялық ұқсас болуы қажет;
- модельдегі газдарға арналған кіріс саңылаулары үлгідегіге геометриялық ұқсас болуы қажет. Бұл шартты, пеш ұзындығы үлкен болғанда немесе газ ағынын тұрақтандыру үшін модельді жасанды ұзартқанда, ұстанбауға болады;
- зерттеу автомодельдік аймақта жататын *Re* модельдің кезінде жүргізілуі қажет. Автомодельдік аймаққа жету *Eu* критериясының тұрақтылығымен немесе *Re* модельдің мәнінің өзгеруі кезіндегі модельдің гидравликалық кедергісі коэффициентімен анықталады.

Газ қозғалысын модельдеу жолымен табуға болады:

- пештегі газдар қозғалысының жалпы көрінісін, газ ағындарының таралуы мен қарқындылығын орнықтыруды;
- пештің және оның жеке бөлімшелерінің гидравликалық кедергілерін анықтауды;
- пештегі әртүрлі құрылымдық өзгерістердің газдар қозғалысына ықпалын және басқаларды.

Металлургиялық пештердегі конвективті жылуалмасуды жуықтама модельдеу, келесі шарттарды сақтаумен, пештің жеке бөлімшелерінің ауалы және сулы модельдерінде жүргізіле алады:

1) жоғарыда аталған газ қозғалысын жуықтама модельдеу шартын сақтаумен;

2) зерттеу жергілікті орындалады – пештің ең сипатты бөлімдері немесе аймақтары бойынша, ары қарай жеке нәтижелердің қосындысымен.

Конвективті жылуалмасуды модельдеумен пештердегі және ауа қыздырғыштардағы конвекциямен жылуберу коэффициенттерінің мәнін анықтауға, сонымен қатар пештің жылулық жұмысында жеке беттіктер мен бөлімдердің рөлін бағалауға да болады.

Конвективті жылуалмасудың критериалдық теңдеуі, α_k Нуссельт (Nu) критериясының мәніне кіретін, келесідей жалпы түрде көрсетіледі:

$$Nu = f(Fo, Re, Pr, Gr); \quad (2.43)$$

$$Nu = f(Fo, Re, Gr, Pr). \quad (2.44)$$

Қалыптасқан мәжбүрлі қозғалыс кезінде Фурье критериясы қосылмайды және табиғи қозғалыстың әсерін ескермеуге болады, яғни Грасгоф критериясын, онда критериалдық теңдеу жеңілденіп, келесі түрге енеді:

$$Nu = f(Re, Pr). \quad (2.45)$$

Газдардың таза табиғи қозғалысы кезінде Re критериясы алынбайды және критериалдық теңдеу былай жазылады:

$$Nu = f(Gr, Pr). \quad (2.46)$$

Прандтль критериясы бірдей және тұрақты болатын, бірдей атомды газдар үшін мәжбүрлі мәнді кезіндегі жылуалмасу теңдеуі:

$$Nu = f(Re). \quad (2.47)$$

ал табиғи қозғалыс үшін

$$Nu = f(Gr). \quad (2.48)$$

Еркін кеңістіктегі газ бен сұйықтың табиғи қозғалысы

кезіндегі жылуалмасуды М.А.Михеевтың теңдеуімен есептеуге болады:

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)_m^n, \quad (2.49)$$

мұндағы m – шартты белгі, ол жылуберуді есептеу кезінде критерияға енетін, физикалық параметрлер мәні орналасатын температураны анықтаушы ретінде газдың және дене беттігінің орташа арифметикалық температурасы қабылдануы керек екенін көрсетеді;

c және n – келесі мәндерге ие болатын коэффициенттер:

$$(Gr \cdot Pr)_m = 1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^2; c = 1,18; n = 0,125;$$

$$(Gr \cdot Pr)_m = 5 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^7; c = 0,54; n = 0,25;$$

$$(Gr \cdot Pr)_m = 2 \cdot 10^7 - 1 \cdot 10^{13}; c = 0,135; n = 0,33.$$

Критерияларды есептеу кезінде анықтаушы мөлшер ретінде l алынады:

– құбырлар мен каналдар үшін – гидравликалық немесе эквиваленттік диаметр $d = \frac{4F}{S}$, мұндағы F – каналдың қима ауданы, m^2 , және S – периметр, m ;

– құбырды айнала аққанда l құбырдың сыртқы диаметріне тең;

– тік плиталарды айнала аққанда – қозғалыс бойынша ұзындығы, көлденең плиталар кезінде – плитаның қысқа жағы.

Келтірілген теңдеу (2.47) $Pr \geq 0,7$ кезіндегі кез келген тамшылы сұйықтар мен газдар үшін және кез келген пішін мен мөлшердегі денелер үшін қолданбалы. Атап айтсақ, осы теңдеу бойынша пештің сыртқы бетінің қоршаған ортамен конвекциямен жылуалмасуын есептеуге болады.

Құбыр және каналдар бойымен қозғалыстың ламинарлық сипатындағы, газдар мен сұйықтардың мәжбүрлі қозғалысы кезіндегі жылуберуді есептеуді М.А. Михеев теңдеуі бойынша жүргізу ұсынылады:

$$Nu_f = 0,17 Re_f^{0,33} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot Gr_f^{0,1} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25}. \quad (2.50)$$

Бұл теңдеуде, критериялардағы f индексі оларды есептеу

кезінде анықтаушы температура ретінде газдың немесе сұйықтың орташа температурасы алынғанын көрсетеді. Дененің бетінің температурасымен есептелетін, бөлшектің бөліміндегі Pr_w критериясы бұл қатарға жатпайды. Теңдеу (2.48) бойынша есептеу кезінде, анықтаушы мөлшер ретінде каналдың эквиваленттік диаметрі қабылданады. Бұл теңдеу кез келген газ бен сұйық үшін қолданбалы және жылу ағыны мен табиғи конвекция бағытының ықпалын барынша толық ескереді.

Газдар мен сұйықтардың, қозғалыстың турбулентті сипатындағы мәжбүрлі қозғалысы кезіндегі жылу беруді есептеу М.А. Михеевпен қорытындыланған теңдеу бойынша жүргізіледі:

$$Nu_f = 0,021 Re_f^{0,80} \cdot Pr_f^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0,25} \quad (2.51)$$

Бұл жерде, анықтаушы температура ретінде газдың немесе сұйықтың орташа температурасы қабылданған, ал анықтаушы мөлшер ретінде – канал қимасының эквиваленттік диаметрі. Теңдеу (2.49) $Re_f = 1 \cdot 10^4 \div 5 \cdot 10^6$ және $Pr_f = 0,6 \div 2500$ кезіндегі барлық газдар мен сұйықтар үшін кез келген пішіндегі көлденең қималы құбырлар мен каналдарға қолданбалы.

Критериалдық түрдегі теңдеулерден өзге, анықтамалық және оқулық әдебиеттерде келесі нысанда келтірілген теңдеулердің жеңілдетілген түрлерінде кездестіруге болады:

$$\alpha_k = A \cdot \Delta t^n \quad \text{немесе} \quad \alpha_k = B \cdot \omega^m. \quad (2.52)$$

Жеңілдетілген теңдеулер, критериялық теңдеулерден осы критерияларға кіретін қандайда бір белгілі шамалардың жеке мәндері үшін критериялардың мәндерін ашу жолымен алынады. Демек, жеңілдетілген теңдеулерді, егер есептелетін агрегаттағы конвективті жылуалмасу процесі осы теңдеу алынған жағдайларға ұқсас шарттарда өтетін болса ғана қолдануға болады.

Конвекциялық жылу беру коэффициентінің тәжірибелік мәні α_k , әртүрлі жағдайларда келесі интервалдарда жатады:

табиғи конвекция кезіндегі газдар 5 – 100;
табиғи конвекция кезіндегі су..... 100 – 1000;
газдың құбырда және каналда немесе құбыр араларындағы
қозғалысы кезінде..... 10 – 300;

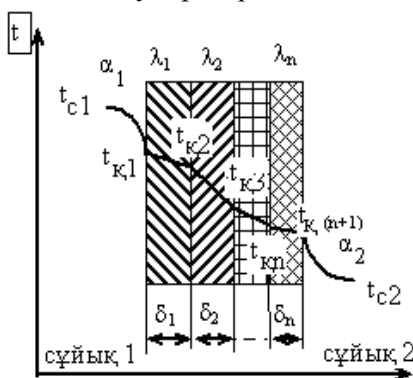
құбырдағы судың қозғалысы кезінде..... 500 –10000;
судың қайнауы (көпіршікті)..... 2000 –40000.

Конвекциямен жылу беру процесінің газ температурасы 600–700 °С-тан төмен және газ жылдамдығы 6-7 м/сек жоғары режимде жұмыс істейтін төменгі температуралы пештерде және ауа қыздырғыштарда алатын орыны маңызды. Қалған пештерде, конвекцияның мәні екінші дәрежелі болады. Металлургиялық пештер үшін, коэффициент α_k ең жиі кездесетін мәні 15 – 100 шегінде жатады.

2.6. Жылотасымалдау

Техникада бір жылотасығыштан екіншісіне оларды бөліп тұрған қабырға арқылы жылудың тасымалдануының стационарлық процесін есептеу жиі қолданылады. Мұндай процесс *жылотасу* деп аталады. Әртүрлі конфигурациядағы қабырғалар арқылы жылудың тасылу жағдайын қарастырайық.

Жазық қабырға. Көпқабатты жазық қабырға арқылы екі сұйық арасындағы жылотасымалын қарастырамыз (20-сурет). Бұл кезде жылудың тасылуы үш процеске бөлінеді:



20-сурет. Көпқабатты жазық қабырға арқылы жылудың тасылуы кезінде температураның таралуы

– алдымен жылу ыстық жылотасығыштан t_{c1} қабырға бетіне конвективті жылуалмасу жолымен (сәулелі жылуалмасу

қатар жүре алады) беріледі. Жылу беру процесінің қарқындылығы жылу беру коэффициентімен α_1 сипатталады;

– содан соң жылу жылу өткізгіштікпен кезек – кезегімен бір беттен екіншісіне өтеді және жылу өткізгіштік коэффициентімен сипатталады $\lambda (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$;

– ақырында, жылу қайтадан конвективті жылу алмасу жолымен қабырға бетінен суық сұйыққа t_{c2} беріледі. Бұл процесс жылу беру коэффициентімен α_2 сипатталады.

Орныққан режим кезінде жылу ағынының тығыздығы үш процесте де бірдей және келесідей жазыла алады:

1. Ньютон – Рихман заңы бойынша:

$$q = \alpha_1 \cdot (t_{c1} - t_{k1}) = \frac{1}{R_{\alpha 1}} \cdot (t_{c1} - t_{k1}), \quad (2.53)$$

2. Фурье заңы бойынша:

$$q = \frac{t_{k1} - t_{k \cdot (n+1)}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} = \frac{t_{k1} - t_{k \cdot (n+1)}}{\sum_{i=1}^n R_{\lambda i}}, \quad (2.54)$$

3. Ньютон – Рихман заңы бойынша:

$$q = \alpha_2 \cdot (t_{k \cdot (n+1)} - t_{c2}) = \frac{1}{R \cdot \alpha_2} \cdot (t_{k \cdot (n+1)} - t_{c2}), \quad (2.55)$$

мұндағы $R_{\alpha 1} = \frac{1}{\alpha_1}$ және $R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha_2}$ – ыстық жылутасығыштан

қабырғаға және қабырғадан суық жылутасығышқа жылудың берілуінің термиялық кедергісі.

Жоғарыда келтірілген теңдеулерден теңдеулер жүйесін құрайық:

$$\begin{cases} t_{c1} - t_{k1} = q \cdot R_{\alpha 1} \\ t_{k1} - t_{k \cdot (n+1)} = q \cdot \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} \\ t_{k \cdot (n+1)} - t_{c2} = q \cdot R_{\alpha 2} \end{cases}$$

және оң және сол жақтарын қосып, көпқабатты жазық қабырға арқылы жылутасымалы теңдеуін аламыз:

$$t_{c1} - t_{c2} = q \cdot (R_{\alpha 1} + \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} + R_{\alpha 2})$$

немесе

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_{\alpha 1} + \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} + R_{\alpha 2}} = \frac{\Delta t}{R_k}, \quad (2.56)$$

мұндағы $\Delta t = (t_{c1} - t_{c2})$ – есеп шартымен берілген температура арыны;

R_k – ыстық жылу тасымалданушынан суыққа жылу тасымалының термиялық кедергісі.

R_k кері шама *жылу тасу коэффициенті* K деп аталады:

$$K = \frac{1}{R_k} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2.57)$$

Жылу тасу коэффициенті K ыстық жылу тасымалданушынан суыққа оларды бөліп тұрған қабырға арқылы жылу тасу процесінің қарқындылығын сипаттайды.

Онда жылу тасу теңдеуін келесідей жазуға болады:

$$q = K \cdot (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_k} \quad \text{немесе} \quad Q = K \cdot (t_{c1} - t_{c2}) \cdot F \quad (2.58)$$

Шекаралық температураларды анықтау теңдеулері:

$$t_{k1} = t_{c1} - q \cdot R_{\alpha 1}; \quad t_{k(n+1)} = t_{k1} - q \cdot (R_{\alpha 1} + \sum_{i=1}^n R_{\lambda i}) = t_{c2} - q \cdot R_{\alpha 1}$$

$$\text{Бірқабатты жазық қабырға үшін} \quad \sum_{i=1}^n R_{\lambda i} = R_{\lambda}, \quad \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = \frac{\delta}{\lambda},$$

$$t_{k(n+1)} = t_{k2}.$$

Цилиндрлік қабырға. Көпқабатты цилиндр қабырға бөліп тұрған екі сұйық арасындағы жылу беру жағдайын қарастырайық. Жоғарыда келтірілген әдіске ұқсас, көпқабатты цилиндр қабырға арқылы стационарлық режимдегі жылу ағынының сызықтық тығыздығын келесідей жазамыз:

1. Ньютон – Рихман заңы бойынша

$$q_l = \alpha_1 \cdot (t_{c1} - t_{k1}) \cdot \pi \cdot d_1 = \frac{t_{c1} - t_{k1}}{R_{l\lambda i}}, \quad (2.59)$$

2. Фурье заңы бойынша

$$q_l = \frac{t_{k1} - t_{k2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} = \frac{t_{k1} - t_{k \cdot (n+1)}}{\sum_{i=1}^n R_{l\alpha i}}, \quad (2.60)$$

3. Ньютон – Рихман заңы бойынша

$$q_l = \alpha_2 \cdot (t_{k \cdot (n+1)} - t_{c2}) \cdot \pi \cdot d_{n+1} = \frac{t_{k \cdot (n+1)} - t_{c2}}{R_{l\alpha 2}}, \quad (2.61)$$

мұндағы $R_{l\alpha 1} = \frac{1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1}$ және $R_{l\alpha 2} = \frac{1}{\pi \cdot d_{n+1} \cdot \alpha_2}$ - ұзындық

бірлігіндегі ішкі және сыртқы жылу берудің термиялық кедергісі.

Жылу ағыны тығыздығын анықтаймыз:

$$q_l = K_l \cdot (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{\Delta t}{R_{lk}}, \quad (2.62)$$

мұндағы R_{lk} – сызықтық термиялық кедергі, (м·К)/Вт.

K_l – жылутасудың сызықтық коэффициенті, Вт/(м·К)

$$K_l = \frac{1}{R_{lk}} = \frac{1}{\frac{1}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi \cdot d_{n+1} \cdot \alpha_2}}, \quad (2.63)$$

Цилиндр қабырғаның шекаралық температуралары анықталады:

$$t_{k1} = t_{c1} - q_l \cdot R_{l\alpha 1}; \quad t_{k \cdot (n+1)} = t_{c2} + q_l \cdot R_{l\alpha 2}$$

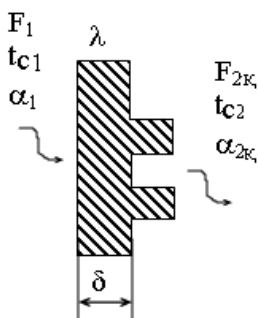
Жылу берілісті күшейту. Жылу беру теңдеуіне сәйкес:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_k}.$$

Жылу берілісті күшейту үшін теңдеудің алымын ($t_{c1}-t_{c2}$) арттыру немесе жылу берудің термиялық кедергісін R_k төмендету қажет. Жылутасығыштардың температуралары технологиялық процестің талаптарымен шартталады, сондықтан оларды өзгерту мүмкіндігі болмайды.

Жылу берудің термиялық кедергісін R_k , оның кез келген құрамдасына $R_{\alpha 1}$, R_{λ} , $R_{\alpha 2}$ әсер етіп, төмендетуге болады. Дегенмен, қосылғыштардың ең үлкенін азайту тиімдірек болады:

$$R_k = R_{\alpha 1} + R_{\lambda} + R_{\alpha 2} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (2.64)$$



21-сурет. Қырланған қабырға арқылы жылу беру

Яғни, егер $R_{\alpha 1}$ және $R_{\alpha 2}$ салыстырғанда R_{λ} біршама төмен екенін ескерсек, R_k азайту үшін жылу беру коэффициенті α аз сұйықтың R_{α} төмендету қажет. Айталық, жылу беру коэффициенті α аз сұйық жағындағы қабырғаны қырландыру қажет.

Осындай нәтижені үлкен жылу беру коэффициентін арттыру арқылы да алуға болады, бірақ ол үшін жылутасығыш жылдамдығын жоғарылатуға қосымша қуат шығыны

талап етіледі.

Қырланған қабырға арқылы өтетін жылу ағыны (21-сурет) келесі теңдеумен анықталады:

$$Q = K_k \cdot F_1 \cdot (t_{c1} - t_{c2}), \quad (2.65)$$

мұндағы $K_k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{2k} \cdot \varepsilon_k}}$ - қырланған қабырға арқылы

жылу беру коэффициенті;

$\varepsilon_k = F_{2k}/F_1$ - қырландыру коэффициенті;

$F_{2к}$ және F_1 – қабырғаның қырланған және қырланбаған беттерінің ауданы;

α_1 – қабырғаның қырланған бетінен сұйыққа немесе газға жылу беру коэффициенті.

Осыдан, қырландыру коэффициентінің ε_k артуымен жылу беру коэффициентінің K_k ұлғаятынын байқауға болады, демек жылу ағыны да артады.

Сондықтан да жылыту радиаторлары, қозғалтқыштар корпустары, іштен жану қозғалтқыштарындағы суды суытуға арналған радиаторлар қырландырылып жасалады.

2.7. Сәулелі жылуалмасу

Барлық денелердің температуралары абсолюттік нөлден айрықшаланады, сондықтан бүкіл денелер сәулелі энергияны шашады және сіңіреді. Дененің ішкі энергиясының электромагниттік толқындарға түрленуімен, осы энергияның тасымалдануымен және оның басқа денелермен сіңірілуімен шартталатын жылуалмасу *жылуалмасу және сәулелену* деп аталады.

Толқын теориясына сәйкес, ν жиілікті және λ толқын ұзындықты толқынды тербеліс *сәулелену* деп қабылданады. Толқынның жиілігі мен ұзындығының көбейтіндісі жарық жылдамдығына тең, таралу жылдамдығы болады:

$$c \approx \lambda \cdot \nu \approx 3 \cdot 10^8 \text{ м/с} \quad (2.66)$$

Кванттық тұрғыдан қарағанда, сәулелену энергиясы энергия-фотондар үлесі түрінде беріледі. Әрбір фотон жарық жылдамдығымен қозғалады және төменгі қатынаспен берілген белгілі бір энергияға ие болады:

$$e = h \cdot \nu, \quad (2.67)$$

мұндағы h – Планк тұрақтысы, $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Электромагниттік сәулеленудің барлық түрінің табиғаты бірдей, тек қана толқын ұзындығымен ерекшеленеді. Толқын ұзындығының интервалдарына тәуелді космостық, γ – сәулелену, рентгендік, ультракүлгін, көрінетін (жарық сәулелері), инфрақызыл және т. б. бөлінеді.

Жылуалмасу үшін маңыздысы – затпен сіңірілу кезінде жылуға және кері түрленетін энергиялы сәулелену. Мұндай қасиеттер толқын ұзындығы 0,4-тен 800 мкм дейінгі сәулелерде байқалады. Бұл сәулелену *жылулықты* деп аталады. Ол көрінетін (жарық) сәулеленуден (0,4-тен 0,8 мкм дейін) және инфрақызыл сәулеленуден (0,8-ден 800 мкм дейін) тұрады. Температураның 2000 °С аймағында жылу алмасудағы басты рөлді екіншісі, яғни инфрақызыл сәулелену атқарады.

Жылулық сәулелену барлық денелерге тән, олардың әрқайсысы қоршаған кеңістікке энергиясын сәулелендіреді. Басқа денеге түскенде бұл энергияның бір бөлігі сіңеді, бір бөлігі шағылады, ал бір бөлігі дене арқылы өтеді. Сәулелі энергияның денеге сіңірілген бөлігі қайтадан жылуға айналады. Ал шағылған бөлігі басқа денелерге түсіп, сіңеді және сәулелінің дене арқылы өтетін бөлігі де осы бірізділікте болады. Осылай бірнеше сіңірілгеннен кейін сәулелі энергия қоршаған денелер арасында түгелімен таралады, яғни әрбір дене тек үздіксіз сәулеленбейді, сонымен қатар сәулелі энергияны үздіксіз сіңіреді.

Энергияның екі жақты осылай түрленуіне байланысты құбылыстың нәтижесінде (жылулық – сәулелену – жылулық) сәулелі жылуалмасу процесі өтеді. Берілетін немесе сіңірілетін жылудың мөлшері денеден шашылатын және сіңірілетін сәулелі энергиялардың мөлшерлері арасындағы айырмамен анықталады. Егер сәулелі энергияны өзара алмастыруға қатысатын денелер температурасы әртүрлі болса, онда бұл айырма нөлден өзгеше болады.

Бұл денелердің температуралары бірдей болған кезде барлық жүйе қозғалмалы жылулық немесе термодинамикалық тепе-теңдікте болады. Бұл жағдайда жүйенің барлық денелері сәулеленеді және сіңіреді, тек әрқайсысы үшін сәулелі энергияның кірісі оның шығысына тең.

2.7.1. Сәулелі ағындар түрлері

Дене бетінен бір уақыт бірлігінде толқын ұзындығының бүкіл интервалында ($\lambda=0$ -ден $\lambda=\infty$ дейін) сәулеленетін энергия мөлшері *сәулеленудің интегралдық (толық) ағыны* Q (Вт) деп аталады. Толқын ұзындығының өте тар интервалына сәйкес келетін сәулелену *монохроматикалық* деп, ал дене бетінің бірлігінен уақыт бірлігінде сәулеленген энергияның мөлшері *дененің сәулелену қабілеті* E ($Вт/м^2$) немесе интегралдық *сәулелену тығыздығы* деп аталады.

$$E = \frac{dQ}{dF}, \text{ Вт/м}^2. \quad (2.68)$$

Дененің сәулеленудің белгілі бір толқынына келтірілген сәуле шашу қабілеттілігін *сәулелену қарқындылығы* J ($Вт/м^3$) деп атайды.

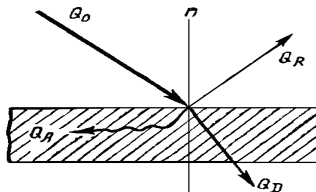
Мейлі, денеге құлайтын сәулелі ағынның Q , бір бөлігі денеге сіңіріледі Q_A , бір бөлігі шағылады Q_R , бір бөлігі дене арқылы өтеді Q_D (22-сурет), онда денеге құлаған сәулелі энергияның мөлшерін жазуға болады:

$$Q=Q_A+Q_R+Q_D \quad (2.69)$$

Теңдіктің екі бөлігінде Q бөліп және белгілеп, аламыз

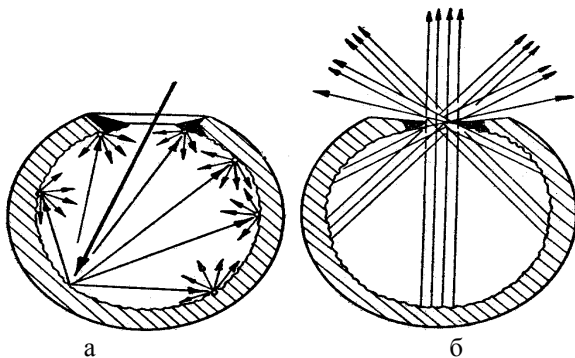
$$Q_A/Q=A, \quad Q_R/Q=R, \quad Q_D/Q=D, \quad \text{осыдан} \quad 1=A+R+D. \quad (2.70)$$

A , R , D коэффициенттері дененің сіңіру, шағылыстыру және өткізу (мөлдірлік) қабілеттерін сипаттайды. Осыған байланысты, олар *сіңіру, шағылысу және өткізу коэффициенттері* деп аталады және ол әртүрлі денелер үшін 0-ден 1-ге дейін өзгере алады.



22-сурет. Құлайтын сәулелі энергияның таралу сұлбасы

Егер $A = 1$, онда $R = 0$ және $D = 0$; бұл түскен барлық сәулелі энергияның денемен толық сіңірілетінін көрсетеді. Мұндай денелер *абсолютті қара денелер* деп аталады. Табиғатта абсолютті қара денелер болмайды. Абсолютті қара дененің моделі 23-суретте келтірілген (диффузиялық шағылыстырушы қабырғалы тұйықталған қуыс саңылауы). Саңылау үшін $A = 1$, өйткені саңылаудан түскен сәуле энергиясы қуыс дене ішінде толығымен сіңіріледі. Ары қарай абсолютті қара денеге қатысты барлық шама «0» индексімен белгіленеді. Берілген дененің сәулелену тығыздығының сол температурадағы абсолютті қара дененің сәулелену тығыздығына қатынасы қаралық дәрежесі деп аталады: $\varepsilon = \frac{E}{E_0}$.

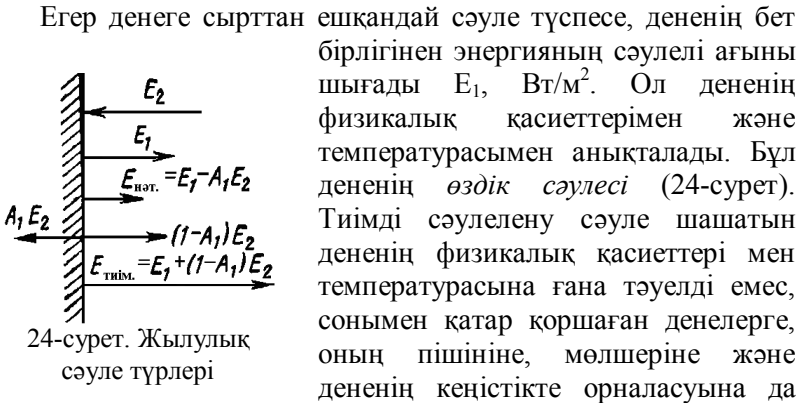


23-сурет. Абсолютті қара дененің моделі:
а – сіңіру; б – сәулелену

Егер $R = 1$, онда $A = 0$ және $D = 0$; бұл түскен барлық сәулелі энергияның денемен толық шағылатынын көрсетеді. Егер шағылған сәуле дұрыс болса дене *айналы* деп, ал шағылу *диффузиялы* болса – *абсолютті ақ дене* деп аталады. Абсолютті ақ дене де болмайды, бірақ кейбір материалдың шағылыстыру коэффициенті өте жоғары болады ($R=0,95$).

Егер $D = 1$, ал $A = R = 0$ болса, онда түскен сәуле толығымен дене арқылы өтеді, мұндай денелер *мөлдір* немесе *диатермиялық* деп аталады.

Сонымен, табиғатта абсолютті қара, ақ және мөлдір денелер болмайды екен, дегенмен нақты беттіктермен салыстыру үшін бұл ұғымдар өте маңызды болып табылады.



тәуелді.

Дененің *нәтижелі сәулеленуі* өздік сәулесі мен сырттан түсетін сәуленің осы дене жұтатын бөлігі арасындағы айырмамен анықталады: $E_{\text{нәт}} = E_1 - A_1 E_2$. Сәулеленудің нәтижелі ағыны оң, теріс және нөлге тең (тепе-теңдікті сәулеленуде) шама бола алады. Дегенмен, қаралып отырған денеге басқа денелер тарапынан сәулелі энергия түседі, мөлшері E_2 .

Бұл сәуле *құлама сәуле* деп аталады. Түскен сәуленің бір бөлігі (мөлшері $A_1 E_2$) денемен жұтылады. Ол *жұтылған сәуле* деп аталады, қалған бөлігі $(1 - A_1) E_2$ мөлшерінде шағылысады – *шағылмалы сәуле*. Дененің өздік сәулесі денеден шағылған сәулемен қосылып дененің *тиімді сәулеленуін* береді, оның шамасы $E_{\text{тиім}} = E_1 + (1 - A_1) E_2$ тең. Дененің бұл сәулеленуін біз сезіміміз немесе аспаптармен өлшей аламыз.

2.7.2. Сәулелі жылуалмасудың негізгі заңдары

Жылулық сәулеленудің заңдары идеал абсолютті қара денеге және термиялық тепе-теңдік жағдайларына қолданбалы алынған. Сәйкес түзетулер енгізумен олар сұр денелердің немесе газдардың сәулеленуін есептеу мақсатында қолданыла алады.

2.7.2.1. Планк заңы

Сәулеленудің кванттық теориясын зерттеумен, М. Планк (1900 ж.) абсолютті қара дененің сәулелену ағыны тығыздығының толқын ұзындығы мен температураға тәуелділігін дәлелдеді:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (2.71)$$

мұндағы λ – толқын ұзындығы, м;

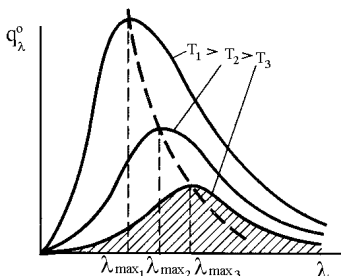
e – натурал логарифм негізі;

T – дененің абсолюттік температурасы, К;

$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$, Вт/м² – Планк тұрақтысы (бірінші);

$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$, м·К – Планк тұрақтысы (екінші).

Төменде келтірілген 25-суретте Планк заңының графикалық көрінісі келтірілген.



25-сурет. Сәулелену ағыны тығыздығының толқын ұзындығы мен температураға тәуелділігі

Суретте көрсетілген изотермалардан, сәулеленудің алғашқыда, қысқа толқындар бөлімшесінде, максимумға дейін жылдам жоғарылайтынын, ал содан соң баяу төмендеп, нөлге ұмтылатынын көруге болады. Толқынның бірдей ұзындығында, дене температурасы қаншалықты жоғары болса, сәулелену қарқындылығы да соншалықты үлкен болады.

Нақты денелер үшін сәулелену ағыны тығыздығының толқын ұзындығы мен температурасының өзгеруі, олардың спектрін тәжірибелік зерттеу негізінде анықталады.

Егер сәулелену спектрі үздіксіз болса, ал $E_\lambda = f(\lambda)$ қисығы сол температурадағы абсолютті қара дене үшін сәйкес қисыққа ұқсас болса, яғни толқынның барлық ұзындығы үшін $E_\lambda/E_{0\lambda} = \text{const}$ болса, онда мұндай сәулелену *сұр* деп аталады.

Көптеген техникалық материалдардың сәулеленуін *сұр* сәулелену ретінде қарауға болатыны тәжірибе жүзінде

анықталды.

Сұр дене үшін Планк заңы келесі түрде жазылады:

$$E_{0\lambda} = \frac{2\pi h\nu^3 / c^2}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (2.72)$$

мұндағы c – жарық жылдамдығы, м/с; ν – c/λ тең сәулелену жиілігі;

h және k – Планк пен Больцман тұрақтылары, $6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с және $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К тең.

2.7.2.2. Ығысу (Вин) заңы

Қара тепе-теңдікті сәулеленуді термодинамикалық талдау негізінде В. Вин (1893 ж.) сәулеленудің максималь қарқындылығы сәйкес келетін абсолюттік температура T мен толқын ұзындығы $\lambda_{\text{макс}}$ арасындағы келесі байланысты белгіледі:

$$\lambda_{\text{макс}} \cdot T = \text{const}. \quad (2.73)$$

Теңдеу (2.73) ығысу (Виннің) заңының математикалық тұжырымы болады. Жоғарғы суретте байқағандай, абсолютті қара дененің температурасының жоғарылауымен сәулелі энергияның максимумы толқындардың қысқа ұзындықтары аймағына ығысады.

Изотермалар максимумы нүктелері арқылы өтетін штрихты сызықтар Виннің ығысу заңына сәйкес келеді. Мысалы, күн сәулесі үшін ($T \approx 6000$ К) қарқындылық максимумы спектрдің көрінетін бөліміне түседі ($\lambda_{\text{макс}} = 0,5$ мкм). Техникалық құрылғыларда кездесетін температуралар үшін (2000 К төмен), қарқындылық максимумы жылулық (инфрақызыл) сәулелерге келеді.

Әртүрлі температураларды T беру кезіндегі $\lambda_{\text{макс}}$ нақты мәнін анықтау үшін, Вин тұрақтысы деп аталатын « в » шамасын білу қажет; Планктың теориялық зерттеулері « в » тәуелсіз анықтауды жүргізуге мүмкіндік берді және оның мәні $\text{в} = 2,8978 \cdot 10^{-3}$ м·К тең деп белгіленді.

Виннің ығысу заңын қолданып, жоғары температуралы денелерді қашықтықтан өлшеуге болады, мысалы, балқыған металдарды, ғарыштық денелерді және басқаларды.

2.7.2.3. И. Стефан – Л. Больцман заңы

Стефан – Больцман заңы интегралдық сәулелену ағыны тығыздығының температураға тәуелділігін айқындайды. Бұл тәуелділікті Планктың кванттық теориясы пайда болғанға дейін, алғаш рет эксперименттік жолмен (қара дене моделінің өздік сәулеленуін өлшеумен) Стефан (1879 ж.) анықтады. Кейінірек (1884 ж.) оны теориялық жолмен (термодинамика заңдарына негізделіп) Больцман орнықтырды. Сондықтан заң біріктірілген Стефан – Больцман атауын алды. Стефан – Больцман заңын интегралдық сәулелену ағынының беттік тығыздығы E_0 , Вт/м² үшін келесі өрнекпен көрсетуге болады:

$$E_0 = \int_0^{\infty} J_{0\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 d\lambda}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}.$$

Интегралдың нәтижесінде аламыз

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.74)$$

мұндағы $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$, Вт/(м²·К) – абсолютті қара дененің сәулелену тұрақтысы.

Техникалық есептеулерде ыңғайлы қолдану үшін σ_0 константасын 10^8 ретке арттырады, ал температураны 100 бөледі. Сонда Стефан – Больцман заңы келесі түрде болады

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.75)$$

мұндағы $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – абсолютті қара дененің сәулелену коэффициенті.

Стефан-Больцман заңы абсолютті қара дене үшін дұрыс. Дегенмен сұр денелер үшін де қолдануға болады. Бұл жағдайда ол келесідей жазылады:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = c \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.76)$$

мұндағы $\varepsilon = E/E_0 = c/c_0 < 1$ – сұр дене қаралығының интегралдық дәрежесі, сұр дененің салыстырмалы сәулелену қабілеттілігін көрсетеді.

Әртүрлі денелер үшін сәулелену коэффициенті ε әртүрлі. Оның мәні дене табиғатымен, беттік күйімен, температурасымен анықталады және 0-ден 1 дейінгі шекте өзгереді.

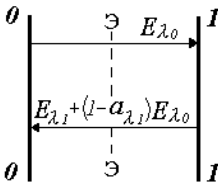
Дененің өздік сәулелену ағыны тығыздығын осы температура кезіндегі абсолютті қара дененің сәулелену ағынының тығыздығымен салыстыра отырып *дененің қаралық дәрежесі*, ε деп аталатын дене сипаттамасы алынады:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c}{c_0}. \quad (2.77)$$

ε мәні 0-ден 1 дейінгі шекте өзгереді. Егер оны ε білсек, өздік сәулелену ағынын есептеу жеңіл. Қаралану дәрежесі толқынның барлық ұзындығын қамтитын, дененің толық немесе интегралдық сәулеленуін сипаттайды. Дененің барынша егжей-тегжейлі сипаттамасы, ол *қараланудың спектрлік дәрежесі*

$$\varepsilon_\lambda = E_\lambda / E_{0\lambda}. \quad (2.78)$$

2.7.2.4. Кирхгоф заңы



26-сурет. Сұр (1) және абсолютті қара (0) беттер арасындағы сәулелі жылу ағынының сұлбасы

Кирхгоф заңы дененің сәулелену және сәуле сіңіргіштік қабілеттілігі арасындағы байланысты анықтайды. Неміс физигі Г. Кирхгоф 1860 ж., термодинамиканың екінші заңына негіздеп, теориялық тұрғыда абсолютті қара дененің сәулелену қабілетінің оның сіңіру қабілетіне қатынасы тек толқын ұзындығы мен абсолюттік температураның функциясы болатынын анықтады. Бұл

функция бірдей температурадағы барлық денелер үшін әмбебапты.

Арақашықтықтары мөлшерлерімен салыстырғанда кіші екі үздіксіз бетті қарастырайық (26-сурет). Сұр беттің (1) сіңіргіш қабілетін α_1 , ал абсолютті қара беттің (0) сіңіргіш қабілетін $\alpha_0 = 1$ арқылы белгілейік. Беттер арасына толқын ұзындығы λ сәулелер үшін абсолютті мөлдік экран орналастырамыз. Басқа сәулелерді

экран толығымен шағылыстырады. Экран мен беттер температуралары бірқалыпты және бірдей, яғни олар температуралық тепе-теңдікте. 0 беттен $\rightarrow 1$ сәулелену тығыздығы беттің (0) өздік сәулесімен ғана шартталады және $E_{\lambda 0}$ тең.

1 беттен $\rightarrow 0$ сәулелену тығыздығы 1 беттің өздік сәулесімен және 0 беттің содан шағылған сәуленің қосындысынан тұрады және $E_{\lambda 1} + (1 - a_{\lambda}) E_{\lambda 0}$ тең. Жүйе жылулық тепе-теңдікте болғандықтан

$$E_{\lambda 0} = E_{\lambda 1} + (1 - a_{\lambda}) E_{\lambda 0}. \quad (2.79)$$

Теңдеуден (2.79) аламыз $\frac{E_{\lambda 1}}{E_{\lambda 0}} = a_{\lambda}$, немесе

$$\frac{E_{\lambda 1}}{a_{\lambda}} = E_{\lambda 0}. \quad (2.80)$$

Яғни, берілген температура мен толқын ұзындығында дененің сәулелену тығыздығының оның сіңіргіштік қабілетіне қатынасы тұрақты шама.

Кирхгоф заңынан тұжырымдауға болады:

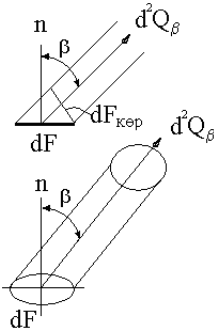
– толқын ұзындығы еркінше таңдалғандықтан және дененің сіңіру қабілеті бірден аспайтындықтан, толқынның кез келген ұзындығында абсолютті қара дененің сәулелену тығыздығы, осы температурадағы басқа денелердің сәулелену тығыздығынан жоғары;

– бір беттің қасиеттері айқын аталмағандықтан, соңғы теңдік осы температурадағы барлық беттер үшін дұрыс:

$$\frac{E_{\lambda 1}}{a_{\lambda 1}} = \frac{E_{\lambda 2}}{a_{\lambda 2}} = \frac{E_{\lambda 3}}{a_{\lambda 3}} = \dots = E_{\lambda 0}.$$

2.7.2.5. Ламберт заңы

Денеден шашырайтын сәулелі энергия кеңістікте әртүрлі бағытта түрлі қарқындылықпен таралады. Сәулелену қарқындылығының бағытқа тәуелділігін орнықтыратын заң *Ламберт заңы* деп аталады. Ламберт заңының тұжырымы: элементарлық ауданнан dF аудан нормалына β бұрышпен



27-сурет. Сәулелену қарқындылығының бағытқа тәуелділігі

бағытталған, кеңістікті бұрышқа $d\omega$ жіберілген сәулелі ағын d^2Q_β , $d\omega$ бағытында көрінетін аудан бетіне және сол бұрыштың шамасына пропорционал (27-сурет).

$$dF_{\text{көр}} = dF \cos\beta, \text{ осыдан} \\ d^2Q_\beta = b dF \cos\beta d\omega, \quad (2.81)$$

мұндағы b – барлық β бұрыштар үшін бірдей пропорционалдық коэффициент, жарықтық деп аталып, ауданды сәуле таратқыш ретінде сипаттайды (Вт/м²).

Демек, сәулелі энергияның үлкен мөлшері сәулелену бетіне перпендикуляр бағытта сәулеленеді, яғни $\beta = 0$ кезде. β ұлғаюымен сәулелі энергияның мөлшері төмендейді және $\beta=90^\circ$ кезінде нөлге теңеседі. Ламберт заңы абсолютті қара және $\beta=0-60^\circ$ кезінде диффузиялық сәулеленуге ие денелерге толығымен дұрыс келеді. Жылтырланған беттер үшін Ламберт заңы қолданыла алмайды.

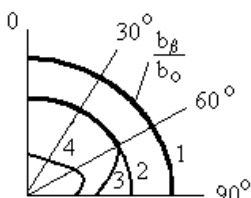
Олар үшін беттікке нормалды бағыттағыға қарағанда, β бұрыш кезінде сәуле шығару жоғары.

Нақты денелердің сәулеленуі. Сұр дене. Нақты денелердің сіңіру коэффициенті беттің табиғаты мен күйіне тәуелді: кедір-бұдырлық дәрежесіне, тотықты қабыршақтың, ластың болуына және т.б. Барлық нақты денелердің (қатты, сұйық, газ тәріздес) сіңіруінің монохроматикалық коэффициенті әртүрлі ұзындықты толқындар үшін бірдей емес.

Егер сіңіру қабілеті A_α ауыспалы шама болса, онда Кирхгоф заңына сәйкес толқын ұзындығының λ өзгеруімен қаралану дәрежесі де $\varepsilon\lambda$ өзгереді.

Толқын ұзындығына тәуелді қаралану дәрежесі өзгертетін денелердің сәулеленуі селективті (таңдамалы) деп аталады. Ең жоғары селективті – газдар, ең төменгі – кедір-бұдырлы бетті қатты диэлектриктер. Нақты денелердің сәулеленуі идеал диффузиялық болмайды, сондықтан беттіктен нормалға үлкен

бұрышпен кететін сәулелердің жарықтығы тұрақты болып қалмайды (28-сурет).



28-сурет. Сәуленің кеңістікті таралуы:

- 1 – абсолютті қара дене,
- 2 – идеал сұр,
- 3 – диэлектриктер,
- 4 – металдар

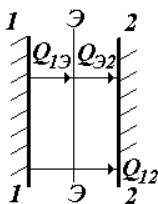
$b_\beta - b = f(\beta)$, мұндағы b – жарықтық, b_0 – абсолютті қара дененің сәулелену жарықтығы.

Техникалық есептеулерді жеңілдету үшін сұр дене туралы ұғым енгізілген. Жоғарыда аталғандай, сұр дене дегеніміз, жарықтығы барлық бағытта бірдей, ал қаралық дәрежесі тұрақты дене.

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma_0 T^4$$

Нақты денелер техникалық есептеулерде сұр ретінде қаралады. Бұл жағдайда денелердің сіңіргіштік қабілеті оның қаралану дәрежесіне тең деп есептеуге болады ($\alpha = \varepsilon$).

2.7.3. Экран орнатқан кездегі сәулелі жылуалмасу



29-сурет. Жұқа экран орнатқан кездегі сәулелі жылуалмасу

Сәулелі жылу ағынын азайту керек болған жағдайларда (мысалы, вакуумдық пештерде), оның жолына экрандар қоюға болады, яғни мөлдір емес материалдан (мысалы, металдан) жасалған жұқа табактарды.

Айталық, бір-біріне қарама-қарсы орналасқан екі үлкен жазық беттер 1 және 2 бар делік және олардың арақашықтығы мөлшерлерімен салыстырғанда аз (29-сурет). Әрбір беттің

ауданы – F .

Режим стационарлық болғандықтан,

$$Q_{1\vartheta} = Q_{2\vartheta} = Q_{12} ; Q_{1\vartheta} = \sigma_{1\vartheta} (T_1^4 - T_{\vartheta}^4) F ; \frac{Q_{1\vartheta}}{\sigma_{1\vartheta} F} = (T_1^4 - T_{\vartheta}^4)$$

$$Q_{\vartheta 2} = \sigma_{\vartheta 2} (T_{\vartheta}^4 - T_2^4) F ; \frac{Q_{\vartheta 2}}{\sigma_{\vartheta 2} F} = (T_{\vartheta}^4 - T_2^4)$$

$$\text{Қоса отырып, аламыз: } \frac{Q_{1\vartheta}}{\sigma_{1\vartheta} F} + \frac{Q_{\vartheta 2}}{\sigma_{\vartheta 2} F} = (T_1^4 - T_2^4), \text{ немесе}$$

олардың температуралары, сәйкес, T_1 және T_2 тең, ал сәулелену коэффициенттері белгілі және бірдей.

Пластиналар арасына экран орналастырамыз – мөлдір емес табак – ол соншалықты жұқа, тіпті екі бетіндегі температура бірдей. Орныққан (стационарлық) режим кезіндегі 1 беттен 2 бетке түсетін нәтижелі жылу ағынын табайық.

$$Q_{12} = \frac{I}{\frac{1}{\sigma_{1\vartheta}} + \frac{1}{\sigma_{\vartheta 2}}} (T_1^4 - T_2^4) F, \quad (2.82)$$

$$\text{мұндағы } \sigma_{1\vartheta} = \sigma_{\vartheta 2} = \frac{\sigma_0}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{\vartheta}} - 1}.$$

σ мәнін тендеуге (2.82) қойып, аламыз:

$$Q_{12} = \frac{I}{2} \frac{\sigma_0}{(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon_{\vartheta}} - 1)} (T_1^4 - T_2^4) F. \quad (2.83)$$

Демек, бір экранды қойған кезде сәулелі жылу ағыны екі есеге азаяды, егер $\varepsilon = \varepsilon_{\vartheta}$. Экранның қаралану дәрежесі қаншалықты аз болса, соншалықты жылу ағыны Q_{12} күштірек төмендейді. n экран орнатқан кезде нәтижелі жылу ағыны $n+1$ ретке төмендейді.

2.7.4. Пеш қабырғасындағы терезе немесе саңылаулар арқылы сәулелену

Пештерде, ашық жұмысшы және бақылауға арналған терезелер арқылы сәулелену өте жиі кездеседі, сонымен қатар салыстырмалы қалың пеш қабырғаларында жасалған басқа да саңылаулар арқылы сәулеленің шашылуы байқалады (30-сурет).

Қарастырылған жағдайда жылу жоғалымын есептеу үшін төменде келтірілген теңдеу (2.83) мен 31-суретте кескінделген қисықтар қолданыла алады.

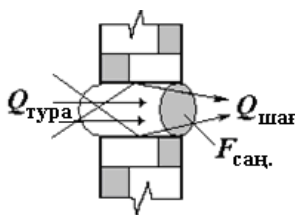
Саңылау арқылы сәулеленуді есептеу кезінде Φ коэффициенті *диафрагмалау коэффициенті* деп аталады. Есептеу, сәулелену саңылаудың ішкі жиегіне тартылған абсолютті қара беттіктен шығады деген негізге сүйенеді.

Саңылау арқылы шығатын қосынды сәулелену:

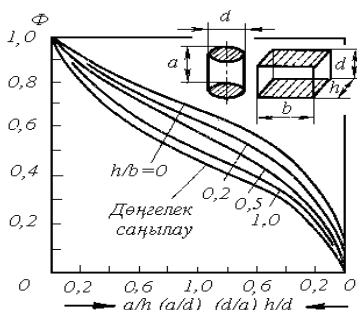
$$Q = C_o \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 F_{\text{саң}} \Phi, \quad (2.84)$$

мұндағы $C_o = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ – абсолютті қара дененің сәулеленуінің келтірілген коэффициенті;

$F_{\text{саң}}$ – саңылау қимасы, м^2 .



30 – сурет. Саңылау арқылы сәулелену



31-сурет. Диафрагмалау коэффициентінің терезе мөлшеріне тәуелділігі

2.7.5. Газдар мен булардың сәулеленуі

Барлық газдар мен булардың сәулелі энергияны сіңіру және шашу қабілеттіктері бар. Екіатомды газдардың сәулелену қабілеттігі мәнсіз – оларды нөлдік сәулелі деп қабылдайды. Үшатомды (және одан жоғары) газдардың маңызды селективті сіңіргіштік және сәулелену қабілеттіктері бар (32-сурет).

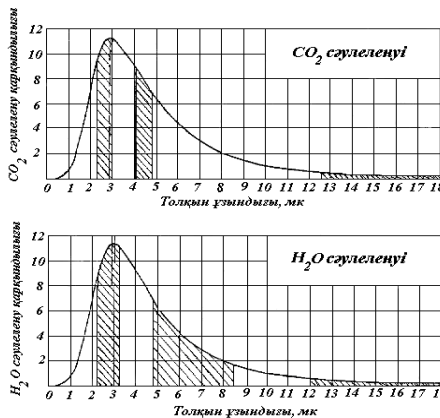
Отынның жану өнімдерінің (түтін) құрамына кіретін CO_2 мен H_2O – бу ерекше көңіл аудартады. CO_2 және H_2O сәулелену энергиясы газдың парциалдық қысымына (p , Па), газдық қабаттың қалыңдығына (S , м) және температураға тәуелді:

$$E_{\text{CO}_2} = 4,1(p \cdot S)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{T}{100} \right)^{3,5}, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.85)$$

$$E_{\text{H}_2\text{O}} = 40,7 p^{0,8} S^{0,6} \left(\frac{T}{100} \right)^3, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.86)$$

Техникалық есептеулер үшін бұл теңдеу қолайсыз, сондықтан температура төрттік дәрежеде болатын теңдеулерді қолданады.

Қажетті түзету, сәулелену қарқындылығының толқын ұзындығына тәуелділігін $\epsilon_r = f(\lambda)$ ескеретін, газдың қаралығының жалпы дәрежесіне енгізіледі – ϵ .



32-сурет. Жоғары температурада және сәулеленетін газдың үлкен қалыңдығы кезінде көмір қышқыл газы мен су буының сәулеленуінің жеңілдетілген спектрлері

$$E_{CO_2} = \varepsilon_{CO_2} c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon_{CO_2} \sigma_0 T^4; \quad (2.87)$$

$$E_{H_2O} = \varepsilon_{H_2O} c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = \varepsilon_{H_2O} \sigma_0 T^4. \quad (2.88)$$

CO₂ және H₂O құрамды газдың сәуле шығару қабілеттігі (E_Г) теңдеумен анықталады:

$$E_G = \varepsilon_G c_0 \left(\frac{T_G}{100} \right)^4 = \varepsilon_G \sigma_0 T_G^4; \quad (2.89)$$

$$\varepsilon_G = \varepsilon_{CO_2} + \varepsilon_{H_2O} \xi - \Delta \varepsilon g, \quad (2.90)$$

мұндағы ξ – $\xi - (p_{H_2O}, s \cdot p)$ графигінен табылатын түзету коэффициенті;

p – парциалдық қысым;

s – қабаттың қалыңдығы;

$\Delta \varepsilon g$ – CO₂ мен H₂O сәулеленетін кеңістікте бірге болған кезде сәулелі жолақтарының қабат түсуін ескеретін түзету, графиктен анықталады.

Түтінді газдарда байқалатын, компоненттердің кәдімгі қатынастарында $\Delta \varepsilon g \sim 2 \div 4$ % болады. Оны өте дәлдікті есептеулер мен P_o:S үлкен мәндерінде ескеру қажет: P_o – газдың жалпы қысымы; S – сәуленің тиімді ұзындығы:

$$S = \eta_G \frac{4V}{F}, \quad (2.91)$$

мұндағы η_G – қабырғаға жететін сәулелену үлесін сипаттайтын газдық сәуленің тиімділік коэффициенті;

V – газбен толтырылған көлем;

F – осы көлем шектейтін барлық қабырғалардың ауданы.

2 тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Қандай жағдайда температура өрісі қалыптасқан деп аталады?

2. Жылуөткізгіштік дегеніміз не және қандай денелерде ол басым байқалады?
3. Конвекция дегеніміз не және қандай денелерде ол басым байқалады?
4. Жылудың сәулеленумен берілуі.
5. Metallургиялық пештердегі конвекцияға мысал келтіріңіз.
6. Жылуөткізгіштіктің негізгі заңы.
7. Ньютон-Рихман заңының негізгі мәні неде?
8. Сұйық қозғалысының қандай режимдері сізге белгілі?
Оларға сипаттама беріңіз.
9. Metallургиялық пештерде жылу берілістің қандай түрлерін байқауға болады?
10. Сұйықтар мен газдар механикасына анықтама беріңіз.
11. Тұтастықтың дифференциалдық теңдеуінің мәні неде?
12. Түтін құбырын есептеудің негізгі принциптерін келтіріңіз.
13. Рейнольдс критериясының шамасы бойынша нені білуге болады?
14. Фурье критериясы қандай шамаларды өзара байланыстырады?
15. Жергілікті кедергіде пайда болатын жоғалымдар неге негізделеді?
16. Шекаралық қабат теориясы не үшін жасалды? Оның қолданылу шекарасы қандай?
17. Идеал сұйықтар үшін Бернулли теңдеуін келтіріңіз.
18. Нақты сұйықтар үшін Бернулли теңдеуін шығарыңыз.
19. Сәулелі ағындар түрлері. Дененің тиімді сәулеленуі деген не?
20. Стефан-Больцман және Кирхгоф заңдары.
21. Дененің өздік сәулеленуі мен сәуле сіңіргіштік қабілеттілігі арасындағы байланыс.
22. Газдардың сәулелену ерекшеліктерін тұжырымдаңыз.
23. Абсолют ақ, қара және мөлдір денелерге анықтама беріңіз.
24. Жылудың конвекциямен берілуінің заңдары.
25. Ұқсастық критериясы деген не, олар қандай критерияларға бөлінеді?

3 ТАРАУ

СҰЙЫҚТАР МЕН ГАЗДАР МЕХАНИКАСЫ

3.1. Механиканың негізгі ұғымдары

Сұйықтар мен газдар механикасы аққыш орта қозғалысының тепе-теңдігі мен заңдылықтарын зерттейді, яғни сұйықтар мен газдардың. Бір жағынан оны теориялық механиканың бір тарауы ретінде қарастыруға болады, өйткені ол механиканың жалпы заңдарына негізделген, ал екінші жағынан жылуфизикасының бір бөлігін көрсетеді, өйткені қозғалыстағы сұйықтар мен газдардағы (конвективті жылу және масса алмасу) жылу және масса тасымалдау процестерін тек қана сұйықтар мен газдар механикасы шеңберінде алынған нәтижелерге сүйеніп зерттеуге болады.

Металлургия жылутехникасында сұйықтар мен газдар механикасының алатын орыны өте маңызды. Пештердің жұмыс камерасындағы газдар қозғалысы мен оларда қысымның таралуы, жану өнімдерін бөлу және суыту жүйелерінің жұмысы, құбырлардағы сұйықтар мен газдар қозғалысы, сұйық металдың оны құю және тасу кезіндегі қозғалысы, жоғарыда айтылған конвективті жылу- және масса алмасу процестері – металлургияда өте маңызды рөл атқаратын осы құбылыстардың барлығын тек қана сұйықтар мен газдар механикасы әдістерінің көмегімен зерттеп, есептеуге болады.

Осы ғылым шеңберінде аққыш орталар – сұйықтар мен газдар континуум, тұтас орта ретінде қарастырылады, яғни олардың дискреттік, молекулярлық құрылымы ескерілмейді. Мысалы, элементарлық көлем қарастырылатын болса, ондағы ортаның қасиеті макроскопиялық көлемдегідей деп есептеледі.

Сұйықтар мен газдар механикасында *идеал және нақты (реал) сұйықтар* ұғымдары ерекше маңызды. Идеал сұйық ұғымын, үйкеліс күші өте аз ықпал ететін жағдайлардағы сұйық қозғалысын жеңілдету мақсатында, 1755 жылы Эйлер ұсынды. *Идеал сұйық* – ешқандай сығылмайды және бөлшектері арасында ішкі үйкеліс (тұтқырлық) болмайды. Тіршілікте барлық сұйықтар қандайда бір дәрежеде сығылады және

тұтқырлы; олар *нақты* немесе *тұтқырлы сұйықтар* деп аталады. Нақты сұйықтар *тамшылы* (сұйықтың өзі) және *серпінді* (газдар) болып бөлінеді. Тамшылы сұйықтардың сығылғыштығы мәнді емес, серпінді сұйықтар қысымның өзгеруімен өзінің көлемін едәуір өзгерту қабілетіне ие.

Сұйықтың негізгі қасиеттері: тығыздық (меншікті салмақ), тұтқырлық және беттік керілу.

Сұйық көлемінің бір бірлігінде болатын оның массасы *тығыздық* деп аталады

$$\rho = \frac{m}{V}, [\text{кг/м}^3]. \quad (3.1)$$

Меншікті салмақ – бұл сұйықтың көлем бірлігінің салмағы:

$$\gamma = \frac{G}{V}, [\text{Н/м}^3]. \quad (3.2)$$

Сұйықтың қозғалысқа кедергі көрсету қасиеті *тұтқырлық* деп аталады. Сұйықтың осы қасиеті үйкеліс күшінің пайда болуына әкеледі. Беттік бірлігіне F келтірілген сұйық ішіндегі үйкеліс күші T ішкі үйкелістің кернеуі τ деп аталады:

$$\tau = \frac{T}{F} = \mu \frac{\Delta \omega}{\Delta n}, \quad (3.3)$$

мұндағы $\frac{\Delta \omega}{\Delta n}$ – нормал бойынша жылдамдық градиенті;

μ – *тұтқырлықтың динамикалық коэффициенті*,

$$\left[\frac{\text{н} \cdot \text{сек}}{\text{м}^2} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{сек}} \right].$$

Динамикалық тұтқырлық коэффициентінің сұйық тығыздығына қатынасы *тұтқырлықтың кинематикалық коэффициенті* деп аталады – ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \left[\frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right] \quad (3.4)$$

Беттік керіліс: сұйық беттігіне жайғасқан молекулалар сұйық ішінде орналасқан молекулалар тарапынан тартылысқа түседі, соның нәтижесінде сұйық ішіне бағытталған қысым

пайда болады. Бұл күштердің әрекеті сұйықтың өзінің беттігін азайтуға ұмтылуынан пайда болады; жаңа беттер пайда болу үшін белгілі бір жұмыс талап етіледі. Жаңадан пайда болатын, бетке жұмсалатын жұмысты фазалар аралық немесе *беттік керілу* деп атайды – σ , оның өлшем бірлігі $[\text{Дж}/\text{м}^2]$ немесе $[\text{н}/\text{м}]$.

Қысым: сұйық өзі тұрған ыдыстың қабырғасы мен түбіне, және де оған батырылған кез келген дене бетіне қысым түсіреді. Тыныштықтағы сұйықтың ішкі көлеміндегі кейбір элементарлы ауданға әсер ететін және осы ауданға нормал бойынша бағытталған күш *гидростатикалық қысым күші* деп аталады. Бұл күштің аудан бірлігіне қатынасы *орташа гидростатикалық қысым* деп аталады. Қысым сұйықтың барлық нүктесінде барлық бағыттар бойынша бірдей. Қысым мен сұйық бағанасының биіктігі арасында байланыс келесідей:

$$p = \gamma H, \quad (3.5)$$

сондықтан қысымды көбінесе белгілі бір сұйық бағанасының бірлігі түрінде көрсетеді (мм су бағанасы, мм сынап бағанасы). Физикалық шамаларды өлшеу жүйесіне СИ сәйкес қысымның өлшеу бірлігі 1 Па.

Сұйықтар мен газдар механикасы, қатты денелер механикасы сияқты статикадан, кинематикадан және динамикадан тұратыны белгілі. Оқу құралы металлургия бағытына арналғандықтан, бұл тарауда пештегі газдардың механикасын және соның заңдылықтарын қарастыруды жөн көрдім.

3.2. Пештегі газдар механикасының негіздері

Пешті пайдаланудың дұрыс жағдайларын жасау үшін, пешке отын мен ауаның қажетті мөлшерін аз шығынмен беру және одан шыққан газдарды аластау қажет. Газдар мен қыздырылған металл арасындағы жылуалмасу қарқындылығы газдық ағын қозғалысының сипатына тәуелді.

Қыздырғыш пештердің оттығында пеш газдарының нөлдік немесе өте аз оң қысымы ұсталады. Теріс қысым кезінде суық ауа пешке сорылады да, ол қыздырылатын металдың сууын

және тотығуын тудырады. Қысым артықша болған кезде, пеш «газданады», бұл еңбек жағдайын нашарлатады.

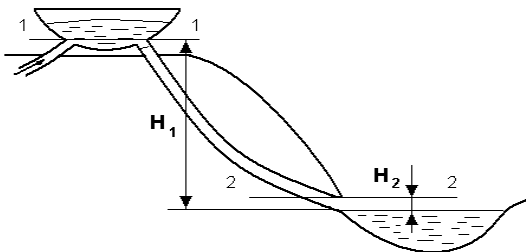
Гидравликаның – сұйықтар қозғалысы туралы ғылым – көптеген заңдары пештік газдарға қолданбалы екені теориямен және тәжірибемен белгіленді. Бұл заңдарды жақсы білу және оны орынымен қолдану пештердің және олардың негізгі бөлшектерінің мөлшерлерін анықтауға, газдың тасымалдануына жұмсалатын энергия шығынын есептеуге, металды қыздырудың қылдамдығы мен сапасына әсер етуге мүмкіндік береді.

Жеке қабаттарының тығыздық айырмасы әсерінен туындайтын газ қозғалысы еркін немесе табиғи деп аталады. Сыртқы әсерлерден туындайтын (желдеткіштермен, жанарғылармен, бүріккіштермен және т.б.) қысымдар айырымы әрекетінен газдың қозғалуы еріксіз немесе жасанды деп аталады.

Сонымен, пештегі және оның элементтеріндегі газдар қозғалысы отынды жағу шарттарын, жылудың қыздырылатын металға берілуін, жану өнімдерінің аласталуын анықтайды екен. Бірқатар жағдайларда технологиялық процестердің өтуі газ қозғалысының сипатына тәуелді болады.

3.3. Бернулли теңдеуі

Сұйықтың немесе газдың қозғалыстағы ағынындағы қысымы туралы мәселені алғашқы болып Д. Бернулли зерттеді. Бернулли теңдеуі 1 кг қозғалыстағы сұйық массасына жатқызылған сығылмайтын сұйық үшін энергия балансын көрсетеді (32-сурет).



32-сурет. Бернулли теңдеуіне түсініктеме сұлба

1 кг сұйықтың 1-1 қимасындағы *кинетикалық энергия* ($m=1$ болғандықтан):

$$L_{\text{кин}} = \frac{mW_1^2}{2} = \frac{W_1^2}{2}, \quad (3.6)$$

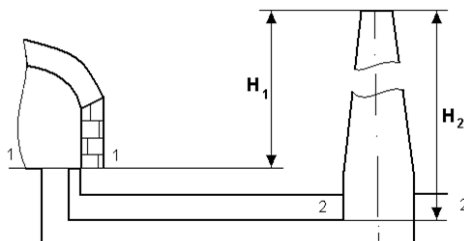
мұндағы W_1 – 1-1 қимадағы ағын жылдамдығы, м/с.

Қысымның *потенциалдық энергиясы* келесідей анықталады. Ыдыстың түбіне түсетін сұйық қысымы – P_1 , Па. Егер ыдыс түбінен сұйық бағанының биіктігі 1 м болатын, 1 м² ауданды бөліп алсақ, онда осы көлемдегі сұйық массасы тығыздыққа тең болады – ρ . Онда 1 кг сұйыққа келтірілген қысымның потенциалдық энергиясы: $L_{\text{пот.қыс.}} = P_1/\rho$, мұндағы ρ – ағынның тығыздығы.

1 кг сұйықтың 1-1 қимасындағы *потенциалдық энергия* $L_{\text{ном}} = gH_1$. Демек, сұйықтың 1 кг массасы 1-1 қимада $\frac{W_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gH_1$ энергиясы болады, 2-2 қимада – $\frac{W_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gH_2$. Сұйықтың 1-1 қимадан 2-2 қимаға дейінгі қозғалу жолында энергия жоғалады: $L_{\text{жог.қыс.}} = \lambda(W^2/2)$, мұндағы λ – үйкеліс коэффициенті, W – қозғалыстың орташа жылдамдығы. Энергияның сақталу заңынан *Бернулли теңдеуі* алынады:

$$\frac{W_1^2}{2} + \frac{P_1}{\rho} + gH_1 = \frac{W_2^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} + gH_2 + \lambda \frac{W^2}{2} = \text{const} \cdot \quad (3.7)$$

Бернулли теңдеуі қозғалыстағы газ үшін де қолданылады (33-сурет).



33-сурет. Пештік газға қолданбалы Бернулли теңдеуі

Газдар үшін энергия балансы 1 кг емес, 1 м³ келтіріледі, ол үшін теңдеудің барлық мүшелері газ тығыздығына көбейтіледі ρ .

$$\frac{W_1^2}{2} \rho + P_1 + \rho g H_1 = \frac{W_2^2}{2} \rho + P_2 + \rho g H_2 + \lambda \frac{W^2}{2} \rho. \quad (3.8)$$

Қалыпты жағдайларда, қоршаған ауа үшін Бернулли теңдеуі жазылады

$$P_{1a} + \rho_{1a} \cdot g \cdot H_1 = P_{2a} + \rho_{2a} \cdot g \cdot H_2. \quad (3.9)$$

Абсолюттік қысымды (P_1 және P_2), әсерінен газдар каналда тасымалданатын, артықша қысыммен алмастыру үшін біріншіден екіншіні алып тастау қажет.

$$\frac{W_1^2}{2} \rho + (P_1 - P_{1a}) + (\rho - \rho_{1a}) g H_1 = \frac{W_2^2}{2} \rho + (P_2 - P_{2a}) + (\rho - \rho_{2a}) g H_2 + \lambda \frac{W^2}{2} \rho$$

Газдар үшін биіктікті H нөлдік ретінде қабылданған қандай да бір деңгейден жоғары қарай емес, төмен қарай өлшеу қабылданған. Егер осыны ескерсек Бернулли теңдеуін келесі түрде жазуға болады

$$\frac{W_1^2}{2} \rho + (P_1 - P_{1a}) + (\rho_{1a} - \rho) g H_1 = \frac{W_2^2}{2} \rho + (P_2 - P_{2a}) + (\rho_{2a} - \rho) g H_2 + \lambda \frac{W^2}{2} \rho$$

Аэродинамикалық тұрғыдан қарағанда:

$$\frac{W_1^2}{2} \rho, \frac{W_2^2}{2} \rho \quad 1-1 \text{ және } 2-2 \text{ қималардағы жылдамдықты}$$

немесе динамикалық арын деп аталады және $h_{1\text{дин}}, h_{2\text{дин}}$ белгіленеді;

$(P_1 - P_{1a}), (P_2 - P_{2a})$ – сол қималардағы пьезометриялық немесе статикалық арындар – $h_{1\text{ст}}, h_{2\text{ст}}$;

$(\rho_{1a} - \rho) g H_1, (\rho_{2a} - \rho) g H_2$ – геометриялық арындар – $h_{1\text{геом}}, h_{2\text{геом}}$;

$$\lambda \frac{W^2}{2} \rho \text{ – жоғалған арын – } h_{\text{жог}}.$$

Онда Бернулли теңдеуі жазылады:

$$h_{1\text{дин}} + h_{1\text{ст}} + h_{1\text{геом}} = h_{2\text{дин}} + h_{2\text{ст}} + h_{2\text{геом}} + h_{\text{жог}} = \text{const.} \quad (3.10)$$

Демек, газ ағынының бір қимасындағы арындар қосындысы каналдың екінші (келесі) қимасындағы арындар қосындысына тең.

3.4. Арындарды өлшеу

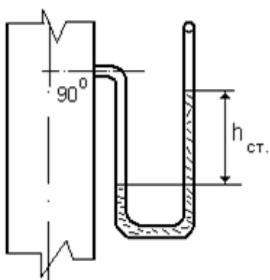
Пеш пен газ арналарды пайдалану кезінде газ арынын өлшеу (Па) қажеттігі жиі туындайды. Оны көбінесе су толтырылған U-тәріздес құбыршалар (34-сурет) көмегімен өлшейді. 1мм су бағанасы 9,81 Па (Н/м^2) қысымға сәйкес, ал 1 Па = 0,102 мм су бағанасына. Тұрақты қималы канал шекараларындағы арынның жоғалымын анықтау үшін 35- суретте кескінделген сұлбаны қолданады:

$$h_{\text{жог.}} = (h_{1\text{ст}} + h_{1\text{дин}}) - (h_{2\text{ст}} + h_{2\text{дин}}). \quad (3.10)$$

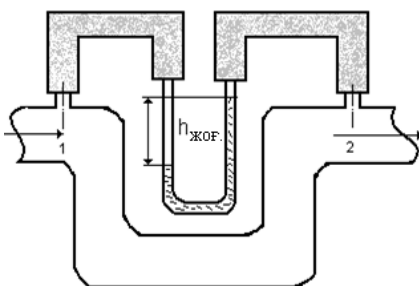
Динамикалық немесе жылдамдықты арынды Пито–Прандтльдің арынды құбыршасы көмегімен өлшейді.

Арынды құбырша көмегімен газдар қозғалысының жылдамдығын табуға болады:

$$W = \sqrt{\frac{2h_{\text{дин}}}{\rho}}, \text{ м/с.} \quad (3.11)$$



34-сурет. Статикалық арынды өлшеуге арналған құрылғының сұлбасы



35-сурет. Жоғалған арынды өлшеуге арналған құрылғының сұлбасы

Газ қозғалысының орташа жылдамдығын канал қимасына көбейту арқылы газ шығыны анықталады $V = W \times \omega$, $\text{м}^3/\text{с}$.

Егер газдың температурасы 0°C -дан айрықша болса, онда тығыздық пен жылдамдықты қалыпты жағдайға қайта есептеу қажет:

$$\rho_0 = \rho_t(1 + \beta t); \quad W_0 = W_t/(1 + \beta t), \quad (3.12)$$

мұндағы $\beta = 1/273$.

Геометриялық арынды тікелей өлшеуге болмайды, өйткені ол газ температурасын біле отырып, есептеуге болатын ауа мен газ тығыздығының айырмасына тәуелді.

Пеш қуыстары бойынша газдың қозғалуы кезінде арынның бір түрінен екіншісіне тұрақты түрленуі өтеді. Егер газдың изотермиялық ағыны туралы айтсақ, онда олардың түрленуі, жоғалатын бөлігінен өзгесі, қайтымды. Арынның жоғалуына, газ қозғалысы кезінде пьезометриялық қысымның қоры есебінен жаңарып отыратын, динамикалық қысым шығындалады.

Газ қозғалысы кезіндегі қысымның жоғалымын минимумға келтіру өте маңызды инженерлік міндет, сондықтан қысым жоғалымының себептерін зерттеудің маңызы өте зор.

3.5. Құбырлар мен каналдарда газ қозғалысы кезінде энергияның жоғалуы

1 кг қозғалыстағы газға жатқызылған энергия жоғалымы арын жоғалымы деп, 1 м^3 жатқызылған жоғалым қысым жоғалымы деп аталады. Энергия жоғалымы газ қозғалысының сипатына тәуелді. Қабатты немесе ламинарлы және турбулентті немесе құйын тәріздес болып айрықшаланады. Ламинарлы және турбулентті қозғалыстың болу шартын Рейнольдс (1883 ж.) орнықтырды. Ол газдың (сұйықтың) қозғалу сипаты ағындағы инерция күші мен ішкі үйкеліс күшінің қатынасына тәуелді болатынын дәлелдеді. Бұл қатынас Рейнольдс критериясы деп аталатын, мөлшерсіз комплекспен сипатталады (критериялар туралы 2 тарауда айтылды).

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d \gamma}{\eta_t} = \frac{\omega_o d \gamma_o}{\eta_t} = \frac{\omega d}{\nu}, \quad (3.13)$$

мұндағы ω – газ қозғалысының жылдамдығы, м/с;

d – ағынның қалыңдығы, м²;

ρ – газдың (сұйықтың) тығыздығы, кг/м³;

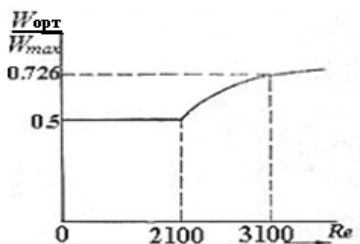
μ – динамикалық тұтқырлық коэффициенті, кг с/м²;

η_t – газ температурасы t_r тең кездегі ішкі үйкеліс коэффициенті.

$$\eta_t = \eta_o \frac{1 + \frac{C}{273}}{1 + \frac{C}{T}} \sqrt{\frac{T}{273}}, \quad (3.14)$$

мұндағы $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ – кинематикалық тұтқырлық коэффициенті.

Дөңгелек құбырларда $Re < 2100$ мәнінде ағын ламинарлық, ал $Re > 2300$ кезінде турбуленттікке өтеді (36 – сурет).



36-сурет. Дөңгелек құбырда ағынның орташа жылдамдығының құбыр өзегіндегі жылдамдыққа қатынасы (Re санына тәуелді)

Критериядан байқағандай, жылдамдығы мен ағынының қалыңдығы жоғары және төменгі тұтқырлы сұйықтар турбулентті қозғалысты, және керісінше болады.

$$\omega_{kp} = \frac{Re \times \nu}{d}. \quad (3.15)$$

Ағын қозғалысының ламинарлық және турбуленттік сипатында ағынның көлденең қимасы бойынша жылдамдықтардың бөлінуі және арынның жоғалымы әртүрлі.

3.6. Қозғалыстағы ағын арынының жоғалымы

Ағынның қозғалысы кезіндегі динамикалық арынның жоғалуы, оның қабырғаға үйкелісімен байланысты, және бұл кинетикалық энергияның жылулыққа өтуімен және *жергілікті кедергіні* жеңу шығынымен қатар жүреді.

Үйкеліске кететін арын жоғалымы ($h_{\text{үйк.}}$) келесі теңдеумен анықталады:

$$h_{\text{үйк.}} = \lambda \frac{W^2}{2} \rho \frac{l}{d_{\text{экв}}} = \lambda \frac{W_o^2}{2} \rho_o (1 + \beta t) \frac{l}{d_{\text{экв}}} \quad (3.16)$$

мұндағы λ – үйкеліс коэффициенті;

W – ағынның шын мәніндегі жылдамдығы;

ρ – ағынның тығыздығы;

l – каналдың ұзындығы;

β – газ көлемінің кеңею коэффициенті;

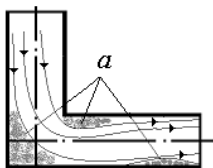
$d_{\text{экв}}$ – каналдың эквиваленттік диаметрі ($d_{\text{экв}} = \frac{4F}{S}$),

мұндағы F – каналдың қимасы, S – периметр.

Тікбұрышты каналдар үшін $d_{\text{экв}} = 2ab/a+b$. Үйкеліс коэффициенті λ – салыстырмалы кедір-бұдырлық пен Рейнольдс критериясының функциясы.

Арынның жоғалуы ағын қозғалысы бағытының өзгеруімен немесе каналдың көлденең қимасының өзгеруі салдарынын туындайды (37-сурет). Ағын қозғалысы бағытының немесе канал қимасының өзгеруі кезінде ағын қимасы бойынша жылдамдық эпюрлері өзгереді. Бұл ағынның канал қабырғасына үйкелісі кезіндегі сияқты, жылулыққа қайтымсыз өтетін кинетикалық энергияның жоғалымымен ілесе жүреді. Мұндай жоғалымдарды *жергілікті* деп атау қабылданған. Тұрақты қималы тіке каналдардағы ағынның қозғалысы тек қана үйкеліске қарсы тұрумен қатар жүреді және бүкіл канал бойынша таралады.

Газ қозғалысына қосынды аэродинамикалық кедергі үйкеліске кедергіден және жергілікті кедергіден тұрады:



37-сурет. Ағын қозғалысы бағытының өзгеруі: (a – аз қозғалысты сұйықпен немесе газбен толатын, өлі кеңістік

$$h = K \frac{W^2}{\rho} \quad (3.17)$$

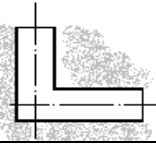
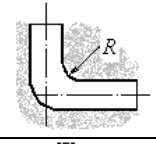
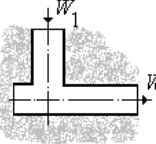
мұндағы K – жергілікті кедергінің мөлшерсіз коэффициенті, ол жергілікті кедергіні жеңу үшін ағынға қажетті динамикалық арынның үлесін анықтайды. Қима түріне қарай K шамалары 9-кестеде келтірілген.

Канал қимасының өзгеруінен болатын жоғалымды тар қимадағы жылдамдық бойынша есептеуге болады.

9-кесте

Жергілікті кедергі коэффициентін анықтау

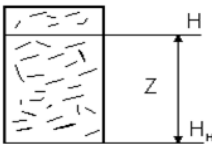
Жергілікті кедергі	Эскиз	K	Ескертпе
Ағынның каналға кірер жері тік жиекті		0,5	K = 0,20 жиектер доғал болған кезде
Каналдың күрт тарылуы		$0,5(1-F_2/F_1)^2$	
Каналдың күрт кеңеюі		$(1-F_1/F_2)^2$	
Каналдың біртіндеп кеңеюі		$(1-F_1/F_2)^2 \sin \alpha$	

90° бұрылыс		1,0	
Доғал бұрылыс		0,15	$R = 2d$
Бүйір қуысты бұрылыс		2,00	$W_1 = W_2$

3.7. Газдың каналдарда төменгі жылдамдықта қозғалуы

Пештің жұмыс кеңістігінде және түтін каналдарында (боровта) газ салыстырмалы төменгі жылдамдықта және қысым құламасында (100 Па дейін) қозғалады. Қысымның мұндай өзгерісі газ тығыздығына әсер етпейді десек те болады, сондықтан пеш газдарын есептеу кезінде Бернулли теңдеуін қолданады. Әншейінде, температураның әсерінен газ тығыздығының өзгеруін ескермейді, есептеуді орташа статистикалық температура кезіндегі газ тығыздығына негіздейді.

Газдың теңе-теңдігі. Тыныштықтағы газдың бір көлемінің ішінде потенциалдық энергияның бөлінуін қарастырайық (38-сурет).



38-сурет. Пеш қысымының таралуы

Бұл жағдайда оның жылдамдығы мен үйкеліс жұмысы нөлге тең, демек Бернулли теңдеуінен аламыз:

$$\rho g(H_2 - H_1) + P_2 - P_1 = 0, \quad (3.18)$$

Мейлі H_2 және P_2 ауыспалы биіктік және ауыспалы қысым болсын (H және P), ал H_1 және P_1 – олардың бастапқы мәндері (H_0 және P_0).

Егер $H - H_0 = Z$ деп белгілесек, онда теңдеу $P = P_0 - \rho gZ$ түрде жазылады. Газ қысымы жоғарыдан құлайтыны байқалады. Пештегі газ температурасы, қоршаған ауа температурасынан жоғары, демек ауаның тығыздығы газ тығыздығынан үлкен. Қоршаған ауаға қарағанда жеңіл газбен толтырылған ыдыстың қабырғасында артықша қысым қалай бөлінеді?

Ыдыстың төменгі бөлігі ауамен жалғастырылады. Бөліну жазығында қысым бірдей. H_0 деңгейінен жоғары газ бен ауаның қысымы теңдеулерге сәйкес төмендейді:

$$\begin{aligned} P_z &= P_0 - \rho_z gZ, \\ P_a &= P_0 - \rho_a gZ. \end{aligned}$$

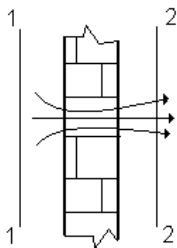
Бір-бірінен алсақ, алынады: $h = P_z - P_a = gZ(\rho_a - \rho_r)$, өйткені ауаның тығыздығы газдың тығыздығынан жоғары, онда ыдыстағы (пештегі) ыстық газдың қысымы барлық уақытта қоршаған атмосфераның қысымынан жоғары. Егер пештің жұмысшы терезелері оттық аймағында орналасса, онда қысым жуық шамамен атмосфералыққа тең болады. Пештің жұмысшы кеңістігінің ішінде артықша қысым нөлден күмбез астында максимумға дейін жоғарылайды.

Саңылау арқылы газдың ағып өтуі. Ағып өтуді ептеудің мақсаты – саңылаудан шығатын газдың жылдамдығы мен шығынын анықтау (39-сурет). Ағып өтудің төменгі жылдамдықтарында (150–200 м/с) газды сығылмайтын сұйық деп есептеуге болады. Мейлі, газ саңылау мөлшерімен

салыстырғанда, үлкен мөлшердегі сыйымдылықтан ағып өтеді делік, онда 1–1 қимадағы жылдамдықты нөлге тең деп қабылдауға болады ($W_1 = 0$). 1 және 2 қимаға Бернулли теңдеуін қолданайық.

Олар бір деңгейде, сондықтан $H_1 = H_2$, демек $\rho g H_1 - \rho g H_2 = 0$.

Саңылаудың гидравликалық кедергісін (жоғалымды) ескермесек,



39-сурет. Газдың саңылау арқылы ағып өтуі

Бернулли теңдеуі жазылады:

$$\frac{W_1^2}{2} \rho + P_1 + \rho g H_1 = \frac{W_2^2}{2} \rho + P_2 + \rho g H_2 \quad (3.19)$$

Екінші қимадағы ағын жылдамдығы $W_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$,

немесе $W_2 = \varphi \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$, мұндағы φ – саңылаудың

гидравликалық кедергісін ескеретін, жылдамдық коэффициенті. Жылдамдықтың ағынша қимасына (F_{ae}) көбейтіндісі газдың көлемдік шығынын (V) береді. Бірқатар жағдайларда ағынша қимасы F_{ae} саңылау қимасынан аз, бұл ағыншаның сығылу коэффициенті көмегімен есептеле алады (10 – кесте): $E = F_{ae}/F_{can}$.

10-кесте

Ағыншаның сығылу коэффициенті

Объект	φ	E	$\mu^I = E \varphi$
Жұқа қабырға ($t_k < d_{can}$)	0,98	0,63	0,62
Массивті қабырға ($t_k > d_{can}$)	0,8	1,0	0,8

Газдың көлемдік шығыны

$$V = F_{can} E \varphi \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} = F_{can} \mu^I \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (3.20)$$

Егер газдың ағуы қабырға немесе оттығында атмосфералық қысым ұсталатын пеш күмбезі арқылы өтетін болса, онда статикалық қысым тығыздықтар айырмасымен шартталады: $\Delta \rho = \rho_a - \rho_z$. Бұл жағдайда $P_1 - P_2 = gH(\rho_a - \rho_z)$.

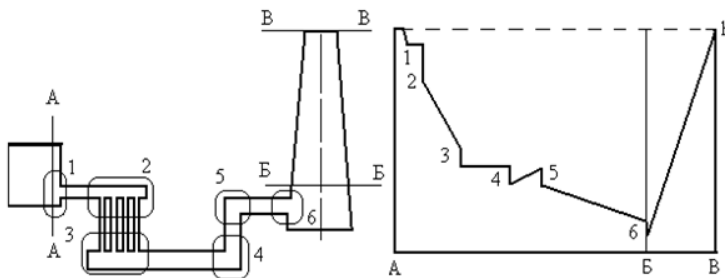
$$W_2 = \varphi \sqrt{\frac{2gH(\rho_a - \rho_z)}{\rho_z}}; \quad V = F_{can} \mu^I \sqrt{\frac{2gH(\rho_a - \rho_z)}{\rho_z}}, \quad (3.21)$$

мұндағы H – оттық деңгейі үстіндегі саңылаудың биіктігі.

3.8. Түтін құбырын есептеу

Ыстық газ садканы (салынды) жақсы жуып өтуі үшін, пештен түтінді шығаратын каналдарды оттыққа жақын орналастырады. Жоғарыда айтылғандай, оттық аймағындағы статикалық қысымды нөлге тең шамада ұстауға тырысады. Сондықтан, каналға кірер жердегі статикалық қысымды нөлге тең деп қабылдауға болады.

Түтінді құбыр табанында болуы талап етілетін сиреуді анықтайық (40-сурет). $h_{см} = 0$ және жылдамдық W_a пешкөмейдегі жылдамдықпен салыстырғанда төмен екенін ескерсек, онда $h_{дин} \approx 0$ болады.



40-сурет. Түтінді трактта қысымның бөлінуі (2-3 бөлімше рекуператор)

$$h_B = \sum_{i=1}^5 h_{геом} - \sum_{i=1}^5 h_{жог} - h_{динБ} \quad (3.22)$$

Құбыр табанындағы нақты сиреуді анықтау үшін, Бернулли теңдеуін Б–Б және В–В қималары үшін жазамыз:

$$h_{Бсм} + h_{Бдин} = h_{Всм} + h_{Вдин} - h_{БВгеом} + h_{БВжог}.$$

Құбырдан шығар жерде газдың қысымы атмосфералықпен теңесетіндіктен, $h_{Всм} = 0$ тең болады.

$$\text{Онда: } h_{Бсм} = h_{Вдин} - h_{Бдин} - h_{БВгеом} + h_{БВжог}.$$

Құбырдағы қысым жоғалымы келесі теңдеумен анықталады:

$$h_{жог} = \lambda \frac{W_o^2}{2} \rho_o \frac{l}{d_{экв}} = \lambda \frac{W_o^2}{2} \rho_o (1 + \beta t) \frac{l}{d_{экв}}. \quad (3.23)$$

Құбырдың конустығы және газ температурасының төмендеуі салдарынан Б және В қималарындағы динамикалық арындар бірдей болмауы мүмкін:

$$h_{Бдин} = \frac{W_{об}^2}{2} \rho_o (1 + \beta t_B), \quad h_{Вдин} = \frac{W_{об}^2}{2} \rho_o (1 + \beta t_B),$$

$$h_{БВжог} = 0,5\lambda H \left(\frac{h_{Бдин}}{d_B} + \frac{h_{Вдин}}{d_B} \right), \quad h_{БВгеом} = gH(\rho_a - \rho_c),$$

мұндағы H – құбырдың биіктігі.

$$h_{БВгеом} = h_{Вдин} - h_{Бдин} - h_{Бст} + h_{БВжог},$$

$$h_{БВгеом} - h_{БВжог} = h_{Вдин} - h_{Бдин} - h_{Бст},$$

$$H = \frac{h_{Вдин} - h_{Бдин} - h_{Бст}}{g(\rho_a - \rho_c) - 0,5\lambda \left(\frac{h_{Бдин}}{d_B} + \frac{h_{Вдин}}{d_B} \right)}. \quad (3.24)$$

Құбырдың шығыс қимасы сағасы деп, ал төменгі бөлігі табаны деп аталады. Саға диаметрін келесі шарт орындалатындай етіп таңдайды: $W_{сага} \sim 2,5 \div 3 \text{ м/с}$; $D_{таб.} = 1,5 D_{сага}$.

Есептеулер үшін газ температурасының төмендеуін кірпіштен қаланған құбырлар үшін $1 \div 1,5$ град/м, шегендеусіз темір құбырлар үшін – $3 \div 4$ град/м деп қабылдауға болады. Отынның шығыны ауыспалы пештер үшін құбыр максималь шығынға есептеледі. Бірнеше пешке жұмыс істейтін құбырдың биіктігін, каналдар кедергісі ең жоғарғысына негіздеп есептейді. Құбырдың диаметрі құбырға қосылған бүкіл пештердің жану өнімдерінің қосынды шығынына есептеледі. Құбырда жасалатын сирету қоршаған ортаның тығыздығына тәуелді болатындықтан, есептеуді жылдың ең қолайсыз жағдайына (жылы уақыттарға) жүргізеді. Каналдардың бітеліп қалу мүмкіндігін ескеріп, жоғалым шамасын $20 \div 30 \%$ арттыру керек.

3-тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Сұйықтар мен газдар механикасында тұтастық туралы постулат қалай қолданылады?
2. Аққыштық қасиеті нені көрсетеді?
3. Сұйықтың газдан айырмашылығы неде?
4. Сығылатын тұтас ортаның физикалық параметрлері.
5. Сұйықтар мен газдарда өтетін процестерді сипаттаудың қандай жағдайларында идеал сұйық моделі қабылданады?
6. Қандай сұйықтар ньютондық емес деп аталады?
7. Идеал және реал сұйықтарда жылдамдықтың таралуы туралы не айтуға болады?
8. Неге Бернулли теңдеуі идеал сұйықтың ағыс құбыры үшін дұрыс?
9. Сұйықпен толтырылған ыдыс түбіндегі қысымды қалай табуға болады?
10. Қысымның газ биіктігі бойынша өзгеруін сипаттау кезінде оны сығылмайтын сұйық деп есептеуге бола ма?
11. Сұйық қозғалысының қандай режимдері Сізге белгілі? Оларға сипаттама беріңіз.
12. Сұйықтар мен газдар механикасына анықтама беріңіз.
13. Түтін құбырының маңызы, есептеу жолдары.
14. Газдың саңылау арқылы ағып өту ерекшелігін түсіндіріңіз.
15. Тұтастықтың дифференциалдық теңдеуінің мәні неде?
16. Идеал сұйыққа сипаттама беріңіз.
17. Сұйықтың сығылмау тереңдігі бойынша қысым қалай өзгереді?
18. Бернулли теңдеуі идеал сұйықтар үшін.
19. Бернулли теңдеуі нақты сұйықтар үшін.
20. Нақты сұйықтардың негізгі қасиеттерін атаңыз.
21. Арынның жоғалу себептері.
22. Сұйықтың ламинарлық қозғалысына сипаттама беріңіз.
23. Сұйықтың турбуленттік қозғалысына сипаттама беріңіз.
24. Құбырда газ сиретудің жүргізілу маңызы.

4 ТАРАУ

МЕТАЛЛУРГИЯ ӨНДІРІСІ ПЕШТЕРІНІҢ СЫНЫПТАМАСЫ. ПЕШТІҢ ЖЫЛУ БАЛАНСЫ

Қазіргі кезде өнеркәсіптерде пеш жабдықтары кеңінен қолданылады. Қара және түсті металлургия, машинажасау, құрылыс материалдары, жеңіл және тамақ өнеркәсіптерінде әртүрлі пештер мен қыздырғыштар пайдаланылады. Пеш жабдықтарының жетілдірілуі өнеркәсіптің маңызды салаларының пайда болуы мен дамуына байланысты өтеді. Металлургиялық (пештік) жылу техника термодинамика, гидро- және аэродинамика, жану теориясы, жылу және масса тасымалдау сияқты ғылымның іргелі тарауларының жағдайын пайдаланушы, толықтырушы және дамытушы техникалық физиканың жеке бағытына бұрыннан-ақ қалыптасқан.

Өнеркәсіптік пештер теориясын жасауда В. Е. Грум-Гржимайло, Н. Е. Скарёдов, Н. Н. Доброхотов, М. А. Глишков сияқты орыс ғалымдары үлес қосты. М. А. Глишковтың пештердің жалпы теориясындағы өзекті мәселе – пеште өңделетін материалға жылудың берілуін қарқындатуда ең қолайлы жағдайлармен қамтамасыздандыруды талап ету. Теорияға сәйкес, пештегі жылуалмасу процесін максималь мүмкіндікте дамыту үшін жасалатын жағдайға барлығы бағынуы керек: жылу өндіру әдістері, газ қозғалысының сипаты, пеш шегенінің таңдалуы, оның конструктивті ерекшеліктері және т.б. Қыздырылатын материалға жылуберу қарқындылығы жоғарылаған кезде пеш жұмысының бүкіл сапалық көрсеткіштері (жылу мен отынды пайдалану коэффициенттері, пеш өнімділігі және т.б.) жақсаратындықтан, М.А. Глишков әзірлеген пештердің жалпы теориясы ережелерінің дұрыстығына көз жетеді.

Пештердің жалпы теориясына сәйкес, кез келген пешті технологиялық процесс аймағы және жылу өндіру аймағынан тұрады деп қарастыруға болады. Технологиялық процесс аймағы *негізгі*, ал жылу өндіру аймағы – технологиялық процесс аймағында белгілі бір энергетикалық жағдайлар жасауға арналған, *қосалқы* аймақ болады.

Пеш жұмысы екі сұлбамен жүре алады:

1) технологиялық процесс аймағында өңделетін материалмен жылуудың игерілуі жылу өндіру аймағынан берілетін жылу беріліске тәуелді;

2) жылу технологиялық процесс аймағында пайда болады, әрі игеріледі.

Бірінші сұлбамен жұмыс істейтін пештер *жылуалмастырушы пештер* деп, ал екіншісі – *жылу өндіруші пештер* деп аталады. Пеш жұмыстарының аралас сұлбасы да мүмкіндікті, бұл кезде жылу өндіру аймағында да, технологиялық процесс аймағында да орын алады.

Жылу алмастырушы пештердің де, жылу өндіруші пештердің де жылулық жұмысының өзіндік режимдері бар. М.А. Глинковтың жалпы теориясына сәйкес, жылу алмастырғыш пештерде, пештердің жылулық жұмысының радиациялық және конвективті режимі, ал жылу өндіру пештерінде – масса алмасу және электрлік режимдер жүзеге асады. Пештердің жылулық жұмысының режимі жылу-масса тасымалдану процестерінің сипатымен анықталады және жылу өндіру процестерімен тығыз байланысты.

4.1. Пештер сыныптамасы

Кез келген пеш энергетикалық агрегат ретінде жалпы сұлбамен көрсетіле алады: «энергия көзі» → «жылу» → «жылумен өңдеу объектісі (материалдар)». Осы жалпы сұлбада энергия көзін қалған объектілермен байланыстыратын буындар болуы керек. Отынды пеште осы буындар барынша толық берілген. Отынды пештің жылулық жұмысының келесідей төрт буынын бөліп қарастыруға болады:

1) отынның жануы, яғни тасығышы жану өнімдері болатын (түтінді немесе пеш газдары) отынның химиялық энергиясының жылуға түрленуі;

2) пеш газдарының қозғалысы, соның көмегімен жылу жұмыс кеңістігінің барлық аймағына тасылады, ал істен шыққан газдар пештен аласталады;

3) сыртқы жылу тасу, яғни жылудың пеш газынан сәулеленумен және конвекциямен қыздырылатын материалдар бетіне берілуі;

4) ішкі жылу беріліс, материалдар бетінен (кесектерде, массивті бұйымдарда) олардың өзегіне жылуөткізгіштікпен берілуі.

Электр пештерінде кейбір буындар болмайды, мысалы, оларда отынның жануы мен газдар қозғалысы жоқ.

Пештер жылуөндіру принципі, технологиялық тағайындалуы және құрылымдық ерекшеліктері бойынша сыныпталады.

4.1.1. Жылу өндіру принципі бойынша пештердің сыныпталуы

Пеште жылудың өндірілуі химиялық немесе электрлік энергияның жылуға түрленуі жолымен өтеді. Жылу бөлетін көзге тәуелді пештер *отынды, автогендік және электрпештері* болып бөлінеді.

Отынды пештер. Отынды пештердегі жылу көзі – қатты, сұйық немесе газ тәрізді отынның химиялық энергиясы. Жылу отынның жануы нәтижесінде бөлінеді. Жылу тасығыштар – отынның жануының газ тәріздес өнімдері (түтінді газдар).

Отынды металлургиялық пештер екі сыныпқа бөлінеді: *жалынды және қабатты*. Жалынды пештердің жұмысшы кеңістігі өңделетін материалмен өте аз дәрежеде толтырылады, ол пештабанда орналасады. Жұмыс кеңістігінің негізгі бөлігі жылуды материалға беретін жалынмен және қатты қызған түтінді газдармен толады. Қазіргі уақыттағы жалынды пештер газ тәріздес немесе сұйық отынмен (мазутпен) жұмыс істейді. Газ тәріздес отынды жағу үшін жанарғылар, ал мазутты жағуда бүріккіштер (форсунка) қолданылады. Жалынды пештер қатарына болат балқыту (мартен) пеші, илектену және ұсталық-престену өндірісінің әртүрлі пештері жатады: қыздырғыш құдықтар, әдістік, аунатқышты, шықпалы оттықты және т.б.

Қабатты отынды пештердің үш түрі белгілі: өңделетін материалдың тығыз қабаты, қайнау қабаты және аспалы қабаты болатын.

Тығыз қабатты тік шахталық пештерде, құрамына қатты түйірлі отында кіретін, шикіқұрам пештің бүкіл көлемі бойынша тығыз қабатпен орналасады және төмен қарай өте баяу жылжиды. Ыстық газдар – отынның жану өнімдері – қабат арқылы шикіқұрамның жеке түйірлері арасымен төменнен жоғары қарай қозғалады, яғни қарама-қарсы ағысты. Бұл қабатты пештер металлургияда кеңінен қолданылады, олардың қатарына домна пештері, вагранкалар, әк өндіруге арналған пештер жатады.

«Қайнау» қабатты пештерде төменнен жоғары қарай газдың қозғалуы ықпалынан, құрамына ұнтақталған отын да кіретін ұсақталған шикіқұрам тығыздалмаған күйге келеді және қарқынды түрде араласады. Шикіқұрамның жеке бөлшектері газ ағыны әсерінен қабат бетінде қайнап жатқан сұйыққа ұқсас көтеріледі. Кейде пештің төменгі жағынан ауа үрлеумен қатар газ тәріздес отын да беріледі. Қайнау қабатты пештер түсті металлургияда әртүрлі металдардың сульфидтік концентраттарын күйдіру және глинеземді кептіру мен кальцинирлеу үшін кеңінен қолданылады.

Аспалы қабатты пештерде шаң түріндегі күйге келтірілген материалдар өңделеді. Материалдың майда бөлшектері төменнен жоғары қарай қозғалатын газ ағынының әсерінен “аспалы” күйде сонымен бірге қозғалады. Газтәріздес және майдаланған қатты отындар қолданылады. Негізінен бұл пештер түсті металлургияда түсті металдар сульфидтерін балқыту үшін қолданылады.

Автогендік пештер. Бұл пештердегі жылу көзі – өңделетін материал құрамындағы бірқатар элементтердің тотығуының экзотермиялық реакцияларының және жануының жылулық эффектесі. Қара металлургиядағы оттегілі, болат балқыту конвертерлер және қосбылаулы болат балқыту пештері автогендік пештердің мысалы бола алады. Оларда сұйық шойынды оттегімен үрлеу кезінде, жылуды бөле жүрегін, көміртегінің және бірқатар басқа элементтердің тотығуы өтеді. Бұл процессте отын шығындалмайды.

Мартен пешінде, отынның жану жылуымен қатар, сұйық былаудағы көміртегі және басқа элементтердің тотығуынан жылу бөлінеді. Мұндай пештер отынды және автогендік пештер арасындағы аралық жағдайды алады.

Электрпештері. Электр энергиясын жылуға түрлендіру әдісі бойынша металлургияда қолданылатын пештерді үш сыныпқа бөлуге болады: *электрдогалы, индукциялық және кедергілі* пештер.

Догалы пештерде электр тоғын газдық аралық арқылы екі электрод арасынан өткізу принципі қолданылады. Электр кернеуі әсерінен газ электродтар арасында иондалады және электрөткізгішті болады. Бұл кезде газдық аралықта электрдоғасы пайда болады, ол электрондардың, иондардың, атомдардың және молекулалардың ашық жарықтанатын қоспасын көрсетеді. Доға электр энергиясының жылуға түрленетін аймағы болып табылады. Доға температурасы – $3000 \div 20000$ К.

Индукциялық пештерде ауыспалы электр тоғының өткізгіш аумағында ауыспалы магниттік өріс жасау қасиеті пайдаланылады. Егер мұндай өріске өткізгіш болатын қыздырылатын денені орналастырса, онда денеде құйынды ток индукцияланады. Құйынды токтар энергиясы, қыздырылатын дене ішінде бөлінетін, жылуға түрленеді.

Кедергілі пештердің жұмысы Джоуль-Ленц заңына негізделеді. Бұл заңға сәйкес, токтың ағуы кезінде өткізгіште оның электрлік кедергісіне пропорционал жылу бөлінеді. Кедергілі пештерде тұрақты да және ауыспалы да токты пайдалануға болады.

Металлургияда электрпештері болат балқытуда, ферро-қорытпалар өндірісінде, қысыммен өңдеу алдында металды қыздыруда және металдың бұйымдарды термиялық, термохимиялық өңдеу кезінде қолданылады.

4.1.2. Технологиялық тағайындалуы мен жұмыс режимі бойынша пештердің сыныптамасы

Технологиялық тағайындалуы бойынша металлургиялық пештер *балқыту және қыздыру* пештері болып бөлінеді.

Балқыту пештері кеннен немесе концентраттардан металдарды алуға және қажетті қасиеттер беру мақсатында металды қайта балқытуға, металдық материалдардан (шикізұрамнан) қоспаларды аластауға және қажетті құрамдағы металды алуға

арналған. Бұл пештерде, балку температурасына дейін қыздырылғаннан кейін, өңделетін материалдардың агрегаттық күйі өзгереді. Өз ішінде, жүргізілетін операцияларға сәйкес балқыту пештері шойын балқыту, болат балқыту, мыс балқыту және т.б. аталады.

Қыздыру пештері материалдарды олардың агрегаттық күйін өзгертпестен қыздыруға арналған. Қыздыру пештері металлургияда отқа төзімді материалдарды, әктасын, магнезитті күйдіру үшін, материалдарды кептіру үшін, қысыммен өңдеу алдында металға илемділік қасиет беру үшін, құрылымы мен механикалық қасиеттерін өзгерту мақсатында металды термиялық өңдеу үшін қолданылады. Қыздыру пештері өз ішінде жіктеледі:

- құрылымдық белгілері бойынша – қыздырғыш құдықтар, әдістік, камералық пештер және т.б.;

- пеште металды (бөлшекті) тасымалдау әдісі бойынша – салындылы, итермелі, таспалы, айналмалы оттықты және басқалар;

- қыздырылатын өнімнің сипаты бойынша – құймакесектерді, құбырларды, блумдерді және т.б. қыздыруға арналған.

Жұмыс режимі бойынша пештерді екі сыныпқа бөлуге болады: *үздіксіз* және *кезеңді* (циклдік) әрекетті.

Үздіксіз әрекетті пештерге шахталық қабатты пештер, доғалы пештер, илектеу өндірісінің әртүрлі пештері, т.б. жатады. Бұл пештерде технологиялық процесс үздіксіз жүреді және материалдар тиеу құрылғысынан бастап дайын өнім шығаруға арналған құрылғыға дейін үздіксіз тасымалданып отырады.

Кезеңді әрекетті пештерге жататындар: болат балқытатын доғалық және мартен пештері, конвертерлар; ұсталық-престік өндірісте және термиялық пештер мен бөлімшелерде қолданылатын қыздырғыш құдықтар, шықпалы және қозғалыссыз оттықты салындылы камералық пештер. Бұл пештер циклды жұмыс істейді. Цикл бірізді операциялардан тұрады. Шикікұрам немесе бұйым тиеледі, олар жылулық өңдеуден өтеді, содан соң дайын өнім шығарылады немесе түсіріледі. Осы операциялар аяқталғаннан соң келесі цикл басталады. Циклдер аралығында дайындық және ағынды жөндеу жұмыстары жүргізіледі.

Суретте тікбұрыштармен пештердің негізгі типтері (топтары), ал сопақшалармен және шеңберлермен – қолданылатын немесе түзілетін материалдың атауы белгіленген. Пайдалануға ыңғайлы болуы үшін, сұлбада шамот кірпіштің сынықтары, плавикті шпат, боксит, құм, марганец кені және т.б. сияқты ферроқорытпалық, агломерациялық, домна және болат балқыту пештерінде қолданылатын кейбір флюстеуші материалдар көрсетілмеген.

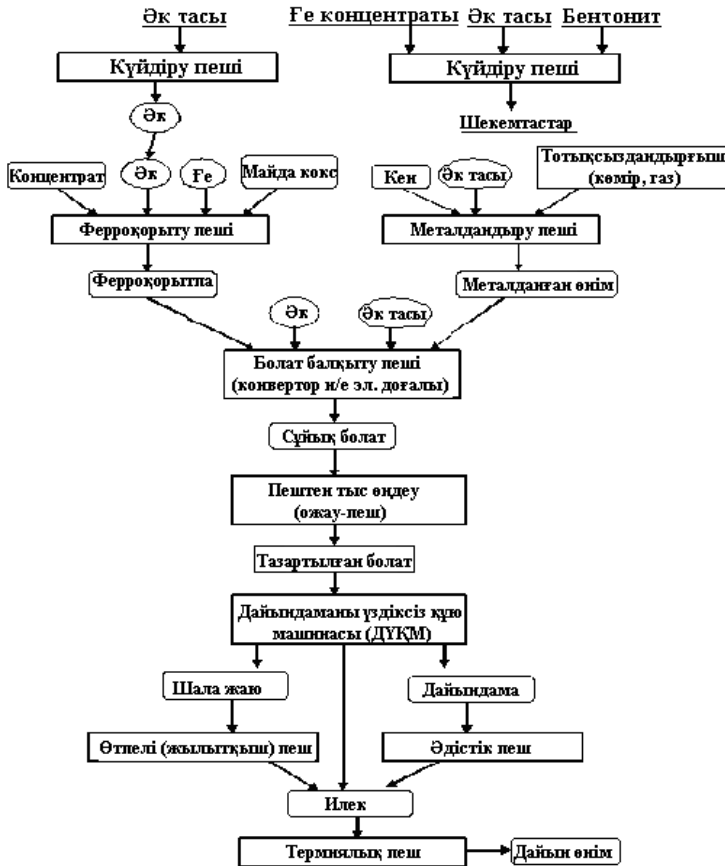
Сұлбаға сәйкес металлургиялық пештерді үш топқа бөлуге болады: шикізатты дайындауға арналған пештер тобы; балқыту пештерінің тобы; қыздыру пештерінің тобы. Бұлай бөлу пештің қолданылуына қарай емес, ал технологиялық тізбектің логикасы бойынша жасалған. Мысалы, ферробалқыту пеші орындайтын операциясы балқыту болғанына қарамастан, шикізатты дайындау тобына жатқызылған.

Қатарынан кокстық және домналық кешендерді алып тастау мақсатында, технологиялық тізбек тұрақты түрде жетілдірілуде (42-сурет).

Бұл кокссыз металлургия немесе темірді тікелей алу (металданған шикізат) технологиясына негізделеді. Кокссыз металлургия – технологиялық тізбекке шикізатты металдандыру пештерін енгізу. Құрылымы бойынша бұл пеш домна пешінің орынын басады.

Одан өзге, дайындамаларды үздіксіз құю қондырғысын енгізумен, технологиялық сұлбадан қыздырғыш құдық аласталады. Сұлбаның негізгі элементі ретіндегі әдістік пештің рөлі, қосалқы қосымша қыздырғыш пеш деңгейіне дейін түседі. Дүниежүзінің қазіргі уақыттағы зауыттары осы сұлба негізінде әзірленеді. Бұл сұлба бойынша алынған металдың сапасы жоғары және арзандау болады. Сапасының жоғарылауы болатқа күкірт пен фосфор енгізетін кокстың болмауымен байланысты, ал арзандауы технологиялық тізбектен жеке құрылымдық элементтердің алынып тасталуынан.

Егер техникалық жоспарда келешекті болмаса, дәстүрлі сұлбаны оқу не үшін қажет деген сұрақ туындайды. Біріншіден, дүниежүзінде дәстүрлі сұлбамен жұмыс істейтін пештер жеткілікті. Екіншіден, толық технологиялық тізбекті ұйымдастыру мүмкіндігі жоқ көптеген шағын зауыттар, өзінің нақты мақсаттары үшін дәстүрлі сұлбаны қолданады.

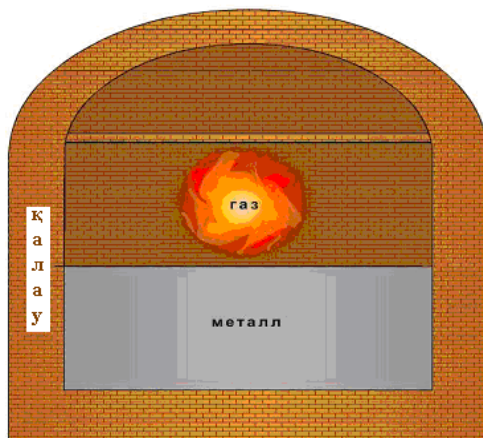


42-сурет. Болат бұйым өндірудің заманауи технологиялық тізбегі

Заманауи технологиялық сұлбадан шыға отырып, металлургиялық нарықта тауар болып табылатын аралық өндеудің өнімдерін атауға болады: әктасы, темір концентраты және кен, бентонит, окатыштар, металданған окатыштар, ферроқорытпа өндірісінің концентраттары (хромның, марганецтің және т.б. концентраттары) ферроқорытпалар (феррохром, ферромарганец және т.б.), дайындама, илек (табак, құбыр, бұрыштама, швеллер және т.б.).

4.2.2. Пештердің жылулық жұмысы

Температуралық режим. Пеш температурасы – пеш жұмысының маңызды жылу техникалық көрсеткіші. Бұл термин шартты. Пештің температурасы – ол, жалынның (қыздырғыш элементтің), қабырға қалауының және металдың температуралары арасындағы орташа мән (43-сурет).



43-сурет. Газ-қалау-металл жүйесіндегі жылуалмасу

Пеш температурасы бірқатар факторларға тәуелді, олардың ең маңыздылары: отынның жану температурасы және жылу жоғалымдарын ескерумен, жылуды пайдалану сипаты. Пеш температурасын анықтау үшін келесі жуықтама қатынас қолданылады:

$$t_n = \eta t_k, \quad (4.1)$$

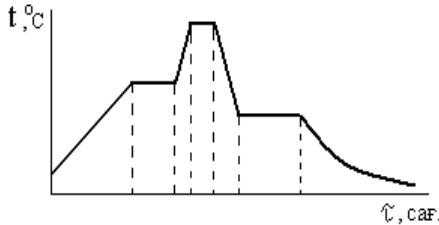
мұндағы t_n – пештің нақты температурасы;

t_k – отынның жануының калориметриялық температурасы;

η – пеш конструкциясына тәуелді, пирометриялық коэффициент, 0,65 – 0,80 шегінде өзгереді.

Пеш пен қыздырылатын металл беті температураларының айырмасы илектік және ұсталық пештер үшін $\Delta t = 150\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$, термиялық пештер үшін – $\Delta t = 50\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$ құрайды.

Уақыт бойында пеш температурасының өзгерісін *пештің температуралық режимі* деп атайды – $t_n = f(\tau)$ (44-сурет).



44-сурет. Қыздырудың температуралық графигі

Бүкіл көлемі бойынша температурасы жуықтама бірдей пештер *камералық* деп, ал ұзындығы бойынша температурасы өзгеретін пештер *әдістік* деп аталады. Уақыттың өтуімен температурасы өзгермейтін пештер *тұрақты әрекетті* деп, ал уақыт бойлығында температурасы өзгеретін пештер *кезеңді әрекетті* деп аталады

Жылулық режим. Әрбір берілген уақыт кезеңінде пешке берілетін жылу мөлшері пештің жылулық күші деп аталады. *Жылулық режим* – бұл жылулық күштің уақыт бойындағы өзгерісі. Пайдалы жылу пайдалану коэффициенті:

$$ПЖК = \frac{Q_m + Q_{шл} + Q_{энд} - Q_{экз}}{Q_o + Q_\phi B}, \quad (4.2)$$

мұндағы B – отынның 1 сағ. шығыны;

Q_o – отынның химиялық жылуы;

Q_m және $Q_{шл}$ – металл мен шлақтың жылуы;

$Q_{энд}$ және $Q_{экз}$ – эндо- және экзотермиялық реакциялар жылуы, отынның жану реакцияларынан өзге;

Q_ϕ – отынның физикалық жылуы.

Электр пештері үшін $Q_o + Q_\phi B = 860 P$,

мұндағы P – пеш қуаты, кВт.

Отынды пайдалану коэффициенті

$$ОПК = \frac{Q_m^{жс} + Q_\phi - Q_{к.г.}}{Q_m^{жс} + Q_\phi}, \quad (4.3)$$

мұндағы $Q_{к.г.}$ – кететін газ жылуы.

$ОПК > ПЖК$, бірақ олардың теңесуіне ұмтылу керек.

Пештің өнімділігі – пеш жұмысының ең маңызды көрсеткіші, ол бірқатар факторларға тәуелді: пештің жұмыс кеңістігіндегі температураға, шығатын түтінді газдар температурасына, пештен қыздырылатын металға берілетін жылу берудің қарқындылығы мен сипатына және т.б. Осының бәрі өнімділіктің технологиялық, жылутехникалық және құрылымдық факторларға тәуелді екенін көрсетеді.

Өнімділік жалпы және меншікті болып бөлінеді. *Жалпы өнімділік (P)* агрегаттың мөлшерін, масштабын сипаттайды және $кг/сағ.$ ($T/сағ.$) немесе $T/тәулікпен$ өлшенеді. *Меншікті өнімділік* пеш жұмысының қарқындылығын сипаттайды – $кг/м^2 сағ.$ ($T/м^2 сағ.$). Оны көбінесе пеш оттығының *кернеуілігі* деп те атайды. Активті оттық кернеуілігі $N_A = P/F_m$ және габаритті оттық кернеуілігі $N_r = P/F_n$ болып бөлінеді, өрнектегі F_m – металл жайғасатын аудан, F_n – пеш оттығының ауданы.

Барлық энергетикалық қондырғылар сияқты пеш те қуатпен сипатталады. Пештің *жылулық қуаты* деп отынның толық жануынан немесе электрэнергиясы шығынының есебінен бір уақыт бірлігінде пеште бөлінетін жылу мөлшері аталады.

Қуаттың өлшем бірліктері $Вт = Дж/с$. Пеш тұтынатын қуаттың бір бөлігі пайдалы жұмысты іске асыруға – материалдарды қыздыруға – жұмсалады. Ол материалдармен жұтылады, сондықтан игерілген қуат $M_{иг.}$ деп аталады, екінші бөлігі қоршаған ортаға мәжбүрлі жоғалады – $M_{жоғ.}$. Сондықтан жылулық қуатты пештің жалпы қуаты деп атау қабылданған

$$M_{жал} = M_{иг} + M_{жоғ}. \quad (4.4)$$

Отынды пештің жалпы қуаты шығын өлшеуішпен өлшенетін отынның шығыны арқылы көрсетіледі, газ тәріздес отындар үшін $м^3/сағ$ ($м^3/с$) немесе $кг/сағ$ ($кг/с$) – сұйық отын үшін. Қатты отынның шығыны таразыға тарту жолымен анықталады. Егер отынның шығынын B белгілесек, онда:

$$M_{жал} = B \cdot Q_m^{жс}, \text{ Вт}. \quad (4.5)$$

4.3. Пештің жылу балансын құру және отын шығыны

Жоғарыда айтылғандардан байқағандай, отынның шығыны пеш жұмысының маңызды сипаттамасын көрсетеді. Әрекеттегі пештегі отын шығыны тікелей өлшеумен, ал жобаланатын пештер үшін – пештің жылулық балансын құрып, есептеу жолымен анықталады. Пештің жылулық балансын құрудың мәні, пешке келетін жылу статьяларын шығыс статьяларымен салыстырудан тұрады. Энергияның сақталу заңы бойынша келетін жылу шығынға тең болуы керек. Арифметикалық есептеулердің дәлсіздігінен, баланста біршама қиыспаушылықтың болуы мүмкін (~1 %).

Өнімді үздіксіз шығаратын пештерде жылу балансы 1 сағатқа, ал кезеңді әрекетті пештер үшін жұмыстың бір цикліне құрастырылады.

Жылу балансының статьяларын анықтағаннан соң, кіріс статьяларының қосындысы шығыс қорытындысынан алынып тасталады. Баланстағы қиыспаушылық анықталады, балансты құру дәлдігі тексеріледі. Кіріс пен шығыстың барлық статьяларын энергия бірліктерімен де (Дж), қосынды саннан пайызбен де көрсетуге болады. Баланстың барлық статьялары өнімнің бір бірлігіне есептеледі, бұл әртүрлі өнімділікті пештердегі баланс статьяларының абсолюттік шамаларын өзара салыстыру мүмкіндігін береді.

Пештегі жылу балансын құру алдында отынды пештегі жылу ағынының сұлбасы көрінісін қарастырып өтейік (45-сурет).

Жылу балансы, әрқайсысы бірқатар статьялардан құралатын, өзара тең кіріс және шығыс бөліктерінен тұрады.

Жылу балансының кіріс бөлігінің статьялары

1. Отынның жануы нәтижесінде алынатын жылу:

$$Q_{\text{нег}} = BQ_m^{\text{жс}}, \text{ кВт (кДж/сағ)}, \quad (4.6)$$

мұндағы B – отынның сағаттық шығыны, кг/сағ немесе м³/сағ.

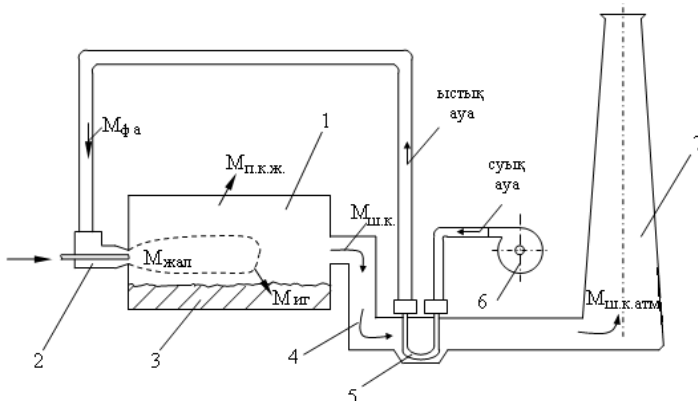
2. Қыздырылған ауамен енетін жылу:

$$Q_a = Bc_a \alpha L_o, \text{ кВт (кДж/сағ)}, \quad (4.7)$$

мұндағы c_a – температураның 0°C -тан t_a дейінгі интервалындағы ауаның орташа меншікті жылуық сыйымдылығы, $\text{кДж/м}^3\text{ }^\circ\text{C}$;

t_a – ауаның қыздырылған температурасы, $^\circ\text{C}$;

αL_o – ауаның нақты шығыны, м^3 .



45 – сурет. Отынды пештегі жылу ағындары:

1 – пештің жұмысшы кеңістігі; 2 – жанарғы; 3 – қыздырылатын материал; 4 – түтін каналы; 5 – шығатын түтін жылуын кәдеге алу (рекуператор); 6 – желдеткіш; 7 – түтін құбыры

3. Қыздырылған отынмен енетін жылу:

$$Q_o = V c_o t_o, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.8)$$

4. Экзотермиялық реакциялар жылуы, кВт (кДж/сағ).

Отынның жану реакциясынан өзге, оң жылулық эффектпен жүретін барлық химиялық реакциялар ескеріледі. Қыздыру пештерінде металдың тотығуы кезінде бөлінетін жылу есептеледі. Бір килограмм металл тотыққан кезде 5652 кДж жылу бөлінеді:

$$Q_{экз} = 5652 P a, \quad (4.9)$$

мұндағы P – пештің өнімділігі;

a – металдың тотығу шамасы.

Жылу балансының шығыс бөлігінің статьялары

1. Металды қыздыру үшін қажетті пайдалы жылу:

$$Q_{пай} = P c_m t_m, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.10)$$

мұндағы P – пештің өнімділігі;

c_m – температураның 0°C -тан t_m дейінгі интервалындағы металдың орташа меншікті жылу сыйымдылығы, $\text{кДж/м}^3\text{ }^\circ\text{C}$.

2. Шлакпен кететін жылу, кВт (кДж/сағ):

$$Q_{\text{шл}} = P c_{\text{шл}} t_{\text{шл}}. \quad (4.11)$$

3. Эндотермиялық реакциялар жылуы – $Q_{\text{энд}}$, кВт (кДж/сағ).

Бұл статья балқыту пештері үшін сипатты. Мысалы, CaCO_3 ыдырауына кететін жылу.

4. Шығатын түтінді газдармен кететін жылу:

$$Q_{\text{кет}} = B V_{\text{кет}} c_{\text{кет}} t_{\text{кет}}, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.12)$$

5. Отынның химиялық толық жанбауы салдарынан жылу жоғалымы. Отынды жалынсыз жағу кезінде химиялық толық жанбау жоғалымы, тәжірибе жүзінде болмайды. Жалынды жағу кезінде шығатын түтінді газдар құрамында $0,5 - 3\%$ жанбаған газдар (CO және H_2) кетеді. 1% CO – да $0,5\%$ H_2 болады деп қабылданады. Мұндай қоспаның жану жылуы 12142 кДж/м^3 құрайды. Егер шығатын газдардағы жанбаған CO үлесін a тең деп қабылдасақ, онда жылу жоғалымы болады:

$$Q_5 = 12142 B V_{\text{кет}} a, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.13)$$

6. Механикалық толық жанбау кезіндегі жылу жоғалымы, кВт (кДж/сағ):

■ Қатты отынды жағу кезіндегі жоғалым $3 - 5\%$ құрайды:

$$Q_6 = (0,03 - 0,05) B Q_m^{\text{жс}}. \quad (4.14)$$

■ Сұйық отынды жағу кезіндегі жоғалым – 1%

$$Q_6 = 0,01 B Q_m^{\text{жс}} \quad (4.15)$$

■ Газды жағу кезіндегі жоғалым $2 - 3\%$ құрайды:

$$Q_6 = (0,02 - 0,03) B Q_m^{\text{жс}}. \quad (4.16)$$

7. Қалау (күмбез, қабырға, пеш оттығы) арқылы жылуөткізгіштік нәтижесінде жылудың жоғалуы:

$$Q_7 = \frac{t_k - t_a}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\alpha}}, \text{ кВт (кДж/сағ)}, \quad (4.17)$$

мұндағы t_k – қалаудың ішкі бетінің температурасы, °C;

t_a – қоршаған ауаның температурасы, °C;

δ_1 және δ_2 – отқа төзімді қалау мен оқшаулаушы қалыңдығы, м;

λ_1 және λ_2 – қалау мен оқшаулаушының жылуөткізгіштік коэффициенттері, Вт/м °C;

α – қабырғадан ауаға жылуберу коэффициенті, 19,8 Вт/м² °C тең ($1/\alpha = 0,052 \text{ м}^2 \text{ °C/Вт}$).

8. Пештің ашық терезесі арқылы сәулеленумен жылудың жоғалуы:

$$Q_8 = C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4 F \Phi \varphi, \text{ кВт (кДж/сағ)}, \quad (4.18)$$

мұндағы C_o – абсолютті қара дененің сәулелену коэффициенті, Вт/м² К⁴;

T – пештің орташа температурасы, °K;

F – ашық терезе ауданы, м²;

Φ – диафрагмалау коэффициенті;

φ – терезенің ашық болу уақытының үлесі (сағат).

9. Тиелетін ыдысты қыздыруға шығындалатын жылу:

$$Q_9 = P_m c_m t_m, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.19)$$

10. Пештің жеке бөлімдерін суытатын сумен кететін жылу:

$$Q_{10} = (0,1 - 0,15) Q_{\text{кпр}}, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.20)$$

11. Қалаудың жылуды шоғырландыру шығыны:

$$Q_{11} = V_{\text{қал}} c_{\text{қал}} \rho_{\text{қал}} t_{\text{қал}}, \text{ кВт (кДж/сағ)}. \quad (4.21)$$

мұндағы $V_{\text{қал}}$ – қалаудың көлемі, м³;

$t_{\text{қал}}$ – қалаудың орташа температурасы, °C;

$c_{\text{қал}}$ – қалаудың жылусыйымдылығы, кДж/кг °C;

$\rho_{\text{қал}}$ – қалаудың тығыздығы, кг/м³.

12. Есептелмеген жоғалымдар:

$$Q_{12} = (0,1 - 0,15) (Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} + Q_{11}), \text{ кВт} \\ (\text{кДж/сағ}).$$

Жылу балансының кіріс және шығыс статьяларын жеке қосып алып, $Q_{\text{кір}} = Q_{\text{шығ}} \text{ теңдеуін құрамыз. Бұл теңдеуде бір белгісіз бар, ол отынның шығыны } B. B \text{ шамасын тауып, кіріс пен шығыстың барлық статьяларын есептейді.}$

Жеке пештердің жұмысының сапасын салыстыру үшін отын мен жылу шығындарының меншікті көрсеткіштерін қолданады. Отынның меншікті шығынын шартты отын ($ш.о.$) бірлігінде жиі анықтайды. Шартты отын ретінде жану жылуы $Q_{ш.о.} = 29330 \text{ кДж/кг}$ отын қабылданады. Кез келген отынды шартты отынға есептеу жолы 1 тарауда берілген.

4.3.1. Электрпештері мен қыздырғыш элементтерді есептеу

Электрпештерді есептеу жалынды пештердің есептеуіне ұқсас орындалады. Айырмашылығы: жылу балансының кіріс бөлігіндегі $Q_{\text{хим}}$ орынына $Q_{\text{эл}}$ алынады; $Q_{\text{кет}}$, Q_5 – толық жанбау, Q_a және Q_o – қыздырылған ауамен және отынмен енетін жылу статьялары болмайды.

Жылу балансының шығыс бөлігіне қысқа тұйықталуға кететін жылу шығыны енгізіледі $Q_{\text{қт.ж.}}$, яғни қалау арқылы өтетін металдық бөлшектерден (терможұп құбыршалары, ауақтар осін бағыттаушы қыздырғыштар және т.б.) жылуөткізгіштікпен жылудың жоғалуы: $Q_{\text{қт.ж.}} = (0,2 - 0,5) Q_{\text{қал.}}$

Жылу балансы $Q_{\text{эл}}$ анықтауға мүмкіндік береді. Осы шама ($Q_{\text{эл}}$) арқылы пештің электрқуаты есептеледі:

$$N = K \frac{Q_{\text{эл}}}{3600\tau}, \text{ кВт/сағ}, \quad (4.22)$$

мұндағы K – пеш жұмысын жылдамдату, желідегі кернеудің төмендеу, окшаулаушының нашарлау мүмкіндіктерін ескеретін қор коэффициенті, камералық пештер үшін $K=1,3-5,0$; өтпелілер үшін $K=1,2-1,3$ тең.

Өнеркәсіптік қыздырғыш құрылғылардың кедергілік электрлік қыздырғыш элементтері металдық және бейметалдық материалдардан дайындалады. Жұмыс температурасы 1000 °С дейінгі қондырғыларда металдық қыздырғыштар, ал жоғары температуралы қондырғылар үшін (жұмыс температурасы 1100 °С жоғары) керамикалық қыздырғыш элементтер қолданылады, олар кремний карбидінен SiC , цирконий карбидінен ZrC , гафний карбидінен HfC және металдық қыздырғыштар W , вакуумда жұмыс істеу кезінде Mo жасалады. Қыздырғыштар материалына жоғары ыстыққа тұрақтылығы, жоғары температураларда беріктігі, сызықты кеңею коэффициентінің төмендігі, меншікті электркедергілігінің жоғарылығы, фазалық түрленудің болмауы, материал құнының арзандығы және жасалынуының қарапайымдылығы сияқты талаптар қойылады. Металдық қыздырғыштар үшін материал ретінде нихром типті қорытпалар, алюминийдің қосылуымен, ферриттік жоғарыхромды болаттар ($Cr \approx 25\%$) қолданылады. Ең жақсы қорытпалар, никель-хромды композициялар – нихромдар, бірақ олар қымбат тұрады, өйткені құрамында никель жоғары. Хромалюминийлі қорытпалар салыстырмалы арзан, бірақ олар тез тозуға бейімді, иілімділігін тез жоғалтады, бұл олардың механикалық бұзылуына келтіреді. Қорытпалардың негізгі сипаттамалары 11 – кестеде келтірілген.

11-кесте

Қорытпалардың сипаттамасы

Қорытпалар	Атауы және қорытпа маркасы	Қыздырғыштың максималь ұйғарынды температурасы, °C	Меншікті электрлік кедергі, $\frac{\Omega \cdot m \cdot m^2}{m}$	Меншікті салмақ, $\frac{g}{cm^3}$	Шығарылатын типмөлшері (немесе кима), мм
Хромникельді қорытпалар (нихромдар)	X20H80 X20H80T X15H60 XH70Ю XH60ЮЗ	1100 °C 1150 °C 1000 °C 1200 °C 1150 °C	1,15 1,10 1,10 1,10 1,10	8,4 8,4 8,4 8,2 8,2	Сым $\varnothing 1 \div 10 мм$ немесе таспа $a \times b$; $a = 1 \div 3 мм$, $b = 8 \div 40 мм$
Хромалюминийлі қорытпалар (фехралдар)	X27Ю5Т X23Ю5 X23Ю5Т X37Ю3ТЛ	1300 °C 1300 °C 1400 °C 1400 °C	1,40 1,35 1,35 1,40	7,5 7,3 7,2 7,3	Сым $\varnothing 1 \div 10 мм$ немесе таспа $a \times b$; $a = 1 \div 3 мм$, $b = 8 \div 40 мм$

Электр қыздырғыштарды есептеу кезінде ескеру қажет: температураны барынша дәл реттеу үшін үлкен электр пештерді дербес реттелетін жылу аймақтарына бөлу керек, аймақтардың саны пештің ұзындығының L оның еніне B немесе диаметріне D қатынасына тәуелді таңдалады.

Температураның бөлінуінің ең ыңғайлы мөлшерлігі: $L_{\text{айм.}} = (1,0 \div 1,5) B$ және $L_{\text{айм.}} = (1,0 \div 1,5) D$.

Әрбір аймақтың бір қыздырғышының қуаты 25 кВт жоғары болмауы керек. Қыздырғыштардың жұмыс температурасы пештің температурасынан $50\text{--}200^\circ\text{C}$ жоғары қабылданады. Мәжбүрлі циркуляциялы пештер үшін бұл айырма одан да жоғары бола алады.

Қыздырғыштарды есептеу кезінде диаметрді, ұзындықты, массаны және қиманы анықтайды. Қыздырғыштар сымды және таспалы болып бөлінеді.

I СЫМДЫ	II ТАСПАЛЫ
$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 10^5 \cdot P^2 \rho_t}{\pi^2 U^2 v}}$	$a = \sqrt[3]{\frac{5 \cdot 10^4 \cdot P^2 \rho_t}{m(m+1)U^2 v}}$
$l = \sqrt[3]{\frac{10 P U^2}{4 \pi \rho_t v^2}}$	$l = \sqrt[3]{\frac{2.5 P U^2 m}{(m+1)^2 \rho_t v^2}}$
$g = \gamma \sqrt[3]{\frac{0.63 \cdot 4 \rho_t \cdot P^5}{U^2 v^4}}$	$g = \gamma \sqrt[3]{\frac{0.625 \cdot m^2 \rho_t \cdot P^5}{(m+1)^4 U^2 v^4}}$

мұндағы d – диаметр, мм;

l – ұзындық, м;

v – қыздырғыштың беттік күші, Вт/см²;

γ – тығыздық, кг/м³;

a – қалыңдық, мм;

g – масса, кг;

P – қуат, кВт;

U – қыздырғыштағы кернеу, В;

ρ_t – меншікті электр кедргілілік, Ом·мм²/м;

m – таспаның жақтарының қатынастары (жалпы $m = 10$);

нихром үшін $\rho_t = \rho_o (1 + \beta t) = (1.0 \div 1.2)(1 + 0.0001t)$.

Қыздырғыштың беттік күші v температураға тәуелді болады. Мысалы, нихром үшін $t = 600^{\circ} \text{C}$ кезінде $V = 2.6 \div 3.2 \frac{\text{Bm}}{\text{см}^2}$; $t = 900^{\circ} \text{C}$ кезінде $V = 1.1 \div 1.5 \frac{\text{Bm}}{\text{см}^2}$; $t = 1100^{\circ} \text{C}$ кезінде $V = 0.5 \div 0.7 \frac{\text{Bm}}{\text{см}^2}$.

Қыздырғыштардың есептелген ұзындығы l мен қималары бойынша оның конструктивтік ерекшеліктерін анықтайды.

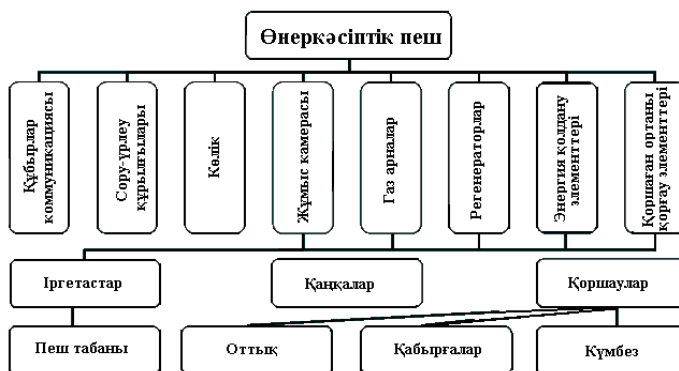
4 тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Металлургиялық пештерде жылу берілістің қандай түрлерін байқауға болады?
2. Қандай пештер пеш-жылуалмастырғыш деп аталады?
3. Қандай пештер пеш-регенераторларға жатады?
4. Балқыту пештерінің жылу балансын құрудың негізгі принциптері.
5. Газ бен ауаны қыздыруға арналған қондырғылардың қандай түрлерін білесіз?
6. Металлургиялық күйдіру, кептіру және балқыту пештерінің жылулық жұмысына қандай факторлар әсер етеді?
7. Балқыту пештерінің негізгі типтерін атаңыз.
8. Екі түрлі балқыту пешінің жылулық және технологиялық процестерін салыстырмалы сипаттаңыз.
9. Автогендік процестер ұғымы және сол процестер жағдайында жылу өндіру принциптері.
10. Доғалы электрқыздырғышты пештердің жұмысының және құрылымының ерекшеліктері.
11. Металлургиялық пештер: сыныптамасы, қолданылу аймағы және құрылымының ерекшеліктері.
12. Металлургиялық технологияның дәстүрлі және заманауи тізбектеріне салыстырмалы талдау жасаңыз.
13. Пештің жылулық және температуралық режимдері.
14. Пештер теориясын құруға үлес қосқан ғалымдар.
15. Пеш жұмысының негізгі көрсеткіштері: өнімділігі, қуаты және т.б.
16. Электр пештерінің қыздырғыш элементтерін есептеу.

5 ТАРАУ ПЕШ ҚҰРЫЛЫСЫНЫҢ МАТЕРИАЛДАРЫ МЕН ЭЛЕМЕНТТЕРІ

5.1. Жалпы мәліметтер

Өнеркәсіптік пеш – материалдың жылумен өңделуімен байланысты технологиялық процестер жүзеге асырылатын жылу техникалық агрегат. Өнеркәсіп пештері құрылымдық элементтерден тұрады, олардың басым көпшілігі бірдей бөліктерден құралады – іргетастан, қаңқадан, қоршау-шегендерден (46-сурет).



46-сурет. Өнеркәсіптік пештің жалпы құрылымдық сұлбасы

Пештердің негізгі элементтерін камералық қыздырғыш пештің мысалында қарастырайық (47-сурет):

1) металдық қаңқа – пеш элементтерін бекітуге арналған құрылғы;

2) шеген (отқа төзімді қалау) – қабырғадан, күмбезден және оттықтан тұратын жоғары температуралы аймақтың қоршауы. Жұмыс камерасын қоршаған кеңістіктен бөлу және жылу жоғалымын азайту қызметін атқарады. Жылу жоғалымының төмендігі – пеште жоғары температура алу мүмкіндігі;

3) пештің жұмыс кеңістігі – тұйықталған көлем, онда қыздырылатын материал жайғастырылады;

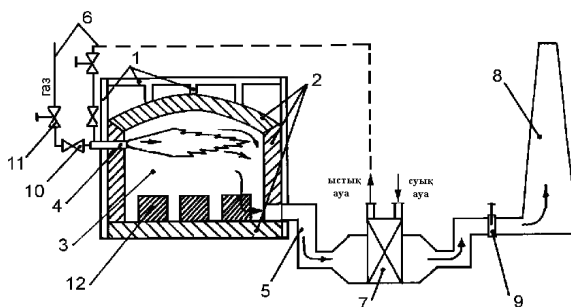
4) жылу өндіруші құрылғы – энергияны пештің жұмысшы кеңістігіне беретін және оны жылуға түрлендіретін құрылғы. Шаң

түріндегі қатты және газ тәріздес отынды жағуға арналған құрылғыны *жанарғылар* деп, ал сұйық отынды жағуға арналғанын – *форсункалар* деп атайды. Электр энергиясын жылуға түрлендіруші құрылғы *термоэлектрлік қыздырғыш* деп аталады;

5) боровтар (түтін арнасы) – түтінді шығарушы каналдар. Пештің жұмыс кеңістігінен жану өнімдерін түтін құбырына аластау қызметін атқарады;

6) газ ауа арналары – жанарғыларға газ бен ауаны жеткізуге арналған құбырлы жүйе;

7) жылу алмастырғыш – пештің жұмыс кеңістігінен жану өнімдерімен әкетілетін жылу (рекуператор немесе регенератор) және қосымша отын жағу (домна пешінің ауа қыздырғышы) жылуы есебінен ауа мен отынды қыздыруға арналған құрылғы. Рекуператорда түтін жылуды ауаға (газға) жұқа керамикалық немесе металдан жасалған бөлгіш қабырға арқылы береді. Түтін және ауа (газ) рекуператорда бір мезгілде болады. Регенераторда түтін және ауа (газ) бір каналмен қозғалады: алдымен түтін жіберіледі және жылу түтіннен саптамаға беріледі, содан соң ауа (газ) жіберіледі, ол жылуды саптамадан қабылдайды. Жылу алмастырғышта ауаны (газды) қыздыру пештің жұмыс кеңістігінде жоғары температураны алуға және отынның шығынын төмендетуге мүмкіндік береді;



47-сурет. Пештің негізгі элементтері:

- 1 – металдық қаңқа; 2 – шеген (күмбез, қабырғалар, оттық);
3 – пештің жұмыс кеңістігі; 4 – жанарғы; 5 – боровтар (түтін арналар); 6 – газ ауа арнасы; 7 – жылу алмастырғыш; 8 – түтін құбыры; 9 – түтін жапқышы; 10 – дроссельдер; 11 – ысырмалар;
12 – қыздырылатын материал

8) түтін құбыры – пештің жұмыс кеңістігінен түтінді атмосфераға аластауға арналған құрылғы. Түтін құбыры екі функцияны атқарады: жылу техникалық (қажетті сиретуді жасау) және экологиялық (зиянды лақтырындыларды әлсіздендіру);

9) түтін жапқышы – түтін арнаның көлденең қимасын жабу жолымен, пештің жұмыс кеңістігіндегі түтіннің қысымын реттеуге арналған жолақ түріндегі орталық элементті құрылғы. Пешке отынның максималь берілуі кезеңінде шибер жоғарғы шекті жағдайға қойылады, яғни толығымен ашық. Шибер, сонымен қатар, жөндеу жұмысын жүргізген кезде, пешті түтін құбырынан ажырату үшін де қызмет атқарады;

10) дроссельдер және 11) ысырмалар – газ шығынын реттеуге арналған құрылғы. Дроссель – жанарғы арқылы өтетін ауа мен газдың шығынын баяу реттеу құрылғысы. Ысырма – пеште жөндеу жұмысы жүрген кезде, оны газ-ауа құбырларынан ажыратуға арналған құрылғы;

12) қыздырылатын материал;

13) сору-үрлеу құрылғылары: желдеткіштер, компрессорлар, түтін-сорғылар. Пешке газ бен ауаны келтіру және пеш түтінін түтін құбырына айдау үшін қолданылады.

Аталған негізгі элементтер белгілі пештердің басым көпшілігіне қатысты, жеке пештерде қосалқы элементтер кездеседі. Мысалы, регенеративті типті пештерде ауыстыру құрылғылары (Фортер және Симплекс клапандары).

5.2. Отқа төзімділердің сыныптамасы және жалпы қасиеттері

Әртүрлі типті пештердің жұмысшы кеңістіктері қоршаған ортадан шеген деп аталатын пештік қоршаумен бөлінеді. Шеген талап етілетін температуралық шартты қамтамасыздандыруға арналған және отқа төзімді және жылуоқшаулаушы бөліктерден тұрады.

Отқа төзімділер деп ұзақ уақыт бойында 1800 К жоғары температура кезінде механикалық беріктілігін және пішінін сақтау қабілеттілігі бар материалдарды атайды.

Отқа төзімді бұйымдар пеш құрылысында қолданылатын материалдардың ішіндегі ең қымбаты және маңыздысы. Олар жоғары температуралар мен агрессивті орталар ықпалы жағдайында (газдардың, қақтың, балқымалардың, т.б.), жұмыс істейтін пештің жұмысшы кеңістігі мен пеш агрегатының басқа да бөлімдерінің құрылысында қолданылады. Металлургияның өркендеуі, пештердің жұмыс істеуінің ұзақтығы, олардың техника-экономикалық көрсеткіштері көп жағдайда отқа төзімділердің сапасы мен олардың ұйғарынды қабілеттілігіне байланысты.

Отқа төзімді материалдарда келесідей басты қасиеттер болуы қажет:

- жоғары отқа төзімділігі (1850 К төмен емес);
- 1300 К жоғары температурада жоғары механикалық беріктігі;
- температуралық ауытқулар кезінде бұзылмау қабілеттілігі;
- металлургиялық процестер компоненттеріне қатынасы

бойынша химиялық төзімділігі;

- қыздыру кезінде тұрақты пішін мен көлемде болуы;
- қажетті физикалық қасиеттерінің болуы – кеуектілігі, тығыздығы, жылусыйымдылығы, жылу өткізгіштігі, электр өткізгіштігі.

Отқа төзімді бұйымдардың қасиеттері бәрінен бұрын олардың химиялық құрамы мен дайындалу технологиясы бойынша анықталады. Олар көптеген белгілеріне байланысты сыныпталады: химия-минералогиялық құрамы, химиялық қасиеттері, беріктену әдісі, термоөңделуі, қалыптау әдісі, геометриялық пішіні бойынша және т.б. Қажет болған жағдайда отқа төзімділердің сыныпталуы туралы мәліметтерді арнайы әдебиеттерден табуға болады. Бұл оқу құралында отқа төзімділердің сыныпталуының, материалды ары қарай мазмұндау үшін ғана қажетті, бөлігі беріледі.

5.2.1. Отқа төзімділердің сыныптамасы

Химия-минералогиялық құрамы бойынша сыныпталуы. Барлық отқа төзімділер химия-минералогиялық құрамы бойынша типтер мен топтарға сыныпталады (12-кесте).

12-кесте
Отқа төзімділердің химия-минералогиялық құрамы бойынша
сыныптамаcы

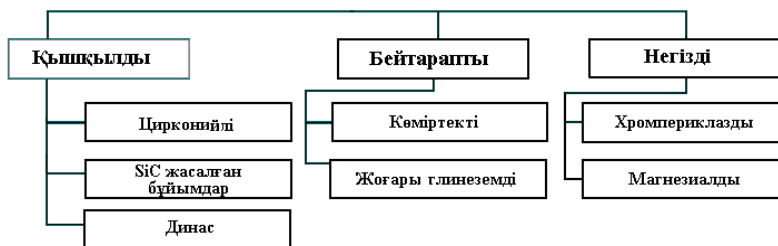
к/с	Типі	Тобы	Химиялық компоненттерін шыныққан затқа анықтайтын массалық үлесі, %
1	Кремнеземді	Кварцты шыныдан	$\text{SiO}_2 \geq 97$
		Династы	$\text{SiO}_2 \geq 93$
		Династы үстемелі	$80 \leq \text{SiO}_2 \leq 93$
		Кварцты (бетонды және күйдірілмеген)	$\text{SiO}_2 \geq 85$
2	Алюмосиликат-ты	Жартылай кышкылды	$\text{SiO}_2 < 85$; $\text{Al}_2\text{O}_3 < 28$
		Шамотты	$28 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 45$
		Муллитокремнеземді	$45 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 62$
		Муллитті	$62 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 72$
		Муллитті корунтты	$72 < \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 90$
3	Глиноземді	Корундті	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 90$
4	Глиноземді-әкті	Алюминат кальцийлі	$\text{Al}_2\text{O}_3 > 65$ $10 < \text{CaO} < 35$
5	Магнезиалды	Периклазды (магнетитті)	$\text{MgO} \geq 85$
6	Магнезиалды-әкті	Периклазды әкті	$50 < \text{MgO} < 85$
		Периклазды әкті тұрақтандырылған	$35 < \text{MgO} \leq 75$
		Әкті периклазды (доломитті)	$\text{CaO} : \text{SiO}_2 > 2$ $15 < \text{CaO} \leq 40$ $10 < \text{MgO} \leq 50$ $45 \leq \text{CaO} \leq 85$
7	Әкті	Әкті	$\text{CaO} \geq 85$
8	Магнезиалды-шпинелидті	Периклазды хромитті	$\text{MgO} \geq 60$ $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$
		Хромитті периклазды	$40 \leq \text{MgO} < 60$ $15 < \text{Cr}_2\text{O}_3 < 35$
		Хромитті	$\text{MgO} < 40$; $\text{Cr}_2\text{O}_3 > 30$
		Периклазды шпинелидті	$50 \leq \text{MgO} \leq 85$ $5 \leq \text{Cr}_2\text{O}_3 \leq 20$ $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 25$

12-кестенің жалғасы

		Периклазды шпинельді	$MgO > 40$ $5 \leq Al_2O_3 \leq 55$
		Шпинельді	$25 \leq MgO \leq 40$ $55 < Al_2O_3 < 70$
		Периклазды шпинельді	$MgO > 40$ $5 \leq Al_2O_3 \leq 55$
		Шпинельді	$25 \leq MgO \leq 40$ $55 < Al_2O_3 < 70$
9	Магнезиалды-силикатты	Периклазофорстеритті	$65 MgO < 85$ $SiO_2 \geq 7$ $50 \leq MgO \leq 65$ $25 \leq SiO_2 \leq 40$
		Форстеритті хромитті	$45 \leq MgO < 60$ $20 \leq SiO_2 \leq 30$ $5 \leq Cr_2O_3 \leq 15$
10	Хромды	Хромооксидті	$Cr_2O_3 \geq 90$
11	Цирконийлі	Бадделеидті	$ZrO_2 > 90$
		Бадделеидті корундты	$20 \leq ZrO_2 \leq 90$ $Al_2O_3 \leq 65$
		Цирконийлі	$ZrO_2 > 50$ $SiO_2 > 25$
12	Оксидті	Арнайы отқа төзімді оксидтерден: $BeO; MgO; CaO; Al_2O_3; Cr_2O_3; V_2O_3; Sc_2O_3; SiO_2; SnO_2; ZrO_2; HfO_2; ThO_2; UO_2; Cs_2O$ және басқалары	Аталған оксидтердің мөлшері құрғақ масса бойынша 98% төмен емес
13	Көміртекті	Графиттелген	$C > 98$
		Көмірлі	$C > 85$
		Көміртек құрамды	$8 \leq C \leq 82$
14	Карбид кремнийлі	Карбид кремнийлі	$SiC > 70$
		Карбид кремний құрамды	$15 < C \leq 70$
15	Оттегісіз	Нитридтерден, боридтерден, карбидтерден, силицидтерден және басқа да оттегісіз қосылыстардан (көміртектерілерден өзге)	Оттегісіз қосылыстардың максималь жеткен мөлшерлері

Отқа төзімділердің химиялық қасиеттері бойынша сыныпталуы. Химиялық қасиеттеріне қарай отқа төзімді материалдар үш түрге бөлінеді: қышқылды, бейтарапты және негізді (48 – сурет).

Отқа төзімді бұйымдардың осылай сыныпталуы жоғары температура кезінде қышқылды, негізді және бейтарапты қосылыстармен реакцияға түсу қабілеттілігіне негізделеді. Мысалы, қышқыл отқа төзімділерді негізгі қождың немесе басты химиялық қосылыстар мен шаң құрамды газдар ықпалына ұшырайтын қабырғалар аймағында пайдалануға болмайды. Атап айтқанда, тотыққан атмосфералы немесе қышқыл қожды пештерде қышқылды отқа төзімділерді, ал негізгі технологиялық процестер жүретін пештерде негізді отқа төзімділерді қолдану қажет.



48-сурет. Отқа төзімділердің химиялық қасиеті бойынша сыныптама

Тәжірибеде, металлургия процестерінде күрделі химиялық әрекеттердің болуынан, бұл принципті қатаң ұстауға мүмкіндік бола бермейді.

Қышқылды отқа төзімділердің басты компоненті – еркін кремнезем. Ең жоғары қышқылды отқа төзімді – динас. Сонымен қатар, арнаулы тағайындаулы қышқылды отқа төзімділер болып табылатын, цирконийлі және карбидкремнийлі бұйымдарда жатады. Қатаң бейтарапты отқа төзімділер болмайды, дегенмен бейтараптылар қатарына жоғары глинеземді және көміртектілерді жатқызады.

Негізді отқа төзімділердің басты компоненті – магний мен кальций оксидтері, яғни магнезиалды және хромпериклазды бұйымдар жатады. Шамот бұйымдар қышқылды да, бейтарапты

да орталарда, ал кейде негізді ортада да қолданылады. Бұл оның қасиеттеріне емес, оның бағасының төмендігіне байланысты.

Отқа төзімділердің кейбір басқа белгілері бойынша сыныпталуы. Отқа төзімді бұйымдар беріктендіру әдістеріне тәуелді жіктеледі: *бетонды*, олар қалыпты температура жағдайында қату немесе 900 К дейін қыздыру кезінде (бетонды блоктар) қажетті қасиетке ие болатын отқа төзімді толтырғыштар, байламдар және үстемелер; *күйдірілмеген*, 900 К жоғары емес температурада кептіру немесе кокстау кезінде қажетті қасиетке ие болатындар; *күйдірілген*, күйдіру процесінде күйе жентектелгендер; *ыстықтай престелген*, престеу процесінде күйе жентектелгендер және т. б.

Пішіні бойынша отқа төзімді материалдар анықталған геометриялық пішіні мен мөлшері бар (пішінделген отқа төзімділер) бұйымдарға, басқа компоненттермен араластырғаннан соң қолданылатын ұнтақ түрінде шығарылатын немесе тікелей қолдануға дайын масса түріндегі пішінделмеген бұйымдарға жіктеледі.

Көптеген пішінделген отқа төзімді бұйымдарды бірнеше килограмм массадан тұратын, тікбұрышты параллелепипед түрінде шығарады. Дұрыс пішінді кірпіштер әмбебапты, олар әртүрлі кескін үйлесіміндегі қабырғалар қалауын орындау кезінде ыңғайлы. Белгілі бір үлгідегі (фасонды) отқа төзімді бұйымдар да шығарылады, олар бірқатар типтерге бөлінеді.

Қалауға қолданылуына бойынша отқа төзімді материалдар *домналық*, домна пештері қалауына арналған; *саптаулық*, регенеративті және рекуперативті саптаулар қалауы үшін қолданылатын; *ожаулық*, ожаулар қаптамасы үшін қолданылатын және т.б. болып жіктеледі.

Қолданыстағы металлургиялық процестердің үздіксіз жетілдірілуі және жаңа процестердің пайда болуы, отқа төзімділер ассортиментін кеңейтуді және жаңа отқа төзімді материалдар жасауды талап етеді. Талшықтардан жасалған *талшықты отқа төзімділер* өндірісі өркен жайып келеді: плиталар, қағаз, картон, маталар және т.б. Тек қана каолинді мақта негізінде отқа төзімді бұйымдардың 50-ден аса түрі шығарылады. Стандартты сыныптамаға әлі де жаңа отқа төзімді

материалдар кірістірілмеген. Олардың арасында органо-минералды эластикті отқа төзімді материалдар (ЭЛОМ) ерекше топты құрайды. Бұл отқа төзімділерде, қатты жоғары отқа төзімді оксидтер (80-90 %) каучуктермен, полиолефинді балауызбен және басқа эластикті органикалық материалдармен байланысқан. Сыныптама кестесіне Si-C-O-N және Si-Al-O-N отқа төзімді жүйелеріде (сиалондар) кірмеген. Жаңадан әзірленген отқа төзімділер техникада тез арада кеңінен қолдану табады. Мысалы, АҚШ-та қолданылатын отқа төзімділер көлемінің 25 % соңғы 5 жылда ойлап табылған отқа төзімділер.

5.2.2. Отқа төзімділер өндірісінің принципті сұлбасы

Табиғатта жаратылысты отқа төзімді материалдарда кездеседі, дегенмен металлургияда қолданылатын отқа төзімділердің негізгі массасы жасанды жолмен алынған отқа төзімділер.

Қазіргі отқа төзімділер өндірісінің теориялық негізін академик А.А. Байков тұжырымдаған. Оның қорытындысы бойынша, отқа төзімділердің негізін құрайтын басты қосылыстарды мүмкіндікті таза түрде бөліп алу керек. Басты қосылыстар ретінде химиялық ең инертті және тұрақты қосылыстарды қолданады (оксидтер, көміртегі немесе оның қосылыстары, т.б.). Олардың бәрінің кристалдық құрылымы бар. Басты қосылыстарға, шикіқұрамды термиялық өңдеу процесінде (күйдіру) кристалдық құрылымдарды еріту міндетін атқаратын байланыстырғыш массаның аз мөлшері қосылады. Отқа төзімділер өндірісінің ең маңызды сатысы болып табылатын күйдіру процесінде, басты қосылыстардың жеңіл балкитын байланыстырғыш массамен қождануы жүреді. Қождану кезінде басты қосылыстардың кристалдық құрылымы жартылай сұйық байланыстырғыш массада ериді, ал содан соң майда берік біріккен кристалдардың бөлінуімен қайта кристалдану өтеді. Бұйымды күйдіру үш сатылы жүреді: біртіндеп қыздыру, қайта кристалдану температурасы кезінде ұстау және ақырын суыту. Ең маңызды – екінші саты, мұнда байланыстырғыштың балқытылған аз мөлшерімен араластырылған, бөлшектердің

қопсыған массасынан тұратын бұйым берік кристалдық қауышпаға айналады.

А.А.Байков теориясы негізінде шикіқұрамды құрастыруға және отқа төзімділер өндірісінің технологиялық режимін таңдауға негізгі талаптар қойылады:

- шикіқұрамға отқа төзімділердің басты қосылыстары сұйық қож түзейтіндей және онда еритіндей қоспалар енгізілуі қажет;

- шикіқұрамда басты қосылыстар химиялық өзара әрекеттесетін заттар болмауы керек;

- күйдіру процесінде қайта кристалдану процесінің өтуін қамтамасыз ететіндей температура ұсталуы қажет;

- отқа төзімді бұйымдарды қайта кристалдану температура-сында ұстау ұзақтығы, қайта кристалдану процесінің толық аяқталуы үшін жеткілікті болуы керек.

Осы талаптарға сәйкес, отқа төзімділер өндірісінің принциптік технологиялық сұлбасы келесідей бес этаптан тұрады.

Бастапқы материалдарды дайындау зиянды және ластанушы қоспаларды бөлу мақсатында шикізатты байытудан, нәтижесінде карбонаттар, гидраттар және органикалық қосылыстар бұзылатын шикізатты алдын ала күйдіруден, және де күйдірілген материалды ұнтақтау мен оны ірілігі бойынша сұрыптаудан тұрады.

Шикіқұрамды дайындау бастапқы заттарды дозалаудан, оларды мұқият араластырудан және ылғалдаудан тұрады.

Бұйымдарды қалыптау. Жоғарыда айтылғандай, әртүрлі отқа төзімділер әрқалай қалыпталады.

Кептіру. Кептіру кезінде шикі бұйымдардан гигроскопиялық ылғалдық аласталады.

Бұйымды күйдіру. Бұл операция арнайы күйдіру пешінде немесе тікелей металлургиялық пеште жүргізіледі. Күйдіру процесінде шикі бұйым берік қатты және біртекті кристалданған қауышпаға айналады.

Нақты отқа төзімділер үшін технологиялық сұлба келтірілген принциптік сұлбадан ерекше болуы мүмкін. Мысалы, балқыған бұйымдар үшін 3-5 этаптар бастапқы шикіқұрамның балқуымен, бұйымды құюмен және кейде оларды күйдірумен орын ауыстырылады.

5.2.3. Отқа төзімділер құрылымы

Отқа төзімді бұйымдарды жеке түйірлерінің әртүрлі химиялық, термомеханикалық және жылуфизикалық қасиеттері болатын, гетерогендік материалдар ретінде қарауға болады. Отқа төзімділердің гетерогендігіне байланысты тіпті олардың химиялық қасиеттері де, мысалы, қождармен өзара әрекеттесуі, бұйымның тек қана химиялық құрамымен анықталмайды, оның химия-минералогиялық құрамына, отқа төзімділер құрылымына және кеуектілігіне тәуелді. Отқа төзімділердің макроқұрылымы қатты бөлігімен және кеуектерімен сипатталады. Қатты бөлімі басты қосылыстардың ірі түйірлерінен тұрады, олар *толтырғыштар* деп аталады және кристалдар болып табылады. Мөлшері бойынша майда түйірлері *байлам* деп аталып, шыныдан, аморфты және кристалдық бөлшектерден тұрады.

Техникада отқа төзімділер құрылымы үш көрсеткішпен сипатталады: тығыздықпен, кеуектілікпен және газөткізгіштікпен. Газөткізгіштікті отқа төзімділердің жұмысшы қасиеттеріне арналатын бөлімде қараймыз, ал қалған екі көрсеткішін осы тарауда қарайық.

Тығыздық. Отқа төзімдінің көлемін шартты түрде екі көлемнің қосындысы десе болады: қатты дене және кеуек. Осыған сәйкес екі тығыздықты қарастырған жөн: нағыз – отқа төзімдінің қатты бөлімінің массасының оның қатты бөлімінің көлеміне қатынасымен анықталады:

$$\rho = G_{\text{кат}} / V_{\text{кат}}, \quad (5.1)$$

мұндағы ρ – отқа төзімдінің нағыз тығыздығы, кг/м³;

$G_{\text{кат}}$ – отқа төзімдінің қатты бөлімінің массасы, кг;

$V_{\text{кат}}$ – отқа төзімдінің қатты бөлімінің көлемі, м³;

және көріністі тығыздық – отқа төзімдінің массасының оның толық көлеміне қатынасымен анықталады:

$$\rho_{\text{көр}} = G_{\text{о.т.}} / V_{\text{о.т.}}, \quad (5.2)$$

мұндағы $\rho_{\text{көр.}}$ – отқа төзімдінің көріністі тығыздығы, кг/м³;

$G_{\text{о.т.}}$ – отқа төзімдінің массасы (толық), кг;

$V_{\text{о.т.}}$ – отқа төзімдінің көлемі (жалпы), м³.

Нағыз тығыздығы бойынша, отқа төзімдінің негізгі қасиетін анықтайтын, оның минералогиялық құрамы туралы айтуға болады. Көріністі тығыздық отқа төзімдіні дайындау әдісіне тәуелді, оның қасиетіне әсер етеді.

Отқа төзімдінің құрылымын оның нағыз тығыздығы бойынша анықтауды келесі мысалмен көрсетуге болады. Негізгі компоненті кремнезем болатын динас отқа төзімдісі өз құрамында кремнеземнің үш модификациясын ұстайды: кварц ($\rho = 2640 \text{ кг/м}^3$); тридимит ($\rho = 2330 \text{ кг/м}^3$) және кристоболит ($\rho = 2270 \text{ кг/м}^3$). Динас кірпішіндегі әрбір модификацияның мөлшері күйдіру сапасына байланысты. Егер кірпіш толық күйдірілсе, онда барлық кварц тридимит пен кристоболитке өтеді және отқа төзімдінің нағыз тығыздығы 2300 кг/м^3 мәніне жуықтайды. Осылай, династың нағыз тығыздығын біле отырып, күйдірудің аяқталу дәрежесін анықтауға болады.

Нағыз тығыздықтың жоғары дәрежесі кірпіште кварц қалдығының бар екенін көрсетеді. Бұл пеш жұмысы процесі кезінде династың жарылуына және қыздыру кезінде шегеннің көлемінің едәуір ұлғаюына соқтырады. Сондықтан, осындай құбылыстарды болдырмау мақсатында, нағыз тығыздығы төмен династы, яғни бүкіл кварц қалған екі модификацияға өткен династы қолдануға ұмтылады. Сонымен қатар, династа кварцтың азаюымен оның қожға беріктілігі төмендейді. Сондықтан әрбір нақты жағдайда, пеш шегенінің қай жерінде динас отқа төзімдісі қолданылатынына қарай, нағыз тығыздылығы қандай кірпіш қажеттігін таңдай білу керек. Алюмосиликатты отқа төзімділерде нағыз тығыздық, олардағы Al_2O_3 мөлшерінің арту шамасына қарай жоғарылайды. Магнезиалды шпинелиді бұйымдарда, хромит мөлшерінің жоғарылауымен артады және т.с.с.

Кеуектілік. Кеуек отқа төзімділердің ажыратылмайтын бөлігі болып табылады. Олар басты қосылыстардың түйірлерінде, түйірлер арасында және байламдарда орналасқан және отқа төзімділер қызметінің әсерлілігіне теріс те, оң да әсер ете алады. Кеуктер бұйымның нөлден 90 % дейінгі жалпы көлемін қамти алады және көптеген нышандары бойынша сыныпталады.

Өтімділік нышаны бойынша кеуектер *ашық және жабық* болып жіктеледі. Өз кезегінде, ашық кеуектер *капиллярлық және капиллярлық емес* болып, ал капиллярлықтар *өтімділікті және өтімділіксіз* болып бөлінеді. Ірілігі 5 мкм жоғары өтімділікті кеуектер *каналдық кеуектерді* құрайды. Каналдық кеуектердің бөлінуі, көп жағдайларда металлургиялық қождардың 5 мкм кіші кеуектерге енбеуімен байланысты. Өтімділік тек қана кеуектер мөлшері мен құрылымына тәуелді емес, сонымен қатар флюидтер (сұйықтық) қасиеттеріне де тәуелді. Сондықтан, кеуектерді өтімді және өтімсіз деп бөлу шартты жағдай.

Түзілуі бойынша кеуектерді *бастапқы*, немесе “технологиялық”, яғни бұйымды өндіру кезінде түзілген, және *қайталама* (капиллярлық және диффузиялық), отқа төзімдінің қызметі кезінде түзілген, деп жіктейді.

Жалпы кеуектілікті бірліктер үлестерінде келесі теңдеумен анықтайды:

$$K_{\text{жал.}} = 1 - \rho_{\text{көр.}} / \rho, \quad (5.3)$$

мұндағы $\rho_{\text{көр.}}$ – көріністі тығыздық;

ρ – нағыз тығыздық;

$\rho_{\text{көр.}}/\rho$ – салыстырмалы тығыздық.

Жабық кеуектілікті келесі айырмамен есептейді:

$$K_{\text{жаб.}} = K_{\text{жал.}} - K_{\text{ашық}}, \quad (5.4)$$

мұндағы $K_{\text{ашық}}$ – ашық немесе көрініс кеуектілік, ол бірліктің үлесінде, үлгіні сумен қанықтыру бойынша анықталады:

$$K_{\text{ашық}} = G_2 - G_1 / \rho_{\text{с.}} V, \quad (5.5)$$

мұндағы G_1 – абсолютті құрғақ үлгінің массасы, г;

G_2 – сол үлгінің сумен қаныққан массасы, г;

V – үлгі көлемі, см³;

$\rho_{\text{с.}}$ – судың тығыздығы, г/см³.

Жұтылған су массасының үлгі массасына қатынасы *су сіңіру* деп аталады:

$$C = G_2 - G_1 / G_1 \times 100, \%. \quad (5.6)$$

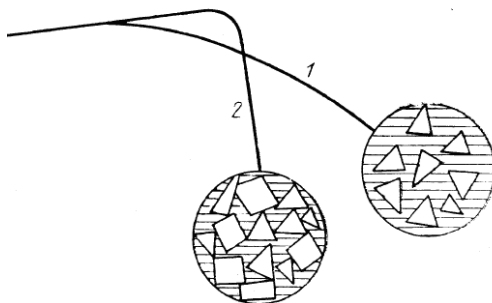
Ашық кеуектілік пен су сіңіру белгілі болса, көріністі тығыздықты анықтауға болады:

$$\rho_{\text{көр.}} = K_{\text{ашық}} / C, \quad (5.7)$$

мұндағы C – бірліктің үлесінде келтірілген, сусіңіру.

Отқа төзімділердің қасиеттері олардағы үздіксіз фазаның не болып табылатынына (қатты зат немесе кеуектер) өте байланысты болады. Фазаның үздікті немесе үздіксіздігі оның мөлшеріне тәуелді емес, ол отқа төзімдінің дайындалу технологиясымен анықталады. Мысалы, газ жалынды әдіспен алынған ультра кеуекті отқа төзімділерде, тіпті кеуектілік 80 % болғанда да үздіксіз болып қатты фаза табылады. Қандай фазаның үздіксіз болуына отқа төзімділердің өткізгіштік қасиеттері де тәуелді: жылу өткізгіштігі, электр өткізгіштігі, ультрадыбыс жылдамдығы, өтімділігі.

Отқа төзімділердің механикалық қасиеттері, оның ішінде жоғары температура кезінде салмаққа деформациялану және температураның шұғыл өзгеруіне бұзылмай беріктік көрсету қабілеті сияқты маңызды қасиеттері, күйдіру процесі кезінде отқа төзімді де қалыптасатын кристалдық қауышпа түрі ретіндегі отқа төзімді құрылымының сипаттамасына тәуелді болады. Осы нышаны бойынша құрылымның екі типін айырады: аралды, бұл кезде басты қосылыс кристалдары шыны түрдегі байламмен қоршалған (шамот, магнезиалды) және қаңқалы, бұл кезде кристалдар шыны түрдегі фазалардың аз мөлшерімен толтырылған аралықтармен біріккен қауышпа түзейді (динас, хромит) (49-сурет).



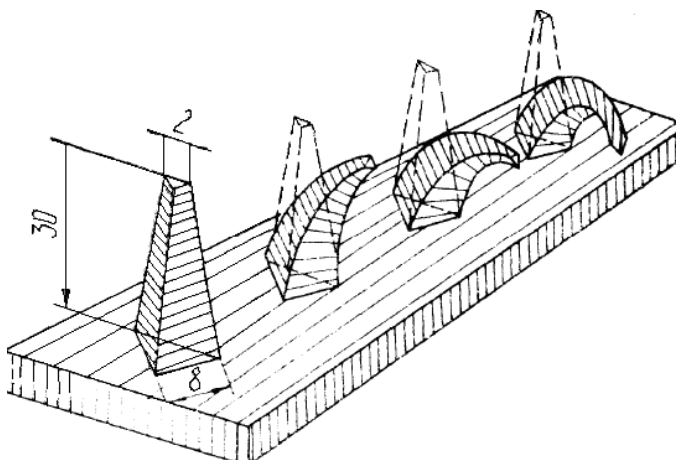
49-сурет. Отқа төзімділердің макроқұрылымының сипаты:

1 – аралды; 2 – қаңқалы

5.3. Отқа төзімділердің жұмысшы қасиеттері

Отқа төзімділік. Күш түспеген жағдайда, жоғары температураларда материалдың механикалық беріктігін сақтау қасиеті отқа төзімділік деп аталады. Отқа төзімділік – берілген температуралық жағдайларда оларды қолдану мүмкіндігін анықтайтын негізгі қасиеттердің бірі және химиялық құрамы мен қоспалардың болуына тәуелді.

Отқа төзімділік стандартты әдіспен анықталады, ол үшін сыналатын материалдан үш бүйірлі биіктігі 30 мм үшбүйірлі пирамида қиылып алынады, бүйірлерінің ұзындығы: үлкен жағы – 8 мм, кіші жағы – 2 мм. Сыналатын пироскоп эталондық пироскоптармен бірге пешке орнықтырылады және пештің температурасы 1300 К дейін көтерілгенше 25 К/сағ., 1800 К дейін – 10 К/сағ. және одан жоғары температураларда 5 К/сағ. жылдамдықпен қыздырылады (50-сурет).



50-сурет. Отқа төзімділікті анықтау:

1-3 – стандартты үлгілер; 4- тәжірибелік үлгі

Өз болмысымен химиялық қосылыстар қоспасын көрсететін отқа төзімділерде балқудың белгіленген температурасы жоқ, тек температуралық интервалы бар. Сондықтан, қыздыру кезінде отқа төзімділерде сұйық фаза пайда болады, оның мөлшері

температураның жоғарылауымен арта түседі және пироскоптар өз массасының ықпалынан деформациялана бастайды.

Сыналатын пироскоптың төбесі иіліп оны орнықтырған табандыққа тиген кездегі температура оның отқа төзімділігін сипаттайды. Бұл температураның шамасы, сыналатын пироскоппен бірге бір уақытта төбесі орнықтырған табандыққа тиген эталондық пироскоптың отқа төзімділігі бойынша анықталады. Отқа төзімділік келесідей белгіленеді, мысалы ПК 172 десе, яғни отқа төзімділігі 1720 К сәйкес (ПК- пироскоп конустық).

Отқа төзімділігіне қарай отқа төзімділер үш топқа жіктеледі: *орташа отқа төзімділікті* – отқа төзімділігі 1850 К-нен 2000 К дейін (кремнеземді, алюмосиликатты, көміртекті және т.б.); *жоғары отқа төзімділікті* – отқа төзімділігі 2000 К-нен 2300 К дейін (магнезиалды, магнезиалды шпинелиді, цирконийлі және т.б.); *ең жоғары отқа төзімділікті* – 2300 К жоғары (карбид кремнийлі, оттегісіз және т.б.).

Газ өтімділік. Газ өтімділік деп кеуекті денелердің оларға қысым құламасының әсері болған кезде газ өткізу қасиетін атайды. Отқа төзімділердің газ өтімділігі газ өткізгіштік коэффициентімен сипатталады, ол Пуазейль теңдеуі көмегімен, үлгіден шығар жердегі қысымның атмосфералыққа жақын кезінде, экспериментті анықталады:

$$K = \mu Qh / S \Delta p, \quad (5.8)$$

мұндағы μ – ауа тұтқырлығының динамикалық коэффициенті, Па·с;

Q – 293 К кезінде үлгі арқылы өтетін ауа шығыны, см³/с;

h – үлгінің биіктігі, м;

S – үлгінің қима ауданы, см²;

Δp – үлгідегі қысым құламасы, Па.

СИ жүйесінде газ өткізгіштік коэффициентінің өлшем бірлігі м² белгіленеді. Ол, ауданы 1 м² және биіктігі 1 м үлгі арқылы, қысым құламасы 1 Па болғанда, тұтқырлығы 1 Па·с бір кубометр газ өткен кезде алынған газдың өтімділігіне сәйкес. Газ өтімділік бұйым құрылымына барынша сезімтал. Мысалы,

ашық кеуектіліктің екі есеге өзгеруінен газ өтімділік 100 есеге өзгереді.

Отқа төзімділердің газ өткізгіштік коэффициенттерінің шамасы келесі шектерде жатады, мкм²: шамот (0,2-1,0), динас (0,1-1,2), периклазды (0,6-1,2), хромитті периклазды (0,8-2,5).

Процесс жүру кезінде жеке отқа төзімділердің газ өткізгіштігі қосымша кеуектердің және жарықшақтардың пайда болуымен артады, ал отқа төзімді қалаудың газ өткізгіштігі, қалау арасының тығыз емес жерлеріне және отқа төзімділердің кеуектеріне технологиялық шаңның толуымен төмендейді.

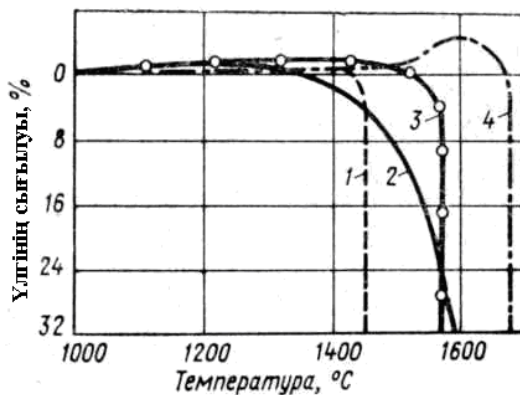
Күштен деформациялану. Пеш шегеніндегі отқа төзімді бұйымдар қыздырумен қатар әртүрлі механикалық күштердің әсеріне түседі және осы кезде отқа төзімді өзінің беріктік қасиетін төмендетеді, ал белгілі бір температурадан бастап бұл өзгерістер апатты болады. Отқа төзімділердің жоғары температурадағы беріктігі олардың химия-минералогиялық құрамына, кеуектілігіне, әсіресе шыны түрдегі фазалардың болуына тәуелді.

Қолдану орынына қарай қысым 0,1-ден 0,3 МПа дейін ауытқиды. Осыған байланысты отқа төзімдінің деформациясын зерттеу қыздыру және қысым 0,2 МПа кезінде қарастырылады. Екі температураны сипатты деп есептейді: $T_{ж-б}$ – жұмсарудың басталу температурасы, ол үлгінің 4 %-дық сығылуына сәйкес; $T_{ж-с}$ – жұмсару соңының температурасы, ол үлгінің 40 %-дық сығылуына сәйкес. Күшпен деформациялануға отқа төзімді материалдар табиғаты мен сұйық фазалар әсер етеді. Күшпен деформациялану отқа төзімді бұйым қызметінің жоғарғы температуралық шегін анықтайтын, ең маңызды көрсеткіші және көбінесе *құрылыстық тұрақтылығы* деп аталады.

Күштен деформацияланудың басталу температурасын, биіктігі 10 м қабырғаның төменгі бөлігіндегі отқа төзімділердің өз массасынан алатын орташа қысымына сәйкес, 0,2 МПа остік сығу күші астында болатын, сыналатын отқа төзімдінің ($d \times h = 36 \times 50$ мм) цилиндр үлгісін берілген режимде пеште қыздыра отырып анықтайды. Қыздыру процесінде жұмсарудың басталу (ЖБ) температурасын және үлгіні 4 % және 40 % қысуды белгілейді. Күштен деформацияланудың басталу температурасы

жұмсартудың басталу температурасы деп есептеледі.

Сынау нәтижелерін стандартты әдістеме бойынша өңдейді және графиктер түрінде көрсетеді (51-сурет).



51-сурет. Отқа төзімділерді жоғары температурада, 0,2 МПа күштен деформациялануын сынау графигі:

1-хромит; 2-шамот; 3-периклазды; 4- динас

Пештің қалауында отқа төзімділер негізінен сығу күшінің әсеріне сыналады, бұл әсер пеш қызған кезде артады. Отқа төзімділердің механикалық беріктігін бағалау үшін, тұрақты күш кезіндегі деформациялану шамасы өзгерісінің температураға тәуелділігі анықталады.

Суретте кескінделген графиктерді талдауда, олардың арасынан үш сипатты қисықты бөліп аламыз:

1) кристалдық қауышпасы қаңқалы құрылымды отқа төзімдінің деформациялану қисығы (динас);

2) байланыстырғышы, салыстырмалы төменгі температурада балқитын және басты заттың кристалдары байланыстырғыш балқымасында нашар еритін, кристалдық зат болып табылатын, кристалдық қауышпасы аралды құрылымды отқа төзімдінің деформациялану қисығы (периклазды);

3) кристалдық қауышпасы аралды құрылымды және байланыстырғышының үлкен бөлігі (жартысындай) шыны

түрдегі фазадан тұратын отқа төзімдінің деформациялану қисығы (шамотты бұйымдар).

Кәдімгі динас 10-15 % дейін шыныдан және 90-85 % кристалдық заттардан (тридимиттан, кристобалиттан, кварцтан) тұрады. Династа тридимит сұйық фазада аз мөлшерде еритін кристалдық қаңқаны түзейді, соның салдарынан сұйық фазаның жоғары температура кезінде династың деформациясына зиянды ықпалы төмендейді. Сондықтан, динас тек қана 1923 – 1943 К кезінде деформацияланады, яғни тридимиттік кристалдық қаңқа балқи бастағанда.

Графиктен байқағандай 1800-1900 К температура интервалында динас үлгісінің біршама кеңеюі жүреді. Бұл осы температураларда династағы қалдық кварц басқа кристалдық модификацияға-тридимитке, содан соң кристобалитке өтуімен байланысты. Бұл кезде, жоғарыда айтылғандай, династың тығыздығы төмендейді, яғни тұрақты масса кезінде оның көлемі артады. Кәдімгі периклазды (магнезитті) бұйымдарда периклаз кристалдары тұтас кристалдық қауышпа түземейді, олар отқа төзімсіз монтичелитті біріктірмемен цементтелген (аралды кристалдық құрылым); бұл біріктірменің балқуы 1720 – 1820 К кезінде жүреді. Периклаз кристалдары біріктірме балқымасында аз шамада ериді, сондықтан біріктірменің отқа төзімділігі температураның жоғарылауымен өспейді, ал тұтқырлық өте төмендеп кетеді, бұл отқа төзімдінің беріктік қасиетінің шұғыл төмендеуіне әкеледі. Периклазды бұйымның отқа төзімділігі мен күштен деформациялану температурасы арасындағы айырмашылық осымен түсіндіріледі, сондықтан олардың деформациялану интервалдары да үлкен емес.

Шамот бұйымдарда температураның жоғарылауы кезінде, ондағы кремнезем мен глиноземнің еруі салдарынан, сұйық фаза мен оның тұтқырлығының мөлшері үздіксіз өседі. Сондықтан, бұл отқа төзімділердің жоғары температурада күштен деформациялануы созылмалы иілгіштік сипатта болады, үлгі сынау кезінде бұзылмайды, тек қана бөшке пішініне кіреді. Деформацияның температуралық интервалы 150 – 250 К.

Механикалық беріктілік. Отқа төзімділер қалыпты температурада мортты бұзылыспен сипатталады, ол аздаған

серпімді деформациядан соң және шамасы бойынша аз илемді деформациядан соң басталады. Отқа төзімділердің механикалық беріктілігі сығу кезіндегі беріктіктің шегімен сипатталады, ол кәдімгі бұйымдар үшін 20-50 МПа шегінде, ал тығыз бұйымдар үшін – 50-100 МПа шегінде болады. Отқа төзімділердің беріктілігі олардың кеуектілігіне тәуелді: қалыпты температурада майда түйірлі және майда кеуекті бұйымдардың беріктілігі ірі түйірлілермен салыстырғанда жоғары. Металлургиялық агрегаттарда қолданылатын отқа төзімді бұйымдар үшін, үйкеліске механикалық берік болу да үлкен маңызға ие.

Шикіқұрамның (домналық пеште, күйдіру пешінде) немесе шандалған газдардың тікелей әсері кезіндегі үйкелудің нәтижесінде отқа төзімді бұйымдар мен шегендердің кирауы механикалық тозу деп аталады. Бұйымның тозуға тұрақтылығы оның түйірлік құрамына, құрылымына, кеуектілігіне және дайындау кезінде пайдаланылған байланыстырғышқа тәуелді болады. Қалыптау кезіндегі жоғарғы қысым, жоғары температурада күйдіру, бұйымның жақсы жентектелуі олардың тозуға тұрақтылығының артуын қамтамасыздандырады. Шегеннің үйкелуге тұрақтылығының ерекше маңызы күйдіруге арналған айналмалы пештерде, домна пеші типті қабатты пештерде, вагранкаларда және т.б. жұмыс істеуде байқалады.

Термиялық тұрақтылық. Отқа төзімділердің қыздыру немесе суыту кезінде температуралардың шұғыл өзгеруіне бұзылмай, қарсы тұру қабілеттілігін *термиялық тұрақтылық* деп атайды. Бұл қасиет әсіресе кезеңді әрекетте жұмыс істейтін пештер үшін өте маңызды. Отқа төзімділердің термиялық тұрақтылығы жоғары болады, егер материалдың жылуөткізгіштік коэффициенті, оның кеуектілігі және түйірлерінің мөлшері үлкен болса және сызықтық кеңеюдің температуралық коэффициенті, тығыздығы, бұйымның мөлшерлері мен аллотропиялық өзгеру кезіндегі көлемнің өзгерісі кіші болса.

Қалау кезінде пайда болатын кернеудің шамасы термиялық тұрақтылықтың мәніне тәуелді, әсіресе пештегі температураның күрт өзгеруі кезінде; осыған байланысты қалаудың температуралық жіктерін отқа төзімді бұйымның сызықтық кеңеюін ескере отырып жасайды. Мысалы, 800 °С кезінде шамоттың сызықтық

кеңеюі $4,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ $X_{800} = 100 \% = 0,36 \%$ тең, яғни 1 м шамот калауы осы температурада 3,6 мм ұзару береді.

Термиялық тұрақтылық сынау кезінде отқа төзімді ұстай алатын жылы ауысымы санымен анықталады (массаның 20 % жоғалымына дейін). Термиялық тұрақтылықты анықтау үшін кірпіш түріндегі үлгілер алынады. Үлгі $850 \text{ } ^\circ\text{C}$ температурада 40 мин қыздырылады, содан соң 8-15 мин суытылады. Қыздыру және суыту циклі *жылу ауысым* деп аталады.

Жылу ауысымы сулы және ауалы болып бөлінеді. Бір сулы жылу ауысым ретінде бұйымды біржақты $1300 \text{ } ^\circ\text{C}$ температураға дейін қыздырып, содан соң бөлме температурасында ағынды суда суыту кезеңін қабылдайды. Ауалы жылу ауысым кезінде қыздырылған үлгіні суыту ауада өтеді. Температураның күрт өзгеруі кезіндегі отқа төзімдінің бұзылуы термиялық кернеулерден туады, ол маңызды температура градиенті кезінде және сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентінің анизотропиясынан, химиялық реакциялардан (химиялық кернеу) пайда болады. Бұйымның термотұрақтылығы сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентіне және отқа төзімді материалдың серпімділік модуліне тәуелді. Әртүрлі материал-дардан бұйым жасау кезінде жоғары термотұрақтылықты материал алудың қажетті шарты келесі шарттардың орындалуы болып табылады:

$$E_1 \alpha_1 \approx E_2 \alpha_2 \quad (5.9)$$

мұндағы E_1 және E_2 — 1 және 2 компоненттердің серпімділік модулі;

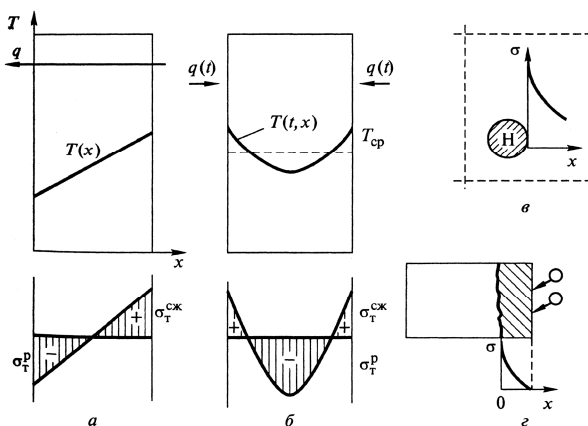
α_1 және α_2 — олардың сызықтық кеңеюінің термиялық коэффициенті.

Термиялық тұрақтылыққа отқа төзімді бұйымдардың механикалық және жылу физикалық қасиеттері — беріктілік, сырғымалылық, жылу және температура өткізгіштік, сызықтық ұлғаюдың термиялық коэффициенті; отқа төзімдінің макроқұрылымы — кеуектілік, құрылымдық біртектілік дәрежесі, кристалдық түйірлер мөлшері, байланыстырғыштың сипаты мен қасиеті; қызметтің жылу физикалық жағдайлары — отқа төзімдінің локальдық (жергілікті) температурасы және оның уақыт бойында жылдамдығының өзгеруі, жылудың қоршаған ортамен алмасу сипаттамасы; отқа төзімді бұйымдардың пішіні

мен мөлшері әсер етеді.

Термиялық тұрақтылық материалдың қасиеті емес, оның басқа қасиеттерімен және отқа төзімдінің жылулық жұмысы режимінің қосындысымен анықталады.

Отқа төзімділердің термиялық бұзылуы кернеудің екі түрінің әсерінен жүреді: бірінші текті немесе термиялық кернеу, отқа төзімді де температуралар градиентімен пайда болады және екінші текті, құрылымдық біртексіздікпен (органикалық немесе қызметтен пайда болған) келетін кернеу (52-сурет). Бұл кернеулер тұрақты температура кезінде пайда болады.



52-сурет. Термиялық кернеудің пайда болуына мысалдар:

- а – қабырғаның қалыптасқан жылулық режимі кезінде;
 б – қабырғаның қалыптаспаған жылулық режимі кезінде; в – отқа төзімдінің жергілікті құрылымдық біртексіздігі кезінде ($T = const$);
 г – балқыма әсерінен отқа төзімді қабаттың қайта пайда болуы кезінде*

Екі жағдайда да кернеу, материалда немесе оның бір бөлігінде өзінің көлемін еркін өзгерту мүмкіндігі болмағанда ғана пайда болады. Термиялық тұрақтылықтың көптеген құбылыстарын әлі де түсіндіру мүмкін емес. Мысалы, теңдей жағдайларда сығылған бұйымдардың термиялық тұрақтылығы, олардың еркін күйдегі термиялық тұрақтылығына қарағанда жоғары екені белгілі.

Жеке алынған үлгілердің термиялық тұрақтылықтары мен жалпы құрылыстың термиялық тұрақтылығы бірдей дүние емес, сондықтан бұйымның термиялық тұрақтылығы мен жалпы құрылыстың термиялық тұрақтылығы арасындағы өзара байланыс орныкпайынша отқа төзімділерді таңдау және пештерді құру кезінде негізінен эксперименттік және практикалық мәліметтерді қолдануға тура келеді. Жоғары термиялық тұрақтылық, оптималдық кеуектілігі 10-18 %, кристалдық байламда біртекті ірі кристалдық макроқұрылымды (шыны түрдегі фазасы минимум) қарапайым пішінді, кіші мөлшердегі отқа төзімділерде болатыны тәжірибеден белгілі.

Химиялық тұрақтылық. Химиялық тұрақтылық, отқа төзімділердің жоғары температура кезінде металлургиялық процестің әртүрлі компоненттерінің (қождардың, металдардың, газдардың және т.б.) әсеріне бұзылмай, қарсы тұру қабілеттілігін сипаттайды. Отқа төзімдінің химиялық тұрақтылығы, нақты компонентке қатысы бойынша, негізінен отқа төзімді мен компоненттің химиялық қауышпалылық дәрежесіне тәуелді. Балқыту пештерінде отқа төзімділерге ең үлкен әсер етуші – қождар. Қож әрекетіне қатысты отқа төзімділер үш топқа бөлінеді – қышқылды, негізді және бейтарапты, ол туралы отқа төзімділердің сыныптамасында айтылды.

Химиялық тұрақтылық, жалпы орта деп атауға болатын, газдардың, қождардың, металдардың, шикіқұрам шаңының және басқа заттардың химиялық ықпалына отқа төзімділердің бұзылмау қабілеттілігін сипаттайды. Отқа төзімдінің ортамен өзара әрекеттесу процесінде оның механикалық үйкелуі және олардың химиялық өзара әрекеттесуі өтеді, нәтижесінде шегеннің қалыңдығы азаяды, қождың немесе қактың жабысуы жүреді. Қож бен отқа төзімдінің шекарасында шегенге енетін балқыма түзіледі және ол метаморфиялық қабат түзейді. Соңғы, отқа төзімді беттігінің аққанда отқа төзімдінің негізінің ірі бөлшектерін жуып кетеді.

Сонымен, отқа төзімділердің химиялық тұрақтылығына отқа төзімдінің құрамы, оған әсер ететін орта, нағыз кеуектілігі K_n , процестің температурасы, қождың тұтқырлығы және отқа төзімдінің сулану қасиеті әсер етеді. Отқа төзімдінің химиялық

құрамы қаншалықты ортаның химиялық құрамына жақын болса, соншалықты олардың өзара әрекеттесуі төмен. Ең белсенді әсер етуші орта – ол қождар, сондықтан отқа төзімділердің қасиетін анықтау кезінде, жалпы ұғым химиялық тұрақтылықты қожтұрақтылық атауына алмастырып атайды.

Қожтұрақтылық – отқа төзімдінің жоғары температуралар кезінде балқыманың физика-химиялық және механикалық бұзушы ықпалына төтеп беру қабілеттілігі. Қозғалыссыз балқымада отқа төзімдінің еру процесі қауышпа беттігінде жеңіл балқитын қосылыстардың молекулярлық диффузиясымен лимиттеледі.

Қожтұрақтылық отқа төзімдінің қожбен өтетін химиялық реакциясының жылдамдығына және қождың тұтқырлығына тәуелді. Қож тұтқырлы және реакция жылдамдығы төмен болғанда отқа төзімді бұйым жақсы жұмыс істейді. Температураның артуымен химиялық реакциясының жылдамдығы жоғарылайды, ал қождың тұтқырлығы төмендейді, сондықтан температураның тіпті аз мөлшерге жоғарылауы (25-30 °C-ға) отқа төзімділер коррозиясының артуына келтіреді. Ашық кеуекті бұйымдардың тығыз бұйымдарға қарағанда қожға тұрақтылығы төмен. Кірпіш қабығының сыртқы тегіс беттігі, сынықтардың кедер-бұдырлы беттігімен салыстырғанда қож әрекетіне жақсы кедергі келтіреді. Бұйымның жарықшақтығы қожтұрақтылықты төмендетеді.

Қожтұрақтылықты анықтау үшін екі әдіс қолданылады – статикалық және динамикалық. Статикалық әдіс кезінде отқа төзімді бұйымдарда цилиндрлік саңылау тесіледі және оған майда ұнтақталған қож салынады. Бұйым пеште жұмыс температурасына дейін қыздырылады (бірақ 1450 °C төмен емес) және осы температурада 3-4 сағат ұсталады. Қожтұрақтылықты бұйымның қожда еру дәрежесі мен қождың бұйымға ену тереңдігі бойынша анықтайды. Динамикалық әдіс кезінде, пешке тік орналастырылған, сыналатын отқа төзімді кірпішке, 1450 °C температурада 1 сағат ішінде ұнтақ тәрізді қожды сеппелейді (1 кг). Балқып және кірпіш бетімен аға отырып, қож оның бетінде сызатты түрде ойып мүжиді. Қождан мүжілу дәрежесі кірпіштің көлемінің жоғалымымен анықталады

(куб сантиметрмен), бұл кезде кірпіштің қосымша шөгуі ескеріледі.

Нернст моделіне сәйкес, А.Эйнштейн теңдеуін есепке алумен, диффузия коэффициенті үшін тұтқыр балқымада қауышпаның еру жылдамдығы тең болады, кг/с:

$$dM/dt = RTS(C_n - C_t)/6N\mu_s r_{\text{ион}} \delta_{\text{диф}} \quad (5.10)$$

мұндағы N – Авогадро саны, моль⁻¹;

S – отқа төзімдінің балқымамен суланған беттігі, м²;

μ_s – тұтқырлықтың динамикалық коэффициенті, Па с;

$r_{\text{ион}}$ – диффузияланушы иондар радиусы, м;

$\delta_{\text{диф}}$ – диффузиялық шекаралық қабат қалыңдығы;

C_n және C_t – отқа төзімдінің балқымамен қанығу концентрациясы және ағымдағы концентрация, кг/м³.

Қожтұрақтылыққа ең күшті әсер етуші – температура. Оның жоғарылауымен балқыманың тұтқырлығы төмендейді және ол балқымамен суланған беттікті ұлғайта отырып, отқа төзімдінің кеуектеріне терең енеді. Сонымен бір уақытта қанығудың концентрациясы жоғарылайды және $r_{\text{ион}}$ азаяды, өйткені температураның жоғарылауы кезінде комплексті иондар бөлшектенеді; түбінде, температураның жоғарылауымен диффузиялық шекаралық қабаттың қалыңдығы төмендейді.

5.4. Отқа төзімділердің физикалық қасиеттері

Жылуөткізгіштік. Отқа төзімдіні қолдану мақсатына тәуелді, оның жылуөткізгіштік қасиеті жоғары немесе төмен болуы керек. Мысалы, пешті шегендеуге арналған материалдар, қоршаған ортаға жылудың жоғалымын төмендету және пештің п.э.к. жоғарылату үшін төменгі жылуөткізгіштікті болғаны жөн. Температураның артуымен көптеген отқа төзімдінің жылуөткізгіштігі артады.

Тиімді жылуөткізгіштік коэффициентінің мәні отқа төзімдінің көлемі бойынша орташаланған жылу ағыны мен температуралар градиенті арасындағы пропорционалдық коэффициентінің мәніндей. Отқа төзімдінің жылуөткізгіштігі *үш процестен* құралады:

1) жылудың кристалдық және аморфты (конденсацияланған) фазалар арқылы тасымалдануы;

2) жылудың кеуектер және жарықшақтар (газдар) арқылы тасымалдануы;

3) фазалар шекарасындағы жылу беріліс.

Отқа төзімділердің жалпы немесе тиімді жылуөткізгіштігі осы процестердің қосындысына тең.

Жылуөткізгіштік отқа төзімдінің химия-минералогиялық құрамына және бұйымның кеуектілігіне тәуелді. Отқа төзімділердің жылуөткізгіштігінің температураға тәуелділігі (кеуектілікті ескермегенде) келесі эмпирикалық теңдеумен көрсетіле алады:

$$\lambda_T = \lambda_0 \cdot (1 \pm bT), \quad (5.11)$$

мұндағы λ_T – температура кезіндегі отқа төзімдінің жылуөткізгіштігі, Вт/(м·К);

λ_0 – 0 °С кезіндегі жылуөткізгіштік, Вт/(м·К);

T – отқа төзімді температурасы, °С;

b – отқа төзімді түріне тәуелді, эмпирикалық коэффициент.

«+» және «-» белгілері, оның химия-минералогиялық құрамына қарай отқа төзімдінің жылу өткізгіштігінің жоғарылауын немесе төмендеуін көрсетеді. Отқа төзімділердің жылуөткізгіштігі олардың температураның күрт өзгеруіне шыдау қабілеттілігіне, жылуды өткізу немесе керісінше оқшаулау қабілетіне, т.б. әсер етеді. Сонымен, жылуөткізгіштік коэффициенті агрегаттың пайдалы әсер коэффициентінің шамасына үлкен ықпал жасай алады. Ұзақ уақыт қызмет көрсету процесінде, температура тұрақты болған жағдайда, отқа төзімділердің жылуөткізгіштігі 10-15 % жоғарылайды, ал ауыспалы температуралар жағдайларында – төмендейді.

Кеңеюдің термиялық коэффициенті (к.т.к.). Сызықты кеңеюдің термиялық коэффициенті – бір градусқа қыздыру кезіндегі дененің сызықты мөлшерінің ұлғаюы. Кеңеюдің термиялық коэффициенті қыздыру кезіндегі бұйымның сызықтық кеңеюіне әсер етеді. Пештің қызуының ұйғарынды жылдамдығын анықтауда, қалауды бұзбастан отқа төзімдінің кеңею мүмкіндігін қамтамасыз ететін температуралық жіктердің, саңылаулардың қажетті мөлшері мен санын есептеуде

термиялық кеңеюді білу керек.

Температураның жоғарылауымен, ең бастысы атомдардың (иондардың) олардың орташа жағдайымен салыстырмалы ауытқуының өсуінің есебінен, кристалдар мен аморфты денелердің көлемі артады. Куб кристалдың 1 К-ге қыздырған кездегі сызықтық мөлшерінің жоғарылау шамасы сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентін құрайды α_t . Сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентінің α_t шамасы аз болғандықтан, көлемдік кеңею β келесідей шамаға тең болады:

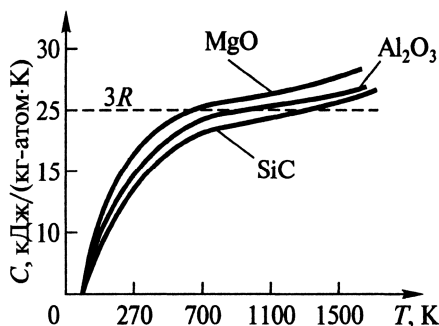
$$\beta = 3\alpha_t \quad (5.12)$$

Сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентінің (с.к.т.к.) α_t шамасы заттың кристалдық құрылымына, құрылымдық элементтер арасындағы күштерге тәуелді, ал бұйымның макро-және микроқұрылымдарына тәуелсіз болады. Жоғары симметриялы кристалдық торлары тығыз тоғаналы оксидтердің (MgO, CaO) с.к.т.к. жоғары шамаларға ие. Керісінше, төменгі симметриялы және тығыз емес тоғаналы оксидтер (SiO₂, Ta₂O₅) с.к.т.к. төменгі шамалы. Силикаттар қыздыру кезінде аз кеңеюмен сипатталады. Көптеген оксидтер мен кристалдық заттарда с.к.т.к. анизотропиясы болады. Температураның жоғарылауымен анизотропия қайта жаңарады (кристалдар симметриялық күйге келе бастайды). Ең анизотропты материалдар қабатты құрылымдылар, мысалы графит.

Термиялық кеңею серпімді және ол толығымен қайтымды. Отқа төзімді бұйымдардың сызықтық кеңеюінің нақты коэффициенті дилатометриялық өлшеу немесе рентген құрылымдық талдау жолдарымен анықталады. Практикалық маңыздысы, отқа төзімділердің қыздыру кезіндегі сызықтық кеңеюі және кеңеюдің температураға тәуелділік сипаттамасы. Шамотты, жоғары глиноземді және периклаздылар жартылай қышқылды мен династық бұйымдарға қарағанда кеңеюдің бірқалыптылығымен сипатталады.

Жылу сыйымдылық. Жылу сыйымдылық шегеннің қызу жылдамдығына әсер етеді, демек басқа да теңдей жағдайларда пештің жұмысшы режимге шығу жылдамдығын анықтайды.

Материалдың жылуsыйымдылығы заттың құрылымы мен оның агрегаттық күйіне тәуелді болады. Температураның жоғарылау шамасына қарай, Дебай температурасынан бастап (яғни, кристалдық тордағы атомдардың максималь мүмкіндікті жиілігі болған кездегі температура) жылуsыйымдылықтың температураға тәуелділігі азаяды. Дебай температурасы $(0,2-0,5) T_{\text{бал}}$ тең. Сонымен, отқа төзімділердің меншікті жылуsыйымдылығы жұмыс температурасы кезінде температураға тәуелді болмайды (53-сурет).



53-сурет. Кейбір отқа төзімді материалдардың атомдық жылуsыйымдылығының температураға тәуелділігі:
 R — амбебап газ тұрақтысы

Отқа төзімділердің жылуsыйымдылығының маңызды ерекшелігі, бұл оның материалдың макроқұрылымына (кеуектілігіне, көріністі тығыздығына, кеуектердің мөлшерлері мен пішіндері бойынша бөлінуіне) тәуелсіздігі.

Электрөткізгіштік. Отқа төзімділердің электрөткізгіштігіне электрбалқытудың үлкен жүктемелі пештерінің пайда болуымен кең көңіл бөліне бастады. Осындай пештердің шегендерінде орнықтырылған отқа төзімділердің жоғары электр кедергісі, қысқа тұйықталу мүмкіншілігін және осыған байланысты пештегі үлкен апаттарды болдырмайды.

Отқа төзімділердің электрөткізгіштігі, гетерогендік денелердегідей, олардың фазаларының (жартылай өткізгіштікті, шыны түрдегі, кристалдық) және кеуектерінің электрөткіз-

гіштіктерінен құралады. Кеуектер тоқты өткізуді жоғарылатады да, төмендете де алады. Кеуектіліктің электр-өткізгіштікке ықпалы оның жылуөткізгіштікке ықпалына ұқсас. Оқшауланған және бірқалыпты таралған кеуектердің аз мөлшері кезінде электрөткізгіштік кеуектіліктің өсуіне пропорционалды дерлік төмендейді. Жоғары кеуектілік кезінде оның ықпалы айқын байқалады.

Электрөткізгіштікке күшті ықпал етушінің бірі – қоспалар. Қоспалар түйірлер шекарасында және олардың айналасында силикатты қабыршықтар түзейді. Көлемдерінің аз болғанына карамастан, олар үздіксіз фазаға айналады. Бұл жағдайда жалпы электрөткізгіштік әрбір фазаның салыстырмалы электр-өткізгіштігіне тәуелді болады.

Температура жоғарылаған кезде шыны түрдегі фазаның электрөткізгіштігі кристалдық диэлектриктердікіне карағанда тез өседі, нәтижесінде жалпы электрөткізгіштік жоғарылайды. Егер силикатты қабыршақ жартылай өткізгішті кристалдарды жабатын болса, онда жалпы электрөткізгіштік төмен болады, өйткені жоғары температура кезінде жартылай өткізгіштердің электрөткізгіштігі шыны түрдегі силикатты фазанікіне карағанда жоғары болады.

Тәжірибе жүзінде, отқа төзімділердің электрөткізгіштігі 1500 К жоғары температураларда, оларда сұйық фаза пайда болған кезде, мәнді бола бастайды. Отқа төзімдінің электр кедергісі мен оның температурасының арасындағы тәуелділік экспоненциалды сипатта болады:

$$\rho = AeB/T, \quad (5.13)$$

мұндағы $\rho = RS/e$ – меншікті электр кедергі, Ом·м;

A мен B – тұрақтылар;

T – температура, К;

R – отқа төзімдінің омдық кедергісі, Ом;

S – отқа төзімдінің көлденең қимасы, м².

5.5. Металлургияда қолданылатын отқа төзімді материалдардың қысқаша сипаттамасы

5.5.1. Кремнеземді отқа төзімділер

Бұл типтегі отқа төзімдінің ең кең тараған түрі – *динас*. Династы бұйымдардың отқа төзімді негізі – тридимит пен кристобалит пішініндегі кремнезем. Кремнеземді отқа төзімділердің (silicons refractories) – құрамында 80 % SiO_2 болады. Оларға жататындар ең кең тараған династы және кварцты отқа төзімділер, сонымен қатар кварц, шыны. Кварцты шыны – табиғи (кұм, тамырлы кварц, тау хрусталі және т.б.) немесе синтетикалық кремнеземнің суытылған балқымасы, құрамында > 99 % SiO_2 болады, инфрақызыл қыздыру шамдарын, терможұптардың қорғаушы қаптамаларын және т.б. дайындауда қолданылады. Кварцты шыныдан ұнтақтау, қалыптау және күйдіру (күйдірусіз де) жолымен термиялық тұрақтылықты отқа төзімді бұйымдар (кварцты керамика) дайындайды. Ол болатты құю кезіндегі батырылу стакандары мен қорғаушы құбырлар ретінде, зертханалық тәжірибеде және т.б. қолданылады.

Динас отқа төзімділердің құрамы > 93 % SiO_2 немесе 80-93 % SiO_2 (қосымшалар қосумен дайындау кезінде) тұрады және кварциттерден дайындалады. Кварцит ұнтағына әк сүті мен темірлі қоспалар қосады және престо берілген мөлшердегі бұйымды қалыптайды, 1430-1460 °C температурада күйдіреді. Динас отқа төзімділері кокстық, шыны пісіргіш пештерде, ауа қыздырғыштарда, түсті металлургияның бірқатар балқыту агрегаттарында шегендеу мақсатында қолданылады. Қалыптанбаған динас отқа төзімділер – мертелдер, сылауға арналған материалдар және т.б. майдаланған динас, отқа төзімділер, кварциттер сынықтарынан дайындайды және қабырға қалауына жөндеу жұмыстарын жүргізу кезінде қолданады.

Династың термомеханикалық қасиеттері. Династы бұйымдардың отқа төзімділігі олардың химиялық құрамына байланысты. SiO_2 мөлшерінің өсуімен династың отқа төзімділігі

жоғарылайды. SiO_2 мөлшері 95-98 % кезінде отқа төзімділік 1980-2010 К шегінде болады.

Салмақтан деформациялану. Қалыпты температуралардағы династың беріктілігі 20-30 МПа. Династың сипатты ерекшелігі – оның 1600-1700 К дейін қыздыру кезінде механикалық беріктілігінің көп өзгермеуі. Дегенмен, салыстырмалы төменгі температуралар кезінде, тридимиттің, кристобалиттің және кварцтың полиморфизмділігімен шартталған, беріктіліктің бірқатар төмендеуі жүреді.

Династы бұйымдар салмақтан деформациялануының басталу температурасының жоғарылығымен (1930 К) сипатталады және осы сипаты басқа көп отқа төзімділерге қарағандағы үлкен артықшылығы болып табылады. Династағы кристалдық қауышпалар сұйық фазада нашар ериді. Қыздыру кезіндегі балқыма мөлшерінің өсу жылдамдығының аздығынан және династа тридимит кристалдары қауышпаларының қаңқалық құрылымының болуынан династың бұзылу температурасы тридимиттің балку температурасынан (1940 К) аз шамаға ғана ерекшеленеді. Династа қайта туылған кварцтың болмауы деформацияның басталу температурасын төмендетеді. Династың шектік жұмысшы температурасы 1920-2000 К.

Сусымалылық. Динас барлық қатардағы отқа төзімділерден өзгеріссіз сусымалылықпен ерекшеленеді.

Көлемінің тұрақтылығы. Динас қыздыру кезінде әрқелкі кеңейеді. Оның 850-1000 К дейін қыздыру кезіндегі кеңеюі 2000 К дейінгі қыздыруға сәйкес кеңеюдің 80 % жоғары мөлшерін құрайды, және қайтымсыз полиморфты түрленумен байланысты болады. Кәдімгі династа 1700-1750 К дейін қыздыру кезіндегі қосынды кеңею 1-1,5 % аспауы керек.

Термиялық тұрақтылығы. Динас бұйымдардың стандартты әдістемемен анықталатын термиялық тұрақтылығы 1-2 су жылу ауысымынан аспайды. Бұл 450-540 К температуралар интервалында жүретін, α – кристобалиттің β – кристобалитқа өтуімен негізделеді және көлемнің секірмелі өзгерісімен қатар жүреді (кеңеюмен-қыздыру кезінде және сығылумен-суыту кезінде). Бұл құбылыс кристобалиттік эффект деп аталады.

Температураның басқа интервалдарда ауытқуы кезінде, мысалы, 550 К жоғары және әсіресе 900 К жоғары болғанда, династың термиялық тұрақтылығы аз кеңеюдің салдарынан өте жоғары болады. Династың термиялық тұрақтылығын, 4 % титанглиноземді қосымшаны енгізу жолымен, жоғарылатуға болады. Динас кордиериттік байламда жоғары термиялық тұрақтылықты.

Қожтұрақтылық. Динас қышқылды отқа төзімді болып табылады, сондықтан қышқыл балқымалар мен газдық ортаның ықпалына тұрақты. Темір, кальций және басқа металл оксидтері сияқты басты балқымалар, динас кремнеземімен өзара әрекеттесе отырып, династың өзіне қарағанда күрделі, төменгі отқа төзімді силикаттар түзейді. Сондықтан да, бұрын динас қолданылып жүрген мартендік пештер күмбезінде, ол балқып, оның ыстық беттігінде біртіндеп төмен қабырғаға ағатын немесе балқу кеңістігіне құлайтын балқыған қатпарлар (шорлар) пайда болды. Династың тығыздығының артуымен оның қожтұрақтылығы жоғарылайды. Қождың отқа төзімдіге енуі, балқыманың тұтқырлығының артуымен және кеуектер мөлшерінің төмендеуімен шұғыл бәсеңдейді.

Динас ультракышқыл отқа төзімді, оның қолданылу аймағы да осымен анықталады. Өте жақсы термомеханикалық қасиеттілігі болғандықтан, ол керме күмбездер үшін ең жақсы отқа төзімді болып табылады, 10-11 м дейінгі үлкен аралықтарды жабуға мүмкіндік береді.

5.5.2. Алумосиликатты отқа төзімділер

Алумосиликатты отқа төзімділер, негізі коалинит минералы ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) болатын, отқа төзімді сазды қолданумен дайындалады. Бұл саз кристаллизациялаушы ылғалдықты жоғалту нәтижесінде шөгеді. Күйдіру кезінде бұйымның мөлшері мен пішінін сақтау үшін арытқыш қосу қажет. Осы мақсатта жартылай қышқылды отқа төзімділерді дайындау кезінде құм қолданылады; шамотты отқа төзімділерде – шамот (күйдірілген отқа төзімді саз); муллитті отқа төзімділерде – глинезем Al_2O_3 . Диаграммадан көріп отырғандай, жартылай қышқылды және

шамотты отқа төзімділердің отқа төзімді негізі болып муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) және кристобалит – SiO_2 табылады.

Шамотты және жартылай қышқылды бұйымдар. Қазіргі уақытта құрамы 30 – 38 % Al_2O_3 бар шамотты отқа төзімділер ең көп шығарылатын бұйымдар. Бұл отқа төзімділер қышқыл және бейтарапты қождармен жартылай қышқылды (Al_2O_3 15 % көп емес) немесе жоғары глинеземді (Al_2O_3 45 % аз емес) отқа төзімділерге қарағанда тұтқырлығы төмен балқымалар түзейді, сондықтан көрсетілген қождардың агрессивті ықпалына қарсы тұру қабілеттігі төмен. Шамотты отқа төзімділердің үлкен мөлшерін өндіру олардың салыстырмалы арзандығымен әзірленген шикізаттық базасының болуымен түсіндіріледі. Шамот өндірісі үшін кез келген отқа төзімді саз бен каолин қолданбалы.

Шөгу процесін қысқарту мақсатында шамотты отқа төзімділер шикікұрамына шамот қосылады (шамот сынықтары, бөлшектер ірілігі микроннан 70 мм-ге дейін). Қайтарма қолданылатын шамот мөлшерімен және оның фракциялық құрамымен шөгу шамасын ғана емес, сонымен қатар басқа да қабілеттерін реттейді: беріктілігін, кеуектілігін, термиялық тұрақтылығын және т. б.

Шикікұрамдағы қайтарма шамот мөлшері бойынша бұйымдар келесідей сыныпталады: аз шамотты (20-30 %), шамотты (40-65 %), жоғары шамотты (>80 %).

Отқа төзімділігі. Шамотты және жартылай қышқылды бұйымдардың отқа төзімділігі 1950-2050 К шегінде орналасқан және қолданылатын шикізат пен алынған бұйым құрылымына тәуелді болады. Шамотты бұйымдар отқа төзімділігіне қарай 4 сыныпқа бөлінеді: О – 2020 К; А – 2000 К; Б – 1940 К; В – 1880 К. Жартылай қышқылды отқа төзімділер тұрақты отқа төзімділікті деуге болады – 1980 К.

Салмақтан деформациялану сипаттамасы. Бұл сипаттама жоғары температуралар кезінде материалдың құрамы мен құрылымына тәуелді. Шамоттың $T_{\text{жұм.баст.}}$ шамасына металдар оксидтерінің (Me_2O) болуы ең күшті ықпал ететін жағдай. Шамот аралды кристалдық құрылымды және оның құрамына 50 % дейін шыны түрдегі фазалар кіреді. Сондықтан, деформацияның басталу температурасы және деформацияның сипаты шыны түрдегі фазаның жұмсару температурасымен және осы фазаның

бұйымдағы мөлшерімен анықталады. Шамоттың 0,2 МПа салмақтан деформациялануының басталу температурасы 1520-1710 К интервалында ауытқиды. Демек, осы отқа төзімділер үшін шекті жұмысшы температура, бұйым сыныбына қарай, 1500 – 1700 К интервалында анықталған. Жартылай қышқылды отқа төзімділер үшін салмақтан деформацияланудың басталу температурасы шамотқа қарағанда жоғары болады.

Көлемінің тұрақтылығы. Шамот бұйымдарда көлем тұрақтылығы сақталмайды және қыздыру кезінде шөгеді, оның себебі шыны түрдегі фазаның көп мөлшерінің болуы. Жартылай қышқылды отқа төзімділер, шамотқа қарағанда, үлкен көлемнің тұрақтылығына ие.

Термиялық тұрақтылығы. Қайтарма шамот мөлшеріне тәуелді шамотты бұйымдар қанағаттанарлықтай және жақсы термиялық тұрақтылықта болады (12-ден 150-дейін су жылу ауысымы). Кристалдық қауышпалары майда түйірлі аралды құрылымға ие болатын алюмосиликаттық отқа төзімділердің айрықша ерекшелігі олардың жоғары термиялық тұрақтылығы болып табылады.

Қожтұрақтылығы. Шамотты отқа төзімділердің қожтұрақтылығы төмен. Олар, жартылай қышқылды отқа төзімділер сияқты, негізгі балқымалар процесінде қолданылмайды. Шамот бұйымдардың қышқыл және бейтарап балқымалармен өзара әрекеттесуі кезіндегі беріктілігін жоғарылату үшін бұйымның кеуектілігін төмендетуге ұмтылу қажет, және де тек ашық кеуектілікті емес, сонымен қатар жалпы кеуектілікті де.

Шамотты отқа төзімділер барлық металлургиялық пештерде, сәйкес температуралық аумақтарда қолданылады.

Пайдалану процесінде шамотты отқа төзімділердің агрессивті ортамен түйісу беттіктерінде, ортаның отқа төзімді материалдармен өзара әрекеттесуі өнімдерінен ауыспалы құрамды қабат түзеледі. Мұндай қабаттың астында басқа – тығыздалған, фарфор түрлі, қалыңдығы бірнеше миллиметр қабат орналасқан. Осы қорғаушы қабат бүтін болған кезде, шамот және жартылай қышқылды отқа төзімділер опырылмай бірқалыпты, балку, еру және аумалы құрамды қожды эрозия жолымен тозады.

5.5.3. Жоғары глинеземді отқа төзімділер

Отқа төзімділердің бұл тобына $\text{Al}_2\text{O}_3 > 45 \%$ құрамды алюмосиликатты отқа төзімділер және корунд жатады. Жоғары глинеземді отқа төзімділердің отқа төзімді негізі – муллит ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) және корунд (Al_2O_3).

Бұл бұйымдардың отқа төзімділігі, күй диаграммасы бойынша ликвидустың сәйкес температурасынан 50-80 К-ге төмен. Домуллитті бұйымдардың (45-60 % Al_2O_3) отқа төзімділігі 2120-2190 К, муллиттіктердікі-2150-2220 К және корундтікі 2170-2270 К.

Жоғары глинеземді отқа төзімділердің *салмақтан деформациялану сипаттамасы* олардың кристалдық қауышпаларының аралды құрылымымен анықталады. Бұл отқа төзімділердің деформациялануының басталу температурасы салыстырмалы үлкен емес: 1780-1870 К-нен (муллитті) 2000-2050 К дейін (корундты). Осыған сәйкес максималь жұмысшы температуралары: 1870-1920 К- муллитті және 1920-1970 К корундты отқа төзімділердікі. Отқа төзімділердегі Al_2O_3 мөлшерінің жоғарылау шамасына қарай, қалған барлық механикалық қасиеттері жақсарады.

Жоғары глинеземді отқа төзімділердің *көлемінің тұрақтылығы* жартылай қышқылды және шамоттыларға қарағанда жақсы, отқа төзімдідегі Al_2O_3 мөлшерінің артуымен жоғарылайды.

Қарастырылған топтағы отқа төзімділердің *термиялық тұрақтылығы* жоғары – сериялы шығарылатын кірпіштердікі 150 жылу ауысымнан артады.

Қожтұрақтылығы. Мәнділігі жағынан жоғары глинеземді отқа төзімділер бейтарапты отқа төзімділердің жалғыз тобы. Глинезем мөлшерінің жоғарылауы отқа төзімділердің бейтарапты балқымалар мен газдардың агрессивті ықпалына тұрақтылығының өсуіне әкеледі.

Жоғары глинеземді отқа төзімділердің *қолданылуы* әртүрлі. Олар жартылай қышқылды және шамотты бұйымдардың орнына жоғары температуралар деңгейіне қолданылады. Корундты отқа төзімді шойынды қайта қыздырудың каналды пештерінде, болатты вакуумдеудің пештен тысқары қондырғыларында

қолданылады. Балқытылған корундты бұйымдар қыздыру пештерінің оттықтарында қолданылады, олар ол жерде ауыр құймалардың қысымы мен соққыларына қарсы тұрып, жұмыс температурасы кезінде темір оксидтерімен өзара әрекеттеспейді. Ожауда болатты инертті газбен үрлеу үшін кеуекті корундты фурмалар қолданылады.

5.5.4. Магнезиалды негізді отқа төзімділер

Периклазды отқа төзімділер. Периклазды деп құрамында 85 % жоғары магний оксиді болатын отқа төзімділерді атайды. Периклазды материалдардың отқа төзімді негізі болып *периклаз* MgO табылады. Шикізат құрамындағы басты қоспалар (CaO , SiO_2 , Fe_2O_3) мотичеллитте, форстеритте және магнезиоферритте байланысқан, бұлардың бірінші екеуі қатты ерітінді түзейді және периклазға қатысты байланыстырғыш минерал болады. Соңғысы периклаз кристалдарының бүкіл массасына бүркілген және онымен жоғары температураларда негізгі қосылыстардың құрамы мен қасиетін өзгерте отырып, қатты ерітінді түзейді.

Құрамында байланыстырғыш ретінде форстерит болатын периклазды бұйымдар, соңғының 2160 К кезінде балқуының ықпалынан *салмақтан деформацияланудың* жоғары температураларына ие болады. Бірақ олар қиын күйе жентектеледі, сондықтан мұндай бұйымдарды 1850 К жоғары температурада күйдіреді. Монтчеллитті қосу кеуектілік пен салмақтан деформациялану температурасын жоғарылатады, бірақ сығылу кезіндегі беріктілік шегі мен күйдіру кезіндегі шөгуді төмендетеді.

Темірлі қоспалар бұйымның күйе жентектелуіне әсер етеді. Периклазды бұйымдардың салмақтан деформациялануының басталу температурасы мен термиялық тұрақтылығы Fe_2O_3 мөлшеріне көп тәуелді болмайды, егер 10 % аспайтын болса. Периклазды отқа төзімділерде магнезиоферриттің мөлшерінің жоғары болмағаны жөн, өйткені ол отқа төзімділікті төмендетеді. Периклазды отқа төзімділердің отқа төзімділігі 2500-2700 К.

Периклазды отқа төзімділердің салмақтан деформациялануының сипаттамасы алдыңғы параграфта жан-жақты қарастырылған. Тек еске түсіретін нәрсе, периклазды отқа

төзімділердің салмақтан жұмсаруының басталу температурасы отқа төзімділіктен едәуір төмен және 1800-2000 К. Механикалық салмақ түскен кезде периклазды бұйымдар аға бастайды. Бұл отқа төзімділер үшін максималь жұмысшы температуралардың интервалы 1950 – 2000 К.

Сериялы шығарылатын бұйымдардың *термиялық тұрақтылығы* жоғары емес және 1-2 сулы жылу ауысымын құрайды, бұл сызықтық кеңеюдің термиялық коэффициентінің (с.к.т.к.) және материал серпімділігі модулінің үлкен мәндерімен байланысты. Отқа төзімдінің силикаттық құрамаларының мөлшерінің азаюымен периклазды бұйымдардың термиялық тұрақтылығы біршама жоғарылайды.

Периклазды отқа төзімділердің негізгі балқымаларға қатысты *қожтұрақтылығы*: металдарға, қождарға (темір оксиді мен әкке бай) және басқаларға, өте жоғары. Бұл ең кеңінен қолданылатын негізгі отқа төзімділердің бірі.

Периклазды кірпіштер қара және түсті металлургия калауда, металдар мен негізгі қождар балқымаларымен түйісетін шегендерде қолданылады. Магнетитті ұнтақтар металлургиялық пештер оттығын құруда және торкреттеуде (бүрке шегендеуде) қолданылады.

5.5.5. Басқа да отқа төзімділердің қысқаша сипаттамалары

Магнезиалды әкті отқа төзімділер MgO-CaO жүйесінің негізгі отқа төзімділерінің, химиялық құрамы бойынша, үлкен және әртүрлі типтерін құрайды. Бұл типтегі отқа төзімділердің ең кең тараған тобы болып шайырлы байламдағы бұйымдар табылады: шайырлы доломитті отқа төзімділер. Бұл отқа төзімділердің отқа төзімді негізіне магний мен кальций оксидтерінен өзге көміртегі де кіреді. Бұл отқа төзімділер оттегілі-конвертерлі өндірісте қолданылатын жалғыз дара отқа төзімді деуге болады. Барлық магнезиалды отқа төзімділердегі сияқты, ең зиянды қоспа болып SiO₂ табылады, өйткені кремнезем жеңіл балқитын сұйық фазаны түзейді. Шайырлы доломитті отқа төзімділердегі SiO₂ мөлшері 2,1-3,5 %.

Көміртегінің мөлшері шайырлы байламның мөлшері мен түріне байланысты және 2,0-4,3 % шегінде болады.

Бұйымның беріктілігі сақтаудың бірінші тәуліктерінде 30-60 МПа құрайды, содан соң кальций оксидінің гидратталуы кезіндегі құрылымның қопсуы нәтижесінде ол шұғыл төмендейді. Сондықтан шайыр байламды бұйымдардың конвертерге орналастырғанға дейінгі сақталу мерзімі шектеулі (3 тәулікке дейін қалпақ астында).

Магнезиалды шпинелидті отқа төзімділер. Қарастырылып отырған отқа төзімділердің отқа төзімді негізі – периклазdan өзге хромошпинелидтер де. Магнезиалды шпинелидті бұйымдар, болат балқыту пештеріндегі күмбездер мен қалаулардың басқа да элементтеріндегі династы негізгі отқа төзімділермен алмастыруға байланысты кеңінен қолданыла бастады. Периклазды хромитті күмбездер династылармен салыстырғанда болат балқыту пештерінің жұмысшы кеңістігіндегі температураны жуық шамамен 100 К жоғарылатуға мүмкіндік береді, бұл болаттың легирленген маркаларын балқытуды жеңілдетеді. Одан өзге бұл күмбездер пештің қолданылу ұзақтығын жоғарылатады.

Пештердің жұмысшы кеңістігіндегі температураның ауытқуы салдарынан күмбез қалауында, жарықшақтың пайда болуына, содан соң бұйымның бөлшектерінің сынуына әкелетін, кернеу туады. Магнезиалды шпинелидті бұйымдар пештер күмбездерінде, динас сияқты балқудың салдарынан емес, көбінесе осындай сынықтардың нәтижесінде тозады.

Форстеридті отқа төзімділер. Форстеридті отқа төзімділердің құрамында, балқу температурасы $T_{\text{бал}}=2150$ К болатын минерал форстерит ($2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$) болады. Олар қаққа және негізгі балқымаларға қарсы тұрақтылықты, механикалық ықпалдарға, тозуға беріктілік танытады. Қыздырғыш пештер оттықтарында, мартендік пештердің регенераторларының саптамаларында және басқа да жерлерде қолданылады.

Хромитті отқа төзімділер. Хромитті отқа төзімділер негізін балқу температурасы $T_{\text{бал}}=2450$ К, минерал хромит $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$ құрайтын хромды кендер базасында өндіріледі. Хромитті отқа төзімділер бейтарапты қасиеттер байқатады және

бейтарапты, негізді және қышқылды балқымаларға қатынасы бойынша тұрақты. Олар жоғары термиялық тұрақтылықты және отқа төзімділікті, бірақ сұйық фаза 1000 К кезінде-ақ пайда болады. Сондықтан хромитті отқа төзімді жоғары температуралар кезінде илемділі күйде болады және пештердің суытылатын беттеріне сылама және тығыздағыш түрінде қолданылады, олардың ыстық жөндеулері кезінде пайдаланылады.

Көміртекті отқа төзімділер. Көміртекті отқа төзімділер арзан және қолжетерлік шикізаттардан (графит, кокс) дайындалады, балку температурасы $T_{\text{бал}} \geq 3800$ К. Олар балқымалармен суланбайды және сондықтан олардың әрқайсысына қарсы едәуір тұрақты, аз тығыздықты және жоғары термиялық тұрақтылықты, отқа төзімділікті, бірақ отынның жану өнімдерінде температураның $T \geq 900$ К кезінде-ақ тотыға бастайды. Сондықтан, көміртекті отқа төзімділер тотықсыздандырғыш ортада — газ генераторлардың шегендерінде, ферроқорытпаларды, алюминийді, қорғасынды алу үшін электрдоғалы пештерде, домналық пештердің пештабанында, таза металдарды құю үшін құрал — сайман ретінде қолданылады.

Карбид кремнийлі отқа төзімділер. Карбид кремнийлі отқа төзімділер көміртектілерге қарағанда баяу тотығады (SiO_2 -нің жұқа қабыршығы қорғайды), жоғары қаттылықты, тозуға тұрақтылықты, жылу және электрөткізгіштікті, термиялық тұрақтылықты. Олар бейтарапты және қышқыл балқымаларға қарсы тұрақты, негізділерге қарсы тұрақты емес, SiC $T \geq 3000$ К кезінде ыдырайды. Керамикалық рекуператорларда, муфелдерде, реторталарда, газ генераторлар шегендерінде және т.б. қолданылады.

Қазіргі уақытта сапасы жоғары, қымбат тұратын, тұрақтылығы жоғары майда ұнтақтардан алынған отқа төзімділер кеңінен қолданылады, олар — муллиттілер, бакорлылар, корундтылар, периклаздылар және басқалары. Ең келешекті деп саналатындар — қалыпталындаған отқа төзімділерден жасалған шегендер, әсіресе отқа төзімді бетондардан және толтырғыш массалардан жасалған монолитті шегендер.

Шегендерді дайындау және жөндеу кезінде таза қиын балқитын ұнтақтарды: Al_2O_3 , MgO , ZrO_2 және басқа плазмалық тозаңдату әдісі енгізілуде, бұл олардың тұрақтылығы мен қызмет мерзімін едәуір арттырады.

5.6. Отқа төзімді бетондар және толтырғыш массалар

Отқа төзімді бетон – отқа төзімді толтырғыштың, байланыстырғыштың және қосымшалардың қоспасы. Бұл қоспа сулы ерітіндімен қатаюы кезінде тасқа ұқсас денеге айналады. Отқа төзімді бетонның қатаюы суық күйде, қайта кристалдану және химиялық реакциялар нәтижесінде жүреді. Отқа төзімді бетонның беріктілігі кептіру процесіндегі қыздыру кезінде және пешті режимге шығаруда қатаю (600 К дейін), беріктендіру (600-1300 К) және күйе жентектелу (> 1300 К) кезінде үздіксіз жоғарылауы керек.

Толтырғыш ретінде (80-90 % масса бойынша) түйір мөлшерлері 0,5-тен 70 мм дейін шөкпейтін отқа төзімді материалдар (сынықтар, отқа төзімді бұйымдардың қалдықтары) қолданылады. Бетондағы ірі кесектер арматуралар рөлін атқарады, шөгуді төмендетеді. Байланыстырғыш ретінде суық күйде қатайтын отқа төзімді цементтер (глинеземді, магнезиалды), жұқа ұнтақталған отқа төзімді ұнтақтар, отқа төзімді саз, сұйық шыны, фосфатты байламдар және т.б. қолданылады.

Бетондық массаның қатаюы үшін тұздар мен қышқылдардың сулы ерітінділері қолданылады. Қоспаға ұстасу және қатаю жылдамдықтарын реттеуші, илемділікке келтіруші, шөгуге қарсы және басқа да әртүрлі қосымшалар енгізіледі. Максималь температуралары бойынша отқа төзімді бетондар 8 топқа бөлінеді: I - 1400 К дейін, II – 1500 К дейін, III – 1600 К дейін, IV – 1700 К дейін, V – 1800 К дейін, VI – 1900 К дейін, VII – 2000 К дейін, VIII – 2100 К дейін.

Инертті толтырғыш пен байланыстырушы зат бұйымның жұмыс істеу температурасы кезінде жеңіл балқымалы эвтектиканы түземеуі керек; егер олай бола қалса, онда сұйық фаза мөлшері анықталуы талап етіледі.

Динас кварцитті ірі бетонды блоктар. Бұл бетондарды династың сынықтары мен ақаулы қалдықтарынан және сұйық шыныдағы немесе алюмофосфатты байламдардағы кварцтан дайындайды. Сұйық шыны қолдану жағдайында бетонға кремний фторлы натрий Na_2SiF_6 енгізеді.

Динас кварцитті бетондар ірі блоктар түрінде, массасы 13 және 18 т, прокат цехтарының қыздырғыш құдықтарын шегендеу үшін қолданылады.

Династы бетон химиялық құрамына тәуелді отқа төзімділігі 1850-ден 1970 К дейін болады. Осы кездегі оның температура 1650 К және ұстау уақыты 2 сағ болғанда күйдіру процесіндегі көлемі 0,8-2,0 %-тен аспайды.

Фосфатты байламдағы сазды кремнеземді массалар. Мұндай массалардың негізді қождарға тұрақтылығы өте жоғары болады. Кварцитті массалар қыздыру кезінде кремнеземнің полиморфизмдігі салдарынан қопсиды және ірі кеуектер түзейді. Кеуектілікті төмендету мақсатында массаға 10-150 % отқа төзімді саз қосылады, бұл қыздыру кезінде (1850 К) блоктың сызықтық мөлшерінің өсуі төмендейді. Беріктікті арттыру үшін массаға 2–5 % (100 % үстіне) 85 % ортофосфорлық қышқыл H_3PO_4 енгізеді.

Торкрет – бетон (бүрке шегендеу-бетоны). Торкреттеу (бүрке шегендеу) әдісімен жаңа шегендерді дайындау немесе оларды жөндеу үшін арнайы торкрет – ұнтақтарды қолданады. Торкрет-ұнтақты сумен араластырады және пульпа (қойыртпақ) түрінде сығылған ауамен шүмек арқылы пеш беттігіне жалатады. Ең жоғарғы тиімділікті әдіс – жалынды торкреттеу. Бұл әдіс бойынша торкрет – ұнтақ оттегілі ортада керосинді жағу кезінде алауға беріледі. Алаудың температурасы – 2250 К-нен жоғары.

Торкрет-бетон деп торкреттеу жолымен жалатылған масса қабатын атайды. Торкрет-ұнтақ отқа төзімді толтырғыштың, байланыстырғыштың және қосымшаның ұнтақты беттікке жабысуын қамтамасыз ететін және қайта түсіп қалуын төмендететін қоспаны көрсетеді.

Талшықты отқа төзімділер. Талшықты құрылымды қиын балқитын материалдар, өндірісі қарқынды өркендеп келе жатқан, жоғары тиімділікті отқа төзімділердің жаңа сыныбы. Барлық өнеркәсібі өркендеген елдер талшықты отқа төзімділерді қолданады. Жеңілдігі, жылуөткізгіштігінің төменгі коэффициенті, жоғары термиялық тұрақтылығы, жақсы химиялық беріктігі бұл материалдарға металлургия мен жылу техниктерінің көңілін аудартады. Бұл қасиеттері пеш шегендерін құрастыруда және

жөндеуде уақыт пен жұмыс күшінің шығындарын қысқартуға, отын мөлшерін үнемдеуге, агрегаттар өнімділігін жоғарылатуға, шеген массасын төмендетуге және т.б. мүмкіндік береді.

Талшықты материалдардың сипатты қасиеті – олардың созылуға жоғары беріктілігі. Кейбір жағдайларда талшықтардың беріктілігі материалдардың теориялық беріктілігіне жақындайды. Жоғары беріктілік кішкене мөлшерлі үлгілердегі құрылымның қауіпті ақауларының пайда болу ықтималдығының төмендеуімен, құрылымның гомогендігімен және оның талшық осі бойымен бағдарлануымен түсіндіріледі.

Талшықты отқа төзімді материалдар металлургияда қыздыру пештерінің шегендері, жоғары температуралы ауа қыздырғыш-тарда жылу окшаулаушы, әдістемелік пештерде оттық құбыр-ларында, болат пен шойын құймаларының жылытқышында, түсті металдарды құю кезінде металдан жасалған құбырларда жылу окшаулаушы ретінде қолданыс тапты. Отқа төзімді талшықтың жеке өзін жылу агрегаттары құрылысының практикасында қолданбайды, тек жіктерді тығыздау қажеттігінде ғана болмаса. Пештердің құрылыстары мен жөндеулері кезінде отқа төзімді талшықтардың келесідей байланыстырғыш материалдармен қоспасы негізіндегі бұйымдар қолданылады: плиталар, картон, киіз, таспа, бау және т.б. Техникада мұндай отқа төзімділерді қолдану жылу жоғалымын төмендетіп қана қоймайды, сонымен қатар материалды қажетсінуді төмендету мәселесін де шешеді.

Қазіргі уақытта 100-ден аса заттар шыны түрде және кристалдық жіптер түрінде алынады. Талшықты материалдар талшықтарының ұзындығы бойынша үздіксіз талшықтары бар *ұзын талшықты* және қысқа талшықтары бар *штапельді* болып бөлінеді. Өндіріс технологиясына қарай отқа төзімді талшықтарды екі түрге сыныпталады: балқыманы үру жолымен алатын, *аморфты*, және химиялық жолмен алынатын, *поликристалдық*.

Кеңінен қолданылатын талшықты жылу окшаулаушы материалдар (минералды силикатты мақта, шыны талшық және солардың негізіндегі жылу окшаулаушы бұйымдар) шектеулі қолданыста болады – шамамен 1100 К температураға дейінгі. Бұл шектеулер, 1500 К-ге дейінгі, ал хром оксидінің қосылуымен 1700-1800 К дейінгі температураларда ұзақ жұмыс

істеуші, глинезем – кремнезем бинарлық жүйесіне сүйенетін, жаңа талшықтарды әзірлеу нәтижесінде алынған.

Талшықты отқа төзімді материалдардың ішінде ең кеңінен таралғаны – каолиндік мақтамен соның негізінде дайындалған бұйымдар, сонымен қатар жіп түрдегі кристалл мен композиттер. Каолиндік мақтаны алу процесі келесідей түрде жүреді: алдымен массасы бойынша қатынасы 1:1 болатын техникалық глинезем (Al_2O_3 99 %) мен кварцты құм (SiO_2 97,5 % жоғары) қоспасы дайындалады. Қоспаны электр пешінде 2300-2500 К температурада балқытылады. Пештен ағынша түрінде ағып шығатын балқыманы, арнайы талшық түзеуші қондырғыда температурасы 490-500 К қыздырылған бу ағыншасымен тозандатады. Каолиндік талшық және одан жасаған бұйымдар массасы бойынша жеңіл, созымталды, серпімді, жылу өткізгіштігі төмен, термиялық тұрақты, дыбыс оқшаулау қасиеті бар, химиялық тұрақтылығы тамаша, май, бу, су ықпалына төтеп береді, дірілге жақсы шыдайды.

Каолиндік мақтадан, қазіргі кезде, 50 аса әртүрлі бұйымдар түрлерін өндіреді: орамдық материалдар, тығыз киіз, плиталар, маттар, күрделі нысандағы даналық бұйымдар және т. б. Отқа төзімді талшықты материалдар мен бұйымдарды жұмысшы және жылу оқшаулаушы қабаттар ретінде қолданады. Бір қызығы, бұл жағдайда шегенді кептірудің қажеті болмайды, ал оның қыздырылу жылдамдығы шектелмейді.

Барлық жылу техникалық есептеулерде бұйымның меншікті жылу сыйымдылығы $1,05 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ тең деп қабылданады.

Талшықты отқа төзімділердің қолданылу температурасы шектеулі екенін ескерту керек. Бұл беріктілікті, серпімділікті және термиялық тұрақтылықты жоғалтуға әкелетін, жоғары температуралар әсерінен талшықтардың шыны фазаларының кристалдануымен түсіндіріледі. Талшықтардың металмен, керамикамен, шынымен және полимерлермен құрамдастырымы бірегей қасиеті бар материалдарды алуға мүмкіндік береді.

5.7. Жылу оқшаулаушы материалдар

Жылу оқшаулаушы материалдардың қызметі – жылу жоғалымдарын төмендету, отынның немесе электр-энергиясының үнемділігін қамтамасыз ету, ақаулықтан соң пешті жағуға кететін уақытты қысқарту, әрине өнімділікті жоғарылату және өнім бірлігінің құнын төмендету.

Жылу оқшаулаушы материалдарға келесідей негізгі талаптар қойылады:

- жылу өткізгіштігінің барынша төмен болуы;
- ішкі отқа төзімді қабат қызатын температураға дейінгі салыстырмалы жоғары температураларға қарсы тұру қабілетінің жоғары болуы;
- құрылыстық беріктігінің жылу оқшаулаушы қабаттың салмағынан бұзылмайтындай жеткілікті болуы;
- шоғырландыруға (аккумуляцияға) жылудың аз шығынын қамтамасыз ету үшін, меншікті жылусыйымдылығының аз болуы;
- материалдардың құнының мүмкіндігінен төмен болуы.

Жылу оқшаулаушы материалдар отқа төзімді материалдар қасиеттері сияқты сипатталады: кеуектілікпен, жылу өткізгіштікпен, меншікті жылусыйымдылықпен, газ өткізумен, электр өткізгіштікпен. Олар бірқатар белгілері бойынша келесі топтарға бөледі: *отқа төзімділігі бойынша* – отқа төзімділерге, 800 °С жұмысшы температураны ұстаушы, және отқа төзімді емес, 800 °С төмен температураларда ғана қолданылады; *алынуына қарай* – табиғи және жасанды; *қолдану пішіні мен әдісіне қарай* – жылу оқшаулаушы материалдар бұйымдар түрінде (кірпіштер, табақтар және т. б.) немесе қалыптанбаған материалдар түрінде (көмбелер, мақталар, талшықтар және басқа) орындалады.

Жылу оқшаулаушылар қолдану температурасы бойынша үш топқа бөлінеді: төменгі температуралы – 1200 К дейін, орташа температуралы – 1200-1500 К, жоғары температуралы (1500 К жоғары).

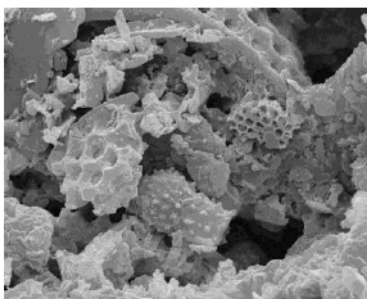
Табиғи жылу оқшаулаушы материалдар. Олардың ішінде кеңінен тарағаны диатомит, трепел, инфузорлық жер, вермикулит және асбест. Алдыңғы үшеуінің құрамы бірдей – $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Диатомит – су балдырларының ыдырау өнімі, борпылдақ жер құрылымды. Ұнтақ немесе сазбен байланысты дайындалған бұйым түрінде қолданылады, бұйымның тығыздығы 500, 600, 700 кг/м³, жылуөткізгіштік коэффициенті 0,18; 0,21; 0,27 Вт/(м·К) сәйкесті тең. Диатомит бұйымдарды қолданудың шекті температурасы 1000 °С (54-сурет).

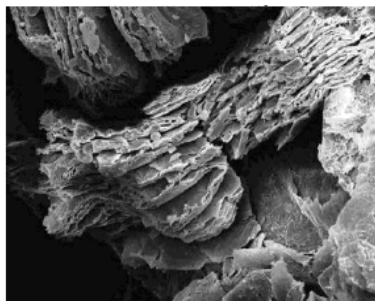
Инфузорлық жер жануарлар ағзасының ыдырау өнімі; көбінесе ұнтақ түрінде қолданылады.

Трепел – тау жыныстарының желдену өнімі, төменгі жылуөткізгіштікті кеуекті материал; ұнтақ немесе бұйым түрінде қолданылады. Трепелден жасалған бұйым қасиеттері бойынша диатом бұйымдарға жақын.

Вермикулит – қыздыру кезінде өзінің көлемін біршама ұлғайтуға қабілеті бар, слюданың бір түрі (55-сурет). Вермикулит толтырғыш немесе плиталар түрінде қолданылады. Қолдану температурасы 700-900 °С дейін. Күйдірілген түрі *зонолит* деп аталады. Зонолитті қолданудың шек температурасы 1000-1100 °С. Вермикулит пен зонолиттің жылуөткізгіштік коэффициенті 0,1 Вт/(м·К) тең.



54-сурет. Диатомит бөлшектерінің үлкейтілген түрі



55-сурет. Вермикулит бөлшектерінің үлкейтілген түрі

Отқа төзімді емес оқшаулаушы материалдар қатарына *асбест* жатады. Асбест $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ құрамды магнийдің сулы силикаты болады, талшықты құрылымды, кеуекті. Толтыруға арналған асбест қиқым түрінде немесе бұйым-шнур, картон, плиталар, мата, мақта түрінде қолданылады.

5.8. Қазақстандағы отқа төзімді материалдар шикізаттарының кен орындары

Қазақстан жерінің табиғи ресурстарға өте бай екені белгілі, осы ресурстар базасында көптеген өндірістер ашылып, өркендеуде. Экономиканың өсуіне байланысты Қазақстанда және Орта Азияның басқа елдерінде отқа төзімді материалдарды қолдану жоғарылауда. Мысалы, Ұлы Отан соғысына дейін 1941 – 1945 жылдары Орта Азия мемлекеттеріне 15 мың тонна отқа төзімді әкелінсе, ал 1945 жылы олардың қажеттілігі тек Қазақстанда 65 мың тоннаға жетті. Қазіргі уақытта ол 200 мың тоннаны құрайды. Отқа төзімді материалдарды ең көп қолданатын аймақтар – бұл Қарағанды, Шығыс Қазақстан, Алматы, Ақтөбе және Оңтүстік Қазақстан облыстарының экономикалық және өнеркәсіптік аудандары. Шойын өндірудің қуатты дамуына байланысты республикада отқа төзімділерді пайдалану тағы бірнеше есе артты. Қазіргі уақытта негізгі отқа төзімділер үлесі 40-50 % көтерілді.

Орта Азия мен Қазақстанда қазірде отқа төзімді бұйымдар мен ұнтақтар өндіретін зауыттар жоқ. Қажетті отқа төзімді материалдар Орал мен Батыс Сібір өндірістік аудандарынан жеткізіледі. Қазақстанда Қарағанды металлургия зауытының жанынан ірі отқа төзімді материалдар цехы ашылмақ, онда 45 мың тонна алюмосиликатты бұйымдар және 130 мың тонна мертель мен ұнтақ өндіріледі. Отқа төзімділер өндірісінің шикізаты ретінде Арқалық кен орынының каолиногипситі және Бірлік (Қостанай облысы) кен орынының саз балшықтары пайдаланылады. Сонымен қатар, Арқалықтың бокситтер және бокситті саз балшықтар кен орынының жанынан шамот күйдіргіш цех салынбақшы. Бұл өнеркәсіптер отқа төзімділермен және ұнтақтармен Қазақстанды ғана емес, сонымен қатар Орта Азия мемлекеттерін және Сібірді қамтамасыз етеді деп жобалануда.

Қазақстанда бокситті кен орындардың бес ірі ауданы белгіленген: Амангелді, Обаған, Ақмола, жоғарғы Тобыл және Мұғалжар. Отқа төзімді саз балшықтың ірі кен орыны Павлодар облысында Ертіс өзенінің оң және сол жағалауларында табылды. Осылайша, Қазақстанның солтүстік және солтүстік-

шығыс аудандарында отқа төзімділер өндірісін дамыту жолға қойылмақшы. Дегенмен, жаңа зауыттарды шикізатпен қамтамасыз ету үшін көрсетілген аудандарда кең геологиялық зерттеулер жүргізу қажет, өйткені отқа төзімді саз балшықтардың бекітілген көп кен орындары әлсіз және сәйкес өндірістік тексерусіз зерттелген.

Қарағанды және Ақмола облыстарында отқа төзімді сазбалшықтардың 60-қа жуық кен орындары бар. Мысалы, Айзын – Томар, Қаражігіт, Ақши, Сасық – Қарасу кен орындары және т.б. Барлық осы кен орындарының шикізаты алюмосиликатты отқа төзімділердің жеке түрлерін өндіруге қолдануға болады. Айзын – Томар кен орынының саз балшықтары зерттеуден кешенді түрде өткізілді (шикізат қоры – 2 млн.т).

Ақмоланың бокситті аудандарының және Қарағанды облысындағы кен орындарды зерттеу сапалы отқа төзімді саз балшық қорын арттыруға үлес қосады. Қазақстан Республикасы Ғылым Академиясының Metallургия және байыту институтында Семіз Бұғы, Қоңырат, Шоқпартас кен орындарының андалузитті жыныстары зерттелді. Келтірілген мәліметтерден Қазақстанда алюмосиликатты отқа төзімділер дайындауға ірі өнеркәсіптер құру мүмкіндігі бар екенін байқауға болады.

Республикада сонымен қатар долмитті кен орындары да бар, олардың ішіндегі ірілері: Қара – Бауыр, Алексеевское (Көкшетау облысы), Сарғалы (солтүстік батыс Балқаш), Тек тұрмас және Түлкібас (Оңтүстік Қазақстан) болып табылады.

Отқа төзімді бұйымдар мен әртүрлі ұнтақтардың қажеттігі бірнеше жылдан кейін Қазақстанда өсіп, жылына 1 млн. тоннаға жетеді. Қазақстанан табылған шикізаттық ресурстар дамушы өнеркәсіптердің қажеттіліктерін толығымен қанағаттандыра алады.

5.9. Пеш құрылысының элементтері

Пеш құрылысында отқа төзімділер мен жылу оқшаулаушы материалдардан өзге болат пен шойын (қаңқа мен пеш жабдықтарын жасауда), құрылыс кірпіші, қойтастар, шой тастар, еленген тастар мен құм қолданылады.

5.9.1. Құрылыс материалдары

Құрылыс кірпіші отқа төзімді емес қызыл саз бен құмның қоспасынан дайындалады. Кірпіш илемді қалыптау (ылғалдық 18-25 % кезінде) немесе жартылай құрғақ престеу (ылғалдық 8-12 % кезінде) әдістерімен қалыптанады. Қызыл кірпіш тек 700 °С дейінгі температурада қолданылады. Құрылыс кірпіші төменгі температуралы пештердің түтін арналарын, құрылыс кептіргіштерін және түтін шығатын құбырларды қалауда қолданылады.

Бұт тастар – табиғи материал, ірілігі 0,02-0,1 м³ граниттің, құмтастардың немесе әктасының кесектерінен тұрады. Іргетасты қалауға арналған материал ретінде немесе бұтбетон дайындауда толтырғыш ретінде қолданылады. Құмтастар температура әсеріне барынша тұрақты, 700 °С дейін қолданыла алады, ал әктасы тек қана 250 °С дейін.

Ұсақталған тас – тау жыныстарын 10-80 мм ірілікке дейін ұсақтау жолымен алады. Бетонды қоспаларда толтырғыш ретінде қолданады.

Қиыршық тас – табиғи тас, түптегі бойынша таулық, өзендік және теңіздік болып бөлінеді, ал ірілігі бойынша ерекше майда (5-10 мм), майда (5-20 мм), орташа (20-40 мм) және ірі (40-150 мм) болады. Ұсақталған тас сияқты, бетонды қоспаларда толтырғыш ретінде қолданылады.

Құм – тау жыныстарының бұзылу өнімі. Түйірінің мөлшері 0,15-тен 5 мм дейін, пішіні бұрышты, беттігі тегіс емес. Құмды бетонды, құрылыс ерітінділерін және кірпішті дайындауда толтырғыш ретінде қолданады.

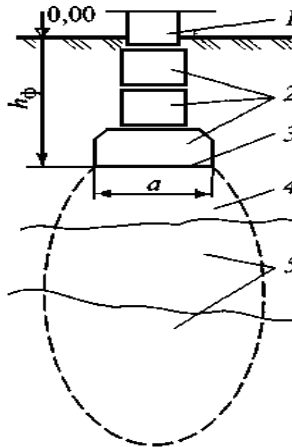
Құрылыс ерітінділері – кірпіштерді қалау кезінде жіктерін толтыруға арналған, яғни даналы құрылыс бұйымдары мен кесек материалдарды (кірпіштерді, блоктарды) монолит етіп біріктіруді қамтамасыз етеді. Толтырғыш түріне қарай ерітінділер ауыр және жеңіл болып бөлінеді. Ауыр ерітінді де толтырғыш ретінде құм, ал жеңіл де – диатомит қожы, т.б. сияқты жеңіл материалдар алынады. Байланыстырғыш зат ретінде цемент алынады. Іргетастарды тұрғызу кезінде қожбетондар кеңінен қолданылады, олар цементке 30-50 % домна қожын қосумен алынады. Тәжірибеде, көбінесе, күрделі

ерітінділер қолданылады, олар байланыстырғыш материалдар қоспасынан, жік тығыздығын арттыру мақсатында саз қосылып дайындалады.

Пеи құрылысында қолданылатын металдар: ыстыққа берік және ыстыққа тұрақты қара металдар кеңінен қолданылады. Ыстыққа берікті деп тиелген күйде, жоғары температурада ұзақ уақыт жұмыс істейтін және осы кезде жеткілікті қатқал тұрақты металдарды атайды. Ыстыққа тұрақты деп $\geq 550^{\circ}\text{C}$ температурада беттіктің газдық ортадан химиялық бұзылуына қарсы тұру қабілеті бар және тиелмеген немесе аз тиелген күйде жұмыс істейтін металдарды атайды.

5.9.2. Пеиің құрылыс элементтері

Іргетастар – ғимараттың жер бетіндегі бөлігінің күшін қабылдайтын және оны табанына беретін жерасты бөлігі (56-сурет).



56-сурет. Табиғи табан мен іргетастың сұлбасы:

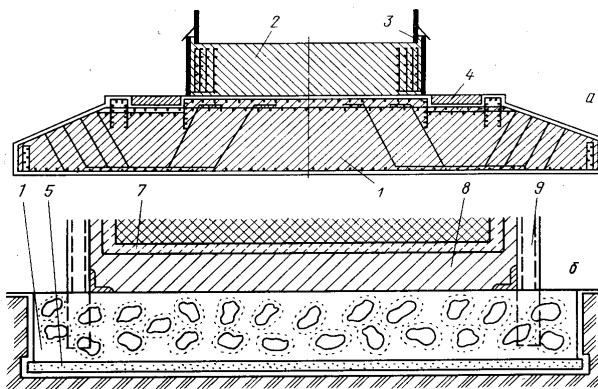
*1-құрылыс колоннасы; 2-іргетас;
3- іргетас табаны; 4-табанның негізгі қабаты; 5-табанның төсеме қабаты*

Олар жартасты, ірі блокты, құмтасты және сазды болады. Іргетасты беріктігі ғимараттың қысымына жеткілікті тұрақты

болатындай тереңдікке бойлата жасайды. Егер жер қыртысы әлсіз болса, онда оны алдын ала жасанды нығыздап, беріктендіреді. Іргетас табанынан жерге түсетін күш 250 кПа аспауы қажет. Пештер іргетасын және түтін құбырларын бұтты, бұтбетонды, бетонды және темірбетонды етіп орындайды.

Конструкциясы бойынша іргетастар келесідей жіктеледі: бүкіл ғимарат астында орналасқан, тұтас; тұтас негізгі қабырғалар астында орналасқан, таспалы; жеке бағаналар түрінде. Табанның шөгуінің біркелкісіздігін болдырмау мақсатында, оларды басқа іргетастармен байланыссыз жекеше орындайды.

Ірі металлургиялық пештердің іргетастарының құрылысы өте күрделі және көптеген арнайы материалдар қолданылады. Домналық және камералық пештердің іргетасы 57-суретте кескінделген.



57-сурет. Домналық (а) және камералық (б) пештің іргетасы:

1 – іргетас плитасы; 2 – отқа төзімді бетоннан тұрғызылған пеш;
3 – пештің қабы; 4 – колонна астындағы ростверк; 5 – майда тасты дайындама; 6 – отқа төзімді қалау; 7 – оқшаулаушы қалау; 8 – сазды кірпіштен тұрғызылған қалау; 9 – пеш қаңқасы

Жоғары температураның әсері болатын іргетастарды тұрғызу кезінде, ыстыққа тұрақты бетонды қолдану қажет немесе бетон беттігін арнайы орындалатын шаңецтар және қалау мен іргетас арасындағы ауалық саңылау көмегімен ауамен

суытуды қарастыру керек. Іргетастың температурасының 1200 °С жоғары көтерілуіне жол бермейтін, іргетас пен пеш шегені арасында жылу оқшаулаушы қабаттың орындалуы да мүмкін. Жерасты суларының деңгейі жоғары болғанда немесе ғимараттың бір бөлігін терең орналастыру қажет болғанда, дренаж қарастырылады немесе іргетас гидрооқшаулаушы жәшікпен қапталады.

Қаңқа пеш шегенінде оның қызуы кезінде пайда болатын күшті қабылдауға, және де пештің бүкіл гарнитурасын, арматураны, механизмдерді, басқа да жабдықтарды көтеруге арналған. Қаңқалар келесідей типтерде болады: қатарлы илемді (қозғалысты) байланыстармен; қатарлы қатаң рамалы конструкциялы. Қаңқаның жауапты элементі, ол аркалы күмбездің керілу күшін қабылдап оны қаңқаға беретін табанды балкалар. Жоғары температуралы пештерде табанды балкалар сумен суытылады.

Қалау. Шеген барлық өнеркәсіптік пештердің жауапты бөлігі болады. Пеш жұмысының сенімділігі мен ұзақтығы соның қызметіне тәуелді. Шеген элементтеріне оттық, қабырғалар мен күмбез жатады. Қалау, мүмкіндігінше, балқыған металл мен қож, пеш газдары енбейтіндей болуы қажет. Қалауды категорияларға бөледі, олардың әрқайсысы үшін жіктің ұйғарынды қалыңдығы қатаң регламенттеледі:

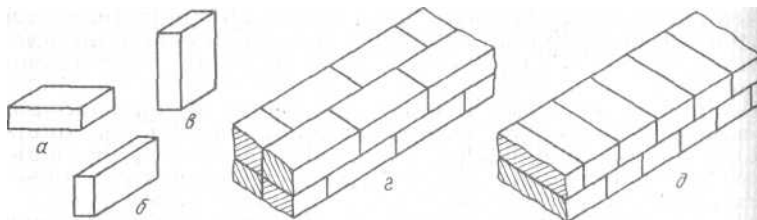
- ерекше мұқиятты, жіктің қалыңдығы 1 мм дейін – балқыту пештерінің сұйық ортамен жанасатын аймақтарын шегендеуге арналған;

- мұқиятты, жіктің қалыңдығы 2 мм дейін – үйкелу әсеріне түсетін аймақтарды және температурасы 1400 °С дейінгі қыздыру пештерін шегендеуге арналған;

- кәдімгі, жіктің қалыңдығы 3 мм дейін – сұйық металмен және қожбен жанаспайтын, температурасы 1200 °С дейінгі қыздыру пештерін шегендеуге арналған;

- қарапайым, жіктің қалыңдығы 3 мм дейін – оттықтың төменгі қабаттарын орындауға арналған.

Қабырғаның қалауы кезінде кірпіштерді орналастыру жағдайлары әртүрлі әдіспен орындалады (58-сурет).



58-сурет. Қалаудағы кірпіштердің жайғасымы:

а – жалпағымен; б – бүйірімен; в – тік бойлығымен; г – қасықты қалау; д – үшкір қырлы қалау

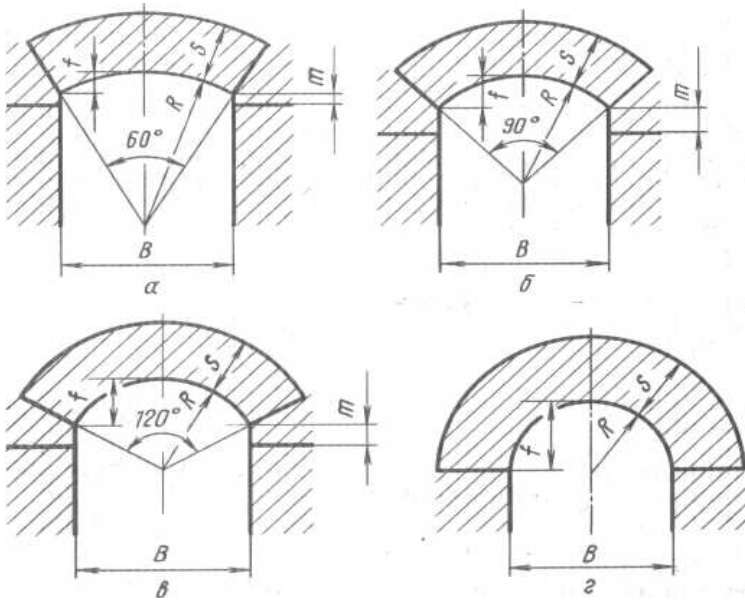
Жоғары тығыздықты талап ететін жерлерде шегеннің жұмысшы қабаты 0,5 мм дейінгі қалыңдықты жікпен ерекше ұқыпты орындалады. Боровтарды қалау кезінде жік қалыңдығы 5 мм дейін, ал пештің сыртқы бетін қызыл немесе оқшаулаушы кірпішпен қаптау кезінде 8-10 мм тең қабылданады.

Пеш оттығы тікелей іргетасқа немесе балкаларға тірелетін болат табақтарда орындалады. Оттық пен іргетас арасындағы саңылау іргетасты аса қызудан сақтайды. Пеш оттығы тиелетін материалдың механикалық соққысына және қақтың немесе сұйық металдың химиялық әсеріне түседі, сондықтан оны көпқабатты етіп жасайды. Домналық пештерде пештабан (лещадь) блоктардан орындалады. Термиялық және қыздыру пештерінде оттықтың қалыңдығы, мөлшері мен жұмысшы температурасына тәуелді, 230-465 мм құрайды. Балқыту пештерінде ол 1200 мм жетеді, ал домна пештерінде лещадь қалыңдығы 5 м және одан да жоғары.

Пеш қабырғасы. Қабырға қалауын, оттық сияқты, жіктерді байланыстырумен орындайды, ол үшін кірпішті қалауды ұзындықты және ендікті алмастырып отырады. Қыздыру пештерінің қабырғасын қалауды қатаң тік, ал балқыту пештерінде, олардың тұрақтылығын жоғарылату үшін, еңкішті орындайды. Қабырғалар екі- немесе үшқабатты қаланады. Ішкі жұмысшы қабат, пеш жұмысының сипатына тәуелді талаптарға сай келетін, отқа төзімді материалдан жасалады. Сыртқы қабат жылу оқшаулаушы материалдан қаланады. Қыздыру пештерінің қалыңдығы 0,345-тен 0,565 м дейін, балқыту пештерінікі 0,9-1,1 м;

домна пештерінде 1,1-1,6 м болады. Кезеңді әрекетті пештердің қабырғасы жеңіл салмақты материалдардан орындала алады.

Пеш күмбезі аркалы, куполды немесе ілмелі орындалады. *Аркалық күмбез* аралық ені 3 м дейін болғанда қолданылады. *Металлургиялық пештер* үшін орталық бұрышы 60, 90, 120 және 180° аркалық күмбездер жасалады. Аталған күмбездердің сұлбасы 59 а, г-суреттерінде кескінделген.



59-сурет. Күмбездер сұлбасы

Күмбездің қалыңдығы кірпіш ұзындығына тең – 230, 250 немесе 300 мм. Егер күмбез екі қатар кірпішпен орындалса, онда қатарлар бір-бірімен байланыспайды. Қыздыру пештерінің күмбезі оқшаулаумен орындалады, ол үшін қалыңдығы 65-230 мм толтырғыш қолданылады. *Куполды күмбез* деп дөңгелек пештердің күмбезін атайды. Олар тұтастай фасонды кірпіштермен орындалады. *Ілмелі күмбез* қыздыру пештерінде аралық ені 3 м асқанда қолданылады. Оларды орындау үшін А класты шамот кірпіші мен каолин, ал қисық сызықты

бөлімдерінде жоғары глинеземді кірпіштер пайдаланылады.

Металлургиялық балқыту пештерінің күмбездері өте массивті, сондықтан оларды тіректі – ілмелі етіп орындайды. Бұл кезде күмбездің салмағының бір бөлігі табантірек арқылы қаңқаның тіреуішіне беріледі. Балқыту пештерінің күмбездерінің аса қызып кетуін болдырмау мақсатында, көп жағдайларда желдеткіштерді қолданумен, күмбездің сыртқы беттігіне мәжбүрлі ауалы суыту жасалады.

Электрпештерінің алмалы-салмалы күмбездері немесе қыздырғыш құдықтардың қақпақтары арнайы металдан жасалған рамаларға бекітіледі. Бұл рамалар барлық салмақты өзіне қабылдайды және олардың қызметінің уақытын ұзартады.

5 тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Өнеркәсіптік пештің құрылымдық элементтеріне сипаттама беріңіз.

2. Екі металлургиялық пештің негізгі элементтерін салыстыра талдаңыз.

3. Жылуоқшаулаушыларға қандай материалдар жатады?

4. Отқа төзімділердің негізгі түрлерінің біріне сипаттама беріңіз.

5. Пештің қаңқасы мен оттығына қандай талаптар қойылады?

6. Отқа төзімділердің негізгі түрлерін атаңыз.

7. Пештің іргетасын салудың ерекшелігі неде?

8. Металлургиялық пештердің қабырға қалауының ерекшеліктерін атаңыз.

9. Қандай материалдар отқа төзімділер деп аталады?

10. Отқа төзімділердің химия-минералогиялық құрамы бойынша жіктелуі.

11. Отқа төзімділердің отқа төзімділігі бойынша сыныптамасы.

12. Отқа төзімділік ұғымынан нені түсінуге болады?

13. Термиялық тұрақтылыққа анықтама беріңіз.

14. Отқа төзімдінің қандай қасиетінен оның химиялық тұрақтылығын білуге болады?

15. Құрылыс материалдарына қандай материалдар жатады?

16. Пеш іргетасы дегеніміз не? Оның қызметі.

17. Пеш күмбезіне сипаттама беріңіз және металлургиялық пештердің күмбездерінің орындалу жағдайын түсіндіріңіз.
18. Шеген не үшін қажет және оған қандай талап қойылады?
19. Қабырға қалауы мен пеш күмбезінің негізгі принциптері қандай?
20. Пеш қаңқасын қалай түсінесіз?
21. Түтін құбырының қызметіне сипаттама.
22. Отқа төзімді материалдарға қандай талаптар қойылады?
23. Отқа төзімді материалдардың химия-минералогиялық құрамы бойынша сыныпталуы және ол неге негізделеді?
24. Талшықты отқа төзімді материалдар қайда қолданылады?
25. Отқа төзімділерді дайындаудың технологиялық сұлбасына талдау жасаңыз.
26. А.А. Байков теориясының негізі, маңызы.
27. Технологиялық принциптік сұлбаны таңдаудың бес сатысына сипаттама беріңіз.
28. Отқа төзімді материалдардың тығыздығына, кеуектілігіне және макроқұрылымына анықтама жасаңыз.
29. Отқа төзімділердің жұмысшы қасиеттері.
30. Отқа төзімділердің физикалық қасиеттері.
31. Отқа төзімділік пен термиялық тұрақтылық қасиеттері арасындағы айырмашылық қалай тұжырымдалады?
32. Жылу оқшаулаушы материалдар туралы жалпы түсінік.
33. Табиғи оқшаулаушы материалдарға сипаттама беріңіз.
34. Жасанды жылу оқшаулаушылар туралы не білесіз?
35. Пеш құрылысында қолданылатын металдарға анықтама.

6 ТАРАУ

МАТЕРИАЛДЫҚ ЖӘНЕ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ҚАЙТАРМА РЕСУРСТАР. ЖЫЛУДЫ ҚОЛДАНУ КЕЗІНДЕГІ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МӘСЕЛЕЛЕР

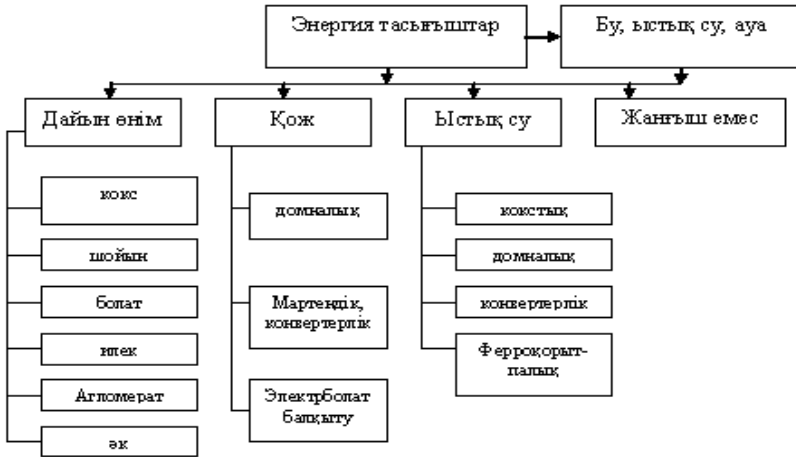
Металлургияның технологиялық процестері отын энергиясын пайдаланудың төменгі көрсеткіштерімен сипатталады, яғни негізгі тұтынушы – металлургиялық пештерде энергияның игерілуі толық жүрмейді. Осыған байланысты қайтарма энергетикалық ресурстар (*ҚЭР*) ұғымы пайда болды. *ҚЭР* – технологиялық процесте пайдаланылмаған отын энергиясының бір бөлігі. Қайтарма материалдық ресурстар (*ҚМР*) ұғымын да енгізуге болады, яғни технологиялық процестің қалдықтары туралы (мысалы, шаң түріндегі лақтырындылар, су, қақ, т.б.). Әрине, *ҚЭР* мен *ҚМР* пайдалану материалдық-энергетикалық ресурстарды ғана үнемдеп қоймай, сонымен қатар зиянды лақтырындыларды азайтады және қоршаған ортаның ластануын төмендетеді.

6.1. Қайтарма энергоресурстардың сыныптамасы

Энергия түрлері бойынша *ҚЭР* жанудың (отынның) *ҚЭР*, жылулықтың *ҚЭР* және артықша қысымның *ҚЭР* болып бөлінеді.

Жанғыш ҚЭР – энергетикалық немесе технологиялық отын ретінде қолдануға болатын технологиялық процестердің жанама газ тәріздес өнімдері. Қара металлургияда жану *ҚЭР* домналық, ферроқорытпалық және конвертерлік газдар, кейде кокстық газ да жатады.

Жылулық ҚЭР негізгі және жанама өнімдердің, технологиялық агрегаттардан шығатын газдардың, сонымен қатар суыту жүйелерінің физикалық жылуын көрсетеді. Дегенмен, егер бұл жылу шикізатты немесе ауаны қыздыру үшін қолданылатын болса, яғни технологиялық процеске қайтарылса, онда ол *ҚЭР* қатарына жатпайды. Жылудың *ҚЭР* үлесі олардың жалпы шығысының 30 % жуығын құрайды (60-сурет).



60-сурет. Жылулық ҚЭР сыныптамасы

Артықша қысым ҚЭР – технологиялық агрегаттардан артықша қысыммен шығатын газдардың потенциалдық энергиясы. Ол кәдеге асырғыш қондырғыларда энергияның басқа түрлерін алу үшін қолданыла алады.

Пайдалану түрлері мен әдістері бойынша ҚЭР сыныптамасы 13-кестеде келтірілген.

13-кесте

ҚЭР түрлері және оларды пайдалану әдістері

ҚЭР түрлері	ҚЭР тасығыштары	Энергетикалық потенциал	Пайдалану әдісі
Жанғыш	Газ тәріздес қалдықтар	Жанудың төменгі жылуы	Отын қолданушы қондырғыларда жағу
Жылулық	Шығатын газдар, өндірістің дайын өнімі және қалдықтары, суыту жүйесінің жылу тасығыштары	Энтальпия	Су буының, ыстық судың жылу кәделеуіш қондырғыларында өндіру

	Істен шыққан және ілеспебу	Энтальпия	Жылу қажеттілігін жабу, конденсациялық немесе жылу-фикациялық турбоагрегатта электрэнергиясын өндіру
Артықша қысым	Артықша қысымды газдар	Изоэнтроптық кеңею жұмысы	Газдық кәдедеуіш турбоагрегатта электрэнергиясын өндіру

ҚЭР-дың технологиялық агрегатта пайда болатын мөлшерін *ҚЭР шығысы* деп атайды. Бұл шаманы ҚЭР көзі ретіндегі агрегаттың жұмыс уақытының бірлігіне, немесе меншікті көрсеткіштерде – өнім бірлігіне жатқызады.

ҚЭР шығысы энергия тасығыш мөлшерінің, оның энергетикалық потенциалына көбейтіндісімен анықталады:

жанғыш ҚЭР үшін

$$Q_{\text{жан}} = m \cdot Q_m^{\text{жс}}, \quad (6.1)$$

жылулық ҚЭР үшін

$$q^{\text{жыл}} = m \cdot i, \quad (6.2)$$

артықша қысым ҚЭР үшін

$$q^{\text{арт}} = m \cdot L, \quad (6.3)$$

мұндағы $q^{\text{жан}}$, $q^{\text{жыл}}$, $q^{\text{арт}}$ – сәйкесті ҚЭР шығысы, Дж/с (Дж/кг өнім);

m – энергия тасығыш шығыны, кг/с (кг/кг өнім);

$Q_m^{\text{жс}}$ – ҚЭР төменгі жану жылуы, Дж/кг;

i – энергия тасығыштың меншікті энтальпиясы, Дж/кг;

L – газдың изоэнтроптық кеңеюінің меншікті жұмысы, Дж/кг.

Кейбір жағдайларда жанғыш ҚЭР шартты отын бірлігінде көрсетіледі:

$$b = m \cdot Q_m^{\text{жс}} / Q_{\text{ш.о.}}, \quad (6.4)$$

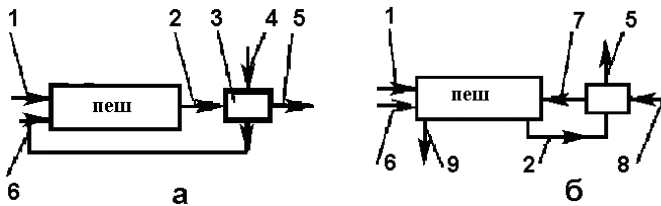
мұндағы b – өнім немесе уақыт бірлігіндегі шартты отын килограммымен анықталатын ҚЭР шығысы, кг ш.о./кг (кг ш.о./с);

$Q_{\text{ш.о.}} = 29308$ кДж/кг ш.о. – 1 кг шартты отынның жану жылуы.

6.2. Пештегі отын шығынын төмендету бағыттары

Шығатын газдардың физикалық жылуын пайдалану үш сұлба бойынша жүзеге асырылады: 1) технологиялық (тұйықталған және алшақтатылған), 2) энергетикалық және 3) құрамдастырылған.

Технологиялық сұлба, шыққан жылуды сол жылу-технологиялық қондырғыдағы технологиялық процестерде пайдалануды қарастырады. Мұндай сұлба бойынша ауаны, кейбір жағдайларда газ тәріздес отындарды қыздырады, пеште өңделетін материалды алдын ала жылытады немесе осы процесте қолданылатын кейбір шикіқұрамдық материалдардың химия-термиялық өңделуін жүргізеді. Сипатталған сұлбалар *тұйықталған* деп аталады, олар технологиялық агрегаттың өзінде отынды үнемдеуді қамтамасыз етеді (61-сурет).



61-сурет. Шығатын газдардың жылуын пайдаланудың тұйықталған технологиялық сұлбалары:

а – ауаны жылытуға арналған;

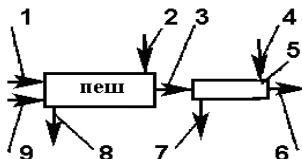
б – материалды алдын ала қыздыру;

1 – пешке жылу келтіру; 2 – пештен газдардың шығуы;

3 – рекуператор; 4 – рекуператорға ауаны келтіру; 5 – түінді шығару; 6 – пешке ауа келтіру; 7 – жылытылған материалды пешке беру; 8 – суық материалды беру; 9 – материалды алу

Шығатын газдардың жылуын процестің температуралық деңгейі төмен басқа пештік қондырғыда қолдануға болады, сұлба *алшақтатылған* деп аталады, оның кескіні 62-суретте келтірілген. Бұл жағдайда шығатын газдардың жылуы пайдаланылатын қондырғыда отын үнемделеді. Сонымен қатар, негізінен төменгі температуралы агрегаттарда, жылуды бірізді қолдану мүмкіндігі де болады.

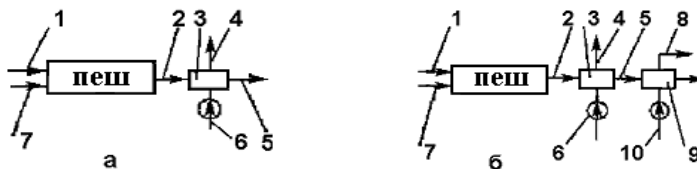
Тұйықталған технологиялық сұлбаны қолдану технологиялық агрегатта жылууды пайдалану тиімділігін жоғарылатады, яғни ҚЭР шығысын төмендетеді.



62-сурет. Шығатын газдардың жылуын пайдаланудың алшақтатылған технологиялық сұлбасы:

1 – пешке жылу келтіру; 2 – негізгі пешке материалды беру; 3 – негізгі пештен газды шығару; 4 – материалды төменгі температуралы пешке беру; 5 – төменгі температуралы пеш; 6 – төменгі температуралы пештен газды шығару; 7 – төменгі температуралы пештен материалдың берілуі; 8 – негізгі пештен материалдың берілуі; 9 – ауаны келтіру

Энергетикалық сұлба, шығатын газдардың жылуын қандай да бір энергия тасығыш (жылу, электрэнергиясы, суық және т.б.) өндіруге арналған энергетикалық қондырғыларда пайдалануды қарастырады (63-сурет). Бірнеше жылупайдаланушы қондырғыларды бірізді орналастыру мүмкіндігі болады, мысалы, кәделеуіш-қазандықтарды және желілік суды жылытуға арналған экономайзерлерді.

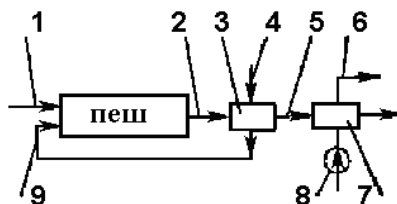


63-сурет. Шығатын газдардың жылуын пайдаланудың энергетикалық сұлбасы:

а – буды алуға арналған; б – бу мен ыстық су алуға арналған;
1 – жылу келтіру; 2 – пештен газды шығару; 3 – кәделеуіш қазандық (КҚ); 4 – КҚ буды шығару; 5 – КҚ түтінді шығару; 6 – КҚ суды жеткізу; 7 – ауаны жеткізу; 8 – ыстық суды шығару; 9 – желідегі суды жылытушы; 10 – жылытқышқа суды келтіру

Сонымен, энергетикалық сұлба алшақтырылған болады және өндірісте қолданылатын отынды және энергия тасығыштарды үнемдеуге мүмкіндік береді.

Құрамдастырылған сұлба технологиялық және энергетикалық сұлбаларды ұштастырады және ҚЭР шығысын төмендетуді және оларды барынша тиімді пайдалануды қамтамасыздандырады (64-сурет).



64-сурет. Шығатын газдардың жылуын пайдаланудың құрамдастырылған сұлбасы:

- 1 – пешке жылу келтіру; 2 – пештен газды шығару; 3 – рекуператор;
4 – рекуператорға ауа келтіру; 5 – рекуператордан түтін шығару;
6 – КҚ буды шығару; 7 – кәдеуіш-қазандық (КҚ); 8 – су келтіру;
9 – пешке ауа келтіру

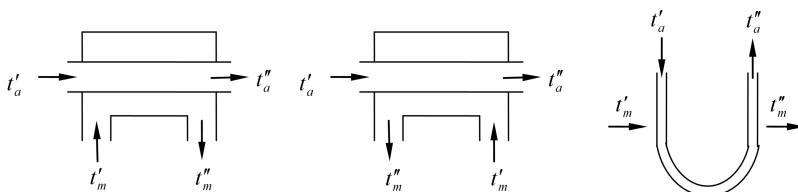
Сұлбаның әрқайсысының басымшылығы мен кемшіліктері бар. Оларды салыстырудың негізгі критерийі – қол жеткізген отын үнемділігі. Дегенмен бұл критерий сұлбаларды түпкілікті бағалауға негіз бола алмайды. Бұл жерде шығатын газдардың жылуының есебінен алынатын күрделі және қолдану шығындарын ескеретін техника-экономикалық есептеу қажет.

6.3. Қайтарма энергоресурстарды пайдалану

Балқыған қождардың жылуы суды жылытуға арналған қондырғыларда тиімді қолданылады. Пештің суытылатын бөлшектерінен кететін жылу ыстық су мен буды алуға қолданыла алады. Пешті жағу үшін қолданылатын ауаны және газ тәріздес отынды жылыту пештердің жылулық жұмысына оң ықпал етеді, жұмысшы кеңістіктегі температураны жоғарылатуға, отын шығынын төмендетуге және термиялық п.э.к. көтеруге

мүмкіндік береді.

Рекуператорларда ауаны және газ тәріздес отынды жылыту тура ағыс, кері ағыс немесе қайшы ағыс сұлбаларымен шығатын газдар және қыздырылатын ауаның бір мезгілдегі қозғалысынан іске асады (65-сурет).



65-сурет. Рекуператордағы жылу тасымалдағыштың қозғалыс сұлбасы:

a – тура ағыс; *б* – кері ағыс; *в* – қайшы ағыс

Рекуператорлар дайындалатын материалдары түрлеріне қарай металдық және керамикалық болып бөлінеді. Металдық рекуператорлар мейлінше тиімді, өйткені жылу беру коэффициенттері үлкен, жинақы, жақсы тығындалған (жабылған) және ғимараттары мен қолданылуында көп шығынды қажет етпейді. Негізгі кемшілігі – температураның шектеулігі, онда ауа 800 °C дейін ғана қыздырылады. Керамикалық рекуператорлар ауаны 900-1000 °C дейін қыздыруға және ұзақ қолдануға мүмкіндік береді.

Құрылысы бойынша металдық рекуператорлар келесідей жіктеледі: инелі, термоблоктар, құбырлы, табақты, радиациялы, құрамалы.

Инелі рекуператорлар шойын ине тәрізді, ұзындығы 880-1640 мм сыртқы және ішкі инелері бар құбырлардан жиналады. Ауа құбыр ішінен өтеді, ал түтінді газдар құбырларды сыртынан жуып өтеді.

Термоблоктарды газдар мен ауа өтуге арналған, қайшылы орналасқан болат құбырлар уысын шойынмен құя отырып дайындайды. Монолитті құрылымды рекуператорлардың бұл типі оларды газ тығыздықты және термиялық тұрақтылықты етеді. Термоблоктар ауаны 400–450 °C дейін қыздыруға мүмкіндік береді.

Радиациялық рекуператорлар газ жолында өте төменгі

гидравликалық кедергілі болады, бұл оларды түтін арнасыз орнатуға мүмкіндік береді. Үлкен түтінді каналдарының және түтінді беттіктерінің болуына байланысты, радиациялық рекуператорлар, түсті металлургия пештерінің шандалған жоғары температуралы газдарында жұмыс істей алады. Құрылыстық рәсімделуі бойынша радиациялық рекуператорлар үш типке бөлінеді: цилиндрлік, корзиналық және орамдық. Радиациялық рекуператорлардың кемшілігі – 700-800 °C төменгі температуралы шығатын газдар жылуын оларда қолдану мүмкіндігінің болмауы.

Құрама рекуператорлар жоғарыда келтірілген рекуператорлар типтерінің әртүрлі комбинациясын көрсетеді. Құрамалы рекуператорлардың ең кең тараған құрылымдары: радиациялық-конвективті, термоблокты-құбырлы және термоблокты-инелі. Құрамалы рекуператорлар есептеулері әрбір құраушы типіне жеке түрде жүргізіледі.

Керамикалық рекуператорлар ауаның 900 – 1000 °C дейінгі жоғары температуралық қыздырылуы қажет болған жағдайда қолданылады. Олар шамоттан, карбо-шамоттан және кейде карборундтан дайындалған, жеке рекуператорлық элементтердің құрама құрылысын көрсетеді. Рекуператорлық элементтер газдар мен ауа жүруге арналған тесіктері бар құбырлар немесе блоктар түрінде жасалынады.

Металлургиялық пештердің шығатын газдарымен жұмыс істейтін *булы кәдедеуіш-қазандықтар*, шарпыма және тазартқыш пештерге орнатылады, кейде конвертерлерге де орнықтырылады. Көбінесе олар табиғи немесе мәжбүрлі айналымды су құбырлы қазандықтар болады. Ұзақ және тұрақты жұмысқа арналған кәдедеуіш-қазандықтар, түсті металлургия пештеріндегі газдар құрамында болатын шаңдар мен шашырандылардан олардың беті қожданбауымен ластануымен тиімді күресуге мүмкіндік беретін, арнайы құрылғылармен жабдықталуы керек. Мұндай құрылғы болып экрандалған форкамера табылады, онда газдар мен шаң бірнеше суытылады, тек содан соң негізгі құбырлар уысымен түйіседі. Кәдедеуіш-қазандықтар, шығатын газдың температурасы 500 – 800 °C төмен емес кезінде үлкен қуатты үздіксіз әрекеттегі пештерде тиімді жұмыс істейді. Кәдедеуіш-

казандықтардан соң, қазаннан 250-350 °С температурамен шығатын газдар жылуын қолдануға мүмкіндік беретін тағы да бір рекуператор орналастырған тиімді.

Сұйық қождар жылуын температурасы 80 °С дейінгі ыстық суды алу үшін қолдануға болады. Бұл кезде температурасы 1200 – 1300 °С сұйық қож пештерден түйірлеуші науаға түседі де, онда сумен түйіршіктенеді. Түйірленген қож бен ыстық су жинағышқа жіберіледі, ол жерден ыстық су тұндырғышқа құйылады, одан әрі қарай цистернаға жіберіледі, ал қож гидроэлеватор көмегімен қалдықтар қоймасына аласталады.

Пештердің суытылатын бөлшектерінен кететін жылуды, судың қарапайым суытылуы кезінде емес, ал судың булана суытылуы кезінде немесе жоғары температуралы жылу тасымалдағыштармен суытылуы кезінде тиімді қолдануға болады. Қайнаған судың көмегімен жүретін булап суыту қысымы 0,7-3 атм, зауыт қажеттілігіне толығымен қолданылатын, буды алуға мүмкіндік береді. Буландыра суыту кезінде судың шығыны күрт төмендейді және пештердің көптеген түрлерінде суытылатын бөлшектердің қызмет ету мерзімі төмендемейді. Сонымен қатар, бөлшектерді суыту үшін, судың орнына қайнау температурасы жоғары және жылу тасымалдағыш температурасы 100-300 °С кезінде жылуды алуға мүмкіндік беретін әртүрлі жылу тасығыштарды қолдануда келешекті болып табылады. Бұл жағдайда қыздырылған жылу тасымалдағыш өнеркәсіптік бу өндіретін, бу генераторы арқылы өтеді, және жылуды алғаннан соң пеш бөлшектерінің суытылу жүйесіне қайтадан түседі. Жылу тасымалдағыштың жоғары температурасы 12 атм дейінгі қысымды буды жеңіл алуға мүмкіндік береді.

Сонымен, қайтарма жылуды қолданып, жылудың үлкен мөлшерін үнемдеуге болады, бұл қазіргі кезде ең бағалы және келешекті мәселе. Қайтарма энергиялық ресурстарды қолдануға мүмкіндік беретін құрылғылардың, тұрақты түрде жетілдірілуінің нәтижесінде, отын мен электр энергиясының шығыны төмендейді, отынды қолданудың п.э.к. жоғарылайды, жаңа қайтарма энергетикалық көздерді тартуға мүмкіндік жасалады.

6.4. Жылуды пайдалану кезіндегі экологиялық мәселелер

Табиғатқа антропогендік әсер ету табиғи экологиялық процестерге өзгеріс енгізеді және олардың өтуінің тепе-теңдігін бұзады. Жердің эко жүйесінің жұмысының ғаламдық және жергілікті бұзылысы пайда болады. Ластану заттардың табиғаттағы айналымының биогеохимиялық циклдарының өтуіне әсер етеді. Температура өзгереді, бұл атмосфералық айналымның және ылғалтасымалының өзгерісіне келтіреді. Өнеркәсіптік аймақтарда «жылу аралдары» түзіледі, «жылу ағындылары» суқоймалардың температуралық режиміне өте күшті әсер етеді.

Планета атмосферасына жылына 5 млрд.т., жуық зиянды заттар тасталады және антропогендік жаратылысты лақтырындылар энергияны қолданумен байланысты. Ал энергияны қолдану және жылулық энергияны алу, өз кезегінде, әртүрлі отындарды түрін жағу процестерімен тікелей байланысты.

Өнеркәсіптік кәсіпорындар үлкен проблемалар тудырады. Олардан 30-50 км радиусте зиянды заттарды тастау концентрациясының жоғарылығы байқалады.

Отынның кез келген түрінің жануының экологиялық зиянды өнімдерінің қатарына жататындар: азот оксиді (NO , NO_2), көміртегі оксиді (CO), әртүрлі көмірсутектер (CH), күйе (C), және қорғасын мен күкірт құрамды қосылыстар және күл бөлшектері. Күл қатты отын жанғанда түзіледі және жанудың газ тәріздес өнімдерімен бірге шығып кетеді. Қатты отынды жағудың қабатты процесі кезінде, металлургияда шикіқұрамның бөлшектері де тастандыға өтеді.

Лақтырындыларды талдаудың көрсетуінше антропогендік жаратылысты лақтырындылар мөлшері, т/жылына: $\sim 3 \cdot 10^8$ – CO , $1 \cdot 10^8$ – NO_x , $1,2 \cdot 10^8$ – SO_x , $(1-2) \cdot 10^8$ қатты бөлшектер, $2 \cdot 10^8$ жуық – CO_2 , бенз(а)пирен ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) құрайды. Азот және күкірт оксидтері лақтырындыларының жартысына жуығы жылулық электрстанцияларының үлесіне келеді.

Зиянды заттардың адамға және басқа тірі организмдерге әсерінің қатынасына қарай, оларды *улы* және *канцерогенді* деп бөледі.

Улы (грек. toxikon – у) деп адам ағзасына және қоршаған ортаға жағымсыз әсер ететін заттарды атайды. Негізгі улы заттар қатарына жататындар: азот оксиді (NO_x), көміртегі оксиді (CO), әртүрлі көмірсутектер (CH), күйе және қорғасын мен күкірт құрамды қосылыстар.

Жанудың улы өнімдерін тастайтын негізгі көздер: өнеркәсіптік кәсіпорындар, көліктер, жылу және электрстанциялары. Кейбір қалаларда атмосферадағы жанудың улы өнімдерінің мөлшері шекті ұйғарынды концентрациядан ондаған есеге асып кетеді.

Канцерогендікке (грек. cancer – рак, genes – тудырушы) бензапирен ($C_{20}H_{12}$) жатады. Канцерогендік заттар адам ағзасынан шықпайды, уақыт өткен сайын жиналып, қатерлі ісіктердің түзілуіне мүмкіндік туғызады.

Әртүрлі отынды өнеркәсіптік жағу кезіндегі бензапиреннің ($C_{20}H_{12}$) максималь мөлшері ($\alpha = 1,03$ болғанда): табиғи газдан – $1 \cdot 10^{-4}$ мг/м³; кокстық газдан – $1 \cdot 10^{-3}$ мг/м³; мазуттан – $2 \cdot 10^{-3}$ мг/м³. Түтіндегі CO және H_2 мөлшері санитарлық нормадан төмен болғанда (0,05 %), жоғары температуралы процестердің шығатын газдарындағы $C_{20}H_{12}$ концентрациясы күрт төмендейді ($5 \cdot 10^{-6}$ мг/м³ төмен). $C_{20}H_{12}$ түзілу механизмі әлі де зерттелуде.

6.4.1. Жану өнімдерінің улы газдары

Есептеулері 1 тарауда келтірілген жану өнімдері, әртүрлі жылутехникалық қондырғылардың энергетикалық және экологиялық көрсеткіштеріне көп әсер етеді. Дегенмен, бұл өнімдерден өзге, жану кезінде бірқатар басқа да заттар түзіледі. Мөлшерінің аз болуына байланысты олар энергетикалық есептеулерде ескерілмейді, бірақ қазіргі жылутехникасының оттықтарының, пештерінің, жылулық қозғалтқыштарының және басқа құрылғыларының экологиялық көрсеткіштерін анықтайды.

Бірқатар зиянды заттардың қоршаған ортаға келтіретін әсері мен негізгі сипаттамаларын қарастырайық.

Азот оксиді. Отынның жануы кезінде негізінен азот оксиді түзіледі, ол содан соң атмосферада NO_2 дейін тотығады, оның улылығы NO салыстырғанда 7 ретке жоғары. NO түзілуі газдар температурасы мен оттегі концентрациясының артуымен

жоғарылайды және отынның көмірсутекті құрамына тәуелді болмайды. Атмосферадағы NO_2 – үлкен концентрацияда тұншықтыратын иісті, қызыл-қошқыл түсті газ, ол көздің шырышты қабыршығына жағымсыз әсер етеді, концентрациясы 200-300 мг/м³ болғанда өкпенің қабынуына келтіреді. Атмосфералық ылғалмен әрекеттесіп, азот оксидтері металдар коррозиясын тудыратын, өсімдіктерді жоятын, т.б. азот қышқылын түзейді.

Көміртегі оксиді (CO) жану кезінде оттегінің жетімсіздігінен немесе CO_2 ыдырауымен түзіледі. CO түзілуіне негізгі әсер етуші – қоспа құрамы: ол бай болған сайын, CO концентрациясы жоғары. Қара металлургияда CO шығысы: агломерациялық өндірісте – 54 %, домналық өндірісте – 27 % құрайды. Көміртегі оксиді – түссіз және иіссіз газ. Тыныс алу кезінде ауамен қосылып қан гемоглобинімен қарқынды байланысады, бұл ағзаның оттегімен қамтамасыздану қабілетін төмендетеді. Ағзаның CO газымен улану белгілері: бас ауруы, жүрек соғуы жиілігінің өзгеруі, тыныс алу қиындығы және лоқсу.

Көмірсутектер (CH) жануға қатыспаған бастапқы немесе отынның ыдыраған молекулаларынан тұрады. Көмірсутектер күн сәулесінің әсерінен NO_x әрекеттесіп, биологиялық активті заттар түзей алады. Бұл адамның тыныс алу ағзаларына зиян келтіреді. Әсіресе, бензолдың, толуолдың, полициклдік ароматикалық көмірсутектердің, және бірінші кезекте бензапиреннің ($C_{20}H_{12}$) лақтырындылары ерекше әсер етеді. Улылығы жоғары заттардың бұл тобы, 600 – 700 К температурада отынның жеңіл және орташа фракцияларының пиролизі нәтижесінде түзіледі.

Газ тәріздес төменгі молекулярлық көмірсутектер адам ағзасына есірткідей әсер етіп, шалқыма күйді тудырады, бұл жол апаттары ықтималдығын арттырады. Максималь – бір мезгілдік ШҰК 5 мг/м³ құрайды.

Күйе – негізінен көміртегіден тұратын қатты өнім. Көміртегіден өзге оның құрамында 1-3 % (массасы бойынша) сутегі болады. Күйе 1500 К жоғары температурада, оттегінің көп мөлшерде жетіспеуімен, термиялық ыдыраудың (пиролиздің) көлемдік процесі нәтижесінде түзіледі. Ол – тыныс жолдары мен өкпені механикалық ластаушы. Ең үлкен қауіптілігі,

бөлшектерінің беттігінде канцерогендік заттарды жинау және оны тасу қасиеттерімен байланысты.

Қорғасын және күкірт. Бензиннің құрамындағы қорғасынның 50-70 % істен шыққан газдармен бірге, қорғасын тұздары түрінде, атмосфераға тасталады, яғни диаметрі 1 мкм аз бөлшектер түрінде. Бұл бөлшектер адам ағзасына ауамен және тері арқылы енеді. Қорғасын қосылыстары өте улы және ағзадан арылмайды, онда жиналады және орталық жүйке жүйесіне жағымсыз әсер етеді. Дизельдік отын, мазут және тас көмір құрамындағы күкірт, отын жанғаннан соң диоксид SO_2 нысанында атмосфераға тасталады. Ол өсімдіктер үшін өте зиянды және «қышқыл» жауынның болуына мүмкіндік тудырады. Істен шыққан газдар құрамында қорғасын мен күкірт қосылыстарының болуы, газдың улылығын төмендетуге арналған бейтараптандырғыштарды қолдануға мүмкіндік бермейді.

Қара металлургияда SO_2 тасталуы келесі өндірістерде өте жоғары: агломерацияда – 45 %; домнада – 14 %, коксхимияда – 6 %, салыстыру үшін – ОЭЦ-да лақтырындысында – 18 %.

6.4.2. «Парниктік эффект» зардаптары

Көміртекті отындардың негізгі жану өнімдерінің бірі, улы газдар қатарына жатпайтын көміртегі диоксиді (CO_2). Оның жылдық эмиссиясы жылына 130-1100 млрд т құрайды. CO_2 негізгі мөлшері табиғи көздерден өндіріледі, тек жуық шамамен 1-3 % адамның техникалық іс-әрекетімен байланысты (антропогендік лақтырындылар). Дегенмен, осы 1-3 % атмосферадағы тепе-теңдікті бұзады және «парниктік эффектінің» пайда болуына себепкер болады.

Атмосфераның жоғарғы қабаттарында, барлық уақытта, 60 – 90 % су буынан тұратын газдар қоспасы орналасқан. Осы газдар қоспасы біздің планетамыздың бетінен, оның орташа температурасын 33 °C (–18 °C-дан +15 °C дейін) жоғарылатып, жылудың кетуіне кедергі келтіреді. Жер бетіндегі орташа температураның жоғарылауы «парниктік эффектіні» түсіндіреді, және сол Жер бетіндегі тіршіліктің пайда болуы мен дамуына оңтайлы жағдайлар туғызды. Дегенмен, адамның іс-әрекетінің

нәтижесінде стратосфера мен тропосферада CO_2 , CH_4 , галогенденген көмірсутектер, озон және азот гемеоксиді (NO_2) сияқты заттар жинала бастады. Бұл газдардың «парниктік» қабаттағы қосынды үлесі салыстырмалы үлкен емес, бары-жоғы 0,5-15 % ғана. Дегенмен, олар соңғы 100 жылда орташа температураның $0,45^\circ C$ жоғарылауына себеп болды, бұл климаттың белгілі жылуынан байқалды. Ары қарай «парниктік» эффект бақылауға алынбаса, мұздардың қарқынды еруі жүріп, ол бүкіл жер шарын қамтитын апатқа келтіреді.

Бүкіл антропогендік «парниктік» газдар ішінен «парниктік» эффектін күшеюінде CO_2 басты маңызды газ болып саналады. Оның негізгі көздері: жылу- және электрстанциялары – 27 %, өнеркәсіп – 20 %, тұрғын үй жылыту жүйелері – 20 %, көлік – 17 %. CO_2 антропогендік лақтырындысын азайту өзекті экологиялық мәселеге айналды. Сонымен қатар, көмірсутекті отындардың жануы кезінде қаншалықты CO_2 көп түзілсе, соншалықты отын жетілдірілген болып саналады. Сондықтан CO_2 антропогендік лақтырындыларды азайту проблемасын келесі жолдармен шешуге болады деп есептейміз:

- жағылатын көмірсутекті отындардың көлемін азайту, яғни жылуэнергетикалық құрылғылар мен жылу қозғалтқыштарының отынды үнемдеуін жоғарылату;
- құрамында көміртегінің мөлшері төмен отындарды пайдалану (сығылған және сиретілген газдар, спирттер және эфирлер);
- сутегіні қолдану;
- энергияның басқа тиімді көздерін кеңінен қолдануға өту (күннің және желдің энергиясы, гидроэнергия, атомдық және ядролық энергия).

6 тарау бойынша бақылау сұрақтары

1. Қайтарма энергетикалық ресурстар және қайтарма материалдық ресурстар ұғымдарына түсінік беріңіз.
2. Қайтарма энергетикалық ресурстар сыныптамасы.
3. Жылулық қайтарма энергетикалық ресурстар анықтамасы, сұлбасы.

4. Қайтарма энергетикалық ресурстар шығысы дегеніміз не және ол қалай есептеледі?
5. Отын шығынын қалай төмендетуге болады?
6. Шығатын газдарды пайдалану сұлбаларын түсіндіріңіз.
7. Қайтарма ресурстарды пайдалану жолдары.
8. Рекуператор туралы не білесіз?
9. Рекуператордағы жылу ағысының сұлбаларын түсіндіріңіз.
10. Рекуператорлар сыныптамасы, салыстырмалы сипаттамалары.
11. Жылуды қолданудың экологиялық аспектілері.
12. Жану процесінің зиянды өнімдерін атаңыз және сипаттаңыз.
13. Отынның жануы кезінде бөлінетін улы газдардың адам ағзасына, қоршаған ортаға қауіпті әсерлері.
14. Парниктік эффект деген не және ол қалай пайда болады?
15. Қайтарма энергетикалық ресурстардың технологиялық сұлбаларының сипаттамасы.
16. Энергетикалық сұлбаларының сипаттамасы.
17. Құрамдастырылған сұлбаларының сипаттамасы.
18. Дайындалатын материалдардың түріне қарай рекуператорлардың сыныпталуы.
19. Радиациялық рекуператорлардың типтері, олардың басымдылығы мен кемшіліктері.
20. Кәдегеуіш-қазандық туралы не білесіз?
21. Улы және канцерогендік зиянды заттардың анықтамалары.
22. Парниктік эффектінің күшеюіне әсер етуші газ.
23. Антропогендік лақтырындыларды азайту жолдары.
24. Ауадағы қорғасын қосылыстарының зияндылығы.
25. Күкірт диоксидінің қоршаған ортаға келтіретін зиянды әсерлері.
26. Шекті ұйғарынды концентрация (ШҰК) деген не?
27. Қара металлургияда шығатын газдардың ШҰК.

ҚОРЫТЫНДЫ

Осы оқу құралын бір рет болса да қолына алып оқыған оқушы, жылу туралы ғылымның білімдегі кең ауқымды және күрделі, тәжірибе үшін өте маңызды саласы екеніне көз жеткізген болар. Жылу техникасы ғылымының негіздері қысқаша баяндалған оқу құралының өзі, әртүрлі сыртқы және ішкі факторлардың энергия түрлерінің бір-біріне ауысуына, жылуалмасу процесінің қарқындылығына, отынның жануы кезінде өтетін процестердің нәтижесіне қандай әсері барын зерделеуге мүмкіндік береді. Әсіресе, жылу техникалық жабдықтарды жобалау, дайындау және пайдалану кезінде туындайтын маңызды тәжірибелік мәселелерді шешуде қолданылатын талдамалы және эксперименттік әдістердің көптігін, түрлілігін және күрделілігін оқушы байқаған шығар.

Әрине, түсіну және игеру үшін қиындық туғызатын күрделі материалдар да бар. Дегенмен, оқу құралын дайындау барысында автор, студенттердің кітаппен жұмыс істеуін жеңілдету мақсатында, материалдың баяндалуын барынша қарапайым, түсінікті беруге тырысты. Десек те, жылу техникасын, оның ішінде металлургиялық өндірістерге қатысты жылулық процестерді игеру едәуір шыдамдылықты, ынталылықты, ой еңбегін, ақыл қабілетін, тырысуды, т.б. ой әрекеттерін талап етеді. Кейбір күрделі теориялық тақырыптар, дәріс оқу барысында қарапайым, тіршіліктегі мысалдармен түсіндіріледі. Оның бәрін оқу құралында сипаттап жазу мүмкін емес, сондықтан студенттердің дәрістік сабақтарды жібермей, қатысқаны жөн.

Металлургия мамандығы бойынша базалық курстардың бірі болып саналатын бұл пәннің маңыздылығы жылдар бойына созылады (жоғарғы курстарда өтетін технологияға қатысты пәндерді оқуда; дипломдық жұмысты немесе дипломдық жобалауды орындау және қорғау барысында; мамандығыңыз бойынша жұмыс істегенде; оқуды ары қарай жалғастырғанда), көптеген техникалық шешімдер жылу техникасының ұғымдарына, анықтамаларына, заңдылық-тарына негізделеді.

Ұлы ғалымдармен, белгілі зерттеушілермен, инженерлермен табиғаттан түйірлеп жиналған ғылыми ойдың жетістіктерін оқып-түсінуге, оны тәжірибеде қолдануға осы оқу құралының септігі тиер деп үміттенеміз.

Таңдаған мамандығыңызды игеру жолында алатын біліміңіз табысты болсын!

БИБЛИОГРАФИЯЛЫҚ ТІЗІМ

1. *Р. А. Кабашев, А. К. Кадырбаев, А. М. Кекилбаев.* Жылу техникасы. – Алматы: Бастау, 2008. – 425 б.
2. *Ә. Жантөреев.* Термодинамика және жылу беріліс. – Алматы: ҚазҰТУ, 2002. – 187 б.
3. *А. П. Баскаков.* Теплотехника. –М.: Энергоатомиздат, 1991. –244 с.
4. *Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков.* Процессы переноса в неоднородных средах. – Л.: Наука, 1991. – 247 с.
5. *Б. Н. Юдаев.* Техническая термодинамика и теплопередача. –М.: Metallurgy, 1988. – 479 с.
6. *Н. М. Беляев, А. А. Рядно.* Методы нестационарной теплопроводности. –М.: Metallurgy, 1978. – 328 с.
7. *В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел.* Теплопередача. –М.: Высшая школа, 1981. – 417 с.
8. *В. А. Кривандин.* Metallургическая теплотехника. Т. 1. Теоретические основы. – М.: Metallurgy, 1986. – 424 с.
9. *В. А. Кривандин.* Metallургическая теплотехника. Т. 2. Конструкции и работа печей. – М.: Metallurgy, 1986. – 592 с.
10. *В. И. Миткалинный, В. А. Кривандин.* Metallургические печи. Атлас. – М.: Metallurgy, 1987. – 384 с.
11. *В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др.* Теплотехника. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.
12. *А. С. Телегин.* Теплотехнические расчёты metallургических печей. – М.: Metallurgy, 1987. – 528 с.
13. *М. А. Глишков., Г. М. Глишков.* Общая теория тепловой работы печей. Учебник для вузов. – М.: Metallurgy, 1990. – 232 с.
14. *В. В. Кобахидзе.* Тепловая работа и конструкции печей цветной metallургии: Учебник для вузов. – М.: МИСиС, 1994. – 356 с.
15. *В. А. Кривандин, В. В. Белоусов, Г. С. Сборщиков и др.* Теплотехника metallургического производства [Текст] Учеб. для вузов: в 2 т. /– М.: МИСиС, 2001. – 336 с.
16. *С. М. Тинькова.* Теоретические основы теплогенерации. – Красноярск: ГАЦМиЗ. 1998. – 203 с
17. *В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко.* Механика жидкости и газа. – М.: Академкнига», 2002. – 400 с.

18. Огнеупоры для нагревательных и термических печей. Справочник/Под ред. И. Д. Кашеева. – М.: Теплотехник, 2002. – 240 с.
19. В. Л. Гусовский, А. Е. Лифшиц. Методики расчета нагревательных и термических печей. – М.: Теплотехника, 2004. – 400 с.
20. В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. Плавильные агрегаты: теплотехника, управление и экология. В 4-х кн. – М.: Теплотехник, 2005.
21. К. К. Стрелов, И. Д. Кашеев. Производство огнеупоров. – М.: Академкнига, 2003. – 640 с.
22. В. Д. Румянцев, В. М. Ольшанский. Теплотехника. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 325 с.
23. Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. Печи черной металлургии. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 154 с.
24. В. И. Губинский. Металлургические печи. – Днепропетровск: НМетАУ, 2006. – 83 с.
25. Ю. И. Розенгарт, Б. И. Якобсон, З. А. Мурадова. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование – К.: Вища школа, 1988. – 328 с.
26. В. И. Ляшков. Теоретические основы теплотехники. – М.: Машиностроение – 1, 2005. – 260 с.
29. Б. Б. Овечкин. Основы теплотехники. Перенос энергии и массы. – Томск: ТПУ, 2006. – 106 с.
30. Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. Теоретические основы металлургической теплотехники. – Днепропетровск: Пороги, 2002. – 226 с.
31. А. С. Ртищев. Теоретические основы гидравлики и теплотехники. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 171 с.
32. М. А. Михеев, И. М. Михеева. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 344 с.
33. Б. П. Тебеньков. Рекуператоры для промышленных печей. – М.: Металлургия, 1985. – 404 с.
34. Л. В. Лифенцева. Теплотехника. – Кемерово: КемТИПП, 2007. – 101 с.
35. М. Я. Кордон, В. И. Симакин, И. Д. Горешник. Теплотехника. – Пенза: ПГУ, 2005. – 167 с.

Қосымшалар

СИ жүйесіндегі физикалық шамалардың негізгі, қосымша және кейбір туынды бірліктері

Шамалар	Өлшем бірлігі	Бірліктің қысқартылған белгісі
Негізгі бірліктер		
Ұзындық	метр	м
Масса	килограмм	кг
Уақыт	секунд	с
Электр тогының күші	Ампер	А
Термодинамикалық температура	Кельвин	К
Зат саны	моль	моль
Жарық күші	кандела	кд
Кейбір туынды бірліктер		
Аудан	квадрат метр	м ²
Көлем, сыйымдылық	куб метр	м ³
Жылдамдық	метр секундына	м/с
Үдеу	метр квадрат секундқа	м/с ²
Күш, салмақ	Ньютон	Н; (кг·м/с ²)
Қысым	Ньютон квадрат метрге	Н/м ²
Тығыздық	килограмм куб метрге	кг/м ³
Меншікті көлем	Куб метр килограмға	м ³ /кг
Энергия, жұмыс, жылу мөлшері, энтальпия	Джоуль	Дж; (Н·м)
Қуат, жылу ағыны	Ватт	Вт; (Дж/с)
Меншікті массалық жылусыйымдылық	Джоуль килограмм - кельвинге	Дж/(кг·К)
Температуралық коэффициент	Кельвиннің минус бір дәрежесі	К ⁻¹
Температура градиенті	Кельвин метрге	К/м
Жылу ағынының тығыздығы	Ватт квадрат метрге	Вт/м ²
Жылуөткізгіштік	Ватт метр кельвинге	Вт/(м·К)
Жылуалмасу, жылуберу коэффициенті	Ватт квадрат метр кельвинге	Вт/(м ² ·К)

Температура өткізгіштік	Квадрат метр секундқа	$\text{м}^2/\text{с}$
Сәуле шығару коэффициенті	Ватт квадрат метр-кельвиннің төрт дәрежесіне	$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

Түгінді газдардың физикалық қасиеттері

($p=760$ мм сын.бағ. $\approx 1,01 \cdot 10^5$ Па; $r_{\text{CO}_2} = 0,13$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,11$)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$c_p, \text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,295	1,042	2,28	16,9	15,8	12,20	0,72
100	0,950	1,068	3,13	30,8	20,4	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	48,9	24,5	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	69,9	28,2	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,7	94,3	31,7	60,38	0,54
500	0,457	1,185	6,56	121,1	34,8	76,30	0,63
600	0,406	1,214	7,42	150,9	37,9	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	183,8	40,7	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	219,7	43,4	131,8	0,60
900	0,301	1,290	10,0	258,0	45,9	152,5	0,59
1000	0,275	1,306	10,90	303,4	48,4	174,3	0,58
1100	0,257	1,323	11,75	345,5	50,7	197,1	0,57
1200	0,240	1,340	12,62	392,4	53,0	221,0	0,56

Металдардың және қорытпалардың тығыздығы ρ , жылуөткізгіштігі λ , жылусыйымдылығы c_p ($\rho = 0,1$ МПа; $t = 20^\circ\text{C}$)

Элементтің атауы	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	$c_p, \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
Алюминий	2700	209	0,896
Қола (75 % Cu, 25 % Sn)	8660	25,9	0,344
Вольфрам	19340	169	0,134
Дюралюминий	2800	164	0,884
Темір	7880	74	0,44
Алтын	19310	313	0,130
Калий	870	100	0,737
Жез (70 % Cu, 30 % Zn)	8520	110,7	0,385
Литий	534	68,6	3,31

Магний	1760	158	0,975
Мыс	8930	390	0,388
Молибден	10214	136,9	0,251
Натрий	975	109	1,20
Никель	8900	67,5	0,427
Қалайы	7300	66,3	0,222
Платина	21460	69,8	0,132
Қорғасын	11350	35,1	0,127
Күміс	10500	419	0,234
Болат 45	7794	32	0,560
Көміртекті болат (C = 0,5 %)	7830	53,6	0,465
Тот баспайтын болат IX18H9T	7900	16	0,502
Титан	4540	15,1	0,531
Көміртегі, графит	1700-2300	174	0,67
Мырыш	7150	113	0,384
Шойын (C = 4 %)	7270	51,9	0,419

Әртүрлі материалдардың толық сәулеленуінің қаралық дәрежесі

Материал атауы және беттің сипаты	t, °C	ε
Алюминий:		
– жылтырланған	225-575	0,039-0,057
– 600 °C кезінде тотыққан	200-600	0,11-0,19
Вольфрам	230-2230	0,053-0,31
Вольфрам жібі	3300	0,39
Темір:		
– электролиттік, жылтырланған	175-225	0,052-0,064
– пісірілетін, жылтырланған	40-250	0,28
– жаңадан өңделген	20	0,242
– құйылған, өңделмеген	925-1115	0,87-0,95
Болат құйма, жылтырланған	770-1040	0,52-0,56
Болат:		
– табакты, жылтырланған	940-1100	0,52-0,61
– 600 °C кезінде тотыққан	200-600	0,79
– тотыққан, кедір-бұдырлы	40-370	0,94-0,97
Шойын:		
– жылтырланған	200	0,21
– 600 °C кезінде тотыққан	200-600	0,64-0,78

– күшті тотыққан, кедір-бұдырлы	40-250	0,96
Алтын, ұқыпты жылтырланған	225-625	0,018-0,035
Жез:		
– ұқыпты жылтырланған, құрамы (массасы бойынша) (73,2 % Cu; 26,7 % Zn)	245-355	0,028-0,031
– илектелген, табиғи беттікті	22	0,06
– көмескі	50-350	0,22
– 600 °C дейін қыздырғанда тотыққан	200-600	0,61-0,59
Мыс:		
– электролиттік, жылтырланған	80	0,018
– жылтырланған	115	0,023
– 600 °C дейін қыздырғанда тотыққан	200-600	0,57-0,55
Жылтырланған таза жолақ	225-625	0,054-0,105
Платина:		
– лентасы	925-1115	0,12-0,17
– жібі	25-1230	0,036-0,192
– сымы	225-1375	0,073-0,182
Хром	38-538	0,08-0,26
Отқа төзімді, құрылыс, термоқшаулаушы және басқа материалдар		
Асбест картон	24	0,96
Отқа төзімді материалдар:		
– әлсіз сәулеленетін	500-1000	0,65-0,75
– күшті сәулеленетін	500-1000	0,80-0,90
Шамот кірпіш	1100	0,75
Динас кірпіші	1100	0,85
Әкті сылақ	10-90	0,91

МАЗМҰНЫ

Алғы сөз.....	3
Кіріспе.....	5
1. Отындардың сыныптамасы және отынның жану теориясының негіздері.....	9
1.1. Отынның сыныптамасы мен құрамы.....	9
1.2. Отынның жану жылуы.....	19
1.3. Жану теориясының элементтері.....	21
1.4. Отынның жануын есептеу.....	27
1.4.1. Ауа шығынын анықтау.....	28
1.4.2. Отынның жану өнімдерінің құрамы мен мөлшері.....	31
1.4.3. Отынның жану температурасын есептеу.....	34
1 тарау бойынша бақылау сұрақтары.....	37
2. Жылуалмасу теориясының негізгі ұғымдары мен заңдары.....	38
2.1. Жылуалмасу процестерінің сыныптамасы.....	38
2.2. Фурье заңы – жылуөткізгіштіктің негізгі заңы..	42
2.3. Жылудың жылуөткізгіштікпен берілуі.....	45
2.4. Орныққан режим кезіндегі жылуөткізгіштіктің жеке есептеулері.....	51
2.5. Конвекция. Конвективті жылуалмасуға әсер етуші факторлар.....	55
2.5.1. Гидродинамикалық және жылулық шекаралық қабаттардың маңызы.....	57
2.5.2. Ньютон – Рихман заңы.....	59
2.5.3. Ұқсастық теориясының негіздері және модельдеу.....	60
2.6. Жылутасымалдау.....	70
2.7. Сәулелі жылу алмасу.....	75
2.7.1. Сәулелі ағындар түрлері.....	77
2.7.2. Сәулелі жылуалмасудың негізгі заңдары.....	79
2.7.2.1. Планк заңы.....	80
2.7.2.2. Бғысу (Вин) заңы.....	81
2.7.2.3. И. Стефан – Л. Больцман заңы.....	82
2.7.2.4. Кирхгоф заңы.....	83
2.7.2.5. Ламберт заңы.....	84
2.7.3. Экран орнатқан кездегі сәулелі жылуалмасу.....	86

2.7.4.	Пеш қабырғасындағы терезе немесе саңылаулар арқылы сәулелену.....	88
2.7.5.	Газдар мен булардың сәулеленуі.....	89
2	тарау бойынша бақылау сұрақтары.....	90
3.	Сұйықтар мен газдар механикасы.....	92
3.1.	Механиканың негізгі ұғымдары.....	92
3.2.	Пештегі газдар механикасының негіздері.....	94
3.3.	Бернулли теңдеуі.....	95
3.4.	Арындарды өлшеу.....	98
3.5.	Құбырлар мен каналдарда газ қозғалысы кезінде энергияның жоғалуы.....	99
3.6.	Қозғалыстағы ағын арынының жоғалымы.....	101
3.7.	Газдың каналдарда төменгі жылдамдықта қозғалуы.....	103
3.8.	Түгін құбырын есептеу.....	106
3	тарау бойынша бақылау сұрақтары.....	108
4.	Металлургия өндірісі пештерінің сыныптамасы. Пештің жылу балансы.....	109
4.1.	Пештер сыныптамасы.....	110
4.1.1.	Жылу өндіру принципі бойынша пештердің сыныпталуы.....	111
4.1.2.	Технологиялық тағайындалуы мен жұмыс режимі бойынша пештердің сыныптамасы.....	113
4.2.	Пештердің технологиялық тізбектегі орыны және жылулық жұмысының көрсеткіштері.....	115
4.2.1.	Металлургиядағы технологиялық тізбектер.....	115
4.2.2.	Пештердің жылулық жұмысы.....	118
4.3.	Пештің жылу балансын құру және отын шығыны.....	121
4.3.1.	Электрпештері мен қыздырғыш элементтерді есептеу.....	125
4	тарау бойынша бақылау сұрақтары.....	128
5.	Пеш құрылысының материалдары мен элементтері.....	129
5.1.	Жалпы мәліметтер.....	129
5.2.	Отқа төзімділердің сыныптамасы және жалпы қасиеттері.....	131
5.2.1.	Отқа төзімділердің сыныптамасы.....	132

5.2.2.	Отқа төзімділер өндірісінің принципті сұлбасы.	137
5.2.3.	Отқа төзімділер құрылымы.....	139
5.3.	Отқа төзімділердің жұмысшы қасиеттері.....	143
5.4.	Отқа төзімділердің физикалық қасиеттері.....	153
5.5.	Металлургияда қолданылатын отқа төзімділердің қысқаша сипаттамасы.....	158
5.5.1.	Кремнеземді отқа төзімділер.....	158
5.5.2.	Алюмосиликатты отқа төзімділер.....	160
5.5.3.	Жоғары глинеземді отқа төзімділер.....	163
5.5.4.	Магнезиалды негізді отқа төзімділер.....	164
5.5.5.	Басқа да отқа төзімділердің қысқаша сипаттамалары.....	165
5.6.	Отқа төзімді бетондар және толтырғыш массалар.	168
5.7.	Жылу оқшаулаушы материалдар.....	172
5.8.	Қазақстандағы отқа төзімді материалдар шикізаттарының кен орындары.....	174
5.9.	Пеш құрылысының элементтері.....	175
5.9.1.	Құрылыс материалдары.....	176
5.9.2.	Пештің құрылыс элементтері.....	177
5 тарау бойынша бақылау сұрақтары.....		182
6.	Материалдық және энергетикалық қайтарма ресурстар. Жылуды қолдану кезіндегі экологиялық мәселелер.....	184
6.1.	Қайтарма энергоресурстардың сыныптамасы...	184
6.2.	Пештегі отын шығынын төмендету бағыттары.	187
6.3.	Қайтарма энергоресурстарды пайдалану.....	189
6.4.	Жылуды пайдалану кезіндегі экологиялық мәселелер.....	193
6.4.1.	Жану өнімдерінің улы газдары.....	194
6.4.2.	«Парниктік эффект» зардаптары.....	196
6 тарау бойынша бақылау сұрақтары.....		197
Қорытынды.....		199
Библиографиялық тізім.....		201
Қосымшалар.....		203
Мазмұны.....		207

Оқулық басылым

Баймаханова Сауле Баймаханқызы

МЕТАЛЛУРГИЯ ЖЫЛУТЕХНИКАСЫ

Оқу құралы

РБ бастығы

З.А. Ғубайдулина

Редакторы

А.И. Бейсебаева

Компьютерде беттеген

А.Б. Аршиова

Басуға қол қойылды 16.05.2014 ж.

Таралымы 300 дана. Пішімі 60x84x1/16. №1 баспаханалық қағаз.

Шартты б.т. 12,1. Көлемі 13,1 есепті б.т. Тапсырыс №15.

Бағасы келісімді.

Қ.И.Сәтбаев атындағы

Қазақ ұлттық техникалық университетінің басылымы,

Оқу-баспа орталығы.

Алматы, Сәтбаев көшесі, 22

ISBN 978-601-228-612-0

