**Саттинова З.К., Достияров А.М., Рамазанова Г.I., Өмірбаева А.Ө**

**ТЕХНИКАЛЫҚ ТЕРМОДИНАМИКА**

(оқулық)

**Астана – 2017**

**УДК 621.1**

Рецензенттер: С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, жылуэнергетика кафедрасының профессоры, т.ғ.д. Баубеков Қ.Т., Е.А. Букетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті, физика-техникалық факультеттің профессоры, т.ғ.к. Нүсіпбеков Б.Р., Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, жылуэнергетика кафедрасының профессоры, т.ғ.д. Алимгазин А.Ш.

**Саттинова З.К., Достияров А.М., Рамазанова Г.I., Өмірбаева А.Ө**

Техникалық термодинамика оқулығы жылуэнергетика мамандығы студенттеріне арналған. /Астана, 2017. – 299 с.

**ISBN 5-06-003712-6**

Оқулық термодинамиканың заңдарын, Карноның тура және қайтымды циклдарын, сипаттаушы функциялар мен термодинамикалық потенциалдар, су буы және оның қасиеті, жылулық машина-іштен жану двигателінің, газтурбиналы циклдары, бу қондырғыларын, газ ағыны термодинамикасын, компрессорлық, мұздатқыш машиналары, химиялық термодинамика элементтерін, плазма термодинамикасын қарастыратын 12 тараудан тұрады.

Оқулық «жылуэнергетика» мамандығы студенттеріне техникалық термодинамика курсын терең меңгеру үшін арналаған.

**МАЗМҰНЫ**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **КІРІСПЕ** | | | | |
| **I ТАРАУ** | | | | |
| §1.1 | | Техникалық термодинамика -жылу энергетикасының теориялық негізі................................................................................. | | 9 |
| §1.2 | | Термодинамикалық жүйе және қоршаған орта........................... | | 9 |
| §1.3 | | Термодинамикалық күй параметрлері........................................... | | 10 |
| §1.4 | | Термодинамикалық процесс............................................................ | | 12 |
| §1.5 | | Күй теңдеуі......................................................................................... | | 14 |
| §1.6 | | Нақты газдардың күй теңдеуі ......................................................... | | 15 |
| §1.7 | | Термиялық коэффициенттер және олардың арасындағы байланыс............................................................................................ | | 17 |
| §1.8 | | Жылу. Джоуль тәжірибесі. Жылу мен жұмыстың эквиваленттілігі................................................................................. | | 19 |
| §1.9 | | Энергия. Ішкі энергия........................................................................ | | 21 |
| §1.10 | | Термодинамиканың бірінші заңы.................................................... | | 22 |
| §1.11 | | Жылусыйымдылық ........................................................................... | | 26 |
| Бақылау сұрақтары......................................................................................... | | | | 29 |
| Есептердің шығарылуы.................................................................................. | | | | 29 |
| Бақылау есептері............................................................................................ | | | | 31 |
| **II ТАРАУ. ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ ЕКІНШІ ЗАҢЫ** | | | |  |
| §2.1 | | Процесстердің тепе-теңдігі және қайтымдылығы.......................... | | 33 |
| §2.2 | | Жылу машинасының жұмыс істеу шарттары. Термиялық ПӘК түсінігі............................................................................................... | | 35 |
| §2.3 | | Карно циклы. Цикл әдістері............................................................. | | 37 |
| §2.4 | | Қайтымды кері Карно циклы.......................................................... | | 40 |
| §2.5 | | Энтропия күй функциясы................................................................. | | 42 |
| §2.6 | | Энтропия. Термодинамикалық жүйе энтропиясының өсуі.......... | | 45 |
| §2.7 | | Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының бірігуі.... | | 47 |
| §2.8 | | Жалпыланған термодинамикалық Карно циклы. Жылу регенерациясы.................................................................................... | | 48 |
| §2.9 | | Эксергетикалық зерттеу әдісі. Энерияның түрленуінің эффективтілігі.................................................................................... | | 48 |
| §2.10 | | Жұмыс қабылеттілік функциясы. Эксергетикалық шығын және эксергетикалық ПӘК......................................................................... | | 50 |
| Бақылау сұрақтары.........................................................................................  Есептердің шығарылуы.................................................................................  Бақылау есептері............................................................................................ | | | | 55 |
| 56 |
| 59 |
| **III ТАРАУ. ИДЕАЛ ГАЗ КҮЙІ ӨЗГЕРІСІНІҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРІ** | | | | |
| §3.1 | Процесстерді зерттеудің жалпы сұрақтары...................................... | | | 61 |
| §3.2 | Изохоралық процесс............................................................................ | | | 61 |
| §3.3 | Изобаралық процесс............................................................................. | | | 64 |
| §3.4 | Изотермиялық процесс........................................................................ | | | 66 |
| §3.5 | Адиабаталық процесс.......................................................................... | | | 68 |
| §3.6 | Политропты процесс............................................................................ | | | 71 |
| Бақылау сұрақтары......................................................................................... | | | | 75 |
| Есептердің шығарылуы.................................................................................. | | | | 75 |
| Бақылау есептері............................................................................................. | | | | 77 |
| **IV ТАРАУ. СИПАТТАУШЫ ФУНКЦИЯЛАР МЕН ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ПОТЕНЦИАЛДАР** | | | | |
| §4.1 | Термодинамикалық функциялар қасиеті........................................... | | | 79 |
| §4.2 | Гомогенді және гетерогенді термодинамикалық жүйелер. Термодинамикалық тепе-теңдік........................................................... | | | 85 |
| §4.3 | Біртекті тұйықталған жүйедегі орнықтылық пен тепе-теңдік шарты...................................................................................................... | | | 89 |
| §4.4 | Фазалық тепе-теңдік шарты................................................................. | | | 91 |
| §4.5 | Фазалық ауысулар................................................................................. | | | 93 |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 94 |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 95 |
| Бақылау есептері.............................................................................................. | | | | 97 |
| **V ТАРАУ. СУ БУЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ** | | | | |
| §5.1 | Негізгі түсініктер мен анықтамалар.................................................... | | | 98 |
| §5.2 | Термодинамикалық фазалық диаграммасы. Клапейрон-Клаузиус теңдеуі................................................................................... | | | 99 |
| §5.3 | Су буының диаграммасы............................................................. | | | 101 |
| §5.4 | Су буының диаграммасы............................................................. | | | 102 |
| §5.5 | Су буының диаграммасы............................................................... | | | 104 |
| §5.6 | Су және су буының негізгі параметрлері............................................ | | | 105 |
| §5.7 | – диаграммаларында су буы күйінің өзгеру процесстері.. | | | 109 |
| §5.8 | Ылғал ауа. Абсолюттік ылғалдылық, ауада ылғалдылық болуы және салыстырмалы ылғалдылық........................................................ | | | 112 |
| §5.9 | Ылғал ауаның-диаграммасы............................................................ | | | 114  Кар |
|  |  | | |  |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 115 |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 116 |
| Бақылау есептері......................... .................................................................... | | | | 118 |
| **VI ТАРАУ. ГАЗ ЖӘНЕ БУ АҒЫНЫ** | | | |  |
| §6.1 | | Ағын үшін термодинамиканың бірінші заңы.................................. | | 119 |
| §6.2 | | Газ ағыны процесіндегі негізгі теңдеулер....................................... | | 123 |
| §6.3 | | Дыбыс жылдамдығы......................................................................... | | 125 |
| §6.4 | | Тарылған сопло арқылы идеал газ ағысы........................................ | | 130 |
| §6.5 | | Дыбыс жылдамдығы арқылы өту. Лаваль соплосы....................... | | 134 |
| §6.6 | | Үйкелісті адиабаталық ағыс.............................................................. | | 137 |
| 6.7 | | Нақты газдар мен будың ағысы........................................................ | | 140 |
| §6.8 | | Эжектордағы процесстер................................................................... | | 142 |
| §6.9 | | Газ және будың дроссельденуі.......................................................... | | 145 |
| §6.10 | | Газ қоспасын сипаттайтын шамалар................................................ | | 150 |
| §6.11 | | Газдардың араласуы………………………...................................... | | 154 |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 156  КарКр |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 157 |
| Бақылау есептері.............................................................................................. | | | | 161 |
| **VII ТАРАУ. КОМПРЕССОРЛЫҚ МАШИНА, ІШТЕН ЖАНУ ПОРШЕНЬДІК ДВИГАТЕЛЬ ЦИКЛДАРЫ. КОМПРЕССОРЛЫҚ МАШИНА ЦИКЛЫ** | | | | |
| §7.1 | | Бір сатылы компрессорлық машиналар циклы............................... | | 164 |
| §7.2 | | Компрессор білігінің қуаты мен пайдалы әсер коэффициенті..... | | 165 |
| §7.3 | | Көп сатылы компрессор.................................................................... | | 166 |
| §7.4 | | Іштен жану поршеньдік двигательдерінің циклдары.................... | | 168 |
| §7.5 | | Тұрақты көлемде жылу алатын іштен жану двигатель циклы...... | | 169 |
| §7.6 | | Тұрақты қысымда жылу алатын іштен жану двигатель циклы..... | | 172 |
| §7.7 | | Аралас жылу беретін іштен жану двигатель циклдары. Тринклер циклы................................................................................. | | 174 |
| §7.8 | | Жылулық двигательдердің жиынтық циклі.................................... | | 176 |
| §7.9 | | Іштен жану поршенді двигательдердің циклі................................. | | 179 |
| §7.10 | | Стирлинг двигателінің циклы.......................................................... | | 184 |
| Бақылау сұрақтары......................................................................................... | | | | 187 |
| Есептердің шығарылуы.................................................................................. | | | | 188 |
| Кар -Кр | | | |  |
| Бақылау есептері............................................................................................. | | | | 190 |
| **VIII ТАРАУ. ГАЗТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР ЦИКЛЫ МЕН РЕАКТИВТІ ДВИГАТЕЛЬДЕР** | | | | |
| §8.1 | | Газ турбинасы қондырғысының құрылымы.................................... | | 191 |
| §8.2 | | Тұрақты қысымда жылу алатын ГТҚ-ның циклы........................... | | 192 |
| §8.3 | | Тұрақты көлемде жылу алатын ГТҚ циклдары……….…............. | | 194 |
| §8.4 | | ГТҚ термиялық пайдалы әсер коэффициентін арттыру әдістері. | | 196 |
| §8.5 | | Сұйық және ауа реактивті двигательдері. Реактивті двигательдер циклы........................................................................... | | 203  Кар -Кр |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 212 |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 212 |
| Бақылау есептері.............................................................................................. | | | | 214 |
| **IX ТАРАУ. БУ ТУРБИНАЛЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫ** | | | | |
| §9.1 | | Карно циклы....................................................................................... | | 216 |
| §9.2 | | Ренкин циклы..................................................................................... | | 217 |
| §9.3 | | Жұмысшы дене параметрлері арқылы бу қондырғыларының ПӘК-ін арттыру.................................................................................. | | 219 |
| §9.4 | | Буды аралық қыздыру....................................................................... | | 221 |
| §9.5 | | Бу турбина қондырғысының регенеративті циклы......................... | | 223 |
| §9.6 | | Бинарлы циклдар................................................................................ | | 226 |
| §9.7 | | Бу турбина қондырғысының регенеративті циклы......................... | | 228 |
| §9.8 | | Атом электр станциясы циклдары.................................................... | | 231  Кар –Кр  Нащ |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 233 |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 234 |
| Бақылау есептері............................................................................................. | | | | 236 |
| **X ТАРАУ**. **МҰЗДАТҚЫШ МАШИНАЛАРДЫҢ ҚАЙТЫМДЫ ЦИКЛДАРЫ** | | | | |
| §10.1 | | Қайтымды цикл туралы түсінік. Қайтымды Карно циклы............ | | 238 |
| §10.2 | | Қайтымды цикл эффективтілігінің көрсеткіші.............................. | | 239 |
| §10.3 | | Газды мұздатқыш машинасының циклы......................................... | | 243 |
| §10.4 | | Бу компрессорлы мұздатқыш машинасының циклы.................... | | 246 |
| §10.5 | | Абсорбциялы мұздатқыш машиналардың циклы......................... | | 249 |
| §10.6 | | Жылулық насос циклы. Жылудың термохимялық трансформаторы................................................................................. | | 251 |
| §10.7 | | Сұйытылған газды алу....................................................................... | | 253 |
| §10.8 | | Абсолютты нөлге ұмтылатын температура кезіндегі термодинамикалық жүйенің тәртібі................................................. | | 256 |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 259 |
| Есептердің шығарылуы................................................................................... | | | | 259 |
| Бақылау есептері.............................................................................................. | | | | 263 |
| **XI ТАРАУ. ПЛАЗМА** | | | | |
| §11.1 | | | Табиғат пен техникадағы плазма.................................................... | 264 |
| §11.2 | | | Плазманың қасиеті мен классификациясы.................................. | 266 |
| §11.3 | | | Идеал және идеал емес плазма.............................................. | 270 |
| §11.4 | | | Плазмадағы термодинамикалық және термиялық тепе-теңдік................................................................................................. | 273 |
| §11.5 | | | Тепе-теңдіктегі плазма құрамы....................................................... | 274 |
| §11.6 | | | Плазманың термодинамикалық параметрлері.............................. | 278 |
| §11.7 | | | Магниттелген плазманың қасиеті................................................... | 283 |
| §11.8 | | | Плазманы энергетикалық қондырғыларда қолдану.................... | 285 |
| §11.9 | | | МГД –генераторы бар энергетикалық қондырғы...................... | 287 |
| §11.10 | | | МГД- генераторының термодинамикалық негізі.......................... | 289 |
| Бақылау сұрақтары.......................................................................................... | | | | 291 |
| **XII ТАРАУ. ХИМИЯЛЫҚ ТЕРМОДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТТЕРІ** | | | | |
| **§**12.1 | | | Химиялық термодинамика элементтері. Химиялық реакция классификациясы............................................................................. | 291 |
| **§**12.2 | | | Химиялық реакцияға қатысты термодинамиканың бірінші заңының қолданылуы...................................................................... | 293 |
| §12.3 | | | Термохимия. Химиялық реакцияның жылулық құбылысы. Гесс заңы........................................................................................... | 296 |
| §12.4 | | | Заттың түзілуі мен жануының жылулық құбылыстары.................................................................................... | 299 |
| §12.5 | | | Жылулық құбылыстың температурадан тәуелділігі. Кирхгофф теңдеуі............................................................................................... | 301 |
| §12.6 | | | Термодинамиканың екінші заңын химиялық процесстерге қолдану.............................................................................................. | 302 |
| §12.7 | | | Изохоралы-изотермиялық (еркін энергия) және изобаралы-изотермиялық потенциал................................................................. | 303 |
| §12.8 | | | Гиббс-Гельмгольц теңдеулері........................................................ | 306 |
| §12.9 | | | Химиялық потенциал ...................................................................... | 307 |
| §12.10 | | | Тұйықталған біртекті (гомогенді) жүйенің орнықтылық шарты................................................................................................ | 308 |
| §12.11 | | | Массалардың өзара әсерлесу заңы және химиялық реакцияның тепе-теңдік тұрақтысы..................................................................... | 310 |
| §12.12 | | | Термиялық диссоциация. Диссоциация дәрежесі......................... | 312 |
| §12.13 | | | Тепе-теңдік тұрақтысын тәжірибелік анықтау әдісі..................... | 314 |
| §12.14 | | | Тепе-теңдік тұрақтысы мен максимал жұмыс арасындағы тәуелділік. Химиялық реакцияның изотермиялық теңдеуі.......... | 315 |
| §12.15 | | | Реакция температурасының химиялық тепе-теңдікке әсері. Ле-Шателье принципі............................................................................ | 319 |
| §12.16 | | | Нернстің жылулық теоремасы........................................................ | 321 |
| Бақылау сұрақтары......................................................................................... | | | | 324 |
| Есептердің шығарылуы.................................................................................. | | | | 324 |
| Бақылау есептері............................................................................................. | | | | 326  Кр |
| **ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ** | | | | |

**КІРІСПЕ**

Жылутехникасының теориялық негізі термодинамика мен жылу-масса алмасу курстары болып саналады. Бұл пән жылуэнергетика мамандықтары үшін бу қазандықтары, бу турбиналары қондырғылары, конденсациялық қондырғылар мен іштен жану двигательдері және т.б. арнайы практикалық курстарынан бұрын оқытылуы қажет. Өйткені технологиялық процесстер бағынатын заңдылықтарды білмей, жылу техникалық қондырғылардың ерекшеліктері мен жеке қондырғыларының жұмыс принципін меңгеру мүмкін емес.

Термодинамика – энергияның түрлену заңдылықтары жайлы ғылым. Жылу двигательдерінің зерттеліп дамуына байланысты, жылудың жұмысқа айналу заңдылығын зерттеу мақсатында -ғасырда термодинамиканың негізі қаланды. Термодинамика қазіргі таңда үш бөліктен тұрады: физикалық, химиялық және техникалық термодинамика.

Физикалық термодинамика – қатты, сұйық және газтәрізді денелерде энергияның түрлену, әртүрлі денелердің сәулеленуін, магниттік және электрлік құбылыстарын, сонымен қатар термодинамикалық шамалар арасында математикалық тәуелділіктерді орнату процесстерін зерттейді;

Химиялық термодинамика – термодинамиканың жалпы заңдылықтары негізінде химиялық, жылулық, физика-химиялық процесстерін, жүйенің орнықтылығымен сыртқы шарттардың орнықтылық процесстеріне әсерін зерттейді.

Техникалық термодинамика – жылулық және мұздатқыш машиналарында жүретін жылулық, механикалық және химиялық процесстер арасында өзара байланыс орнатады, газдар мен буда жүретін процесстерді, сонымен қатар әртүрлі физикалық шарттарда осы денелердің қасиеттерін зерттейді.

Техникалық термодинамика XVIII ғасырдың 20-шы жылдарынан бастап дами бастады. Термодинамикада екі зерттеу әдісі қолданылады: циклдық процесс (айналмалы) және термодинамикалық функциялар әдісі. XVIII ғасырдың екінші жартысында өте маңызды техникалық мәселе шешілді – өнеркәсіп пен транспорт үшін жылу двигателі жасалынды. Бірінші болып жылу машинасын орыс инженері И.И. Ползунов құрастырды. Ол әлемде бірінші болып бу машинасын жасаумен қатар, оған шашыратқыш қондырғы ойлап тапты және бірінші болып бу қазандығын автоматты қоректендіруді жүзеге асырды.

Техникалық термодинамика пәні жылудың механикалық жұмысқа, механикалық жұмыстың жылуға айналу процесстеріне негізгі заңдарды қолдана отырып, жылу двигательдері теориясын талдауға, оларда жүретін процесстерді зерттеуге және әрбір двигатель үшін экономикалық тиімділікті көрсетуге мүмкіндік береді.

**I ТАРАУ**

§1.1 Техникалық термодинамика - жылу энергетикасының теориялық негізі

Классикалық термодинамикада әртүрлі энергия түрлерінің өзара өзгеру заңдары зерттеледі. Техникалық термодинамикада жылулық және механикалық формада энергия алмасумен жүретін құбылыстарды зерттеу үшін жалпы әдістер қолданылады. Термодинамикалық әдістердің басты ерекшеліктері:

1. Тәжірибелік деректерді ғылыми талдау және жинақтау нәтижесінде орнатылған заңдылықтарды қолдануда құрылған термодинамикалық әдіс – осы заңдылықтарды табиғаттың объективті заңдылықтары ретінде қарастырады. Жалпыланған заңдылықтар термодинамиканың үш заңы немесе бастамасы ретінде өрнектелген.

Термодинамиканың бірінші заңы арнайы термодинамикалық ұғымда өрнектелген энергияның сақталу, өзгеру заңынан шығады және термодинамикалық процестердегі энергия балансын құруға мүмкіндік береді.

Термодинамиканың екінші заңы жылу мен жұмыстың өзара түрлену шарттарын орнатады және энергия алмасу процесінде пайда болатын өзгерістің айқын бағытын көрсетеді.

Термодинамиканың үшінші заңы абсолюттік нольге ұмтылатын температурада заттардың тәртібін түсіндіреді.

2. Термодинамикада әртүрлі денелердің қасиетін және энергия алмасу процесстерін сипаттау үшін физикалық ұғымдар мен шамалар қолданылады. Мұндай шамалар макроскопиялық, феноменологиялық немесе термодинамикалық деп аталады. Феноменологиялық шамаларға жататындартемпература, қысым, тығыздық. Феноменологиялық шамалар арқылы жазылған термодинамикалық қатынастарды заттың кез – келген күйіне (газ тәрізді, қатты, сұйық) қолдануға болады. Феноменологиялық әдістің артықшылығы - термодинамикалық қатынастар мен тұжырымдар дәлдігі сақталады. Феноменологиялық әдістің кемшілігі – жұмысшы дененің физикалық қасиеттері белгілі болуы керек. Ол қасиеттер тек эксперименттік зерттеулермен анықталынады.

§1.2 Термодинамикалық жүйе және қоршаған орта

Термодинамикалық жүйе деп, қоршаған ортамен өзара байланыстағы зерттелу объектісі болатын материалдық денелер жиынтығын атайды. Термодинамикалық жүйенің қарапайым мысалы ретінде - поршеньді цилиндрдегі газды, ал қоршаған орта ретінде – цилиндр мен поршеньді атауға болады.

Термодинамикалық жүйе қоршаған ортамен жұмыс және жылу алмаспайтын болса, жүйе изоляцияланған деп аталады. Егер жүйе қоршаған ортамен тек қана жұмыс атқарылуы арқылы немесе жылу алмасатын болса, ол жартылай изоляцияланған деп аталады. Жүйе қоршаған ортамен жұмыс пен жылу арқылы энергия алмасатын болса, ол изоляцияланбаған деп аталады. Жүйе барлық бөлімінде бірдей құрылымға және физикалық қасиетке ие болса, ол физикалық біртекті деп аталады. Бір фазалы біртекті термодинамикалық жүйе гомогенді (мұз, су, бу) деп аталады. Бірнеше фазалық бөліктен тұратын термодинамикалық жүйе – гетерогенді деп аталады. Мысалы, мұз бен су, су мен будан тұратынжүйені айтуға болады.

Жұмысшы дене деп, жұмыс пен жылудың өзара түрленуі жүретін ортаны атайды. Мысалы, бу турбинасында - су буы, газ турбинасында – газ, мұздатқыш қондырғыларда – фреондар, аммиак, көмірқышқылы және т.б. жұмысшы дене болып табылады.

§1.3 Термодинамикалық күй параметрлері

Термодинамикалық жүйенің тепе-теңдік күйі белгілі физикалық шамалармен, яғни тепе-теңдік күй параметрлерімен сипатталады*.* Ішкі параметрлер жүйенің ішкі күйін сипаттайды. Оларға қысым, температура, көлем және т.б. жатады. Сыртқы параметрлер сыртқы күш өрісінде жүйенің орнын (координаталарын) және оның жылдамдығын сипаттайды. Ішкі параметрлер интенсивті және экстенсивті болып бөлінеді. Интенсивті параметрлер – шамасы дененің өлшеміне (қысым, температура, меншікті көлем, меншікті жылусыйымдылық) тәуелді емес. Экстенсивті параметрлер жүйедегі зат мөлшеріне (көлем, салмақ және т.б.) тәуелді.

Термодинамикада параметрлерді термиялық (қысым, температура, көлем) және калориялық (меншікті энергия, меншікті жылусыйымдылық, фазалық ауысулардың меншікті жасырын жылуы) деп бөледі.

Жүйеде жүретін процессті немесе берілген жүйе орналасқан нақты шарттарды сипаттау үшін, меншікті көлем, абсолютті қысым, абсолютті температура сияқты ішкі күй параметрлерін білу қажет. Меншікті көлем – көлемнің массаға қатынасымен анықталатын шама

(1.1)

мұндағы - кез келген зат мөлшерінің көлемі, -заттың массасы, кг.

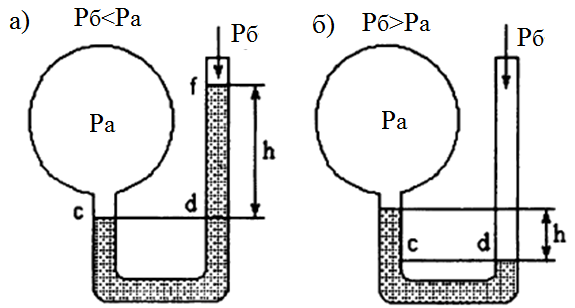
(1.2)

Қысым – бетке әсер ететін күштің осы бет ауданына қатынасы

(1.3)

- күштің нормаль құраушысы, Ньютон; - бет ауданы, .

Қысым – атмосфералық, асқын және сиретілген деп бөлінеді. Атмосфералық қысым шамасы ретінде биіктігі (1 атм=760 мм.сын. бағ.) 760 мм.сын.бағ.қысымы алынады. Атмосфералық қысымнан артық қысымды – асқын, ал атмосфералық қысымнан төменгі қысымды – сиретілген қысым деп атайды. Қысымды өлшеуге манометр қолданылады. Атмосфералық қысым барометрмен, сиретілген қысым вакууметрмен өлшенеді.Абсолюттік нольден немесе абсолюттік вакуумнен саналатын күй термодинамикалық параметрі болып тек қана абсолюттік қысым саналады. Техникада қысымды өлшеу үшін абсолюттік толық қысымды өлшейтін емес, абсолюттік және атмосфералық (барометрлік) қысымдар айырымын өлшейтін приборлар қолданады. Ыдыстағы қысым атмосфералық қысымнан көп болса (сур.1а), онда трубканың оң және сол жақтарындағы және нүктелерінде сұйық тепе-теңдікте болғандықтан қысым бірдей болады.



сурет 1

Күштердің тепе-теңдік шарты деңгейлеріне қатысты былай жазылады.

(1.4)

мұндағы трубканың нүктесіндегі сұйыққа түсіретін газдың қысым күші; теңдеуі трубканың нүктесіндегі атмосфералық ауаның қысым күшін сипаттайды. теңдеуі трубканың нүктесіндегі биіктікті сұйық бағанының қысым күшін сипаттайды.Осы формулаларды (1.4) теңдеуіндегі қысым күшінің тепе-теңдік шартына қойып, төмендегі теңдеуді аламыз

мұндағы ыдыстағы газдың абсолютті толық қысымы; барометр бойынша атмосфералық қысым; манометрдегі сұйық тығыздығы; биіктікті сұйық бағанының салмағы; манометр трубкасы қимасының ауданы. шамасына қысқартқаннан кейін төмендегі теңдеуді аламыз

(1.5)

мұндағы манометрлік сұйықтың меншікті салмағы; биіктікті сұйық бағанының манометрлік қысымы. (1.5) теңдеуден

шығады. Ортаның атмосферадан жоғары асқын қысымы манометрмен өлшенеді. Егер ыдыстағы қысым (сур.1б) атмосфералық қысымнан аз болса деңгейіне қатысты манометрдегі сұйыққа әсер ететін күштердің тепе-теңдік шарты былай болады

мұндағы тең, осындағы қысымын биіктікті сұйық бағаны тудырады. Бұл резервуардағы вакуумдық қысымды анықтайды. Асқын қысым мен вакуум күй параметрлері бола алмайды, өйткені олар бірдей абсолюттік қысымда атмосфералық қысым шамасынан тәуелді әртүрлі мәндер қабылдауы мүмкін. Техникада қысымды өлшеудің бірнеше өлшем бірліктері бар. Қысымының өлшем бірліктері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Бірлік | Бар | Паскаль, Па (Н/м2) | Физикалық  атмосфера, атм | Техникалық  атмосфера,  атм  (кг/см2) | Сынап бағ.  миллиметрі | Су бағаны  миллиметрі |
| 1 бар | 1 | 105 | 0,987 | 1,02 | 750 | 10200 |
| 1 Н/м2 | 10-5 | 1 | - | - | - | - |
| 1 атм | 1,013 | 101300 | 1 | 1,033 | 760 | 10330 |
| 1 ат | 0,981 | 98100 | 0,968 | 1 | 735,6 | 10000 |
| 1сын.  бағ.мм | 0,00133 | 133 | 0,001316 | 0,00136 | 1 | 13,6 |
| 1 су бағ.  мм | 98,1\*105 | 9,81 | 9,68\*10-5 | 10-4 | 0,0736 | 1 |

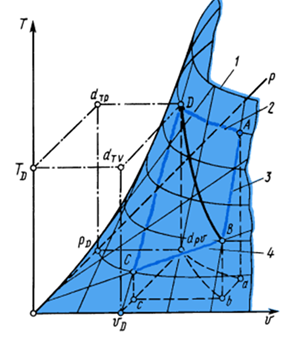
§1.4 Термодинамикалық процесс

Термодинамикалық жүйе күйінің оның қоршаған ортамен өзараәсері нәтижесінде өзгеруін, немесе термодинамикалық параметрдің кез келген бір параметрінің өзгерісімен байланысты термодинамикалық жүйедегі өзгерісті термодинамикалық процесс деп атайды. Егер параметр өзгерісі бастапқы және соңғы күйден тәуелді, ал процесс жолынан тәуелсіз болса, онда мұндай парметр күй функциясы деп аталады.

Термодинамикалық процесте жүйе мен қоршаған орта денесі арасында энергия алмасу жүреді. Энергия ағыны пайда болу үшін, қандайда бір потенциал айырымы болуы қажет. Термодинамикалық жүйе күйі тепе-теңдікте және теңсіздікте болуы мүмкін. Тепе-теңдік күй деп жүйе көлемінің барлық нүктесінде оның барлық параметрлері және физикалық қасиеттері (қысым, температура, меншікті көлем және т.б.) бірдей болатын күйді айтады. Термодинамикада тұйықталған жүйе уақыт өтуіне байланысты әрқашанда термодинамикалық тепе-теңдік күйге келеді және өздігінен ол күйден шығып кете алмайды.

Термодинамикалық жүйеде ішкі тепе-теңсіздіктің бұзылумен жүретін процессті тепе-теңсіздік процесі деп атайды. Табиғатта өтетін барлық нақты процестер қандай да бір дәрежеде тепе-теңсіздікте болады, ал тепе-теңсіздік өлшемі ретінде жүйе мен қоршаған орта арасындағы потенциалдар айырымы қолданылады. Тепе-теңсіздік процесстерді термодинамика әдістерімен толық сипаттау мүмкін емес, себебі жүйеде өтетін процесс өзгерісі өте күрделі. Жүйеде тепе-теңдік бұзылғанда күй параметрлері арасын байланыстыратын күй теңдеуін қолдану мүмкін емес. Тепе-теңсіздік процесінің ерекшеліктерін талдау термодинамиканың екінші заңы негізінде орындалады. Жүйе күйінің тепе-теңдідігінен шексіз аз шамаға ауытқуы арқылы жүретін термодинамикалық процесс – тепе-теңдік процесі деп аталады. Тепе-теңдік процесі энергия алмасуда жүйенің негізгі қасиеттерін зерттеуге мүмкіндік беретін нақты процесстің идеализацияланған ғылыми абстракциясы, негізінде табиғатта өтетін барлық нақты процесстер тепе-теңсіздікте болады. Тепе-теңдік процессте термодинамикалық жүйе бірқатар тізбектелген шексіз жақын күйлерден өтеді. Егер процесс өте баяу өтетін болса, онда біртіндеп уақыт өтуге байланысты тепе-теңдік орнайды, осы процесс квазистатистикалық деп аталады. Бұл процесстер қайтымдылық қасиетке ие.

Процессте жүйенің әрбір аралық күйі күй теңдеуімен сипатталып, сәйкес нүктелермен бейнеленеді, мысалы -нүктесі күй диаграммасындағы 1-термодинамикалық бет (сурет 2).



сурет 2. Идеал газ күйінің термодинамикалық процесс сызықтары: 1-күй беті, 2-изотермиялық, 3-изохоралық, 4-изобаралық.

Осындай нүктелердің жиынтығы беттегі күй сызығын түзеді, яғни процесс сызығы деп аталады. Термодинамикада процессті талдау үшін графикалық әдістер кеңінен қолданылады. Суретте -осіне перпендикуляр - жазықтығындағы 3-изохоралық сызық, -осіне перпендикуляр -жазықтығындағы 2-изотермиялық сызық, -осіне перпендикуляр -жазықтығындағы 4-изобаралық процесс сызықтарын көрсетеді.

§1.5 Күй теңдеуі

Біртекті жұмысшы дененің қысымы, температурасы және меншікті көлемін байланыстыратын теңдеу термиялық күй теңдеуі деп аталады. Бұл теңдеудің жалпы түрі

(1.6)

Осы теңдеуіндегі үш параметрдің кез-келген біреуі екі параметрдің функциясы болады. Егер тәуелсіз айнымалылар ретінде қабылдасақ, онда функция ретінде былай өрнектеледі . Егер жүйенің бір параметрі тұрақты болса, онда екі айнымалы шама болады және жүйе күйін сипаттайтын нүктелер бір жазықтықта жатады. Күй теңдеулері теориясы идел газ және тығыздығы аз нақты газдар үшін орнатылған. Идеал газдар күй теңдеуін 1834 жылы Бойл-Мариотт және Гей-Люссак заңдарының теңдеуін біріктіре отырып, бірінші болып Клапейрон ашты

(1.7)

мұндағы меншікті газ тұрақтысы, . (1.7) теңдеуі 1кг газ үшін жазылған және бұл теңдеу идеал газ күйін сипаттайды. кг массалы газ үшін күй теңдеуі

(1.8)

мұндағы газ көлемі, .

Көптеген нақты газдар өте аз тығыздықта және біршама жоғары температурада өзінің қасиеті бойынша идеал газға жақындайды. Сондықтан осындай газ есептері үшін (1.7) теңдеуі қолданылады. (1.7) теңдеудің екі жағын молекулалық салмаққа көбейтіп, 1 кмоль газ үшін күй теңдеуін жазамыз

(1.9)

мұндағы бір кмоль газдың көлемі. (1.9) теңдеуінен

универсал газ тұрақтысы температура 1К өзгергенде және тұрақты қысым процесінде 1 кмоль идеал газдың жұмысы. Қалыпты физикалық шарттарда идеал газдың универсал тұрақтысы келесі жолмен анықталады:

1 кмоль газға қатысты универсал күй теңдеуі

(1.10)

(1.10) теңдеу Клапейрон-Менделеев күй теңдеуі деп аталады. Молекулалық салмақ молекула массасын сипаттайды. Мысалы, (1.10) теңдеу бойынша азоттың универсал газ тұрақтысы

Газдардың физикалық тұрақтылары

*2-кесте*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | Химиялық формуласы | Масса  1кмоль, кг/кмоль | Газ тұрақтысы R, | Қалыпты жағдайда  газ тығ, |
| Оттегі |  | 32 | 259,8 | 1,429 |
| Сутегі |  | 2,016 | 4124,8 | 0,090 |
| Азот |  | 28,02 | 296,8 | 1,250 |
| Көміртегі қышқылы | CO | 28 | 296,8 | 1,250 |
| Ауа | - | 28,96 | 287 | 1,293 |
| Көмірқышқыл  газы |  | 44 | 189,9 | 1,977 |
| Су буы |  | 18,016 | 461,6 | 0,804 |
| Гелий |  | 4,003 | 2077,2 | 0,178 |
| Аргон |  | 39,944 | 208,2 | 1,784 |
| Аммиак |  | 17,031 | 488,2 | 0,771 |

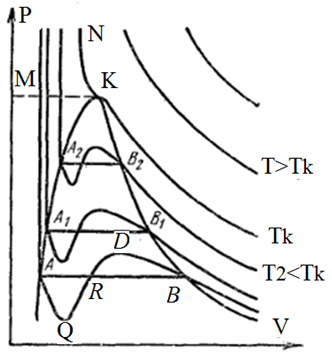
§1.6 **Нақты газдардың күй теңдеуі**

Реал газдардың идеал газдан айырмашылығы олардың молекулалары белгілі көлемге ие және олар электромагниттік және кванттық табиғи қасиеті болғандықтан өзараәсер күштерімен байланыста болады. Молекулалар атомдардан тұрады. Атомдағы ядро маңайындағы электрондар әртүрлі зарядты кулондық күштермен тартылып тұрады. Молекулаларда атомдар байланысының екі түрі бар: иондық және коваленттік. Молекулалар арасындағы арақашықтық алыстаған сайын өзара әсер күші азаяды. Молекулалар арасы жақындаған сайын өзара әсер күші өте үлкен мәнге ие тебілу күшіне ауысады. Сондықтан идеал газ заңдылығы негізінде алынған нәтижелер тек қана сиретілген нақты газдар үшін орынды. Осыған байланысты нақты газ күйін толық сипаттайтын Ван-дер-Ваальс теңдеуі 1873 жылы алынды

мұндағы нақты газды толық сыққанға дейінгі ең кішкентай көлемі. Әртүрлі газдар үшін шамасы белгілі бір сандық мәнге ие. күй параметрлерінен тәуелсіз, әртүрлі жеке газдар үшін белгілі сандық мәнге ие пропорционалдық коэффициент. Ван-дер-Ваальс теңдеуі нақты заттардың күйін сұйық және газ күйінде сапалы айқын бейнелейді. Бір моль газ үшін Ван-дер-Ваальс теңдеуі былай жазылады

Осы теңдеуде жақшаларды ашып, алынған шамаларды көлемнің кему дәрежесі бойынша орналастыратын болсақ, газдың меншікті көлеміне қатысты 3-ші дәрежелі теңдеу алынады

Бізге математикадан белгілі берілген және мәндерінде бұндай теңдеудің үш түбірі бар. Егер диаграммада Ван-дер-Ваальс теңдеуіне сәйкес изотерма тұрғызылса, онда суреттегідей қисық түрлерін көрсетеді (сурет 3).



сурет 3. Ван-дер-Ваальс теңдеуі бойынша табылған изотермалар

Бұл изотермалық сызықтар төменгі температурада изотерма қисығы ортасы толқын тәрізді екендігін көрсетеді. Температура өскен сайын изотерманың толқын тәрізді бөлігі қысқа. Изотерманы қиып өтетін АВ-изобара сызығы ARB-нүктелерінде көлемнің үш нақты мәнін береді (үш түбірін). В-нүктесіндегі меншікті көлемге тең үлкен түбір- заттың бу (газ) түріне жатады, ал А-нүктесі аз, заттың сұйық күйіне жатады. АВ-аймағы болуы мүмкін емес, өйткені Ван-дер-Ваальс теңдеуі екі фазалы системаны айқын сипаттамайды. Сұйық күйден газ күйіне нақты өту процессі түзу сызықпен (изобара) АВ бейнеленеді. Ол үшін А нүктесі сұйықтың қайнаған күйіне сәйкес, ал В нүктесі құрғақ қаныққан буға сәйкес. Критикалық температурада изотерма толқын тәрізді бөлімде болмайды. Бұл изотермада тек иілу нүктесі болады. Бұл барлық үш түбірі де нақты және бір-біріне тең болатын Ван-дер-Ваальс теңдеуін шешудің екінші жағдайына сәйкес келеді (3-суреттегі К-нүктесі).

Критикалық температурадан жоғары температураларда изотермалар монотонды кемуші сипатқа ие болады. Бұл жерде бір түбірі болады. Егер нүктелерін қоссақ, онда сұйық қайнау күйінде болатын қисықты аламыз. Осылайша нақты зат үшін диаграммасын үш сипаттық облысқа бөлуге болады:

1) АК қисығының сол жағы сұйық күй облысы;

2) АК және ВК қисықтарының арасында екі фазалық күй облысы;

3) ВК қисығының оң жағы, К нүктесінен жоғары қыздырылған бу облысы.

Заттың критикалық күйін 1861 жылы Менделеев ашты. Ол сұйықта беттік керілу нольге тең болғанда заттың бу және сұйық күйінің айырмашылығы жойылатын критикалық температураны *-* абсолюттік қайнау температурасы деп атады. Заттың критикалық күйін ашқанға дейін, тек қысымды көбейту арқылы газды сұйыққа айналдыруға тырысты. Алайда критикалық нүктеден жоғары температурада сұйық болмайды екен. Сондықтан қысымды ұлғайту арқылы газды сұйыққа айналдыруда, газды критикалық төменгі температураға дейін суыту керек. Осыдан кейін изотерма бойынша кез келген газды сұйыққа айналдыруға болады.

§1.7 Термиялық коэффициенттер және олардың арасындағы байланыс

Термиялық коэффициенттер дененің жылулық және серпімді қасиеттерін сипаттайды. Бізге белгілі көлемдік ұлғаю коэффициенті , қысымның термиялық коэффициенті , изотермиялық сығылу коэффициенті . Сыртқы тұрақты қысымда заттың белгілі бір массасын қыздыру нәтижесінде температураның әрбір градусқа өсуіне байланысты көлемнің өзгеруі дербес туындымен былай өрнектеледі . Бір градусқа қыздырғанда көлемнің салыстырмалы өзгерісі көлемдік ұлғаю коэффициенті деп аталады

(1.11)

Идеал газ үшін . Егер температураны Цельси градусы шкаласында өрнектесек, онда және көлемнің салыстырмалы өзгерісін төмендегідей өрнектеуге болады

Егер аз интервалда температура өзгерісі деп қабылдасақ, онда

Соңғы теңдеуді интегралдасақ температура өзгерісінде көлем сызықтық заңдылыққа бағынады деген шешімге келеміз

Кез келген қысымдағы идеал гаш үшін

Егер берілген массалы затты тұрақты көлемде қыздырса температура өзгергендегі қысымның салыстырмалы өзгерісі қысымның термиялық коэффициенті шамасымен сипатталады.

(1.12)

Идеал газ үшін

(1.12) теңдеуді де алдыңғыдай былай жазуға болады

Температура аз өзгергендеде десек

Интегралдап алатынымыз

Идеал газ үшін

.

Изотермиялық сығылу коэффициенті

(1.13)

«-» белгісі қысым ұлғайғанда көлемнің кішірейетіндігін білдіреді. Идеал газ үшін Бойль-Мариотт заңынан екендігі белгілі, олай болса қысым бойынша дифференциалдап аламыз

(1.14)

(1.14) қатынасын (1.13) қатынасымен салыстырып, аламыз. Сонымен сығылу коэффициенті қысымға кері шама болады. Жалпы жағдайда -термиялық коэффициенттер арасындағы өзара байланысты табамыз. Қысым, көлем және температураның толық дифференциалын төмендегідей түрде жазуға болады

.

1-ші теңдеуден шамасын 2-ші теңдеуге қойып, десек, төмендегіні аламыз

(1.15)

(1.11), (1.12), (1.13) теңдеулерін(1.14) теңдеуіне қойып

(1.16)

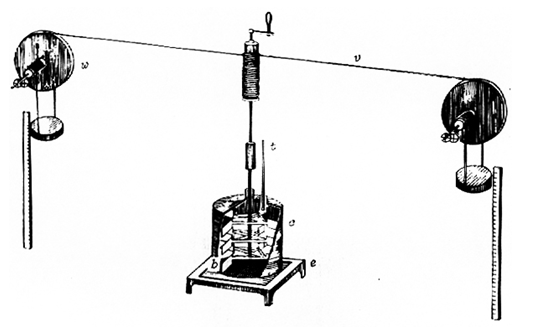
Идеал газдар үшін болғандықтан (1.16) теңдеуден шығады. Сұйық денелер үшін сығылу коэффициенті өте аз. Су үшін . Осыдан қалыпты қысымда , онда газ үшін бұл жағдайда . Қысымды изотермиялық процессте бір атмосфераға көтергенде су көлемі бастапқы көлемнен шамасы мөлшерінде кемиді.

§1.8 Жылу. Джоуль тәжірибесі. Жылу мен жұмыстың эквиваленттілігі

AN=2

Термодинамикада жылу ең негізгі ұғымдардың бірі болып саналады. Мағынасы бойынша жылу жұмыс ұғымына жақын. Жылу мен жұмыс энергия беру формасы болып табылады. Олардың арасындағы айырмашылық энергия беру формасының әр түрлілігінде. Денелер арасында контакты болғанда жылуөткізгіштік, конвекция немесе сәулелену жолымен энергия беру формасы – жылуды береді. Ал жұмыс энергия берудің басқаша механизмін көрсетеді. Механикалық жұмыс атқарылса міндетті түрде дене көлемі өзгереді. Дененің жылу алуы сол дененің микробөлшектерінің энергиясымен анықталатын дене температурасының көтерілуімен байланысты жүреді.

1844 жылы ағылшын физигі Джоуль ғылымда үлкен роль атқарған жылудың механикалық эквиваленттік мәнін анықтайтын тәжірибе жүргізді. Тәжірибе қондырғысы мыс герметикалық қақпақты калориметрден тұрады. Қақпақта екі түтікше орналасқан: бірінші түтікшеге термометр салынған, екінші түтікшеде күрекшелі ағаш білік орналасқан. Суы бар адиабаталы калориметрде араластырғыш күрекше суды айналдырып, су қабаттары арасында үйкеліс тудырады. Үйкеліс әсерінен су мен күрекше қызады. Күрекшені айналдыру қақпақ бетіндегі жіңішке шпагеттегі блок арқылы ілінген екі ауыр жүкшелер көмегімен жүзеге асады (сурет 4). Төмен түскенде жүкшелер орталық вал күрекшелі білікті айналдырады. Жылуизоляциясы аз ыдыс саңылаулары бар ағаш тақтайшаға орнатылған. Тәжірибе температура ауытқуы болмайтын жабық кеңістікте жүргізілген.



сурет 4. Джоуль қондырғысының сүлбесі

Күрекшелер айналып суды қыздырған соң, оның температурасы өлшенді. Әрбір тәжірибенің басында, ортасында, соңында температураны бірнеше рет өлшеп тәжірибе 20 рет қайталанды. 1 сағат жұмыс істегенде температура шамамен шамасына көтерілген. Джоуль жүкшелер орын ауыстырғанда атқарылған жұмысты және күрекше, ыдыстағы судың алған, ыдыстың алған жылу мөлшерлерін есептеп, содан соң осы жұмыс пен жылу мөлшерін жүкшелер құлаған кездегі жұмыс, жылу мөлшерімен салыстырды. Сонымен, атқарылған жұмыстың жылу мөлшеріне қатынасы, яғни жылудың механикалық эквиваленті 4,5 Дж/кал шамасына тең екендігі анықталды. Осылайша Джоуль, егерде денеге механикалық жұмыс жасай отырып, осы денені қыздырғанда, дененің алатын жылуы атқарылған жұмыс шамасына тең және де осы жұмыс қандай әдіспен жүргізілгендігіне тәуелсіз екендігін көрсетті.

§1.9 Энергия. Ішкі энергия

Энергия материяның әртүрлі қозғалыс формасының өлшемі. Жүйеде энергияның ұлғаюы мен кемуі осы жүйе қозғалысының мөлшерлік және сапалық өзгерістерін білдіреді. Энергия мен масса арасындағы өзара байланысты Эйнштейн ұсынған

мұндағы массаға ие дененің толық энергиясы; жарық жылдамдығы (). жылдамдықпен қозғалатын дененің массасы былай анықталады

мұндағы тыныштық күйдегі дененің массасы. Дененің энегиясы жарық жылдамдығы на пропорционал өседі немесе кемиді. Термодинамикада макросистеманың толық энергиясы

сыртқы күш өрісінде жүйенің потенциалдық энергиясы. Жүйенің кинетикалық энергиясы

Жүйенің потенциалдық энергиясының өзгерісі - күш өрісінде энергияны бір орыннан екінші орынға ауыстырғанда жүйеден тыс жасалатын жұмысқа тең. Ішкі энергия –ілгерілемелі кинетикалық, молекулалардың айналмалы және тербелмелі қозғалыс, молекулалардың өзараәсерлесу потенциалдық энергиясынан, атомдар мен ядро ішіндегі бөлшектердің қозғалыс энергиясынан тұрады. Ішкі энергия жүйенің ішкі параметрлерінің (қысым, температура) функциясы болып табылады. Ішкі энергия күй функциясы болғандықтан оның өзгерісі процесс жолына тәуелді емес, ол бастапқы және соңғы күйлердегі мәндерімен анықталады, яғни

Ішкі энергияны жеке энергия түрлерінің қосындысы ретінде қарастыруға болады: молекулалардың ілгерілемелі және айналмалы қозғалысы нәтижесіндегі молекулалардың кинетикалық энергиясы, молекуладағы атомдардың тербелмелі, молекула ядросы мен электрондары арасындағы өзара әсер энергиясы, сыртқы күш өрісіндегі молекулалардың потенциалдық энергиясы, электромагниттік сәулелену энергиялары қосындысын құрайды.

Дененің ішкі энергиясы

Дене күйі өзгеру процесіндегі ішкі энергияның өзгерісі. Әртүрлі процесстерде қоршаған ортадан жылу алу немесе қоршаған ортаға энергияны жылу немесе жұмыс ретінде беруі нәтижесінде термодинамикалық жүйенің ішкі энергиясы өзгереді. Бір күйден екінші күйге өткенде жүйенің ішкі энергиясының өзгерісі (К-22)

(1.17)

Жылу мен жұмыстың ішкі энергиядан айырмашылығы, олар күй функциясы болмайды. Жылу мен жұмыстың шамасы бастапқы күйден келесі күйге өткен жолдан тәуелді, сондықтан бұл шамалар процесс функциясы болады. Жұмыс пен жылу күй функциясы болмағандықтан ішкі энергияны жылулық және механикалық деп бөлуге болмайды. Жылу мен жұмыс екеуі де энергия берудің екі формасына жатады, олар эквивалентті, бірақ олар толығымен бірдей емес. Өйткені қоршаған орта жағдайларында жұмыс толығымен жылуға айналуы мүмкін, ал денеге берілетін жылудың тек бір бөлігі ғана жұмысқа айналады. Жылу өздігімен толық дененің ішкі энергиясына айналуы мүмкін. Ішкі энергияның абсолют шамасын анықтау үшін (1.17) теңдеуді интеграладу қажет. Интегралдау нәтижесінде өрнекке қандай да бір тұрақтысы енеді:

яғни ішкі энергия тұрақты қосымшасына дейін дәлдікпен анықталады. Темодинамикада бізге қажеті ішкі энергияның абсолют мәні емес, негізінде жүйедегі процесс өзгерісі нәтижесіндегі ішкі энергияның өзгерісін анықтау. Ішкі энергия аддитивті шама. Аддитивность (латын сөзі - қосылатын) толық объектіге сәйкес шаманың мәні, егер объекті бірнеше бөліктерден тұрады десек сол бөліктер шамасының мәніне тең. Ішкі энергияның аддитивтілігінен біртекті дененің ішкі энергиясы

мұндағы молярлық ішкі энергия, дене массасы. Біртекті дененің тепе-теңдігі екі тәуелсіз термиялық параметрлермен анықталады. Сондықтан біртекті дене тепе-теңдік күйде болғанда ішкі энергия параметрлерінің кез-келген екеуінің функциясы болады. Бірнеше бөліктерден тұратын күрделі жүйенің ішкі энергиясы осы бөліктердің ішкі энергияларының қосындысына тең

§1.10 Термодинамиканың бірінші заңы

AN=1

Термодинамиканың бірінші заңы жалпы жағдайда энергияның сақталу және өзгеру заңын бейнелейді. Бұл заң барлық процесстерге мындай шарттар қояды:

1. Энергия жоқтан пайда болмайды және жоғалмайды, ол бір түрден екінші түрге өзгереді. Механикалық энергияның жылуға айналуы былай өрнектеледі

жұмыстың термиялық эквиваленті. жылудың механикалықэквиваленті

2. Энергия жұмсамай пайдалы жұмыс алатын бірінші текті мәңгілік двигатель құру мүмкін емес.

3. Толық тұйықталған жүйенің ішкі энергиясы тұрақты шама болып табылады. Бұл тұжырымның дұрыстығын төмендегі өрнектер дәлелдейді.Термодинамиканың бірінші заңын жазу үшін, денеге қандай да бір жылу берілген. Осы жылу ішкі энергияның өзгерісіне және атқарылатын жұмысқа кетеді. Онда массалы дене үшін эквиваленттік теңдеу былай

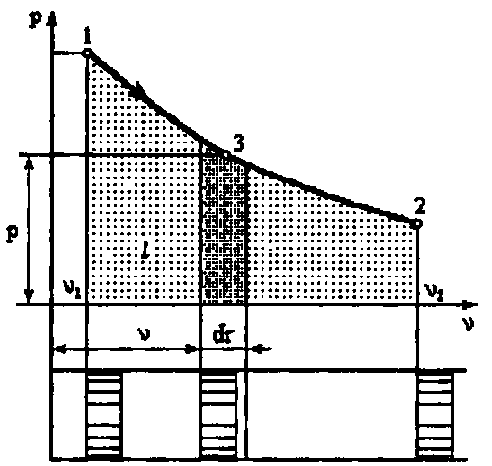
(1.18)

мұндағы

Шексіз аз процесс үшін

(1.19)

(1.19) теңдеуіне толық тұйықтау шартын қолданамыз, яғни (жүйе сыртқы ортамен жылу алмаспайды және жұмыс жасамайды). Онда немесе . Тұйықталған жүйеде қандай процесс жүрсе де, оның ішкі энергиясы тұрақты болып қалады. Жұмыстың өрнегін негізгі күй параметрлері арқылы табамыз (сурет 5).



сурет 5. Поршеньдік цилиндрдегі газдың сығылу мен ұлғаю жұмыстарын

анықтауға арналған диаграмма

1 кг газдың жұмысы поршеньді шексіз аз оңға жылжытқанда тең. Мұндағы қысым нүктесіндегі қысым, поршеннің көлденең қимасының ауданы, поршеннің жылжуы. болғандықтан,

(1.20)

1-2 процестің барлық жұмысы ауданына тең. Жұмыстың айқын өрнегін табу үшін (1.20) өрнегін интегралдаймыз.

(1.20а)

Бұл жерде жұмыс күй функциясы емес процесс функциясы, сондықтан толық дифференциал емес. Термодинамикалық процесстер есебін жеңілдету үшін кг масса үшін -функциясын, ал 1 кг үшін -функциясын энтальпия деп аталатын функцияны Гиббс енгізді. *Энтальпия деп* –қарастырып отырған дене көлемінің қысымға көбетіндісінің ішкі энергия қосындысына тең күй функциясын атайды

(1.21)

(1.21) теңдеуді дифференциалдап,

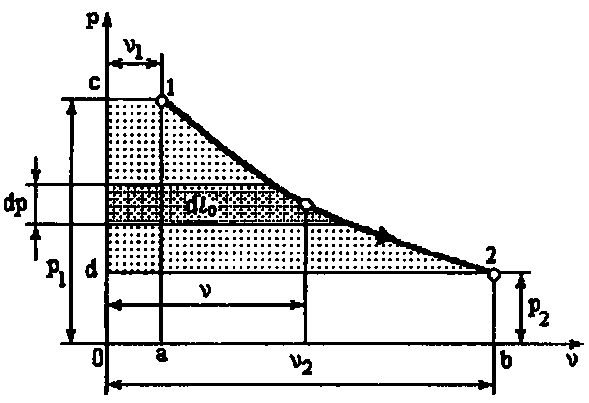
(1.22)

(1.22) теңдеуінен ішкі энергия өзгерісін анықтап, (1.20) теңдеуін ескере отырып, (1.19)теңдеуіне қойып келесі теңдеуді аламыз

(1.23)

(1.23) теңдеуді интегралдап, төмендегі 1-2 процесстегі жылу мөлшерін анықтауға болады

Орныққан жұмыс формуласын қорыту үшін төменде көрсетілген процессті қарастырамыз (сур.6).



сурет 6. Поршеньдік цилиндрдегі газдың сығылу мен ұлғаю жұмыстарын

анықтауға арналған диаграмма

мұндағы сызығы двигатель цилиндрін газбен (сұйық) толтыру процесіне сәйкес. Сыртқы ортадан газға жасалынған жұмыс мынаған тең , яғни ауданы. Бұл жұмыс оң. сызығы газдың ұлғаю процесі. Бұл жерде ұлғаю жұмысы атқарылады.

**-**cызығы двигатель цилиндрінен газды ығыстыруына сәйкес. Бұл жұмыс теріс, мынаған тең

Жоғарыда аталған жұмыстардың алгебралық қосындысы графиктегі ауданына тең. Бұл аудан машинаға енгізу жұмысы мен газды машинадан шығару жұмысы ескерілетін орналастыру жұмысын (располагаемая) береді, яғни

Осыдан

(1.24)

Осы теңдеуді соңғы процесс үшін жазылған термодинамиканың бірінші заңына қойып, төмендегіні аламыз

осыдан

(1.25)

Алынған теңдеу (1.23) теңдеуімен сәйкес келеді. Бұл теңдеу термодинамиканың бірінші заңының математикалық формасы. Егер термодинамикалық процесте *P=const* болса, онда (1.23) теңдеу төмендегідей түрде жазылады

немесе соңғы процесс үшін

Осылайша энтальпияның физикалық мағынасы, изобаралық процесте энтальпияның өзгерісі жүйенің алған немесе берген жылу мөлшеріне тең.

Қоршаған ортамен жылу алмаспайтын жағдайда (адиабаталық процесте, ) (1.23)-теңдеу немесе . Сонымен болғанда пайдалы жұмыс процестің бастапқы және соңғы энтальпиялар айырымна тең. Энталпия тәуелсіз күй параметрлерінің функциясы болғандықтан, оның толық дифференциалы үшін тәуелсіз айнымалыларда сәйкесінше төмендегі қатынастар орындалады.

Идеал газдың энтальпиясы ішкі энергия сияқты температураның ғана функциясы болып, молекулалар арасында өзара әсер күші болмағандықтан көлем мен қысымнан тәуелсіз болады.

§1.11 **Жылусыйымдылық**

Жылусыйымдылық деп – дене температурасын өзгерту үшін денеге берілетін немесе денеден алынатын жылу мөлшерін атайды. Термодинамикада жылу мөлшерін есептеу үшін жылусыйымдылық ұғымы қолданады. Жылусыйымдылық келесі формуламен анықталады

(Дж/К) (1.26)

Егер қарастырып отырған жүйе біртекті болса, онда меншікті жылусыйымдылық

молярлық

қалыпты жағдайда () көлемдік жылусыйымдылық

Жылусыйымдылық процестің сипатына байланысты. Термодинамикада үлкен мағынаға ие

(1.27)

(1.28)

Термодинамиканың бірінші заңынан

көлем тұрақты болғанда

(1.29)

(1.29) теңдеуді (1.27) теңдеуіне қойып, төмендегіні аламыз

(1.30)

(1.30) теңдеуді ескерсек, (1.29) төмендегі түрге ие болады.

болғанда

Тұрақты көлем кезіндегі процесте идеал газ ішкі энергияның өзгерісі дене температурасының бастапқы және соңғы процестердегі айырымының на көбейткенге тең. Тұрақты қысым және көлем кезіндегі массалық жылусыйымдылық *Майер теңдеуі* деп аталатын қатынаспен өзара байланыста болады.

(1.31)

Термодинамиканың бірінші заңының төмендегі түрінен

Тұрақты қысым кезіндегі процесстен төмендегіні аламыз

(1.32)

(1.32) теңдеуді (1.28) теңдеуіне қойып, төмендегіні аламыз

Жылусыйымдылықтар қатынасы термодинамикада үлкен роль атқарады

(1.33)

адиабата көрсеткіші; бір атом үшін, екі атом үшін, үш атом үшін. мәні температурадан тәуелді. (1.33) теңдеуден Майер теңдеуін ескере отырып, төмендегіні аламыз

(1.34)

немесе бір моль үшін . Газ температурасы ұлғайғандықтан артады, онда мәні бірге жақындап азаяды. Бірақ барлық уақытта бірден үлкен. мәнін біле отырып (1.34) теңдеуден тұрақты көлем кезіндегі жылусыйымдылықты анықтауға болады

болғандықтан

Идеал газдың жылу сиымдылығы *температурадан*, реал газдың жылусиымдығы *қысымнан* тәуелді болғандықтан техникалық термодинамикада *ақиқат* және *орташа жылусыйымдылық* деп бөлінеді. Термодинамикалық жүйеге берілетін элементар жылу мөлшерінің шексіз аз температуралар айырымына қатынасы *ақиқат жылусыйымдылық* деп аталады . Реал газдардың ақиқат жылусыйымдылығын былай жазуға болады

(1.35)

берілген газдың сиретілген күйдегі жылусыйымдылығы () және ол температурадан ғана тәуелді. жылусыйымдылықтың тек қысымнан немесе меншікті көлемнен тәуелділігін анықтайды. Жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділігі жуық шамамен температурадан үшінші дәрежелі полином түрінде көрсетілуі мүмкін

мұндағы аппроксимация коэффициенттері. Практикалық есептеулерде жылу мөлшерін анықтау үшін көбінесе орташа жылусыйымдылық қолданады. Берілген процестің температурадан температураға дейінгі аралықтағы орташа меншікті жылусиымдылығы

(1.36)

Процессте берілетін жылу мөлшері төмендегі формуламен табылады

(1.37)

ақиқат меншікті жылусыйымдылық. (1.37) теңдеуін ескерсек, (1.36) мына түрге ие болады

Газ қоспалары қарастырылатын жылу қондырғылары есептерінде, олардың жылусыйымдылықтарын анықтау қажет болады. Егер газ қоспалары массалық мөлшермен берілсе, онда қоспаның меншікті жылусыйымдылығы төмендегі формулалармен анықталады

мұндағы - газ қоспасына кіретін әрбір газдың массалық мөлшері. Егер қоспа көлемдік мөлшермен берілсе онда қоспаның көлемдік жылусыйымдылығы төмендегі формулалармен анықталады

мұндағы әрбір газдың көлемдік жылусыйымдылығы.

Бақылау сұрақтары

1. Идеал газ.Идеал газ үшін Джоуль заңы.

2. Идеал газдардың газ қоспасы қандай заңға бағынады?

3. Универсал газ тұрақтысы анықтамасы және оның өлшем бірліктері.

4. Ван-дер-Ваальс теңдеуі. Ван-дер-Ваальс теңдеуіндегі шамасы қандай мағынаға ие?

5.Термиялық коэффициенттер анықтамасы. Изотермиялық сығылу коэффициенті анықтамасы.

6. Қандай шарттарда газды сұйық күйге айналдыруға болады?

7. Критикалық нүкте дегеніміз не?

8. Жылу мен жұмыс энергияны тасымалдау формасы

9. Термодинамика бірінші заңының математикалық өрнегі

10.Ішкі энергия, энтальпия дегеніміз не?

11. Егер дене қозғалмаса, сыртқы өрістің әсерін ескермеуге болатын болса, онда оның ішкі энергиясы неге тең?

12.Жылусыйымдылық, меншікті жылусыйымдылық, массалық жылусыймдылық анықтамалары.

13.Майер теңдеуінің практикалық мағынасы.

14.Денені қыздырғанда қысымның термиялық коэффициенті қандай шамамен сипатталады?

15. Термодинамикада жылу бірлігімен өлшенетін шамаларды атаңыз.

16.Термодинамикалық жүйе анықтамасы. Термодинамикалық жүйенің негізгі күй параметрлері.

Есептердің шығарылуы

1.1 Егер сыртқы қысым тұрақты болса, бөлме ішіндегі ауаның ішкі энергиясы температурадан тәуелсіз екендігін көрсетіңіз. Бөлме көлемі , қысымы атмосфералық қысымға тең болған жағдайдағы ішкі энергияны есептеңіз.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Идеал газдың ішкі энергиясы:

Адиабата көрсеткіші:

.

Менделеев-Клапейрон теңдеуінен

1.2 Резервуарда 5 кг ауа бар. Резервуар температурасы . Тұрақты көлемде резервуардағы ауаны температураға дейін көтеру үшін ауаға қандай мөлшерде жылу беру керек?

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Есептің шығарылуының 2-жолы көрсетіледі.

1. Жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділігін ескермейміз.

Газ тұрақтысы мен адиабата көрсеткіші бойынша тұрақты көлемде жылу сыйымдылықты анықтау

.

Жылу мөлшері

.

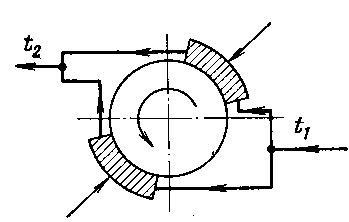
1. Ауаның меншікті ішкі энергиясының кестелік мәнін қолдана отырып, есептеу. және температуралары бойынша кестеден меншікті ішкі энергия мәндері , .

Жылу мөлшері

1.3 Қуатын анықтау мақсатында қозғалтқышттарды тексеру үшін оларды тоқтату керек. Қозғалтқышпен атқарылған жұмыс үйкеліске қарсы жұмсалады және жылуға айналады, шамамен 20% қоршаған ортаға шашырайды, қалған бөлігі тормозды салқындататын сумен кетеді. Су жылусыйымдылығы . Валдағы айналу моменті , айналу жиілігі , ал су температурасының көтерілу шегі болғанда 1 сағат ішінде тормозға қандай мөлшерде су жіберу керек.

*Берілгені:*

*Т/к*

**

*Шығарылуы:* Қозғалтқыш қуаты бірлік уақытта бөлінетін үйкеліс жылуына толығымен айналады, ал осы жылудың 80% сумен жұтылады. Сондықтан энергетикалық баланс былай жазылады:

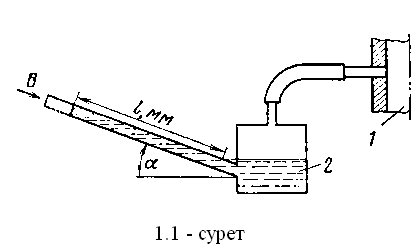
мұндағы су шығыны, кг/с; су жылусыйымдылығы, ; қозғалтқыш қуаты, Вт. Олай болса

.

Бақылау есептері

1.4 Көлемі ыдыста масссасы көміртегі тотығы орналасқан. Көрсетілген шарттарда көміртегі тотығының меншікті көлемін және тығыздығын анықтаңыз?

*Жауабы:*

******1.5 Асқын және сиретілген қысымдарды өлшеу үшін микроманометр қолданылады. Прибордың арнайы сүлбесі 1.1-суретте көрсетілген. Егер бұрышқа иілген 2-микроманометр түтікшесіндегі сұйық бағанының ұзындығы тең болса, 1-ауа өткізгішіндегі абсолюттік қысымды анықтау керек. Жұмысшы сұйық –спирт, тығыздығы . Барометр көрсеткіші . Қысымды МПа, мм.сын.бағ., өлшем бірліктерінде өрнектеңіз.

*Жауабы:* =0,1027 МПа = 770 мм.сын. бағ.=1,047

1.6 Газгольдерге жалғанған диаметрі құбырөткізгішке меншікті көлемі болатын газ жіберіледі. Егер газгольдер көлемі , құбырөткізгіштің орташа қимасы бойынша газ жылдамдығы , газгольдерге толтырылған газ тығыздығы болса, қанша уақыт аралығында газ газгольдерді толтырады?

*Жауабы:* .

1.7 Бу жинағышта мөлшерінде су буы орналасқан. Егер будың меншікті көлемі болғанда, бу жинағыш көлемін анықтаңыз.

*Жауабы:*

1.8 Фаренгейт шкалалы термометрмен өлшенген температураны Цельсий градусына айналдыру:

Цельсий градусымен өлшенген температураны Фаренгейт градусына айналдыру:

*Жауабы:*

1.9 Турбогенератор қуаты , генератор ПӘК-ті . Машиналық бөліктегі температура ; ауаның орташа жылусыйымдылығы . Егер ауаның соңғы температурасы аспауы қажет болса, генераторды салқындату үшін генератор арқылы қандай мөлшерде ауа өтуі қажет?

*Жауабы:* .

1.10 Қазандықты электр станциясы жұмыс уақыты мерзімінде тас көмір жақты, оның жану жылуы 28 900 . Көмір жанғанда алынған жылу электр энергиясына айналатын болса, яғни тең станцияның орташа қуатын анықтаңыз.

*Жауабы:*

1.11 Көлемі л ыдыста 1 моль газ орналасқан. К температурада газ қысымы атм, ал К температурада атм. Осы газдың Ван-дер-Ваальс тұрақтыларын анықтаңыз.

*Жауабы:* ; .

II ТАРАУ

**ТЕРМОДИНАМИКАНЫҢ ЕКІНШІ ЗАҢЫ**

Термодинамиканың бірінші заңы энергияның сақталу және түрлену заңын сипаттап, жылудың жұмысқа, жұмыстың жылуға айналуы мүмкін екендігін дәлелдеп, процесстің энергетикалық балансын құрайды. Бірақ ол жылулық процесс бағытын көрсетпейді. Жылулық процесс бағытын білмей, оның сипаты мен нәтижесін алдын ала білу мүмкін емес. Мысалы, термодинамиканың бірінші заңы қызған денеден суық денеге немесе керісінше суық денеден қызған денеге жылудың берілуі жайлы сұрақтардың шешімін бермейді. Күнделікті көріністер мен тәжірибелерден жылудың қызған денеден суық денеге өздігінен берілетінін білеміз және жылудың берілуі екі дене арасында толық температуралық тепе-теңдік орнағанша жүреді. Жылу қозғалысының бағытын тек қана жұмыс шығыны арқылы өзгертуге болады.

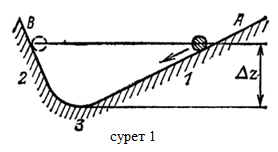
Кез келген процесске қатысатын жұмыс, жеңіл және толығымен жылуға айналады. Жұмыстың толығымен жылуға айналуы ерте заманнан екі денені үйкеу нәтижесінде жалын алынатындығынан адамзатқа белгілі. Табиғатта үзіліссіз мынадай құбылыстардың жүруімен (үйкеліс, соққы, тежелу және т.б.) жұмыстың жылуға айналатындығын көруге болады. Ал жылудың жұмысқа айналуы жылу көзі мен жылу қабылдағыш арасында тек қана температуралар айырымы болған жағдайда жүреді. Сонымен қатар жылу толығымен жұмысқа айнала алмайды.

Осы айтылғандардан жылудың жұмысқа және жұмыстың жылуға түрленуі арасында терең айырмашылық бар. Жылу машиналарында жылу ағынының бағытын көрсететін және жылудың жұмысқа түрленуінің максимал шегін орнататын – термодинамиканың екінші заңы болып табылады. Термодинамиканың екінші заңы былай өрнектеледі: «Кез келген нақты өздігінен жүретін процесс - қайтымсыз». 1850 жылы Клаузиус мынадай анықтама берді, «Жылу өздігінен суық денеден ыстық денеге беріле алмайды». Клаузиуспен қатар Томсон термодинамиканың екінші заңының басқа тұжырымдамасын былай өрнектеді: жылубергіштен алынатын барлық жылу жұмысқа айнала алмайды, тек жылудың бір бөлігі жұмысқа айналады. Қалған жылу жылуқабылдағышқа беріледі.

Сондықтан жұмыс алу үшін жоғары температуралы жылу көзі - жылу бергіш, және төменгі температуралы жылу көзі – жылу қабылдағыш болуы керек. Планк термодинамиканың екінші заңының мынадай тұжырымдамасын ұсынды, «Екінші текті мәңгілік двигатель жасау мүмкін емес». Екінші текті мәңгілік двигательдің мағынасы – үздіксіз жылу көзінен алынатын барлық жылуды жұмысқа айналдыратын двигатель.

§2.1 Процесстердің тепе-теңдігі және қайтымдылығы

Жүйенің барлық нүктесінде температура мен қысым бірдей болатын болса, онда термодинамикалық жүйе тепе-теңдік күйде болады. Барлық тұйықталған жүйе уақыт өтуіне қарай тепе-теңдік күйге келеді де сыртқы күштің әсері болмайынша өзгеріссіз қалады.

Термодинамикалық тепе-теңдікте жүйеде бір денеден екіншісіне жылу берілмейді, өйткені жылулық және механикалық тепе-теңдік орнайды. Жүйені құрайтын барлық денелердің қысымы мен температурасы қоршаған ортаның температурасы мен қысымына тең. Қоршаған орта шарты өзгеретін болса, жүйенің күйі де өзгереді. Мұндай өзгеріс жүйеде тепе-теңдік орнағанша, яғни жүйе мен қоршаған орта температурасы мен қысымы теңескенше байқалады. Техникалық термодинамика тепе-теңдік күй мен процесстерді қарастырады, өйткені термодинамикалық жүйе ішіндегі тепе-теңсіздік күй параметрлерінің уақыттан тәуелділігіне әкеледі. Сонымен, тепе-теңдік процесс деп, шексіз жақын күйлердің үзіліссіз қатарын айтамыз, оны және термодинамикалық диаграммада сызықпен көрсетуге болады. Егер жүйенің қысымы мен температурасы қоршаған ортаның қысымы мен температурасынан өте аз шамада айырмашылықта болса, термодинамикалық жүйенің қоршаған ортамен өзара әсері мен процесстің шексіз баяу өтуі байқалады.

Процестің тепе-теңдігімен оның қайтымдылық ұғымы байланысты. Қайтымды процесс дегеніміз – егер процесстің тура және кері бағытында термодинамикалық жүйе бастапқы қалпына келсе ол қайтымды. Егер тура бағытта жүйе қаншалықты мөлшерде жылу алатын болса, қайтымды процессте соншалықты мөлшерде жылу береді. Қайтымсыз процесстерді кері бағытында келтіретін болсақ ол үшін жұмыс және энергия жұмсалу керек. Осы барлық қайтымсыз процесстер жүйеде тепе-теңдік орнағанша жүреді.

Тура және кері бағыттағы процесстерде жүйенің бастапқы қалпына келмеуін қайтымсыз процесс деп атайды. Барлық өздігінен жүретін табиғи процесстер бастапқы қалпына келмейді, олар қайтымсыз. Мысалы үйкеліске қарсы атқарылатын жұмыс, қайтымсыз жылуға айналады.

Қандай да бір дене бет бойымен 1 нүктеден 2 денеге орын ауыстыру процесінде үйкелісті жоюға белгілі бір жұмыс атқарылуы қажет. Кері процессте дене 2 нүктеден 1 нүктеге орын ауыстырғанда үйкеліске қарсы сондай мөлшерде жұмыс атқарылады, өйткені үйкеліске қарсы атқарылатын жұмыс қозғалыс бағытынан тәуелсіз. Үйкеліс кез келген механикалық процесстің қайтымсыздығының себепкері. Егер үйкеліс болмаса кез келген механикалық процесс қайтымды болады.

Қайтымсыз процесстің қарапайым мысалына, вакуумдағы газдың ұлғаю процесін (Гей-Люссак – Джоуль тәжірибесі) жатқызуға болады. Газ бастапқда көлемді алып тұрады, ал ұлғайғаннан соң көлемге ие, газ өздігінен жұмыс атқарылмай бастапқы қалпына келе алмайды.



Күнделікті практикада жиі кездесетін қайтымсыз процесстерге жоғары температуралы денеден төменгі температуралы денеге жылудың берілуі жатады. Жылудың берілуі екі дененің температурасы теңескенше жүреді. Егер жұмыс атқарылмаса суық денеден ыстық денеге жылу берілуінің мүмкін еместігін адамзаттың бірнеше ғасырлық өмірлік тәжірибесі көрсетеді.

Гей-Люссак – Джоуль тәжірибесіндегі ұлғайған газ көлемін газдың бастапқы көлеміне келтіру үшін вакуумдық насос қолданылады. Насос білігіде сәйкесінше жұмыс атқарылады. Сонымен, суық денеден ыстық денеге мұздатқыш қондырғыларында қолданылатын жылулық двигательдің қайтымды циклы көмегімен жылу беруге болады.

Негізінде кез келген жылу двигателінде минимум екі жылу көзі болған жағдайда жұмыс атқарылады. Егер ыстық және суық жылу көздері жылулық тепе – теңдікке келгенде жылудың тасымалы мен жұмысы атқарылмай тоқталады.

Мысалға кез келген тұйықталған жүйеде 1 күйден 2-ші күйге өтетін процесс жүреді. Жүйенің қайтымдылығы 2-ші күйден 1-шіге өту үшін екі шартқа ие боламыз: 1) қайтымды процесс болады және қоршаған ортада осы процесс ешқандай өзгеріссіз өтеді. Бұл жағдайда 1-2 процесс қайтымды; 2) қоршаған ортада өтетін қайтымды процесстің өзгеріссіз болуы мүмкін емес. Бұл жағдайда 1-2 процесс қайтымсыз болады.

§2.2 Жылу машиналарының жұмыс істеу шарттары.

Термиялық ПӘК түсінігі.

Газдың ұлғаю процесінде сыртқы қысым күшіне қарсы жұмыс атқарады. Бастапқы қысымнан соңғы қысымға дейін газдың атқаратын ұлғаю жұмысы

(2.1)

мен ұлғаю процесінің басындағы және соңындағы газ көлемдері. Газдың ұлғаю процесін қайталап, жұмысын атқару үшін газды бастапқы күйіне келтіру, яғни газды сығу керек. Газды сығу кезінде жұмыс атқарылады, ал бұл жұмыс сыртқы ортадан беріледі:

(2.2)

немесе

(2.3)

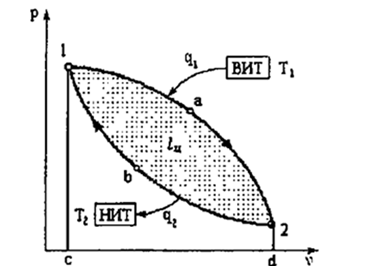
(2.1) теңдеуі сипаттайтын ұлғаю жұмысы мен (2.3) теңдеуі сипаттайтын сығылу жұмысының ұқсастығы процесс жүретін жолдан тәуелділігінде. Жылу двигательдерінде жұмыс атқарылатын циклдік процесстер жүзеге асады. Жылу двигателі дегеніміз –жылуды жұмысқа айналдыратын, циклды процесс жасай отырып, үздіксіз жұмыс істейтін жүйе.

Жылу двигателінен – жылу машинасынан пайдалы жұмысты алу үшін келесі шарттарды орындау керек: 1) жылу мен жұмысты өзара айналдыратын дене болуы қажет; 2) әртүрлі температуралы кем дегенде екі жылу көзін алу – жоғарғы жылу көзі (ВИТ) және төменгі жылу көзі (НИТ) немесе мұздатқыш; 3) жылумашинасының жұмысы айналымды (циклды) болуы керек, яғни дене бірнеше процесстерді орындай отырып бастапқы күйіне келу керек. 2-суретте келтірілген жылу машинасының циклын қарастырамыз: ұлғаю процесінде жоғары жылу көзінен жұмысшы денеге температуралы мөлшерінде жылу беріледі. Бұл кезде ауданы тең оң жұмыс атқарылады. сығылу процесінде жұмысшы денеден жылу мөлшері температурамен төменгі жылу көзіне беріледі. Осы процессте ауданы болатын жұмыс атқарылады. және процесстері үшін термодинамика бірінші заңының теңдеуі төмендегідей түрде жазылады



(2.4)

(2.5)



сурет 2. Жылу машинасының айналмалы циклы

Ішкі энергия өзгерісінің әртүрлі таңбамен алынған себебі цикл ішінде ішкі энергия өзгермеуі тиіс. (4) мен (5) теңдеулерін қосып

Цикл жұмысы ауданына тең. Пайдалы жұмыс алу үшін сығылуда атқарылатын жұмыс ұлғаю кезінде атқарылатын жұмыстан аз болуы керек . Осындай нәтиже алу үшін сығылумен қатар жұмысшы денеден жылуын алып салқындату қажет. Егер сығылу кезінде жұмысшы денені салқындатпаған жағдайда сығылу процесі жолымен жүреді де ұлғаю кезіндегідей жұмысы атқарылады. Нәтижесінде циклдің пайдалы жұмысы нольге тең болады. Осылайша, циклы бойынша жылудың келуі мен жылудың шығуын тізбекті қайталай отырып, үздіксіз жұмыс істейтін жылу машинасын алуға болады. Жылу машинасы циклының пайдалы әсер коэффициенті

(2.6)

Жылу машинасының пайдалы әсер коэффициенті – циклде алынған пайдалы жұмыстың барлық жұмсалынған жылуға қатынасын береді. Жылу машинасының пайдалы әсер коэффициенті барлық уақыттта 1-ден кіші, өйткені денеге келген жылудың барлығы жұмысқа айнала бермейді. мөлшеріндегі жылудың бір бөлігі қоршаған ортаға кетеді.

Осыдан келіп термодинамиканың екінші заңының өрнектелуі шығады. «Жылу машинасының көмегімен жылуды 100% жұмысқа айналдыру мүмкін емес». Барлық жылуды жұмысқа айналдыратын жылу двигателі екінші текті мәңгілік двигатель деп аталады. Пайдалы әсер коэффициенті бірге тең жылу машинасы энергияның өзара түрленуін сипаттайтын термодинамиканың бірінші заңына қайшы келмейді. Алайда, мұндай машина қандай да бір компенсациялаушы процесс арқылы пайдалы жұмыс алуды сипаттайтын термодинамиканың екінші заңына қайшы келеді.

§2.3 Карно циклы. Цикл әдістері.

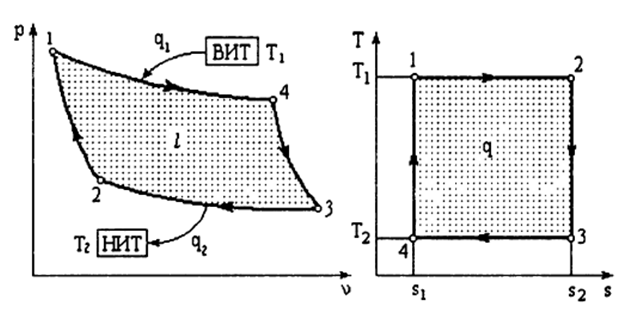
AN=3

Пайдалы әсер коэффициентті арттыру мақсатында Сади Карно тиімді Карно циклын ұсынды. Карно циклы қайтымды екі изотермиялық және екі адиабаталық процесстерден тұрады (сурет-3,4). Жұмыс атқарылуы үшін изотермиялық және адиабаталық процесстер ең тиімді процесстер болып табылады, яғни изотермиялық процессте денеге келетін барлық жылу жұмысқа айналады, ал адиабатада процесс жылу алмасусыз жүреді. 1-2 процесі температурасы жоғары жылу көзінен жылу алатын дененің изотермиялық ұлғаюын көрсетеді. 1-2 процесінде алынған жұмысына тең жылу мөлшері төмендегі формуламен анықталады



-жұмысы фигураның ауданымен де анықталады . 2-3 процесі адиабаталық ұлғаю процесі деп аталады. Газ фигураның -ауданына сан жағынан тең жұмыс атқарады және ол төмендегі формуламен





сурет 3 сурет 4

3-4 процесінде температуралы төменгі жылу көзіне жылу мөлшері келетін дененің изотермиялық сығылу процесі жүреді. Сығылу кезінде жұмысы атқарылады және ол фигураның ауданына сан жағынан тең.

4-1 адиабаталық сығылу процесінде газ температураға дейін қызады. Сығылуда атқарылатын жұмыс шамасы сан жағынан фигураның ауданына тең және төмендегі формуламен анықталады



Егер 3-4 процесінде газды суытпай-ақ сығатын болсақ (жылуын бермей), онда бұл процесс адиабаталық болады. Көріп тұрғандай адиабата сызығы эквидистанттық сызық (яғни өзара қиылыспайтын) болғандықтан, бір нүктеден кейін (3 нүктесінде) бір ғана адиабата жүргізуге болады. Онда бұндай сығылу нәтижесінде процесс 3-4 изотерма бойынша емес, 3-2 адиабата бойынша жүреді. Дене бастапқы күйіне тек изотерма бойынша ғана келу керек, өйткені изотермиялық процессте сығылуға аз мөлшерде жұмыс атқарылады. Нәтижесінде 3-4 және 4-1 процесстеріндегі сығылуға кеткен жұмыстың мөлшері 1-2 және 2-3 ұлғайтуға кеткендей жұмыс мөлшеріне тең. Циклдың пайдалы жұмысы және нольге тең. Пайдалы жұмыс алу үшін алынатын жылудың қандай да бір бөлігін қайтарусыз қоршаған ортаға беру керек. 1-2-3-4 циклының пайдалы жұмысы циклдың жеке процесстеріндегі алынатын немесе шығарылатын жұмыстың алгебралық қосындысымен анықталады. Циклдың барлық процесі үшін жұмыс формуласын қосып, төмендегі формуланы аламыз

(2.7)

2-3 және 4-1 адиабаталық процесстегі жұмыстар жойылады. (2.7) формула мына түрге келеді

Жылу машинасының кез келген циклының пайдалы әсер коэффициенті (Карно циклы) келесі формуламен анықталады

осыдан

(2.8)

2-3 және 4-1 адиабаталары үшін келесі тәуелділіктер орынды

Бірінші теңдеуді екіншісіне бөліп, аламыз

Осы қатынасты логарифмдеп

(2.9)



(2.9) теңдеуін ескере отырып, (2.8) теңдеу келесідей түрде жазылады

(2.10)

, немесе болғанда (2.10) теңдеуден екендігі байқалады. Бұл шартты идеал циклда да іске асыру мүмкін емес, өйткені жоғары жылу көзінің температурасы шексіздікке тең болатындай жағдайға жету мүмкін емес, сонымен бірге төменгі жылу көзінің температурасы температураның абсолюттік ноліне тең болуы мүмкін емес.



(2.10) теңдеуден болғанда , яғни жоғары және төменгі жылу көздерінің температурасы бір-біріне тең болған жағдай үшін жылудың жұмысқа айнала алмайтындығы шығады. Осыдан тағы да термодинамиканың екінші заңының өрнектелуінің бірі болатын 2-ші текті мәңгілік двигателінің екінші анықтамасын алуға болады. «2-ші текті мәңгілік двигатель деп- оның көмегімен температуралар айырымы болмаған жағдайда пайдалы жұмыс алуға болатын жылу двигателін айтамыз». Термодинамиканың екінші заңына сай ондай двигатель болуы мүмкін емес.

Карно циклынан тағы да маңызды қорытынды жасауға болады. Жылудың жұмысқа толықтырусыз (компенсацияланусыз) айналуы мүмкін емес. Компенсацияның екі түрі бар: 1-ші текті компенсация жылудың жұмысқа айналу процесі дененің термодинамикалық күйінің өзгеруімен жүреді. Мысалғы, идеал газдың изотермиялық ұлғаю процесінде ішкі энергия тұрақты болып қалады да, газға келетін барлық жылу жұмысқа айналады. 1-ші текті компенсацияға жататын көлемнің ұлғаюы жылудың жұмысқа айналуының ең басты шарты болып саналады. Жұмыс жылуға айналатын болса, бұл процесс жүйедегі дене күйін өзгертіп қоймай, басқа да денелердің күйін өзгертетін болса, онда бұл жағдай 2-ші текті компенсацияға жатады. 2-ші текті компенсациялану ұғымын термодинамиканың екінші заңынан (Планк өрнектелуінен) оңай түсінуге болады: «жылу көзін суыту және жүк көтеруден басқа жұмыс атқармайтын периодты жұмыс жасайтын жылу машинасын құру мүмкін емес»

Табиғатта өздігінен бір бағытта ғана жеңіл өтетін процесстер көп, ал кері бағытта бұл процесстер өздігінен жүзеге аспайды. Мысалға, жылудың ыстық денеден суық денеге өтуі өздігінен жүреді, ал суық денеден ыстық денеге өтуі қосымша процесстерсіз жүруі мүмкін емес. Жылудың суық денеден ыстық денеге өтуі жылу двигателіның қосымша жұмыс атқарылуымен орындалады. Жылу двигателінің жұмысы тек төменгі жылу көзінен жылу беретін компенсациялаушы процесс үшін орындалады.

Осыдан табиғи жолмен ыстық денеден суық денеге берілетін жылу мөлшері жүйені бастапқы күйіне келтіру үшін жеткіліксіз екендігі шығады. Өйткені жылудың бір бөлігі ( мөлшерінде) төменгі жылу көзіне қайтымсыз беріледі. Сондықтан жүйені бастапқы күйіне келтіру үшін, тура процессте берілген жылумен салыстырғанда өте көп жылу шығыны болуы керек. (2.10)-теңдеуден мынадай маңызды қорытынды шығады. Карно циклының ПӘК-ті төменгі және жоғарғы жылу көздерінен тәуелді, ал дененің тегіне тәуелді емес.



§2.4 Қайтымды кері **Карно циклы**

Карно циклы тура бағытта ғана емес кері бағытта да жүреді. Жұмысшы дене бастапқы нүктеден адиабата бойынша сыртқы ортамен жылу алмаспай ұлғаяды. Сонымен қатар температура температураға азаяды. Содан соң газ изотермасы бойынша ары қарай ұлғаяды. Бұл процессте жүйеге төменгі температуралы жылу көзінен алынған жылуы келеді. Жұмысшы дененің температурасы температурадан температураға ұлғая отырып, адиабаталық сығылу процесі жүреді. Соңғы процесінде изотермиялы сығыла отырып, жоғары температуралы жылу қабылдағышқа жылуы беріледі.



Сыртқы сығылу жұмысының шығыны тұйық циклдың ауданды шамасына ұлғайтатын жұмыстан көп екендігін көруге болады. Бұл жұмыс жылуға айналып, жылуымен бірге температуралы жылу көзіне беріледі. Осылайша, қайтымды циклдың жүруіне жұмысын атқара отырып, жылуқабылдағыштан жылубергішке жылуын тасымалдауға болады. Жылуқабылдағыштан алынатын жылу төмендегі формуламен анықталады

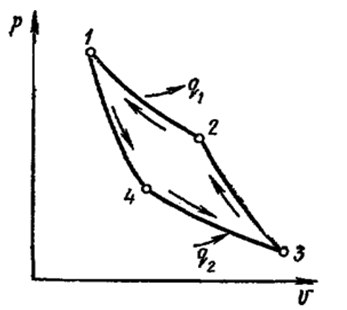


Қайтымды кері цикл бойынша жұмыс істейтін машиналарды мұздатқыш машиналары деп аталады. Қайтымды Карно циклынан Клаузиус постулатындағыдай мынадай тұжырым жасауға болады, төменгі температуралы жылу көзінен жоғары температуралы жылу көзіне жылу тасымалдау үшін, міндетті түрде энергия шығыны болады.

Мұздатқыш машинасы эффективтілігінің сипаттамасы мұздатқыш коэффициенті болып табылады



Кері Карно циклы үшін



сурет 5

Мұздатқыш коэффициенті жылу көзінің және абсолюттік температураларынан тәуелді. Тура және кері Карно циклдарын қарастырғаннан кейін Клаузиус анықтаған термодинамиканың екінші заңының өрнегін түсіндіруге болады. Клаузиус табиғатта жүретін барлық табиғи процесстер өздігінен жүреді, ал кері бағытта процесс компенсациясыз өздігінен жүре алмайды деп көрсетті. Өздігінен жүретін процесстерге: ыстық денеден салқын денеге жылудың берілуі; жұмыстың жылуға айналуы; сұйықтар мен газдардың өзара диффузиясы және т.б. жатады. Өздігінен жүрмейтін процесстерге жоғарыда аталғандарға кері процесстер: салқын денеден ыстық денеге жылудың берілуі; жылудың жұмысқа айналуы; диффузияланатын заттардың құрамдас бөлшектерге ыдырауы және т.б. жатады.



Төменгі температуралы жылу көзінен жоғары температуралы жылу көзіне жылу беру арқылы кеңістікті жылытуға арналған мұздатқыш машиналар *жылу насостары деп аталады.* Олардың эффективтілігі салыстырмалы коэффициентпен бағаланып, мына формуламен анықталады



§2.5  **Энтропия күй функциясы**

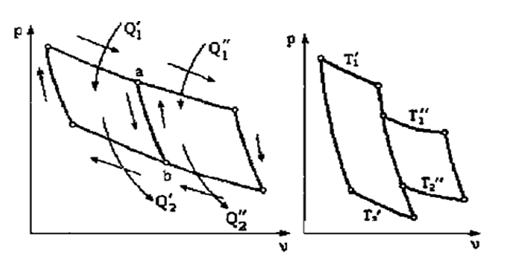
Гиббс 1870 жылы потенциалдар әдісін енгізгенге дейін термодинамикада жылу мен жұмыстың түрленуімен байланысты процесстердің термодинамикалық сипаттамалары арасындағы байланысты орнататын цикл әдісі кеңінен қолданылды. Цикл әдісін Карно идеясы негізінде Клапейрон ұсынды.

Қайтымды Карно циклының пайдалы әсер коэффициенті мен жылу машинасы циклының пайдалы әсер коэффициентін (2.6) теңдеумен салыстыра отырып, мына теңдікті аламыз

Осы теңдіктен

(2.11)

шамасы келтірілген жылу деп аталады. (2.11) теңдеуден Карно циклындағы қыздырғыш пен салқындатқыштың келтірілген жылуларының теңдігі шығады. Карно циклын аралық адиабаталы екі немесе бірнеше циклдарға бөлуге болады (сурет 6). адиабатасы арқылы циклды екіге бөлгенде, жылу және болып екіге бөлінеді



сурет 6 сурет 7

Алынған циклдар бойынша келтірілген жылулардың теңдігі

Осы теңдіктерді қосқанда

Ал бірнеше циклге бөлгенде төмендегідей теңдік қолданылады

(2.12)

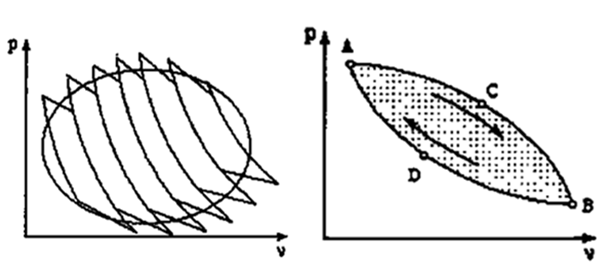
Әртүрлі температуралы қыздырғыштар мен салқындатқыштар болған жағдайда (2.12) теңдеуі келесі түрде жазылады

(2.13)

Кез келген қайтымды циклды бірнеше элементар адиабата бойынша жанасатын Карно циклдарына бөлуге болады (сурет 8).

Осы кезде контур ішінде орналасқан адиабата қиындылары өзара компенсацияланады. Элементар циклдардың соңғы саны үшін (2.13) теңдеу келесі түрде жазылады

(2.14)



сурет 8 сурет 9

(2.14) теңдеуін төмендегідей жазуға болады

(2.15)

Қосынды барлық контурға қатысты болғандықтан, (2.15) өрнегін алгебралық қосындысы ретінде қарастыруға болады

(2.16)

(2.16) –өрнегі қайтымды цикл үшін Клаузиус интегралы деп аталады. жол түрінен тәуелсіз. Мысылы, 9-суретте АСВ жолы бойынша А-нүктесінен В-нүктесіне дейін күй өзгеретін болса

АДВ жолы бойынша А-нүктесінен В-нүктесіне

осыларды ескеріп,

немесе

Тұйық контур бойынша шамасынан интеграл нольге тең және оның өзгерісі жол формасынан тәуелсіздігін ескере отырып, шексіз аз шамасы қандай да бір күй параметрінің функциясы екендігі шығады.

(2.17)

Бұл функция энтропия деп аталады.

§2.6 **Энтропия. Термодинамикалық жүйе энтропиясының өсуі**

Термодинамиканың екінші заңы тәжірибе деректерінің тұжырымы болып табылатын екі заңдылықтан тұрады. Біріншісі – қайтымды процесстер үшін энтропияның болу принципі; қайтымсыз процесстер үшін энтропияның өсу принципі. Энтропияның болу принципі былай тұжырымдалады: әрбір термодинамикалық жүйе үшін жүйе күйінен тәуелді энтропия физикалық шамасы болады және жылу күйінде берілетін энергия әсерінен энтропияның өзгерісі болады. Энтропияның болу принципінің аналитикалық өрнегі

(2.18)

Энтропияның өсу принципі тепе-теңсіздік процесстерге қатысты және осы процесстердің ерекшеліктерін бейнелейді. Сондықтан энтропияның өсу принципін өрнектеп, аналитикалық теңдеуін алу үшін тепе-теңсіздік (қайтымсыз) процесстер ерекшеліктерін қарастыру қажет.

Екі жүйе арасында өздігінен энергияның жұмыс формасында берілуі жүйелердегі қысымдар әртүрлі болған жағдайда жүреді және энергия бағыты қысымы жоғары жүйеден төменгі жүйеге қарай бағытталады. Ешқашан кері бағытта болмайды. Осыған ұқсас өздігінен энергияның жылу формасында берілуі жүйелердегі температура әртүрлі болғанда және температурасы жоғары жүйеден төменгі жүйеге бағытталады. Осы тепе-теңсіздік процесстері болып саналады. Қысымдары мен температуралары әртүрлі денелер арасында энергияның берілуі қайтымсыз және міндетті түрде төменгі қысым бағытына (энергияның жұмыс формасында берілуі), төменгі температура бағытына (энергияның жылу формасында берілуі) қарай бағытталады.

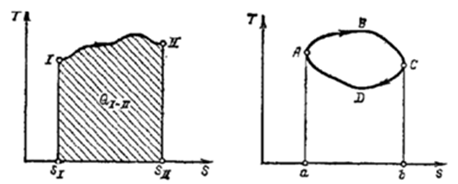
Әртүрлі денелер арасында тепе-теңдікті (қайтымды) энергияның берілуі тура бағытта және кері бағытта да жүруі мүмкін. Әртүрлі температуралы денелер арасында тепе-теңдікті жылудың берілуі Карно циклын жасайтын термомеханикалық жүйенің болуын талап етеді.

Қайтымсыз процесстерде энергияның жұмыс формасында берілуі кезінде осы атқарылатын жұмыстың бір бөлігі өздігінен жылуға айналады. Жылуға айналған жұмыстың бір бөлігі қаншалықты көп болса, жүйенің тепе-теңсіздік дәрежесі соншалықты үлкен.

Әртүрлі термодинамикалық процесстердегі энтропияның өзгерісін қарастыралық. (2.18) теңдеуден жүйенің энтропиясы әртүрлі қайтымды процесстерде өсуі де кемуі де мүмкін. Өтйкені температура әрқашан оң шама болғандықтан, жүйеге жылу келгенде энтропия артады, ал жүйеден жылу шыққанда энтропия кемиді. Қайтымды процессте дене күйінің өзгерісі 1-күйден 2-ші күйге өткенде дене энтропиясы өзгереді

(2.19)

Энтропия түсінігі жылу двигательдерінің циклын талдау үшін жеңіл -диаграммасын енгізуге мүмкіндік береді (сурет 10).



сурет 10 сурет 11

(2.18) теңдеуден қайтымды процессте

(2.20)

Қайтымды процессте жүйеге келген немесе жүйеден шыққан жылу жылу мөлшері

(2.21)

-диаграммада (сурет 11) жылу двигателінің қайтымды циклы бейнеленген. Циклдағы жұмысшы денеге келген жылу сызығы астындағы ауданмен, ал жұмысшы денеден шыққан жылу қисығы астындағы ауданмен белгіленген. (2.21) теңдеуден изотермиялық процесстегі жылу мөлшері

теңдеуінен қайтымды адиабаталық теңдеуде ..

*Қайтымсыз процесстегі энтропия өзгерісі.* Тұйықталған (изоляциялық) жүйедегі қайтымсыз процессті қарастырамыз. Тұйықталған жүйе деп – жылу изоляциясымен жабдықталған қатты қабықшалы жүйені атайды. Жылуизоляциясы жүйені қоршаған ортамен жылуалмасуынан сақтайды, ал қатты қабықша қоршаған ортамен ұлғаю жұмысының атқарылуынан сақтайды. және температураларына ие екі денеден тұратын изоляцияланған жүйені қарастырып, деп санаймыз. Жүйедегі осы денелер арасында температурасы жоғары денеден температурасы төмен денеге жылу беріліп, жылуалмасу процесі жүреді. Егер бірінші денеден екінші денеге жылу мөлшері берілсе (2.18) теңдеуіне сәйкес бірінші дененің энтропиясы мынадай шамаға төмендейді

(2.22)

ал екінші дененің энтропиясы мынадай шамаға өседі

(2.23)

Түгелімен жүйе бойынша энтропияның өзгерісі

(2.24)

болғандықтан

(2.25)

яғни қайтымсыз процесс нәтижесінде қарастырып отырған изоляциялық жүйенің энтропиясы өседі. Қорытындылап айтқанда, изоляцияланған жүйеде қайтымсыз процесстің нәтижесінде жүйе энтропиясы өседі, ал егер изоляцияланған жүйеде қайтымды процесс орындалған жағдайда жүйе энтропиясы тұрақты болып қалады. Сонымен изоляцияланған жүйеде қандай процесс жүрсе де оның энтропиясы төмендемейді:

Бұл қатынастағы “=” белгісі қайтымды процесстер, “>” белгісі қайтымсыз процесстерді бейнелейтін термодинамиканың екінші заңының аналитикалық өрнегін береді.

§2.7 Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының бірігуі

Термодинамика екінші заңының аналитикалық өрнегі

Бұл қатынасты былай жазуға болады

(2.24)

Заттың бірлік массасы үшін

(2.25)

Сәйкесінше термодинамиканың бірінші заңын және дененің бірлік массасы үшін жазсақ

және мәндерін (2.24) пен (2.25) қойсақ

(2.26)



(2.27)



Бұл қатынастар термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының біріккен теңдеулері. Егер жүйе тек ұлғаю жұмысын атқаратын болса

(2.28)



(2.29)



Кейін бұл теңдеулерді тепе-теңдік күйдегі жүйелер үшін қолданамыз. Ондай жүйе үшін бұл біріккен теңдеулер былай жазылады

(2.30)

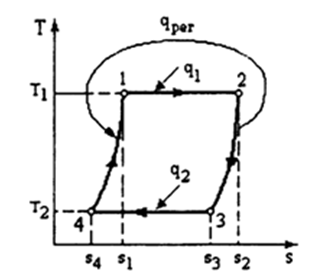


(2.31)



§2.8 Жалпыланған термодинамикалық Карно циклы. Жылу регенерациясы

12-суретте және екі изотермадан, және горизонталь бағытта эквидистантты кез келген қайтымды процесстерінен тұратын циклы бейнеленген.



сурет 12

Термодинамикада эквидистанттық деп – бірдей температураларда тең бұрыштық коэффициенттерге ие сызықтар жиынтығын атайды. процесінде температуралы қыздырғыштан жұмысшы денеге меншікті жылу мөлшері келеді. процесінде жұмысшы дене ауданына тең жылу мөлшерін береді. процесінде жұмысшы дене изотермиялы сығыла отырып, температурасында



мөлшердегі жылуды мұздатқышқа береді. процесінде жұмысшы дене ауданымен өлшенетін жылу мөлшерін жұтады. процесінде аралық жылу бергіш ретінде процесінде жылуқабылдағыш ретінде қолданылған жылу көзі қолданылады. және процесстерінің эквидистанттылығына байланысты және аудандары өзара тең, сәйкесінше мен меншікті жылу мөлшері абсолют шамасы бойынша бірдей, яғни процесінде жұмысшы дене қанша жылу берсе процесінде соншалықты жылуды қабылдайды. Қарастырып отырған жағдайда циклдың бір бөлігінен басқа бөліктеріне жылу тасымалдану жүреді. Осындай процесс - жылу регенерациясы деп аталады. циклының жұмысы , немесе . Термиялық пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК)



және сызықтары эквидистантты болғандықтан, және .

Осыдан

Осылайша, екі изотерм мен екі эквидистанттық сызықтардан тұратын қайтымды циклдің пайдалы әсер коэффициенті (ПӘК) қайтымды Карно циклының пайдалы әсер коэффициентіне тең. Жылу регенерациясы қолданылатын цикл регенеративті цикл деп аталады. Екі изотерм мен кез келген екі эквидистанттық сызықтардан тұратын регенеративті қайтымды цикл жалпыланған регенеративті Карно циклы деп аталады. Пайдалы әсер коэффициенті жоғары мұндай циклдар жылуэнергетикалық қондырғыларда жиі қолданылады.

§2.9 Эксергетикалық зерттеу әдісі. Энерияның түрленуінің эффективтілігі.

Техникалық термодинамиканың басты мақсатының бірі – энергияның бір түрден екінші түрге түрленуінің шарттарын талдау. Энергия көзі энергиясын тұтынушы талабына сай формада емес, ол өзінің бастапқы формасында тұтынушыға береді, немесе энергия көзі потенциалы (қысым, температура, электрлік кернеу және т.б.) тұтынушы потенциалымен сәйкес келмейтін жағдайлар болады. Сол үшін энергияның түрлену шарты қажет. Энергияны түрлендіргіш бірнеше жылу көзінен бастапқы энергияны әртүрлі форма мен мөлшерде алуы және энергияны тұтынушыға әртүрлі форма мен мөлшерде беруі мүмкін. Түрлендіргіштің өзі тұтынушы үшін энергия көзі бола алады. Көп жағдайда түрлендіргіш бастапқы энергияны бір формада қабылдайды, ал сол энергияны тұтынушыға бірнеше формада береді. Осы формалардың біреуі пайдалы, ал қалғаны қосалқы және олар энергия шығынын құрайды. Энергияның түрлену эффективтілігі тұтынушыға берілетін пайдалы энергия мөлшерінің түрлендіргіштің жылу көзінен қабылдаған бастапқы энергия мөлшеріне қатынасымен сипатталады.

Бастапқы энергия көзіне, термодинамикалық жүйенің түріне және сол жүйедегі процесстердің жүруіне байланысты жұмыстың максимал мөлшері жұмыс қабылеттілік функциясы (термодинамикалық потенциалдар) деп аталатын әртүрлі қатынастармен өрнектеледі.

Қазіргі таңда термодинамикада энергияның түрленуін зерттеудің екі әдісі бар: *бірінші әдісі* – циклдардың тура және қайтымды процесстерін талдау әдістері. Бұл термодинамиканың бірінші және екінші заңдары негізіндегі әдіс жылу мен жұмыс мөлшері, күй параметрлері арасындағы байланысты табуға мүмкіндік береді; *екінші әдісі*–әртүрлі жүйелерде энергияның түрлену процесін талдау мақсатымен термодинамикалық потенциалдарды қолдануға негізделген. Термодинамикалық потенциалдар барлық жағдайда жұмыстың кез келген түрінің шамасын анықтай алады. Термодинамикалық потенциалдар көмегімен берілген жүйенің кез келген нүктесінде жүйенің құрылымы мен күрделілігіне байланыссыз дененің немесе энергия ағынының жұмыс қабылеттілігін бағалауға болады.

Термодинамикалық потенциалдарды қолдануға негізделген әдістің ерекшелігі – оның максимал универсалдығы болып табылады. Алайда техникалық жүйені талдауға қатысты потенциалдарды қолдану есебі үшін, сыртқы шарттарда энергия ағынының жұмыс қабылеттілігін сипаттайтын термодинамикалық функциялар болуы қажет. Термодинамикалық функциялар жүйенің ішкі параметрлерімен қоса қоршаған орта параметрлерін ескеріп энергияның жұмыс қабылеттілігін анықтай алатын потенциалдар ролін атқара алады.

Дененің немесе энергияның жұмысқабылеттілігін анықтайтын жүйенің энергетикалық ресурсының өлшемі *эксергия* деп аталады. Эксергия шамасын анықтайтын функция *эксергетикалық функция* деп аталады. Эксергия - материяның фундаментальдық қасиетімен байланысты энергиядан айырмашылығы қоршаған ортаның берілген шарттарында энергияның жарамдылығын сипаттайтын дербес ұғым болап табылады.

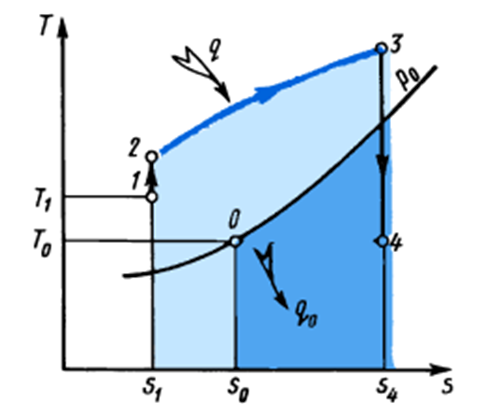
*Эксергетикалық әдіс дегеніміз* – термодинамикалық процесстерде жұмысқабылеттіліктің шығынын талдауға негізделген зерттеу әдісі. Бұл әдіс энергияның барлық түрлерін өзара салыстырып, соның негізінде энергия өзгерісінің әртүрлі процесстерінің эффективтілігін анықтауға мүмкіндік береді. *Эксергетикалық көрсеткіштер*, жобалайтын жылуэнергетикалық қондырғылардың өлшемі мен экономикалық өте тиімді параметрлерін табуға мүмкіндік беретін қондырғылардың техникалық-экономикалық сипаттамаларымен байланысты. Эксергияның мынадай түрлері бар:

1. Жұмысшы дене эксергиясы – дене мен қоршаған ортадан тұратын жүйе. Бұл жүйеде дененің ішкі және сыртқы энергиясы қолданылады. Эксергия тыныштықта тұрған дененің және оның ағынының эксергиясы деп бөлінеді.

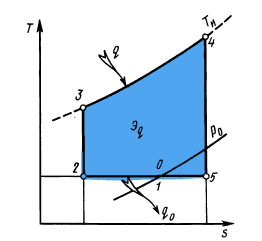
2. Энергия ағыны эксергиясы – жылу эксергиясынан тұрады, яғни жылу көзінен, жұмысшы денеден және қоршаған ортадан тұратын жүйе ағыны эксергиясы.

§2.10 Жұмысқабылеттілік функциясы. Эксергетикалық шығын және эксергетикалық ПӘК

Термодинамикалық жүйеде жұмысшы дененің жұмысқабылеттілік функциясы мынадай процесстер болған жағдайда алынады. Жүйенің бастапқы күйінде жұмысшы дененің бастапқы параметрлері қоршаған орта параметрлерімен тең болмайды , қоршаған ортамен біртіндеп тепе-теңдікке келеді. Барлық процесс тепе-теңдікке келу үшін, яғни жұмысшы дене температурасы жылу көзі температурасына тең болатын адиабата процесін жүргізу керек. Бірақ жұмысшы дене қоршаған ортамен (тұтынушымен) қандай да бір мөлшерде жұмыс атқарады. процесінде жұмысшы дене жылу көзінен мөлшерде жылу алады, ал жұмысшы дене температурасы барлық уақытта жылу көзі температурасына тең, сонымен қоса жұмыс орындалады. адиабаталық процессте жұмысшы дене жұмыс жасай отырып, өзінің температурасын қоршаған орта температурасына дейін өзгертеді. Егер жұмысшы дене температурасы қоршаған орта температурасына жеткенде жұмысшы дене қысымы қоршаған орта қысымына тең болмауы мүмкін. Олай болса, тепе-теңдік орнату үшін, жұмысшы дене қоршаған ортаға жылу мөлшерін бере отырып, -изотермиялық процесі орындалады.



сурет 13. Айнымалы температуралы жылу көзінен жылу алатын жүйенің жылу қабылеттілігін анықтау



сурет 14. Айнымалы температура көзінетін алынатын жылудың жұмысқабылеттілігін анықтау

Жұмысшы дененің -күйінен -күйіне өтердегі жылу көзімен, тұтынушымен және қоршаған ортамен алмасатын жұмысы мен жылуы мөлшерінің қосындысы жүйе үшін термодинамиканың бірінші заңымен байланысты

(2.32)

Энтропияның суммалық өзгерісі жұмысшы дене энтропиясы, жылу көзі және қоршаған орта өзгерістерінің қосындысынан тұрады

-қоршаған орта энтропиясының өзгерісі

«» таңбасы жылу көзі жылуын бергенде энтропия кемитіндігін білдіреді. Қоршаған орта температурасының тұрақтылығын ескерсек энтропиясының өзгерісі

мұндағы - алгебралық шама. 13-суреттегідей -процесінде қоршаған орта жұмысшы денеден жылу алса, онда ортаның энтропиясы өседі, егер де изотермиялық процессте жұмысшы дене қоршаған ортадан жылу алса, онда ортаның энтропиясы кемиді.

Олай болса

мұндағы

(2.33)

(2.33) теңдеуін (2.32) теңдеуіне қойып, жүйедегі жұмысшы денемен атқарылған пайдалы жұмыс мөлшері алынады:

(2.34)

Барлық процесс толық қайтымды болғанда денелердің энтропия өзгерісінің қосындысы нольге тең , ал жұмыс максимал болады. Жұмысшы дененің бастапқы күйінің индексін алып тастаса, (2.34) теңдеуінен ағымды жүйенің жұмысқабылеттілігі функциясы үшін өрнекті аламыз:

(2.35)

Бастапқы жылу көзі болмаған жағдайда жұмыс ағымды жүйеден өтетін тек қана жұмысшы дене энергиясы арқылы атқарылады. шартында (2.35) өрнектен эксергия үшін төмендегі шама алынады

(2.36)

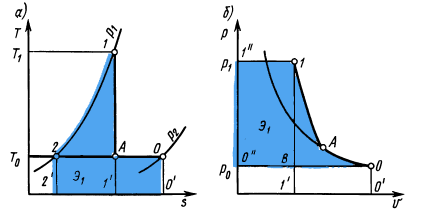
Жұмысшы дене эксергиясының мәні тек оның бастапқы күйінен тәуелді. Сондықтан эксергия қоршаған ортаның берілген шарттарында жұмысшы дененің күй функциясы болып табылады. Жұмысшы дененің бастапқы күйі соңғы күйімен сәйкес келгенде *жылудың жұмыс қабылеттілік функциясы* қолданылады (сурет 14). Бұл кезде жұмыстың атқарылуы тек қана дене алатын бастапқы жылу арқылы жүреді. Термодинамикалық жүйеде жұмысшы дене периодты қайта-қайта бір күйден өтетін болса, онда дененің өзіндік энергиясы жұмыс атқарылуға шығындалмайды. Осындай шарттарда және, яғни , , ал (2.35) теңдеу *жылу эксергиясы* деп аталатын жылудың жұмысқабылеттілік функциясын береді:

(2.37)

(2.36) және (2.37) теңдеулерін ескере отырып, максимал мөлшердегі пайдалы жұмысты анықтайтын теңдеу алынады

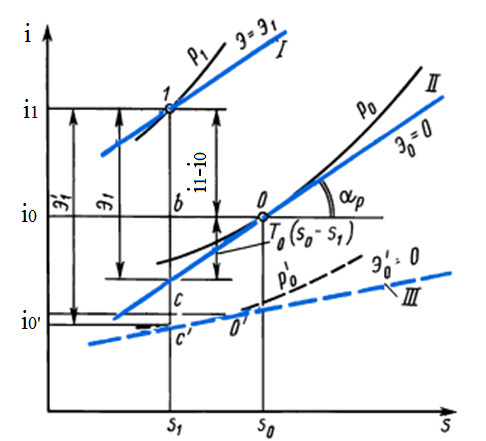
(2.38)

Жылу эксергиясы мен жұмысше дене эксергиясы күй диаграммасында көрсетілген. Жылу эксергиясы (сурет 14) -диаграммада ауданымен бейнеленген. Идеал газ үшін энтальпияның өзгерісі 15а-суретте изобарасы астындағы ауданымен, ал -изотермиялық процесстегі жылу мөлшері ауданымен бейнеленген. Ағынды жүйеде идеал газ эксергиясы -диаграммада изобарасы мен изотермасы астындағы аудандарымен көрсетілген. Жұмысшы дененің эксергиясы -диаграммада ауданымен бейнеленген. Тұйық жүйедегі жұмысшы дененің эксергиясы -диаграммада ауданына сәйкес.



сурет 15. Жұмысшы дене эксергиясын анықтау

16-суретте -диаграммасы көмегімен жұмысшы дене эксергиясын графикалық түрде анықтауға болады.



сурет 16. диаграммасында жұмысшы дененің эксергиясын бейнелеу:

I-сызығы , II- болғандағы қоршаған орта сызығы, III- болғандағы қоршаған орта сызығы

Осы мақсатта (2.36) теңдеуі мына түрде жазылады

Эксергияның нольге тең күйі жұмысшы дененің қоршаған ортамен тепе-теңдігін сипаттайтын, 0-нүктесі арқылы өтетін, бұрыштық коэффициентке ие II-сызығына сәйкес келеді. Бұл сызық 0-нүктесінде изобарасына жанама болып табылады. 16-суреттен

Жұмысшы дене эксергиясы дене күйіне сәйкес келетін 1 нүктесі мен қоршаған орта түзуіндегі нүктесі арасындағы вертикаль ұзындығымен бейнеленген. -диаграммасы қоршаған ортаның шарты шартына өзгергенде эксергияны анықтау үшін өте ыңғайлы. Ол үшін шартында сызығын жүргізсе жеткілікіті. Жұмысшы дененің эксергиясы жаңа шартта сызықпен бейнеленген.

Кез келген энергия түрлену процесстерінің қайтымсыздығы тұтынушыға берілетін нақты жұмыстың төмендеуіне әкеледі. Жұмыс шығыны процесс қайтымсыздығынан болатын энтропияның өзгерісімен анықталады. Қайтымсыз процесс әсерінен болатын пайдалы жұмыстың кемуі қоршаған орта температурасын процесске қатысқан барлық денелер энтропиясы өзгерісіне көбейткенге тең

(2.39)

Бұл (2.39) эксергетикалық шығын өрнегі және Гюи-Стодол заңын өрнектейді. Эксергия түсінігін қолдану энергияның түрлену эффективтілігіне термодинамикалық процесстер біртексіздігінің әсерін сапалы анықтауға мүмкіндік береді. Жұмыс формасында алынатын энергия мөлшерін қайтымсыз процес әсері кемітетіндігін (2.39) теңдеуі көрсетеді. (2.38) теңдеуі сол шығынды табуға мүмкіндік береді. Толығымен қайтымды процесстермен жұмыс істейтін қондырғыларда шығын болмайды.

Эксергетикалық ағын әдісінде (2.35) теңдеуі бойынша жұмысшы дене ағын эксергиясы, ал (2.36) бойынша жылу ағынының эксергиясы және жұмыстың барлық түрлері ескеріледі. Жұмысшы дене эксергиясы мен жылуын анықтау үшін эксергетикалық диаграмманы қолданған ыңғайлы. Жүйеде қайтымсыз процесс болғанда одан шығатын эксергия ағындарының қосындысы жүйеге енетін эксергия ағындарының қосындысынан барлық уақытта аз болады. Термодинамикалық жүйенің эксергетикалық ПӘК-ті, яғни пайдалы қолданылған эксергияның эксергия шығынына қатынасын береді

(2.40)

Бақылау сұрақтары

1. Қайтымды Карно циклын сипаттау.

2. Айналымды процесс немесе цикл. Цикл түрлері.

3. Айналымды процесстегі барлық жылуды жұмысқа айналдыруға бола ма?

4. Жылудың жұмысқа айналуының үзіліссіз процесін жасау үшін қандай шарттар талап етіледі?

4. Кері Карно циклы. Кері Карно циклы бойынша қандай машиналар жұмыс істейді?

5. Термиялы ПӘК дегеніміз не?

6. Қандай шарттарда циклдың термиялық ПӘК бірге тең болады?

7. Қайтымды Карно циклының термиялық ПӘК қандай параметрлерден

тәуелді?

8. Қайтымды Карно циклының қасиеті және Клаузиустің бірінші интегралы.

9. Термодинамиканың екінші заңының өрнектелуі.

10. Максимал пайдалы жұмыс қалай анықталады?

11. Эксергетикалық зерттеу әдісі.

12. Жұмысқабылеттілік функциясы деген не?

13. Қайтымды және қайтымсыз процесстерде эксергия қалай өзгереді?

14.Қайтымсыз процесстерде эксергия шығыны қоршаған орта параметрлерінен қандай тәуелділікте болады?

15. Жұмысшы дене мен жылу эксергиясы.

Есептердің шығарылуы

2.1 Егер жоғарғы жылу көзі тұрақты температурада, ал төменгі жылу көзінің температурасы ден температураға дейін төмендетілсе, Карно циклінің ПӘК-ті қалай өзгереді?

*Берілгені:*

*Т/к*  (Карно циклоның ПӘК қалай өзгереді?)

*Шығарылуы:*

температурада Карно циклының ПӘК-ті

температурада

Карно циклының ПӘК-тінің өсуі

2.2 Сығылу процесінде 1 кг екі атомды көміртегінің энтропия өзгерісін анықтаңыз. Көмірқышқылының бастапқы параметрлері: , соңғы параметрлері . Есептеуді екі вариантта жүргізу керек: 1) көмірқышқыл газының жылусыйымдылығын есептеуде молекула-кинетикалық теориясын қолдану; 2) жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділік кестесін қолдану (16 қосымшасы).

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:*

мен көмірқышқыл газы үшін энтропияның температуралық функциясының кестелік мәні. Екі вариант бойынша алынған нәтижелерде айырмашылық көп. Нақтыға жуық дәлірек жауап екінші вариант бойынша алынған.

2.3 Қоршаған ортаның температурасы болғанда қазандық қондырғыларында температурамен бу өңделеді. Жану камерасындағы жану өнімінің температурасы . Жанармайдың жанғыштық қабылеттілігі . Бу алатын жанатын газ жылуының эксергиясын және эксергетикалық ПӘК-тің табу керек.

*Берілгені:*

*Т/к* ,

*Шығарылуы:*

Жанатын газ жылуының эксергиясы

Алынған бу жылуының эксергиясы

1 кг жұмсалған жанармайдың эксергия шығыны

Гюи-Стодол теңдеуі бойынша эксергия шығыны

Қазандық қондырғысының эксергетикалық ПӘК

Бумен алынған жылудың эксергиясы үшін қазандық қондырғысының эффективті ПӘК ескеріп, аламыз

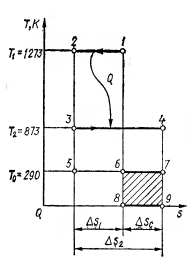
Жылу шығынын ескергенде эксергетикалық ПӘК

2.4 Температурасы болғанда жылуы кДж тең эксергияны және бұл жылуды денеге беру барысындағы температурадағы эксергия шығынын анықтаңыз. Қоршаған орта температурасы . Эксергияның сүлбелік мәнін және диаграммада шығынын көрсетіңіз.

*Шығарылуы:*

- диаграммадағы 12561 ауданы (1273 К) температурадағы эксергия жылуын көрсетеді, ал 67986 ауданы жылудың (873 К) тең төменгі температуралық деңгейге өтуі негізінде эксергия шығыны.

Эксергия жылуы



Жылудың төменгі температуралық деңгейге қайтымсыз өтуі негізіндегі эксергия шығыны:

2.5 Өндірісте 1с температурадан температураға дейін суды қыздыру үшін, қыздырылатын буды абсолютті қысымда қолданылуы есептелген, бу сулы (пароводяной) қыздырғыш қондырылған. Өндірісте бұндай қысымды будың жоқтығынан жоғары қысымды бу қолданылады. Будың нақты және жобалық параметрлер кезіндегі қыздырғыштың термодинамикалық сипаттамаларын анықтаңыз. Қоршаған ортаға кеткен жылу шығынын ескермеңіз.

*Шығарылуы* Қыздырғыштың энергетикалық балансы екі режимде де жылулық жүктемесін сипаттайды.

Қыздырылатын будың секундтық шығыны :

мұндағы – конденсатпен қыздырылатын будың меншікті энтальпиялары. Қыздырылатын буды құрғақ қаныққан деп алатын болсақ, ал 2 -тан төмен қаныққан температурада конденсатты суытылған деп аламыз, онда: жобалық режимде

нақты режимде

Қыздырғыштың эксергетикалық балансын құрайды:

Екі режимде де қыздырылатын судың эксергиясының өсімі:

Жобалық режимдегі қыздырылған ортадағы эксергияның кемуі:

Нақты режимде:

Эксергия шығыны:

Қыздырғыштың ПӘК-ті:

Жобаланған режимнан ауытқыған кезде қыздырғыштың эксергетикалық ПӘК-ті 30 жақын төмендейді. Жобаланған режимнан ауытқыған кездегі эксергия шығынының ұлғаюы мынаған тең:

Отынның артық шығыны

мұндағы – шартты отынның жану жылуы, 29300 кДж тең.

Шартты отынның тәуліктік артық шығыны

Бақылау есептері

2.6 Қайтымды Карно циклы бойынша жұмыс істейтін жылу двигателінің термиялық ПӘК-тін анықтаңыз. Жүйеге келетін жылу температурасы , ал жүйеден шығатын жылу температурасы . Егер двигательдің қуаты болғанда двигательге қандай мөлшерде жылу келеді және шығады?

*Жауабы:*

2.7 3 кг азот пен 2 кг көмірқышқыл гзын араластырғанда энтропия қаншалықты өзгереді. Идеал газдардың температурасы мен қысымы араластырғанға дейін бірдей болды деп саналады.

*Жауабы:*

2.8 Қысымы атмосфералық қысымға жуық болатын трубамен ағатын 1 кг ыстық судың эксергиясын анықтау. Су температурасы , ал қоршаған орта ауасы тең. Судың жылусыйымдылығы .

*Жауабы:*

2.9 Жану жылуы болатын 1 кг жанармайдың ауада жанған кездегі бөлінетін жылуының эксергиясын анықтау. Жану температурасы . Жану өнімінің жылу сыйымдылығы тұрақты. Ортаның температурасы:

*Жауабы:.*

2.10 Жанармай жанған кездегі жалын температурасы , ал газ қысымы атмосфералық қысымға тең болғандағы қазандық агрегатындағы 1 кг жанғыш газдың эксергиясын анықтау керек. Газдың термодинамикалық қасиеттері азоттың қасиетімен бірдей. Қоршаған орта, яғни ауа параметрлері: .

*Жауабы:.*

2.11 Будың конденсациялану процесі қысымда жүреді. Конденсациялану температурасы тең. Будың конденсациялану процесінде бөлінетін жылу температурасы болатын қоршаған ортаға беріледі. Есептеу 1 кг бу үшін жүргізіледі, бу түзілу жылу . Конденсатордың гидравликалық кедергісі жоқ, конденсаторға құрғақ қаныққан бу түседі деп саналады. Бу турбинасының конденсаторындағы су буының конденсациялану процесінде жүретін эксергия шығынын анықтаңыз.

*Жауабы:.*

2.12 Газ турбинасының регенеративтік жылуалмастырғышында жылуалмасу нәтижесінде болатын эксергия шығынын анықтаңыз. Жылуалмастырғыштағы ауа температурадан бастап қызады, ал газ температурадан температураға дейін салқындатылады. Жылуалмастырғыштағы жылу шығыны газдан берілетін жылудың құрайды. Турбинадан шығатын газ бен ауаны идеал газ деп, ал жылусыйымдылықтарын молекула-кинетикалық теория бойынша қабылдау керек. Қоршаған ортаның температурасы температураға тең. Эксергия шығынын 1 кг газ және ауа үшін есептеңіз.

*Жауабы:.*

III ТАРАУ. **ИДЕАЛ ГАЗ КҮЙІ ӨЗГЕРІСІНІҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ПРОЦЕССТЕРІ**

§3.1 Процесстерді зерттеудің жалпы сұрақтары

Теориялық зерттеулермен қолданбалы жұмыстар үшін мынадай процесстер үлкен роль атқарады: изохоралық; изобаралық; изотермиялық; адиабаталық–қоршаған ортамен жылу алмаспайтын процесстер. Сонымен қатар белгілі бір шарттарда жоғарыда аталған процесстердің барлығы да жүретін политроптық деп аталатын процесс орындалады. Барлық процесстер үшін зерттеудің келесідей жалпы әдістері орнатылған.

1. және координаталарында процесс сызығының теңдеуі шығарылады.
2. Процесстің басында және соңында жұмысшы дене күйінің негізгі параметрлері арасындағы қатынастар орнатылады.
3. Ішкі энергия өзгерісін сипаттайтын формула анықталады

(3.1)

немесе жылусыйымдылық тұрақты болғанда

(3.2)

1. Газ көлемі өзгерісінің жұмысы анықталады

(3.3)

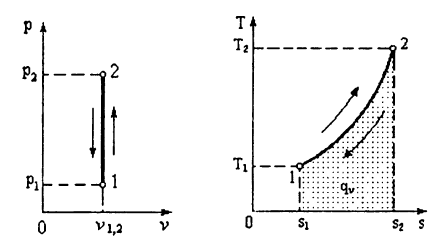
1. Процесске қатысатын меншікті жылу мөлшері анықталады
2. Меншікті энтропия өзгерісін анықтайтын формула

§3.2 **Изохоралық процесс**

AN=4

Тұрақты көлемде жүретін процесс изохоралық, ал процесс сызығы изохора деп аталады (сурет 1,2).

1.*Процесс теңдеуі* немесе



сурет 1 сурет 2

1. *Параметрлер қатынасы.* 1-2 процесі үшін 1 және 2 нүктелеріндегі газ күйінің теңдеуін жазамыз

1-ші теңдеуді 2-шісіне бөліп, Шарль заңын аламыз, яғни изохоралық процессте абсолют қысымның өзгерісі абсолют температура өзгерісіне тура пропорционал болады.

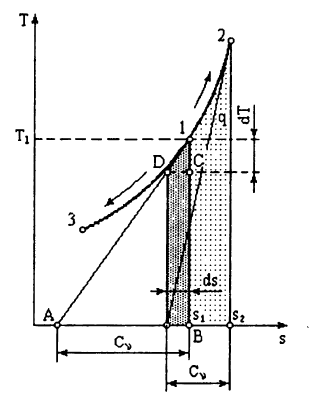
3.*Ішкі энергияның өзгерісі.* 1-2 процесі үшін термодинамиканың бірінші заңының теңдеуін жазамыз

болғандықтан,

Соңғы теңдеуді интегралдап, аламыз

(3.4)

Егер , онда жылуы 1-2 процесінде оң таңбалы, яғни жүйе жылу алады. Егер , онда жылу теріс, яғни осы процессте жүйеден жылу кетеді. Жүйеге келген және жүйеден шыққан меншікті жылу мөлшері графикалық тұрғыдан жоғарыдағы 3-ші суреттегі 1-2 қисығы астындағы ауданмен анықталады. Егер элементар аудандардың барлығын қосатын болсақ, онда 1-2 изохоралық процессте алған және 1-3 процессте берген жылу мөлшерін аламыз.



сурет 3

4.*Газ көлемі өзгерісінің жұмысы.*  болғандықтан, яғни жұмыс изохоралық процессте нольге тең, ал денеге келген барлық жылу ішкі энергияның өзгерісіне кетеді. Меншікті орнықталған жұмыс төмендегі формуламен анықталады

5.*Меншікті жылу мөлшері* (3.4) формуламен анықталады.

6.*Меншікті энтропияның өзгерісін* термодинамиканың бірінші және екінші заңынан табамыз. Термодинамиканың бірінші бастамасын мына түрде жазамыз

Теңдеудің екі жағын да температураға бөлгенде, келесі қатынас алынады

(3.5)

Идеал газ күйі теңдеуінен төмендегі қатынас жазуға болады

(3.6)

(3.6) теңдеуді (3.5) теңдеуге қойып

мұндағы болғандықтан,

Соңғы өрнекті интегралдап, келесі түрде жазуға болады

(3.7)

Изохоралық процессте болғандықтан,

Олай болса изохоралық процесстегі энтропия өзгерісі

**-**координатадағы изохоралық қисық сызық астындағы ауданмен жылу мөлшері анықталады және осы процесс қисығын қолданып, жылусыймдылық мәнін анықтауға болады. Егер осы процесстегі 1-нүктесіне жанамасы жүргізілсе, -қисығы осы процесстің ақиқат жылусыйымдылығын көрсетеді.

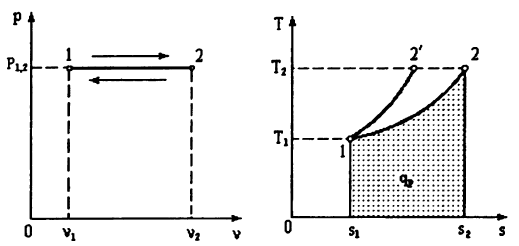
§3.3 **Изобаралық процесс**

AN=6

Тұрақты қысымда жүретін процесс, ал процесс сызығы изобара деп аталады.

1. *Процесс теңдеуі* немесе

2. *Параметрлер қатынасы.*  1-2 процесі үшін 1 және 2 нүктелеріндегі күй теңдеуін жазамыз



сурет 4 сурет 5

Бірінші теңдеуді екіншісіне бөліп, Гей-Люссак заңы алынады

3.*Ішкі энергияның өзгерісі.*Изобаралық процесс үшін термодинамиканың бірінші заңы төмендегідей жазылады

(3.8)

Осылайша, изобаралық процессте денеге келген жылудың бір бөлігі ішкі энергияның өзгерісіне жұмсалады да, қалған бөлігі сыртқы жұмыстың атқарылуына кетеді. Ішкі энергияның өзгерісіне және сыртқы жұмыстың атқарылуына кеткен жылу мөлшерін анықтау үшін (3.8) теңдеуді тұрақты қысымдағы жылу мөлшеріне бөліп, төмендегілерді аламыз

Осыдан

Егер десек (екі атомды газ үшін), онда

ал

Сонымен, екі атомды газ үшін денеге келетін жылудың 28,5 % - сыртқы жұмыстың атқарылуына, ал 71,5%-ішкі энергияның өзгерісіне кетеді. Термодинамиканың бірінші заңын *энтальпия* арқылы жазып

осыданболғандықтан,

(3.9)

немесе

Сондықтан, изобаралық процессте денеге берілген жылу энтальпияның ұлғаюына кетеді. Изобаралық процессте жұмысшы дененің алған жылу мөлшері 5-суреттегі изобара сызығы астындағы ауданмен анықталады.

4. *Изобаралық процесстегі жұмыс*  немесе

болғандықтан, орнықталған жұмыс .

5.*Меншікті жылу мөлшері* (3.8) және (3.9) теңдеулерімен анықталады.

6.*Меншікті энтропияның өзгерісі* изобаралық процесс қатынасын қолданып, (3.7) теңдеуімен анықталады

Майер теңдеуі бойынша болғандықтан

Майер теңдеуінен жылусыйымдылық қысым тұрақты болғанда үлкен екендігі айқын (). Сондықтан изобаралық процессте энтропияның өзгерісі изохоралық процесске қарағанда үлкен болады.

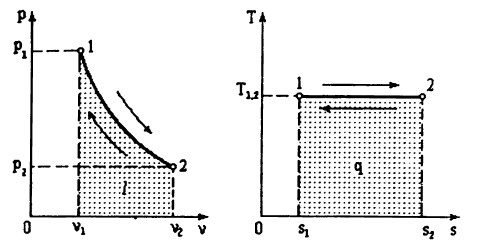
§3.4 **Изотермиялық процесс**

AN=5

Тұрақты температурада өтетін процесс, ал процесс сызығы изотерма деп аталады.

1. *Процесс теңдеуі* немесе

2.*Параметрлер қатынасы.* Изотермиялық процесстің 1-2 нүктелерінде идеал газдың күй теңдеуі



сурет 6 сурет 7

Бірінші теңдеуді екінші теңдеуге бөліп, аламыз

немесе (3.10)

Осы теңдеулерден изотермиялық процесстің тағы бір теңдеуі шығады

(3.10) қатынасы газ көлемі оның қысымына кері пропорционал өзгеретіндігін көрсетеді (Бойль-Мариотт заңы).

3. *Ішкі энергияның өзгерісі.*Термодинамиканың бірінші заңын мына түрде жазуға болады

0 болғандықтан,

(3.11)

Сонымен, изотермиялық процессте денеге берілетін барлық жылу жұмыстың атқарылуына кететіндігін көрсетеді. Ішкі энергияның өзгерісі

4. *Изотермиялық процесстегі жұмыс* (3.11) формуласынан табылады. Осы қатынасты интегралдағанда келесі түрде жазылады

Идеал газ күйі теңдеуінен ,

немесе

меншікті орныққан жұмыс төмендегі формуламен табылады

Осылайша, идеал газдың изотермиялық процесінде көлемнің өзгеру жұмысы , пайдалы жұмыс және меншікті жылу мөлшері өзара тең болады.

Изотермиялық процесстегі жылусыйымдылық болғандықтан, . Сондықтан изотермиялық процессте жылусыйымдылық анықталынбайтындығы шығады.

5. *Изотермиялық процесстегі* меншікті жылу мөлшері . Интегралдағанда келесі өрнек шығады

6. *Изотермиялық процесстегі меншікті энтропияның өзгерісі* қатынасымен анықталады. Осы теңдеуден шығады

Интегралдағанда энтропияның өзгерісі изотермиялық процессте келесі формуламен анықталынады

§3.5 **Адиабаталық процесс**

AN=7

Адиабаталық процесс деп, жүйеге жылу келмейтін және жүйеден жылу берілмейтін процессті атайды, яғни

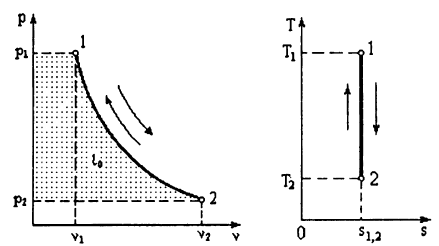
(3.12)

Адиабаталық процесс жүретін термодинамикалық жүйені жылу өткізбейтін идеал жылуизоляциялы қабықшамен шектелген қандай да бір көлем деп қарастыруға болады. Ал нақты шын мәнінде жүйе жылуизоляциялы қабықшасы бар немесе газдың ұлғаю (сығылу) процесстері өте жылдам өтетіндіктен жүйенің қоршаған ортамен жылуалмасып үлгермейтін процесін атайды. болғандықтан қайтымды адиабаталық процессте

(3.13)

яғни жүйе энтропиясы тұрақты. Басқаша айтқанда қайтымды адиабаталық процесс изоэнтропты процессте бола алады. Адиабаталық процесс қайтымсыз да болуы мүмкін. Сонымен, тұйықталған жүйеде кез келген изоэнтропты процесс адиабаталы бола алады, ал кез келген адиабаталы процесс изоэнтропты бола алмайды. Тек қана қайтымды адиабаталық процесс изоэнтропты бола алады.

Қоршаған ортамен жылуалмасусыз жүретін процесс, ал процесс сызығы адиабата деп аталады.



сурет 8 сурет 9

1. *Адиабаталық процесс теңдеуі* , олай болса

2. *Параметрлер қатынасы.*Термодинамиканың бірінші заңынан болғанда, және . Бірінші теңдеуді екінші теңдеуге бөлгенде келесі қатынас алынады

, немесе (3.14)

болғанда, соңғы теңдеуді интегралдап

осыдан

адиабаталық процесс теңдеуі алынады.

3. *Адиабаталық процессте*  ішкі энергия мен жұмыстың өзгерісі термодинамиканың бірінші заңынан

интегралдағанда

Осылайша, адиабаталық процессте ішкі энергияның шығыны есебінен жұмыс атқарылады. Адиабаталық процессте жұмыс келесі формула бойынша анықталады

мұндағы , күй теңдеуінен болғандықтан, жұмыс үшін формула келесі түрге ие болады

ді жақшадан шығарып, аламыз

және ескерсек, төмендегі теңдеуді аламыз

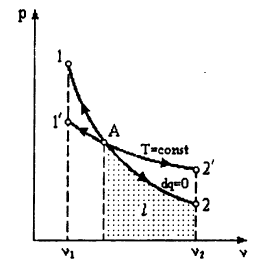
Пайдалы жұмыс төмендегі формуламен анықталады

Қайтымды адиабаталық процессте пайдалы жұмыс газ ұлғаюының меншікті жұмысынан рет үлкен және заң бойынша оған қарама-қарсы. Дәлелдеу үшін (3.14) қатынасын төмендегідей түрлендіреміз

осыдан немесе

(3.14 a)

4. *Адиабаталық процессте энтропияның өзгерісі* Осыдан яғни қайтымды адиабаталық процесс біруақытта изоэнтропты бола алады (энтропия тұрақты болады). болғанда диаграммада адиабата изотермаға қарағанда жылдамырақ жүреді (сурет 10). Адиабаталық ұлғаюда (А-2 сызығы) газ қысымы жылдам төмендейді. Осыдан адиабаталық процесс жылуалмасусыз жүзеге асады, ал газдың ұлғаюы оның ішкі энергиясының түсуімен анықталады.



сурет 10

Егер А нүктесінен газды сыққанда, онда А-1 адиабата изотермаға қарағанда ерекше, өйткені адиабаталық процессте жылу шығарылмайды және газ температурасы қысымның ұлғаюына қатысты тез ұлғаяды.

§3.6 **Политроптық процесс**

Жылусыйымдылық тұрақты болып қалатын процесс, ал процесс сызығы политроп деп аталады. Политроп барлық термодинамикалық параметрлерінің өзгерісімен жүретін газ күйін сипаттайтын процесс.

1. *Политроптық процесстің теңдеуі.* Политроптық процесстегі меншікті жылу мөлшері төмендегі формуламен анықталады

және (3.15)

мұндағы политроптық процесстің жылусыймдылығы. (3.15) теңдеуді термодинамиканың бірінші заңы теңдеулеріне қойып, аламыз

Екінші теңдеуді біріншісіне бөліп

деп белгілеп аламыз .

Интегралдап немесе

(3.16)

Алынған теңдеу политроптық процесс теңдеуі, политроп көрсеткіші аралығында өзгереді. белгілі бір мән қабылдағанда, политроптық процесс жоғарыда аталған кез келгенге процесске өте алады. Мысалға, (3.16) теңдеуде болғанда, -изохоралық процес; болғанда изобаралық процесс; болғанда изотермиялық; болғанда адиабаталық процесс болады. Осылайша политроптық процесс –жоғарыда аталған процесстердің жалпыламасы болып табылады.

2. *Параметрлер қатынасы.* Политроп теңдеуі адиабата теңдеуіне ұқсас болғандықтан, адиабата көрсеткішін политроп көрсеткішіне ауыстырып, негізгі термодинамикалық параметрлерді байланыстыратын келесі теңдеуді жазуға болады

3. *Политроптық процесстегі жұмыс.* Адиабаталық процесс өрнектеріндегі адиабата көрсеткіші шамасын политроп көрсеткішіне алмастырып, политроптық процесстегі жұмысты анықтау үшін төмендегі өрнектерді аламыз

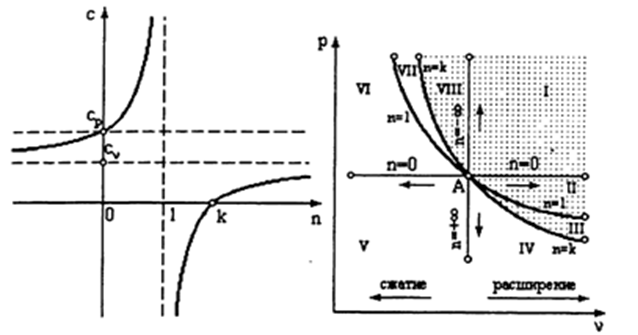
Орныққан жұмыс (располагаемая работа)

(3.16a)

Сонымен, политроптық процесстегі орныққан жұмыс ұлғаю жұмысынан есе үлкен. Политроптық процесстегі жылусыйымдылық

(3.17)

(3.17) формула көмегімен политроптық процесстегі дене жылусыйымдылғының политроптық көрсеткішке тәуелділік өзгерісін көруге болады. Графиктен политроп көрсеткішінің өзгеру диапазонында , жылусыймдылық теріс. Бұл денеге жылу келгенде оның температурасы азаятындығына, ал жылу шығарылғанда температура көтерілетініне байланысты. (3.17) формуладағы (изобаралық процесс) десек, немесе , өйткені . (изотермиялық процесс). (изохорный процесс) . Политроп көрсеткішінің мәні диаграммада политроптық процесстің орналасуы мен өту сипатын анықтайды (сурет 12). Егер кез келген А нүктесін алып, және ол нүктеден жоғарыда айтылған термодинамикалық процесстің жеке жағдайларын ұлғайту жағына жүргізгендей сығылу жағына да жүргізсек, онда диаграмма 8 облысқа бөлінеді. А нүктесінен бастап, I-IV облысында орналасқан процесстер дененің ұлғаюымен жүреді. Сондықтан оң жұмысқа ие. изохораның сол жағындағы процесстер теріс жұмысқа ие. Өйткені бұл жерде дене сығылады.



сурет 11 сурет 12

I-III, VIII (штрихталған) аймақтарында процесстер сырттан жылу алу арқылы өтеді, ал IV-VII аймақтарында жылу кететін процесстер жүреді. изотерма барлық координаталық облысты: дене температурасының жоғарылауымен өтетін аймақтар (VII, VIII, I, II) және қалған аймақтар температурасы төмендеуімен өтетін. Изотерма мен адиабата облыстар аралығында (III) жылу келуінде дене температурасы түседі, ал жылу шығарда (VII) температура көтеріледі.

4. *Политроптық процесстегі энтропия өзгерісі* төмендегі формуламен анықталады

(3.17)-теңдеуден жылусыйымдылық мәнін мына қатынасқа қойып

,

аламыз

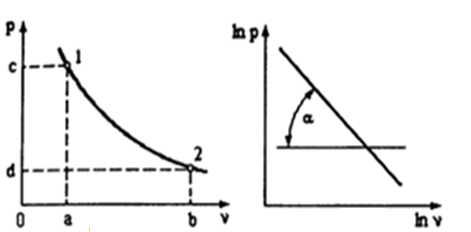
Интегралдаған соң

(3.16)-теңдеуін және ескеріп, аламыз

немесе

Политроптық процесстерді есептеуде политроптық көрсеткішті білу керек, оны анықтау әдістерін қарастырайық.

*Бірінші әдіс.* Политроптық процесстің екі әртүрлі күйінің параметрлері берілген (сурет 13).



сурет 13 сурет 14

Политроптық процесстің (3.16) теңдеуіне сай

логарифмдеп аламыз

осыдан

*Екінші әдіс.*  теңдеуін логарифмдеп

алынған теңдеу логарифмдік координатада политроп төмендегі теңдеумен анықталатын түзу қисықты көрсетеді (сурет 14).

осыдан мұндағы логарифмдік координатадағы политроптың қисық бұрышы. Ол изотерма үшін адиабата үшін -те .

Бақылау сұрақтары

1. Газ процесстерінің негізгі теңдеулері

2. Изобаралық процесстегі жылу мөлшерінің энтальпия өзгерісіне теңдігін дәлелдеу

3. Неліктен адиабаталық ұлғаю процесінде дене температурасы төмендейді, ал сығылуда температура өседі?

4.диаграммада изотерма мен адиабатаның өзара орналасуы

5.координатада изохора мен изобараның өзара орналасуы

6. Политроп көрсеткішін анықтау әдістері

7. Политроп процесі қандай шарттарда изохоралық, изобаралық, изотермиялық, адиабаталық процесстерге өтеді?

8. Қандай политроптық процесстерде ішкі энергия кемиді, қандай политроптық процесстерде ішкі энергия артады?

9. Негізгі газ процесстеріндегі энтропияның өзгерісі қандай теңдеулермен есептеледі?

10. Қандай термодинамикалық процессте жылуды жұмсамай механикалық жұмыс атқаруға болады?

Есептердің шығарылуы

3.1 Сыйымдылығы жабық резервуарда ауа орналасқан. Резервуар ішіндегі абсолюттік қысым , ал температура . Резервуардағы ауаға жылу бергеннен кейінгі ауаның абсолюттік қысымы мен температурасын табу керек. Ауаның жылусыйымдылығы температурадан тәуелсіз.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:*

Біріншіден тұрақты көлемде газ тұрақтысы мен массалық жылусыйымдылықты табу қажет

Ауаның массасы

Жылу алғаннан кейінгі ауаның температурасы

Процесс соңындағы абсолюттік қысым

3.2 бастапқы температура мен бастапқы қысымда 1 кг ауа соңғы қысымға дейін сығылады. Соңғы көлем, температура және атқарылған жұмысты анықтау.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Адиабаталық процесстің параметрлер қатынасынан температурасы анықталады.

Соңғы көлем күй теңдеуінен анықталады.

Процессте атқарылған жұмыс

3.3 Массасы 1 кг азот процесстің басында мынадай параметрлерге ие . Политроптық ұлғаюдан кейін азоттың қысымы тең. Политроп көрсеткіші . Бастапқы және соңғы процесс арасында азотқа берілетін жылу мөлшерін , ішкі энергия өзгерісін және ұлғаю жұмысын анықтаңыз.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:*

Біріншіден процесс соңындағы температураны табу керек

Процесс жұмысы

Ішкі энергия мен энтальпия өзгерісі анықталады:

Ішкі энергия мен энтальпия мәндері *(азоттың термодинамикалық функциясы деп аталатын С.Л. Ривкин кестесін қолдану)* және температуралары бойынша алынған.

Шарт бойынша

Бақылау есептері

3.4 Атмосфералық қысымы ортада диаметрі қозғалмалы поршеньді цилиндр орналасқан. Поршеннің астында күкіртсутек температурада орналасқан. Поршеньге массасы жүк түсірілген. Газ қыздырылып, жылу алады. Тепе-теңдік процесі соңында газ параметрлерін, энтальпия, ішкі энергия өзгерістерін және ұлғаю жұмысын анықтау *(күкіртсутектің термодинамикалық функциясы деп аталатын С.Л. Ривкин кестесін қолдану)*.

*Жауабы:*

3.5 Карбюраторлы іштен жану двигателінің цилиндріндегі жанғыш қоспаны сыққаннан кейінгі қысымы , температурасы болады. Қоспа сығылған моментте тұрақты көлемде электрлік свеча көмегімен өте жылдам жану процесі өтеді. Қоспаның қасиеті ауа қасиетімен ұқсас, ал оның жылусыйымдылығы температурадан тәуелді. Қоспаның жануы қайтымды изохоралық процессте және жұмысшы денеге жылуының келуімен жүреді. Процесс соңындағы температура мен қысымды анықтаңыз.

*Жауабы:*

3.6 Адиабаталық ұлғаю процесінде ауаның температурасы төмендейді. Ұлғаю процесінде атқарылған жұмыс қандай мәнге ие және изотермиялық процессте жұмыстың мәні нақты адиабаталық процесстегідей болу үшін ауаға қандай мөлшерде жылу беру керек?

*Жауабы:*

3.7 Бу генераторының ауақыздырғышына пайыздық мөлшерде түтіндік газдар жіберіледі. Ауаны қыздыра отырып, газдар температурадан температураға дейін салқындатылады. Ауақыздырғыш газдардан алатын жылуының пайызын қоршаған ортаға жоғалтады. Түтіндік газдардың бастапқы көлемі ауа шығыны ауақыздырғышқа кіреберістегі ауаның температурасы мәндері белгілі болса, қыздырылған ауа температурасын анықтау. Газ энтальпияларын анықтау үшін кестелерді (Ривкиннің 14-16,18 кестелерін) қолданыңыз.

*Жауабы:*

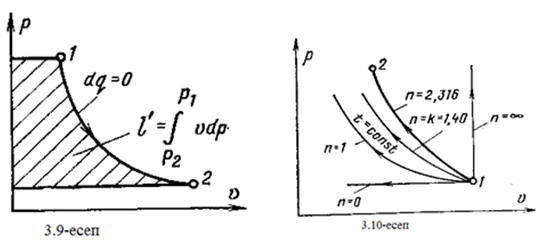
3.8 Бастапқы көлемде орналасқан ауа политропты ұлғаяды. Ауаның қысымы бастапқы қысымнан қысымға, ал бастапқы көлем көлеміне дейін өзгереді. Политроп көрсеткішін, процесс соңындағы температураны, атқарылған жұмыс пен жүйеге келген жылуды анықтаңыз.

*Жауабы:*

3.9 Газ турбинасының соплосы мен күрекшелерінде массасы мөлшеріндегі екі атомды көміртегі адиабаталы ұлғаяды. Турбинаға кіре берістегі газ параметрлері: турбинадан шыға берістегі қысым тең.

Есептеуде жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділігін ескеріп, кесте мәндерін қолдану (Ривкиннің 16-кестесі). Турбинадан шығардағы екі атомды көміртегі параметрлерін, газдың сыртқы пайдалы жұмысын, турбинаның теориялық қуатын табу керек.

*Жауабы:*



3.10 Ауаны политропты сығу процесінде жүйеге жылу келеді. Процесс соңында ауа температурасы температураға артады. Процесстің жүру барысын -диаграммада бейнелеп, жұмыс, жылу және ішкі энергия өзгерістері арасындағы пайыздық қатынасты, политроптық сығу дәрежесін анықтаңыз.

*Жауабы:*

IV ТАРАУ. **СИПАТТАУШЫ ФУНКЦИЯЛАР МЕН**

**ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ПОТЕНЦИАЛДАР**

§4.1 Термодинамикалық функциялар қасиеті.

Термодинамикада макрожүйені зерттеудің екі әдісі бар. Оларға циклдық және термодинамикалық функциялар әдістері жатады.Термодинамикалық функциялар әдісін (математикалық әдіс) қолдана отырып, термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының біріккен теңдеуі негізінде заттың әртүрлі термодинамикалық қасиеттері арасындағы байланысты орнататын қатынастарды алуға болады. Термодинамикалық функциялар әдісі циклдық әдіске қарағанда термодинамикалық жүйе күйін дәлірек сипаттайды.

Термодинамикалық шамалар күй функциясы және процесс функциясы болып екі топқа бөлінеді. Күй функциясы берілген күй параметрлерімен анықталады. Күй функциясының өзгерісін анықтау үшін процесстің басындағы және соңындағы осы функцияның мәнін білген жеткілікті. Ал процесс функциясы (мысалға жұмыс және жылу) термодинамикалық жүйе күйінің өзгеру процесінің сипатымен анықталады. Термодинамикалық функциялар ішіндегі сипаттаушы күй функциясы үлкен роль атқарады.

Сипаттаушы күй функциясы деп –функциялар көмегімен және дербес туындылар арқылы термодинамикалық қасиеттері айқын өрнектелетін функциялар, оның ішінде күй теңдеуі және жылусыйымдылықтарын анықтайтын теңдеулер де жатады. Жүйенің толық термодинамикалық қасиетін анықтайтын сипаттаушы функциялар – термодинамикалық потенциалдар деп аталады. Сипаттаушы функцияларға жататындар: ішкі энергия , энтальпия изохоралы-изотермиялық потенциал (еркін энергия), изобаралы-изотермиялы потенциал (еркін энтальпия). Егер аталған функциялар жүйенің тәуелсіз айнымалылары арқылы аналитикалық өрнектелсе, онда жүйені сипаттайтын барлық негізгі термодинамикалық шамаларды анық формада алуға болады.

Күй функциясының сипаттық қасиеті – функциялар дифференциалы толық дифференциал болуымен анықталады. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының біріккен теңдеуін төмендегідей қарастырамыз

(4.1)

(4.2)

(4.1) және (4.2) теңдеулері жүйе күйін анықтайтын бес айнымалыны өзара байланыстырады. Осы бес параметрден әртүрлі он жұп комбинация құруға болады: Аталған комбинациялар ішінде термодинамикалық зерттеулер үшін -ішкі энергия; -энтальпия; -изохоралы-изотермиялық потенциал (еркін энергия); -изобаралы-изотермиялық потенциал көп мағынаға ие.

Ішкі энергия және тәуелсіз айнымалылар болғанда сипаттаушы функция болады. (4.1) теңдеуін төмендегідей түрде жазамыз

(4.3)

(4.3) теңдеуі таңдап алынған тәуелсіз параметрлерге байланысты әртүрлі болады. және тәуелсіз параметрлердегі ішкі энергияның толық дифференциалы келесі түрге ие болады:

Соңғы теңдеуді (4.3) теңдеуіне қойып, аламыз

Көлем тұрақты болғанда, жоғарыдағы теңдеуден

, осы теңдеуден (4.4)

Энтропия тұрақты болғанда , жоғарыдағы теңдеуден келесі өрнек шығады

(4.5)

(4.5) теңдеуін энтальпия формуласына қойып, аламыз

(4.4) теңдеуінен бойынша туынды алып, калориялық коэффициентті анықтаймыз

Осыдан

(4.6)

(4.5) теңдеуінен бойынша туынды аламыз

(4.4) және (4.5) теңдеулерінен төмендегідей дифференциалдау жолымен аламыз

және

Осыдан

(4.7)

немесе

(4.8)

(4.8) теңдеуі *Максвеллдің біріншіқатынасы* деп аталады.

Сонымен және айнымалыларында ішкі энергия жүйенің барлық термодинамикалық қасиетін анықтайтын сипаттаушы функция болып табылады. Бірінші туынды жүйенің термиялық қасиетін, ал екінші туындысы жүйенің калориялық қасиетін анықтайды. Жылу бірлігімен өлшенетін термодинамикалық шамалар калориялық деп аталады. Оларға жататындар: ішкі энергия, энтальпия, энтропия, жылусыйымдылық. Термиялық шамаларға: температура, абсолюттік қысым, меншікті көлем жатады. Термиялық шамалардың калориялық шамалардан өзгешелігі, олар прибор көмегімен анықталынуы мүмкін.

Ішкі энергия тек қана энтропия мен көлем айнымалыларында сипаттаушы функция бола алады, яғни . Егер ішкі энергия кез келген басқа параметрмен анықталатын болса, онда сипаттаушы қасиеті жойылады, өйткені басқа параметрлер бойынша ішкі энергиядан алынған дербес туындысы дененің термиялық және калориялық қасиетін өрнектей алмайды. Келесі сипаттаушы функциямыз-энтальпия. Энтальпия мен айнымалы параметрлерінде сипаттаушы функция бола алады. (4.2) теңдеуден аламыз

(4.9)

Энтальпияның толық дифференциалы мына түрге ие:

осы қатынасты (4.9) формуласына қойып, табамыз

және боғанда, төмендегі өрнек шығады

(4.10)

формуласынан төмендегіні аламыз

(4.11)

(4.10) теңдеуін бірінші , екінші бойынша дифференциалдап, *Максвеллдің екінші қатынасын* аламыз

(4.12)

(4.10) теңдеуіндегі бірінші қатынасты бойынша дифференциалдап аламыз

.

екендігін ескендігін ескеріп, және тәуелсіз айнымалыларындағы температураның толық дифференциалы үшін өрнекті осы теңдеуге қойып

аламыз

болғанда

немесе

(4.13)

Осыдан

(4.10) формуласындағы қатынасын, яғни екінші туындысынан аламыз

адиабаталық сығылу коэффициенті үшін

,

осыдан

(4.13a)

Осылайша, энтальпиядан бірінші дербес туындысы термиялық параметрлерді – температура мен көлемді, ал екінші туындсы калориялық параметрлерді – тұрақты қысымдағы жылусыйымдылықты (4.13) және адиабаталық сығылу коэффициентін анықтайды. Егер аргументтері тек қысым мен энтропия болған жағдайда (4.9) теңдеуінен энтальпия сипаттаушы функция бола алады.

Егер тәуелсіз айнымалылар және болса, онда сипаттаушы функция изохоралы-изобаралы потенциал болады. Аталған сипаттаушы функция көмегімен термиялық және калориялық параметрлер анықталынады. (4.3) теңдеудегі ретінде жазуға болады, олай болса теңдеуіндегі орнына қойып, аламыз

(4.14)

(4.15)

немесе (4.16)

шамасы күй функциясы және оны байланысты энергия деп атайды. Изохоралы-изотермиялы потенциалдың және айнымалылардағы толық дифференциалы келесі түрге ие

Жоғарыдағы (4.15) теңдеуіне қойып, аламыз

Көлем мен температура тұрақты болғанда энтропия мен қысым келесі теңдеулермен анықталынады:

(4.17) (4.17a)

(4.18)

(4.19)

(4.17) және (4.17a) қатынастарынан потенциалынан аралас екінші рет туындылап, аламыз

(4.20)

(4.20) *Максвеллдің үшінші қатынасы* деп аталады. Изохоралы-изотермиялы потенциалды қолданудың тиімділігі – көлем мен температураны өлшеуге болатындығында. (4.17) теңдеуді тұрақты көлемде температура бойынша туындылап, изотермиялық сығылғыштықты анықтауға болады.

(4.21)

қатынасына тәуелсіз энтропия мен қысым параметрлерінде температураның толық дифференциалы үшін өрнекті қойып, аламыз

болғанда

(4.21)теңдеуін ескерсек .

(4.17a) теңдеуінен бойынша екінші туындысын есептеу арқылы

мұндағы - изотермиялық сығылу коэффициенті.

Сонымен, еркін энергияның бірінші туындысы қысым мен энтропияны анықтайды, ал екінші туындысы тұрақты көлемдегі жылусыйымдылықты және изотермиялық сығылу коэффициентін анықтайды. (4.15) теңдеуден еркін энергия тек қана тәуелсіз параметрлер көлем мен температураның функциясы болғанда сипаттаушы функция бола алатындығы шығады.

Егер тәуелсіз параметрлер температура мен қысым болса, онда сипаттаушы функция -изотермиялы-изобаралы потенциал болады. Аталған сипаттаушы функция арқылы термиялық және калориялық параметрлерді анықтау қарастырылады. (4.15) қатынасының оң және сол жағына шамасын қосып, аламыз

(4.22)

деп белгілейміз. Гельмгольц энергиясы болғандықтан

(4.22) ескере отырып,

(4.23)

Жоғарыдағы теңдеуді интегралдағанда

(4.24)

(4.23) теңдеуге температура мен қысым тұрақты жағдайында функциясының толық дифференциал мәнін қойып, басқа параметрлерді табамыз

(4.25)

(4.24) теңдеуден ішкі энергияны өрнектеп, сол теңдеуге (4.25) қойып, аламыз

(4.26)

(4.24) теңдеуден энтальпияны өрнектеп, сол теңдеуге (4.25) қойып, аламыз

(4.27)

Сәйкесінше

Осылайша, изобаралық потенциал үшін үш негізгі формулалар алынады

(4.25) теңдеуден екінші туынды есептейміз

Жоғарыдағы қатынастардан келесі қатынас алынады, бұл *Максвеллдің төртінші қатынасын* сипаттайды.

(4.28)

(4.25) теңдеуден энтропия мен температура бойынша туынды есептейміз

Соңғы қатынастан

(4.25) теңдеудің бірінші қатынасынан қысым бойынша екінші туынды аламыз

Сонымен, изобаралық потенциалдан бірінші туындысы энтропия мен көлемді, ал екінші туындысы жылусыйымдылық пен изотермиялық сығылу коэффициентін анықтайды. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдары негізінде алынған Максвелл қатынастары термодинамикада әртүрлі процесстердегі заттардың термодинамикалық өзгерістерін анықтауда маңызды роль атқарады.

§4.2 Гомогенді және гетерогенді термодинамикалық жүйелер. Термодинамикалық тепе-теңдік

*Гомогендік жүйе* деп – бірдей агрегаттық күйде орналасқан бір немесе бірнеше компоненттерден тұратын, өзінің барлық нүктесінде бірдей физикалық қасиеттерге ие физикалы біртекті жүйені атайды. Гомогендік жүйеге мысал ретінде газ қоспасы мен ерітінділер жатады.

*Гетерогендік жүйе* деп – әртүрлі фазада орналасқан бір немесе бірнеше компоненттерден тұратын физикалы біртексіз термодинамикалық жүйені атайды. Яғни гетерогендік жүйедегі гомогендік аймақтар *фазалар* деп аталады. Гетерогендік жүйеге мысал ретінде, су мен ондағы жүзіп жүрген мұзды жатқызуға болады. Бұл жүйеде екі гомогендік жүйе: су және мұз. Бұл фазалардың химиялық құрамы бірдей, ал фазалардың физикалық қасиеттері әртүрлі. Гетерогендік жүйенің құрамына кіретін әрбір фаза, тепе-теңдік бұзылған жағдайда бір фазадан екінші фазаға өту процесі жүреді, мысалы, сұйық заттың қатты немсе газтәріздес затқа өтуі және т.б. Тәжірибеден фазалық ауысудың екі түрі белгілі. *Бірінші текті фазалық ауысу* – фазалық өту сызығында меншікті көлем мен энтропияның секірмелі өзгерісі және фазалық ауысу жылуының жұтылу немесе бөлінуі арқылы жүреді. *Екінші текті фазалық ауысу* – біріншіге кері меншікті көлем мен энтропия фазалық өту сызығында өзгермейді және фазалық ауысу жылуы жұтылмайды немесе бөлінбейді. Термодинамикалық жүйенің сыртқы орта шарттары өзгеріссіз болса, жүйеде тепе теңдік болады. Осыған орай жүйенің орнықты, орнықсыз, салыстырмалы орнықты тепе теңдік күйлері болады. Орнықты, стабильдік күйдегі жүйені сыртқы күшпен әсер етіп, белгілі уақыттан кейін әсерді тоқтатқанда жүйе бастапқы қалпына келеді. Орнықты күйді бір компонентті тұйықталған жүйе үшін қарастырайық.

Тұйықталған жүйе деп сыртқы ортамен жылу алмаспайтын және механикалық жұмыс атқарылмайтын жүйені атайды. Олай болса мұндай жүйе үшін ішкі энергия және көлем тұрақты: . Термодинамиканың екінші заңына сәйкес тұйықталған жүйенің энтропиясы максимумға ұмтылады. Тепе теңдік күйде тұйқталған жүйенің энтропиясы тұрақты болып қалады.

осы теңдеуден

Тұйықталған жүйе үшін тепе-теңдік шарты . Тұйықталған жүйеде қандай процесс өтпесін оның энтропиясы төмендемейді. Егер жүйе қоршаған ортамен әсерлесетін болса, онда жүйенің тепе теңдік шарты басқаша болады. Тепе теңдік шарт жүйенің қоршаған ортамен өзара әсерлесу шартына тәуелді. Әсерлесу шартының төрт түрі жиі кездеседі:

1) Жүйенің көлемі тұрақты болып қалады. Бірақ жүйе энтрописы өзгермейтіндей қоршаған ортамен жылу алмаса алады:

(\*) теңдеуінен жүйенің тепе теңдік критериі ретінде төмендегі шартты аламыз

(4.32)

Басқаша айтқанда, жүйенің тепе теңдік күйге жақындауымен ішкі энергия кемиді. Жүйенің тепе теңдік күйдегі шарттары:

(4.33)

2) Жүйенің қысымы және энтропиясы тұрақты болғанда жүйе қоршаған ортамен жылу алмасады және механикалық жұмыс атқарылады:

(4.34)

(\*) теңдеу мына түрде жазылады

(4.35)

болғанда жүйенің тепе теңдік критериі ретінде мынадай шарт орындалады, яғни жүйе тепе теңдік күйге жақындауымен оның энтальпиясы кемиді. Тепе теңдік күйдегі шарттар:

(4.36)

3) Жүйенің температурасы өзгермейтіндігімен қатар, жүйенің көлемі тұрақты болғанда, жүйе қоршаған ортамен жылу алмаса алады

*,* (4.37) деп жазуға болатындықтан, (\*) теңдеуді мына түрде жазуға болады

(4.38)

(4.39)

термодинамикалық функциясын еркін энергия немесе изохоралы-изотермиялы потенциал деп атаймыз.

(4.40)

Олай болса,

(4.41)

болғанда изохоралы-изотермиялық жүйенің тепе теңдік критериі ретінде мына шарт орындалады

(4.42)

Жүйе тепе теңдік күйге жақындауымен оның еркін энергиясы кемиді. Тепе теңдік күйдегі шарттар:

(4.43)

4) Жүйеде қысым мен температура тұрақты болғанда, жүйе қоршаған ортамен жылу алмаса алады және механикалық жұмыс атқарылады. Өзара әсерлесу шарттары:

(4.34) теңдеуіндегі мәнін (4.38) теңдеуіне қойып, аламыз

(4.44)

термодинамикалық функциясын изобаралы-изотермиялық потенциал деп атайды, оны былай белгілейді

. (4.45)

немесе

(4.46)

болғанда изобаралы-изотермиялық жүйенің тепе теңдік критериі ретінде мына шарт орындалады,

(4.47)

яғни тепе теңдік күйге жақындаумен жүйенің изобаралы-изотермиялық потенциалы кемиді. Сонымен тепе теңдік күйдегі шарттар:

(4.48)

және шамалары күй функцияларынан түзілген, сондықтан күй функциялары болып табылады.

Қоршаған ортамен өзара әсерлесудің әртүрлі шартында термодинамикалық жүйенің тепе теңдігін сипаттайтын ішкі энергия , энтальпия , еркін энергия және изобаралы-изотермиялық потенциал – сипаттағыш функциялар деп аталады. Сипаттағыш функциялар термодинамикалық жүйенің тепе теңдік критерилері болып табылады. Сипаттағыш функциялар мынадай маңызды қасиеттерге ие: егер ішкі энергия көлем мен энтропияның функциясы ретінде берілсе, онда қалған негізгі термодинамикалық шамалары төмендегідей анықталынады:

(4.49)

(4.50)

шамаларын біле отырып, энтальпия , еркін энергия және изобаралы-изотермиялық потенциал және басқа шамаларды есептеуге болады. мен функцияларында белгілі болса, онда төмендегі теңдеу бойынша температура мен көлем анықталынады:

(4.51)

(4.52)

және берілгендері бойынша және оңай табылады. Еркін энергияның көлемнен тәуелділігі және бойынша табамыз:

(4.53)

(4.54)

шамаларын біле отырып, және табуға болады. Изобаралы-изотермиялық потенциалдың қысым мен температурадан тәуелділігін білсек, онда көлем мен энтропия төмендегі теңдеулермен анықталынады:

(4.55)

(4.56)

біле отырып, және есептеуге болады. шамалары термодинамикалық потенциалдар деп аталады.

Термодинамикалық потенциалдар арасында еркін энергияның орны ерекше. Термодинамикалық жүйеде атқарылатын толық жұмыс кез келген қайтымды изотермиялық процессте еркін энергияның кемуіне тең. Жүйенің ішкі энергиясы үшін өрнек былай жазылуы мүмкін

(4.57)

Изохоралы-изотермиялық жүйеде жұмыс тек еркін энергияның кетуімен ғана атқарылады. Олай болса, мұндай жүйеде жұмысқа ішкі энергияның барлғы емес, тек еркін бөлігі мәні айналады. Байланысты энергия деп аталатын шамасы жұмысқа айнала алмайды.

Изобаралы-изотермиялық потенциалды – еркін энтальпия деп атайды. Изобаралы-изотермиялық жүйеде жұмыс энтальпияның бір бөлігі болатын потенциалының кетуімен атқарылады:

(4.58)

(4.59)

. (4.60)

Жоғарыдағы теңдеулерден және шамалары өзара мынадай байланыста болады:

(4.61)

§4.3 Біртекті тұйықталған жүйедегі орнықтылық пен тепе-теңдік шарты

Кел келген біртекті жүйенің орнықтылық тепе-теңдік күйінде төмендегі шарт орындалуы тиіс:

(4.62)

(4.63)

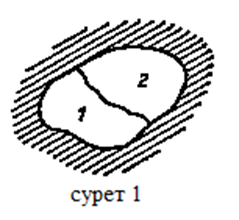
изохоралық жылусыйымдылық әрқашан оң, және изотермиялық процессте қысымының ұлғаюы әрқашан дене көлемнің кішіреюіне әкеледі. (4.62) шарты *термиялық орнықтылық шарты*, ал (4.63) *механикалық орнықтылық шарты* деп аталады. (4.62) және (4.63) шарттарын *тепе теңдіктің ығысу принципі* немесе *Ле Шателье-Браун принципі* деп аталады. (4.63) шарттың дұрыстығына келесі талдау арқылы көз жеткіземіз. Мысалы, тұрақты температурада қандай да бір дене қысымының көлем бойынша өзгерісі оң шама болсын, яғни дене көлемінің ұлғаюымен қысым артады.

(4.64)

Жүйені екі бөліктен, дене мен қоршаған ортадан тұрады және екеуінің де температурасы бірдей болатындай арасында жылуалмасу процесі жүреді деп қабылдаймыз. Ал зерттеліп отырған дененің қысымы қоршаған ортамен салыстырғанда өте шексіз аз шамаға ұлғаяды. Осының салдарынан дене ұлғаяды, ал көлем кішірейеді. Ал (4.64) шартына сәйкес бұл процесс әрі қарай дененің қысымының үздіксіз өсуіне әкеліп, көлем де ұлғаяды. Егер бастапқы моментте дене қысымы қоршаған орта қысымынан кішкене аз жағдайды қарастыралық. Бұл жағдайда дененің қысымы төмендегенде көлемінің кішірейетіндіге әкеледі. Сонымен, екі жағдайда да жүйе орнықсыз болады.

Егер тұрақты температурада дене қысымының көлем бойынша өзгерісі теріс шама болсын. Бастапқыда дене қысымы қоршаған орта қысымынан үлкен болса, дене көлемінің ұлғаюы дене қысымын қоршаған орта қысымына теңескенше, яғни жүйе тепе-теңдік күйге жеткенше төмендетеді.

Енді тепе-теңдік шартын термодинамикалық жүйелерге қатысты 1-суретте бейнеленгендей екі бөлікке бөлінген термодинамикалық жүйені қарастырамыз.



Қандай шарттарда екі элементар жүйе арасында тепе-теңдік орнайды? Жалпы тұйықталған жүйе болғандықтан,

және .

Тұйықталған жүйенің ішіндегі әрбір элементар жүйенің көлемі немесе ішкі энергиясы, көлем мен ішкі энергиясы бірге өзгеретін шексіз аз процесс жүреді деп санаймыз. Бірақ зат мөлшері әрбір элементар жүйеде өзгеріссіз сақталады. Бірінші элементар жүйенің көлемі -шамасына, ал ішкі энергиясы , екінші элементар жүйенің көлемі -шамасына, ал ішкі энергиясы -шамасына өзгерсін. Барлық жүйенің көлемі мен ішкі энергиясы тұтас тұрақты шаманы білдіретін болғандықтан, және тең болады; басқаша айтқанда бірінші элементар жүйенің көлемі немесе ішкі энергиясы қаншалықты кемісе, екінші элементар жүйенің көлемі немесе ішкі энергиясы соншалықты артады.

Осыған дейін тұйықталған жүйенің басты критериі ретінде энтропия қарастырылған. Термодинамикалық тепе-теңдік күйінде тұйықталған жүйенің энтропиясы тұрақты мәнге ие, яғни

(4.65)

деп қабылданған болатын. Энтропия аддитивті шама болғандықтан, қарастырып отырған жағдай үшін

(4.66)

(4.65) шартына сәйкес

(4.67)

Термодинамиканың бірінші заңы теңдеуін -ға бөліп

(4.68)

Осылайша, 1-ші элементар жүйе үшін

(4.69)

2-ші элементар жүйе үшін

(4.70)

(4.67) теңдеуіне сәйкес, екі элементар жүйе энтропияларын қосып, аламыз:

(4.71)

(4.71) теңдеуді келесі түрде жазуға болады:

(4.72)

Әрбір элементар жүйенің көлемі мен ішкі энергиясы бір-біріне тәуелсіз өзгеруі мүмкін, басқаша айтқанда мен бір-бірінен тәуелсіз. Олай болса (4.72) теңдеудің сол жағындағы мен дифференциалдарындағы көбейткіштерді нольге теңестіруге болады

(4.73)

(4.74)

(5.73) теңдеуден , ал ескере отырып, (4.74) теңдеуден төмендегі теңдік шығады:

(4.75)

Осылайша, тұйықталған жүйенің тепе-теңдік күйінде оның барлық бөлігінде температура мен қысым бірдей болады.

§4.4 Фазалық тепе-теңдік шарты

Алдыңғы тақырыпта тұйықталған бір фазалы жүйенің тепе-теңдік шарты қарастырылып, жүйенің барлық бөлігінде температура мен қысым бірдей болатындығы анықталды. Енді екі немесе бірнеше фазадан тұратын жүйені қарастыра отырып, фазалық тепе-теңдіктің жалпы шартын анықтаймыз. Жүйе әртүрлі фазалы екі элементар жүйеден құралсын және элементар жүйелердегі зат мөлшері, яғни бір фазадан екінші фазаға ауысып отырады. Сонымен тұрақты болатын жүйені аламыз. Мұндағы -жүйедегі заттың толық мөлшері. Мұндай жүйені жылуизоляциялы қабырғасы бар тұрақты көлемді ыдыс ретінде қарастыруға болады. Ыдыстың қабырғамен бөлінген бір бөлігі сумен, ал екінші бөлігі су буымен толтырылған. Сонымен жүйенің толық көлемі, жүйедеге толық зат мөлшері мен ішкі энергиясы төмендегідей түрде жазылады:

(4.76)

(4.77)

(4.78)

1 және 2 бірінші мен екінші фазаға қатысты жазылған. Жоғарыдағы теңдеулерден:

(4.79)

(4.80)

(4.81)

екендігі белгілі, сондықтан

(4.82)

1-ші элементар жүйенің энтропиясының толық дифференциалы үшін өрнекті қарастырамыз. Элементар жүйенің энтропиясының функциясы ретінде сол элементар жүйенің көлемі, ішкі энергиясы мен зат мөлшері алынады:

Олай болса,

(4.83)

Көлем мен зат мөлшері тұрақты болғанда энтропияның ішкі энергия бойынша, ішкі энергия мен зат мөлшері тұрақты болғанда энтропияның көлем бойынша, ішкі энергия мен көлем тұрақты болғанда энтропияның ішкі энергия бойынша өзгерістері қандай шамаларға тең екендігін біле отырып,

(4.83) теңдеуін төмендегідей жазуға болады:

(4.84)

Осыған ұқсас екінші элементар жүйенің энтропиясы үшін

(4.85)

Соңғы екі теңдеуден анықталған мен мәндерін (4.82) теңдеуімен өрнектелген жүйе энтропиясының теңдеуіне қойып және (4.79)- (4.81) қатынастарын ескеріп, аламыз:

(4.86)

–дифференциалдары өзара тәуелсіз болғандықтан, (4.86) теңдеудің оң жағы нольге тең болуы үшін дифференциалдарының көбейткіші де нольге тең болуы керек:

(4.87)

(4.88)

(4.89)

(4.87), (4.88), (4.89) қатынастарынан төмендегі келтірілген шарттарды аламыз

(4.90)

Осылайша, егер екі фаза тепе-теңдікте орналасқан болса, онда осы фазалардың температурасы, қысымы және химиялық потенциалы өзара тең болады.

§4.5 Фазалық ауысулар

Фазалық ауысу деп- заттың бір агрегаттық күйден екінші бір агрегаттық күйге ауысуын атайды. Сыртқы шарттарға байланысты бір дене бірнеше агрегаттық күйде бола алатындығын күнделікті құбылыстардан байқауға болады. Мысалы, атмосфералық қысымда - температурадан - температураға дейін су сұйық күйінде, - температурадан төменгі температурада атмосфералық қысымда су қатты фазаға өтеді, ал - температурадан жоғары температурада су бу күйіне ауысады. Сонымен қатар қысым өзгергенде заттың қайнау және қату температурасы да өзгереді. Әртүрлі агрегаттық күйде дененің физикалық қасиеті әртүрлі болады, дәлірек айтқанда тығыздық. Физикалық қасиетінің әртүрлі болуы молекула аралық өзарабайланыс сипатымен түсіндіріледі. Зат сұйық фазадан газ күйіне өткенде фазалық ауысу жылуы ұлғаю жұмысына кетеді және молекула аралық өзараәсерлесу күшін болдырмауға жұмсалады. Сонымен қатар тығыздық азаяды. Балқу немесе сублимация кезінде фазалық ауысу жылуы қатты дененің кристалдық торын бұзуға жұмсалады. Өте төменгі қысымда қатты фазадан газтәрізді фазаға өту - сублимация деп аталады. Фазалық ауысу кезінде заттың тығыздығы шапшаң өзгереді. Бутүзілу және сублимация процесстерінде газ фазасының тығыздығы конденсациялық фаза (сұйық немесе қатты ) тығыздығына қарағанда әрқашан аз болады. Ал балқу кезінде қатты фазаның тығыздығы сұйық фазаның тығыздығынан үлкен немесе кіші болуы да мүмкін.

Фазалық ауысу нүктелерінің классификациясы: сұйықтан буға өту нүктесі – қайнау нүктесі (конденсациялану нүктесі), қатты денеден сұйыққа өту нүктесі – балқу нүктесі (қату нүктесі), қатты денеден буға өту нүктесі – сублимация нүктесі деп аталады. Фазалық тепе-теңдік пен фазалық ауысу процесстерін талдағанда Гиббс фазалық ережесі маңызды роль атқарады. Бұл ереже тепе-теңдікте орналасқан термодинамикалық жүйе күйін анықтайтын тәуелсіз интенсивті айнымалылар саны мен жүйедегі компонент саны, фаза саны арасындағы тәуелділікті орнатады. Көп жағдайда тәуелсіз айнымалыларды – жүйенің еркіндік дәрежесі деп атайды. Фаза ережесі келесі түрде өрнектеледі:

(4.91)

мұндағы -термодинамикалық жүйенің еркіндік дәрежесінің саны; -жүйенің компоненттер саны; -жүйедегі фаза саны.

Химиялық термодинамикада кез келген мөлшердегі компонентті жүйе үшін фаза ережесі маңызды роль атқарады. Бір компонентті таза зат, яғни жүйе үшін фаза ережесі келесі түрге ие:

(4.92)

Бір фазалы жүйеде таза заттар үшін еркіндік дәрежесі болады. Тәуелсіз айнымалыларға қысым мен температура жатады. Ол дегеніміз, егер осындай жүйе үшін кез келген мәнді қысым мен температураны берсек, онда жүйенің басқа интенсивті параметрлері меншікті көлем, энтропия, энтальпия және т.б. анықтауға болады. Сонымен, берілген заттың күйін анықтайтын кез келген үш интенсивті термодинамикалық шамаларының (көлем, температура, қысым) екеуі тәуелсіз, ал үшіншісі осы екі айнымалының функциясын сипаттайды.

Таза заттан тұратын жүйені қарастырамыз. Таза зат өзара тепе-теңдікте болатын екі фазадан тұрады. Жүйедегі фаза саны болғандықтан жүйе тек қана бір еркіндік дәрежеге ие, яғни жүйенің әрбір фазасының тепе-теңдік күйін анықтайтын тәуелсіз айнымалылар ретінде қысым немесе температура болуы мүмкін. Егер фазалық ауысудың температурасын білетін болсақ, онда температура арқылы әрбір фазаның интенсивті термодинамикалық шамаларын анықтауға болады. Ол инетенсивті шамаларға: ауысу нүктесіндегі қысым, екі фазадағы заттың тығыздығы, меншікті энтальпия мен энтропия және т.б. шамалар жатады.

Бір компонентті үш фазалы жүйені қарастыратын болсақ, осы жүйенің еркіндік дәрежесі нольге тең екендігі төмендегі теңдеуден белгілі.

Еркіндік дәрежесінің болмауы – қарастырып отырған затқа лайықты тек қана белгілі бір температура мен қысымда бір компонентті жүйенің үш фазасы тепе-теңдікте бола алатындығын білдіреді. Фазалық ауысу сызығындағы үш фазаның болуы -диаграммасы арқылы келесі тарауда толығымен келтірілген.

Бақылау сұрақтары

1.Сипаттаушы күй функциясы дегеніміз?

2. Термодинамикалық функциялар қандай ерекшеліктерге ие?

3. Термодинамикалық функциялар ішінен қандай функциялар негізгілері деп саналады?

4. Әрбір негізгі термодинамикалық функция қандай тәуелсіз айнымалылармен анықталады?

5. Изохоралы-изотермді потенциал және байланысты энергия дегеніміз не?

6. Изохоралы-изотермді потенциалдың физикалық мағынасы.

7. Жүйенің жалпы энергиясы қандай шамалардан құралады?

8. Қандай шамалар термодинамикалық потенциал деп аталады?

9. Заттардың термодинамикалық өзгерістерін анықтауға қолданылатын теңдік?

10 Максвелл қатынастарын қорытып беріңіздер.

11. Гомогенді және гетерогенді жүйелер деп қандай жүйелерді атайды?

12. Бірінші және екінші текті фазалық ауысулар.

13. Термодинамикалық жүйенің орнықтылық тепе-теңдігі үшін қандай шарттар орындалуы керек?

14. Біртекті тұйықталған жүйенің тепе теңдік шарттары.

15. Бірнеше фазалы жүйенің тепе-теңдік шарттары.

16. Термодинамикалық жүйені қандай шамалар сипаттайды?

17. Термодинамикалық жүйе біртексіздігінің негізгі белгісі неде?

Есептердің шығарылуы

4.1 -еркін энергия мен -термодинамикалық потенциалды қолдана отырып, келесі қатынастардың дұрыстығын дәлелдеу қажет.

*Берілгені:*

*Дәлелденуі:*

(4.15)

(4.15) теңдеуінен аламыз, мұндағы ,

Олай болса

.

Осы алынған қатынасты -бойынша дифференциалдап, (4.17a) теңдеуін қойып, аламыз

Осыған ұқсас

(4.23)

(4.23) теңдеуінен аламыз, мұндағы ,

Олай болса

.

Жоғарыдағы қатынасты -бойынша дифференциалдап, екендігі белгілі, орнына қойып аламыз

4.2 Идеал газ қоспасы үшін Гиббс термодинамикалық потенциалын алу. Идеал газ қоспасы екі компоненттен тұрады. Бірінші компонент -моль санынан, екінші компонент -моль санынан тұрады.

*Берілгені: -*изобаралы-изотермиялық немесе Гиббс термодинамикалық потенциалы; .

*Шығарылуы:* Идеал газдар қоспасының еркін энергиясы келесі түрде жазылады:

(1)

мұндағы -газдар қоспасының толық көлемі, ал мен -екі газдың араластырғанға дейінгі алып тұрған көлемі, төмендегі формулалармен анықталады:

-ығысу энтропиясы төмендегі формуламен анықталады:

(2)

мен -Гельмгольц еркін энергиясы:

1. теңдеу төмендегідей түрге көшеді:

(3)

Гиббс изобара-изотермиялық потенциал теңдеуінен

(4)

мұндағы

мен -газдардың парциалдық қысымдары, мен - мен қысымдағы заттар үшін 1 мольдегі термодинамикалық потенциалдар. Бұл шамалар қоспадағы заттардың химиялық потенциалына сәйкес келеді.

(5)

мұндағы -бастапқы қысым. Әрбір компоненттің химиялық потенциалы төмендегі қатынаспен анықталынады:

4.3 Төмендегі теңсіздіктерді дәлелдеу:

a)

б)

мұндағы –ішкі энергия, энтальпия, энтропия, қысым, көлем.

*Дәлелдеу:*

(1)

1. болғанда (4.2) теңдеуінен

(2)

б) болғанда (2) теңдеуінен

Бақылау есептері

4.4 температура мен қысымда мұздың еру жылуы . Мұз бен судың меншікті көлемдерінің қатынасы . Қысым өзгерген жағдайда еру нүктесінің өзгеруін бағалау.

4.5 Идеал газдың тұрақты көлемдегі жылусыйымдылығы белгілі: , -молекула саны. -еркін энергияны, -ішкі энергияны, -энтропияны, -химиялық потенциалды анықтау қажет.

4.6 Термодинамикалық жүйенің -ішкі энергиясы мен -энтальпиясы қысым мен көлеммен анықталады. Осы жағдай үшін келесі қатынастардың дұрыстығын дәлелдеңіз:

а)

б)

мұндағы және - тұрақты қысым мен көлемдегі жылусыйымдылықтар, -изотермиялық сығылғыштық, ал -жылулық ұлғаю коэффициенті.

4.7 Гельмгольц еркін энергиясының келесі қасиеттерін дәлелдеу:

а)А-жүйесі -жылулық резервуармен жылулық контактіде болады. Жылулық резервуардың температурасы жүйе ішіндегі температураға тең. А- жүйесіндегі -Гельмгольц еркін энергиясының өзгерісі, егер -жылулық резервуар А- жүйесіне ғана жылу беретін болса және резервуарға түсіретін сыртқы күш жұмыс әсері болмаған жағдайда, жүйенің ішкі энергиясы мен резервуар энергиясының қосындысының өзгерісіне тең.

б) Изотермиялық процессте сыртқы күш тарапынан жүйеге атқарылатын жұмыс жүйенің еркін энергиясының ұлғаюына тең.

4.8 Адиабаталық квазистатикалық сығылу жағдайында - адиабаталық температуралық коэффициентті тұрақты қысымдағы -жылулық ұлғаю коэффициенті және -тұрақты қысымдағы жылусыйымдылық арқылы өрнектеңіз.

4.9 Келесі процесстер қайтымсыз екендігін көрсетіңіз:

а) газдың -көлемнен көлемге дейін еркін адиабаталық ұлғаюын;

б) газдың -қысымнан қысымға дейін адиабаталық ұлғаюын, яғни Джоуль-Томсон процесін.

4.10 Парамагнитті дене -изотермиялық магниттік қабылдағышқа ие. Дененің -еркін энергиясын дененің-магниттілігі мен температурасының функциясы ретінде және ішкі энергиясы мен энтропиясын анықтаңыз.

V ТАРАУ. СУ БУЫ ЖӘНЕ ОНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІ

§5.1 Негізгі түсініктер мен анықтамалар

Өнеркәсіптің көптеген саласында су, аммиак, көмірқышқыл және т.б. заттардың булары жиі қолданылады. Солардың ішінде су буы жұмысшы дене ретінде бу турбиналарында, бу машиналарында, атом станциясы қондырғыларында, әртүрлі жылуалмастырғыш қондырғыларда жылутасымалдағыш ретінде қолданылады.

Дененің сұйық күйінен газ күйіне ауысуы бутүзілу деп аталады. Булану деп, кез келген температурада сұйық немесе қатты дене бетінде өтетін будың түзілуі. Булану интенсивтілігі сұйық температурасының өсуімен ұлғаяды. Қайнау процесі деп, егер сұйыққа жылу бергенде жұмысшы дененің физикалық қасиеті мен қысымынан тәуелді белгілі бір температурада сұйықтың беті мен ішінде будың түзілетін процесін атайды. Дененің газ күйінен сұйық немесе қатты күйге ауысуы конденсация деп аталады. Конденсация кезінде алынған сұйық конденсат деп аталады.

Дененің қатты күйінен бу күйіне өтуі сублимация, ал осы процесске кері, яғни бу күйінен қатты күйге өтуі десублимация деп аталады.

Егер сұйықтың бу түзілу процесі жабық ыдыста жүретін болса, онда сұйықтан ұшып шыққан молекулалар сұйық бетіндегі кеңістікті алып, молекулалардың бір бөлігі сұйыққа қайта оралғанда бу түзілу мен будың қайта оралу процесі арасында тепе-теңдік орнайды. Берілген температура мен қысымда будың максимал тығыздыққа ие болуын, сонымен будың өзі алынған сумен тепе-теңдік күйде болуын қаныққан бу деп атайды. Сұйық температурасының өзгеруі тепе-теңдіктің бұзылуына және қаныққан будың тығыздығы мен қысымының өзгеруіне әкеледі. Сұйық түгелімен буланғанда құрамында жоғары дисперсті сұйық фаза бөлшектері болмайтын қаныққан буды құрғақ қаныққан бу деп атайды. Құрғақ қаныққан будың температурасы мен көлемі қысымның функциясы болып табылады, сондықтан оның күйі тек қана қысым немесе температурамен анықталады.

Құрамында ұсақ сұйық тамшылары бар қаныққан буды – ылғал қаныққан бу деп атайды. Ылғал будағы құрғақ қаныққан бу массасының () ылғал қаныққан будың (бу+сұйық) жалпы массасына () қатынасы будың құрғақтық дәрежесі деп аталады

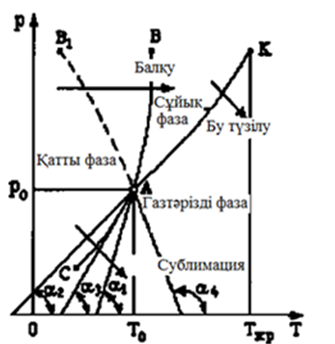
мұндағы - ылғал бу массасы; -ылғал будағы сұйық массасы. Ылғал будағы сұйықтың массалық мөлшері будың ылғалдылық дәрежесі, ол деп белгіленеді. Құрғақтық дәрежесі 0-ден 1-ге дейін өзгереді . Мысалы, қанығу температурасындағы қайнаған сұйық үшін , ал құрғақ қаныққан бу үшін . Егер құрғақ қаныққан буға жылу бергенде температурасы өсіп, бу қатты қызған күйде болады. Қатты қызған бу температурасы мен құрғақ қаныққан бу температурасы арасындағы айырмашылық қыздыру дәрежесі деп аталады. Қыздыру дәрежесі көп болған сайын қыздырылған будың қасиеті газдың қасиетіне жақын болады. Қатты қызған бу қанықпаған болып саналады. Берілген қысымда қатты қызған будың тығыздығы құрғақ қаныққан бу тығыздығынан аз.

§5.2 Термодинамикалық фазалық диаграммасы. Клапейрон-Клаузиус теңдеуі

Дене температура мен қысымға байланысты қатты, сұйық және газ түрінде болуы мүмкін. Фазалық ауысу деп, жылу шығыны мен көлемнің өзгеруімен жүретін дененің агрегаттық күйінің өзгерісін атайды. Бір агрегаттық күйден екінші агрегаттық күйге ауысуды -диаграммадан көрген ыңғайлы (сурет 1). Тәуелсіз параметр ретінде температура алынса, онда -диаграммада үш сипаттық сызықтар болады

1-суреттегі -сызығы сұйық және газтәрізді фазалардың тепе-теңдік күйіне сәйкес келеді. Бұл сызықты булану немесе оған кері конденсация сызығы деп атайды. сызығы қатты және газтәрізді фазалардың тепе-теңдігіне сәйкес. Бұл сызықты сублимация немесе оған кері десублимация сызығы деп атайды. сызығында қатты жәнесұйық фаза тепе-теңдікте орналасады, ал сызық балқу немесе қату сызығы деп атайды. Берілген температурада бір агрегаттық күйден екінші агрегаттық күйге өту нақты белгілі қысымда жүреді немесе берілген қысымда бір күйден екінші агрегаттық күйге көшу нақты белгілі температурада жүреді. Мысалы, белгілі бір қысымда қандай да бір дене сұйық күйден бу күйіне көшкенде, барлық сұйық буға айналғанша оның температурасы өзгеріссіз болады.

Дененің қатты күйден сұйық күйге өткендегі температурасы балқу температурасы деп аталады. Осы процесстегі алынған жылу мөлшері балқу жылуы деп аталады. Дененің сұйық күйінен газ күйіне ауысуы қайнау температурасы, ал оған кері процессте конденсация температурасы деп аталады. Осы процессте жұтылатын жылу мөлшері - бу түзілу жылуы деп аталады. Дененің қатты күйден газ күйіне өту температурасы сублимация температурасы деп, ал осы процесстегі жылу мөлшерін сублимация жылуы деп атайды.



сурет 1

Температура мен қысымға байланысты заттың сұйық күйінен газ күйіне өту қисығы критикалық деп аталатын нүктесінде аяқталады. Осы нүктеде заттың сұйық күйі мен газ күйі арасындағы физикалық айырмашылық жойылады. Қысымның ұлғаюы қайнау температурасын арттырады. Осы кезде газтәрізді фазаның көлемі кемиді, ал сұйық фазасының көлемі артады. Су үшін қысымда осы екі көлем бірдей болады. Критикалық нүктеде құрғақ будың тығыздығы қайнаған су тығыздығымен бірдей болады, осылайша сұйық фаза мен бу фазасы арасында айырмашылық болмайды.

Заттың әртүрлі фазаларының тепе-теңдік күйінің үш қисығы үштік нүктеде қиылысады (сурет 1 А-нүктесі). Осы нүктеде термодинамикалық тепе-теңдікте заттың үш түрлі қатты, сұйық, газтәрізді фазалары арасында айырмашылық жойылады. Фазалық тепе-теңдіктің кейбір ерекшеліктерін айтатын болсақ, фазалық ауысу процесінде жылусыйымдылық шексіздікке ұмтылады, өйткені *.*

Теңдеудегі изобаралық көлемдік ұлғаю және изотермиялық сығылу коэффициенттері шексіздікке тең, өйткені

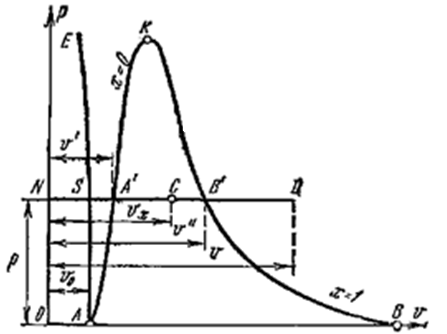
Термиялық шамалар (температура, қысым, меншікті көлем) мен калориялық шамаларды (фазалық өту жылуы) байланыстыратын Клапейрон-Клаузиус теңдеуі фазалық ауысулар үшін үлкен мағынаға ие

мұндағы - фазалық ауысу жылуы; -сұйықтың немесе қатты дененің меншікті көлемі; -будың меншікті көлемі; - фазалық ауысу сызығында алынған қысымнан температура бойынша туынды. Клапейрон-Клаузиус теңдеуі заттың агрегаттық күйінің барлық өзгерістері үшін қолдануға болады.

Қатты дененің балқу процесінде (сурет 1 АВ сызығы) Клапейрон-Клаузиус теңдеуіндегі шамалар мынадай физикалық мағынаға ие: - балқудың меншікті жылуы; -қатты дененің меншікті көлемі; -сұйықтың меншікті көлемі. Газ түзілу процесінде (АК сызығы): - бутүзілудің меншікті жылуы;-қайнаған сұйықтың меншікті көлемі; -құрғақ қаныққан будың меншікті көлемі.

§5.3 Су буының диаграммасы

Жүйенің фазалық диаграммасы сұйық пен будың меншікті көлемдерінің қысымнан тәуелділігін көрсетеді. су температурада белгілі бір қысыммен - көлемін алып тур деп қарастыралық (сурет 2. -сызығы).



сурет 2

-сызығы температурада судың меншікті көлемінің қысымнан тәуелділігін өрнектейді. Су сығылмайтын болғандықтан, -сызығы ордината осіне параллель болады және бұл аймақ сұйық және қатты фазаның тепе-теңдігін сипаттайды. Егер тұрақты қысымда суға жылу берілсе, онда судың температурасы көтеріліп, меншікті көлем ұлғаяды. Белгілі бір температурада су қайнайды, ал оның меншікті көлемі нүктесінде берілген қысымда максимал мәнге жетеді. Меншікті көлемнің қысымнан тәуелділігі 2-суретте көрсетілген сызығы сұйықтың шекаралық қисығы деп аталады. қисығын сипаттайтын құрғақтық дәрежесі болып табылады. Тұрақты қысымда әрі қарай жылу берілсе, бутүзілу процесі басталады. Ондай жағдайда су мөлшері аз, ал бу мөлшері ұлғаяды. Бутүзілу нүктесінде аяқталғанда бу құрғақ күйде болады. Құрғақ қаныққан будың меншікті көлемі белгіленеді.

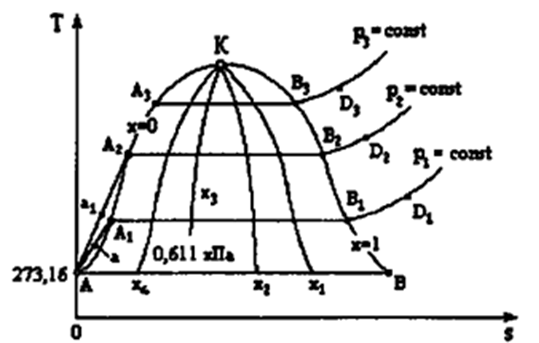
Егер бутүзілу процесі тұрақты қысымда өтетін болса, онда оның температурасы өзгермейді және процесі бір уақытта изобаралық және изотермиялық процесстер бола алады. және нүктелерінде дене бір фазалық күйде болады. мен арасындағы нүктелерде дене су мен бу қоспасынан тұрады. Мұндай қоспаны екі фазалы жүйе деп атайды. 2-суретте меншікті көлемнің қысымнан тәуелділігі будың шекаралық қисығы деп аталатын сызығымен көрсетілген. Осы сызықты сипаттаушы құрғақтық дәрежесі болып табылады. нүктесі үштік нүктедегі қайнаған сұйық күйіне, ал изобарасы барлық үш фазаның тепе-теңдігіне сәйкес келеді.

Егер тұрақты қысымда құрғақ қаныққан буға жылу берілсе, онда температурасы мен қысымы артып, бу құрғақ қаныққан күйден қатты қызған күйге өтеді . және қисықтары диаграмманы үшке бөледі. қисығының оң жағында сұйық аймақ орналасқан. мен қисықтары арасында су мен құрғақ бу қоспасынан тұратын екі фазалы жүйе орналасқан. қисығының оң жағы мен нүктесінен жоғары қатты қызған бу аймағы орналасқан. - критикалық нүкте деп аталады. Критикалық нүктедегі будың параметрлері:

Критикалық нүкте үштіктен нүктеден басталатын сұйық-бу фазалық ауысуының соңғы нүктесі болып табылады. Критикалық нүктеден жоғары зат екі фазалы күйде бола алмайды. Критикалық нүктеден жоғары температурада ешқандай қысыммен газды сұйық күйге келтіруге болмайды.

§5.4 Су буының диаграммасы

Суды температурадан қайнау температурасына дейін тұрақты қысымда қыздыру сызығымен сипатталады. - бутүзілу және - буды қатты қыздыру процесстерінің сызықтары болып табылады (сурет 3). Егер –диаграммасындағы бірнеше изобаралық процесстерді сипаттаушы нүктелерін біріктірсе, критикалық нүктеде түйісетін қайнаған сұйықтың шекаралық қисығын және құрғақ будың шекаралық қисығын алуға болады. Үштік нүктесінде изобара , ал изотерма мәндеріне сәйкес болады. және шекаралық қисықтары диаграмманы үш бөлікке бөледі. қисығының сол жағында сұйық аймағы, мен қисықтары арасында ылғалды бу аймағы, ал қисығының оң жағында және нүктесінен жоғарғы бөлігінде қатты қызған бу аймағы орналасқан. Сұйық аймағында суды температурадан қайнау температурасына дейін қыздыру , процесстерінде қысымдарында жүреді. үштік нүктедегі қысым изобарасына сәйкес келеді. және қисықтары арасында құрғақтық дәрежелері болатын аралық қисықтар жүргізілген.



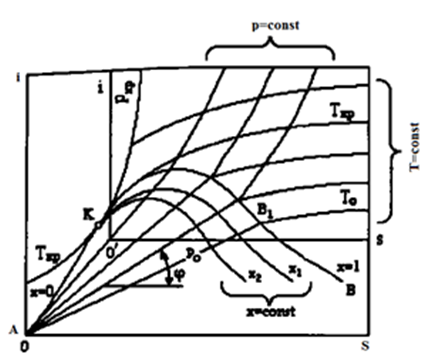
сурет 3

Осы қисықтардың барлығы критикалық нүктеде бірігіп, сұйық пен бу фазасы арасында айырмашылық жойылады, яғни құрғақ бу мен қайнаған су бірдей тығыздыққа ие болады. Жұмысшы денеге берілетін меншікті жылу мөлшері –диаграммада процесс қисығы астындағы ауданмен бейнеленген. Қайтымды циклдың меншікті жұмысы да циклдың ауданы ретінде табылуы мүмкін. Сондықтан –диаграммасы көмегімен қайтымды циклдың термиялық пайдалы әсер коэффициентін табу өте жеңіл

–диаграммасының артықшылығы, процесске қатысатын жұмысшы дене температурасының өзгерісін бақылауға және жылу мөлшерін анықтау үшін тиімді. Аудандарды өлшеу қажеттілігі жағынан –диаграммасының кемшілігі байқалады.

§5.5 Су буының диаграммасы

-диаграммасы-диаграммасына қарағанда есептеулер жүргізу үшін өте ыңғайлы. -диаграммасының үлкен артықшылығы процесске қатысатын жұмыс пен жылу мөлшері сызық кесіндісімен бейнеленеді. -диаграммада координатада басы ретінде үштік нүктедегі болатын су күйі қабылданған. Абсцисса осі бойынша меншікті энтропия, ал ордината осі бойынша энтальпия жазылады. Су буының кестелік деректері бойынша диаграммаға критикалық нүктеде қиылысатын және шекаралық қисықтары салынады. Сұйықтың шекаралық қисығы координата басынан шығады, өйткені бұл нүктеде энтропия мен энтальпия нольге тең. Су күйі сұйықтың шекаралық сызықтарымен бірігіп кететін изобара сызықтарында нүктелермен бейнеленеді.



сурет 4

Ылғалды бу аймағында изобара сызықтары құрғақтық дәрежесі нольге тең шекаралық сызықтан басталатын түзу иілген сызықтармен көрсетілген. Бұл аймақта изобара мен изотерма бір-біріне сәйкес және олардың абсцисса осіне иілу коэффициенті бірдей. Кез келген изобара мен изотерма үшін

мұндағы -энтропия осіне изобараның бұрылу бұрышы, -қанығу температурасы. Қатты қызған бу аймағында (оң жақта және қисығынан жоғары) изобаралар шығыңқы иіліп төмен қарай бағытталған. Бұл аймақта изотермалар сызығы шығыңқы және олар жоғары қарай бағытталған. изобарасы үштік нүктеде қысымына тең. және қисықтары арасында будың құрғақтық дәрежесі тұрақты болатын, критикалық нүктеде қосылатын сызықтар торы жүргізіледі. Практикалық есептерде диаграмманың оң жақ жоғарғы бөлігі қолданылады. Сондықтан координата басы нүктесінен нүктесіне көшіріп, үлкен масштабта бейнелеуге болады. -диаграммасы су буы процесстерінің есептері үшін кеңінен қолданылады. Жалпы әдістер келесі алгоритмдерден тұрады:

1. Берілген бастапқы және соңғы параметрлер, процесс сипаттамасы бойынша -диаграммада процесс графигі анықталады.

2.Процесстің бастапқы және соңғы нүктелері бойынша будың негізгі параметрлері анықталады.

3.Формула бойынша ішкі энергия өзгерісі анықталады

4.Формула бойынша процесстің жылу мөлшері анықталады:

а) процессте

б) процессте

в) процессте

г) процессте

5. Формула бойынша меншікті жұмыс анықталады

Жоғарыда қарастырылған -диаграммалары координаталарда тәжірибе және теориялық деректерден алынған кестелік мәндер негізінде сәйкес масштабтармен құрылады.

§5.6 Су және су буының негізгі параметрлері

Судың сығылмайтындығына байланысты оның меншікті көлемі температурада қысымнан тәуелсіз және ол тең болады. температурада және МПа қанығу қысымында ішкі энергия, энтальпия және энтропия шартты түрде нольге тең деп алынады.

температурадағы суды қайнау температурасына дейін тұрақты қысымда қыздыру үшін қажетті жылу мөлшері төмендегідей анықталады:

(5.1)

мұндағы температурадан қайнау температурасына дейінгі тұрақты қысымдағы жылу сыйымдылық Изобаралық процессте суды қыздыру үшін термодинамиканың бірінші заңы келесі түрде жазылады

(5.2)

қайнау температурасындағы судың ішкі энергиясы; суды қыздырғанда оның атқаратын ұлғаю жұмысы:

температурадағы меншікті көлем; қайнау температурасындағы меншікті көлем. Судың меншікті көлемі оны қыздырғанда аз ғана өзгеретіндіктен (сурет 5), деп қабылдауға болады. Олай болса (5.2) теңдеуден аламыз. Суды қайнау температурасына дейін қыздыру үшін қажетті жылу мөлшері төмендегі формуламен табылады:

,

болғандықтан

мұндағы қайнау температурасындағы меншікті энтальпия, (1-2) қисығы астындағы ауданмен анықталады (сурет 6). температурадан қайнау температурасына дейін қыздырғанда сұйық энтропиясының өсуі төмендегі формуламен:

(5.3)

Термодинамиканың екінші заңына сәйкес қайтымды процесстер үшін

.

болғандықтан,

(5.4)

(5.4) теңдеуін ескерсек, (5.3) мына түрге келеді:

*.*

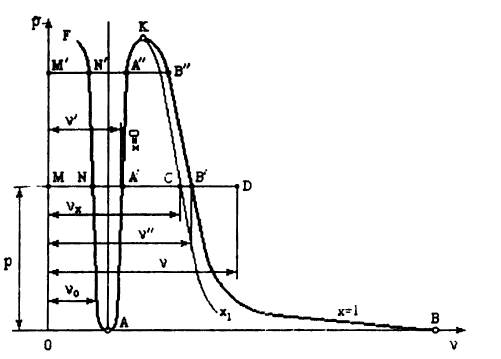
Қайнау температурасына дейін 1 кг суды буға айналдыру үшін қажетті жылу мөлшері бутүзілудің меншікті жылуы деп белгіленеді. Бутүзілу жылуы температура мен қысымнан тәуелді, және олардың өсуімен бүтүзілу жылуы азаяды, критикалық нүктеде нольге айналады. Термодинамиканың бірінші заңы бойынша

- құрғақ қаныққан будың ішкі энергиясы, - бу түзілу процесіндегі ұлғаю жұмысы. энергиялар айырымы бутүзілудің ішкі жылуы. Осылайша, бутүзілу жылуы ішкі және сыртқы күштер жұмысына қарсы атқарылады. Бу түзілу процесі тұрақты қысымда жүретіндіктен

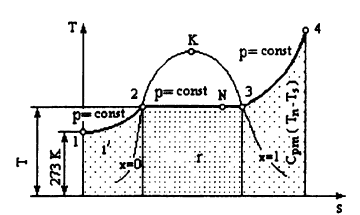
- құрғақ қаныққан бу энтальпиясы. -бу түзілу жылуы - диаграммада (2-3) процесс сызығы астындағы ауданмен анықталады. Құрғақ қаныққан будың меншікті энтропиясы төмендегі формуламен анықталады:

,

Егер бу түзілуде құрғақтық дәрежесі болатын (6-сурет)



сурет 5



сурет 6

-нүктесінде ылғал бу алынса, оның энтропиясы

немесе

Берілген қысымда ылғал будың құрғақтық дәрежесі

5-суреттегі -қанығу сызығында сұйықтың меншікті көлемі мен бу және , -қаныққан бу және меншікті бу түзілу жылуы арасындағы байланысты Клапейрон-Клаузиус орнатты

Құрғақтық дәрежесі белгілі ылған қаныққан будың меншікті көлемі төмендегі формуламен анықталады:

(5.5)

Судың - меншікті көлемі будың - меншікті көлемінен аз болғандықтан, құрғақтық дәрежесі жоғары және жоғары емес қысымда (5.5) формуласындағы бірінші мүшені ескермеуге болады, олай болса .

Ылғал қаныққан будың меншікті энтальпиясы төмендегі формуламен анықталады:

.

ескерсек, тең болады. - құрғақтық дәрежесі болатын қайнаған судың ылған қаныққан буға айналуына кететін жылу.

Қатты қызған будың температурасы - қанығу температурасынан жоғары және оның меншікті көлемі құрғақ қаныққан бу көлемінен үлкен. Құрғақ қаныққан буды қатты қызған - температуралы буға айналдыру үшін жұмсалатын жылу мөлшері қатты қыздыру жылуы деп, төмендегі формуламен анықталады:

немесе

-қатты қызған будың изобаралық орташа массалы жылусыйымдығы. -мәні диаграммада 3-4 қисығы астындағы ауданмен анықталады. Қатты қызған будың энтальпиясы үшін формула

Бұл шама қатты қызған будың толық жылуы деп аталады. -қатты қыздыру жылуын термодинамиканың бірінші заңы бойынша табуға болады

*-* қатты қыздыру процесінде ішкі энергияның өзгерісі; -будың изобаралық ұлғаю процесіндегі ұлғаю жұмысы.

Буды қатты қыздыру процесінде энтропия өзгерісі:

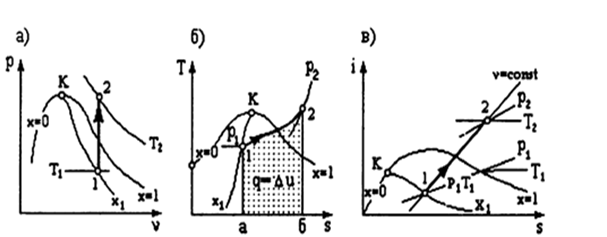
Осыдан, төмендегіні ескеріп

жоғарыдағы теңдеудегі мәнін қойып аламыз

Ылғал, құрғақ қаныққан және қатты қыздырылған бу параметрлерінің қысымнан және температурадан тәуелділігі су буының арнайы кестелерінде берілген.

§5.7 – диаграммаларында су буы күйінің өзгеру процесстері

Бу құбыры қондырғылары жұмысын талдау үшін изохоралық, изобаралық, изотермиялық және адиабаталық процесстер маңызды роль атқарады. Изохоралық процесс -диаграммалары арқылы 7-суретте көрсетілген.



сурет 7

*-*диаграммада изохоралық процесс ордината осіне параллель кесіндімен бейнеленген (сурет 7а). Диаграммада қисығымен көрсетілген ылғал бу мен қатты қызған бу аймақтарында бейнеленген (сурет 7б). -диаграммада изохора қисығымен көрсетілген (сурет 7в).

Изохоралық процессте сыртқы жұмыс нольге тең және денеге келетін барлық жылу ішкі энергияның өзгерісіне жұмсалады, яғни

немесе

.

болғандықтан,

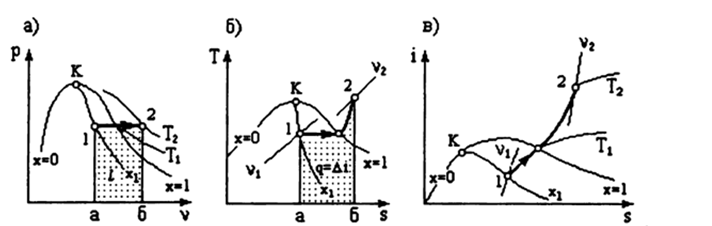
(5.6)

Процесстің - меншікті көлемі құрғақ қаныққан будың меншікті көлемінен аз болатын болса, онда процесс соңында бу ылғал болады, ал болатын болса, онда бу қатты қызған болады. Ылғал будың құрғақтық дәрежесі келесі формуламен анықталады

осыдан

(5.6) формуласы бойынша жылу мөлшерін есептеу үшін қажетті параметрлерді диаграммасы арқылы анықтауға болады. Ол үшін процесстің бастапқы және соңғы нүктелерін (1 және 2) тауып, (5.6) формуладағы шамаларды анықтау жеткілікті. Изохоралық процессте денеге берілетін жылу мөлшері -диаграммасындағы қисық астындағы ауданмен анықталады.

Изобаралық процесс – диаграммалары арқылы 8-суретте көрсетілген



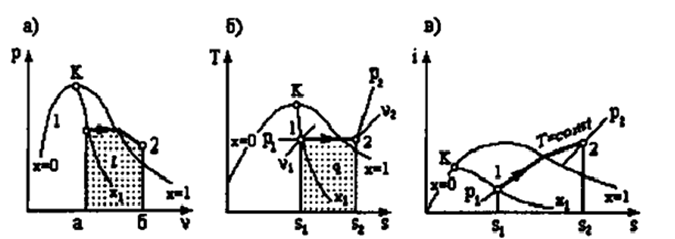
сурет 8

Изобара сызығы -диаграммада абсцисса осіне параллель сызығымен, *-*диаграммада ылғал бу аймағына горизонталь тік, ал қатты қызған бу аймағында иілген қисығымен, *-*диаграммадақаныққан бу аймағында тік сызықпен және қатты қызған бу аймағында төмен қарай иілген қисық сызығымен бейнеленген. Изобаралық процессте жұмыс келесі формуламен анықталады

Изобаралық процессте жүйеге келетін жылу

Ішкі энергияның өзгерісі

Изотермиялық процесс – диаграммалары арқылы 9-суретте көрсетілген. -диаграммада ылғал бу аймағында изотерма сызығы абсцисса осіне паралель, ал қатты қызған бу аймағында изотерма қисығы төмен қарай бағытталған (сурет 9а).



сурет 9

-диаграммада изотерма сызығы абсцисса осіне паралель бейнеленген (сурет 9б). -диаграмманың ылғалды бу аймағында изотерма изобара сызығымен сәйкес түзу сызыққа ие және құрғақтық дәрежесі қисығын қиып өтеді. Қатты қызған бу аймағында изотерма сызығы жоғары қарай бағытталған шығыңқы қисықпен бейнеленген.

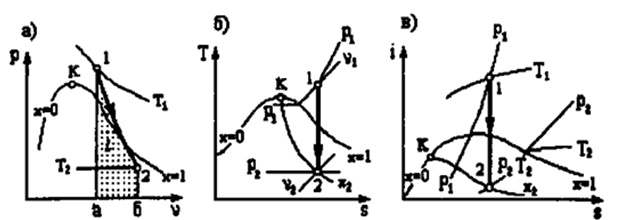
Изотермиялық процесстегі жұмыс төмендегі формуламен анықталады, ал сандық мәні -диаграммасындағы сызығы астындағы ауданмен анықталады (сурет 9а).

Изотермиялық процессте жүйеге келген жылу мөлшері төмендегі формуламен анықталады, ал график бойынша -диаграммасындағы сызығы астындағы ауданмен анықталады (сурет 9б).

Изотермиялық процесстегі ішкі энергияның өзгерісі төмендегі формуламен анықталады.

,

мұндағы барлық параметрлерді  *–*диаграммалары арқылы табуға болады. Адиабаталық процесс – диаграммалары арқылы 10-суретте көрсетілген.



сурет 10

-диаграммаларында адиабаталық процесс ордината осіне параллель сызықтармен бейнеленген (сурет 10б,в). Адиабаталық процесстегі меншікті жұмыс пен ішкі энергия өзгерісі төмендегі формулалар арқылы табылады

§5.8 Ылғал ауа. Абсолюттік ылғалдылық, ауада ылғалдылық болуы және салыстырмалы ылғалдылық

Атмосферада әрқашанда су буы түрінде ылғалдылық болады. Құрғақ ауа мен су буы қоспасы ылғалды ауа деп аталады. Су буы ауада қаныққан немесе қатты қызған күйде болуы мүмкін. Ылғалды ауаның мынадай түрлері болады:

1.Қаныққан ылғал ауа деп – құрғақ қаныққан бу мен қатты қызған су буының қоспасын атайды.

2.Қанықпаған ылғалды ауа деп – құрғақ ауа мен қатты қызған су буының қоспасын атайды.

Қанықпаған ылғалды ауаны суытуға дейінгі температураны *шық нүктесі деп аталады.* Ылғалды ауаны әрі қарай суытқанда бу конденсациясы болады. Ылғалды ауамен есептеу процесі, құрғақ ауа мөлшері шартпен жүргізіледі. Қоспадағы бу мөлшері айнымалы болуы мүмкін. Ылғал ауаның қысымы ауа мен су буының парциалдық қысымдары қосындысы ретінде анықталады:

Абсолюттік ылғалдылық деп – ылғалды ауа құрамындағы бу массасын атайды. Абсолюттік ылғалдылық қоспадағы бу қысымы арқылы өрнектеледі

мұндағы -бу массасы. Ылғалды ауа күйін анықтау үшін ылғалдылықтың болуы деген ұғым қолданылады. Ылғалдылықтың болуы (влагосодержание) деп - ылғалды ауадағы бу массасының құрғақ ауа массасына қатынасын атайды

Ылғалдылықтың болуын будың парциалдық қысымы мен ылғал ауаның қысымы арқылы анықтау үшін, ылғал ауадағы құрғақ ауа мен су буының күй теңдеуін қолдануға болады:

Бірінші теңдеуді екінші теңдеуге бөлгенде төмендегі қатынас алынады

екендігін ескере отырып, -ылғалдылықтың болуы табылады

(5.7)

Егер су буының парциалдық қысымы қанығу қысымына   
 тең болса,

мұндағы -максимал ылғалдылықтың болуы, яғни 1кг құрғақ ауадағы будың максимал мөлшері. Абсолюттік ылғалдылықтан басқа салыстырмалы ылғалдылық қолданылады. Салыстырмалы ылғалдылық деп, қанықпаған будың нақты абсолюттік ылғалдылығының ауаның максимал абсолют ылғалдылығына қатынасын атайды

Салыстырмалы ылғалдылық (құрғақ ауа) аралығынан  
(ылғалдылықпен қаныққан ауа) аралығына дейін өзгереді. Клапейрон теңдеулерінен

салыстырмалы ылғалдылық

(5.8)

Сонымен ылғал ауа идеал газ болса, онда салыстырмалы ылғалдылық (5.7) және (5.8) теңдеулерінен төмендегі формула бойынша табылады

Осыдан болғанда салыстырмалы ылғалдылық тек қана -ылғалдылықтың болуынан тәуелді. Салыстырмалы ылғалдылық пен ылғалдылықтың болуы, психрометр деп аталатын қондырғы көмегімен анықталады. Ылғал будың энтальпиясы 1кг құрғақ ауа мен кг су буынан тұратын газ қоспасының энтальпиясы ретінде анықталады

мұндағы -құрғақ ауа энтальпиясы;   
 - қатты қызған күйдегі ылғал ауа құрамындағы су буының энтальпиясы; - ылғал ауа температурасы; - бутүзілудің жасырын жылуы; - судың меншікті изобаралық жылусыйымдылығы; -қоспадағы будың парциалдық қысымындағы қанығу температурасы.

екендігін ескере отырып, бу энтальпиясы

,

осыдан

Ылғал будың -изобаралық жылусыйымдылығы 1кг құрғақ ауа мен кг су буы қосындысы ретінде анықталады

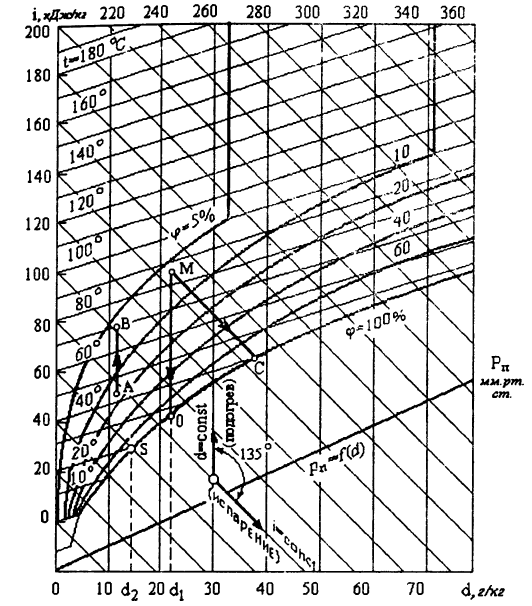
мұндағы -құрғақ ауаның меншікті изобаралық жылусыйымдылығы; -су буының меншікті изобаралық жылусыйымдылығы.   
, мәндеріне тең деп қабылдауға болады. Олай болса, .

§5.9 Ылғал **ауаның -диаграммасы**

Ылғал ауаның параметрлерін анықтауда және ылғал ауамен термодинамикалық процесстерді зерттеуде - диаграммасы өте ыңғайлы. Бірінші рет ылғал ауа үшін - диаграммасын Л.К. Рамзин 1918 жылы ұсынды және бұл диаграмма конденсациялау, құрғату, вентиляция мен жылыту жүйелерінің есептерінде кеңінен қолданылады. 11-суреттегі диаграммада вертикаль сызықтар -ылғалдылықтың болу сызығы, ал вертикаль сызықтарға бұрышпен иілген сызықтар –тұрақты энтальпия сызықтары болып табылады. Диаграммада осы сызықтармен қатар ауаның -салыстырмалы ылғалдылық, парциалдық қысым сызықтары бар. -диаграмма бойынша температура мен -салыстырмалы ылғалдылық белгілі болса, энтальпия мен -ылғалдылықтың болуын анықтауға болады, ал белгілі болса, парциалдық қысымды анықтауға болады. Сонымен қатар -диаграмма бойынша ылғалды ауаның әрбір күйі үшін шық нүктесін, яғни су буымен қаныққан нүкте температурасын анықтауға болады. Ылғалды ауаны қыздыру процесі болғанда -диаграммада вертикаль түзу сызықпен бейнеленеді. Суыту процесі де болғанда вертикаль түзу сызыпен бейнеленеді. Бұл процесс толық қанығу күйіне дейін орынды. Ары қарай суытқанда ауа ылғалмен қанығып, шық ретінде түседі.

Конденсацияны сызығы бойынша өтетін процесс деп санауға болады. Мысалы, -нүктесінен -нүктесіне дейін конденсация кезінде түзілген су мөлшері тең болады.

-диаграммасы бойынша шық нүктесі былай анықталады. Ылғал ауаның берілген жағдайдағы күйін сипаттайтын нүктеден сызығымен қиылысуына дейін вертикаль жүргізіледі. Осы қиылысу нүктесі арқылы өтетін изотерма шық нүктесінің температурасын анықтайды.



сурет 11

Бақылау сұрақтары

1. Қайнау, бутүзілу және булану түсініктері?

2. Сублимация және десублимация деп қандай процесстерді атайды?

3. Қандай буды ылғал қаныққан, құрғақ қаныққан қатты қыздырылған деп атайды?

4. Құрғақтық дәрежесі және ылғалдылық дәрежесі деген не?

5. Су буын -диаграммада бейнелеу.

6. Су мен будың шекаралық қисықтарында қандай нүктелер орналасады?

7. Критикалық нүктенің параметрлеріне не жатады?

8. Қандай шарттарда бутүзілу процесі жүреді?

9. Бутүзілу жылуы түсінігі, оның анықтамасы қандай?

10.Құрғақ қаныққан будың энтальпиясы мен ішкі энергиясы қалай есептелінеді?

11.Ылғал будың меншікті көлемі, энтальпиясы және ішкі энергиясын қалай анықтайды?

12.Қатты қызған будың энтальпиясы мен ішкі энергиясын қалай есептейді?

13.Су, ылғал, құрғақ және қатты қызған будың энтропиясы.

14.Су буының -диаграммасы

15.Су буының -диаграммасы

Есептердің шығарылуы

5.1 Қысымы , ал құрғақтық дәрежесі болатын ылғал қаныққан су буының параметрлерін анықтау.

*Берілгені: ,*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Су буының кестесі немесе -диаграммасы бойынша 2 МПа қысымдағы қайнаған су мен құрғақ қаныққан бу параметрлері анықталынады:

Ылғал бу параметрлері келесі формулалар арқылы анықталады:

5.2 Бу қазандығында 0,4 МПа қысымда 8250 кг массада бу-су қоспасы бар, оның құрамындағы бу мөлшері . Егер бу-су қоспасына жылу берілсе, жабық вентильдерде қысымды дейін көтеру үшін қанша уақыт қажет?

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Қанығу күйіндегі су мен су буының термодинамикалық қасиеттері қысым бойынша кестеден анықталады:

Бу-су қоспасының меншікті көлемі

Процесс соңындағы қалған бу мөлшері:

Бу-су қоспасы күйінің өзгерісі тұрақты көлемде жүретін болғандықтан, қысымды 1 МПа көтеруге қажетті жылу мөлшері келесі формуламен анықталады:

Будың бастапқы және соңғы күйлеріндегі энтальпиялары анықталады:

Жабық вентильдерде 1 МПа қысымға дейін көтеруге қажетті уақыт

5.3 Макаронды кептіру үшін температурадағы салыстырмалы ылғалдылығы болатын ауа қолданылады. Ауа қыздырғышында ауаны температураға дейін қыздырып, кептіргішке жібереді, ал кептіргіштен ауа температурамен шығады. Ауаның құрамындағы ылғалдылықты, 1кг буланған ылғалға кеткен жылу мен ауа шығынын анықтау. Ылғал ауаны қанықтыру процесі идеал деп саналады.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* -диаграммада (11-сурет) температура мен салыстырмалы ылғалдылықтың қиылысқан нүктесі арқылы бастапқы ылғалдылықтың болуы мен энтальпия анықталады. Қыздыру жүретін болғандықтан, изотерма қиылысында қыздырғыштан шыға берістегі қызған ауа күйін сипаттайтын нүкте анықталады. Осы нүктеден болғанда изотермамен қиылысуға дейін сызық жүргізіледі, қиылысқан нүкте кептіргіштен шыға берістегі ауа күйін сипаттайды. Бұл нүкте үшін: . Сонымен, құрғақ ауаны кептіру процесінде мынадай мөлшерде ылғалдылық буланды

Сондықтан ылғалды буландыру үшін төмендегідей мөлшерде құрғақ қыздырылған ауа қажет

Ауа қыздырғышында ауаны қыздыруға қажетті жылу шығыны:

ылғалды буландыруға кеткен жылу шығыны:

Бақылау есептері

5.4 Ылғал ауа күйінің параметрлері берілген: . Су буының кестесі бойынша ауадағы су буының парциалдық қысымын анықтау.

*Жауабы:.*

5.5 Ылғал ауаның күйі температурада гигрометр көмегімен өлшенеді. Шық нүктесі температурасы да гигрометрмен өлшенеді, оның температурасы тең. Ылғал ауаның -салыстырмалы ылғалдылығын, -ылғалдың болу мөлшерін және -энтальпияны анықтау.

*Жауабы:*

5.6 Массасы су буы изотермиялық сығылу процесінде будың бастапқы күйі параметрлеріне, ал соңғы күйі қайнаған сұйық күйіне сәйкес. Процесс соңындағы параметрлер мен берген жылу мөлшерін анықтау.

*Жауабы:*

5.7 Ауаның бастапқы параметрлері: . Ауа адиабаталы дейін сығылып, салқындатылады. Қандай температурада осы ауадан ылғалдылық бөлінеді. Есепті шешу үшін су буының кестесін қолдану керек.

*Жауабы:*

5.8 Құбырөткізгіште су буының ағысы жүреді. Құбырдың қандайда бір қимасында бу параметрлері шамаларына тең. Осы қимадағы будың эксергиясын анықтау. Қоршаған орта температурасы .

*Жауабы:*

5.9 Көлемі ыдыста барлық массасы болатын бірдей мөлшерде құрғақ қаныққан бу мен қайнаған су қоспасы бар. Ыдыс ішіндегі температура . Қоспаның құрғақтық дәрежесін анықтау.

*Жауабы:*

5.10 Жылу-электр орталығы зауыттың өндірістік қажеттілігіне қысымы , ал құрғақтық дәрежесі болғанда бу мөлшерін береді. Зауыт температурада конденсатты мөлшерде қайтарады. Конденсат шығыны температурасы болатын химиялық тазаланған сумен толықтырылады. Егер осы бу қазандығы зауытқа арнайы қажетті бу өңдеп, жанармайдың жану жылуы болғанда, пайдалы әсер коэффициентпен жұмыс істейтін бу қазандығының пешіне сағатына қанша киллограмм жанармай қажет?

*Жауабы:*

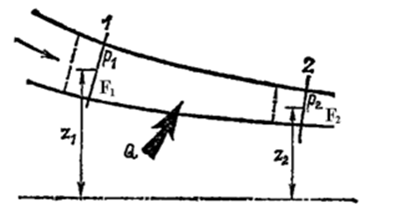
VI ТАРАУ. ГАЗ ЖӘНЕ БУ АҒЫНЫ

§**6.1 Ағын үшін термодинамиканың бірінші заңы**

Жылутехникалық қондырғыларда жүретін газдың қозғалысы ағындағы энергия өзгерісімен байланысты. Термодинамиканың бірінші заңы кез келген жүйені сипаттай алатын жалпы қасиетке ие, яғни қозғалыстағы дене үшін де орынды. Каналдағы газ немесе сұйық қозғалысын қарастырамыз. Ағынды қарастырғанда ескеретін фактор ол – ағынның кинетикалық энергиясы

(6.1)

мұндағы - ағындағы зат мөлшері; -ағын жылдамдығы.



сурет 1

1-суреттегі канал бойымен 1 мен 2 қималары арасындағы ағын жылдамдығы өзгеретін болса, онда ағынның кинетикалық энергиясы мынадай шамаға өзгереді

(6.2)

Термодинамиканың бірінші заңын, қарастырып отырған ағын үшін келесі түрде жазамыз:

(\*)

мұндағы 1 мен 2 ағынның екі қимасына қатысты алынған. Теңдеудегі шамасына, яғни қозғалыстағы газ ағыны қандай жұмыстар атқаратындығын толығырақ қарастырамыз. 1 мен 2 қималары арасында қандай да бір жылу мөлшері келуі мүмкін. Каналдың 1 қимасының ауданын , ал 2 қимасының ауданын деп белгілейміз. Ағынның көлденең қимасы арқылы бірлік уақытта өтетін зат мөлшерін (массалық шығын) деп белгілейміз. Массалық шығынды өлшеу үшін белгілі бір қиманы таңдау маңызды емес, өйткені гидравликаның үзіліссіздік принципі бойынша стационар ағынның массалық шығыны кез келген қима үшін бірдей болады.

массалы газ порциясын 1 қимасынан 2 қимасына тасымалдау және келесі порцияның босаған орынға түсуі үшін қандай да бір жұмыс атқарылады. Уақыт бірлігінде қарастырып отырған газ порциясының қимасы арқылы өту жолының ұзындығын деп белгілейміз. Газ порциясын аралыққа жылжыту үшін мынадай жұмыс атқарылады

мұндағы деп белгілеуге болады, -бірлік уақытта қарастырып отырған аймаққа түсетін газ көлемі. тең, ал мұндағы -бірнші қимадағы газдың меншікті көлемі. Олай болса,

(6.3)

жұмысының таңбасы теріс, өйткені қарастырып отырған қимаға газды айдау үшін ағынға сырттан күш әсер етеді. Екінші қима арқылы өткенде ағынның атқаратын жұмысы

Жоғарыда аталған ағынның үзіліссіздік принципі бойынша екінші қима арқылы өтетін массалық шығынды төмендегідей жазып,

2-ші қима арқылы өтетін жұмысты былай жазуға болады

(6.4)

(6.3) және (6.4) теңдеулерінен массалы шығынды газдың бірлік уақытта екі қима арасында ағып өткенде атқаратын жұмысы

тең болады, немесе келесі түрде жазуға болады

(6.5)

*Итеру жұмысы* – ағынның атқаратын жұмысының бірінші құраушысы. Егер 2-қимадағы ағын жылдамдығы 1-ші қимадағы ағын жылдамдығынан өзгеше болса, онда ағынның кинетикалық энергиясының өзгерісі төмендегідей

*Ағынның кинетикалық энергиясының өзгерісі* – ағынның атқаратын жұмысының екінші құраушысы.

Егер 1 мен 2 қималары әртүрлі биіктікте орналасатын болса, онда қарастырып отырған газ порциясын биіктіктен биіктікке көтеру үшін жұмыс атқарылады. Бұл жұмыс массалы газ порциясының потенциалдық энергиясының айырымына тең.

*Бұл ағынның атқаратын жұмысының үшінші құраушысы.*

Көп жағдайда 1 мен 2 қималары арасында ағын аталған жұмыстардан басқа да жұмыс түрлерін атқарады, мысалы, турбина қалақшаларының айналымы немесе көлденең магниттік өрістегі электрөткізгішті сұйық ағыны және т.б. Мұндай жұмыс түрлерін техникалық жұмыс деп атайды. Техникалық жұмыс ағыннан кетіп қана қоймай, сонымен қатар ағынға беріледі. Осыған мысал ретінде, центрден тепкіш нсоспен ағын сығылады, электромагниттік насоспен сорылады.

*Техникалық жұмыс ағынның атқаратын жұмысының төртінші құраушысы.*

*Ағын атқаратын жұмыстың бесінші құраушысы* – *канал қабырғасындағы үйкеліс күшіне қарсы атқарылатын жұмыс.*

Жалпы түрде қозғалыстағы газ ағынының атқаратын жұмысы келесі түрде жазылады:

(6.6)

(6.6) теңдеуіндегі мәнін (\*) теңдеуіне қойып, аламыз:

(6.7)

Теңдеудің екі жағын массалық шығынға бөліп, меншікті массалы ағын үшін төмендегі теңдеуді аламыз:

(6.8)

(6.8) теңдеуін дифференциалдық түрде жазамыз

(6.9)

екендігін ескере отырып, келесі түрде жазуға болады:

(6.10)

(6.11)

(6.10) және (6.11) теңдеулері ағын үшін термодинамиканың бірінші заңын бейнелейді. Жалпы түрде кез келген жүйе үшін жазылған термодинамиканың бірінші заңының дифференциалдық теңдеуін дербес ағын үшін жазылған теңдеумен салыстырамыз.

Жалпы түрдегі термодинамиканың бірінші заңы

(\*)

Ағын үшін жазылған термодинамиканың бірінші заңы

(\*) теңдеуіндегі жұмыс тек қана ұлғаю жұмысы болып табылады. Сондықтан ағын үшін жазылған теңдеудегі техникалық және жұмыстың басқа түрлерімен шатастырмау керек. Егер ағын жылдамдығы нольге тең болса, техникалық жұмыс болмайды.

Ағысқа канал қабырғасынан үйкеліс әсер ететін болса, үйкеліске қарсы жұмыс атқарылып, ағын тарапындағы жылуға айналады. Сондықтан (\*) және (6.9) теңдеулерінің сол жағындағы жылу ағынға сырттан берілетін жылу мен үйкеліс жылуы қосындысынан тұрады.

(6.12)

Олай болса, (\*) және (6.9) теңдеулерін келесі түрде жазуға болады:

(6.13)

(6.14)

(6.14) теңдеуіндегі шамалары өзара тең, олай болса қысқартылып, төмендегідей түрде жазылады

(6.14a)

немесе

(6.14б)

(\*) және (6.9) теңдеулері бірдей, сондықтан осы теңдеулердің оң жақтарын теңестіріп, аламыз:

(6.15)

Бұл қатынас, -ағынды ығыстыру, -ағынның кинетикалық энергиясының өзгерісі, -ағынның потенциалдық энергиясының өзгерісі, -газдың ұлғаюы есебінен атқарылатын техникалық жұмыстардан тұратындығын көрсетеді. Егер газ ұлғаятын болса, көлемнің ұлғаюы есебінен жұмыс атқарылады; бұл жұмыстың дифференциалы шамасына тең. болғандықтан, кез келген ағын үшін (6.15) теңдеуіне мәнін қойып, қысқартылып, теңдеу келесі түрде жазылады

(6.16)

Ағын техникалық жұмыс атқармаса , теңдеу келесі түрге келеді

(6.17)

болса, теңдеу келесі түрде жазылады

(6.18)

Ағын үйкеліссіз болса,

(6.19)

§**6.2** Газ ағыны процесіндегі негізгі теңдеулер

Алдыңғы параграфта ағын үшін термодинамиканың бірінші заңы келесі түрде жазылған:

немесе дифференциалдық түрде

(6.20)

Ағынның алатын жылуы сырттан алатын және үйкеліс жылулары қосындысынан тұратындығын ескере отырып, жоғарыдағы теңдеуді келесі түрде жазуға болады:

(6.21)

Практикада көп жағдайда газ немесе сұйықтың адиабаталық ағысы, яғни жылу алмайтын және жылу бермейтін ағыс қарастырылады. Төмендегі теңдеуді

адиабаталық ағын үшін былай жазуға болады

(6.22)

Адиабаталық ағын жылдамдығы артатын болса, онда энтальпияның кемитіндігін (6.22) теңдеуінен көруге болады. Қайтымды адиабаталық ағысты қарастыратын болсақ, термодинамиканың бірінші заңы ағын үшін келесі түрде жазылады

немесе үйкеліссіз

(6.23)

Адиабаталық ағыс үшін техникалық жұмыс болмаса, келесі түрде жазуға болады:

(6.24)

Егер сұйық сығылмайтын болса, онда және .

Термодинамиканың бірінші заңынан қайтымды адиабаталық ағыс үшін келесі теңдеу шығады

(6.25)

Осы теңдеуден сығылмайтын сұйық үшін , яғни . Олай болса (6.24) теңдеу келесі түрге ие болады:

(6.26)

екендігін ескеретін болсақ, (6.26) теңдеу төмендегідей жазылады

(6.26 a)

(6.26 a) теңдеуі қайтымды адиабаталық сығылмайтын сұйық ағыны үшін жазылған термодинамиканың бірінші заңының өрнегі және Бернулли теңдеуі деп аталады. Бернулли теңдеуінің практикалық маңызы зор, өйткені төменгі қысымда барлық сұйықты сығылмайтын деп санауға болады. Егер болса, (6.26 a) теңдеуін келесі түрде жазуға болады:

(6.26 б)

(6.22) теңдеуін интегралдап, аламыз:

(6.27)

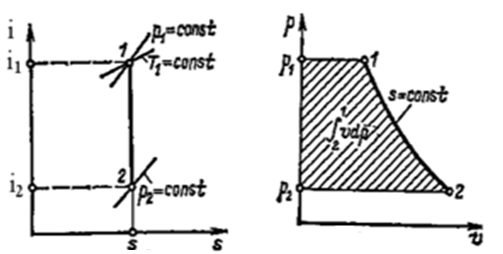
осыдан

(6.28)

2-суреттің 1-нүктесіндегі жылдамдық пен 1-2 нүктелеріндегі энтальпиялар айырымы белгілі болса, (6.28) теңдеуі 2-нүктесіндегі адиабаталық ағын жылдамдығын қалай анықтауды көрсетеді. Энтальпиялар айырымын анықтау үшін -диаграммасын қолданған тиімді. Егер қайтымды адиабаталық ағын қарастырылса, онда 1 мен 2 нүктелері изоэнтроп сызығында жатады. 2-нүктесіндегі ағын жылдамдығын басқаша әдіспен анықтауға болады.

Үйкеліссіз ағыс үшін (6.19) теңдеу орынды

(6.19)



сурет 2 сурет 3

Осы теңдеуден, егер ағын қозғалысы бойынша қысым төмендесе, онда жылдамдық артатындығы белгілі. (6.19) теңдеуді интегралдап, келесі теңдеуді аламыз:

(6.29)

немесе

(6.29a)

осыдан

(6.30)

(6.30) теңдеуі интеграл мәні белгілі болса, 1-нүктесіндегі белгілі жылдамдық бойынша 2-нүктесінде ағын жылдамдығын анықтауға мүмкіндік береді. (6.30) теңдеуі жалпы түрінде тек қайтымды адиабаталық ағыс үшін емес, үйкеліссіз ағыстар үшін де орынды. Басқа процесс ағыстары үшін интегралын есептеуде процесс ерекшеліктері қолданылады, мысалы изотермиялық, политроптық және т.б. Қайтымды адиабаталық процесс үшін нүктелері изоэнтропта жатады, ол интеграл диаграммада изоэнтропия мен изобараларымен шектелген ауданды көрсетеді (сурет 3). Нақты газдар мен сұйықтар үшін бұл интеграл эксперименттік деректер бойынша сандық әдіспен, ал идеалдық газ үшін адиабата теңдеуі бойынша есептелінеді.

Ағынның кинетикалық энергиясын арттыру үшін атқарылған жұмыс (үйкеліссіз, және (6.29 а) теңдеу), ағынның кеңею жұмысы мен ығыстыру жұмысы айырымынан тұратындығын көрсетеді.

Негізінде қатынасынан, шығады,

(6.31)

осыдан

(6.32)

-ден ге дейінгі қысымдар интервалында өтетін әртүрлі термодинамикалық процесстер үшін мәні мен таңбасы әртүрлі. шамасын –орын алған жұмыс деп атайды. Бұл терминнің мағынасы – ағынның кинетикалық энергиясының артуына тең шама жұмысқа айналуы мүмкін. 1 және 2 нүктелері арасында ағын аймағындағы энталпиялар айырымын байланыстыратын қатынасты және пайдалы жұмысты табамыз.

Термодинамиканың бірінші заңынан , қайтымды адиабаталық ағын үшін ()

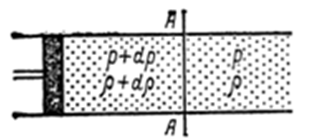
(6.33)

(6.34)

§**6.3** Дыбыс жылдамдығы

Дыбыс жылдамдығы деп, берілген ортада дыбыс жылдамдығы термодинамикалық параметрлермен қандай байланыста болатындығын қарастырамыз. Ол үшін сығылатын ортада әлсіз ауытқудың таралу процесі қарастырылады. Ішінде қозғалыссыз сығылған газ немесе сұйық орналасқан трубкаға поршень енгізіледі.

Белгілі уакытка дейін бұл поршень жылдамдықпен қозғалады. Қарастырып отырған газ сығылғандықтан, ол труба бойымен поршень жылдамдығымен қозғалмайды. Бұл кезде поршеньге жанасып тұрған газ қабатшасы сығылады және осы газ қабатшасының қысымы шамасына дейін өседі; содан соң бірінші газ қабықшасына жанасып тұрған газ қабықшасы сығылады. Басқаша айтқанда АА қимасы бойымен қозғалатын газдың әлсіз сығылу толқыны жүреді. АА-қимасының алдында газ қозғалмайды және қысымы мен тығыздыққа ие (ауытқымайтын облыс); осы қиманың артында жылдамдықпен қозғалатын газ қысымға және тығыздыққа ие (ауытқитын облыс). Әлсіз ауытқудың таралу жылдамдығын деп белгілейді. уақыт аралығында ауытқымайтын облысты ауытқитын облыстан бөліп тұратын АА қимасы арақашықтыққа ауысады (сурет 4).



сурет 4

аралығында осы қимада алынған ауытқымайтын газ салмағы мынаған тең:

(6.35)

Ауытқитын газдың массасы:

(6.36)

Трубадағы газ массасының үзіліссіздігінен

(6.35) және (6.36) ескере отырып, аламыз

(6.37)

Бұл теңдеуде және белгісіз. Әлсіз ауытқудың таралу жылдамдығын анықтау үшін, осы теңдеуді және белгісіздері бар тағы бір теңдеумен толықтырамыз. Бұндай теңдеу ретінде механикадан белгілі импульстар теңдеуін қолданған ыңғайлы. (6.35) теңдеуімен анықталатын аралығында АА қимасындағы ауытқымайтын газ массасы өзінің жылдамдығын 0-ден -дейін өзгертті. Осылайша, аралығында осы массаның қозғалыс мөлшерінің өзгерісі тең. Газдың осы массасына әсер ететін күш құбырдың көлденең қимасының ауданы мен газ массаларындағы қысымдар айырымы көбейтіндісіне тең . Күш импульсі тең. Импульстар теңдеуін (6.35) теңдеуін ескеріп былай жазамыз:

осыдан

(6.38)

(6.37) және (6.38) бірге шеше отырып, және екінші текті шексіз аз шамаларды ескермей, аламыз:

(6.39)

Аз қозғалысты жылдамдықтың таралуы төмендегі қатынаспен анықталады:

(6.40)

Газдардағы дыбыс жылдамдығын есептеу үшін бұл теңдеуді бірінші болып 1687 жылы Ньютон қолданды. (6.40) теңдеуін қолдану үшін дыбыс толқындарының таралу процесін, яғни туындысын қандай шарттар үшін есептеу қажеттігін білу керек. Ньютон газдарда дыбыстың таралуы процесі изотермиялық шарттарда жүреді деп санады. Идеал газ изотермиялық процесі үшін Бойль-Мариотт теңдеуін қолданып , төмендегіні орнатты:

(6.41)

Ньютон атмосфералық қысымда ауадағы және бөлме температурасындағы дыбыс жылдамдығын есептеді. Алайда тәжірибе бойынша алынған ауаның дыбыс жалдымдығының мәні Ньютонның есептеуінен пайызға көп болды. Бұл айырмашылықтың себебін Лаплас орнатты. Дыбыс толқындары ауада тез таралатындықтан, қоршаған орта, дыбыс толқындарының сығылуы мен сиретілу зонасы арасында айтарлықтай жылу алмасып үлгермейді, сондықтан дыбыс толқындары таралатын ортаның тербелісін адиабаталы деп қарастыруға болады, деді. Сондықтан (6.40) теңдеуіндегі туындыны изоэнтропты процесс шарты бойынша алу керек, яғни

(6.40a)

(6.40a) *Лаплас теңдеуі* деп аталады*.* Бұл теңдеу белгілі шамалары бойынша ортада дыбыстың таралу жылдамдығын есептеуге мүмкіндік береді. екенін ескерсек, (6.40a) Лаплас теңдеуін мына түрде жазамыз:

(6.42)

мұндағы - дененің кері адиабаталық сығылу шамасы. және шамалары күй функциясы болғандықтан, Лаплас теңдеуімен анықталатын дыбыс жылдамдығы да термодинамикалық күй функциясы болады. Егер су буы үшін температура мен атмосфералық қысымда адиабаталық сығылу , ал су үшін температура мен алдыңғыдай қысымда адиабаталық сығылу тең болса, онда темір үшін 20℃ температурада адиабаталық сығылу шамасына тең болады. Дыбыс жылдамдығы су буы үшін – 471, су үшін – 1505, темір үшін – 5130 м/с тең. Абсолютті сығылмайтын орта үшін адиабаталық сығылу 0-ге тең, ал дыбыс жылдамдығы мұндай ортада шексіздікке тең болады. Изоэнтроп көрсеткішін анықтау жолын келтіретін болсақ, термодинамиканың бірінші және екінші заңдарының біріккен теңдеуін жазамыз, және бұл теңдеулер

изоэнтропты процесс үшін келесі түрге ие:

(6.43)

(6.44)

осыдан

(6.45)

(6.46)

Осы қатынастардың көмегімен аламыз:

(6.47)

Осы теңдеу изоэнтроптық процесстің дифференциалдық теңдеуі деп аталады. Белгілеу енгізіп, шамасын изоэнтропты процесс көрсеткіші деп атайды:

(6.48)

Олай болса (6.47) теңдеуін төмендегідей түрде жазуға болады

(6.49)

(6.42) және (6.49) теңдеулерінен

(6.50)

(6.50) теңдеуіндегі дыбыс жылдамдығын ортаның қысымы, меншікті көлемі және изоэнтроп (адиабата) көрсеткіші бойынша анықтауға болады. Менделеев-Клапейрон теңдеуін ескеріп, идеал газ үшін:

(6.51)

Осыдан идеал газ үшін дыбыс жылдамдығы пропорционал екендігі шығады. екендігін ескеретін болсақ, ( – газдың салыстырмалы молекулалық массасы), газдың молекулалық массасы қаншалықты аз болса, газдағы дыбыс жылдамдығы соншалықты үлкен болады.

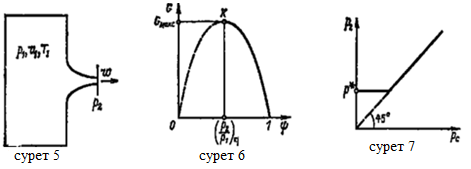
*Кесте 1.*  температурада газдардағы дыбыс жылдамдығы

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| газ |  |  |  |  |
| азот | 28,016 | 296,8 | 1,4 | 349 |
| ауа | 28,960 | 287,0 | 1,4 | 343 |
| гелий | 4,003 | 2077 | 1,66 | 1005 |
| екі атомды көміртек | 44,010 | 188,9 | 1,31 | 269 |
| оттегі | 32,000 | 259,8 | 1,4 | 327 |
| сутегі | 2,016 | 4124 | 1,41 | 1305 |
| су буы | 18,016 | 461,4 | 1,33 | 424 |
| фреон-12 | 120,920 | 69,28 | 1,14 | 152 |

(6.50) теңдеуімен есептелген температурада әртүрлі газдардың дыбыс жылдамдығы кестеде келтірілген. (6.50) теңдеу идел, нақты газдар үшін, сонымен қатар сұйықтар мен қатты денелер үшін де орынды, ал (6.51) теңдеу тек қана идеал газдар үшін орынды.

§**6.4 Тарылған сопло арқылы идеал газ ағысы**

Ағын жылдамдығын арттыру үшін сопло деп аталатын арнайы профильденген каналдар қолданылады. Үлкен көлемді газ резервуарымен жалғанған соплодан газдың үйкеліссіз адиабаталық ағысын, қайтымды процессті қарастырамыз.



Резервуардағы газ параметрлерін , ал соплодан шыға берістегі газ параметрін деп белгілейміз. Соплодан шыға берістегі газ қысымын қоршаған орта қысымына тең деп қарастырамыз. Соплоға кіре берістегі газ жылдамдығы . және мәндері белгілі болса (6.28) формула бойынша газдың соплодан ағып шығу жылдамдығын анықтауға болады

мұндағы анықтау үшін -диаграммасын қолданған ыңғайлы. Сығылмайтын сұйықтың қайтымды адиабаталық ағысы үшін жылдамдықты (6.30) теңдеуі көмегімен анықтауға болады

Сығылмайтын сұйық үшін меншікті көлем тұрақты болғандықтан, оны интеграл алдына шығаруға болады. Олай болса, (6.30) теңдеуі келесідей түрде жазылады

(6.52)

Идеал газ үшін де (6.30) теңдеуі көмегімен шамасын оңай анықтауға болады. Адиабата теңдеуінен келесі қатынасты алуға болады

(6.53)

мәнін (6.30) теңдеуіне қойып, және оны интегралдап, соплодан ағып шығатын газдың жылдамдығын анықтаймыз:

(6.54)

Егер соплоға кіре берістегі ағын жылдамдығы соплодан шыға берістегі ағын жылдамдығынан біршама аз болса, онда (6.54) теңдеу келесі түрде жазылады:

(6.55)

Соплодан ағып шығатын газ шығыны немесе газ мөлшері былай анықталады. Уақыт бірлігінде соплодан ағып шығатын газ мөлшері тең, мұндағы - соплоның шыға беріс қимасындағы газдың меншікті көлемі. Бұл шаманы деп қарастыруға болады, мұндағы -соплоның шыға беріс қимасының ауданы. Олай болса соплодан ағып шығатын газ шығыны

(6.56)

шамасын адиабата теңдеуі көмегімен төмендегідей жазуға болады

(6.57)

Олай болса

(6.58)

(6.58) теңдеуіне (6.55) теңдеуін қойып, аламыз:

(6.59)

Осы теңдеудің көмегімен белгілі бір мөлшердегі газ шығынын қамтамасыз ету үшін соплоға кіре берістегі және шыға берістегі газ параметрлері белгілі болған жағдайда соплоның шыға беріс қимасының ауданы қандай болу қажеттігін анықтауға болады.

Егер қысымы мәнін өзгертпей, ал соплодан шыға берістегі қысымды төмендетсек -ағын жылдамдығы мен -газ шығыны ұлғаяды. жылдамдығы -жергілікті дыбыс жылдамдығына тең болғанда, тарылған каналда, яғни соплода ағынды ары қарай айдау мүмкін емес. Сондықтан болғанда - қысымының төмендеуімен газ шығыны өзгеріссіз және тең болады. Максимум шығынға сәйкес қысымды критикалық қысым деп атайды және оны деп белгілейді. -критикалық жылдамдық деп аталады.

Соплодан газ ағысы кезінде максимал шығын алу үшін (6.52) теңдеуіндегі қысымы бойынша бірінші ретті туынды алып және оны нольге теңестіру керек, яғни

осыдан

(6.60)

Максимал шығынды қамтамасыз ететін бұл қысымдар қатынасы критикалық деп аталып, ол арқылы белгіленеді

(6.61)

Қысымның критикалық қатынасы тек газ қасиетінен, яғни адиабата көрсеткішінен тәуелді. Мысалы, екі атомды газ үшін және (6.59) теңдеуіне мәнін қойып, максимал шығын мәнін анықтаймыз:

(6.62)

мәнін (6.55) формуласына қойып, критикалық жылдамдық формуласын аламыз:

(6.63)

Ағыстың критикалық жылдамдығы тарылған соплодағы газ ағысының максимал жылдамдығын көрсетеді. Сонымен соплодан шыға берістегі максимал жылдамдық жергілікті дыбыс жылдамдығынан артық болмайды, олай болса . (6.57)және (6.61) теңдеулерінен

және мәндерін (6.63) теңдеуіне қойып, аламыз

Дыбыстың таралу жылдамдығы Лаплас формуласы бойынша анықталады

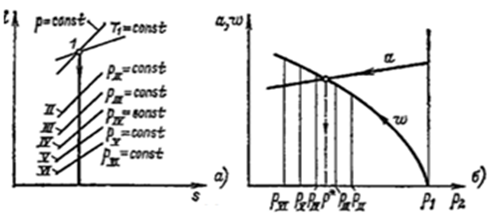
Сопло арқылы газ ағысын қарастырғанда соплоның кіре беріс және шыға беріс қимасының аудандары мен соплоның формасы қалай таңдалады деген сұрақ туындайды. Соплоға кіре берістегі және соплодан шығар жердегі ортаның қысымы алдын-ала белгілі болады. Егер сопло арқылы өтетін газ мөлшері белгілі болса, онда кіре беріс және шыға берістегі қима аудандары (6.56) теңдеуі көмегімен анықталады:

(6.64)

Нақты газдардың ағысының есептері (6.28) немесе (6.30) теңдеулері бойынша -диаграммасы көмегімен анықталады. Соплоға кіре берісте газдың белгілі параметрлерімен соплодан ағып шығатын газ жылдамдығының -қысымнан тәуелділік графигін тұрғызалық. Ағыс процесі қайтымды адиабаталы болғандықтан, соплодағы ұлғаюға сәйкес нақты газ күйі -диаграммасындағы 1-нүктесінен төмен изоэнтропта орналасады. Әртүрлі изобара сызықтарының изоэнтропия сызығымен қиылысу нүктесі арқылы энтальпиялар анықталып, нақты газ ағысының жылдамдығы анықталады. жағдайында (6.28) теңдеуі төмендегідей жазылады:

(6.65)

(6.65) теңдеуі арқылы анықталған жылдамдықтарды қысымға байланысты 8(б)-суретінде көрсетілген графигіне саламыз.



сурет 8

Әрбір изобараның изоэнтропия сызығымен қиылысу нүктелеріне сәйкес күйлері үшін газдағы дыбыс жылдамдығы анықталады. Дыбыс жылдамдығы күй параметрлеріне байланысты кестеден алынады, немесе нақты газдың адиабаталық сығылуына бойынша Лаплас теңдеуімен есептеледі. Изоэнтропты сызықтағы қысым қаншалықты төмен болса, нақты газдағы дыбыс жылдамдығының мәні соншалықты төмен болады. графигіне әртүрлі қысымдағы дыбыс жылдамдығы мәндерін саламыз. мен қисықтарының қиылысқан нүктесінде соплодан ағып шығатын нақты газ жылдамдығы жергілікті дыбыс жылдамдығына тең болатын қысымды көрсетеді. Сәйкесінше, ол ағыстың -критикалық қысымы деп аталады.

§**6.5 Дыбыс жылдамдығы арқылы өту. Лаваль соплосы**

Қозғалыстағы газ қысымның төмендеуімен , ал жылдамдығының өсуімен жүретін канал - *сопло*, ал қысымы жоғарылайтын , жылдамдығы төмендейтін канал - *диффузор* деп аталады. Қысым мен жылдамдықтың таңбасы қарама-қарсы екендігін (6.19) теңдеуінен байқауға болады. Газ ағынында қысым төмендегенде жылдамдық артады, ал қысым артқанда жылдамдық кемиді. Соплода айдау, диффузорда ағын тежелісі жүреді. Энергетикалық қондырғыларды (турбина, компрессор, реактивті двигатель және т.б.) жобалауда газдардың диффузорлық және соплолық ағысын қамтамасыз ету үшін каналдың конструкциялық құрылымын ескеру өте маңызды. Газ немесе сұйық ағысы кезінде каналдың кез келген қимасы үшін келесі теңдеу орынды

(6.66)

мұндағы -газдың массалық шығыны; -канал қимасының ауданы; -газ жылдамдығы; - каналдың берілген қимасындағы газдың меншікті көлемі. Стационарлық ағыс режимінде ағынның үзіліссіздік шартын ескеретін болсақ, онда каналдың кез келген қимасында ағып өтетін газ шығыны бірдей деп қабылданады, яғни

(6.67)

Бұл теңдеу гидродинамикада үзіліссіздік теңдеуі деп аталады, және осы теңдеуді логарифмдеп,

(6.68)

(6.68) қатынасын дифференциалдап, аламыз:

(6.69)

бұл дифференциалдық формадағы үзіліссіздік теңдеуі деп аталады. (6.19) теңдеу ағында және техникалық жұмыс атқарылмайтын үйкеліссіз газ ағысы үшін орынды

Жоғарыдағы теңдеуді келесі түрде жазуға болады

(6.70)

Қайтымды адиабаталық ағыс үшін (6.49) теңдеуімен сәйкес

(6.71)

(6.70) мен (6.71) теңдеулерін (6.69) теңдеуге қойып, аламыз:

(6.72)

(6.70) теңдеуін ескере отырып, (6.72) теңдеуін келесі түрде жазуға болады

(6.73)

мұндағы - газдағы жергілікті адиабаталық дыбыс жылдамдығы, яғни серпімді деформацияның таралуы. (6.73) теңдеуін басқаша келесі түрде жазуға болады

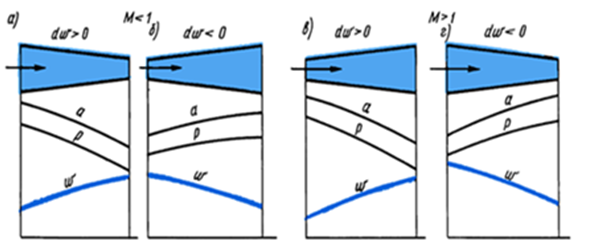
(6.73 a)

мұндағы - Мах саны деп аталады. Егер болса ағыс дыбыс жылдамдығына дейінгі жылдамдыққа сәйкес болады, ал дыбыс жылдамдығынан үлкен жылдамдыққа сәйкес келеді. (6.73a) теңдеу каналдың көлденең қимасы ауданының ағындағы қысым өзгерісі мен Мах санын байланыстырады. (6.73a) теңдеуіне (6.19) теңдеуіндегі мәнін қойып, канал қимасы ауданының өзгерісін, ағын жылдамдығы өзгерісін және Мах санын байланыстыратын теңдеуді аламыз:

(6.74)

(6.73a) теңдеуінен дыбыс жылдамдығына дейінгі ағыста канал қимасының тарылуы ағын бойымен қысымының төмендеуіне әкеледі, ал (6.74) теңдеуі бойынша каналдың тарылуы кезінде ағын жылдамдығы артады. Егер дыбыс жылдамдығына дейінгі ағыста канал қимасы ұлғаятын болса, онда ағын жылдамдығы кемиді , ал қысым канал бойымен артады . Дыбысқа дейінгі ағынды тежеу үшін, яғни ағынның кинетикалық энергиясын сығылған газдың потенциалдық энергиясына айналдыру үшін қолданылатын ұлғаятын канал диффузор деп аталады.

(6.73a) және (6.74) теңдеулері арқылы асқын дыбыс жылдамдықты ағын үшін де маңызды қорытынды жасауға болады. Асқын дыбысты жылдамдықта, яғни ұлғаятын каналда ағын бойымен қысым төмендейді, ал жылдамдық артады, ал керісінше асқын дыбысты жылдамдықта тарылатын каналда қысым артады, ал жылдамдық кемиді. Осы тұжырымдарды төмендегі 9-суреттен көруге болады.



сурет 9. Тарылатын және ұлғаятын каналдардағы ағын параметрлерінің өзгерісі

Сонымен, сопло мен диффузор профильді каналдарда асқын дыбысты жылдамдықта ағын параметрлері бір біріне қарама-қарсы өзгереді. Сопло-кеңейетін канал, диффузор-тарылатын канал. (6.73a) және (6.74) теңдеулерінің нәтижесі 2-кестеде келтірілген.

*Кесте 2.* Әр түрлі режимді ағыс үшін канал профильдері

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Ағын түрі | Канал түрі | |
| Сопло | Диффузор |
| Дыбысқа дейінгі | Тарылатын :  0, | Кеңейетін  0, |
| Асқын дыбысты | Кеңейетін  0, | Тарылатын :  0, |

Аталған тұжырымдардан тарылған соплодан шыға берістегі ағынды ары қарай үдетуді қалай жүзеге асыруға болатындығы айқын. Ол үшін каналдағы қысым ағыстың критикалық қысымына тең болатындай канал тарылып, сопло профильденуі қажет. Бұл жағдайда ағын жылдамдығы жергілікті дыбыс жылдамдығына тең болады. Осы қимадан соң канал ұлғаяды. Аталғандарға сәйкес ағын дыбыс жылдамдығы арқылы өтіп, соплоның ұлғаю бөлігінде ағынның жылдамдығы үдей түседі. Осылайша, ағынды үдету үшін қысымды соплоға кіре берістен ортаның қысымына дейін төмендетеді. Газ ағысының асқын дыбысты жылдамдығын алу үшін тарылатын және ұлғаятын бөліктерден тұратын аралас соплоны бірінші болып швед ғалымы Лаваль қолданды. Лаваль соплосының құрылымы, сопло бойымен ағын жылдамдығы мен жергілікті дыбыс жылдамдығының таралуы 10-суретте бейнеленген. Соплоның минимал қимасының ауданы берілген газ шығыны бойынша (6.56) теңдеуі бойынша анықталады:

(6.75)

Лаваль соплосынан шыға берістегі газ жылдамдығы жоғарыда келтірілген (6.65), ал идеал газ үшін (6.54) немесе (6.56) теңдеулерімен анықталады. Соплоның шыға беріс қимасының ауданы (6.56) теңдеуімен анықталады

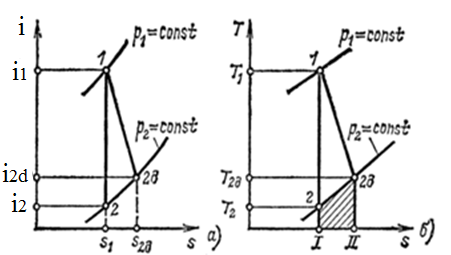
(6.76)

§**6.6 Үйкелісті адиабаталық ағыс**

Канал қабырғасына газдың үйкелісін ескере отырып ағыс процессін қарастырамыз. Бұл көрініс іс жүзінде айтарлықтай маңызды. Мысалға каналда газ немесе сұйықтық аққанда үйкелістен өту кезінде қабырғалардың кедір-бұдырлығынан және т.б. жағдайларда улкен немесе кіші энергия шығындары болады. Ішкі ортамен жылуалмасу болмаған жағдайда, ағыс процессін адиабатты деп есептейміз. Сонымен қатар бұл процесс қайтымсыз ағыс кезінде үйкелістен жылу бөлінеді және ағынның энтропиясы осыған сәйкес артады.

(6.77)

Үйкелісті ағын процессінің суреті және - диаграммаларында көрсетілген (сурет 11).



сурет 11

Егер ағыс қайтымды, үйкеліссіз болған жағдайда, онда бұл процесс - диаграммасында изобаралар арасындағы және (1 мен 2 нүкте арасында) изоэнтропты процесс алынып тасталынып, ал соплодан шыға берістегі жылдамдық энтальпиялар айырмасымен анықталынады. Сондықтан энтропия газдың үйкелісі кезінде қайтымсыз шығын ағыс процессі кезінде артады және соған сәйкес адиабата изоэнтропқа қарағанда оң жаққа қарай жылжиды (сурет 11 а). Сонымен, ағыс үйкелісті немесе үйкеліссіз болса да ағында газдың ұлғаю процесі жүреді. Соплодан шыға берістегі қысым , ал 2д нүктесі үйкелісті ағыс процессі, . Үйкелісті ағыс кезінде соплодан шыға берістегі газдың энтальпиясының өлшемін деп белгілеміз.

(6.78)

осылайша, үйкеліссіз қайтымды ағын жағдайына қарағанда үйкелісті ағын процессінде энтальпиялар айырымы төмен болады. Сондықтан соплодан шығар кездегі газдың жылдамдығы үйкеліссіз ағысқа қарағанда, үйкелісті ағыс кезінде аз мәнге ие болады. Бұл жылдамдықты арқылы белгілейміз.

(6.79)

(6.80)

мұндағы -бір ден аз шамаға тең жылдамдық коэффициенті. Жақсы өңделген, пішінделген соплолар үшін мәні аралығында болады. Үйкеліске кеткен ағын энергиясының шығыны үйкеліссіз ағыспен салыстырғанда, үйкелісті ағыс кезінде соплодан шыға берістегі ағынның кинетикалық энергиясының төмендеуімен көрсетіледі.

(6.81)

(6.80) ескере отырып

(6.82)

өлшемі тең, яғни энергия коэффициенті деп аталады.

(6.83)

мәнін еңгізе отырып, мына түрде жазамыз:

(6.84)

егер

(6.85)

тең болса, онда былай анықталады

(6.86)

олай болса, шамасын келесідей түрде жазуымызға болады:

(6.87)

(6.84) формуланы ескере отырып, келесідей теңдікті аламыз:

(6.88)

Соңғы екі теңдікті, яғни (6.87)- (6.88) теңестіре отырып мынаны аламыз:

(6.89)

Адиабаталық ағыс процессі - диаграммасында келесідей күйде көрсетіледі. Қайтымды адиабаталық ағыс жағдайында, соплоға кіргендегі (1 нүкте) және соплодан шыққандағы 2 нүктесіне сәйкес, - диаграммасы сияқты изоэнтропты процессінде орналасады (сур.11б). Үйкелісті адиабаталық ағыс процесс сызығы - диаграммасы сияқты оң жаққа қарай жылжыған . Осы сызығының астындағы аудан, үйкеліске кеткен күшті , қайтымсыз жылуға айналған көрсетеді, осыдан (6.77) формуладан мынаны аламыз:

(6.90)

бұл интеграл адиабата бойынша алынады. -диаграммасындағы изобара кесіндісінің ауданы (суреттің б штрихталған бөлігі) үйкеліс нәтижесінің кинетикалық энергия ағынының шығының көрсетеді. Егер 2 және нүктесі изобарада жатса, онда қарастрылып жатқан ауданымыз шамасына тең.

изобаралық процессте ,

(6.91)

(6.92)

және аудандарын салыстыра отырып, үйкеліс әсерінен болған кинетикалық энергия ағынының шығыны үйкеліс жылуының бөлігін көрсетеді. Үйкелістің жылуының басқа бөлігі -диаграммада ауданымен көрсетіледі және жұмыстық газбен қанығып, қайтадан жұмысқа айналады.

Осылайша

(6.93)

Үйкеліс нәтижесіндегі қайтымсыз процессінен болған шығын штрихталған ауданмен белгіленген. Осыдан қисық формасы қайтымсыз адиабатаны көрсетеді. Қорытындылай келе, қайтымды адиабата үйкелісі келесідей үш негізгі теңдеулермен көрсетіледі:

(6.94)

Үйкелісті адиабаталық ағыс жағдайы үшін бұл теңдеулер төмендегідей күйде болады.

(6.95)

(6.96)

Үйкеліс кезіндегі адиабаталық ағын үшін

(6.97)

(6.98)

немесе

(6.99)

Бір маңызды жағдайды ескеруіміз қажет: (6.95) теңдіктен алынған үйкеліссіз адиабаталық ағын үшін орныққан жұмыстың мәні және үйкелісті адиабаталық ағын мәні өзара тең емес. Дәлелдесек, мына теңдеуді аламыз:

(6.100)

(6.100) теңдігінен келесідей теңсіздікті аламыз:

(6.101)

Осылайша, орныққан жұмыс қайтымды адиабаталық ағыс жағдайына қарағанда, үйкелісті адиабаталық ағыс жағдайында артық екендігін көреміз. (6.93) теңдігінен (6.80) формуланы ескере отырып келесі айырымды аламыз:

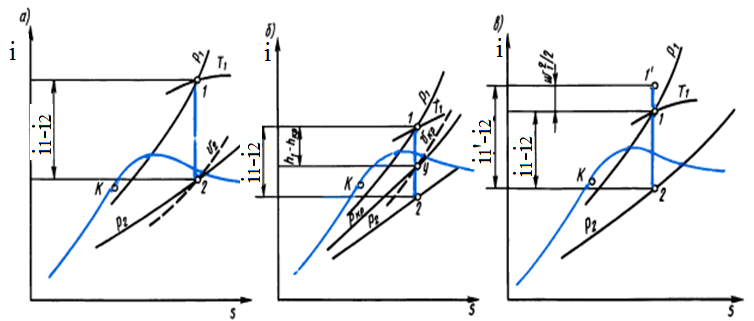
(6.102)

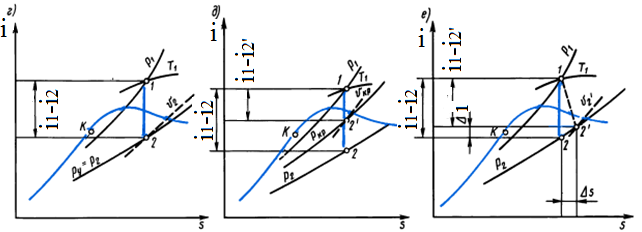
§**6.7 Нақты газдар мен булардың ағысы.**

Нақты газдар мен булардың шығындары мен ағыс жылдамдықтарын есептеу үшін – диаграммаларын қолдануға болады. Бұл жағдайда бастапқы қысымы , температура және қысымның төмендеуі берілуі қажет. 1 нүктесі (сурет 12а) изобарасымен және изотермиясының қиылысуымен анықталатын, заттың бастапқы күйін сипаттайды. Адиабатты (изоэнтропты) ағысы кезінде процесс 1-2 вертикальды сызығымен көрсетілген, ал жұмыстық дененің соңғы күйін сипаттайтын 2 нүкте изобарасында орналасқан.

Ағыс жылдамдығын (6.85 формула) анықтау үшін алдымен - диаграммасы көмегімен энтальпиялар өзгерісін табамыз. Сопло арқылы өткен заттың теориялық шығыны , соплоның кіре беріс ағысының ауданы *f* белгілі болса, онда формуласымен анықталынады. Сопло қиылысындағы (2 нүкте) меншікті көлем немесе заттың тығыздығы - диаграммасы бойынша да анықталынады.

Сопло формасы мен қысымның төмендеуінің тәуелділігіне байланысты ағыс жылдамдығы дыбысқа дейінгі, дыбысты және жоғары дыбысты болып бөлінеді. Егер заттың ағысы (мысалы, бу) тарылған соплодан дыбысқа дейінгі аймақта жүрсе (сур 12а), онда сопло қиылысындағы будың қысымы ағыс жүріп жатқан ортаның қысымына р2 тең болады. Сонымен қатар ағыс жылдамдығы (6.85) формуламен анықталынады. Егер тарылған сопло орнына Лаваль соплосын қолданатын болсақ, нәтиже өзгеріссіз болады (сурет 12 г).





сурет 12

Будың адиабатты ағысы: а тарылған соплодағы дыбысқа дейінгі аймақ; г Лаваль соплосындағы дыбысқа дейінгі аймақ; б тарылған соплодағы жоғары дыбысты аймақ; д Лаваль соплосындағы жоғары дыбысты аймақ; в бастапқы жылдамдығы ескерілген; г үйкеліс ескерілген аймақтар.

Жоғары дыбысты аймақта тарылған соплоны қолдану, сопла қиылысндағы мәнімен анықталынатын критикалық қысыммен қамтамасыз етеді (сурет 12б). Жоғарғы дыбысты ағыс аймағын анықтау үшін алдымен коэффициент мәнін анықтап аламыз. Сонымен қатар сулы бу үшін аса қызған болса және құрғақ қаныққан бу үшін . Ағыстың критикалық жылдамдығы және шығыны төмендегі формула бойынша анықталады:

және анықтау үшін есептеп, 1-2 адиабатамен изобарасымен қиылысқан нүктесін табу қажет. Осыдан, тарылған соплода ағыс толық орныққан энтальпиялар өзгерісінің бөлігін құрайтын, энтальпиялар өзгерісімен анықталады. Егер, таңдалған қысым төмендеуінде (жоғары дыбысты аймақ) Лаваль соплосын қолданатын болсақ, барлық орныққан энтальпиялар өзгерісін ескере отырып, ағыс жылдамдығын (6.85) формуламен есептейміз (сурет 12г). Будың шығыны Лаваль соплосының ең төменгі ағысымен шектеледі және критикалық мәнге тең, жоғарыда айтылғандай - диаграммасы бойынша анықталады.

Кейде ағыс жылдамдығын анықтау кезінде ағынның бастапқы жылдамдығын ескермеуге болады. Бұл жағдайда ағыс жылдамдығы төмендегі формуламен анықталады (сурет 12в)

Будың ағысы кезіндегі үйкеліс, өрнегіне сәйкес соплоның шығын коэффициенті ескеріледі. Бұл жағдайда үйкеліс әсерінен соплодағы кинетикалық энергияның шығыны будың кинетикалық энергиясының айырымымен анықталады. (6.85) формулаға сәйкес кезінде үйкеліс әсерінен болған энтальпия шығыны мынаған тең:

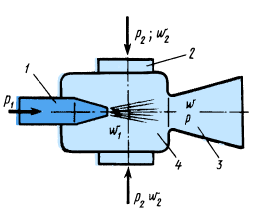
12е-суретте 1-2´ сызығы үйкеліс кезіндегі бу ағысының процессін көрсетеді, үйкеліс әсерінен жылудың қайтымсыз бөлінуінен болған энтропияның жоғарылауы.

§**6.8 Эжектордағы процесстер**

AN=8-9

Екі ағынды араластыру жолымен жоғары қысымды газ немесе буды алу үшін арналған аппараттарды эжектор деп атаймыз. Сығылатын газ немесе бу р2 қысыммен түтікше 2 арқылы араластыру камерасына 4 түседі (cурет 13).

Заттың қысымын көтеру үшін түтікше 1 арқылы араластыру камерасына жіберілетін, қысымды бу немесе газдың жоғары напорлы ағынның энергиясы қолданылады. Жоғары және төменгі жылдамдықты ағынның турбулентті араласуының әсерінен араласу камерасында 4 жоғары напорлы ағын жылдамдығының бір уақытта төмендеуі кезінде сығылатын газдың жылдамдығы арта түседі. Диффузорда 3 ағынның кинетикалық энергия қозғалысы ағынның қысымы *р* мәнге ие болатын, яғни қысымның энергиясына өтеді. Эжектор белгілі бір көлемде төменгі қысымды тудыру үшін эксгаустер ретінде қолданылады мысалы, конденсациялық жүйелердегі бу айдау қондырғыларында пайдаланылады.



сурет 13. Эжектор схемасы

Эжектордың термодинамикалық есебі түтікшедегі 3, берілген *р* қысымда және 1 кг/с шығынды ағын алу үшін қажетті түтікше 1 арқылы жоғары напорлы ағынның зат массасының шығынын анықтаудан тұрады. Ағындағы *р* қысымды заттың мұндай шығынын (1 кг/с) түтікше 1 арқылы келетін жоғары напорлы газдан кг/с және түтікше 2 арқылы келетін төменгі напорлы газдан кг/с алуымызға болады. Аралас ағынды құрайтындар үшін бастапқы қысым параметрлері  *,* мен меншікті энтальпиялары  *,* берілуі қажет.

Эжектордың аралас ағынды процессін шығынсыз ағатын, адиабатты деп қарастыруымызға болады. Бұл жағдайда жоғары напорлы ағынның жылдамдығы сопломен қиылысын 1 келесідей айырма түрінде жазуымызға болады:

(6.103)

мұндағы , – жоғары напорлы газ ағынының сопломен 1 қиылысындағы және соплодағы 1 ағынның тежелуіне сәйкес меншікті энтальпиялар. Аралас ағынның (қоспа) жылдамдығы ω келесіде формуламен анықталады:

(6.104)

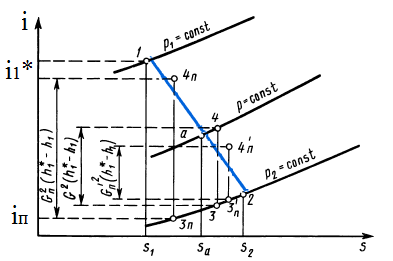
мұндағы және – қоспа мен қоспаның тежелуіне сәйкес меншікті энтальпиялар. Диффузор алдындағы эжектордағы ағыстың қоспа тежелуінің меншікті энтальпиясы келесі теңдікпен анықталады.

(6.105)

Егер түтікше 2 арқылы төменгі напорлы ағынның аз жылдамдығын ескермесек, онда қозғалыс мөлшерінің сақталу заңына сәйкес сәйкес келеді . Осы қатынасты (6.103) формуласына қойып, келесі түрге келтіреміз:

(6.106)

Алынған теңдіктен екі шаманы анықтауға болады: және . Оларды анықтау – диаграммасы көмегімен тізбекті әдісімен анықталынады (сурет 14).



сурет 14. Эжектордегі процесстердің -диаграммада бейнеленуі

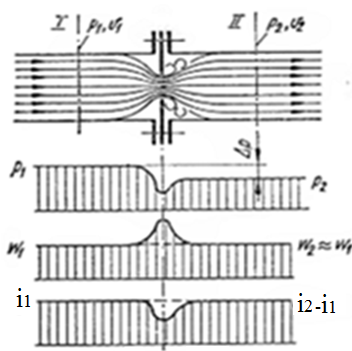
Диаграммадағы 1 және 2 түктесін ,, , мәндерінің берілуі арқылы табамыз. Осыдан мәнін және анықтаймыз. Дәл осылай қысымда және энтальпияда нүктесін табамыз. нүктесінен вертикаль бағытта (адибатты процесс) нүктесін табамыз. Егер ол изобарасынан жоғары орналасса, онда шығын артық алынған, егер төмен болса онда өте аз алынған. Дұрыс алынған 4 нүктесі изобарасында болады.

Егер аралас процессі қайтымды болғанда, 4 нүктесін

қатысты изобарасы мен 1-2 ( а нүктесі) қиылысу нүктесі ретінде анықтауымызға болады. Бұл жағдайда жоғары напорлы ағын шығыны мынаған тең: . Бірақ эжектордағы ағын жылдамдығының теңсіздігі әсерінен аралас процесі қайтымсыз, сондықтан 4 нүктесі а нүктесінен оң жаққа қарай орналасқан және негізгі мәні теориялықққа мәніне қарағанда жоғары. Газдың негізгі шығынының теориялық шығынға қатынасын эжектор ПӘК- ті деп аталады.

§6.9 Газ және будың дроссельденуі

Егер газ немесе бу ағысы жолында канал қимасы кенеттен тарылып, ағынға кедергі туғызатын кішірек саңылау пайда болса (толығымен ашылмаған вентиль немесе кран), онда осы аралықта ағын жылдамдығы шапшаң артып, қысымы төмендейді (сурет 15).



сурет 15

Дроссельдену деп, тарылған саңылау арқылы газ ағып өткенде сыртқы жұмыстың атқарылуынсыз қысым төмендейтін қайтымсыз процессті атайды. Канал немесе трубадағы барлық кедергі (вентиль, задвижка, шайба, кран, клапан) газдың дроссельденуіне, қысымның төмендеуіне әкеледі.

Қысым шамасының төмендеуі газ табиғатынан, оның күйінен, труба қимасының тарылуынан және газ жылдамдығынан тәуелді. Кедергі тудыратын саңылау арқылы газ ағып өткенде, газдың кинетикалық энергиясы және оның жылдамдығы тарылған қимада артады, ал температура мен қысым төмендейді (сурет 15). Газ саңылау арқылы аға отырып, кинетикалық энергиясының бөлігін үйкеліс күшінің жұмысына кетіреді, содан соң жылуға айналады. Нәтижесінде температура өзгеріп, ұлғая бастайды. Саңылау біртіндеп ұлғайып, газ толық қима бойынша ағып, газдың жылдамдығы төмендейді, ал қысым артады, бірақ бастапқы мәніне оралмайды. Қысымның төмендеуі газ немесе будың шығынына пропорционал болғандықтан шығынды өлшеуге болады. Жылуалмасу болмаса және ағын техникалық жұмыс атқармаса , ағын үшін термодинамиканың бірінші заңы

мұндағы – дененің толық энергиясы дененің ішкі күйінен тәуелді -ішкі энергия мен дененің қоршаған ортамен салыстырғандағы орны мен қозғалыс жылдамдығымен байланысты -сыртқы энергиялардан тұрады:

Жоғарыдағы теңдеуді ескеріп, ағын үшін термодинамиканың бірінші заңының математикалық өрнегін аламыз:

және

екендігін ескеретін болсақ,

,

болғандықтан,

немесе

(6.107)

мұндағы мен – жергілікті кедергіден алыс жатқан мен қималарындағы меншікті энтальпия. Дроссельденуге дейінгі және дроссельденуден кейінгі ағын жылдамдығының өзгерісі өте аз болғандықтан , меншікті кинетикалық энергия өзгерісін ескермеуге болады, олай болса (6.107) теңдеуден

(6.108)

яғни адиабаталық дроссельдену кезінде бу мен газдың меншікті энтальпиясы дроссельденуге дейін және кейін де өзгермейді. Идеал газдар үшін , олай болса (6.108) теңдеуі негізінде дроссельденуі кезінде идеал газдың температурасы өзгермейді.

Нақты газдардың дроссельденуінде газ температурасының төмендеуі, артуы немесе өзгеріссіз қалуы мүмкін. Дроссельденуде нақты газдардың сипаты мен температурасының өзгеруі молекулааралық күштердің әсерімен анықталады. Дроссельдену кезінде нақты газдар температурасының өзгеру құбылысын бірінші болып Джоуль мен Томсон анықтады, сондықтан бұл құбылыс Джоуль-Томсон эффектісі деп аталып, былай өрнектеледі:

(6.109)

-шамасын дифференциалдық температуралық Джоуль-Томсон эффектісі немесе дифференциалдық дроссель-эффект деп атайды. -шамасын анықтау немесе (6.109) теңдеуінің шығу жолы төменде келтіріледі. Термодинамиканың негізгі заңы теңдеуіне -энтальпияның толық дифференциал мәні қойылады:

, немесе (6.110)

мұндағы

(6.111)

(6.110) теңдеуін (6.111) теңдеуіне қойып, келесі теңдеулер алынады

(6.112)

(6.111) теңдеудегі екендігі белгілі. Осы теңдеудегі шамасын табу төменде келтіріледі. Ол үшін (6.112) теңдеуді энтропияның толық дифференциалы келесі түрде жазуға болады,

(6.113)

(6.112) және (6.113) бір-біріне тең. болғанда (6.112) теңдеуден

(6.114)

болғанда (6.112) теңдеуден

(6.115)

(6.114) теңдеуін бойынша , ал (6.115) теңдеуін бойынша дифференциалдап, келесі қатынасты аламыз:

(6.114a)

(6.115a)

Соңғы екі теңдеуді теңестіріп, қысқартқанда келесі қатынас алынады:

осыдан

(6.116)

(6.111) теңдеуіне мәнін қойып, келесі теңдікті аламыз:

(6.117)

(6.117) теңдеуінен

(6.118)

нақты мәнін анықтау үшін берілген заттың күй теңдеуін білу қажет. Идеал газ үшін . күй теңдеуінің дифференциалы

және

(6.118) теңдеуіндегі орнына қойып, келесі теңдеуді аламыз

Осы теңдеу идеал газдың дроссельдену-эффектісі нольге тең екендігін көрсетеді. (6.118) теңдеуін келесі түрде жазып,

(6.119)

Ван-дер-Ваальс теңдеуі бойынша келесі түрге келеді

(6.120)

мұндағы - берілген газ тұрақтылары. Дроссельдену кезінде , ал болғандықтан, таңбасы (6.121) теңдеуінің алымының таңбасынан тәуелді. таңбасы үш түрлі жағдайда болуы мүмкін:

1)

2)

3)

Дроссель-эффекті таңбасының өзгеруі инверсия деп аталады, ал тең болатын температура – инверсия температурасы деп аталады. Инверсия температурасы

(6.122)

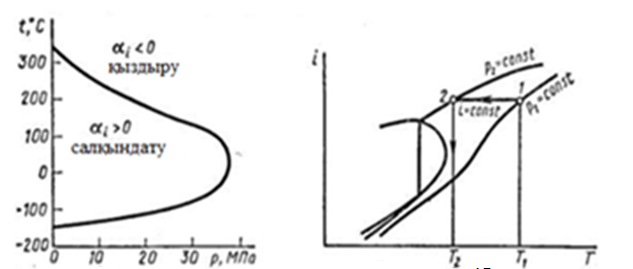
Ван-дер-Ваальс теңдеуіне бағынатын кез келген газдың өзіндік инверсия температурасы болады. Көптеген газдардың инверсия температурасы жоғары, шамамен , ал сутегі үшін , гелий үшін тең болады.

Егер газ немесе будың бастапқы температурасы инверсия температурасынан жоғары болса, онда дроссельдену нәтижесінде температура артады; егер газ немесе будың бастапқы температурасы инверсия температурасынан төмен болса, онда дроссельдену нәтижесінде температура кемиді.

(6.119) теңдеуден болғанда кез келген заттың инверсия температурасын анықтауға болады

(6.123)

Егер берілген заттың күй теңдеуі белгілі болса, онда (6.123) теңдеуі бойынша нақты мәнін анықтауға болады. Заттың әрбір қысымы үшін инверсияның екі нүктесі: біріншісі - сұйық аймағы, екіншісі – қатты қызған бу аймағы үшін болады. 16 -суретте (6.123) формула бойынша есептелген азоттың инверсия сызығы келтірілген. Егер азоттың параметрлері дроссельдену алдында инверсия сызығы ішіндегі кез келген нүктеге сәйкес келсе, онда дроссельденуден кейін температура төмендейді, ал осы параметрлер инверсия сызығы сыртындағы нүктелермен сәйкес келетін болса, онда температура артады. Егер мәндеріне сәйкес нүктелер инверсия сызығы үстінде орналасса, онда дроссельдену нәтижесінде газ температурасы өзгермейді.



сурет 16 сурет 17

Дроссельденуге дейін және кейінгі температура айырымы интегралды дроссель-эффект деп аталып, келесі теңдеумен сипатталады

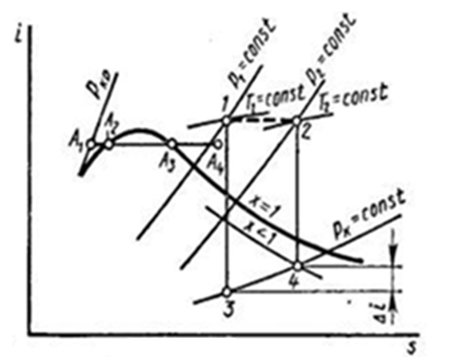
(6.124)

Интегралды дроссель-эффектіні -диаграммасы көмегімен графикалық тұрғыдан анықтауға болады (17-сурет). Белгілі параметрлері бойынша дроссельдену алдында нүктесін табады; дроссельдену шартын және дроссельденуден кейінгі белгілі қысымды қолдана отырып нүктесін табады, содан соң дроссельденуден кейінгі температурасы анықталады.

Су буының дроссельдену процессін зерттеу үшін -диаграммасын қолдануға болады (18-сурет). Интегралды дроссель-эффект келесі жолмен анықталады: Будың параметрлері арқылы дроссельденуге дайінгі нүктесін анықтайды; дроссельдену шартын және дроссельденуден кейінгі белгілі қысымды қолдана отырып нүктесін анықтайды, содан соң температурасын анықтайды. Дроссельдену нәтижесінде температура кемиді, яғни дроссель-эффект таңбасы оң. Заманауи бу техникасында қолданылатын су буы үшін дроссель-эффект тек қана оң болады, өйткені будың инверсия температурасы шамасына тең.

Дроссельдену нәтижесінде будың жұмыс қабылеттілігі төмендейді. Турбина алдындағы будың параметрлері 18-суреттегі - нүктесіне сәйкес; турбинада қысымына дейін адиабаталық ұлғаю процесінде будың әрбір килограмы шамасына тең жұмыс атқарады. Егер турбинаға бу дроссельденуден кейін түсетін болса, мысалы, параметрлермен – нүктесінде, онда дроссельденген сығылған будың адиабаталық қысымына дейін ұлғаю процесіндегі будың әрбір килограмы шамасына тең жұмыс атқарады.

Дроссельдену кезінде бу күйі біршама өзгереді, мысалы, қатты қызған бу құрғақ қаныққан бу күйіне , содан соң ылғал күйіне, әрі қарай құрғақ қаныққан және қайтадан қатты қызған күйге өтуі мүмкін .



сурет 18

§6.10 Газ қоспасын сипаттайтын шамалар

Техникада қасиеті идеал газға жақын қазандық қондырғылары, іштен жану двигательдері, реактивтік двигательдерден шығатын газ қоспалары жиі қарастырылады. Ауа азот, оттегі, көмірқышқыл газы, су буы мен бір атомды газдардан тұратын газ қоспасы болып саналады. Сондықтан практикалық есептерді шешу үшін газ қоспасының негізгі параметрлерін газ тұрақтысын, орташа молекулалық массасын, парциалдық қысымдарын анықтай білу қажет.

Газ қоспасы деп – өзара ешқандай химиялық реакцияға түспейтін жеке газдардың қоспасын атайды. Идеал газдың қоспасы Дальтон заңына бағынады. Дальтон заңының тұжырымдалуы: газ қоспасының жалпы қысымы, қоспаны құрайтын жеке газдардың парциалдық қысымдарының қосындысына тең:

мұндағы -парциалдық қысымдар. Газ қоспасы массалық, көлемдік және молярлық үлеспен берілуі мүмкін. Массалық үлес деп, әрбір жеке газ массасының қоспаның жалпы массасына қатынасын атайды:

мұндағы - массалық үлес. -жеке газ массалары,- қоспаның массасы:

Массалық үлес қосындысы бірге тең:

Көлемдік үлес деп, жеке газдардың парциалдық көлемдерінің газ қоспасының жалпы көлеміне қатынасын атайды:

мұндағы -көлемдік үлес. Әрбір газдың жеке парциалдық көлемін Бойль-Мариотт заңы бойынша анықтауға болады:

Әрбір жеке газдардың парциалдық көлемдерінің қосындысы қоспа көлеміне тең (Амага заңы)

Көлемдік үлес қосындысы 1-ге тең:

Қоспа молярлық үлеспен берілетін болса, онда біріншіден қоспадағы әрбір компоненттің мольдік сандары келесі қатынаспен анықталады:

мұндағы - әрбір компоненттің моль саны; - қоспаның жеке компоненттеріне сәйкес молекулалық салмақ. Жоғарыдағы қатынасты келесі түрде жазуға болады:

Авогадро заңынан бірдей қысым мен температураларда

Массалық үлес пен көлемдік үлес арасындағы байланысты қалай орнатуға болатындығын қарастыралық. Авогадро мен Менделеев-Клапейрон теңдеулері негізінде меншікіті көлем, тығыздық, молекулалық масса мен кез келген газ тұрақтысы арасындағы тәуелділік төмендегідей түрде орнатылған:

(6.125)

мұндағы -әрбір жеке газдар тығыздығы, -газ қоспасының тығыздығы, -әрбір жеке газдардың молекулалық массасы, -газ қоспасының молекулалық массасы. Немесе былай жазуға болады

Соңғы екі теңдеу массалық және көлемдік үлесті байланыстыратын бірнеше теңдеу алуға мүмкіндік береді:

(6.125а)

(6.125б)

Газдар қоспасының газ тұрақтысын анықтауды қарастыралық. Газдар қоспасы күй теңдеуіне бағынады.

және

(6.125б) теңдеуінен

және

осыдан

(6.126)

Газдар қоспасының газ тұрақтысы келесі түрде анықталады:

(6.127)

Қоспаның газ тұрақтысын қоспаның орташа молекулалық массасы бойынша анықтауға болады:

(6.128)

Егер қоспаның көлемдік құрамы берілсе, онда (6.125) теңдеуінен

Олай болса толығымен қоспаның газ тұрақтысы төмендегідей анықталады:

(6.129)

Газдар қоспасының орташа молекулалық массасын анықтау төменде келтірілген. Егер қоспаның газ тұрақтысы белгілі болса, онда молекулалық масса былай анықталады:

(6.130)

және

Егр қоспа массалық үлеспен берілсе, Клапейрон теңдеуінен орташа молекулалық масса үшін өрнекті аламыз:

(6.131)

Егер қоспа көлемдік үлеспен берілсе, онда (6.129) теңдеуінен

болғандықтан, газдар қоспасының орташа молекулалық массасы келесі түрде анықталады:

(6.132)

Егер газдың негізгі параметрлері белгілі болса, Клапейрон теңдеуінен массалық үлес арқылы парциалдық қысым анықталады:

(6.133)

Қоспа көлемдік үлеспен берілсе әрбір жеке газдың парциалдық қысымын анықтау үшін Бойль-Мариотт заңын қолдануға болады:

және (6.134)

(6.134) теңдеу жылулық қондырғыларды сынақтан өткізу үшін техникалық есептеулерде қолданылады. Газдардың көлемдік үлестері арнайы аппараттар-газанализаторларымен анықталады.

§6.11 Газдардың араласуы

Газдар қоспасының түзілуі қарастырылады. Газдар қоспасының түзілуі немесе араласу әдістері үш топқа бөлінеді: 1) тұрақты көлемде газдардың араласуы; 2) газ ағындарының араласуы; 3) резервуарды толтыру барысында газдардың араласуы.

Газдардың араласуының бірінші әдісі қысымдары және температуралары әртүрлі газдар көлемдерін алып тұрады (6.18-сурет). Бөліп тұрған аралық тосқауылдарды алып тастағаннан кейін, араласқан газ қоспасының көлемі

Қоспаны құрайтын газдардың массасы

Газдардың араласуы барысында сыртқы жұмыс атқарылмайтындықтан, газ қоспасының ішкі энергиясы термодинамиканың бірінші заңы бойынша араласуға дейінгі жеке газдардың ішкі энергияларының қосындысына тең:

болғанда

осыдан

және

немесе

мұндағы - қоспаны құрайтын идеал газдардың массалық үлесі. Идеал газдардың күй теңдеуінен:

Әрбір жеке газ массаларын қоспа температурасын анықтайтын теңдеуге қойғаннан кейінгі температура келесі түрде анықталады:

Тұрақты жылусыйымдылықты идеал газ үшін

Бірдей атомды газдар қоспасы үшін

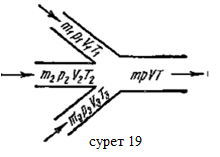
(6.135)

Бірдей атомды газдар қоспасының қысымын анықтау үшін (6.135) теңдеуге келесі мәндер қойылады:

(6.136)

(6.136a)

Температура, көлем мен қысымды біле отырып, газдар қоспасының параметрлері мен басқа шамаларын анықтауға болады.



Газ ағындарының араласуын қарастыралық. Газдардың араласуы бірнеше ағындардың бір каналда бірігуі нәтижесінде жүзеге асады. Мысалға, бірнеше қазандықтардан шығатын газдардың түтін трубасында бірігуін атайды. Бірінші трубадан массалы газ параметрлерімен, екінші, үшінші трубалардан да сәйкесінше белгілі параметрлермен газдар түсетіндігі көрсетілген (сурет 19).

Адиабаталық процессте газдар ағыны сыртқы күштің орындалуынсыз, термодинамиканың бірінші заңы негізінде газ ағынының толық энергиясы төмендегідей жазылады:

Техникалық есептер үшін ағынның кинетикалық энергиясын ескермей, келесі түрде жазуға болады:

немесе

мұндағы - массалық үлес. Газ энтальпиясын арқылы өрнектеп, келесі түрде жазамыз:

- мәні төмендегі теңдеумен анықталады.

(6.137)

немесе

(6.138)

(6.1.32) теңдеу тұрақты жылусыйымдылықты идеал газдар үшін орындалады. Идеал газдар қоспасының көлемі күй теңдеуінен анықталады:

(6.139)

**Бақылау сұрақтары**

1. Газ ағысының энергия теңдеуі. Итеру жұмысы дегеніміз не?

2. Орныққан жұмыс және диаграммада қалай бейнеленеді?

3. Қандай каналдар сопло деп аталады?

4. Қандай каналдар диффузор деп аталады?

5. Дыбыс жылдамдығына дейінгі және асқын дыбыс жылдамдығында газдың соплолық немесе диффузорлық ағысын қамтамасыз ету үшін канал қандай формаға ие болуы керек?

6. Қысымның критикалық қатынасы және критикалық жылдамдық дегеніміз не?

7. Комбинирлі Лаваль соплосы дегеніміз не және ол не үшін қолданылады?

8. диаграммасы бойынша газ ағысының нақты процесі қалай есептелінеді?

9. Сұйық немесе газдың адиабаталық дроссельденуі деген не?

10.Дроссельдеу процесінің теңдеуі қайдан шығады және ол нені анықтайды?

11.Дроссельдік эффект деген не және ол практикада қандай мақсатта қолданылады?

12. Газ қоспасын жасаудың қандай әдістері бар?

13. Газ қоспасы қандай формуламен есептелінеді?

Есептердің шығарылуы

6.1 Газ турбинасындағы құрамдастырылған (комбинированный) соплосының минимальды және шығу ағысының ауданың анықтаңыз: соплоның шыға берісіндегі газдың қысымы Па; соплоға кіре берісіндегі газдың температурасы ; соплоға кіре берісіндегі газдың қысымы Па. Газдың массалық шығыны кг/с. кезіндегі ағысты адиабаталы деп санауға болады. Каналдағы үйкеліс пен кіре беріс жылдамдығы ескерілмейді.

*Шығарылуы.* Соплоның критикалық ағыстағы газдың жылдамдығы мынаған тең

654,7 м/с.

Соплоның (минимальды) критикалық ағысының ауданы мына формуламен анықталады.

мұндағы

= = 0,66 м3/кг;

= = 0,414 м3/кг.

Соплоның критикалық ағысының диаметрі

= = 27,8 мм.

Соплоның тарылған бөлігінің ұзындығын критикалық ағысының диаметрімен тең деп аламыз ягни, мм. Соплоның шыға берісіндегі ағысының газ жылдамдығы:

м/с.

Соплоның шыға берісіндегі ағыстың ауданы:

мұндағы

= =1,97 м3/кг.

Соплоның шыға берісіндегі ағыстың диаметрі:

= = 36,9 мм.

Соплоның кеңейген бөлігінің ұзындығы мына теңдікпен анықталады.

Егер саптаманың Ω конустық бұрышын 10 0 тең деп алсақ, онда

6.2 Резервуарда орналасқан тарылған сопло арқылы және тең тұрақты қысым мен температурада оттегі ағады. Газ ағатын ортаның қысымы тең.

Егер шыға берістегі ағыстың ауданы болса, оттегі шығыны мен ағып шығу жылдамдығын анықтаңыз. а) техникалық жүйесімен б) СИ халықаралық өлшеу жүйесін қолдану арқылы есепті жүргіземіз. Газ теңдігіне бағынады, жылусыйымдылық температурадан тәуелді емес. Ағымдағы газ күйінің өзгеру процессі- изоэнтропиялық.

*Шығарылуы:*

а) Алдымен газдың ағыс режимін және шыға берістегі ағыста дыбысқа дейінгі немесе дыбысты жылдамдық болатындығын анықтап алуымыз қажет.

Ол үшін қысымға қатысты мен қысымға критикалық қатысты салыстырамыз. Оттегі үшін және . Осыдан шығады:

Осылайша, соплоның шыға берісіндегі жылдамдық дыбысқа дейінгі екендігін, ал шыға берістегі ағыстың қысымы p2 ортаның қысымына тең екенін анықтаймыз.

Ағыс жылдамдығын анықтаймыз.

= =304 м/сек.

Газдың секундтық салмақтық шығыны.

= 20·10-6

=0,256 кг/сек.

мұндағы

б) СИ жүйесін қолдану кезінде ағыс жылдамдығын есептеу мына түрде орындалады.

мұндағы

Сондықтан,

Массалық шығын есебін өзге тәсілмен аламыз. Шыға берістегі ағыстың меншікті көлемін анықтаймыз.

Массалық шығынды үздіксіздік теңдеуінен табамыз.

6.3 Қысымы және температурасы кезінде, бастапқы жылдамдығы тең ауа, тарылған сопло арқылы ортаға қысыммен ағады. Шыға беріс ағыстың ауданы Ауаның ағып шығу жылдамдығын анықтаңыз.

*Шығарылуы:*

Біздің жағдайда ағыс режимі критикалық күйде, сондықтан шығын және жылдамдық үшін келесіде түрге ие:

.

Адиабаталық тежелудегі энтальпия изоэнтроптық ағыс кезінде энергия ағыны теңдігімен анықталады:

,

мұндағы . Сандық мәндерін орнына қойған кезде, мынаны аламыз:

,

мұндағы ( температура бойынша сәйкес энтальпиясын табамыз), анықтаймыз:

екендігін анықтау ғана қалды.

мұндағы келесідей формулалардан табамыз:

Критикалық температура төмендегі қатынастан анықталады.

осыдан

**Бақылау есептері**

6.4 Егер соплоға кіре берістегі ауаның қысымы соплоға кіре берістегі температура болса, Лаваль соплосының ағысының сипаттамалық өлшемдерін анықтау қажет. Сыртқы қысымы . Ауаның шығыны Егер соплоға кіре берісіндегі ауа температурасы  тең болса, онда шығын мен жылдамдық қалай өзгереді? Шығын сол қалпы қалу үшін соплоны қалай өзгертуге болады?

*Жауабы:* кезінде жылдамдық ұлғаяды, ал шығын 5850 кг/сағ дейін төмендейді. Оны сол қалпы сақталу үшін ағысты дейін көтеру қажет.

6.5 Қозғалтқыштардың цилиндрлерін суыту үшін, шыға беріс ағысының жалпы ауданы болатын тарылған соплодан ағатын ауа ағынымен, ауа үрлегіш арқылы салқындатылады. Сопло алдындағы ауаның параметрлері Ортаның қысымы . Қажетті ауа шығынын қамтамасыз ететін, ауа үрлегіштің теориялық қуатын анықтау қажет. *Жауабы:*

6.6 Соплоға кіре берістегі газдың параметрлері екендігі белгілі болса, көміртегі тотығының секундтық массалық шығыны мен тарылған соплодан аққан ағып шығу жылдамдығын анықтау қажет. Газ ағатын ортаның қысымы . Соплоның шыға берісіндегі ағыстың ауданы . Жылдамдық коэффициенті Шыға берістегі ағыстың дыбыс жылдамдығын есептеңіз. Есепті энальпияның температурадан тәуелділігін ескере отырып, газдардың термодинамикалық қасиеттері берілген таблица көмегімен шығарады. *Жауабы:*

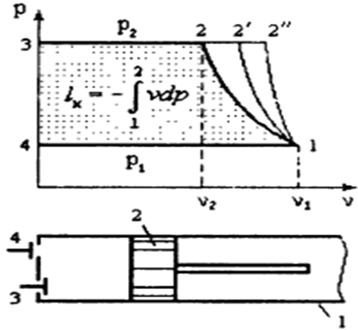
6.7 Массаның шығын кезінде бастапқы жылдамдығы тең көмірқышқыл газы ағатын, тарыла түскен саптама саңылауының ауданын анықтаңыз. Кіре берістегі газдың параметрелері: . Газ ағатын ортаның қысымы . *Жауабы:*

6.8 Кіре берістегі қысымы температурасы тең азот ағатын, тарылған соплоның шыға берісіндегі ағыс ауданың анықтаңыз. Шыға берістегі ағыстың сыртындағы қысым Соплоның жылдамдық коэффициенті Газ соплоға жылдамдықпен жетеді. Шығын  *Жауабы:*

VII ТАРАУ. КОМПРЕССОРЛЫҚ МАШИНА, ІШТЕН ЖАНУ ПОРШЕНЬДІК ДВИГАТЕЛЬ ЦИКЛДАРЫ.

КОМПРЕССОРЛЫҚ МАШИНА ЦИКЛЫ

Компрессор деп – газ, бу немесе ауаны ығыстыруға арналған машиналарды атайды. Техникада газтурбиналық және поршеньдік двигательдерде негізгі агрегат ретінде кеңінен қолданылады. Газды сығу әдісі мен конструкциялық құрылымына қарай : 1) көлемдік компрессорлар (поршеньдік, ротациялық және т.б.); 2) центрден тепкіш (турбиналы). Конструкциясы әртүрлі болса да, процесс термодинамикасы бірдей. Газды сығуға арналған машинада жүретін процесстерді талдау үшін поршеньдік компрессорды қарастырайық. 1-суретте компрессор 1-цилиндрден, 2-поршень, 3-сору клапаны, 4-айдау клапандарынан тұрады. Поршеньді оңға жылжытқанда сорғыш клапан арқылы газ цилиндрге түседі. Қайтадан кері қозғалысында клапан жабылады және белгілі қысымға дейін газ сығылады, осы кезде сығымдағыш клапаны ашылып, газды резервуарға иетеріп шығарады. Цилиндрдегі сығылған газ түгелімен, ешқандай қалдықсыз поршеньмен итерілсе, онда компрессор идеал, клапандарда энергия шығыны болмайды.



сурет 1

Идеал поршеньдік цилиндрдің теориялық индикаторлық диаграммасын қарасақ, 4-1 сору сызығы; 1-2 изотерма бойынша сығылу процесі; 1- адиабата бойынша сығылу процесі; 1- политроптық сығылу процесі; 2-3 ығыстыру сызығы; 3-4 циклды тұйықтайтын шартты сызық. 4-1 мен 2-3 термодинамикалық процессті бейнелемейді, өйткені жұмысшы дене күйі өзгермейді, тек оның мөлшері өзгереді. Компрессордың термодинамикалық есептері – газды сығуда атқарылған жұмысты, двигатель қуатын анықтау үшін жүргізіледі.

1 кг сығылған газ алу үшін барлық процесс қайтымды және Ек -кинетикалы– энергия өзгермейді десек атқарылатын жұмыс мынаған тең:

-сору жұмысы (цилиндрді толтыру үшін сыртқы ортамен); - ығыстыру жұмысы:

- газды сығуда атқарылатын жұмыс:

болғандықтан,

компрессор жұмысы газды сығуға жұмсалатындықтан, таңбасы теріс. Бұл жұмыс компрессордың техникалық жұмысы деп аталады. компрессор жұмысы -диаграммада ауданымен анықталады, яғни изотермиялық сығылу жұмысы. Изотермиялық сығылу кезінде идеал компрессор приводында атқарылған жұмыс мына формуламен анықталады:

(7.1)

адиабаталық сығылу жұмысы

(7.2)

Бұл жұмыс ауданына тең.

Политроптық процесс үшін идеал компрессордың приводында атқарылатын жұмыс

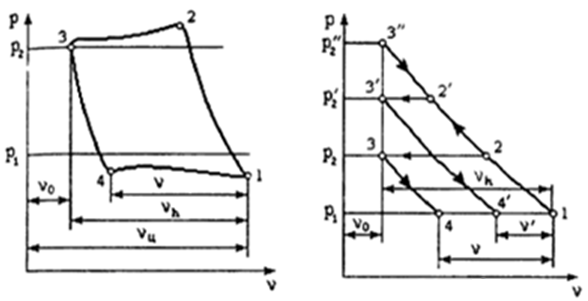
(7.3)

Политроптық сығылу процесінде компрессор приводында атқарылатын жұмыс ауданы . Сонымен изотерма бойынша сығылу аз ауданды береді, яғни жұмыс шығыны аз. Адиабаталық процессте жұмыс шығыны көп болады.

§7.1 Бір сатылы**компрессорлық машиналар циклы**

AN=10-11

Бір сатылы компрессордың нақты индикаторлық диаграммасы 2-суретте көрсетілген. Бұл диаграммада 4-1 сору процессі; 1-2 сығу; 2-3 ығыстыру; 3-4 зиянды кеңістікте қалған газдың ұлғаю процесін сипаттайды. Зиянды кеңістік (V0) дегеніміз – цилиндр қақпағы мен поршень арасындағы -еркін кеңістікті атаймыз. Оның көлемі -цилиндрдің жалпы көлемінің 4-10% құрайды. Газды қысып сыққаннан кейінгі зиянды кеңістікте қалған газдың қысымы -тең. Поршеньді кері жылжытқанда зиянды кеңістікте қалған газ ұлғая бастайды. Жаңа газ бөлігін сору цилиндрдегі ұлғайып жатырған газ қысымы атмосфера қысымнан аз болғанда басталады. Сору тек 4 нүктесінде басталып, цилиндрге газдың жаңа бөлігі енеді. - цинидрдің жұмысшы көлемі.



сурет 2 сурет 3

Зиянды кеңістік сорылатын газ мөлшерін азайтады, олай болса компрессор өнімділігі төмендейді. Цилиндрдің жұмысшы көлемін қолдану дәрежесі компрессордың көлемдік ПӘК-тімен бағаланады:

Зиянды кеңістік көлемі көп болса, көлемдік ПӘК азаяды. Көлемдік ПӘК сығылу қысымының артуымен төмендейді.3 суреттегі диаграммада 1 сатылы компрессорде Р2, Р2´, Р2´´- әр түрлі үш қысым үшін газдың сығылуы көрсетілген.

1-2 – адиабаталық процесс Р2 –ға дейін сығылуы;

2-3 - Р2 қысымында газды резервуарға ығыстыру сызығы;

3-4 - зиянды кеңістікте қалған газдың адиабаталық ұлғаю процессі;

4-1 – газды сору сызығы.

Бұл жағдайда цилиндрге түсетін газ көлемі V –ға тең.

Егер сығылу қысымын Р2´ - дейін көтеретін болсақ, онда мынадай процесстерге ие боламыз:

1-2´- сығылу процессі;

2´-3´- резервуардағы газды ығыстыру;

3´-4´- зиянды кеңістіктегі қалған газдың ұлғаюы;

4´-1 – компрессордың цилиндріне газдың жаңа бөлігін сору сызығы.

Осыдан байқайтынымыз, газды сығу қысымы артатын болса, цилиндрге түсетін газ көлемі азаяды. Үлкен қысыммен цилиндрде қалған газ, ұлғаю кезінде үлкен көлемді алып, цилиндрдің жұмысшы көлемін азайтады. 1-3´ - сығу сызығы зиянды аймақтың 3-3´ сызығымен түйіссе, компрессор газдың бір ғана бөлігін сығып, ұлғайтады, өйткені сору процессі жоқ. Зиянды кеңістіктегі Р2´´- қысымды газ ұлғаю процессінде цилиндрдің барлық көлемін алып, жаңа бөлігін сору болмайды. Көлемдік ПӘК нөлге тең, сонымен қатар компрессор өнімділігі де нөлге тең болады.

Қысымның ұлғаюымен сығылған газдың температурасы өседі, сонымен қоса зиянды кеңістіктегі газдың да температурасы және цилиндр қабырғасының температурасы артады. Газдың жаңа бөлігін сорғанда, осы газ цилиндрдің қабырғасы тарапынан және зиянды кеңістігі газбен араласу нәтижесінде қызады. Сорылған газдың қызуы газдың меншікті көлемін ұлғайтады, ал ол дегеніміз цилиндрге түсетін газдың массасын азайтады. Массаның азаюы – қатынасымен бағаланады, мұндағы - сорылатын газ температурасы, - сору нәижесінде цилиндрде қыздырылған газ температурасы. Компрессордың өнімділігін төмендететін газдың қызуы мен зиянды кеңістік әсері толтыру коэффициентімен бағаланады.

Бір сатылы компрессорларда қысымның көтерілу дәрежесі 10-12 –ден аспайды. Жоғары қысымды газ алу үшін 1- сатылы компрессорды қолдану тиімсіз. Себебі, аталып өткен қысымның өсуімен көлемдік ПӘК-тің кемуі және т.б. Жоғары қысымды газ алу үшін 2,3,4 .... көп сатылы цилиндрде сығу қолданылады.

§7.2 Компрессор білігінің қуаты мен пайдалы әсер коэффициенті

Энергетикада ПӘК деп - пайдалы қолданылған энергияның барлық жұмсалынған энергияға қатынасын атайды. Барлық жұмсалынған энергия мөлшерінен пайдалы қолданылған энергия проценті қаншалықты көп болса, соншалықты ПӘК жоғары. Компрессор үшін ПӘК мұндай анықтамасы лайықсыз. Сондықтан нақты компрессорлық машинаның жұмысын бағалау үшін оны идеал компрессормен салыстырамыз. Ол үшін суытқыш компрессор үшін изотермиялық ПӘК енгізіледі

-изотермиялық сығылудағы идеал компрессор приводындағы жұмыс; -нақты суытқыш компрессор приводындағы нақты жұмыс; -приводты двигательдер қуаты; -компрессордың массалық өнімділігі.

*-*газ шығыны болғанда атқарылған жұмыс:

Осыдан приводты двигатель қуаты

Изотермиялық сығылу процесінде компрессор приводы үшін двигатель қуаты төмендегі формуламен анықталады:

Нақты компрессорда сығылу политроптық процесс боынша жүреді. Политроптық процессте үйкелістегі шығынды, зиянды кеңістік әсерін, газдың қызып кетуінен сору мөлшерінің төмендеуін ескере отырып, эффективті қуатты анықтайтын формуланы аламыз:

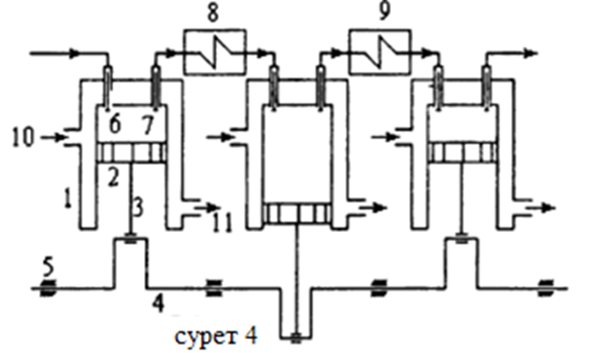
-политроп сығылу процесінде компрессор приводындағы жұмыс;

-политроп сығылу процесінде компрессор ПӘК;

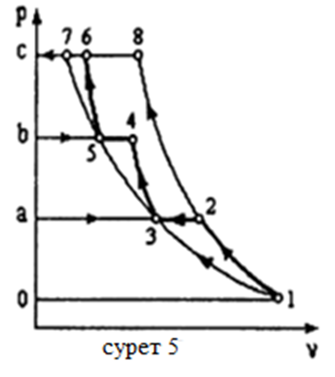
- үйкелістегі шығынды ескеретін механикалық ПӘК.

§7.3 Көп сатылы компрессор

Жоғары қысымды газ, ауа алу үшін көп сатылы компрессорлар қолданылады. Көп сатылы компрессор деп – тізбектей жалғанған бірнеше бір сатылы компрессорлардың жиынтығы. Сатылар арасында алдыңғы сатыда сығылған газды салқындатуға арналған жылуалмастырғыштар орналасады. Төмендегі суретте үш сатыдан тұратын компрессор сұлбасы келтірілген:



Сурет 4. 1- цилиндр, 2- поршень, 3- шатун, 4-иінді білік, 5- мойынтірек (подшипник), 6- сорғыш клапан, 7-айдау клапаны, 8,9- аралық салқындатқыш, 10,11- суытқыш суды енгізу, шығару. 1-ші сатының 6 клапаны арқылы газ сорылады, 7- сығылады. Содан соң 8- салқындатқыш арқылы компрессордың 2-ші сатысына түседі. 2-ші сатыдағы газды сығу қысымы 1-ші сатыдағы қысыммен бірдей. 3-сатыда газды сору 9-шы аралық салқындатқыштан өткеннен кейін жүреді. 3-ші сатының айдау клапаны арқылы газ резервуарға ығыстырылады. Үш сатылы компрессорда газдың сығылу процесі төмендегі - диаграммада көрсетіледі.



(0-1)- компрессордың 1-ші сатысында газды сору сызығы;

(1-2)- 1-ші сатыда политропты сығу;

(2-а)-8 аралық салқындатқышта газды ығыстыру сызығы;

(а-3)- компрессордың 2-ші сатысында газды сору сызығы.

(3-4)- 2-ші сатыда политропты сығу;

(4-в)-9 аралық салықндатқышта газды ығыстыру сызығы;

(в-5)- компрессордың 3-ші сатысында газды сору;

(5-6)- 3-ші сатыда политропты сығу процессі;

(6-с)- резервуарға газды ығыстыру сызығы.

2-3, 4-5 – сызықтары 8-9- салқындатқыштарында суыту салдарынан газ көлемінің кішірейтіндігін көрсетеді.

Газдың температурасы 1-ші сатыдағы газдың температурасына дейін теңескенше суытылады. Сондықтан 1,3,5- нүктесіндегі бірдей және осы нүктелер арқылы 1-7 изотермасын жүргізуге болады.Әрбір саты үшін қысымдар қатынасы бірдей, x- шамасына тең.

Бастапқы температуралар мен политроп көрсеткіші тең болғанда, соңғы температуралар да тең болады, яғни

Осыдан

, болғандықтан

компрессордың z- сатыларындағы х мөлшері үшін мынада формуланы аламыз:

Әрбір саты үшін сығылу жұмысы бір біріне тең.

;

;

§7.4 **Іштен жану поршеньдік двигательдерінің циклдары**

AN=11-12-14

*Іштен жану двигателі дегеніміз* – двигатель ішінде жанармайды жағу арқылы дененің жылу алуын іске асыратын жылу машинасы. Бұндай двигательдерде жұмысшы дене ретінде бірінші этапта - ауа немесе жанармаймен оңай жанатын ауа қоспасы, екінші этапта - сұйық немесе газтәрізді жанармай жану өнімдері (бензин, керасин, соляркалы май және т.б.).

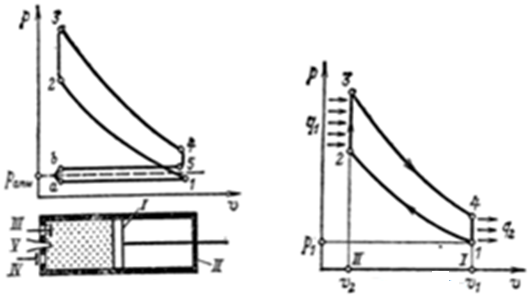
Іштен жану двигателі басқа жылу двигательдері типімен салыстырғанда екі ерекшелікке ие: біріншіден, іштен жану двигателінде жылудың ыстық көзі двигательдің ішінде орналасады, яғни ыстық жылу көзінен жұмысшы денесіне жылу жеткізетін үлкен жылуалмастырғыш беттердің қажеті жоқ. Екінші ерекшелігі мынада. Іштен жану двигательдерінде жұмсшы денесінің өз көлемі ішінде жылудың бөлінуі есебінен жылу алатын үзіліссіз өзгеріп тұратын жұмысшы денесінің температурасының өсуіне шек қойылмайды.

*Іштен жану двигателін жасау идеясын ұсынған Сади Карно.* Оның «Размышления о движущей силе огня» еңбегінде ұсынған идеясы толығымен жүзеге асты. 1860 жылы Француз Ленуар газбен жұмыс істейтін іштен жану двигателін жасады, бірақ ооның ПӘК төмендігінен көп қолданысқа ие болған жоқ. 1876 жылы Карноның іштен жану двигателін жасау принципін неміс инженері Отто бензиндік двигатель негізінде іске асырды. 1897 жылы неміс инженері керосинмен жұмыс істейтін жоғары сыққышты двигатель жасады. 1904 жылы орыс инженері Тринклер жанармай араласып жанатын компрессорсыз двигатель құрастырды. Яғни бірінші тұрақты көлемде, сосын тұрақты қысымда. Мұндай двигатель қазіргі кезде кеңінен қолданылады.

Қазіргі замандағы барлық іштен жану двигательдері үш топқа бөлінеді: *Отто циклы* – болғанда жану; *Дизель циклы* – болғанда жану; *Тринклер циклы* - алғашқыда жану, одан кейін жану.

§7.5 **Тұрақты көлемде жылу алатын іштен жану двигатель циклы**

Отто циклы бойынша жұмыс істейтін двигатель схемасы және оның индикаторлық диаграммасы *6-суретте* көрсетілген.



сурет 6 сурет 7

I поршень II цилиндре қайтымды-түсімді қозғалыс жасайды. III сорғыш клапан, IV итеріп шығару клапаны. *а-1* процесінде поршень солдан оңға қарай жылжиды, III клапан ашылып, цилиндрге ыстық қоспа кіреді. Ол қоспа арнайы қондырғыда – карбюраторда дайындалады. Отто циклындағы ыстық қоспа белгілі бір мөлшерде *бензин буымен араласқан ауа*. Поршень оң жақ шетке жеткенде цилиндрі ыстық қоспамен толтыру бітеді де сорғыш клапан жабылады, поршень кері оңнан солға қарай жылжиды. Осы кезде цилиндрдегі ыстық қоспа сығылады және оның қысымы артады *(1-2 процесс).* Цилиндрдегі қоспа қысымы белгілі мәнге жеткенде (индикаторлық диаграммадағы 2-нүкте) электрлік свеча V көмегімен ыстық қоспаны жағу жүреді. Қоспаның жану процесі өте жылдам өтеді де поршень қозғалып үлгермейді. Сондықтан жану процесін изохоралық деп есептеуге болады. Жану процесінде жылу бөлінеді, осы жылу есебінен цилиндрдегі жұмысшы дене жылынады және оның қысымы индикаторлық диаграммадағы *3*-нүктесіне сай қысым мәніне дейін артады. Осы қысым әсерінен поршень қайтадан оңға жылжиды, бұл кезде сыртқы тұтынымға берілетін ұлғаю жұмысын атқарады. Поршень оң жақтағы соңғы нүктеге жеткенде IV итеріп шығару клапаны ашылады және цилиндрдегі қысым атмосфералықтан кішкене үлкен қысымға төмендейді (*4-5* процесс); осы кезде газдың бір бөлігі цилиндрден шығады. Содан соң поршень қайтадан солға жылжып, цилиндрден жұмыс атқарған газдың қалған бөлігін атмосфераға шығарады.

Осыдан кейін жаңа цикл басталады – ыстық қоспаның келесі бөлігін сору. Осылайша Отто циклы бойынша жұмыс істейтін двигатель цилиндріндегі поршень бір цикл ішінде төрт жүріс атқарады: *сору, сығу, қоспа жанғаннан кейін ұлғаю, жану өнімдерін атмосфераға шығару.* Отто циклының термодинамикалық талдауы *7-суреттегі* диаграммасында жұмысшы дененің бірлік массасы үшін көрсетілген.

Іштен жану двигателінің нақты циклі – ажыратылған цикл, жұмысшы дене сырттан сорылады және цикл аяқталғанда атмосфераға шығарылады; осылайша әрбір циклда дененің жаңа бөлігі қатысады. Цилиндр двигателіне (ауа+жанармай) берілетін ыстық қоспада жанармай мөлшері ауа мөлшерімен салыстырғанда аз болғандықтан, талдауға ыңғайлы болу үшін іштен жану двигателі циклы тұйықталған, жұмысшы дене ретінде двигательдегі мөлшері өзгеріссіз қалатын -ауа, ал денеге келетін жылу мөлшері изохоралық процессте цилиндр қабырғасы арқылы және изохоралық процессте денеден суытқышқа кететін жылу мөлшері сыртқы ыстық көзінен жүзеге асады деп санаймыз.

(1-2) сығу және (3-4) ұлғаю процесстері бұл циклда өте аз уақыт аралығында өтеді. Осы уақыт аралығында қоршаған ортамен жылуалмасып үлгермейді. Сондықтан осы процессті адиабаталы деп санауға болады. Отто циклына термодинамикалы эквивалентті тұйықталған цикл екі адиабатадан (1-2 сығылу адиабатасы және 3-4 ұлғайту адиабатасы) және екі изохорадан (2-3 жылудың келуі және 4-1 жылудың шығу изохорасы) тұрады. Бір цикл үшін двигательдің атқаратын жұмысы 2-3-4-1-2 ауданымен бейнеленеді. Отто циклының термиялық ПӘК-тін анықтаймыз. 2-3 изохоралық процессте денеге келетін жылу мөлшері (7.4) теңдеумен анықталады:

(7.4)

4-1 изохоралық процессте денеден шығатын жылу мөлшері:

Отто циклының термиялық ПӘК төмендегі теңдеумен анықталады:

Циклдың барлық сипаттық нүктелеріндегі жұмысшы дене параметрлерін анықтаймыз. Циклдың сипттары ретінде -сығылу дәрежесі; - қысымның жоғарылау дәрежесі;

*2-нүктеде*

*3-нүктеде*

*4-нүктеде*

Осыдан

Температураның табылған мәндерін термиялық ПӘК теңдеуіне қойып, аламыз

(7.5)

Отто циклының термиялық ПӘК-ті *1-2* адиабаталық процессте дененің сығу дәрежесінен және немесе жұмысшы дене табиғатынан тәуелді. және артатын болса, ПӘК-те жоғары. ПӘК қысымның жоғарылау дәрежесінен тәуелсіз. сығылу дәрежесінің өсуі жанармайдың алдын ала жанып кетуіне әкеледі, ол двигатель жұмысын бұзады. Сығылу дәрежесі көп болса, жану жылдамдығы артады, ол детонация яғни қопарылысты жану тудырады. Нәтижесінде двигатель үнемділігі төмендейді, детальдарын істен шығаруы мүмкін. Сондықтан әрбір жанармай үшін оптималды сығылу дәрежесі қолданылады. Жанармай қасиетіне байланысты сығылу дәрежесі осы двигательде аралығында өзгереді. Сонымен тұрақты көлемде жағуда жоғарғы сығылу дәрежесін қолдануға болмайды, сәйкесінше ПӘК салыстырмалы төменгі ПӘК-не ие болады. Сығылу дәрежесі октандық санмен сипатталатын антидетонациялық қасиетінің жақсаруымен жоғарылап отырады, ол жанармай сапасынан тәуелді. Циклдың жұмысы

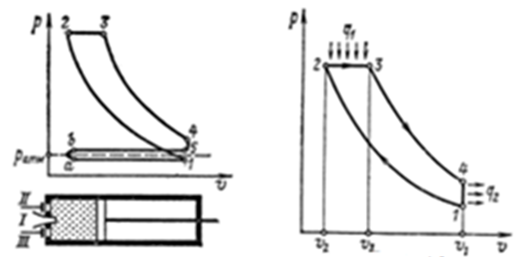


сурет 8

Тұрақты көлемде жанатын цикл карбюраторлық типті двигательдерде қолданылады. Отто циклындағы денеге келетін жылу, диаграммада (*8-сурет*) ауданымен, денеден шығатын жылу ауданымен, ал цикл жұмысы ауданымен бейнеленеді. Отто циклы бойынша жұмыс істейтін карбюраторлық двигательдер техникада кеңінен қолданған: олар жеңіл және жүк машиналарында, самолеттерде қолданылады.

§7.6 **Тұрақты қысымда жылу алатын іштен жану двигатель циклы**

Дизель циклы бойынша жұмыс істейтін двигатель схемасы және осы двигательдің индикаторлық диаграммасы 9-суретте көрсетілген.



сурет 9 сурет 10

Отто циклымен жұмыс істейтін двигатель ПӘК арттыру үшін жоғары сығылу дәрежесін талап етсе, Дизель циклінде сығылу дәрежесі жоғары. Сығылу дәрежесі жоғары болғанда өте жоғары температураға ие болады да берілген жанармайды өздігінен тұтандырып жібереді. Ал Дизель циклында жанармай мен ауа жеке жеке сығылады, ол температураның жоғарылап жанып кетуін болдырмайды. Сонымен қоса ауа мен жанармайды жеке жеке сығу кез келген, арзан жанармай – мазут, смола, тас көмір және т.б. қолдануға мүмкіндік береді. Ауа цилиндрде сығылады, ал сұйық жанармай компрессордағы сығылған ауамен шашыратылады.

процесінде двигатель цилиндріне таза атмосфералық ауа сорылады; процесінде осы ауаны қысымға дейін адиабаталық сығылу жүзеге асады. Содан соң ауаның ұлғаю процесі және осымен бір мезгілде арнайы форсунка арқылы жанармай шашырайды (керосин, солярка). Сығылған ауаның жоғары температурасының есебінен жанармай тұтанады және ден ке дейін ұлғаюды қамтамасыз ететін тұрақты қысымда жанады. Сондықтан Дизель циклы тұрақты қысымда жанатын цикл деп аталады. Цилиндрге жанармайды кіргізу процесі аяқталысымен (*3*-нүкте), ары қарайғы дененің ұлғаюы *3-4* адиабатасы бойынша жүреді. *4*-нүктесіне сәйкес келетін күйде цилиндрдің выхлопной клапаны ашылып, цилиндрдегі қысым атмосфералыққа дейін төмендейді (изохора бойынша *4-5*) және газ цилиндрден атмосфераға ығыстырылады (*5-b* сызығы). Осылайша Дизель циклы – төртконтактылы деп қарастырылады.

Қарастырып отырған Дизель циклын оған термодинамикалы эквивалентті таза ауамен жүзеге асатын идеалданған тұйық циклымен алмастырайық; бұл циклдың диаграммасы *10-суретте* көрсетілген. Диаграммадан көріп тұрғандай, идеалданған Дизель циклы екі адиабатадан (*1-2* сығылу адиабатасынан және *3-4* ұлғаю адиабатасынан), сыртқы ыстық көзінен жылу алатын *2-3* изобарасы, суыққа кететін жылу жүзеге асатын изохорасынан тұрады. Осы циклдың термиялық ПӘК-ін есептейміз.

Циклдың сипаттамалары:

- сығылу дәрежесі;

-алдын ала ұлғаю дәрежесі.

Жүйеге келген және кеткен жылу формулалары:

береді.

Сипаттағыш нүктелердегі газ параметрлерін анықтаймыз.

*2-нүкте*

*3-нүкте*

*4-нүкте*

болғандықтан

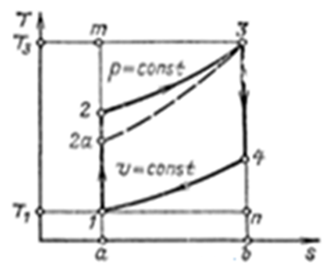
Температура мәндерін ПӘК формуласына қойып табамыз:

(7.6)

және ұлғайған сайын ПӘК артады, ал ұлғайғанда ПӘК кемиді.

Цикл жұмысы төмендегі формуламен анықталады:

Дизель циклы диаграммада 11-суретте көрсетілген.



сурет 11

шамасы ауданымен, ал шамасы ауданымен, ал циклдың жұмысы ауданымен бейнеленген. Іштен жану двигательдерінің Отто және Дизель циклдері бірдей температура мен қысымда, ал сығылу дәрежесі әртүрлі болғанда Дизель циклы ПӘК көп екендігін көрсетеді:

§7.7 Аралас жылу беретін іштен жану двигатель циклдары.

**Тринклер циклы**

AN=15

Тұрақты қысымда жанатын двигательдің бір кемшілігі – жанармайды беру үшін компрессорды қолдануды қажет етеді. Ал компрессордың болғаны конструкциясын күрделендіреді және двигательдің экономикалық тиімділігін төмендетеді, яғни оның жұмысына двигательдің жалпы қуатының кетеді. Двигатель конструкциясын жеңілдету және оның қуатын арттыру мақсатында орыс инженері Тринклер сығылу дәрежесі жоғары компрессорсыз двигатель жасады. Бұл двигательдің жоғарыдағы екеуіне қарағанда кемшілігі жоқ. Негізгі ерекшелігі сұйық жанармай насос көмегімен форсунка арқылы цилиндрдің бас жағына беріледі. Ол жерде бірінші тұрақты көлемде тұтанып, жанады, содан соң тұрақты қысымда. *12-суретте -*координатада аралас жылу келетін двигательдің идеал циклы көрсетілген.

*1-2* адиабаталық процессте жұмысшы дене *2*-нүктесінің параметрлеріне дейін сығылады. *2-3* изохоралық процессте жұмысшы денеге -жылудың бірінші мөлшері келеді, ал *3-4* изобаралық процессте -жылудың екінші мөлшері келеді. *4-5* процесінде дененің адиабаталық ұлғаю процесі жүреді және *5-1* изохорасы бойынша жылуалмастырғышқа -жылу шығаруымен бастапқы қалпына келеді.



Сурет 12

Циклдың сипаты болып табылады:

- сығылу дәрежесі;

-қысымның жоғарылау дәрежесі;

-алдын ала ұлғаю дәрежесі.

-келген және -кеткен жылу төмендегі формулалармен анықталады:

Циклдың термиялық ПӘК

Циклдың сипаттық нүктелеріндегі жұмысшы дене параметрлерін анықтаймыз.

*2-нүкте*

*3-нүкте*

*4-нүкте*

*5-нүкте*

Температураның мәндерін двигатель ПӘК-ті формуласына қойып, аламыз:

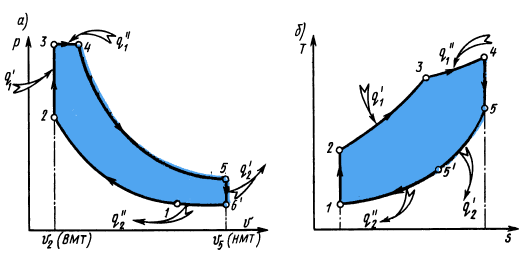
(7.7)

Осыдан ұлғаюымен цикл ПӘК-ті артады, ал артуымен ПӘК кемиді. Егер болғанда тұрақты көлемде жылу келмейді дегенді білдіреді және (7.7) теңдеуі (7.6) формулаға келеді, егер деген тұрақты қысымда жылу келмейді дегенді білдіреді, онда (7.7) теңдеуі (7.5) формулаға келеді. Заманауи двигательдердің көпшілігі Тринклер циклы бойынша жұмыс істейді.

§7.8 Жылулық двигательдердің жиынтық циклі.

Нақты жылулық машиналардағы жылуды жұмысқа айналдыру газодинамикалық және термодинамикалық процесстерімен, физика- химиялық кешендерімен байланысты сондықтан циклді барынша меңгеру қиын және көп бөлігі эксперимент нәтижелеріне негізделген.

Сонымен қайтымды термодинамикалық процесстен тұратын термодинамикалық циклды қарастырамыз, жылулық машиналардың жұмысына белгілі бір дәрежеде мынаны дәріптеп және қабылдауымыз қажет: идеалды термодинамикалық циклда процесстер өзіндік барлық кезеңдерінде жұмысшы дененің тұрақты мөлшерімен өтеді; термодинамикалық циклдың барлық кезеңдерінде жұмысшы дененің химиялық құрамы тұрақты деп алынуына байланысты отынның жануы болмайды. Сонымен қатар жану процесі, кейбір жалған ыстық жылу көзінен жұмысшы денеге жылудың келуімен алмастырылады; жұмыстық дене процессінің ұлғаюы мен сығылуы адиабатты деп алынады; жұмысшы дененің жылусыйымдылығы температурадан тәуелді емес; идалды газ жұмысшы дене болып табылады.



сурет 13. Жылуэнергетикалық машиналардың термодинамикалық жалпыланған циклы: а) диаграммада; б) диаграммада.

13 а,б-суреттерінде және – диаграммалары көрсетілген және бұл цикл жиынтықты деп аталады. Жұмысшы дененің 1-2 сығылуы адиабатты деп алынады. жылу мөлшерінің келуі алдымен 2-3 изохоралық процессте, кейін изобаралық процессте өтеді. Осыдан кейін 4-5 процессінде адиабаталы ұлғаю жүреді, жылу алдымен 5-6 изохоралық процессте, кейін изобаралық процессте суық көзіне беріледі.

Жиынтықты циклды сипаттайтын параметрлер мынаған тең: – сығылу дәрежесі; – қысымның жоғарылау дәрежесі; – алдын ала ұлғаю дәрежесі; – ұлғаю кезіндегі қысымның төмендеу дәрежесі; – алдын ала сығылу дәрежесі.

Сондықтан ыстық жылу көзінен жиынтық циклдегі жылудың меншікті мөлшері және салқын жылу көзінің цикліне берілетін жылудың меншікті мөлшері мына сумма бойынша анықталады: және осыдан,

Олай болса,

(7.8)

(7.9)

Циклдағы алынған және берілген жылулар мөлшері цикл параметрі арқылы есептелінеді. Ол үшін циклдың барлық нүктелерінің температураларын, цикл параметрлеріне сәйкес келетін және циклдің бір нүктесінің температурасы ( мысалы ) арқылы береміз. Сонда 1-2 адиабатты процесс болады, сондықтан , осыдан

. (7.10)

2-3 процессі – изохоралық, байланысты, осыдан немесе (7.10) формуласын ескере отырып

(7.11)

3-4 изобаралық процессте , сондықтан немесе (7.11) ескере отырып,

(7.12)

5-6 жылу алу процессі – изохоралық, сондықтан ,

осыдан

(7.13)

6-1 жылу алу процессі – изобаралық, сондықтан , осыдан

(7.14)

(7.14) формуласын ескере отырып, (7.13) мына түрге келеді:

(7.15)

(7.10), (7.12), (7.14) және (7.15) өзара қатынасын (7.8) (7.9) келесідей түрде жазуға мүмкіндік береді:

(7.16)

. (7.17)

Циклдағы жұмыстық денеден алынған және берілген жылу мөлшері циклдың термиялық ПӘК-ті мен циклдің жұмысын анықтауға мүмкіндік береді. Термиялық ПӘК-ті (7.16) және (7.17) ескере отырып мына формуламен анықталады.

(7.18)

Циклдің меншікті жұмысы айырымдылық бойынша анықталады.

(7.19)

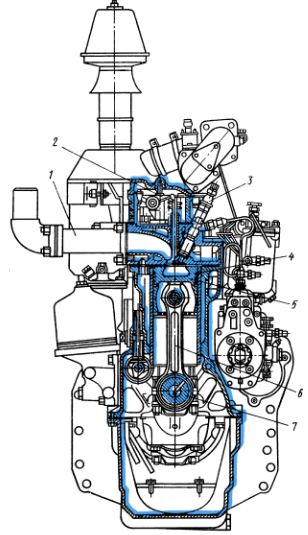
(7.16) және (7.17) теңдіктерін ескеріп және оны түрлендіпе отырып, (7.19) формуласын былай жазуымызға болады.

(7.20)

мұндағы (7.18) теңдігінен анықталады. (7.18) және (7.20) формулалары мен нақты бір цикл үшін анықтауға мүмкіндік береді.

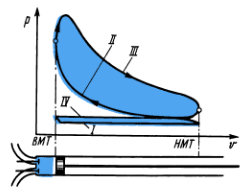
§7.9 Іштен жану поршенді двигательдердің циклі.

Іштен жану двигательдері (ІЖД) тұрақты көлемде жылудың келуімен жұмыс жасайтын мәжбүрлі тұтану двигателі және тұрақты қысымда жылудың келуімен немесе аралас циклда жұмыс жасайтын двигатель болып бөлінеді. Жоғары нүктеден (ВМТ-жоғарғы қозғалмайтын нүкте) поршень 5 қозғалған кезде ашық жіберу клапанымен 2 төмен сору 1 тактісі іске қосылады (сурет 14).



сурет 14

Төменгі нүктеде (НМТ- төменгі қозғалмайтын нүкте) жіберу клапаны 2 жабылады және поршень 5 жоғары қарай орын аусытыра отырып сығылу тактісі деп аталатын тактты II жасайды (сурет 15).



сурет 15. ІШД-нің индикаторлық диаграммасы: I-сору, II-сығу, III-ұлғаю, IV-сыртқа шығару

ВМТ –ға жақындағанда отын тұтанып және жылудың бөлінуінен кейін қысым лезде көтеріледі. Жану процессі болғаннан кейін жұмыстық такт деп аталатын III такт (немесе ұлғаю тактісі) іске асады. НМТ-ға жақындағанда шығару клапаны ашылып, қысым төмендейді және НМТ –дан ВМТ –ға (IV тактісі) поршень қозғалған кезде жұмыс істелген газдар (отработавшие газы) цилиндрді итеріп шығады (пайдаланылған газдың шығу тактісі).

Бұл төрт такт ІЖД-нің нақты циклін құрайды. Бұл циклдың индикаторлы диаграмма деген атауы бар (сурет 15).

Термодинамикалық циклда ІЖД –нің жіберу және шығару (I және IV) тактілері қарастырылмайды. 1-2 газдың сығылу адиабатты деп алынады, ал жылудың берілу процесі алдымен 2-3 изохорада, кейін 3-4 изобарада аралас циклда жүреді. 4-5 ұлғаюы сығылу тәрізді адиабатты деп алынады. Суық жылу көзіне жылудың алынуы ІЖД поршендік сұлбасы 14-суретте көрсетілген. 1-жіберу коллекторы , 2- жіберу клапаны, 3- форсунка, 4-цилиндр, 5-поршень, 6-шатун, 7- иінді білік, 5-1 изобара бойынша жүреді. Қарастырылып отырған циклды жинақтық циклмен салыстырғанда, аралас термодинамикалық циклда көрсетеді.

Бұл жағдайда параметрі өзгеруі мүмкін. Шынында,

болса, онда тең. Осыған байланысты ПӘК мынаған тең:

(7.21)

ІЖД ең маңызды көрсеткіштерінің бірі орташа циклдық қысым болып табылады, бұл цикл жұмысының цилиндр двигателінің меншікті жұмыстық көлеміне қатынасымен анықталады (Сурет 16 а).

(7.22)

(7.22) формуласына (23.20) формуласынан мәнін қоя отырып, түрлендірсек мынаны аламыз:

(7.23)

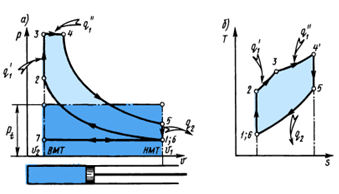
мұндағы (7.20) формуласымен анықталады.

Мәжбүрлі тұтануы бар ІЖД жұмыстық қоспасы электрлік ұшқынға қарағанда жану уақыты өте аз, бұл жану процессін жүзеге асыру тұрақты көлемде деп алынады. Мұндай цикл тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін цикл деп аталады, 17 а,б - суретінде көрсетілген. 16 және 17- суреттерінде көрсетілген циклдарды салыстыра отырып, қарастырып отырған цикліміз екендігін көреміз. Сондықтан формула (23.14) мына түрде жазылады:

(7.24)

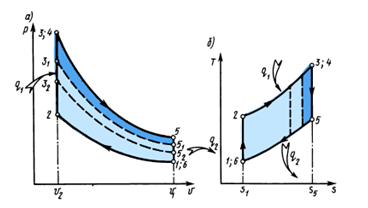
Тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін циклдын термиялық ПӘК –ті жұмыстық дененің қасиеті мен двигательдің конструкциясына тәуелді. Циклдын ПӘК-ін сонымен қатар - диаграммасы көмегімен 12351 ауданының 2-3 процесс астындағы ауданына қатынасы арқылы есептеуге болады (сурет 17б). Термодинамикалық циклде двигательге тускен жүктеме ыстық жылу көзінен жұмыстық денеге жіберілетін жылу мөлшерімен сипатталады. Тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін цикл үшін тең. 15-суретте іштен жану индикаторлық диаграммасындағы I – сору, II – сығылу, III – ұлғаю, IV – шығу (выхлоп) процесстерін білдіреді.

Осыдан, және берілген мәндерінде жүктеме қысым дәрежесінің жоғарылауына пропорционал және сығылу дәрежесіне тәуелді емес. Қарастырылып отырған циклдын термиялық ПӘК –ті жүктеме өзгерген кезде оның өзгермейтіндігін көрсетеді. 16-суретте қисық үзік сызықтармен жүктеменің төмендеуі кезіндегі жұмысшы дененің ұлғаю процессін көрсетеді.



сурет 16. ІЖД-нің аралас термодинамикалық циклі:

а) - диаграммада, б) диаграммада.

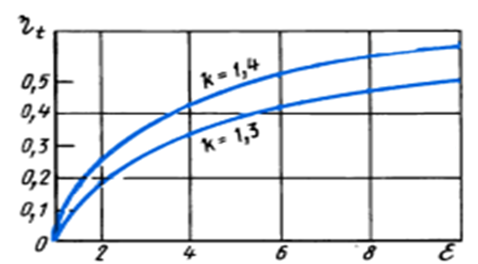
****

сурет 17. Тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін ІЖД-нің термодинамикалық циклі: а) - диаграммада, б) диаграммада.

(7.23) формуласына сәйкес циклдын орташа қысымы болғанда

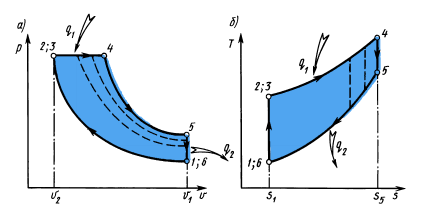
мұндағы (7.24) формуласымен анықталады.

Келетін жылудың мөлшерінің жоғарылауынан ( жоғарылауынан) циклдің орташа қысымы да жоғарылайды. Цилиндрдегі тұтанатын ІЖД сығылу тактісі кезінде яғни, сығылудан таза ауа сығылады. ВМТ –дан жақын цилиндр двигателінде форсунка 3 арқылы өздігінен тұтанып және жанатын ыстық ауа ортасына отын шашыратылады (сурет 14).



сурет 18. Адиабата көрсеткіші мен сығылу дәрежесінен тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін циклдын термиялық ПӘК-нің тәуелділігі.

Жұмысшы денеге жылудың берілу процессі бұл жағдайда изобаралық деп алынады. Тұрақты қысымдағы жылудың келуімен жүретін цикл және - диаграммаларында көрсетілген (сурет19а, б).

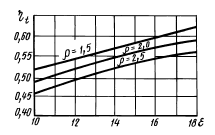


сурет 19. Тұрақты көлемдегі жылудың берілуімен жүретін ІЖД термодинамикалық циклі: а) - диаграммада, б) диаграммада.

16 және 19 суреттерінде көрсетілген циклдарды салыстыра отырып, тұрақты қысымда жылудың келуімен жүретін цикл екенің ескеріп, мынаны аламыз:

(7.25)

Сығылу дәрежесі өскен кезде қарастырылып отырған циклдын термиялық ПӘК де өседі және алдын ала ұлғаю дәрежесі жоғарыласа керісінше төмендейді (20 сур).



сурет 20. Алдын ала ұлғаю дәрежесі ρ мен сығылу дәрежесінен тұрақты қысымдағы жылудың берілуімен жүретін циклдын термиялық ПӘК тәуелділігі .

Циклдын термиялық ПӘК-ін сонымен қатар -диаграммасы көмегімен 1245 ауданының 2-4 процесс астындағы ауданына қатынасы арқылы есептеуге болады (сурет 19б). Жылудың берілу мөлшері мен жүктеменің жоғарылауы кезінде жоғарылайды және өзгермейді. Осыдан, жүктеменің жоғарылауы кезінде мұндай циклдын термиялық ПӘК –ті төмендейді (сурет 20). Циклдын орташа қысымы (7.23) формуласымен есептелінеді, ал егер деп алатын болсақ,

мұндағы (7.21) формуласымен анықталады.

§7.10 Стирлинг двигателінің циклы

AN=16

Стирлинг двигателі - жылуөткізгіш қабырғалар арқылы сырттан жылу алатын қондырғы. Двигательдің жұмысшы көлеміндегі жұмысшы дененің мөлшері (мысалы ауа) тұрақты және өзгермейді. Бұл двигательдің артықшылығы жылудың ыстық көзі ретінде жану өнімінен басқа ядролық энергия, күн батареялары және т.б қолданылады.

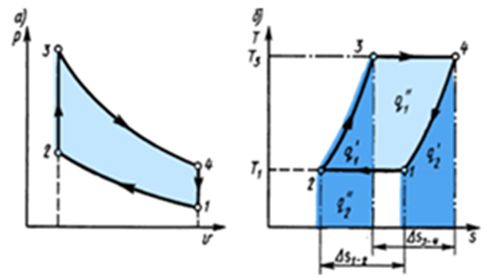
Жабық көлемдегі двигательде жылуөткізгіш бет арқылы жылудың берілуі кезінде жұмыстық дене ұлғаяды. Содан кейін жылу суық жылу көзіне алынып, жұмысшы дене сығылады және жұмысшы циклды аяқтай отырып, бастапқы күйіне оралады. Жалпы жылуөткізгіш қабырғаларындағы жылудың берілуі мен алынуы двигательдің құрылысына қиындықтар туғызды, яғни тұрақты ыстық Г және салқын Х қуыстар жасалды. Осыған байланысты жұмысшы дене ыстық қуыстан салқынға немесе керісінше уақтылы тізбектей орын ауыстыруы қажет.

Стирлинг двигателіндегі мұндай ығысулар -ығыстырғыш пен -поршеньмен жүзеге асады (сурет 21).



Стирлинг двигателі екі жалғасқан цилиндрден тұрады. Бұл жағдайда бір цилиндрде ығыстырғыш, ал екіншісінде поршень орналасады. Стирлинг двигателінің жұмысы 4 сатыға бөлінеді (сурет 22). I сатыда жұмысшы дененің барлық мөлшері Х-салқын қуыста болады. II сатыда поршень 3 жоғары қарай орын ауыстыра отырып, суық қуыста жұмысшы денені сығады. Салқын жылу көзіне цилиндр қабырғалары арқылы жылудың алынуы есебінен жұмысшы дененің температурасы тұрақты болып қалады (23-суреттегі 1-2 изотермиялық процесс).

III сатыда ығыстырғыш 1 төменге орын ауыстыра отырып, тұрақты көлемде: Х-cалқын қуыстан Г-ыстыққа жұмысшы денені шығарады (сурет 23).



сурет 23. Стирлинг двигателінің а) диаграммасы,

б) координатасындағы циклы

Стирлинг циклының ерекшелігі-изохоралық процесстердің жылуын толығымен регенерациялау болып табылады. Бұл мақсатта жұмысшы дененің суықтан ыстық қуысқа орын ауыстыруы 2-регенератор арқылы жүзеге асады (сурет 22). Регенератор жылуын жұмысшы денеге бере отырып суыйды, ал жұмысшы дене температурасына дейін қыздырылады. Двигательдегі Г ыстық қуыста температурасына дейін қыздырылған жұмысшы дене ұлғаяды және цилиндрдің жоғары қақпағының беті арқылы ыстық жылу көзінен жылу берілу есебінен өзінің температурасын сақтайды (3-4 изотермиялық процесс). Содан соң 1-ығыстырғыш жоғары орын ауыстыра отырып, тұрақты көлемде 2-регенератор арқылы ыстық қуыстан салқынға жұмысшы денені шығарады (IV саты). Регенератор температурасына дейін 4-1 изохоралық процессте салқындатып және жұмыстық дене жылуын ала отырып қыздырылады. Х-салқын қуыс қабырғалары салқын жылу көзінен жылу алу есебінен тұрақты температурасын сақтайды. Тұйықталған жұмыстық циклда, 1-2 изотермиялық процессте 3-4 ұлғаю процессіне қарағанда жұмысшы денені сығу өте төменгі температурада жүреді, сондықтан циклда падалы жұмыс істелінеді. Поршень мен ығыстырғыштың барлық қозғалыстары 4 және 5 графигіне сәйкес ыстық және салқын қуыс көлемінің өзгеруін қамтамасыз етеді (сурет 22). 2-3 изохоралық процесс кезінде регенератордан мөлшері және 3-4 изотермиялық процесс кезінде жылудың сыртқы көзінен мөлшерде, жұмысшы денеге меншікті жылу беріледі. Осыған байланысты тең. Жылу алдымен 4-1 изохоралық процессте регенераторда мөлшерде және кейін 1-2 изотермиялық процесс кезінде двигательдің суық қуысында мөлшерінде алынады. Осыдан, тең. Циклдың меншікті жұмысы келесі түрде анықталады

Жоғарыда көрсетілген мен мәндерін жоғарыдағы теңдеуге қойып, аламыз:

Изотермиялық процесстегі энтропия өзгерісі келесі теңдікте көрсетіледі.

және болғандықтан, . Осыдан . Шығынды ескермей идеал жағдайдағы Стирлинг двигателінің регенераторы 4-1 және 2-3 изохоралық процесстегі ыстық жұмысшы денеден салқынға толық жылуын береді. Айтылғандарды ескере отырып, . Сыртқы көз жылуынан жұмысшы денеге берілетін меншікті жылуы мынаны құрайды: , сондықтан Стирлинг циклының ПӘК-ті мынаған тең:

Стирлинг циклының термиялық ПӘК-ті Карно циклының термиялық ПӘК-тіне тең.

Бақылау сұрақтары

1. Идеал поршеньдік компрессор деген не, оның индикаторлық диаграммасы қандай және оның жұмысы қалай есептеледі?

2. Компрессордың нақты индикаторлық диаграммасы қандай? Зиянды кеңістік деген не, неліктен олай аталады?

3. Бір сатылы компрессор өте жоғары қысымды газ алу үшін неліктен жарамсыз деп саналады?

4. Көп сатылы сығылуды қолдану қажеттілігінің негізгі себебі?

5. Компрессор жұмысы эффективтілігін бағалау үшін қандай ПӘК енгізіледі және компрессордің білік қуаты қандай формулалар бойынша таңдалынады?

6. Іштен жану двигательдерінің термодинамикалық классификациясы қандай?

7. Тұрақты көлемде жылу беретін ІЖҚ-ның нақты циклының диаграммадағы схемасы.

8. Тұрақты көлемде және қысымда аралас жылу беретін ІШҚ циклының диаграммалардағы схемасы және осы циклдың термиялық ПӘК-ті қалай анықталады?

9. Тұрақты қысымда кезіндегі жану циклінің түрі? Оның двигатель схемасы және индикаторлық диаграммасын көрсетіңіз.

10. Сығылу дәрежесі жоғары компрессорсыз двигательдің идеал циклы мен оның жұмыс істеу принципі?

11.Аралас жылу беретін іштен жану двигатель циклдары

12.Неліктен Отто циклына қарағанда Дизель циклының термодинамикалық эффективтілігі жоғары?

Есептердің шығарылуы

7.1 кезіндегі жылу беріле жүретін іштен жану двигатель циклінің негізгі нүктелеріндегі параметрлерін табыңыз, циклдің термиялық ПӘК-тін және деп алып, сығылу дәрежесінен тәуелділігін анықтаңыз. Циклдын бастапқы нүкте параметрлері ; сығылу дәрежесі ; қысымның жоғарылау дәрежесі . Жұмысшы дене – ауа, меншікті газ тұрақтылығы тең, адиабата көрсеткіші . Есептеп шығарылған ПӘК-ті максималды және минималды ауа температурасы кезіндегі Карно циклының термиялық ПӘК-тімен салыстырыңыз.

*Шығарылуы:* Ауаның бастапқы меншікті көлемі

Сығылу процессі соңындағы ауа параметрі:

Жану процессінің соңындағы ауа параметрлері,

Адиабаталық ұлғаю процессі соңындағы ауаның параметрі,

Ауаға келетін меншікті жылу :

Процесстегі алынған меншікті жылу мөлшері:

Пайдалы қолданылған меншікті жылу мөлшері:

Циклдын термиялық ПӘК-ті:

немесе

тәуелділігін келесі берілгендермен анықтаймыз.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|  | 0,435 | 0,512 | 0,575 | 0,615 | 0,638 |

Ауаның максималды және минималды температуралар кезіндегі Карно циклының термиялық ПӘК-ті.

7.2 Идеалды бір сатылы компрессор 0,1МПа, =17 кезінде 200 м3/ сағ метанды сорып алады және 0,7МПа қысымға дейін политропты сығады. Компрессордағы сығылудың теориялық жұмысын және сығылған метанның көлемін және температурасын анықтаңыз.

*Шығарылуы:* Соңғы температура

сығылған метанның көлемі:

Компрессордың теориялық жұмысы:

Бақылау есептері

7.3 Компрессор қысымнан қысымға дейін ауаны сығады. Компрессордың білігіне қажетті қуатты анықтаңыз, егер сығылу мына процесстерде жүрсе: a) адиабаталық б) политропты көрсеткішімен в) изотермиялық. *Жауабы:* .

7.4 Көп сатылы поршенді компрессор зиянсыз көлемде ауаны бастапқы қысымынан қысымына дейін сығады. Соңғы қысымның бастапқы қысымға қатынасы барлық цилиндрлер үшін бірдей және 6-8 аралығында деп есептелінген.

Температурасы 15 жоғарылаған кездегі салқындатылған судың шығынын және егер сатылар ПӘК-ті 0,7 болса, компрессордағы сатылар санын, двигатель қуатын анықтаңыз. Ауаның бастапқы температурасы , ал сығылу процессінің полтроптық көрсеткіші . Компрессордың өнімділігі . *Жауабы:*, сатылар саны 2-ге тең.

7.5 Ауа қысымнан және , қысымға дейін сығылады, компрессордағы сығылған ауаның көлемдік сағатты өнімділігін анықтаңыз. Сығылу изотермиялық, двигатель қуаты 40 квт. *Жауабы:*.

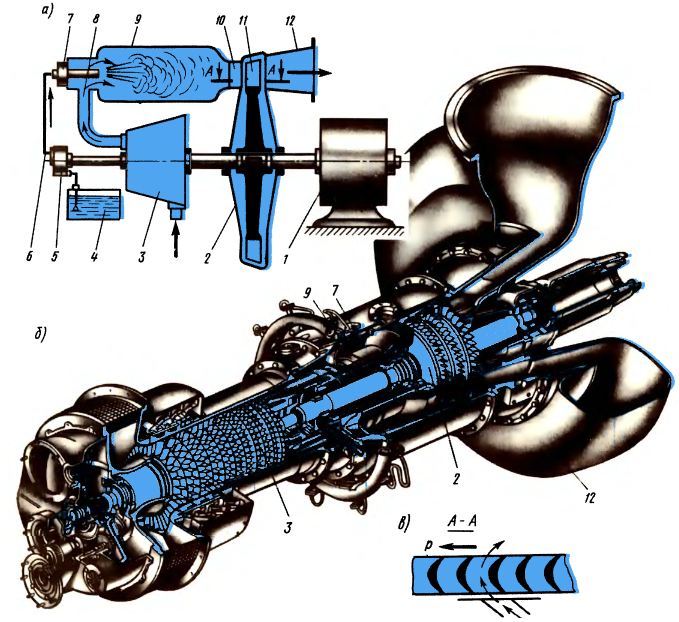
7.6 Дизель циклы үшін ауа қасиеттеріне ие жұмысшы дененің цикл нүктелеріне сәйкес келетін мынадай температуралар берілген:, , . Термиялық ПӘК-ті анықтаңыз және Карно циклының термиялық ПӘК-тімен сол температура интервалында салыстырыңыз. Жауабы: .

VIII ТАРАУ. ГАЗТУРБИНАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАР ЦИКЛЫ МЕН РЕАКТИВТІ ДВИГАТЕЛЬДЕР

§8.1 Газ турбинасы қондырғысының құрылымы

AN=17

Газ турбиналық қондырғылардың поршеньдік двигательдерге қарағанда біршама артықшылығы бар. Газ турбиналарының габариті мен массасы аз және онда қайтымды-түсімді қозғалыс жасайтын бөлшектері жоқ. 1а, в –суреттерінде газ турбинасының қондырғысы келтірілген.

****

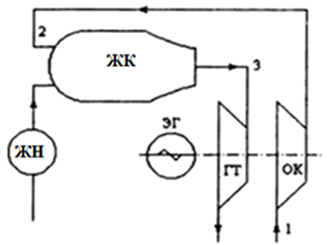
сурет 1. Жанармайы тұрақты қысымда жанатын газтурбиналық қондырғы: а) схема; б) жалпы түрі; в) А-А бойынша қима: 1-энергия тұтынушы, 2-статор, 3-турбокомпрессор, 4-бак, 5-жанармайлық насос, 6,8-турбопровод, 7-форсунка, 9-жану камерасы, 10-соплолық аппарат, 11-турбина қалақшалары, 12-патрубок.

Газ турбинасының қондырғысы екі бөліктен тұрады: 11-ротор деп аталатын радиал күрекшелі айналмалы диск, 2-статор деп аталатын корпус. Ротормен бір білікте 1-энергия тұтынушы және ауаны сығып, 8-құбырөткізгіш бойымен жану камерасына беретін 3-турбокомпрессор орналасқан. 9-жану камерасына 4-бактан 6-құбырөткізгіш пен 5-жанармайлық насос арқылы жанармай 7-форсунка арқылы шашыратылып беріледі. 9-камерада жанармайдың жануы нәтижесінде түзілген газ жылдамдығын арттыратын 10-соплолық аппаратқа беріледі. Соплолық аппараттан кейін жоғары кинетикалық энергияға ие газ ротордың күрекшелері арасындағы каналға түсіп, күрекшелердің иілген беттерінде пайда болған қысым әсерінен жұмыс атқарады (сурет 1в). Қысым роторды айналдыратын күш туғызады. Жұмыс істеген газ 12-түтікше арқылы шығарылады. Газ турбинасы қондырғысының циклы 3-турбокомпрессордан, 9-жану камерасынан және 11-турбинаның өзін құрайтын термодинамикалық процесстерден тұрады.

Газ турбинасы қондырғысының екі негізгі түрі бар: тұрақты қысымда, көлемде жылу алатын және регенерациялы.

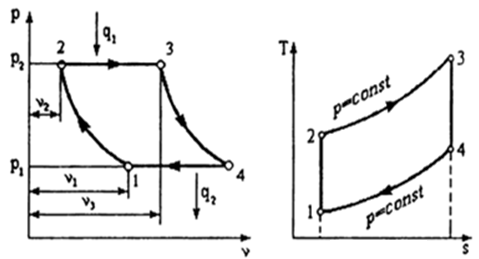
§8.2 Тұрақты қысымда жылу алатын ГТҚ-ның циклы

Газ турбинасы қондырғысының принципиалды схемасы 2-суретте келтірілген. Форсунка арқылы осьтік компрессордан (ОК) ауа, жанармайлық насостан (ЖН) жанармай жану камерасына (ЖК) түседі. Ыстық газ жану камерасынан аралас сопло арқылы газ турбинасының (ГТ) қалақшасына бағытталады, содан соң атмосфераға шығарылады. ЭГ-электр генераторы.



сурет 2

Тұрақты қысымда жылу алатын газ турбинасы қондырғысының идеал циклы диаграммалары арқылы 3 және 4 -суреттерінде көрсетілген. процессте жұмысшы дене адиабаталы сығылады. изобаралық процессте жұмысшы денеге жоғарғы жылу көзінен қандай да бір жылу мөлшері келеді. адиабатасы бойынша жұмысшы дене бастапқы қысымға дейін ұлғаяды, ал изобара бойынша төменгі жылу көзіне жылу кетеді.



сурет 3 сурет 4

Цикл сипаттамасы:

– компрессордегі қысымның көтерілу дәрежесі;

- изобаралық ұлғаю дәрежесі.

Жүйеге келетін және кететін жылу мөлшері анықталады:

Соңғы екі формуланы ескерсек, термиялық ПӘК:

– температуралар өрнегін жұмысшы дененің бастапқы - температурасы арқылы табуға болады. адиабаталық процесс үшін келесі қатынастар орынды

осыдан

изобаралық процессте

Осыдан

адиабаталық процессте

Осыдан

Температураның табылған мәндерін ПӘК формуласына қойып, аламыз

-қысымның көтерілу дәрежесі және -адиабата көрсеткіші ұлғаюымен тұрақты қысымда жылу алатын процессте газ турбинасы қондырғысының ПӘК артады. Алайда термиялық ПӘК қондырғының экономикалық тиімділік өлшемі бола алмайды. Ондай рольді ГТҚ эффективтік ПӘК-ті атқарады

мұндағы -эффективті жұмыс, яғни қондырғыдағы ішкі және механикалық шығын ескерілетін қозғалтқыш білігіндегі пайдалы жұмыс. Эффективтік жұмыс ұлғаю және сығылу жұмыстарының айырымы ретінде анықталады

мұндағы

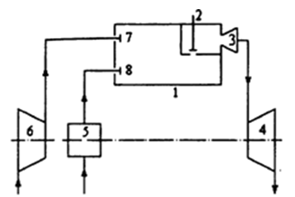
- газ турбинасының ішкі салыстырмалы ПӘК-ті;

- турбокомпрессордың адиабаталық ПӘК –ті;

- механикалық ПӘК.

§8.3 Тұрақты көлемде жылу алатын ГТҚ циклдары

Жанармайдың жану процесі үзіліссіз тұрақты қысымда жүретін ГТҚ-на қарағанда тұрақты көлемде жүретін ГТҚ-да жану процесі периодты, пульсациялы болады. 7-ауа клапаны арқылы 6-компрессормен сығылған ауа 1-жану камерасына түседі. Осымен қатар 5-жанармайлық насостан 8-жанармайлық клапан арқылы сұйық жанармай 1-жану камерасына түседі (сурет 5).



сурет 5

Жану процесі 7-клапан мен 2-соплолық клапан жабылғанда жүреді. Тұтану электрлік жалынмен жүзеге асады. Жанармай жанған соң қысымның көтерілу нәтижесінде жану камерасындағы соплолық клапан ашылады. Жану өнімі 3-соплолық аппараттан өту арқылы 4-газ турбинасының қалақшасына түседі.

Тұрақты көлемде жылу алатын газ турбинасының идеал циклы -диаграммалары арқылы 6-суретте көрсетілген.



сурет 6

адиабаталық процессте -параметрлі жұмысшы дене -нүктеден -параметрлермен нүктеге дейін сығылады. изохоралық процессте жұмысшы денеге -мөлшерде жылу келеді. Жұмысшы дене процесінде бастапқы қысымға дейін адиабаталы ұлғаяды және изобарасы бойынша бастапқы күйге келеді. Циклдың сипаттамасы:

- компрессордегі қысымның көтерілу дәрежесі;

- қысымның қосымша көтерілу дәрежесі.

Жүйе алатын және беретін меншікті жылу мөлшері төмендегі формулалармен анықталады

Термиялық ПӘК үшін формулаға қойып, аламыз

-температуралары үшін өрнектерді арқылы табуға болады. адиабаталық процессте

.

осыдан

.

изохоралық процессте

.

осыдан

адиабаталық процессте

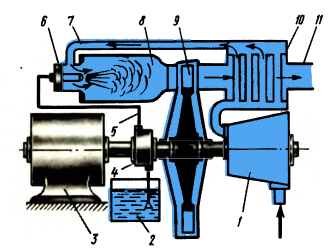
осыдан

Температураның мәндерін термиялық ПӘК формуласына қойып, аламыз

Осы теңдеуден шамаларының өсуімен термиялық ПӘК-нің артатыны белгілі.

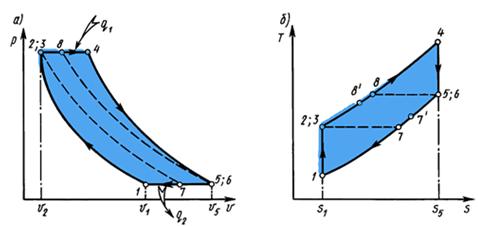
§8.4 ГТҚ термиялық пайдалы әсер коэффициентін арттыру әдістері

Компрессормен сығылып, жану камерасына түсетін ауамен салыстырғанда турбинаның жұмысшы органдары арқылы өтіп, қоршаған ортаға шығарылатын газдың температурасы біршама жоғары болады. Камераға компрессор арқылы сығылып берілетін ауаны қоршаған ортаға шығарылатын газ жылуымен алдын-ала қыздыру арқылы қондырғының жұмысын жетілдіруге болады. Мұндай процессті регенерациялау деп атайды. Регенерациялы ГТҚ-ның схемасында 1-компрессорда сығылған ауа, 10-жылуалмастырғышқа беріледі, ол жерде 9-турбина қалақшаларында жұмыс істеген және 11-түтікше арқылы шығатын газбен қыздырылады (сурет 7). Жылуалмастырғышта қыздырылған ауа 7-құбырөткізгіш арқылы 8-жану камерасына түседі. Осы камераға 2-жанармайлық бактан 4-насоспен сорылып, 5-құбырөткізгіш арқылы 6-форсункамен шашыратылып отын беріледі. Қондырғымен өндірілген энергия 3-тұтынушыға қолданысқа кетеді.



сурет 7. Изобаралық процессте жылу алатын және регенерациялы ГТҚ-ныңсхемасы: 1-компрессор, 2-бак, 3-тұтынушы, 4-насос, 5,7-трубопровод, 6-форсунка, 8-жану камерасы, 9-турбина қалақшасы, 10-жылуалмастырғыш, 11-түтікше

Регенерациялы және изобаралық жылу алатын ГТҚ-ның циклы мынадай термодинамикалық процесстерден тұрады (сурет 8): 1-2 процесі бойынша компрессорде ауа адиабаталы сығылып, жылуалмастырғышқа түседі. Жылуалмастырғышта 2-8 изобарасы бойынша сығылған ауа шығатын газ жылуымен қыздырылады. Қыздырылған ауа жану камерасына түсіп, жұмысшы денені қыздыру 8-4 изобарасы бойынша отын жанғанда бөлінетін жылу арқылы жүзеге асады.



сурет 8. Регенерациялы және изобаралық процессте жылу алатын ГТҚ-ның термодинамикалық циклы: а) диаграммада, б) диаграммада

Содан кейін 4-5 процесі бойынша турбинада газ адиабаталы ұлғайып, жылуалмастырғышқа түсіп, жылуын ауаға 5-7 изобаралық процесі бойынша береді. Әрі қарай 7-1 салқындату қондырғыдан тыс жылуды қоршаған ортаға беру арқылы жүреді (сурет 8а).

Толығымен жылу регенерациясы кезінде және (8-суретте пунктирлі сызықпен изотерма көрсетілген). Сондықтан . Регенерация болғанда жану камерасындағы жұмысшы денеге келетін меншікті жылу , ал салқын жылу көзіне берілетін жылу . Олай болса, регенерациялы циклдың термиялық ПӘК-ті

(8.1)

болғандықтан, (8.1) формула төмендегідей жазылады

Қарастырып отырған циклде , сондықтан

температурасы жоғары, температурасы төмен болған сайын толық регенерациялы және изобаралы жылу алатын циклдың термиялық ПӘК-ті жоғары болады. Алайда, нақты жылуалмастырғыштар белгілі бір өлшемге ие. Сондықтан жылу регенерациясы толығымен жүзеге аса алмайды: жылуалмастырғыштағы ауа температураға дейін ғана қыздырылады (сурет 8б), ал осы жылуалмастырғыштағы газ температураға дейін салқындатылады. Регенерацияның толық жүрмейтіндігін осыдан көруге болады. Регенерацияның толық регенерацияға жақындағаны регенерация дәрежесімен бағаланады.

(8.2)

Толық регенерация болған жағдайда .

Регенерация дәрежесі термиялық ПӘК формуласын шығарғанда ескеріледі. Толық емес регенерация болғанда немесе

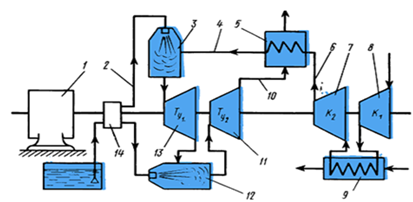
(8.2) формуланы ескеріп, яғни орнына қойып аламыз

Осыған ұқсас,

Термиялық ПӘК

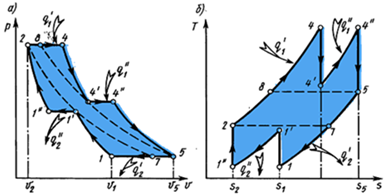
Температура төмендегенде, яғни адиабаталық процесстің соңында регенерацияны қолданудың эффективтілігі артады. Нақтырақ айтсақ төмендеген сайын, регенерация процесі жүретін 2-8 изобарасының аймағы ұлғаяды (сурет 8б).

Жұмысшы денені сатылы қыздыру мен сатылар арасында ауаны салқындатып, компрессорде сатылы сығу арқылы ГТҚ-ның термиялық ПӘК-тін арттыруға болады. Регенерациясы болатын мұндай ГТҚ-ның схемасы 9-суретте көрсетілген. Схемада көрсетілгендей қондырғы жұмысшы денені аралық қыздыру мен сығылған ауаны аралық салқындатқыштан тұрады.



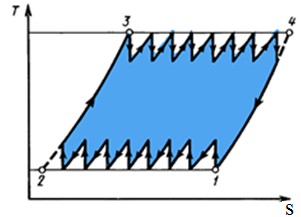
сурет 9. Компрессорде сатылу сығу, сатылы қыздыру және регенерациялы ГТҚ-ның схемасы (тұрақты қысымда жылу алатын): 1-тұтынушы, 2,10-трубопровод, 3-жану камерасы, 4,6-ауаөткізгіш, 5-жылуалмастырғыш-регенератор, 7,8-компрессор, 9-жылуалмастырғыш-мұздатқыш, 11,13-газ турбинасы, 12-жану камерасы, 14-насос

Қондырғының термодинамикалық циклы 10а, б-суреттерінде көрсетілген. Атмосферадан сорылатын ауа 8-компрессордың бірінші сатысында адиабаталы сығылады (сурет 9). Содан кейін сығылған жұмысшы дене 9-жылуалмастырғыш-мұздатқышқа беріліп, тұрақты қысымда бастапқы температураға дейін салқындатылады. 9-жылуалмастырғыштан кейін ауаны сығу адиабата бойынша 7-компрессордың екінші сатысында жалғасады. Осылайша сығылған ауа



сурет 10. ГТҚ-ның регенерациялы, сығылған ауаны аралық салқындату мен жұмысшы денені аралық қыздыру (тұрақты қысымда жылу алатын): а) диаграммада, б) диаграммада

6-ауаөткізгіш арқылы 2-8 изобара бойынша қыздырылатын 5-жылуалмастырғыш-регенераторға түседі. Регенераторда қыздырылған ауа 4-ауаөткізгіш арқылы 3-жану камерасына түсіп, ол жерде 14-насоспен 2-құбырөткізгіш арқылы берілген отынның жануы есебінен жылуымен 8-4 изобарасы бойынша қосымша қыздырылады. Жұмысшы дене 4 нүктесінің параметрлерімен (сурет 10) 13-газ турбинасының бірінші сатысына беріледі. Турбинаның бірінші сатысында адиабаталық ұлғаю процесі жүреді. Бірінші сатыда жұмыс істеген жұмысшы дене қайтадан 12-жану камерасына беріледі де, изобарасы бойынша 4 нүктесіндегі температураға дейін жылуы есебінен қыздырылады. Осылайша қыздырылған жұмысшы дене 11-турбинаның екінші сатысына түсіп, адиабата бойынша ұлғаяды. Турбинада жұмыс істеген жұмысшы дене 10-құбырөткізгіш арқылы 5-жылуалмастырғыш-регенераторға түсіп, өзінің жылуын иіртүтік арқылы өтетін ауаға 5-7 изобаралық процесі бойынша береді. Содан кейін жұмысшы дене атмосфераға шығарылып, жылу мөлшерін шығара отырып, 7-1 изобарасы бойынша салқындатылады. Қондырғымен өндірілген энергия 1-тұтынушыға беріледі. Аралық сатылы қыздыру мен салқындату көп болған сайын, циклдың термиялық ПӘК-ті соншалықты жоғары болады. Нақтысында, егер циклда 2-3 процесінде жұмысшы дененің алатын жылуы, тек қана жұмысшы денені 4-1 процесі арқылы салқындату нәтижесінде жүзеге асады деп қарастырсақ, онда процесстің эквидистанттылығы арқасында бұл жылу мөлшері термиялық ПӘК-ті анықтауда ескерілмейді (сурет 11).

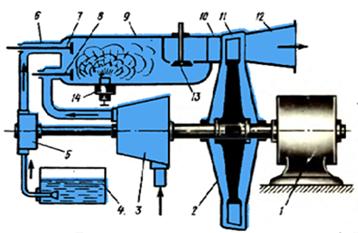


сурет 11. Көпсатылы аралық қыздырғышты, салқындатқышты ГТҚ-ның термодинамикалық циклы

Жұмысшы денеге 3-4 процесінде келетін жылуды және салқын жылу көзіне 1-2 процесінде берілетін жылуды түрінде жуықтап анықтасақ, онда термиялық ПЭК-ті төмендегідей анықталады

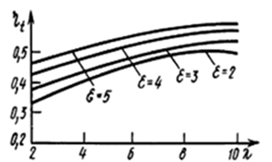
2-3 және 4-1 процесстері эквидистантты болғандықтан, болады. Сондықтан , яғни мұндай циклдың термиялық ПӘК-ті Карно циклының ПӘК-іне тең болады. Алайда, бұл аталған шарт тек қана аралық сатылы қыздыру мен салқындату саны көп болған жағдайда орынды. Ескеретін жағдай, аралық сатылы қыздырғышты немесе салқындатқышты көбейту барысында, қондырғы бағасының өсуіне байланысты циклдың термиялық ПӘК-ін арттыру интенсивтілі төмендейді. Сондықтан, аралық сатылы қыздырғыштар саны термодинамикалық, конструкторлы-құрылымыдық және экономикалық факторлары ескерілетін экономикалық тиіміділік негізінде таңдалынады.

Изохоралық процессте жылу алатын ГТҚ-ның схемасы 12-суретте көрсетілген.



сурет 12. Тұрақты көлемде отынның жануы жүретін ГТҚ-ның схемасы: 1-тұтынушы, 2-статор, 3-турбокомпрессор, 4-бак, 5-отындық насос, 6-трубопровод, 7,8-форсункалар, 9-жану камерасы, 10-соплолық аппарат, 11-турбина қалақшалары, 12-түтікше, 13-клапан, 14-тұтандыру білтесі

Отын мен ауа қоспасы 14-тұтандыру білтесі көмегімен жанады, ал газ жану камерасынан 13-клапаны арқылы периодты түрде шығарылады. 13 а,б-суретте цикл -диаграммаларында көрсетілген.



сурет 13. Изохоралы жылу алатын ГТҚ-сы циклының термиялық ПӘК-тінің қысымның көтерілу дәрежесі мен сығылу дәрежесінен тәуелділігі

1 және 12-суреттеріндегі циклдарды салыстыру, қарастырылып отырған циклда және екендігін көрсетеді. Сонымен қатар

Олай болса, циклдың термиялық ПӘК-ін анықтайтын

(8.3)

Циклдың меншікті жұмысы

(8.4)

мұндағы

(8.5)

(8.6)

(8.5), (8.6) теңдеулерін ескеріп, (8.4) теңдеуі төмендегідей жазылады

(8.7)

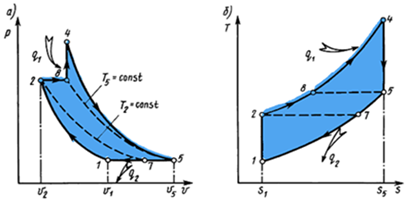
(8.3) теңдеу төмендегідей жазылады

(8.8)

Осыдан, -қысымды көтеру дәрежесінің және -сығылу дәрежесінің өсуімен изохоралық процессте жылу алатын ГТҚ-ның термиялық ПӘК-ті артатындығын көруге болады. болғанда тәуелділігі 13-суретте көрсетілген. (8.7) теңдеуі қарастырып отырған циклдың жұмысын анықтауға мүмкіндік береді. болғанда

(8.9)

мұндағы (8.8) теңдеуімен анықталады. Циклдың параметрлері мен адиабата көрсеткіші, сығылу процесі соңындағы жұмысшы дененің қысымы мен меншікті көлемін біле отырып, циклдың термиялық ПӘК-ті мен жұмысын есептеуге болады. Изохоралы жылу алатын ГТҚ-нда регенерация қолданылады (сурет 14). Бұл циклда 2-8 регенерация процесі жылуалмастырғыш-регенератор құрылымын күрделендірмейтіндей изобаралы процесс бойынша жүзеге асады. Осыған байланысты компрессорде ауа 1-2 адиабаталы сығылып, содан соң жылуалмастырғыш-регенераторда 2-8 изобаралы қыздырылып, 8-нүктенің параметрлерімен жану камерасына түседі. Отынның жану есебінен жұмысшы денеге 8-4 изохоралық процесінде жылуы келеді. Осыдан кейін қоршаған орта қысымына дейін газ турбинасында 4-5 адиабаталы ұлғаяды. Қоршаған ортаға шығардың алдында жұмыс істеген газ жылуалмастырғыш-регенератор арқылы өте отырып, өзінің жылуын сығылған газға беріп, 5-7 изобаралы салқындатылады.



сурет 14. Регенерациялы және изохоралы жылу алатын ГТҚ-ның термодинамикалық циклы: а) диаграммада, б) диаграммада

Жұмыс істеген газды 7-1 процесі бойынша әрі қарай салқындату қоршаған ортада жүреді. Толық регенерациялы және изохоралы жылу алатын циклдың термиялық ПӘК-ті төмендегідей анықталады

Осы формуланы цикл параметрлері арқылы жазу үшін -белгілі параметрлерінен басқа, - параметрін енгізу қажет. –регенерацияның қыздыру дәрежесі деп аталады. Толық регенрация кезінде тең болады. болғандықтан, термиялық ПӘК-ті төмендегідей жазуға болады

(8.10)

Процессте толық регенерация жүргізу мүмкін емес, сондықтан практикалық тұрғыдан жүзеге асатын регенерациялы және тұрақты көлемде жылу алатын циклдың термиялық ПӘК-ті (8.10) формуласымен есептелген термиялық ПӘК-нен төмен болады.

§8.5 Сұйық және ауа реактивті двигательдері. Реактивті двигательдер циклы.

AN=18

Реактивті двигатель деп – отынның химиялық энергиясын соплода ұлғаятын газ ағынының кинетикалық энергиясына айналдыратын қондырғыны атайды. Бұл ағынша самолет қозғалысы бағытына кері бағытта двигательден шығатын газдың реактивті қозғалысы салдарынан тартылыс тудырады. уақыт аралығында реактивті двигатель соплосынан шығатын газ массасын , самолет немесе ракетамен салыстырғанда газдың шығу жылдамдығы десек, Ньютонның 2-ші заңына сәйкес реактивті двигательдің тартылыс күшін жазып,

(8.11)

самолет немесе ракета қозғалысы үшін реактивті тартылыс күші

(8.12)

мұндағы -бірлік уақыттағы газ массасының шығыны.

(8.13)

Реактивті двигательдер ракеталық және ауа реактивті двигательдер (АРД) деп бөлінеді. Ракеталық двигательдер бортында жанармаймен қоса, жанармайды жағу үшін (сұйық оттегі, озон, сутегі тотығы, азот қышқылы және т.б.) тотықтандырғыштар қорын алып жүреді. Ракеталық двигательдер сұйық және қатты отынды болып бөлінеді. Ракеталық двигательдерге қарағанда ауа-реактивті двигательдері бортында тек жанармай қорын, ал тотықтандырғыш ретінде атмосфералық ауа оттегісін қолданады. Олай болса АРД тек атмосферада жарамды, ал ракеталық двигатель атмосфера мен космостық кеңістікте де қолданылады.

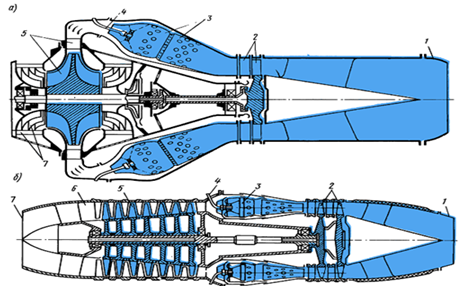
Ауа реактивті двигательдері циклдарын қарастырайық

Ауа реактивті двигательдері жану үшін атмосфералық ауаны қолданады. Олардың жұмыс принипі бойынша компрессорлық (турбореактивті) және компрессоры болмайтын (тура ағынды және соққылы) деп бөлінеді. Турбореактивті двигатель схемасы 15-суретте көрсетілген.

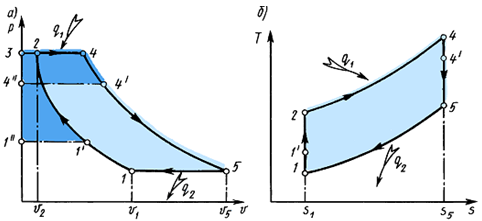
Турбореактивті двигательдің 6-корпусындағы подшипниктерде бекітілген ротордың алдында 5-турбокомпрессор орнатылған. Ротордың келесі жағында компрессорды айналдыруға арналған 2-газ турбинасының жұмысшы сақиналары бекітілген. 7-диффузор арқылы двигательге түсетін ауа 5-компрессормен сығылып, 3-жану камерасына беріледі. Осы камераға жану кезінде газтәрізді өнім түзетін 4-түтікше арқылы отын түседі. Негізгі жұмыс 1-соплосында газбен атқарылады. Турбореактивті двигатель циклын құрайтын термодинамикалық процесстерді қарастырамыз. Двигательдерде дыбысқа дейінгі жылдамдықты ұшуда ауаны бастапқы адиабаталы сығу 7-диффузорда жүреді.

16-суреттердегі диаграммаларда адиабаталық сығылу процесімен көрсетілген. Компрессормен адиабаталық сығуды процесімен жалғастырады. -қысымына дейін сығылған ауа жану камерасына беріледі. Содан соң жанармай жанғанда бөлінетін жылуы денеге келеді. Бұл процесс изобара бойынша жүреді.

AN=



сурет 15. Турбореактивті двигатель схемасы: а) центрден тепкіш компрессор, б) осьтік компрессор: 1-сопло, 2-газ турбинасының сақиналары, 3-жану камерасы, 4-түтікше, 5-турбокомпрессор, 6-корпус, 7-диффузор



сурет 16. Турбореактивті двигательдің термодинамикалық циклы: а) диаграммада, б) диаграммада

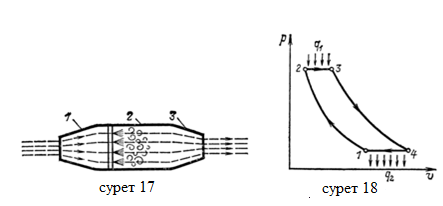
Жану камерасынан жұмысшы дене газ турбинасының қалақшаларына түседі. Турбина қалақшаларында жұмысшы дене қоршаған ортамен жылу алмаспай процесі бойынша адиабаталы ұлғаяды. Бұл кезде турбина ауданы болатын оң жұмыс атқарады (сурет 16а). Газдың әрі қарай қоршаған орта қысымына дейін (5-нүкте) адиабаталы ұлғаюы реактивті соплода жүреді. -диаграммаларында процесімен бейнеленген. Двигательден сыртқы ортаға шығарылатын ыстық газ қоршаған орта қысымында жылуын бере отырып, салқындатылады. Бұл процесі бойынша жүзеге асады.

Турбореактивті двигатель циклының термиялық ПӘК-ті мен меншікті жұмысы келесі формулалармен анықталады

(8.14)

(8.15)

Турбокомпрессорлы реактивті двигательдер қазіргі кезде жылдам самолеттер үшін двигательдің негізгі түрі болып табылады. Компрессоры жоқ АРД – тура ағынды (ПВРД) және соққылы (ПуВРД) деп екі топқа бөлінеді. ПВРД схемасы 17-суретте көрсетілген.



Бұл схемада компрессор мен турбина жоқ. 1- диффузорда атмосфералық қысымнан ге дейін сығылған ауа 2- жану камерасына түседі. Жану процесі жүреді. Жоғары температураға ие жанған өнім 3-соплодан шығады. Осылайша, ПВРД циклы диаграммада диффузордағы 1-2 ауаны сығу адиабатасынан, 2-3 жану процесі изобарасынан, соплодағы 3-4 адиабата ұлғаюынан және атмосфералық қысымдағы 4-1 изобарасы тұйықталу циклынан тұрады. (8.16) теңдеуіне сәйкес осы циклдың термиялық ПӘК-ті үлкен болған сайын, соншалықты қысымның көтерілу дәрежесі үлкен, яғни ауа ағыны динамикалық қысымымен байланысты осы двигатель орнатылған самолеттің қозғалыс жылдамдығы жоғары болады. Сондықтан, самолет жылдамдығы артқан сайын ПВРД ПӘК-ті артады. ПВРД циклының термиялық ПӘК-нің самолет қозғалысы жылдамдығынан тәуелділігін төменде қарастырамыз. (8.16) теңдеуі мен (8.17) адиабаталық процесстің сығылу процесі теңдеуінен қарастырып отырған цикл үшін төмендегідей теңдеуді аламыз

(8.18)

мұндағы -сығылғанға дейінгі ауа температурасы, -адиабаталық сығылу процесі соңындағы ауа температурасы. Самолет сыртынан ағып өтетін ауа ағынының жылдамдығын , ал жану камерасының кіре берісіндегі ауа қозғалысының жылдамдығы деп белгілесек, онда VI-тараудағы (6.27) теңдеуіне сәйкес келесі түрде жазуға болады:

(8.19)

мұндағы мен - адиабаталық сығылуға және адиабаталық сығылудан кейінгі ауа энтальпиясы. Ауаны тұрақты жылусыйымдылықты идеал газ деп санап

(8.20)

(8.19) теңдеуінен аламыз

(8.21)

осыдан

(8.22)

Осы теңдеулерді (8.18) теңдеуіне қойып, ПВРД циклының термиялық ПӘК-ті үшін төмендегі теңдеуді аламыз:

(8.23)

Жану камерасындағы жылдамдықты ескермей , аламыз:

(8.24)

(8.24) теңдеуімен есептелген ПВРД термиялық ПӘК-інің ұшу жылдамдығынан тәуелділігі 19-суретте график түрінде көрсетілген.

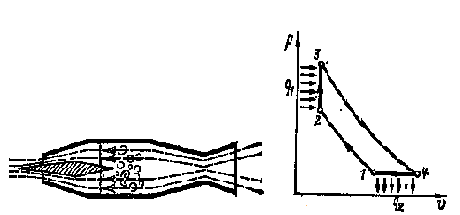


сурет 19

(8.17) мен (8.18) теңдеулерінен қысымның жоғарылау дәрежесінің ұшу жылдамдығынан тәуелділігі мына қатынаспен анықталады

(8.25)

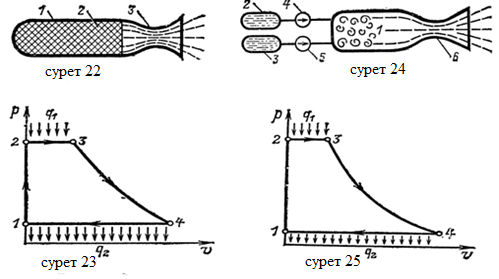
Ұшудың дыбысқа дейінгі және асқындыбыстық жылдамдықтары үшін ПВРД конструкциясы әртүрлі. Дыбысқа дейінгі жылдамдыққа сәйкес ПВРД схемасы 17-суретте көрсетілген. Дыбысқа дейінгі ағынның тежелуі кеңейтілген диффузордағы ағында, ал ағынның үдеуі тарылған соплодағы ағында пайда болады. Аталған сопло мен диффузор 17-суретте бейнеленген. Асқын дыбысты жылдамдық үшін ПВРД схемасы 20 -суретте көрсетілген. Конструкциясының қарапайымдылығы, массасы мен өлшемінің аздығы үлкен асқын дыбысты жылдамдықпен ұшатын самолеттер үшін двигательдің бұл түрі тиімді болып саналады. Соққылы компрессорсыз (ПуВРД) реактивті двигатель циклы 21-суретте -диаграммасында көрсетілген.



сурет 20 сурет 21

ПуВРД циклы жоғарыда қарастырылған тұрақты көлемде жанатын газ турбинасының циклына ұқсас. Мұндай типті двигатель конструкциясының күрделігіне байланысты көп қолданылмайды. Ракеталық двигательдер химиялық отынды және ядролық ракеталық двигательдер деп бөлінеді. Химиялық отынды двигательдері екі негізгі топқа бөлінеді: қатты отынды ракеталық (РДТТ) және сұйықты ракеталық (ЖРД).

РДТТ қатты отынға (порохтардың әртүрлі сортты) жанғыш, тотықтырғыштар жатады. Ракета ұшқанда тұтанып, соплодан шығатын газ түзе отырып біртіндеп жанады. РДТТ схемасы 22-суретте көрсетілген. Мұндағы 1-жану камерасы, 2-қатты отын, 3-сопло. Осындай двигательдер циклы 23-суретте диаграммада бейнеленген. Двигательді іске қосқанда қатты дене жануының газтәрізді өнімінің қысымы атмосфералық қысымнан ге дейін шапшаң көтеріледі. Әртүрлі типті двигательдерде қысымы бірнеше ондық немесе жүздік атмосфералық қысымға жетуі мүмкін; қысымның көтерілу процесі өте жылдам өтетіндіктен оны изохоралық деп санауға болады (23-суретте 1-2 сызығы).



Жану өніміне жылудың келу процесін изобаралы деп санауға болады (23-суретте 2-3 сызығы). Одан кейін соплода жанудың газтәрізді өнімі 3-4 адиабаталы ұлғаяды. Цикл 4-1 (қоршаған ортада жану өнімін суыту) изобарамен тұйықталады. Жану камерасында қатты отынның жану өнімі соплодан шығатын газға қарағанда үлкен тығыздыққа ие. РДТТ конструкциясының қарапайымдылығы және эксплуатацилауға ыңғайлы болғандықтан ракеталы техникада жиі қолданылады.

ЖРД двигателінің тиімділігі:қоршаған орта күйінен тәуелсіз, ауасыз кеңістікте ұша алады, ұшу жылдамдығынан тартылыстың тәуелсіздігі, сәйкесінше жылдамдық өсуімен қуаттың артуы, конструкциясының қарапайымдығы, меншікті массасының аздығы.

ЖРД двигателінің кемшілігі: ПӘК-ті аз, отын қорымен қоса тотықтырғыштарды алып жүреді. 24-суретте ЖРД схемасы бейнеленген. 1-жану камерасына 2-жанармай багынан сұйық жанармай және 3-бактан тотықтырғыш 4 және 5 насостары арқылы беріледі. Жану тұрақты қысымда жүреді. Жанудың газтәрізді өнімі 6-сопло арқылы қоршаған ортаға шығады. ЖРД циклы 25-суретте диаграммасында көрсетілген. Сұйық жанармай және тотықтырғыш жану камерасына қысымымен беріледі. ЖРД двигателінде денені сығудың орнына, осы дененің сұйық компоненттерін сығу жүргізіледі. Сұйықты сығылмайтын деп санауға болатындықтан, жанармай қоспасы компоненттерін сығуды изохоралы деуге болады. Сұйық тығыздығы жану өнімі тығыздығынан біршама жоғары болғандықтан 25-суреттегі 1-2 изохора ординатамен беттесіп тұр. 2-3 изобара жану камерасындағы жылудың келу процесімен, ал 3-4 соплодағы ұлғаюмен сәйкес. 4-1 изобарасы (қоршаған орта қысымы) циклды тұйықтайды. Осылайша, ЖРД циклы РДТТ циклына ұқсас. ЖРД циклының термиялық ПӘК-ті төмендегідей есептеледі.

2-3 изобара процесінде келетін жылуы

(8.26)

шамасы төмендегідей көрсетілуі мүмкін

(8.27)

Циклдың термиялық ПӘК-інің жалпы өрнегі үшін (8.26) және (8.27) ескеріліп былай жазылады:

(8.28)

немесе

(8.29)

энтальпиялар айырымы изохоралық процессте жанғыш қоспасының сұйық компоненттерінің қысымын көтеру үшін 4 және 5 насостарымен шығындалған жұмысқа тең. Сұйық жанармай және тотықтырғыштың меншікті көлемдері өте аз болғандықтан, оларды сығуда атқарылатын жұмыс, отынның жануы кезінде бөлінетін жылу мөлшерімен салыстырғанда аз. Сондықтан (8.29)-теңдеуіндегі шамаларын ескермеуге болады. Осыны ескеріп (8.29)-теңдеуінен ЖРД циклының термиялық ПӘК-ті үшін келесі өрнекті аламыз:

(8.30)

энтальпиялар айырымы соплодан шығу процесінде жану өнімінің кинетикалық энергиясына айналады.

(8.31)

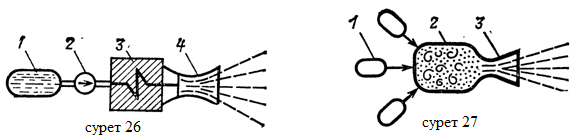
(8.31) теңдеуіне сай, соплоға кіре берістегі жану өнімінің жылдамдығын ескермей, төмендегідей жазуға болады:

(8.32)

мұндағы ЖРД соплосынан жану өнімінің шығу жылдамдығы. Осы теңдеуді ескеріп, (8.30) теңдеуді ЖРД циклының термиялық ПӘК-ті үшін былай жазуға болады:

(8.33)

Сұйықты (ЖРД) ракеталы двигательдер ракеталы және авиациялы техникада кеңінен қолданылады. Ядролы ракеталы двигательдер (ЯРД) қарастырамыз. ЯРД схемасы 26-суретте көрсетілген.



1-бакта сұйық күйдегі дене 2-насос көмегімен, оған жылу келетін 3-ядролық реактордың активті зонасы арқылы айдалады. Реакторға келетін жылу дененің тұрақты қысымында жүреді. Газтәрізді дене реактордан 4-соплоға түседі. Термодинамика тұрғысынан ЯРД циклы ЖРД циклына ұқсас; сондықтан ЯРД термиялық ПӘК-ті ЖРД циклы сияқты (8.33) теңдеуімен анықталады. ЯРД-нің басқа схемасы 27-суретте көрсетілген. Суспензия түріндегі сұйықта ядролық отын (уран-235 немесе плутоний) орналасқан 1-бактан, тізбекті реакцияны болдырмайтын қондырғылармен қамтамасыз етілген 2-жану камерасына береді. Камерада ядролық отын массасы критикалықтан асады және тізбекті реакция жүреді. Ядролық реакция жүргенде бөлінетін жылу жұмысшы денені қыздырады, содан соң 3-соплода ұлғаяды және сыртқы ортаға ағып шығады. ЯРД-дің бұл түрінің де термодинамикалық циклы алдыңғыға ұқсас.

Ең маңыздысы АРД және ракеталы двигательдерден айырмашылығы химиялық отынмен жұмыс істейтін ядролық ракеталық двигательдерде жұмысшы дене отынның жану өнімі болмайды.

Соплодан идеал газдың ағып шығу жылдамдығы үшін ,

Вакуумға ағып шығуы үшін космостық кеңістікте қысымды 0-ге тең деп аламыз, яғни үшін:

(8.34)

немесе

(8.35)

шамасы тұрақты болғандықтан, осы қатынастан ең көп ағып шығу жылдамдығын қамтамасыз ететін салыстырмалы молекулалық массасы аз газды қолданған дұрыс. Осы тұрғыдан ядролық ракета үшін өте тиімді жұмысшы дене сутегі болып табылады. ЯРД жану камерасында өте жоғарғы температурада атомдық сутегіге диссоцияцияланады. Сутегімен қоса ЯРД двигательдерде жұмысшы дене ретінде гелий, су буы, жеңіл элементтердің сутектік байланыстары қарастырылады.

Айтатын маңызды нәрсе, ЯРД двигательдерінің тартылуы химиялық ракеталық двигательдерге қарағанда үлкен емес. Бірақ ЯРД химиялық отынды ракеталық двигательге қарағанда көп уақыт жұмыс істей алады. Сондықтан ЯРД планетааралық космос корабльдерін басқару үшін өте тиімді двигатель болып саналады.

**Бақылау сұрақтары**

1. Тұрақты қысымда жылу алатын газ турбинасы қондырғысының схемасы мен -диаграммалары қандай?

2. жылу алатын газ турбина қондырғысы циклының термиялық ПӘК –ті сығылу және қысымның жоғарылау дәрежесінен қандай тәуелділікте?

3. Қысымның жоғарылау дәрежесіне байланысты тұрақты қысымда жылу алатын ГТҚ –ның эффективті және термиялық ПӘК – нен тәуелділігі қандай?

4. ГТҚ – ның термиялық ПӘК-ін көтеру әдістері қандай?

5. жылу алатын жылу регенерациялы ГТҚ –ның схемасы мен -диаграммадағы циклы қандай?

6. Сұйық және ауа реактивті двигательдерінің схемасы қандай?

7. Турбокомпрессорлі ауа реактивті двигателінің схемасы қандай?

8. Тұрақты көлемде жану процесі жүретін ГТҚ–ның идеал циклын сипаттаңыз.

9. жылу алатын ГТҚ–ның термиялық ПӘК өрнегін жазыңыз.

10. жылу алатын ГТҚ–ның - диаграммаларындағы процесстерді сипаттаңыз.

11. Реактивті двигатель деп қандай двигательдерді атайды?

12. Реактивті двигательдердің идеал циклдарын сипаттаңыз.

13. Реактивті двигательдер қандай топтарға бөлінеді және олардың бір-бірінен айырмашылығы неде?

Есептердің шығарылуы

8.1 кезіндегі жылу берілумен жүретін цикл үшін нүктелердегі пайдалы жұмысты, термиялық ПӘК-ті, алынған және берілген жылу мөлшерін табу қажет, егер Жұмысшы дене – ауа. Жылусыйымдылық тұрақты деп аламыз.

*Шығарылуы:*

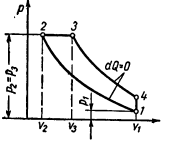
Меншікті көлемді анықтаймыз:

*1 нүкте.*

*2 нүкте.* Сығылу дәрежесі мынаған тең болғандықтан,

болса, онда

Адиабаталық сығылу соңындағы температура



Адиабаталық сығылу соңындағы қысым

*3 нүкте.* Изобаралық процесстегі параметрлер қатынасынан

Осыдан

*4 нүкте.*

Адиабаталық ұлғаю соңындағы қысым

Адиабаталық сығылу соңындағы температураны изохоралық процесстегі параметрлер қатынасынан анықтаймыз.

.

Берілген жылудың мөлшері

Алынған жылу мөлшері

Циклдің термиялық ПӘК-і

Циклдің жұмысы

Бақылау есептері

8.2 Жылуды енгізу циклі бойынша жұмыс істейтін қарапайым газотурбиналық қондырғының p=const болғанда және қысымның келесі жоғарлау дәрежесі кезіндегі 1) =5 2) =10 3) =20 термиялық ПӘК-тін есептеу керек. Жұмыс денесін ауа қасиетімен қамтылған деп есептеу керек. Адиабата көрсеткішін . *Жауабы:* ;

8.3 Газтурбиналық қондырғы p=const болғанда жылуды енгізу циклі бойынша бойынша жұмыс істейді.Қысымның жоғарлау дәрежесі . Екі жағдай үшін газтурбиналық қондырғының термиялық ПӘК-тің есептеу керек:1) жұмысшы дене ауа болғанда 2) жұмысшы дене гелий болғанда. *Жауабы:* 1) 2)

8.4 Газотурбиналық қондырғының компрессоры бастапқы параметрлері МПа, ауаны қысымы МПа дейін сығады. Компрессордың ішкі ПӘК-ті тиесілі 0,84-ке тең. Компрессордан шыға берісіндегі ауа температурасын және компрессордың еңгізу қуаттылығын анықтау керек.Егер бізге компрессор 1∙ауа беру қажет екені белгілі болса. *Жауабы:*; =7,5 МВт

8.5 Газтурбиналық қондырғының турбинасына параметрі гелий кіреді.Турбинаның тиесілі ішкі ПӘК –ті 0,86 тең.Турбинаның артындағы қысымы МПа.Турбинадан шығардағы гелийдің темпратурасын анықтаңыз. Егер турбинаның нақты қуаты МВт болса гелийдің сағаттық массалық шығынын есептеңіз. *Жауабы:*

8.6 Отынның жағылуы мен газтурбиналық қондырғының компрессорына келіп түсетін ауаның бастапқы параметрі ,, . Газтурбиналық қондырғысының компрессорындағы қысымның жоғарлау дәрежесі β=6. Турбинаның сопласына дейінгі газ температурасы . Жұмысшы дене ретінде ауа қасиеттері алынады, жылусыйымдылығы молекулалық кинетикалық теория бойынша есептеледі. Компрессор 2∙ кг/сағ ауаны сорып алады. Табу керек: газтурбиналық қондырғының идеал цикілінің барлық нүктелерінің параметірін, термиялық ПӘК-тің, турбина мен компрессорлардың және барлық ГТҚ-ның теориялық қуатын анықтау керек.

8.7 кезінде отын жанатын ГТҚ-сы үшін: ауаның бастапқы параметрлері , қысымның жоғарлау дәрежесі , турбина алдында газдың температурасы, турбинаның тиесілі ішкі ПӘК-ті және компрессордың ПӘК-ті белгілі. Компрессордың өндірімділігі . Нақты циклдің барлық нүктелерінің параметірін, турбина мен компрессордың және барлық ГТҚ- ның нақты қуаттылығын, ГТҚ-ның ішкі ПӘК-тің анықтау керек. Жұмыс денесі ауа қасиеттерімен қамтылған деп есептеп, ауаның жылусыйымдылығының температурадан тәуелділігін ескеру керек.

8.8 Ауа реактивті двигательді ұшақ 1000км/сағ жылдамдықпен ұшады. Ауаның температурасы . Двигатель жұмыс істейтін циклдың термиялық ПӘК-тін анықтау керек. *Жауабы*:

8.9 Ауа температурасы 10 кезінде ұшақ 900км/сағ жылдамдықпен ұшады. Ары қарай ұшақ жылдамдығы 800км/сағ төмендейді, ауа температурасы 0. Ұшақта тұрған ауа реактивті двигатель циклінің термиялық ПӘК-ті қаншалықты өзгеретінің анықтаңыз. *Жауабы:* термиялық ПӘК 9,9 ден 8,2% дейін өзгереді. Қоршаған орта температурасының әсеріне қарағанда, ұшу жылдамдығының әсері көбірек.

8.10 кезінде жылу енгізуі бар ГТҚ циклінің термиялық ПӘК-ті, турбина алдындағы газ температурасына тәуелсіз, ал ішкі ПӘК-ті осы температураға тәуелді екені бізге белгілі.ГТҚ-ның ішкі ПӘК-ін екі жағдайдағы мәнін есептейміз: 1) , турбина алдындағы газдың температурасы , 2) ,,,. Адиабата көрсеткішін тең деп алып, газдың жылусыйымдылығын тұрақты деп аламыз. *Жауабы:*

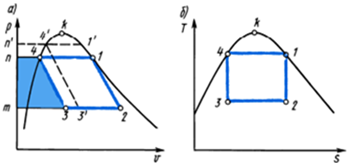
8.11 Екі сатылы сығу мен екі сатылы ұлғайтуы бар және шекті регенерациялы ГТҚ теориялық циклін есептеу керек. Компрессорге кірердегі ауаның параметрі МПа, екі сатыда да қысымның жоғарлау сатысы бірдей . Бірінші компрессордан кейін ауаны салқындату температураға дейін жүргізіледі. Екі турбина алдында да ауа температурасы бірдей және 800 тең. Бірінші турбинадан кейінгі ауаның қысымы 0,24 МПа. Ауа шығыны 250∙ кг/сағ. ГТҚ-ның теориялық қуатын, термиялық ПӘК-тін, циклдің барлық нүктелерінің параметрлерін анықтау керек. ГТҚ-ның циклін -диаграмасында көрсетіңіз.

IX ТАРАУ. БУ ТУРБИНАЛЫ ҚОНДЫРҒЫЛАРЫ

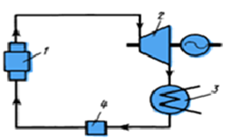
§9.1 Карно циклы

Бу қондырғыларында негізгі жұмыстық дене ретінде су буы алынады, су буын қатты қызған күйінде де, қаныққан күйінде де қолданады.

Егер жұмыстық дене ретінде қаныққан бу болса, онда Карно циклын жүзеге асырып, максималды термиялық ПӘК алуға болады. Температура тұрақты болатын 4-1 изобаралық процесстегі жылудың берілуі мен 2-3 процессте жылудың алынуын конденсация мен булану есебінен қамтамасыз етуге болады ( сурет 1). Карно циклындағы 1-2 процессі турбинадағы будың адиабаталық ұлғаю процессі болып табылады, ал 3-4 процессі жұмысшы дененің адиабаталық сығылуы. Мұндай циклды 1- қазандық қондырғысынан, 2- турбинадан, 3- конденсатор және 4- компрессордан тұратын бу қондарғыларында жүзеге асыруға болады (сурет 2). 3 конденсаторда бу ақырындап ылғал бу күйіне дейін (3 нүкте) конденсацияланады, ал жылу қоршаған ортаға кетеді. Ылғал бу 4 компрессорға келіп түседі және толық конденсацияланғанға (1 суреттегі 4 нүкте) дейін адиабатты сығылады, кейін конденсат 1 бу генераторына беріледі. Ылғал буды адиабаталық сығуға жұмсалған жұмыс мынаған тең:



сурет 1. Бу қондырғыларының қаныққан буы үшін Карно циклы: а) , б) -диаграммаларында



сурет 2. Бу қондырғысының қарапайым схемасы: 1-қазандық қондырғысы, 2-бу турбинасы, 3-конденсатор, 4-компрессор

Сығылу жұмысы көп болған сайын цикдын бастапқы параметрлері жоғары болады, мысалы 4 нүкте (1 а суретіндегі үзік сызықпен көрсетілген). Жұмысшы дененің бастапқы парметрлері жоғарылаған сайын циклдын термиялық ПӘК-ті де өседі, бірақ оның өсімі сығылуға кеткен шығын өсімінен төмен болады. Осыған байланысты бу қондырғылардың жалпы ПӘК-ті төмендейді, ал бу қондырғыларындағы жылуды қолдану эффективтілігі азаяды. Сондықтан, Карно циклы бойынша жұмыс жасайтын бу қондырғыларының артықшылығы (максималды термиялық ПӘК-ті), ылғал буды сығуға кеткен үлкен жұмыстан жоғалады.

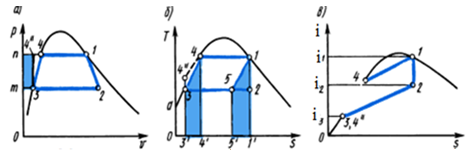
§9.2 Ренкин циклы

AN=19

Егер конденсация процессін, яғни турбинадан жұмыс жасалынған буды толықтай суға айналдырып (сурет 3а, 2-3 ), кейін насоспен қазандық қондырғысының бу генераторына жіберілсе (3-4 процессі) Карно циклындағы кемшіліктер (ылғал буды сығуға кеткен үлкен жұмыс) жойылады. Алғаш рет жұмыс жасалған буды толықтай конденсациялайтын мұндай циклды У.Дж. Ренкин ұсынды және бу қондырғысындағы 4 компрессорды су насосымен ауыстырды.

Ренкинның бу циклында конденсат қысымға дейін 3-4 изохоралық емес, адиабата бойынша сығылады. Сондықтан оның меншікті көлемі бірнешеге төмендейді, ал температура жоғарылайды сол себепті конденсаттың термиялық ұлғаюы жүреді. Ренкинның бу циклы 1-2-3-4-1 айналма процессімен көрсетіледі. диаграммасындағы бөлігі кезінде қазандық бу генераторында конденсатты қыздыру процессімен сәйкес келеді. қысымға дейін конденсатты насоспен сығуға кеткен жұмыс диаграммасында ауданымен көрсетілген және мына формуламен анықталынады . Бұл формуламен есептелген жұмыстарды салыстыра отырып, яғни Карно циклындағы адиабатлық сығылу жұмысына қарағанда, Ренкин циклындағы қазандықтың бу генераторы қысымына дейін конденсатты сығу аз жұмысқа ие, алайда Карно циклындағы ылғалды буды сығуға кеткен жұмыстың қысымы Ренкин циклының қысымымен тең болады. Сонымен қатар жұмыс істелінген буды толық конденсациялау есебінен Карно циклына қарағанда көбірек вакуум алынады. Будың толық конденсациялануы жүретін заманауи конденсаторларда абсолютты қысым 0,004 ден 0,006 МПа дейін құрайды. Будың бастапқы қысымы 10 МПа және одан жоғары қысым кезінде Ренкин циклында Карно циклына қарағанда 1,5 есе үлкен жұмыс алуға болады. Сондықтан будың терең ұлғаюы және конденсатты сығу процессіне кеткен аз жұмыс есебінен Карно циклына қарағанда Ренкин циклының жұмысы үлкен мәнге ие. Алайда, Ренкин циклының жылуының көп жұмсалуына байланысты, Ренкин Циклының термиялық ПӘК-ті Карно циклы ПӘК-нің параметріне сәйкес аз мәнге тең.

Карно циклында жылу тек бу түзілу процессіне шығындалса, ал Ренкин циклында процессіндегі қоректік суды қыздыруға қосымша жылу мөлшері шығындалады.



сурет 3. Бу қондырғысының (Ренкин циклы) теориялық циклы: а) , б) , в) -диаграммаларында

3б суретінде ауданымен -диаграммасында сипатталатын циклға келетін жылу; алынатын жылу ауданына тең. Сондықтан циклдың меншікті жұмысы аудандар айырымымен анықталады: . -диаграммадағы ауданы 1 нүктесіндегі меншікті энтальпия болып табылады және Оа321´ ауданы – 2 нүктесіндегі меншікті энтальпиясы тең болса, онда циклдың меншікті жұмысы мына айырыммен анықталады:

. (9.1)

келтірілген жылуды ауд. аудандар айырымымен анықтауға болады , олай болса

(9.2)

мұндағы бу генераторына кіре берісіндегі қоректік судын меншікті энтальпиясы. Осыдан,

(9.3)

Алынған (9.1) (9.3) формулаларымен есептеу үшін - диаграммасын қолдану қажет. Егер , мұндағы - қоректік судың конденсат температурасы, ал кДж/(кг·К) – жылусыйымдылығы, онда (9.3) формула мына түрде жазылады.

Бу циклының үнемділігі будың шығынымен (кг/МДж) сипатталады, (9.3) формуласына сәйкес,

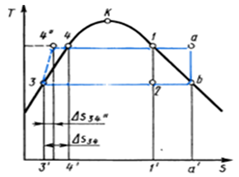
(9.4)

мұндағы -энтальпия кДж тең. Будың шығынын білу қондырғының ағатын бөлігіндегі (қалақша, канал, құбырөткізгіш) ағыс ауданын анықтау үшін қажет. Бірлік жұмысқа тең жылудың меншікті шығыны (кДж/МДж) , (9.4) ескере отырып, мынаны аламыз:

Әдетте Ренкин циклының термиялық ПӘК-ті 30.......40 тең.

§9.3 Жұмысшы дене параметрлер арқылы бу қондырығыларының ПӘК-ін арттыру

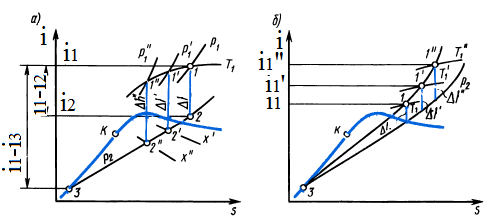
Бу қондырғыларының ПӘК-ті берілетін бу температурасының жоғарылауы мен жұмыс істелінген бу температурасының төмендеуі есебінен жоғары болуы мүмкін. Карно циклымен салыстыруға мүмкіндік беретін Ренкин циклында жұмыстық дене болып қаныққан бу алынады (сурет 3). Егер екі циклдан тұратын (1-2-3-4 және 1-а-b-2), Ренкин циклын а-b-3-4 контурында қарастырсақ, онда біреуі ПӘК-ті бар Ренкин циклы, ал екіншісі ПӘК-ті бар Карно циклы (сурет 4).

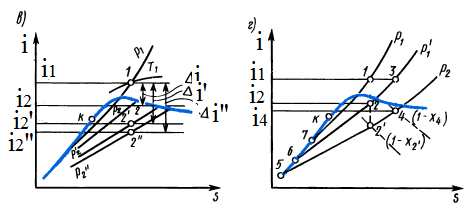


сурет 4. -диаграммада буды аса қыздырғышы бар Ренкин циклы

болса, онда Ренкин суммалық циклы а-b-3-4 белгілі бір орташа мәнге ие болуы қажет . Осыдан, сол циклдын қаныққан бумен жұмыс жасауы кезінде, Ренкин циклының термиялық ПӘК-ті жұмысшы дене ретінде қатты қызған буды қолданғанда ПӘК-ті жоғары болады.

Егер қаныққан будың қысымы сақталып, қайта қыздыру температурасын жоғарылатқан кезде, циклдын ПӘК-ті қосымша жоғарылайды. 5-ші суретте көрсетілгендей циклдын ПӘК-ті (9.3) формулаға сәйкес, қысым мен температураның функциялары болып табылатын энтальпиялар ,, мәнімен анықталады.





сурет 5. Ренкин циклының ПӘК-тін жоғарылату жолдары: а) бастапқы қысымды жоғарылату есебінен; б) бастапқы температураны жоғарылату; в) соңғы қысымды төмендету; г) буды қайта қыздыру есебінен.

Олай болса, циклдын термиялық ПӘК-ті және мәндеріне тәуелді. Тұрақты температура кезінде, будың бастапқы қысымдарының жоғарылауы ден және және соңғы қысым , жылу айырымын жоғарылатады (сурет 5а). Тұрақты температура мәнінің сақталуы кезінде будың бастапқы қысымын жоғарылату есебінен цикл ПӘК-нің жоғарылауының негізгі кемшіліктері болып табылады және қысымы ұлғаю процесінің соңында будың ылғалдылығын арттырады. 10 МПа қысымы және жоғары қатты қыздыру температурасы (830 К) және 0,005 МПа соңғы қысымы кезінде адиабатты ұлғайған будың құрғақтылық дәрежесі 0,79 тең болады, ал 20 МПа – 0,74 тең. Бұл жағдай турбина ротор қалақшасының соңғы сатылары бетінің бұзылуына әкеліп соқтырады. Бұл жағдайды болдырмау үшін, Ренкин циклының ПӘК-тін бір уақытта жоғарылату кезінде турбинаға келетін жұмысшы дене температурасын жоғарылату есебінен болады (5б сурет). 5б суретте көрсетілген температурасы кезінде ПӘК-тінің жоғары екенін көреміз. Цикл ПӘК мәнінің жоғарылауы жылу берілудің орташа температурасының жоғарылау есебінен болады. Сонымен қатар мынаны ескеруіміз қажет, будың бастапқы температурасын жоғарылату кезінде жылу алынудың орташа температурасы да бір уақытта жоғарылайды. Бірақ бастапқы температурасы жоғарылау кезінде Ренкин циклының ПӘК жоғарылауына байланысты, бұл жоғарылау төменгі қарқында жүреді. Бу қондырғылар ПӘК-тін жоғарылату үшін бұл әдісі практикада кеңінен қолданылады.

Қазіргі уақытта будың қайта қыздыру температурасы 900....950 К жететін қондырғылар бар. Ыстыққа төзімді материалдар қолдануылуына байланысты бұл жоғарылатулар белгілі бір шектеулі мәндерге ие. Циклдын ПӘК-тің жоғарылату будың ұлғаюы кезіндегі соңғы қысымның төмендеуі есебінен болуы мүмкін (конденсатордағы қысымы). және қысымына дейін қысымының түсуі, -ден және дейін жылу айырымының жоғарылауына және жылу алынуының орташа температурасының төмендеуіне әкеледі. Бу циклдарының ПӘК-тіне басқа параметрлердің әсері туралы жүргізілген анализ мынаны көрсетеді.

Заманауи бу қондырғыларының жұмысшы денесі салыстырмалы төменгі қысымда жоғарғы қанығу температурасына ие болуы керек, ұлғаю процесінің соңында төменгі қанығу температурасы мен сұйықтың жылусыйымдылығы төмен және аса қыздырылған будың жылусыйымдылығы жоғары болуы керек.

§9.4 Буды аралық қыздыру

AN=22

Ренкин циклының арттыру үшін қысымды көтеру адиабаталық ұлғаю соңында будың ылғылдылық дәрежесінің артуына әкеледі. Ылғалдылық дәрежесін төмендету үшін аса қызған будың температурасын көтереді, сонымен қатар екіншілік және аралық аса қыздыру қолданылады. 6 суретте аралық қыздырғышты бу турбинасының принципиальды сұлбасы келтірілген.



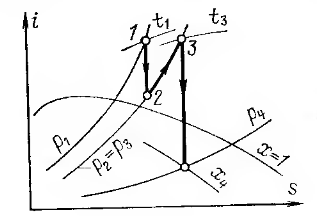
сурет 6. Аралық бу қыздырғышы бар бу турбинасы

қондырғысы мен циклы

Бу генераторынан 1 алынған бу, бу құбыры I арқылы турбинаның жоғары қысымды цилиндріне (ЖҚЦ) 2 түседі, бұл жерде бу аралық қысымға дейін ұлғайып, бу құбыры II арқылы аралық буды аса қыздырғыш арқылы қайта қыздырылады. Кейін III төменгі қысымды бу құбыры арқылы турбинаның төменгі қысымды цилиндріне (ТҚЦ) 4 түседі. Осы жерде бу толығымен ұлғаяды. Жұмыс істелінген бу 5 конденсаторға түсіп, конденсацияланады. Конденсат 6 насос арқылы қайтадан бу генераторына беріледі.

- диаграммада осы цикл қарастырылған: a-b-c-1 1 бу генераторында жоғары қысымды бу алудың изобаралық процессі; 1-2 турбинаның ЖҚЦ –де 2 будың адиабаталық ұлғаю процессі; 2-3 аралық буды аса қыздырғышында 3 буды аса қыздырылудың изобаралық процессі; 3-4 турбинаның ТҚЦ-де будың адиабаталық ұлғаю процессі; 4-4´ конденсаторда 5 жұмыс істелінген будың конденсациясының изобара-изотермиялық процессі. Егер аралық қыздыру болмаған жағдайда, будың ұлғаю процессі 6 нүктесінде құрғақтылық дәрежесімен аяқталатын еді.

7-суреттегі -диаграммасында буды аралық қыздырғышты циклдың негізгі процесстері көрсетілген. Бұл диаграммадағы сипаттаушы нүктелер -диаграммадағыдай белгіленген.



сурет 7. -диаграммасындағы аралық бу қыздырғышы бар цикл

- диаграммасын қолдана және процесс қасиеттерін ескере отырып, цикл анықталады. Бу генераторларындағы жоғары қысымды буға берілетін жылу

Аралық қыздырғыштағы буға берілетін жылу

Жалпы циклға берілетін жылу мынаған тең:

Жұмыс істелінген будың конденсатордағы салқындатқыш суға берілетін жылуы:

Қарастырылып отырған циклдын термиялық ПӘК-і мынаған тең:

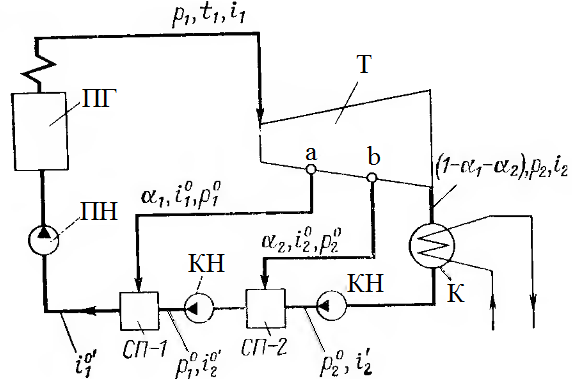
мұндағы турбинаның ЖҚЦ-дегі бу жұмысы; турбинаның ТҚЦ бу жұмысы. Будың меншікті шығыны мынаған тең:

9.5 Бу турбина қондырғысының регенеративті циклы

AN=23

Бу турбинасының регенеративті циклы деп турбинаның әр түрлі аралықтарындағы алымдарынан алынатын будың жылуы есебінен қоректік суды қыздыру циклын атайды.Бу турбинасының бірнеше сатысынан өтіп, жұмыс жасағаннан кейін ғана бу алынады.Осы аралықта будың қысымы бастапқы қысымнан қысымға дейін төмендейді.

Алынған бу қыздырғышқа бағытталады.Қыздырғышқа сонымен қоса конденсат немесе қоректік су түседі. Қыздырғышта (СП) жылуалмасу салдарынан бу конденсацияланады, ал су қыздырылып, бу генераторына беріледі. Суды қыздыру үшін регенеративті деп аталатын беттік және араластырғыш қыздырғыштар қолданылады. Араластырғыш қыздырғыштарда сумен будың араласуы нәтижесінде су қайнау температурасына дейін қызады, ал беттік қыздырғыштарда қайнау температурасына дейін 2-3 жетпейтіндей қыздырылады. Өйткені бу мен су арасындағы жылу алмасу оны бөліп тұрған құбыр беті арқылы жүреді.



сурет 8. Екі аралас регенеративті қыздырғышы бар бу турбина қондырғысының принципиалды схемасы

Бу алынуының мәні мен қай жерден алынатындығы көптеген факторлардан тәуелді. Біріншіден будың бастапқы параметрлерінен ( және ), қондырғы қуатынан және қоректік суды қыздырудың соңғы температурасынан тәуелді. Екі араластырғыш қыздырғышы (СП) бар бу турбинасы қондырғысының регенеративті циклының ерекшелігін қарастырамыз. ПГ- бу генераторынан аса қызған бу параметрлерімен турбинаға келіп түседі. Турбинада будың бір бөлігі қысымға ұлғайып, бірінші алымға (а - нүктесі) түседі және СП-1 аралас қыздырғышқа бағытталады. Будың қалған бөлігі одан да төмен қысымға дейін ұлғайып, екінші алымға (b -нүктесі) түсіп, СП-2 араластырғыш қыздырғышқа бағытталады. Ал будың қалған негізгі үшінші бөлігі турбинаның барлық сатысынан өтіп, соңғы - қысымына дейін ұлғайып, конденсаторға түседі. Конденсаторда толығымен конденсацияланып, түзілген конденсат конденсаторлық насоспен біртіндеп СП-2 және СП-1 арқылы айдалады.

Әрбір араластырғыш қыздырғыштарда негізгі конденсат алынған бу конденсатымен араласып, қайнау температурасына дейін сатылы қыздырылады.СП-2 қыздырғыштары алымының қысымы , СП-1 қыздырғыштағы алымының қысымы . Қыздырғыштардан кейін қызған бу қоректік насоспен қайтадан бу генераторына түседі. Осы цикл айналып, қайталанып отырады. Регенеративті циклдын негізгі сипаттамаларын есептеу үшін төмендегі көрсетілген белгілеулерді қолданамыз: бірінші алымға түсетін бу үлесі; екінші алымға түсетін бу үлесі; конденсаторға түсетін бу үлесі; турбинаға түсетін бу параметрлері; бірінші алымға түсетін бу параметрлері; бірінші алымға түсетін конденсат энтальпиясы; екінші алымға түсетін бу параметрлері; екінші алымға түсетін конденсат энтальпиясы; конденсаторға кіре берістегі бу параметрлері; конденсатордағы конденсат энтальпиясы.

Турбина алымдарынан қыздырғышқа түсетін бу мөлшері жылулық баланс теңдеулерінен табылады. Жылулық балансты қүрып, мәндерін анықтауға болады.

*СП-2 қыздырғышы*. Бұл қыздырғышқа конденсатордан кг су, екінші алымынан кг бу түседі және кг су шығады. Осыдан жылулық балансты құрып, мәндерін анықтауға болады.

,

осыдан шығады,

(9.5)

*СП-1 қыздырғышы*. Бұл қыздырғышқа бірінші алымнан кг бу, СП-2 қыздырғышынан кг конденсат түсіп, 1 кг су шығады.

осыдан

. (9.6)

СП-1 қыздырғыштан кейін су энтальпиясымен бу генераторына түсіп, аса қызған буға айналады. 1 кг аса қызған бу алу үшін бу генераторына берілетін жылу мөлшері мынаған тең:

(9.7)

Бұл жылу мөлшері Ренкин циклымен салыстырғанда аз. Турбинаға түсетін 1 кг буға, конденсатордағы салқындатқыш суға берілетін жылу мөлшерін келесі теңдеу бойынша анықтаймыз:

(9.8)

Бұл да Ренкин циклымен салыстырғанда аз. Регенеративті циклдың ПӘК-ті,

(9.9)

1 кг будың регенеративті циклдегі жұмысы былай анықталады. қысымнан қысымға төмендегенде бірінші алымға түсетін будың бір бөлігі келесідей жұмыс атқарады:

(9.10)

Будың қалған бөлігі бастапқы қысымнан алымының қысымына дейін ұлғая отырып, келесідей жұмыс атқарады:

(9.11)

Будың қалған негізгі бөлігі түгелімен турбинадан өтіп, бастапқы қысымнан қысымына дейін төмендейді. Будың осы бөлігінде атқарылған жұмыс:

(9.12)

Үш жұмыстын (9.10, 9.11, 9.12) қосындысы 1 кг бу жұмысын береді. Ола болса,

,

(9.13)

Бу турбинасы регенеративті цикл бойынша жұмыс істесе бу генераторындағы жыу шығыны, 1 кг бу жұмысы Ренкин циклына қарағанда аз болады және жұмысқа қарағанда жылуы интенсивті азаяды, сондықтан регенеративті циклдын териялық ПӘК-ті әрқашан да Ренкин циклы ПӘК-інен көп. Регенеративті циклдын экономикалық тиімділігі будың бастапқы параметрлерімен алым санының өсуімен артады.Оның термиялық ПӘК-ті Ренкин циклымен салыстырғанда 10-12 -ке жоғары.

Будың меншікті шығыны былай анықталады:

(9.14)

болғандықтан будың меншікті шығыны Ренкин циклымен салыстырғанда көп болады.

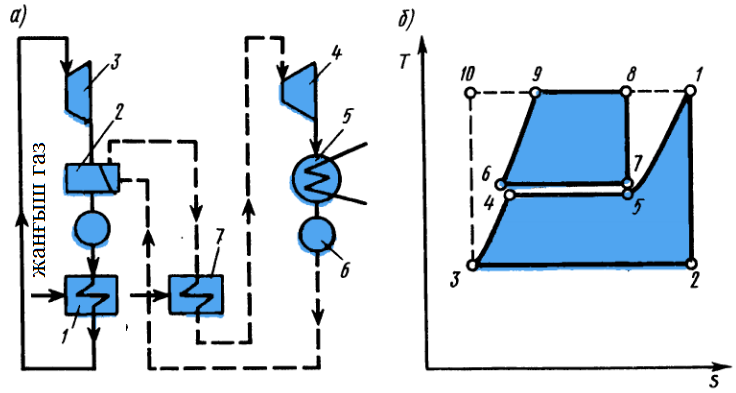
§9.6 Бинарлы циклдар

Энергетикалық бу қондырғыларында көбіне жұмысшы дене ретінде су буы қолданылады. Бірақ су жоғары критикалық қысымда төменгі критикалық температураға ие. Судың және су буының мұндай физикалық қасиеті кезінде қатты қыздыру температурасын өсіре отырып жылу берілудің орташа температурасын жоғарылата алмаймыз. Су үлкен меншікті жылусыйымдылыққа ие, формуладан энтропияның жоғарылауына әкеледі. Төменгі жұмыстық қысым кезінде бу ұлғаю процессінің соңында үлкен меншікті энтальпияға ие болады және жұмыс істелінген бу өзімен көп мөлшерде жылуды ала кетеді. Сонымен қатар су және су буының тағы кемшіліктеріне: қанығу температурасы мен оған сәйкес қысымның қатынасын жатқызуымызға болады (қысым едауір көтерілген кезде температурның ақырын жоғарылауы). Шынында температура 3 есе көтерілгенде қысым 200 есе жоғарылайды. Судың физикалық ерекшеліктері бу циклдарындағы термиялық ПӘК-тін шектейді және қондырғының металлға деген қажеттілігін жоғарылатады, эксплуатациялық қиындық туғызады.

Жоғарыда көрсетілген су және су буының кемшіліктерін ескере отырып, бу қондырғылары үшін жаңа жұмысшы денені іздеуді қажет етті. Жұмысшы дене ретінде аз қысымда жоғары қаныққан температураға ие сынапты қолдануға болады. Алайда, сынапты қоршаған орта температурасына дейін салқындату үшін конденсаторды толық ваккуммен қамтамасыз ету қажет өйткені бұл температураға сәйкес сынаптын қаныққан бу қысымы 0,33 Па құрайды. Оны алу тәжірибелік түрде мүмкін емес. Олай болса қарастырылып жатқан (су және сынап) жеке алғанда жұмысшы денелер талаптарға сай болмағандықтан, бір жұмысшы дененің орнына екі жұмысшы дене қолданатын цикл идеясы табылды. Бір жұмысшы дене (сынап) салыстырмалы төменгі қысымда жоғары критикалық температураға ие физикалық қасиетіне байланысты, циклдын жоғары температуралы аймағында қолданылады. Екінші жұмысшы дене (су) қоршаған орта температурасы кезінде жоғары қаныққан қысымға ие болғандықтан циклдын төменгі температуралы аймағында қолданылады. Мұндай екі циклдын қосындысы су булы циклға қарағанда жалпы термиялық ПӘК-тің жоғарылауына әкеледі. Бұл цикл бинарлы деп аталады. (сурет 9, б).

Сұлбада (сурет 9, а) тұтас сызықпен – сынап, үзік сызықпен – су көрсетілген. Арнайы 1 сынапты қазандық қондырғысында сынапты бу түзіліп, жұмыс істеліну үшін 3 сынапты турбинаға жіберіледі. Турбинада сынап буының ұлғаюынан кейін 2 конденсатор- буландырғышқа түседі, мұнда сынап буы су буын алу үшін өзінің жылуын беріп, конденсатқа айналады. Сынап конденсатор – буландырғыштан кейін сынапты қазандық қондырғысына бағытталады, ал 7 аса қыздырғыштан қосымша қыздырылудан кейін түзілген су буы 4 турбинаға келіп түседі. Турбинадан ұлғаю процессінен кейін жұмыс істелінген бу 5 конденсаторға бағытталады. Түзілген су 6 насос арқылы 2 конденсатор – буландырғышқа беріледі. 1 кг су буын алу үшін конденсатор – буландырғышта m кг сынап қажет. , мұндағы сынап турбинасы сыртындағы будың меншікті энтальпиясы; конденсатор-буландырғыш сыртындағы сынаптың меншікті энтальпиясы; конденсатор –буландырғыштан шыға берісіндегі су буының меншікті энтальпиясы; конденсатор-буландырғышқа келіп түсетін судың меншікті энтальпиясы.

Жалпы 1 кг су буына 10 –нан 12 кг дейін сынап қажет. Әдетте бинарлы қондырғыларда 790....820 К қаныққан температураға сәйкес келетін 0,1....15 МПа қысым кезінде құрғақ қаныққан сынап буы қолданылады (сурет 9 б). Турбинада сынап буының ұлғаюы (8-7 процессі) 0,01....0,004 МПа тең қысымға дейін жіберіледі. Бұл қысымға сынаптың 520....500К қанығу температурасы сәйкес келеді. Егер конденсатор – буландырғыштағы сынап және су буы арасынадғы температураның түсуі 10....15 К тең болса, онда су буының қанығу температурасы 505...490К құрайды.



сурет 9. Жылуэнергетикалық қондырғылардың сынап-су бинарлы схемасы: а) схема, б) -координатасындағы цикл: 1-сынапты қазандық қондырғысы, 2-конденсатор-буландырғыш, 3-сынап турбинасы, 4-бу турбинасы, 5-конденсатор, 6-насос

Мұндай температураға 3,3 ...2,5 МПа қысым сәйкес келеді. Бинарлы циклдын эффективтілігін, бинарлы циклдын пайдалы жылуының *()* Карно циклының мөлшеріне қатынасы - толтырылым коэффициенті деп аталатын мәнінен көруімізге болады. – диаграммасының ауданы бірдей температурада және есептелінеді.

мұндағы, Ренкин циклының бір су буының толтырылым коэффициенті. Регенерациясыз бинарлы циклдын термиялық ПӘК-і мына қатынаспен анықталады

,

мұндағы сынап буының m кг жұмысы; су буының 1 кг жұмысы; сынап қазандығы сыртындағы сынап буының энтальпиясы; бу аса қыздырғыш сыртындағы аса қызған су буының энтальпиясы; турбина сыртындағы су буының энтальпиясы. Бинарлы циклдын тиімділігін 1,8 –ден 20 мың кВт дейін қуатты қондырғылардың құрылуымен түсіндіруімізге болады. Мұндай қондырғыларды пайдалану қауіпсіз, жақсы беріктілікпен жоғары үнемділікті көрсетті. Бұл қондырғылардың тез енгізілмеу себебі, қондырғының қымбаттылығы (әсіресе жоғары қуатты қондырғылар), сынапты көп мөлшерде қажет ететіндігі және сынап буының улылығы.

§9.7 Бу-газды қондырғылар циклы

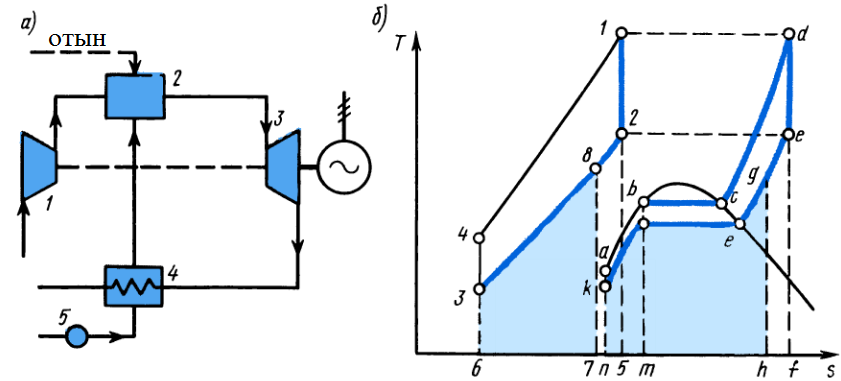
Газ турбинасының ПӘК-ті жұмысшы дене температурасына (1000....1100 К жоғары емес) және өздік қажеттілікке жұмсалатын энергия есебінен болатын бірлік қуаттылықпен шектеледі. Су буы қоспасы мен газдан тұратын немесе жылулық сұлбада қолданылатын газ және бу сияқты жұмысшы денемен жұмыс жасайтын газ турбиналы қондырғыны бу газды қондырғы, ал олардың циклын бу-газды цикл деп атайды.

Екі жұмысшы денеден тұратын, турбинаға жіберер алдында араластырылатын энергетикалық қондырғыны ойлап табу идеясын алғаш орыс инженері П.Д. Кузьминский айтқан. 1-ші компрессор қондырғысынан сығылған ауа 2-ші жағу камерасына бағытталады, 5-ші насос арқылы 4-ші регенеративті қыздырғышқа химиялық тазартылған су беріледі (сурет 10 а). Жану камерасында қыздырылған сумен ыстық жану өнімінің (газдың) араласуы жүреді, жану камерасы келесіде функцияларды атқарады: отынды жағу, судың булануы және жану өнімін бумен араластыру. Жану камерасынан шыққан бу газды қоспа 3-ші турбинаға келіп түседі, содан кейін регенеративті қыздырғыш арқылы атмосфераға жіберіледі немесе арнайы конденсаторға бағытталады. Жану камерасына суды шашырату арқылы газ температурасын керекті мәніне дейін төмендетеді және жұмысшы дененің меншікті энтальпиясын жоғарылатады. Бу газды дене энтальпиясы кг үшін мынаны құрайды:

мұндағы 1 кг газ үшін су мөлшері (кг); су, газдың сәйкес жылусыйымдылығы; қаныққан су мен газ қоспасының бу температурасы. және дан үлкен, олай болса бірдей температурада . Бу газды циклды ауалы газ және бу екі циклының жиынтығы түрінде көруімізге болады (сурет 10 б). Барлық қондырғының пайдалы меншікті жұмысы будың суммалық ауданымен a-b-c-d-e-k және газ циклының 1-2-3-4 анықталады. Бұл циклдар 1 кг жану өнімі және кг су буы үшін құрылған. Егер су буының массасы,жану өнімінің массасы болса, онда олардың қатынасы будың қатысты шығыны деп аталады. Әдетте мұндай сұлбада регенеративті қыздырғышта су қайнау температурасына дейін қыздырылады.Осы үшін қажетті жылу abmn ауданымен көрсетілген (сурет 10б); бу мен газдан тұратын, жұмыс істелінген жұмысшы денеден алынады. -диаграммасында бу газды жұмысшы дененің газ құрамасына берілген меншікті жылу 2578 ауданымен және бу құрамасына- efhg ауданымен көрсетілген. Бу газды циклда жалпы келтірілген жылу, газды құрайтын және буды құрайтын жылуларының қосындысынан тұрады.

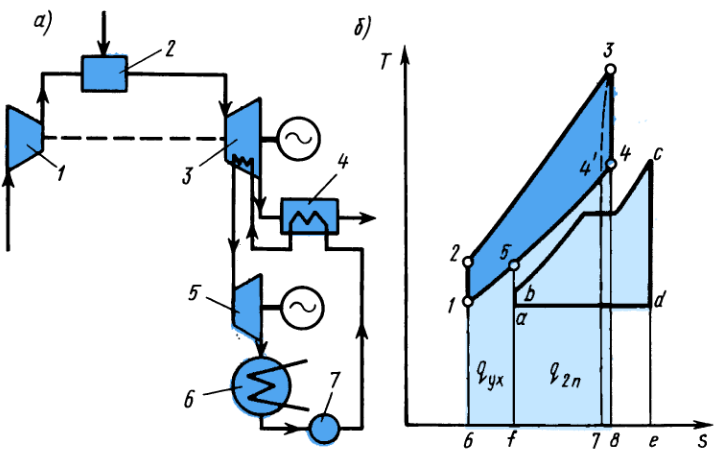
Бу газды циклдын термиялық ПӘК-тін мына қатынастан анықтауға болады

мұндағы және газ және бу циклдарына сәйкес жұмысы; және газ және бу циклдарындағы жұмысшы денені қыздыруға жұмсалған жылу.



сурет 10. Аралас жұмысшы денесі бар бу-газды энергетикалық қондырғы: а) схема, б) -диаграммадағы цикл: 1-компрессор, 2-жану камерасы, 3-турбина, 4-регенеративті қыздырғыш, 5-насос.

Бөлінген жұмысшы дене циклын игеру барысында әр түрлі жылулық сұлбалар жасалынып және сыналынды. Бу циклы газға қатысты толықтай утилизационды болатын сұлба ең эффективті сұлба болып табылды. Мұндай сұлбада қондырғының бу бөлігі отынның қосымша шығынынсыз жұмыс жасайды. Қондырғы жоғары температуралы 3-газ турбинасынан, 4-қазандық –утилизаторы және 5-бу турбинасынан тұрады (сурет 11а). 1-ші компрессордан сығылған ауа 2-ші жану камерасына беріледі, мұнда отынның жануы нәтижесінде 1370....1570 К орташа температуралы жұмыс денесіне айналады. 3-ші турбинаға келіп түсетін жұмысшы дененің мұндай жоғары температурасы қалақшалы аппараттардың суытылуын талап етеді. Газ турбинасында құрамдастырылған бу газды сұлбасының бу бөлігіндегі бу аса қыздырғышы салқындатқыш қондырғысы болып табылады. Мұнда газ турбинасының газы 4-ші қазандық-утелизаторынан келіп түскен буды аса қыздыру есебінен салқындайды. Буды аса қыздырғыштан шыққан бу газ сияқты пайдалы жұмыс атқаратын, 2-ші бу турбинасына жіберіледі. 5-ші турбинадан шыққан жұмыс істелінген бу 6-шы конденсатор арқылы 7-ші насоспен 4-ші қазандық-утилизаторға беріледі. Мұндай сұлбада жұмыс жасайтын бу газды қондырғының электрлік ПӘК-ті 50 дейін және одан жоғары мәнге ие. Қарастырылып отырған циклдағы жылу ауданы (пл.6238) болатын циклдың газ бөлігіндегі меншікті жылуымен анықталады (сурет 11б). Барлық қондырғының пайдалы жұмысы, газ циклының пайдалы жұмысы (пл.1234) мен бу циклының жұмысының (пл.abcd) қосындысымен анықталады.



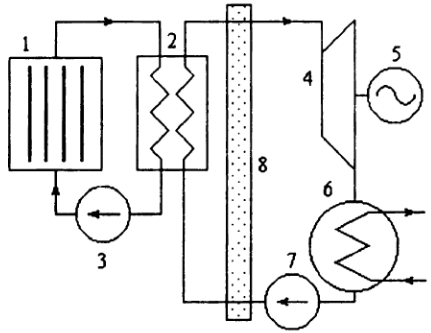
сурет 11. Бөлек жұмысшы денесі бар бу-газды энергетикалық қондырғы: а) схема, б) -диаграммадағы цикл: 1-компрессор, 2-жану камерасы, 3-газ турбинасы, 4-қазандық утилизатор, 5-бу турбинасы, 6-конденсатор, 7-насос.

Циклдын термиялық жылу шығыны ауд.15f6 (қазандық- утилизаторынан шыққан газдардың жылуы) және fade (конденсаторда бу күйінде жоғалған жылу) көрсетілген. Қарастырылып отырған жағдайды ескере отырып, циклдын термиялық ПӘК-ті мына қатынаспен анықталады

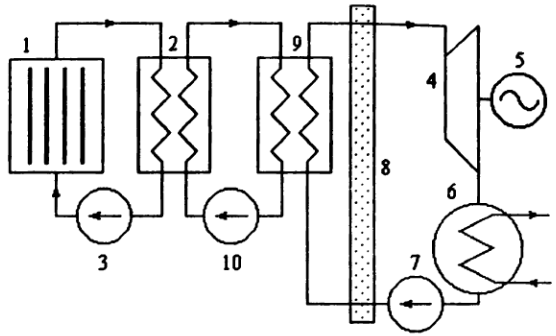
мұндағы будың шығыны.

§9.8 Атом электр станциясы циклдары

Атом электр станциясының жылу электр станциясынан айырмашылығы жылу алу үшін бу генераторы емес ядролық реактор қолданылады. Ядролық отын ретінде әдетте уран және плутоний, ал жылутасымалдағыш ретінде су, газдар(гелий, азот, көмірқышқыл газы), металлы (калий, натрий) және органикалық сұйықтықтар (көмірсутегі, дифенил, изопропилдифенил, нафталин және т.б.) қолданылады. Ядролық реакторда ауыр металлдар ядросының ыдырауы кезінде энергия бөлінеді. Ядролық реактордан жылуды алу циркуляциялы сұйық немесе газ көмегімен жүзеге асады. Жылу алудың бірнеше схемалары бар. Төменде атом қондырғысының екі, үш контурлы схемасы қарастырылады.

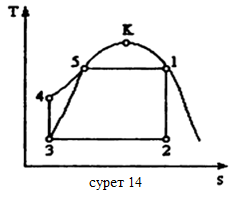


сурет 12



сурет 13

12-суретте екі контурлы атом электр станциясы, 13-суретте үш контурлы атом электр станциясы схемалары келтірілген: 1-ядролық реактор, 2-екі контур үшін бу генераторы, және үш контурлы схема үшін жылуалмастырғыш, 3-насос, 4-бу турбинасы, 5-электр генератор, 6-конденсатор, 7-конденсаттық насос, 8-биологиялық қорғаныс, 9-үш контурлы схема үшін бу генераторы, 10-насос. Бұл схемада Ренкин циклының жылутасымалдағышы 1-ші контурдың радиактивті жылутасымалдағышымен араласпайды. Бірінші контурдан екінші контурға жылудың тасымалдануы жылуалмастырғышта (бу генераторында) жүреді.



Атом электр станциясының циклдарында негізгі жылутасымалдағыш ретінде жоғары қысымдағы су, қайнаған су, газ, сұйық металлдар қызмет етеді. Бірінші контурда жылу тасымалдағыш ретіндегі судың кемшілігі –екінші контурда су буының жоғары параметрлерін алудың мүмкін еместігі, яғни аз қысымда су төменгі қайнау температурасына ие. Сол себепті Ренкин циклының ПӘК-і айтарлықтай төмендейді. Су буының өте жоғары параметрлерін алу үшін, аз қысымда өте жоғары қайнау температурасына ие жылутасымалдағышты қолдану керек. Сұйық металдар мұндай талаптарға толығымен сәйкес келеді.

14-суретте құрғақ қаныққан бумен жұмыс істейтін бу турбинасы қондырғысының циклы келтірілген. Мұндағы бу турбинасының қалақщаларындағы адиаба-талық ұлғаю; конденсатордағы бу конденсациясы; 7-конденсаттық насостағы суды сығу; 2-бу генераторында суды изобаралы қыздыру; бу генераторында бу түзілу. Бұл циклдың термиялық ПӘК-ті мен будың меншікті шығыны келесі формулалармен анықталады

14-суретте көрсетілген циклдың кемшілігі – бу турбина қалақшалары ылғалды буда жұмыс істейді, сондықтан турбина қалақшасының ресурсы эрозияға қатысты төмендейді. Будың құрғақтық дәрежесін арттыру үшін оны қайта қыздыру қажет.

**Бақылау сұрақтары**

1. – диаграммалардағы ылғалды бу аймағында Карно циклы қалай бейнеленеді?

2.Бу қондырғыларындағы ылғалды буда Карно циклы неліктен қолданылмайды?

3. Ренкин циклының термиялық ПӘК-ті мен пайдалы жұмысы қалай есептелінеді?

4.Бу параметрлері Ренкин циклының термиялық ПӘК-іне қалай әсер етеді?

5. Буды аралық қыздыру қандай мақсатта қолданылады?

6. Аралық бу қыздыруы бар бу турбинасының схемасы мен циклы қандай?

7. Аралық бу қыздыру циклының термиялық ПӘК-ті қалай есептеледі?

8. Бу турбинасы циклына қатысты жылу регенерациясы қалай жүреді?

9. Қоректік суды регенеративті қыздырудың негізгі схемалары қандай?

10. Екі бу жинақтауы болатын қоректік суды регенеративті қыздырудың араластырғыш схемасы қалай бейнеленеді? Осы жағдайда цикл жұмысы, алатын жылу, термиялық ПӘК және бу шығыны қалай есептелінеді?

11.Қоректік суды регенеративті қыздыруды бу турбинасы қондырғыларында қолдану себебі неде?

12. Бинарлық циклдар не үшін қолданылады?

13. циклдың толтыру коэффициенті деген не?

14.Сынап-су бинарлы қондырғының схемасы және -жылулық диаграммасы қандай?

15. Сынап-су бинарлы қондырғының циклды толтыру коэффициенті мен ПӘК-ті қандай мәндерге ие?

**Есептердің шығарылуы**

9.1 Бу турбина қондырғысы Ренкин циклы бойынша жұмыс істейді. Турбинаға кіре берісінде: және , конденсатордағы қысым . Будың меншікті шығыны және термиялық ПӘК-тін анықтаңыз.

*Шығарылуы:* -диаграммасы бойынша мыналарды табамыз: , ; су буының кестесі бойынша:, осыдан термиялық ПӘК мынаған тең:

.

Будың меншікті шығыны:

.

9.2 Бу турбина қондырғысы будың аралық аса қыздырғыш циклы бойынша жұмыс істейді. Турбинаға кіре берісінде: және , конденсатордағы қысым , аралық қыздыру кезінде температураға дейін жүреді. Будың меншікті шығыны және термиялық ПӘК-тін, жылу мөлшерін (бу генераторында) және конденсатордағы жылу шығынын анықтаңыз.

*Шығарылуы:* -диаграммасы бойынша мыналарды табамыз: , , , су буының кестесі бойынша: ; осыдан Ренкин циклы үшін термиялық ПӘК мынаған тең:

.

Бу генераторындағы буға келтірілген жылу мынаған тең: ; ал конденсаторға берілген жылу мынаған тең: немесе

.

Будың меншікті шығыны мынаған тең:

9.3 Егер бу турбинасының қуаты кезінде будың бастапқы параметрлері: және , конденсатордағы қысым болатын бу қондырғысының негізгі циклының (Ренкин) термиялық ПӘК-тін анықтаңыз.

*Шығарылуы:* -диаграммасы бойынша будың бастапқы параметрлері және кезінде меншікті энтальпия ; қысымға дейін адиабаталы ұлғаю соңында меншікті энтальпия . Ал кесте бойынша кезінде .

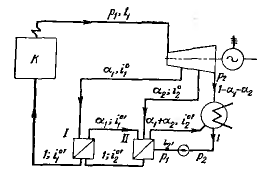
Осыдан термиялық ПӘК мынаған тең:

Будың меншікті шығыны:

Будың сағаттық шығыны:

.

9.4 Бу турбинасына параметрлері және тең бу келіп түседі. Турбинаның екі регенеративті алымы бар. Алымдардың қысымы және . Конденсатордығы қысым тең. 1МДж және 1 кВт·сағ өндірілген энергия үшін будың меншікті шығыны және регенеративті циклдын термиялық ПӘК-тін анықтаңыз. Содан соң бұл көрсеткіштерді регенерациясыз цикл көрсеткішімен салыстырыңыз. Регенеративті қыздыруды енгізуден болатын үнемділік мөлшерін есептеңіз.



*Шығарылуы:* жоғарыда көрсетілген суретке сәйкес - диаграммасы мен кестеге сәйкес энтальпияларды табамыз: ; ; ; ; және . және алымдарының мәнің табу үшін қыздырғыштардың балансын құрамыз. Бірінші қыздырғыштың балансы мынаған тең:

Екінші қыздырғыштың балансы:

Екі теңдікті біріктіре отырып шешкенде, және екенін табамыз. Регенеративті циклдын термиялық ПӘК-ті

Будың меншікті шығыны:

Регенерациясыз циклдын (Ренкин циклы) термиялық ПӘК-ті:

Бұл цикл буының меншікті шығыны:

Регенеративті қыздырғышты енгізу барысындағы алынған үнемділік нәтижесі мынаған тең:

.

Бақылау есептері

9.5 Бу турбина қондырғысының екі аралас қыздырғыштарында қоректік суды регенерациялы қыздыру жүзеге асады. Турбинаға кіре берісте: қысым мен температура , . Бу қысымы бірінші алымда , ал екінші алымда , конденсатордағы бу қысымы . Регенеративті циклдын термиялық ПӘК-нің Ренкин циклымен салыстырғандағы ұлғаюын анықтаңыз.

9.6 Турбинадағы жоғары қысымды цилиндрде (ЖҚЦ) жұмыс істелінген бу қысыммен аралық қыздырғышқа бағытталады. Содан соң изоэнтропиялық ұлғаю кезінде төменгі қысымды цилиндрде (ТҚЦ) соңғы қысымы кезінде құрғақтылық дәрежесі болатындай, буды аралық қыздырғышта қанша температураға дейін қыздыру қажет? *Жауабы:* дейін.

9.7 Егер және турбинаға қатысты ішкі ПӘК-ті тең турбина сыртындағы будың күйін және қондырғының ішкі ПӘК-ін есептеңіз.Насос жұмысы ескерілмейді. Есесптідиаграммасын қолдана отырып шығарыңыз. *Жауабы:*

9.8 Қуаты турбогнератордағы электрэнергиясын өндіруге кеткен будың меншікті шығыны құрайды. Егер электр генераторының ПӘК-і екендігі белгілі болса, будың сағаттық шығыны және турбинаға қатысты эффективті ПӘК , циклдың термиялық ПӘК-ті неге тең? Турбина соплосының алдындағы бу параметрлері және . Турбинадан (кері қысымды) шыға берісіндегі будың қысымы . Қоректік судың температурасы . Насостың жұмысы ескерілмейді.

*Жауабы:* ; ; т/сағ.

9.9 және тең бастапқы параметрлерімен жұмыс жасайтын бу турбинасы қондырғысында, өзіндік қажеттілігіне (өндірісітің) екі алым алынады. қысым кезінде 20 000 кг/сағ бу алынады және кезінде 10 000 кг/сағ алынады. Конденсатордағы қысым . Егер 0,80 болса, турбинаның ішкі қуатын анықтаңыз және қазандық қондырғысының өнімділігі 100 т/сағ болғандағы жылудың өлшемсіз меншікті шығының табыңыз. Қоректік насостың жұмысы ескерілмейді.

*Жауабы:* 25 350 квт; 3,59.

9.10 Қуаты 200 МВт тең бу турбина қондырғысы келесідей параметрлермен жұмыс жасайды: бастапқы қысымы , температура . Аралық қыздырылу қысымда бастапқы температураға дейін жүргізіледі. Конденсатордағы қысым . Қоректік судың температурасы .

Егер отынның жану жылуы 30 000 кДж/кг, ал қазан агрегатының ПӘК-ті 0,91 тең болғандағы отынның сағаттық шығынын В, кг/сағ анықтау қажет. *Жауабы:*В = 49 000 кг/сағ.

9.11 Бу турбина қондырғысындағы шекті регенерация жылуының термиялық ПӘК-тін анықтаңыз. Турбина алдындағы будың параметрлері мынаған тең: және температура , ал конденсатордағы қысым . Су температураға дейін қыздырылады. Насостың жұмысы ескерілмейді.

*Жауабы:* .

X ТАРАУ. МҰЗДАТҚЫШ МАШИНАЛАРДЫҢ ҚАЙТЫМДЫ ЦИКЛДАРЫ.

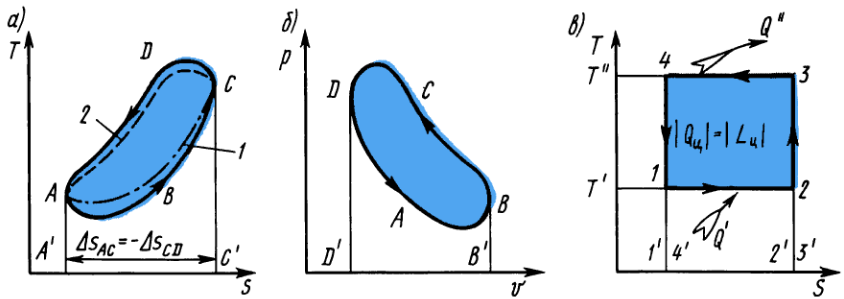
10.1 Қайтымды цикл туралы түсінік. Қайтымды Карно циклы.

Термодинамика циклының қайтымды циклы деп термодинамикалық жүйеге жылудың берілуі жұмысшы дененің өте төменгі температурада жүретін циклды айтады (1, а-в). Қайтымды циклды жүзеге асыру үшін қоршаған ортада кем дегенде әр түрлі температурадағы екі дене болуы шарт: төменгі температуралы дене термодинамикалық жүйе үшін жылу көзі ретінде қызмет етсе, ал жоғары температуралы дене жұмысшы денеден жылуды қабылдап яғни, жылу қабылдағыш қызметін атқарады. Жұмысшы денеге жылудың берілу процессі Ts-диаграммада А-В-С процесс сызығымен сәйкес келеді, жүру барысында жұмысшы дене энтропиясы -да жоғарылайды. C-D-A сызығы қоршаған ортадағы жылу қабылдағышқа жұмысшы денеден жылудың алыну процессін көрсетеді және процесс барысынағы температура жұмысшы дене температурасынан да төмен болуы қажет.

Жылу көзінен жұмысшы денемен алынған жылу мөлшері -диаграммасындағы А´АВСС´ ауданымен, ал жылу қабылдағышқа жұмысшы денемен берілген жылу мөлшері - А´АDСС´ ауданымен көрсетілген. Жылудың алыну мен берілу процесстеріндегі абсолютты энтропия өзгерісі бірдей болады, жылудың алынуы жоғары температурада жүреді, олай болса жұмысшы денеден алынған жылу мөлшері берілген жылу мөлшеріне қарағанда қайтымды циклде жоғары болады.

Егер алынған жылудың абсолютты мәнің Q´´, берілген жылудың абсолютты мәнін Q´ деп белгілесек, онда толық циклдын суммалық жылу мөлшері болса, онда және . Осылайша, қайтымды циклда жұмыс жасаған термодинамикалық жүйе, қоршаған ортаға жылу түрінде энергия береді.

Термодинамиканың бірінші заңына сәйкес , , осыдан және . Бұл дегеніміз, қайтымды циклда жұмыс жасаған термодинамикалық жүйе, қоршаған ортадан жұмыс түрінде энергия тұтынады.Осыдан кейін қайтымды циклда жұмысшы дененің ұлғаю процессі сығылу процессіне қарағанда, төменгі қысымда жүруі қажет (1 б).



сурет 1. Қайтымды термодинамикалық циклдың схемасы: а) диаграммада, б) диаграммада, в) қайтымды Карно циклы: 1-жылу көзінің температурасы, 2-жылу қабылдағыштың температурасы.

Қайтымды циклдың маңызды ерекшелігі термодинамикалық жүйе көмегімен мөлшерде қоршаған ортадағы азырақ қыздырылған денеден жылуды алу және мөлшерде жоғарырақ қыздырылған денеге жылуды беру болып табылады.Сонымен қатар азырақ қыздырылған денеге қарағанда, жоғарырақ қыздырылған дене жылуды көбірек алады, циклдын суммалық жұмысы мынаған тең:

(10.1)

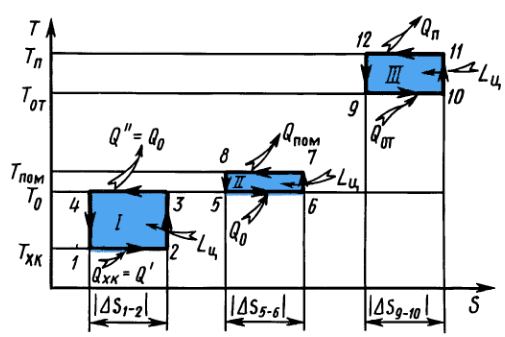
Ең негізгі қайтымды циклдардың бірі Карно циклы, яғни екі тепе- тең изотермиялық және екі тепе-тең адиабаталық процесстерден тұрады (1 в). Термодинамикалық жүйенің қайтымды Карно циклында жұмысшы дене 1-2 процессінде жылу көзінен Т´ температурасына ие жылу мөлшерін алады. 1´122´ ауданы алынған жылу эквивалентінің мөлшері. Адиабаталық сығылу нәтижесінде 2-3 процессінде дене, қоршаған ортадағы жылу қабылдағыш Т´´ температурасын аз мөлшерде асатын температураға дейін көтеріледі. 3-4 тепе – тең изотермиялық процессте жұмысшы денеден жылуды алып, оны жылу қабылдағышқа беру мүмкіндігін туғызады. Қоршаған ортада берілетін жылу мөлшері 1´432´ ауданымен көрсетілген. Жұмыстық дененің тепе-тең 4-1 адиабатты ұлғаю процессінде оның температурасы кенеттен Т´ төменгі жылу көзінің температурасына дейін төмендеп, кейін цикл қайталанады. Циклда жұмыс түрінде берілетін қорытынды энергия мөлшері 1234 ауданымен, жылу қабылдағышқа жылу көзінен жылу түрінде алынған энергиямен беріледі, жылу көзінен жылу күйінде алынған кезде: .

§10.2 Қайтымды цикл эффективтілігінің көрсеткіші.

Мұздатқыш циклының мәні қоршаған ортадағы мұздатқыш дененің өзіндік температурасынан төменгі температураға ие денеден жылуды алу циклы болып табылады. Мұндай процесс жасанды салқындату деп аталады. Жасанды салқындату XIX ғасырдың ортасында тамақ өнімдерін ұзақ уақытқа сақтау үшін кеңінен қолданыс тапты. Заманауи техникада жасанды салқындату газды сұйылтуда, материалдарды термиялық өндеуде, медицинада және т.б қолданылады.

Мұздатқыш машиналардеп қайтымды циклды жасанды салқындату үшін қолданылатын қондырғыны айтады. 2 суретте Карноның мұздатқыш циклы көрсетілген, мұнда температураға ие қоршаған орта жылу қабылдағыш ортасын болған жағдайында 1-2-3-4 қолданылады.

Мұздатқыш циклының пайдалы эффектісі мұздатқыш машинаның жұмысшы денесі, температураға ие салқындатылатын заттардан жылу мөлшерін алу болып табылады. Мұндай жылу мөлшерін мұздатқыш өнімділік циклы деп атайды.



сурет 2. Қайтымды термодинамикалық циклдың әр түрлілігі: I-мұздатқыш Карно циклы, II-жылуландыратын жылулық насос үшін Карно циклы, III-төменгі температуралы жылуды утилизациялау үшін жылулық насос циклы.

Мұздатқыш өнімділігі мен циклға жұмсалған жұмыстың суммасы энергияға тең, яғни , бұл энергия температурасы тең қоршаған ортаға беріледі. Мұздатқыш циклының эффективтілігі мұздатқыш коэффициентімен анықталады, пайдалы эффектісінің (мұздатқыш өнімділігі) жұмсалған эффектіге қатынасын береді, яғни

(10.2)

Басқа циклдармен салыстырғанда Карно циклы қоршаған орта және мұздатқыш камерасы температурасының берілген интервалында мұздатқыш коэффициентінің үлкен мәніне ие.

Мұздатылып отырған обьектімен қоршаған орта арасындағы температура айырымы жоғарылаған кезде, мұздатқыш коэффициенті күрт төмендейді. Жылулық насос дегеніміз қайтымды термодинамикалық цикл бойынша жұмыс істейтін, аз қыздырылған денеден жылуды алып, жоғары қыздырылған денеге беру жұмысын атқаратын машинаны атайды.

Бұл жағдайда пайдалы эффект жоғары температуралы деңгейге берілетін жылу болып табылады. Жылулық насостарды қолданудағы мысалды қарастырсақ, У.Томсон 1852 жылы динамикалық жылыту деп аталатын насосты ұсынған, алайда бұл тек XX ғасырдың 30 жылдары орындалды.Бұл жағдайда жылу көзі ретінде төменгі температурада қоршаған орта қолданылды, мысалы сыртқы ауа жылытатын ғимараттың температурасына қарағанда, төменгі температураға ие. Жоғары температурада жылуды қабылдаушы жылытылатын ғимараттағы ауа болып табылады. 5678 ауданымен көрсетілген цикл жұмысының шығыны есебінен жылытылып жатқан ғимаратқа жылуға тең сыртқы ауадан алынған жылу беріледі (2 сурет).

Қайтымды жылыту циклының эффективтілігі жылыту коэффициентімен сипатталады, яғни жылытылып жатқан ғимаратқа берілетін жылудың пайдалы эффектісінің, цикл жұмысының жұмсалатын эффектісіне қатынасын көрсетеді:

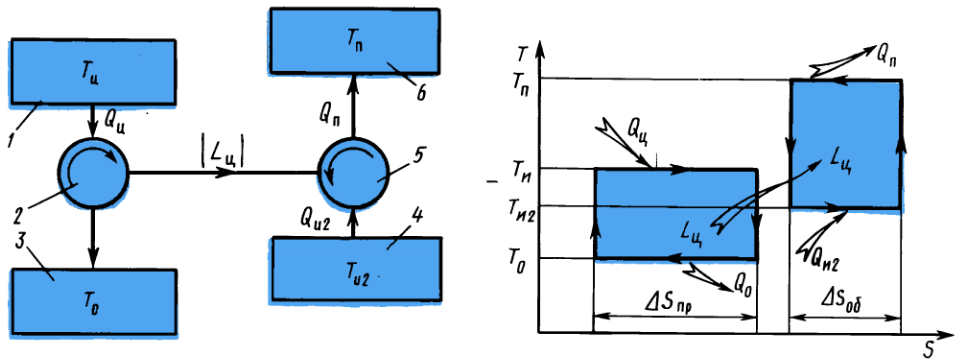
(10.3)

Қайтымды Карно циклының тепе-теңдік жағдайында теориялық жылыту коэффициенті мына қатынаспен анықталады:

(10.4)

болса, онда жылыту коэффициенті оң немесе бірден жоғары. Мысалы, сыртқы ауа температурасы 0 және ғимарат температурасы 25 кезінде, қайтымды Карно циклының жылыту коэффициенті 12 –ге тең.

Сонымен қатар жылулық насостарды технологиялық және басқа да қондырғылардан шыққан қалдық жылуларды утилизациялау үшін қолданылады (сурет 2, 9-10-11-12 Карно циклы ). Дайын өнімді суыту кезінде түтінді газдармен шыққан және температураға ие басқа да жылутасымалдағыштардан алынған жылу жоғары температуралы жылулық насос көмегімен тұтынушыға жіберіледі. Тұтынушы жылуын алады. Мұндай жағдайда цикл эффективтілік коэффициентінің жылыту коэффициентінің орнына өзгеріс коэффициенті деген термин қолданады.



сурет 3 сурет 4

сурет 3. Трансформатордың принципиалды схемасы: 1-«күшті» жылу көзі, 2-двигатель, 3-қоршаған орта, 4-трансформацияланатын жылу көзі, 5-жылулық насос, 6-жылуды тұтынушы.

сурет 4. Үдетілетін трансформатор үшін Карно циклы.

Термотрансформатор(немес жылу трансформаторы) тура және қайтымды термодинамикалық циклда, бір деңгейден екінші бір деңгейге жылуды ауыстыру үшін қолданылатын қондырғыны айтады. Егер цикл тепе-теңдік процессте құралған болса, бұл процесс қайтымды болып табылады. Жалпы трансформаторлар екі жылу көзімен жұмыс жасай алады (сурет 3): температурасымен «күшті» көзі 1 жұмыстың алынуы мен тура циклдың аяқталуы үшін жұмыс атқарады, ал температуралы «жылулық» көзі 4 трансформациядағы негізгі жылу мөлшерін басқа температуралы деңгейге жеткізеді. Барлық жағдайда жылу трансформациясының пайдалы эффектісі болып тұтынушымен алынған жылу , ал жұмсалған эффектіге - жылу мөлшері, және жоғары температураға ие термотрансформаторға келген жылу жатады.

Термотрансформатор циклы эффективтілігінің мәні жылу өзгерісінің коэффициентінің мәнімен сипатталады.

(10.5)

Термотрансформация циклының ең үлкен термодинамикалық эффективтілігі- термотрансформатордың қайтымды немес тура циклдары қайтымды Карно циклы болған жағдайда жетеді (4 сурет). Бұл жағдайдың өзгеріс коэффициентінің мәнін анықтау үшін сәйкес температуралар арқылы, қайтымды және тура циклда энтропия өзгерісінің абсолютты мәні арқылы жылуды табамыз. Олай болса, ; ; , осыдан

(10.6)

Тура және қайтымды циклда жұмысы абсолютты мәні бойынша бірдей болғандықтан мынаған тең:

(10.7)

(10.7) формуласын (10.6) формуласына қоя отырып, мынаны аламыз:

(10.8)

Егер трансформацияланатын жылу қоршаған ортадан алынатын болса, онда

(10.9)

кезінде жоғары мәніне сәйкес жылудың температуралық потенциалының трансформациясы орын алады, нәтижесінде төменгі потенциалды жылу шығыны есебінен аз мөлшерде болсада, жоғары потенциалды жылу алуға болады. Жоғары температуралы деңгейге жылуды жіберетін трансформатор жоғарылатқыш трансформатор деп аталады. Жоғарылатқыш трансформатордың өзгеріс коэффициенті бірден төмен. Термотрансформаторлық жүйелердің техникалық түрде жүзеге асуы егер тұтынушы жылуының температурасына қарағанда төменірек температура кезінде арзан жылу көзі бар болса, экономикалық түрде тиімді болып табылады. Мұндай арзан жылу көздеріне, мысалы технологиялық пештер немесе двигательдерден щыққан қалдық газдар, өндірістегі ыстық бірақ ластанған су, геотермалды сулар және т.б жатады. Бұл жағдайда әдетте мұндай жылу көзімен қоршаған орта арасындағы орныққан температура айырымы, үнемді жылулық двигателін құруға жеткіліксіз. Сондықтан термотрансформатордың тура және қайтымды циклдарын абсорбционды деп аталатын қондырғыларда жүзеге асырған жөн.

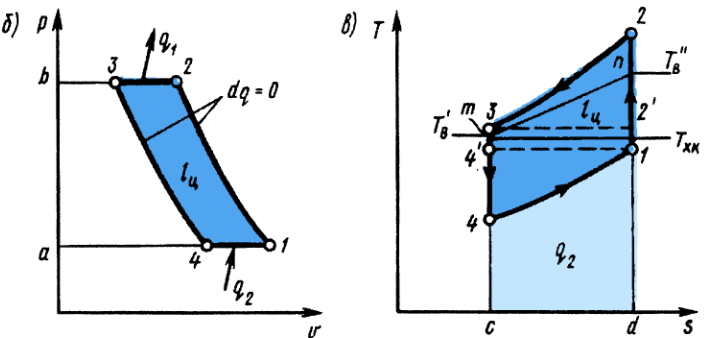
§10.3 Газды мұздатқыш машинасының циклы

AN=20-21

Практикада алғашқы мұздатқыш қондырғыларының бірі ретінде газды мұздатқыш машинасы қолданылды. Газды мұздатқыш машинасының схемасы 5-суретте көрсетілген. Бұл газды мұздатқыш машинасы I-мұздатқыш камерадан, II-компрессорден, III-жылуалмастырғыштан, IV-пневматикалық двигательден (детандер) тұрады. II-компрессормен сығылған газ III-жылуалмастырғышта ағымды сумен салқындатылады. Ағымды су температурасы кіре берістегі -температурадан шыға берістегі -температураға дейін көтеріледі.



сурет 5. Газды мұздатқыш машинасының схемасы: I-мұздатқыш камера, II-компрессор, III-жылуалмастырғыш, IV-детандер.



сурет 6. Газды мұздатқыш машинасының циклы: б) диаграммада, в) -диаграммада

II-компрессор I-мұздатқыш камерадан газды сорып алады және 1-2 адиабаталық сығылудан кейін газды III-жылуалмастырғышқа береді. 1-2 процесінде жұмысшы дене температурасы температурасына өседі. Осы кезде компрессор білігіне шығындалған жұмыс ауданына тең (сурет 6б), ал температура болады (сурет 6в). изобаралық процесінде газ салқындатқыш суға меншікті жылуын береді. Ал газдың температурасы мен меншікті көлемі мәндеріне жетіп төмендейді. IV-детандорда адиабаталық ұлғаюдан кейін жұмысшы дененің температурасы температурасына дейін кемиді. Бұл температура мұздатқыш камера температурасынан да төмен болады. Осы кезде атқарылған жұмыс ауданына тең. Детандердің жұмысы сыртқы тұтынушыға мысалы, электргенераторына беріледі.

Мұздатқыш камерада газ қоршаған ортадан жылуын алатын изобаралық процесі жүреді. Бұл процессте жұмысшы дененің температурасы мен меншікті көлемі мәндеріне дейін артады. Осылайша цикл қайталанады. Циклға кеткен жұмыс шығыны ауданына тең. Салқындатқыш суға берілетін меншікті жылуы ауданымен өлшенеді және шамасына тең. Сонымен қарастырып отырған циклдың мұздатқыш коэффициенті

және адиабаталық процесстер үшін төмендегі қатынастар орынды болғандықтан,

өрнегін келесі түрде жазуға болады:

(10.10)

Осылайша, немесе температуралар қатынасы бірге жақын болған сайын газды мұздатқыш машиналары циклының экномикалық тиімділігі жоғары болады. Қандайда бір шарттарға байланысты III-жылуалмастырғыштағы салқындатқыш су температурасының төмендеуі шамасының өсуіне әкеледі. мен температуралар мәндері аз болса, онда қысымы да төмен болады. Бұл компрессордың шыға берісіндегі қысымы компрессор білігіне жұмсалатын жұмыс шығынын азайтады. қысымының төмендеуімен және қатынастары кемиді. Мұздатқыш камераның температурасы жоғары болған сайын мен температуралары жоғары, мөлшері көп, цикл жұмысы аз, ал сәйкесінше мұздатқыш коэффициенті көп болады.

Газды мұздатқыш машинасының мұздатқыш коэффициенті кері Карно циклының мұздатқыш коэффициентінен өзгеше болады. Карно циклын мұздатқыш камерада болғанда жылуын қайтымды ала отырып, болғанда салқындатқыш суға қайтымды жылуын бере отырып жүзеге асыруға болады. 6 в-суретте кері Карно циклы пунктирлі сызықпен көрсетілген. аудандарын ауданымен салыстыра отырып, газды мұздатқыш машинасының нақты циклының экономикалық тиімділігі қайтымды кері Карно циклынан төмен екендігін көруге болады. Осы екі циклды мына шарттарда салыстырайық: циклдар температура аралығында жүзеге асатын болсын. Газды мұздатқыш машина циклында . Қайтымды Карно циклында деп қабылдай отырып, газды мұздатқыш машина циклындағы температураны анықтаймыз:

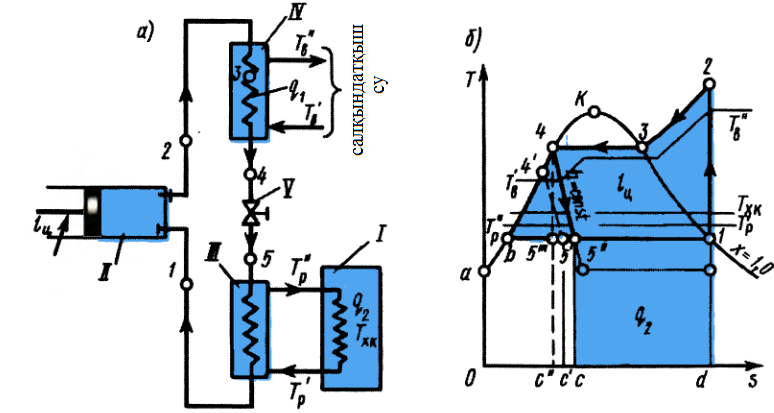
Газдымұздатқыш машина циклында (10.10) теңдеуіне сәйкес

Қайтымды Карно циклында

Сонымен, газды мұздатқыш машина циклының салқын өндіргіштігі қайтымды Карно циклымен салыстырғанда алты есе төмен екендігін көруге болады. Газды мұздатқыш машиналары үшін жұмысшы дене шығынының көптігінен экономикалық тиімсіз болып табылады. Сондықтан соңғы кезде газды турбокомпрессорлы мұздатқыш машиналар қолданыла бастады. Регенерациялы циклды қолдану арқылы осындай машиналардың экономикалық тиімділігін көтеруге болады.

§10.4 Бу компрессорлы мұздатқыш машинасының циклы

Жұмысшы дене ретінде (хладоагент) температурадан аспайтын температурада және атмосфералық қысымда қандай да бір сұйықтың ылғалды буын қолдануға болады. Бұл жағдайда мұздатқыш циклда жылудың келуі мен кетуін изотермиялық процесс арқылы жүргізіп, кері Карно циклына жақындатуға болады. 7а-суретте компрессорлы мұздатқыш машинасының схемасы келтірілген.



сурет 7. Бу компрессорлы мұздатқыш машина: а) схема, б) -диаграммадағы бу компрессорлы цикл: I-мұздатқыш камера, II-компрессор, III-буландырғыш, IV-конденсатор, V-реттегіш (дроссельдік) вентиль.

температурадан төменгі температура мен атмосфералық қысымнан жоғарғы қысымда (1-нүкте) -буландырғыштан хладоагент ылғалды немесе құрғақ қаныққан бу ретінде -компрессорге түседі. -компрессорде адиабаталық сығылудан кейін бу температурасы -салқындатқыш су температурасынан жоғары болады (сурет 7б). Сығылған бу жылуын салқындатқыш суға бере отырып, изобаралық процессте бу конденсациясы жүретін -салқындатқышқа (конденсатор)келіп түседі. -диаграммасынан конденсаторға түсетін хладоагент ылғалды бу болған жағдайда, жылудың шығуы (бу түзілу процесі) толығымен изотермиялық шарттарда жүретіндігі шығады. процесінде салқындатқыш суға бу түзілу жылуы ғана емес, сонымен қатар буды аса қыздыру жылуы да жиберіледі. -нүктесінде бу толығымен конденсацияланады. Тұрақты энтальпияда жүретін процесінде конденсат -реттегіш вентиль арқылы өтеді. Реттегіш вентильде конденсат булану қысымына дейін дроссельденеді. Екі фазалы аймақта дроссельдену процесі барлық уақытта температураның төмендеуімен жүреді. -буландырғышта булану процесі жүреді және хладоагент қайтадан компрессорге түскеннен кейін цикл қайталанады.

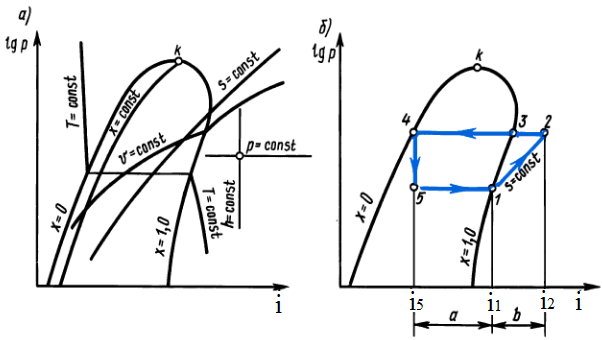
Мұздатқыш камерада сақталатын заттың жылуы -камера мен -буландырғыш арасында циркуляцияланатын сұйық жылутасымалдағыш көмегімен буландырғышқа беріледі. Қарастырып отырған цикл соңында салқындатқыш камерада алынатын жылу мен компрессор білігінде атқарылатын жұмысқа сәйкес келетін жылумен бірге конденсатор арқылы өтетін салқындатқыш суға беріледі. Мұндай мұздатқыш машинасын бу компрессорлы деп атайды, өйткені буды сығу компрессор көмегімен атқарылады.

Компрессорде хладоагентті адиабаталық сығу жұмысы ауданына тең. Салқындатқыш камерадан кететін жылуына -диаграммадағы ауданы сәйкес келеді. Қарастырып отырған букомпрессорлы машинасының мұздатқыш коэффициенті төмендегідей түрде анықталады

(10.11)

Осындай мұздатқыш машинасының экономикалық тиімділігін арттыру үшін -диаграммадағы ауданын ұлғайту және ауданын азайту қажет. ауданының өлшемі мұздатқыш камерадағы температурадан тәуелді. (10.11) теңдеуден температурасы, температура сызығы, булану сызығы төмендегенде мұздатқыш машинаның экономикалық тиімділігі де төмендейтінін байқауға болады. ауданы салқындатқыш су температурасымен байланысты сызығынан тәуелді. Салқындатқыш су температурасы төмендегенде мұздатқыш машинаның экономикалық тиімділігі артады, өйткені компрессорде хладоагентті сығу үшін атқарылатын жұмыс шығыны азаяды. Конденсатордан шыға берісте хладоагентті қатты салқындату жолымен де қондырғының тиімділігін арттыруға болады. Аса қатты салқындатуды арнайы жылуалмастырғыш-салқындатқыш немесе конденсатордың өзінде жүзеге асыруға болады. Аса қатты салқындату процесінде жылуына сәйкес ауданы ауданына ұлғаяды. -диаграммада аса қатты салқындату процесі төменгі шекаралық сызықпен сәйкес келеді. Реттегіш вентильді жабу жолымен дроссельдеу тереңдігін арттыра отырып, буландырғыш алдындағы хладоагент температурасын және мұздатқыш камерадағы температураны төмендетуге болады (сурет 7б, процесс). Вентильді аша отырып, температурасын көтеруге болады.

Қарастырып отырған мұздатқыш машинада детандер орнына дроссельдеуші вентиль қолданылады. Бұл қондырғы құрылымы қарапайым болғанымен тиімділігі жоғары емес. Вентиль орнына детандер қолданылатын болса, онда дроссельденудің қайтымсыз процесінің орнына детандердегі адиабаталық ұлғаю процесі жүреді. Олай болса, ауданымен анықталатын жылу мөлшерінің өсуімен және ауданында атқарылатын жұмыс шығыны аз болғандықтан мұздатқыш машинаның экономикалық тиімділігі артады. Алайда сұйық жұмысшы денесі үшін детандерді жасау техникалық қиындық туғызады. Букомпрессорлы мұздатқыш машина аз температура өзгерісінде газды мұздатқыш машинасына қарағанда тиімді. Ал температура өзгерісі үлкен болатын жағдай үшін газды мұздатқыш машинасы өте тиімді. температурасын алу үшін букомпрессорлы машиналары аралығындағы температураларды қолданады. Букомпрессорлы машина циклын есептеу үшін диаграммалары қолданылады. диаграммасы көмегімен мұздатқыш коэффициентін анықтауға болады (сурет 8а). 8б-сурет бойынша мынадай қатынас түрінде анықтауға болады: .



сурет 8. диаграммасы: а) диаграмма схемасы, б) диаграммасындағы бу-компрессорлы цикл.

Букомпрессорлы қондырғы үшін хладоагенттер мынадай: циклда температураның белгіленген интервалында хладоагент ылғалды бу күйінде болуы; осы температуралар интервалында хладоагенттің ылғалды буының қысымы өте төмен немесе жоғары болмауы қажет, деген талаптарға сай болуы керек. Хладоагенттің бу түзілу жылуы температурасында өте жоғары болуы керек. Салқындатылатын көлемнен алынатын жылуы энтропиялар айырымынан тәуелді, ал айырымы көп болған сайын энтропиялар айырымы да көп болады. Бұл жағдайда .

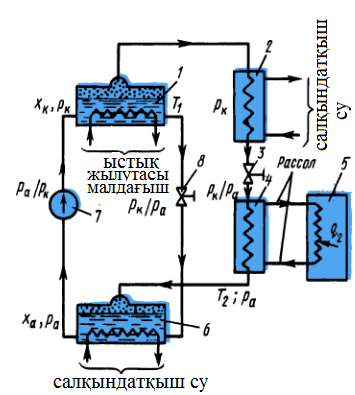
Өнеркәсіптік қондырғыларда жиі қолданылатын ең жақсы хладоагенттердің бірі – аммиак болып табылады. Тұрмыста қолданылатын мұздатқыштарда аммиак улы-зиянды болғандықтан және коррозияға жылдам ұшырайтындықтан қолданылмайды. Мұндай қондырғыларда хладоагент ретінде қарапайым көміртекті, фторхлор қолданылады. Олар химиялық орнықты, зиянсыз және құрылымдық материалмен өзара әрекеттеспейді. Алайда, бұл хладоагенттердің бутүзілу жылуы аз болғандықтан, аммиакқа қарағанда шығыны біршама жоғары болады.

§**10.5 Абсорбциялы мұздатқыш машиналардың циклы**

Өзінің жұмыс процессінде жылу энергиясын тұтынатын мұздатқыш машиналардың бірі - абсорбционды мұздатқыш машиналар. Мұндай машиналарда жұмысшы дене ылғал бу болып табылады. Абсорбциялы мұздатқыш машиналардың циклы бу компрессорлы циклынан буды сығу тәсілімен ғана ерекшелінеді. Абсорбция дегеніміз белгілі бір шартта кейбір денелердің басқа денені сіңіру қабілетін айтады. Мысалы, таза заттың буы сол заттың сұйық күйімен (конденсатталған) сіңіріледі бірақ бір шартпен ғана, сұйықтың температурасы бу температурасынан төмен болғанда. Бұл жағдайға қарағанда ерітінді жоғары да айтылғандай шартты бұза отырып, бір құрамның бу ерітіндісімен басқа құрамның сұйық ертітіндісін абсорбциялау қабілетіне ие. Мұндай ерітінді қасиеті қарастырылатын мұздатқыш машиналарда қолданылады (сурет 9).

Су аммиагы ерітіндісімен аммиак концентрациясының булануы қысымда және температурада 1-ші бу генераторында жүреді. Сонымен қатар булану процессіне ыстық жылутасымалдағышпен келетін жылу мөлшері жұмсалады.Ерітіндінің төменгі қайнау компонентіне аммиак жатады.

Бу генераторында орын алатын төменгі температурада ертінді бетіндегі су буының парциальды қысымында ерітіндіден таза аммиакты бу бөлінеді. 2-ші конденсаторда тұрақты қысымда және температурада алынған бу сұйыққа айналады. 3-ші редукциялы вентильде сұйық аммиактың қысымы, ерітінді концентрациясы деңгейде ұсталынып тұратын 6-шы абсорбердегі қысымға дейін төмендейді. Бұл процесс –ден - ге дейін температураның төмендеуімен жүреді. Кейін түзілген аммиактың ылғал буы құрғақтылық дәрежесі бірге дейін жоғарылайтын 4-ші буландырғышқа келіп түседі.



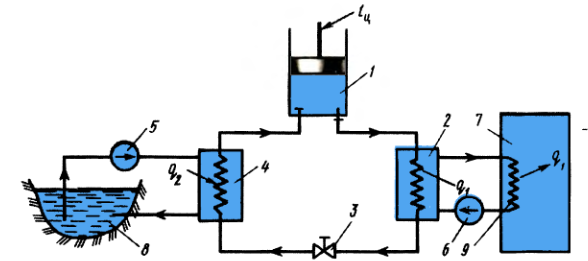
сурет 9. Абсорбциялық мұздатқыш машиналардың қарапайым схемасы: 1-бугенераторы, 2-конденсатор, 3-редукциялы вентиль, 4-буландырғыш, 5-мұздатқыш камерасы, 6-абсорбер, 7-насос, редукциялы вентиль.

Булану процессі жүруі үшін қажетті жылу мөлшері 5-ші мұздатқыш камерасында ораналасқан денеден буландырғышқа келіп түседі. Кейін буландырғыштағы температурада және қысымда құрғақ қаныққан бу 6-шы абсорбердің бу кеңістігіне келіп түседі. Абсорбер аммиак ерітіндісімен толтырылған. Бұл ерітіндіден алынған бу қысымда және буландырғыштан келіп түскен буға қарағанда жоғары температураға ие. Сондықтан салқын бу ерітіндімен сіңіріледі. Бу генераторында және абсорберде мұздатқыш машиналардың жұмысы кезінде ерітінді концентрациясының тұрақты деңгейі ұсталынып тұрады. Бұл мақсатпен 6-абсорберден қаныққан аммиак ерітіндісі 7-насос көмегімен белгілі бір мөлшерде 1-бу генераторына келіп түседі. Бір уақытта буланудан кейін азайған аммиак ертіндісі 1бу генераторынан 8 редукционды вентильге бағытталады және -дан -ға дейінгі қысымда дроссельденіп 6 абсорберге келіп түседі.Бұл азайған ерітінді өзінің қасиеті бойынша суға жақын, сондықтан оның температурасы дроссельдеу процессінде тұрақты және бу генераторындағы температурасына тең. Бу генераторындағы қысымы конденсатордағы салқындатқыш су температурасына сәйкес келеді және сол уақытта абсорбердеге қысымы мұздатқыш камерасындағы температураға сәйкес келеді.

Бу компрессорлы қондырғылардан ерекшелігі компрессор жұмысын абсорбционды түйін атқарады. Ол 1 бу генераторынан, 6 абсорберден,7 насостан және 8 редукционды вентильден тұрады. Олай болса, компрессор білігіне қажетті механикалық жұмыстың орнына абсорбционды машинада ыстық (бу генераторында) және суық (абсорберде) жылу көздерінің температуралар айырымы қолданылады. Егер насос жұмысын ескермейтін болсақ, онда коэффициент , мұндағы мұздатқыш камерасына алынған жылу мөлшері (пайдалы эффект), ал бу генераторында жұмасалған жылу мөлшері. ξ шамасын *жылу қолдану коэффициенті* деп атайды.

§**10.6 Жылулық насос циклы. Жылудың термохимялық трансформаторы.**

Қоршаған орта жылуын пайдалана отырып ғимаратты жылыту үшін қолданылатын жылулық насос, 1 компрессор, 2 конденсатор, 3 реттейтін вентиль және 4 буландырғыштан тұрады (сурет 10).



сурет 10. Жылулық насостың схемасы: 1-компрессор, 2-конденсатор, 3-вентиль, 4-буландырғыш, 5,6-насос, 7-тұтынушы, 8-су қоймасы, 9-жылыту жүйесі.

Бұл элементтер қарапайым компрессорлы мұздатқыш қондырғысын құрайды. Хладоагенттің булануы кезінде 4 буландырғышта 8 су қоймасынан 5 насоспен берілетін судан жылуын қабылдайды. Мұздатқыш қондырғысының 2 конденсаторында жылуы хлодагентті сығу нәтижесінде «қайтымды» сумен 7 ғимараттың 9 жылыту жүйесіне беріледі. Егер 1 компрессорде жұмсалған жұмыс тең болса, онда (10.4) формулаға сәйкес мынаған тең:

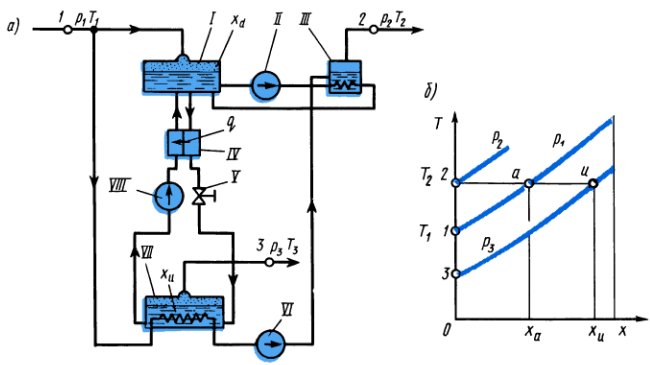
болғандықтан,жылыту коэффициенті .

Нақты алынған мәндері 3...5 құрайды. Бұл дегеніміз электр энергиясының бірлік шығынын жылулық насостың компрессорын қосуға жұмсамай, сол электр энергия мөлшерін электрлі қыздырғыш қондырғыларында тікелей қолдануға қарағанда жылыту мақсатында 3...5 есе жылу мөлшерін алуымызға болады. Жылулық насостарда мұздатқыш машиналардың басқа да түрлері көбінесе абсорбциялы және бу ағыншалы. Термохимиялық трансформатор жұмысының жылуы ерітіндінің қасиетіне негізделген. Мұндай ерітінді мақсатында, еріткіш ретінде су, ал ерітінді зат ретінде калий гидроксиді КОН және NaOH. Таза судың қайнау температурасы сол қысымда ертітндінің қайнау температурасынан төмен. 10 кПа қысымда таза су 372,64 К температурада, ал 90 КОН ерітіндісі 643 К температурада қайнайды.

Егер жылудың потенциалын жоғарылату қажет болса, онда трансформаторлар жоғарылатқыш сұлба бойынша жұмыс істейді, ал жылудың орташа потенциал қажет кезінде және өте жоғары, өте төмен кезінде ыдырату (расщепительный) сұлбасы бойынша жұмыс жасайды. 11а-суретінде жылудың термохимиялық ыдырату трансформаторы көрсетілген. Мұндай қондырғы орташа қысымды, екі ағынды будың: жоғары қысым кезінде () және бастапқы қысымға қарағанда төменгі қысым кезінде () бу жылуы есебінен алуға арналған.

температуралы орташа қысымды будың бөлігі I абсорберге және қалған бөлігі VII буландырғышқа бағытталады. Абсорберде қысымда будың ертітндімен сіңірілуі жүреді және концентрациясы деңгейінде ұсталынып тұрады (11сурет, б). Будың абсобрциясы жылудың бөлінуімен жүреді, осыдан абсорберде температурасы орнығады. III жоғары қысымды бу генераторы арқылы II насос көмегімен ерітінді циркуляциясы арқасында абсорбцияның негізгі жылу мөлшері абсорберден үзіліссіз алынады. Генераторда жылу қанығу қысымы және температура кезінде судың булануы үшін қолданылады.Термодинамиканың екінші заңына сәйкес жоғары температуралы деңгейден төменгіге жылуды ауыстыру процессі VII буландырғышта жүреді. Будың сіңірілуі кезінде абсорберде үзіліссіз бірігетін ерітінді VII буландырғышқа бағытталады және мұнда келіп түскен будың жылуы есебіненсу буланады және температурада төменгі қысымды бу түзіледі. Сонымен қатар ерітінді концентрациясы мәніне дейін жоғарылайды (11 сурет, б ).

Қысмдары әр түрлі VII буландырғышпен I абсорбер арасындағы ерітінді циркуляциясы VIII насос көмегімен жүргізіледі, ал қысым төмендеуін реттеу V редукциялы клапан көмегімен орындалады. IV жылуалмастырғыш регенератор жұмысын атқарады яғни, абсорберге қайтатын ыстық қосынды ерітіндісінің жылуын ерітінді концентрациясын қыздыру үшін қолданылады. Қыздырылатын будың конденсатбуландырғыштан III жоғары қысымды бу генераторына келіп түседі және сол үшін VI насос орнатылған. Шығын жоқ кезде жоғары және төменгі бу қысымының суммалық мөлшері будың орташа қысымының шығынына тең.



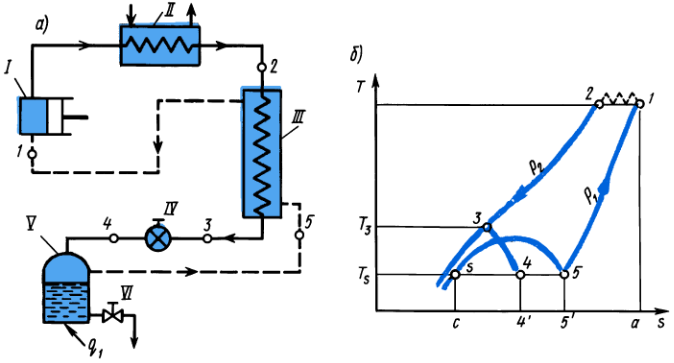
сурет 11. Жылыдуы ыдырататын термохимиялық тарнсформатор: а) қондырғы схемасы, б) -координатасындағы процесстер: I-абсорбер, III- жоғарғы қысымды бу генераторы, IV-жылуалмастырғыш, V-редукционды клапан, II, VI, VIII-насостар, VII-буландырғыш.

§**10.7 Сұйытылған газды алу**

Сұйылған газды қолдану аясы кеңінен таралған және халық шаруашылығы салаларында кездеседі. Сұйытылған газды алу үшін дроссельдеуді (Джоуль-Томсон эффектісі), газдың ұлғаюы, арнайы хладогенттермен жұмыстық денені суыту, Ранктың құйынды эффектісі, Пельте құбылысы, адиабатты магнитсіздендіру және т.б қолданылады. Компрессордағы изотермиялық сығылудың қайтымды процессінен тұратын идеалды циклда, детандердегі (газсалқындатқыш) изоэнтропты ұлғаю және изобаралық процесстің жұмыстық денеге сұйылатын газдан жылудың берілуі, яғни циклдың жұмысы (сұйылудың минималды жұмысы) мына айырыммен анықталады: , мұндағы сұйылатын газдан жұмысшы денемен алынған жылу; жұмысшы денемен қоршаған ортаға берілетін жылу. Сығылуға қажетті p=0,1 және T=300 кезіндегі минималды меншікті жұмыстың мәндері келтірілген және атмосфералық қысым кезіндегі сұйылған газдың қайнау температурасы төменде көрсетілген.

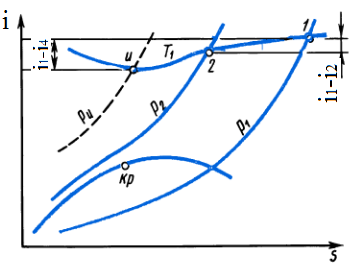
|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | , |  | Газ | , |  |
| Сутегі | 11900 | 20,4 | Оттегі | 637 | 90,2 |
| Гелий | 6850 | 4,2 | Ауа | 738 | 80 |

Газды сұйылтудың негізгі тәсілі ретінде мыналар жатады: бірнеше бу компрессорлы мұздатқыш циклдардың жиынтығын көрсететін *каскадты тәсіл*; сұйылту үшін алдын ала салқындатылған газдың адиабатты дроссельдеу қолданылатын *Линде тәсілі*; газдың адиабатты дроссельдеуінен басқа детандерге жұмыстың қайтарылуы бар адиабатты ұлғаю қолданылатын *Клод тәсілі*. Линде тәсіліне негізделген мұздатқыш машиналар өте қарапайым және ықшамды (сурет, 12а).



сурет 12. Алдын ала суытылған газды дроссельдейтін мұздатқыш камерасы: а) қондырғы схемасы, б) диаграммасындағы цикл: I-компрессор, II-мұздатқыш, III-жылуалмастырғыш, IV-дроссельді вентиль, V-түтікше, VI-вентиль.

Детандерлі сұйылтқыштар құрылысы бойынша күрделі, бірақ термодинамикалық жағынан алып қарағанда жетілген, өте жақсы. қысымға дейін I компрессорда сығылудан кейін газ II мұздатқышқа келіп түседі, мұнда қосымша хладогент көмегімен газ температурасы деңгейге дейін төмендейді. Кейін III жылуалмастырғышта газ 2-3 процессінде тұрақты қысымда, тіпті төменгі деңгейге дейін температурасына сәйкес суытылады. Сонымен қатар түзілген екі фазалы қоспа V түтікшеге келіп түседі. Сұйытылған газды алу үшін арналған мұздатқыш қондырғыларда сұйық фаза VI вентиль арқылы түтікшеден бөлінеді және алынады. Сонымен қатар цикл толық тұйықталған болмайды. 4-5 процессінде V түтікшеге жылуының кейбір мөлшері келіп түседі, сондықтан ылғал бу құрғаққа айналады. Құрғақ қаныққан бу III жылуалмастырғышқа келіп түсіп, деңгейіне дейін қыздырылып және қыздырылған күйде компрессорға қайтады. Сонымен қатар циклдың қайталанып отыруы үшін компрессорға қосымша мөлшерде алынған сұйық өнім массасына тең газ жіберіп отыру қажет. Газды сұйық күйге айналдыру үшін қажетті меншікті жылу мөлшері энтальпиялар айырымына тең яғни, ал -диаграммада a15sc ауданымен көрсетілген (12 сурет, б). мөлшері температурадан және жұмысшы дененің физикалық қасиетінен тәуелді. Жабық VI вентиль кезінде цикл тұйықталған (12 сурет, а). Мұндай жағдайда жылу мөлшері ( 44´5´5 ауданы) циклдын суықөнімділігін анықтайды және салқындатылатын денеден түтікшеге келеді. Бұл жылу мөлшері энтальпиялар айырымымен анықталады , ал циклды аяқтауға жұмсалған жұмыс тең, мұндағы мұздатқыш және компрессорға алынған жылу мөлшері. Жылуалмасу процессі 2-3 және 5-1 тұрақты қысымда ағып өтсе, онда III жылуалмастырғыштағы жылулық баланс былай өонектеледі . Бұл теңдіктегі орнына энтальпиясын қоюға болады, өйткені 3-4 дроссельдеу процессінде жұмысшы дененің энтальпиясы өзгермейді, яғни . Осыдан, .



сурет 13. Газдың изотермиялық сығылу процесі

Теориялық циклда жұмыс компрессордағы газдың изотермиялық сығылуына тең (12 сурет, б, 1-2 процессі) яғни, . Бұл теңдік теориялық циклдын алдын-ала сақындатылған газ дроссельдеуінің мұздатқыш коэффициентін анықтауға мүмкіндік береді.

Қарастырылып отырған теориялық циклдын МПа, кезіндегі және ір түрлі қысымдағы кейбір мәндер 1- кестесінде келтірілген. Жұмысшы дене ретінде ауа таңдалып алынған. Кестеден қарастырылып отырған циклдын эффективтілігінің төмен екендігін көруге болады. Осыған байланысты дроссельдеуі бар циклды қарапайымдылығына қарамастан үлкен қондырғылар үшін ұсынылмайды. қысымының жоғарылауында циклдын суық өнімділігі артады және инверсия қысымына тең, кезінде максимум мәніне жетеді. Бұл кезінде изотермия -координата жүйесінде минимум мәнге ие, ал минимальды энтальпия мына шартқа сәйкес келеді . диаграммасынан мынаны көреміз: теориялық циклдын максималды суықөнімділігін энтальпиялар айырымынан анықталады. Қарастырылып отырған циклдын эффективтілігі әр түрлі жолмен жоғарылауы мүмкін мысалы, екілік дроссельдеу көмегімен және аралық газды салқындатуды енгізу жатады.

Кесте 1

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Циклды сипаттайтын мәліметтер | Қысым, , МПа | | | |
| 6 | 10 | 20 | 40,5 |
| Суықөнімділігі, , кДж/кг | 13,4 | 21,6 | 37,5 | 46,5 |
| Изотермиялық сығылыу жұмысы кДж/кг | 344 | 387 | 446 | 503 |
| Мұздатқыш коэффициенті, | 3,91 | 5,58 | 8,40 | 9,25 |
| Циклда алуға болатын өте төменгі температура, К | 82 | 82 | 82 | 82 |

§**10.8 Абсолютты нөлге ұмтылатын температура кезіндегі термодинамикалық жүйенің тәртібі.**

Температураның абсолютты нөлге жақындауы кезінде термодинамикалық жүйенің жоғары температурада танылмаған жаңа қасиеттері табылды. Микрофизикалық тұрғыдан былай түсіндіріледі: төменгі температура кезінде термодинамикалық жүйе тәртібінде квантты- механикалық эффект тұрғыдан көп айтылады (бөлшектің өлшемі kT-ға тең, мұндағы - Больцман тұрақтысы). Термодинамиканың бірінші және екінші заңынан шығатын дифференциалдық қатынастарды қолдану әр түрлі физикалық қасиеттерін байланыстыратын заттардың мәнің теориялық түрде түсіндірілді. Алайда бұл заңдарды қолдана отырып барлық қасиеттерді сипаттай алмаймыз. Мысалы, энтропияны есептеу кезінде тұрақты интеграциялаудың анықталмаған мәні қалады, жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділігі, химиялық реакция тепе-теңдігінің констант абсолюттік мәні және т.б белгісіз болып қалады.

1906 жылы неміс физигі Нерист В. химиялық реакцияның жылулық эффектісінің температурадан тәуелділігін сол уақыттағы эксперименталльды мәліметтерге сүйеніп, абсолютты нөлге жақын температура кезінде термодинамиканың бірінші және екінші заңынан шықпайтындығын және бұрын белгісіз гипотеза айтты. Теорема негізінде Нернстің химиялық реакцияның энергетикалық эффектісіне қатысты оның алғашқы тұжырымдамасы жалпы принциптің жалғасы ретінде көрсетіледі. Термодинамиканың бірінші және екінші заңдарынан шықпаған бұл принцип термодинамиканың үшінші заңы деп аталды.

Термодинамиканың үшінші заңының тұжырымдамасы мынадай: конденсациялау жүйесіндегі кез келген тепе-теңді изотермиялық процессте абсолютты нөлге ұмтылатын температура кезінде энтропия өзгерісі нөлге ұмтылады (Нернст-Симонның тұжырымдамасы).

Математикалық түрде былай көрсетіледі:

(10.12)

немесе

, (10.13)

мұндағы және - екі кез келген процесс көмегімен абсолютты нөлге ұмтылатын температура кезінде алынатын энтропиялар мәні; изотермиялық процессте кезінде өзгеретін қандай да бір параметрдің күйі. (10.12) теңдігінен Т=0 К кезінде бір күйден екінші күйге энтропияның өзгеруімен жүрмесе, онда кезінде энтропия жүйесі барлық күйде бірдей

Термодинамиканың үшінші заңы абсолютті нөлге ұмтылатын температура кезіндегі заттарың термодинамикалық қасиеттерінің өзгеруі туралы маңызды қорытынды жасайды:

1. кезінде барлық заттар термиялық серпімділігін және термиялық ұлғаюға деген қабілетін жоғалтады. Максвелл қатынасы заттың термиялық серпімділігі энтропияның көлемнен тәуелділігімен байланыстырады. Термодинамиканың үшінші заңын ескере отырып, мынаны аламыз:

(10.14)

Максвелл қатынасына сәйкес термиялық ұлғаю энтропияның қысымнан тәуелділігімен байланысты. (10.13) теңдікке сәйкес мынаны аламыз:

2. кезінде парамагнитты заттар Кюри заңынан принципиалды ауытқуларды көрсетеді. Максвелл қатынасынан термомагнитты жүйе үшін және (10.13) теңдігінен,

(10.15)

Бірақ Кюри заңына сәйкес,

Термодинамиканың үшінші заңы негізінде алынған шартқа қарсы келеді және адиабаталық магнитсіздендіру кезіндегі температураның төмендеу мәні кезінде жарамсыз болып табылады.

3. Абсолютты нөлге жақын температурада кез келген процессте конденсатталған, қатты немесе сұйық денелердің жылусыймдылығы нөлге тең. Дифференциалды қатынаспен еркін энергияның анықталуын қолданатын болсақ, изохоралық жылусыйымдылық үшін

S=

Алынған теңдіктің шегінде мынаған тең:

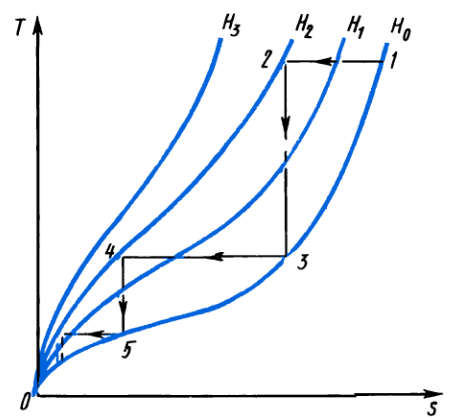
.

Алынған теңдіктің оң жағындағы бөлігінің анықталмағандығын ашу үшін Лопиталь ережесі бойынша жазылады.

туындысы шекті болғандықтан, онда соңғы теңдіктің оң және сол бөлігіндегі мәндер жойылып, тең болады. және , мұндағы х- кейбір процессте тұрақты болып қалатын кез келген параметр.

4. Нөлге ұмтылу кезіндегі температурада байланыспаған бөлшектер жүйесін сипаттау үшін әдеттегі статистикалық идеалды газдың моделі жарамсыз, яғни Клайперон теңдігі термодинамиканың үшінші заңына қарсы келеді. Дифференциалды қатынас идеал газ үшін . кезінде туынды шексіз үлкен мәнді қабылдайды, сол уақытта термодинамиканың үшінші заңы оның нөлге тең болатындығын қажет етеді.

Барлық жасалған эксперименттер термодинамиканың үшінші заңының дұрыстығын көрсетеді. 14-ші суреттегі адиабаттты магнитсіздендіру әдісімен T=0 температура мәніне дейін салқындату процессінің энтропиялық диаграммасы үшінші заңға сәйкес. T=0 температурасы кезінде энтропияның өзгермейтіндігін ескеріп, мынаны тұжырымдайды: идеалға сонша жақын процесстің соңғы мәнінде темродинамикалық жүйені абсолютты нөлге дейін салқындату мүмкін емес. Бұл пікір абсолютты нөлге жетпейтін принцип түрінде термодинамиканың үшінші заңының тұжырымы ретінде белгілі.



сурет 14. Абсолютті нольге жетпейтін принципті түсіндіретін диаграммасы

**Бақылау сұрақтары**

1. Мұздатқыш машина немесе термокомпрессор деп нені атайды?

2. Қайтымды Карно циклы қалай жүзеге асады?

3. Мұздатқыш машина жұмысының термодинамикалық эффективтілігін сипаттау үшін қандай шама қабылданған?

4. Қайтымды Карно циклының мұздатқыш коэффициенті қандай формуламен есептелінеді?

5. Ауалы мұздатқыш қондырғысының схемасы мен циклы қалай бейнеленеді?

6. Жылулық насос дегеніміз не?

7.Абсорбциялық мұздатқыш қондырғысын трансформатор ретінде қалай қолдануға болады?

8. Бу компрессорлы мұздатқыш қондырғысының циклы

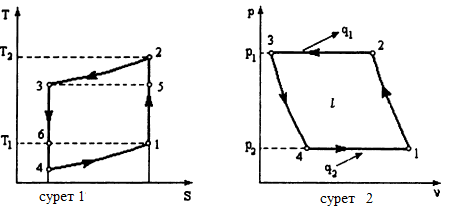
9. Бу эжекторлы мұздатқыш қондырғысының циклы

10. Жылулық насостың жұмыс принципі

Есептердің шығарылуы

10.1 Ауалы мұздатқыш қондырғысында мұздатқыш камерасындағы ауа қысым және температураға ие. Компрессорда қысымға дейін адиабаталық сығылудан кейін ауа салқындатқышқа бағытталады, мұнда оның температурасы дейін төмендейді. Турбодетандерде бастапқы қысымға дейін ауаның адиабаталық ұлғаюы жүреді. Мұздатқыш камерасында ауа температураға дейін қыздырылады және кейін қайтадан компрессорға келіп түседі (1 және 2 сурет). Мұздатқыш камераға келіп түсетін ауаның температурасын, суықөнімділігін, мұздатқыш коэффициентін және циклда жұмсалған теориялық жұмысын анықтаңыз. Сол температура интервалында қайтымды Карно циклы бойынша жұмыс жасайтын қондырғы үшін мұздатқыш коэффициентін анықтаңыз.

*Шығарылуы:* Мұздатқыш камерасына келіп түсетін ауа температурасын 3-4 адиабаталық процессінен анықтаймыз.



Компрессордан шығатын ауа температурасын 1-2 адиабатты процесстен анықтаймыз.

Компрессорда жұмсалған меншікті жұмыс,

Турбодетандердегі меншікті жұмыс мынаған тең:

Цикл жұмысы

Ауаның меншікті суық өнімділігі мына формуламен анықталады:

Қондырғының мұздатқыш коэффициенті

ε

Сол температура интервалында Карно циклы бойынша жұмыс жасайтын қондырғының мұздатқыш коэффициенті

.

10.2 Ауалы мұздатқыш машина температуралы судан мұз өндіреді. Компрессордың сорып алатын ауаның температурасы ал қысымы және қысымға дейін сығылады. Мұздатқышқа түсіп, ауа дейін салқындатылады. Ауаның шығыны тең. Мұздатқыш коэффициентін, компрессорды жұмысқа келтіретін қуатты және сағатына алынатын мұздың мөлшерін анықтаңыз.

*Шығарылуы:*Детандердің (ұлғаятын цилиндр) цилиндрінде ұлғаюдан кейінгі және компрессорде сығылудан кейінгі ауа температурасын анықтаймыз:

;

10 температурадағы 1 кг суды температуралы мұзға айналдыру үшін біріншіден, дейін суды салқындатуға кететін жылуын алуымыз қажет ; екіншіден мұздың еру жылуын; үшіншіден жылуды ккал/кг мұзды 0-ден -қа дейін температураны төмендету үшін алынады. Судан алуға қажетті жалпы q жылу мөлшері мынаған тең:

Ауадағы артық сағаттық салқындық мынаған тең:

Мұздатқыш машинадағы алынған мұздың сағаттық мөлшері

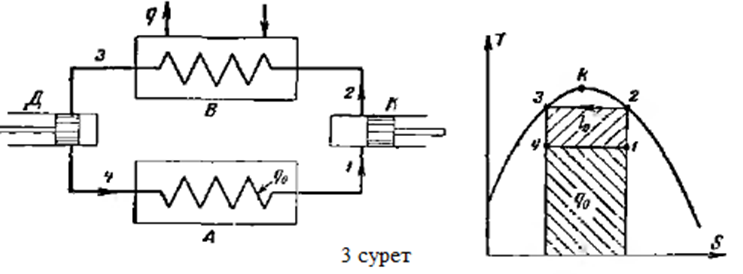
Мұздатқыш коэффициенті

Жұмысы

Қуаты

.

10.3 Суретте көрсетілген булы мұздатқыш машинасының жұмысшы денесі ретінде көмірқышқылын қолданады (3 сурет). Компрессор К қаныққан буды сорып және 20 конденсация температурасына сәйкес адиабатты сығады. Компрессордан көмірқышқылы конденсаторға В келіп түседі, мұнда тұрақты қысымда сұйыққа айналып, ұлғайтқыш цилиндрда Д 10 булану температурасына сәйкес қысымда ұлғайып, сол температурада көмірқышқылы салқындатылатын денеден жылуды ала отырып, буланып, құрғақтылық дәрежесімен ылғал бу түзіп, салқындатылатын ортаға келіп түседі. Мұздатқыш қондырғының меншікті суықөнімділігін, конденсаторға берілген жылуды, циклға жұмсалған жұмысты және мұздатқыш коэффициентті анықтаңыз.



*Шығарылуы:* салқындататын ортадағы 1 кг көмірқышқылын сіңіретін қондырғының меншікті суықөнімділігінің жылу мөлшері:

, ккал/кг

Кесте бойынша кезінде ккал/кг екенін табамыз.

және мәндерін мына формула бойынша анықтаймыз.

.

Кесте бойынша ккал/кг·К; ккал/кг·К; Осыдан,

4 нүктесінде құрғақтылық дәрежесі анықталады.

Осыдан, конденсаторға берілген жылу

Кестеге сәйкес кезінде Меншікті суықөнімділік мынаған тең:

Циклға жұмсалған жұмыс мынаған тең:

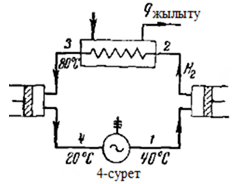
Мұздатқыш коэффициенті

**Бақылау есептері**

10.4 Ғимаратты жылыту үшін төменгі жылу көзі ретінде қоршаған орта болып табылатын мұздатқыш қондырғы қолданылады.Бұл принцип жылулық насос жұмысына негізделген. Оның жұмысы нәтижесінде жылу қоршаған ортаға қарағанда өте жоғары температурада жылу көзіне беріледі.

Егер қоршаған орта температурасы және қыздырғыш қондырғысының температурасы болса, жылулық насос көмегімен ғимаратты жылыту үшін сағатына қанша жылу алуға болады? Компрессор двигателінің қуаты Қондырғы суретте (4 сурет) көрсетілген цикл бойынша жұмыс жасайды деп аламыз. Мұздатқыш агенті –аммиак.

*Жауабы:*

**

10.5 Заманауи электргенераторлар сутегілік салқындатуды қолданумен жұмыс істейді.Циркуляциялы салқындату жүйесінде сутегі жылулық насос сұлбасында жұмысшы дене ретінде қолданылады (4 сурет). Егер генератордық салқындату жүйесіндегі сутегі қысымы тұрақты және тең болса, ал температурасы ,3 және 4 нүктелерінде көрсетілгендей болса, бұл қондырғының жылыту коэффициенті неге тең? Жылуалмастырғышқа келіп түсетін сутегінің қысымы неге тең? Сутегінің жылусыйымдылығын температурадан тәуелді емес деп санаймыз.

*Жауабы:*

10.6 Ауалы мұздатқыш машинасы қоршаған орта температурасы кезінде салқындатылатын ғимаратта температураны қамтамасыз етуі қажет. Машинаның суықөнімділігі 200 000 ккал/сағ тең. Компрессордан шыға берістегі ауаның қысымы ; салқындатқыш камерасында . Машинаны жұмысқа келтіретін двигаель қуатын, ауа шығының, мұздатқыш коэффициентін және қоршаған ортаға берілетін жылу мөлшерін анықтаңыз. Сол температура интервалындағы Карно циклымен жұмыс жасайтын машинаның мұздатқыш коэффицентін есептеңіз.Циклды -диаграммасында көрсетіңіз. *Жауабы:*

10.7 Суықөнімділігі 150 000 ккал/сағ кезінде егер салқындатылатын ғимарат температурасы , қоршаған орта температурасы болғандағы мұздатқыш машина двигателінің қуатын анықтаңыз. Ауаның максималды қысымы ; . Циклды - диаграммасында көрсетіңіз.

*Жауабы:.*

10.8 Ауалы мұздатқыш машинасы температуралы судан сағатына температура кезінде 198 кг мұз өндіреді.Компрессорда ауа қысымнан қысымға дейін және сығылады. Сығылған ауа мұздатқышта дейін салқындатылады. Машинаның тұтынатын қуаты мен ауаның сағаттық шығынын анықтаңыз.

*Жауабы:*

XI ТАРАУ. ПЛАЗМА

§11.1 Табиғат пен техникадағы плазма

Плазма деп – оң және теріс зарядталған бөлшектер жиынтығынан тұратын жартылай немесе толығымен иондалған зат күйін атайды. Плазманы макроскопиялық масштаб тұрғысынан электрлі нейтралды қоспа деп қарастыруға болады. Плазманың-қоспаның әрбір куб сантиметрінде -электрондар, -иондар, ал төменгі температуралы плазмада -нейтрал атомдар мен молекулалар бар. Плазманы заттың төртінші күйі деп атайды.

Егер атомдар мен молекулалар арасындағы өзара тартылыс энергиясын , атомдар мен молекулалардың тербеліс және кинетикалық энергияларын және , заттың ионизациялану энергиясын деп белгілесек, онда энергетикалық тұрғыдан заттың нақты күйін:

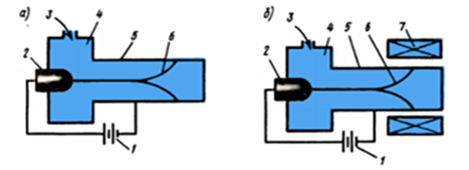
– қатты күйде;

- сұйық күйде;

- газ күйінде;

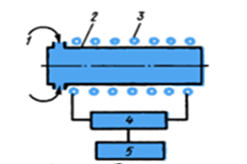
- плазмалық күйде болады деп көрсетуге болады. Дененің бір күйден екінші екінші күйге өтуі денеге берілетін жылу мөлшерімен анықталады. Қатты денеге белгілі мөлшерде жылу бергенде ол балқиды және сұйыққа айналады, әрі қарай қыздырыла беретін болса сұйық буға (газ) айналады. Буды әрі қарай қыздыру жалғаса берсе және температураның өсуі күрделі молекулалардың диссоциациялануына, содан соң заттың ионизациялануына, яғни плазманың түзілуіне әкеледі. Плазма - К температурада үлкен жоғары энергетикалық күйде болады. Плазма үшін кинетикалық энергияның диапазоны өте жоғары және құрайды. Ғарыш кеңістігіндегі күн, жылдыздарплазмалық күйде болады. Жер бетіндегі температура төмен және жер денесінің тығыздығы жоғары болғандықтан атмосфераның төменгі қабатында табиғи плазма болмайды.Оны тек жасанды жолмен ғана алуға болады. Төменгі температуралы плазманы алу үшін электр-доғалы, жоғары жиілікті плазмалық генератор, плазматрон,плазмалық зеңбірек, үдеткіш және инжекторлар қолданылады.

Төменде электр-доғалы плазматрон көрсетілген.



сурет 1. Тұрақты токтың электрлі доғал плазматроны: а) құйынды газды; б) құйынды-электромагнитті орнықты

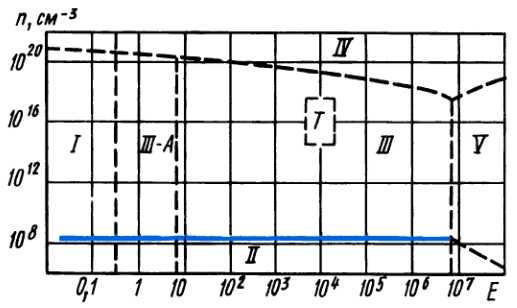
Электр-доғалы плазматронда 1- қоректік көзден электр тоғы 2-стерженьдік катод пен 5-цилиндрлік анодқа бөлінеді. Олардың арасына 6- электрлік разряд жанады. 3-жұмысшы дене газ күйінде 4-камераға беріледі(сурет 1). Разряд зонасынан газ өте отырып, электр-доғасын орнықтандырады да, жоғары температураға дейін қызып, плазмалық күйге өтеді. 1б-суретінде плазматрон анодында орнатылған 7-магниттік катушка анод ішінде магнит өрісін тудырады (магнит өрісі 1,0....10 ). Магнит өрісінің электр өрісімен өзара әсері қосымша айналыс және доғаның тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Мұндай плазматрон (5....8)К, орташа К деңгейінде максимал температура алуға мүмкіндік береді. Жоғары жиілікті және аса жоғары жиілікті плазматронда электродтар болмайды (сурет -2).



сурет 2. Электродсыз индукциялы жоғары жиілікті плазматрон

1- плазма түзуші жұмысшы дене 2- разрядты камераға түсіп,Гц жиілікпен құйынды токпен қызады. Құйынды токты 3- индуктор көмегімен туғызады. Индуктор аса жоғары жиілікті генераторға 5- ток көзімен жалғанған. Жоғары жиілікті (ЖЖ) және аса жоғары жілікті (АЖЖ)- плазматрондары К температуралы таза плазма алуды қамтамасыз етеді.

Әр түрлі энергетикалық және энерготехнологиялық процесстер мен қондырғылар үшін плазма – перспективті жұмысшы дене болып табылады.



сурет 3. Бөлшект -энергиясының бөлшектің -тығыздығына тәуелділк диаграммасы

Плазма – жоғары температуралы дене, электрозарядын тасымалдаушы, толқын ұзындығының ширек диапазонындағы электромагниттік сәулелену көзі рөлін атқарады. Е,n- координатасындағы Е –бөлшек энергиясы, n- газ немесе плазма тығыздығы. Диаграммадағы I аймағы – механикалық және газодинамикалық қондырғыны құрайды, II аймағы- зарядталған бөлшектердің үдеткішін құрайды. Механикалық және газодинамикалық қондырғы I аймағында жұмысшы тығыздығы үлкен, бөлшек энергиясының мәні төмен. Зарядталған бөлшек үдеткішінде (II аймақ) жұмысшы дене тығыздығы аз, ал бөлшек энергиясы жоғары. Плазма дененің төртінші күйі ретінде диаграммада III аймақты алып тұр. Плазманың жұмысшы дене ретінде ширек мүмкіндігін көрсете отырып, барлық термоядрлық жүйе диаграммада Т-аймағын алып тұрғандығын ескердік. Ал доғалы және жоғары жиілікті қондырғылар мен төменгі температуралы плазма генераторлары III- А аймағында жатыр. IV –V аймағының игеру жолы әлі қарастырылуда.

§11.2 Плазманың қасиеті мен классификациясы

Плазманың түзілуі деп нейтрал атомдардың ионизациялану процессі және алынған иондардың әрі қарай иондалу процессін айтады. Нейтрал атомды ионға айналдыру үшін белгілі бір энергия жұмсалады. Ол Е- ионизациялану энергиясы деп аталып, электровольтпен өрнектеледі.

Егер электрон қандай да бір потенциалдар айырымымен электр өрісіне өте отырып, ионизация энергиясына тең энергияға ие болса, онда мұндай потенциалдар айырымын ионизация потенциалы деп атайды.

Кез келген зат атомдарының ионизациялану энергиясы заттың химиялық табиғатынан және атомдық энергетикалық күйінен тәуелді. Атомдардың ионизациялану энергиясы қаншалықты аз болса, соншалықты олардың атомдық массасы үлкен болады. Бұл жағдай ауыр атомдарда ядро өрісін экрандайтын ішкі электрондардың көп болатындығымен байланысты. Плазма түзілудің бірнеше әдістері бар. Солардың ішінде кеңінен тарағаны термиялық ионизация болып табылады. Егер атом ионизациясы негізгі деңгейде жүретін болса, онда нейтрал атомға келетін энергия ионизациялану энергиясына тең болуы керек. Термиялық ионизация үшін бұл шарт былай жазылады: ; электрлік разрядпен ионизациялау үшін ; фотоионизация үшін . Мұндағы k мен h- Больцман мен Планк тұрақтысы. Т-плазма температурасы; - электрлік разрядты электродының еркін жүру ұзындығы; - электрлік өрістің кернеулігі; - сәулелену жиілігі.

Ионизация процессі бөлшектерінің өзара әсері нәтижесінде элементар формула жазған ыңғайлы. Олай болса негізгі деңгейден электронымен өзара әсері негізінде атомның ионизациялануын төмендегідей формула арқылы жазуға болады.

, (11.1)

фотоионизациялану кезінде

(11.2)

Ионизацияланудың осы процессін, бірақ қозған деңгейімен мына түрге енеді:

және .

Атомдар мен атомды қоршап тұрған зарядталған бөлшектердің электростатикалық өзара әсерлесу нәтижесінде шамасына ионизация энергиясының кемуі жүреді. Электростатикалық өзара әсер атом ядросымен сыртқы электрондық қабықшасының электрондар байланысын әлсіздендіруге әкеледі, тіпті электрондар еркін күйде болады. Осылайша плазмадағы ионизациялану энергиясы эффективті энергия деп аталып, төмендегідей формуламен анықталады.

(11.3)

А.Унзольдтың анықтауы бойынша . Ал Г.Эккер дәлірек электростатикалық өзара әсерімен қатар зарядталған бөлшектердің жылулық қозғалысы ескеріліп анықталынады.

(11.4)

И. Брюннер жоғардағы айтылғандарға келесідей теңдікті ұсынды.

(11.5)

мұндағы және - электронның тығыздығы мен температурасы. Плазманың ең маңызды қасиеттерінің бірі – оң және теріс зарядталған бөлшектердің тығыздықтарының теңдігін сақтауға ұмтылу болып табылады, яғни электрнейтралдылықты сақтау. -есе иондалған плазманың электрлік нейтралдылығының шарты болып:

(11.6)

мұндағы - ионизациялау еселігі. Бір есе иондалған төменгі температуралы плазма үшін жоғарыдағы шарт мына түрде болады: . Плазмадағы бөлшектер тығыздығы болсын. Егер осы плазмада электрондар мен иондардың қашықтықта толық бөлінуі жүретін болса, кернеулігі болатын электр өрісін тудырады және әрбәр электрон энергиясын алады.

Сыртқы әсер болмаған жағдайда зарядтардың бөлінуі тек қана бөлшектің -жылулық энергиясы - электростатикалық энергиядан артық немесе тең болғанда жүреді, яғни . Осыдан

(11.7)

-плазманың электрнейтрондылығы бұзылатын максимал арақашықтықты сипаттайтын шама. Бұл шама ұзындық өлшеміне, экрандардың дебайлық радиусы деп аталады. Дебалық радиус – плазманың негізгі түсінігі мен параметрі. Лэнгмюр берген плазманың нақты анықтамасы Дебай радиусымен байланысты. Лэнгмюр И мынадай анықтама берді:

Плазма депгаздың алып тұрған көлемімен салыстырғанда Дебай радиусы аз болатын иондалған газды айтады.Олай болса, плазмада барлық уақытта мына шарт орындалуы қажет.

(11.8)

мұндағы - иондалған газбен толтырылған аймақтың сызықтық өлшемі.

Плазманың электрлік нейтралдылығы кеңістік бойынша және уақыт бойынша сақталуы қажет. жылулық жылдамдықпен қозғалатын плазма бөлшектерінің дебай радиусына тең арақашықтықтан өтетін уақытын- зарядтардың бөліну уақытының масштабы деп атайды.

(11.9)

Плазманы сипаттаушы параметрі ретінде плазмалық тербелістердің шеңберлік жиілігі қолданылады.

(11.10)

11.7, 11.9 және 11.10 теңдеулерінен плазманың тығыздығы жоғары болған сайын, соншалықты зарядтардың декомпенсациялану масштабы аз болады. Температура жоғарылаған сайын Дебайлық радиус ұлғаяды. Плазмадағы зарядтың маңайындағы потенциал өзгерісі

мұндағы - дебайлық радиус, - зарядтардың арақашықтығы, - зарядтың кулондық потенциалы. Дебайлық радиус – плазмадағы зарядталған бөлшектер арасында электростатикалық өзара әсерлесу жүзеге асатын арақашықтықты сипаттайды. Барлық уақытта, плазмадағы кез келген бөлшекке басқа бөлшектер тарапынан әсер күші болып тұрады. Сондықтан Власов А.А «Плазма – газ емес, алыс күштермен тартылатын өзіндік бір жүріс» деп тұжырымдаған. Тепе – теңдіктегі ионизациялану процессінің сандық және сапалық сипаттамасы болып - ионизациясының белгілі еселік дәрежесі болып саналады.

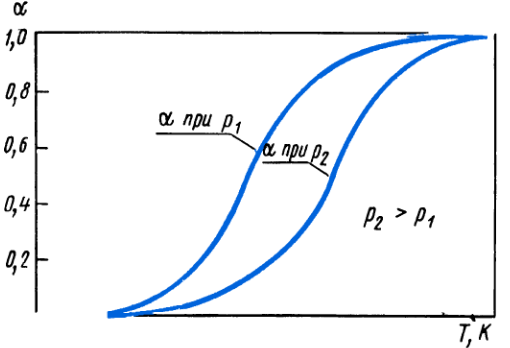
(11.11)

мұндағы - иондар тығыздығы, - атомдар мен иондардың толық тығыздығы. Плазманың электрнейтралдылығын ескергендегі бір еселі ионизациясының дәрежесі мынаған тең:

(11.12)

мұндағы – иондар мен электрондар тығыздығы; - нейтралды атомдар тығыздығы. Плазмадағы бір еселік ионизациялану дәрежесі , ал әлсіз иондалған плазмада . болғанда плазмадағы электрондар қозғалысы электронды атомдық соқтығысуларымен анықталады. Мұндай плазма әлсіз иондалған деп аталып, ал оның қасиеті газдың химиялық табиғатымен анықталады. болғанда электрондар қозғалысы иондармен кулондық өзара әсерлесумен шектеледі. Мұндай плазма күшті ионизацияланған деп аталып, ал оның қасиеті толық иондалған плазма заңдылықтарына бағынады. Күшті иондалған плазма газдың химиялық табиғатынан тәуелсіз. Кез келген заттың ионизациялау дәрежесінің температура мен қысымға тәуелділігі 4-ші суретінде көрсетілген.

Қысым артатын болса, - иондалу дәрежесі төендейді, яғни тепе-теңдік жоғары температурасы аймаққа ауысады.



сурет 4. Ионизация дәрежесінің қысым мен температурадан тәуелділік графигі

Плазманы температура мен бөлшектердің тығыздығына байланысты классификациялауға болады. Плазма төменгі температурасы және жоғары температуралы деп екіге бөлінеді. Төменгі температуралы плазма құрамында электрондар, иондар, нейтрал атомдар болады. Жоғары температуралы плазма тек қана электрондар мен көп зарядты иондардан тұрады. Бөлшектер тығыздығына байланысты сиретілген , орташа тығыздығы және тығыз деп бөлінеді.

§11.3 Идеалжәне идеал емес плазма

Егер бөлшектер арасындағы электростатикалық өзара әсер энергиясы бөлшектердің кинетикалық энергиясымен салыстырғанда аз болса, онда плазманы яғни термодинамикалық тұрғыдан идеал газ деп қарастыруға болады

(11.13)

мұндағы - иондардың зарядтық саны; - бөлшектер арасындағы ара қашықтық . - плазманың идеал еместігінің классикалық параметрі. (11.13) қатынасы Кирквуд – Онсагер теңсіздігі деп аталады. Ионосфералық плазмада , термоядорлық плазмада . Плазма өзінің термодинамикалық қасиеті бойынша шегінде идеал газға айналады. Алайда, практика жүзінде болғанда плазма қысымы идеал газ күйі теңдеуі бойынша анықталады. Бұл теңдеу жартылай және толығымен иондалған плазма үшін келесі түрде жазылады.

, (11.14)

11.14 теңдеуі бойынша есептеу практикалық деректермен сәйкес келеді. Плазма тығыздығының өсуімен артады, тығыздығы жоғары плазмада болады. Мұндай жағдайда тығыздық флуктациясымен электрондар орнықтанады.Электрондардың орнықталу нәтижесінде плазмада арнайы квазибөлшектер – кластерлер пайда болады. Кластер электрон мен оны қоршаған асқын көп атомдар санынан тұрады. Плазманың осы күйін сипаттайтын теңдеуді И.Т Якубов келесі түрде жазады.

(11.15)

мұндағы электрон маңайындағы атомдардың асқын көп саны (кластердегі атомдар саны); - электрондардың толық тығыздығы (еркін және байланысты). - кластердегі байланысқан электрондардың саны. Плазма тығыздығының өсуімен бөлшектер арасындағы өзара әсер өсіп, плазма туындап, оның қасиеті кванттық эффектімен анықталады. Плазманың кванттық күйі алты өлшемді фазалық кеңістікте элементар ұяшық көлемін алып тұрады. Плазманың тығыздығы аз болғанда элементар ұяшықтар саны электрондар санынан біршама көп. Тығыздықтың өсуімен барлық ұяшық толтырылып, тығыздықтың ары қарай ұлғаюы плазманың туындысына әкеледі. Алты өлшемді кеңістікте плазма көлемі шамасына тең. Мұндағы - координаталық көлем, - максимал импульс. Олай болса осы көлемдегі элементар ұяшықтар саны және электрондардың толық саны бір біріне тең. Бірлік көлемдегі электрондар тығыздығы . Жоғарыдағыларды ескере отырып, максимал энергияны анықтауға болады.

(11.16)

плазма қысымы:

(11.17)

Бұл өрнектер өте жоғары тығыздықты (қысымдағы) плазма термодинамикасының формуласы. туындау немесе Ферми энергиясы деп аталады. Туындалған плазмада Ферми энергиясы температурадан тәуелсіз, тығыздықтың функциясы болады.

(11.18)

(11.18) қатынасы туындау параметрі деп аталады. көп болған сайын соншалықты туындаған газ көп болады. болғанда тығыздықты анықтауға болады.

(11.19)

Классикалық плазмаға ұқсас және туындалған плазма үшін идеал емес параметр енгізуге болады.

(11.20)

Туындалған плазманың идеалдық шарты,

(11.21)

Критикалық тығыздық туындалған плазманы идеал және идеал емес деп бөлуге мүмкіндік береді. Плазманың әр түрлі термодинамикалық күйін (идеал, идеал емес, туындалған, туындалмаған) lgT, lgn- координаталарында графикалық түрде көрсетуге болады (5 сурет). және шартарына сәйкес сызықтар көмегімен плазманың термодинамикалық күйінің диаграммасы бірнеше аймаққа бөлінеді.

I аймақ () өзара байланысты классикалық идеал плазма параметрлеріне сәйкес келеді. Классикалық идеал плазмаға жататындар: жұлдыз аралық және иносфералық газ, газразрядты плазма, термоядорлық плазма және т.б.



сурет 5. Плазманың термодинамикалық күйінің логарифмдік диаграммасы

II аймақ () өзара мықты байланысты классикалық идеал емес туындалмаған плазмаға сәйкес келеді. Кейбір электр разрядтарының өте тығыз плазмалары мен толқынды соққы қондырғыларының плазмасы осындай параметрлерге ие. III аймақ () идеал емес туындалған плазмаға сәйкес; IV аймақ () идеал туындалған плазмаға сәйкес келеді. Металдардағы газ, металл аммиакты ерітінді, өте күшті легирленген жартылайөткізгіштер, аса тығыз жұлдыздардағы ядролық сұйықтар осындай параметрлерге ие. Плазманың әр түрлі энергетикалық және энерготехнологиялық қондырғыларда қолдану тұрғысынан I және II аймақтары, яғни идеал және идеал емес классикалық плазма өте маңыздырақ болып табылады.

§11.4 Плазмадағы термодинамикалық және термиялық тепе-теңдік

Плазма – әр түрлі зарядты және массалы бөлшектер қатынасы ретінде яғни, егер плазмада газокинетикалық, диссоциациялық және иондалған тепе-теңдік сақталатын, ал сәулелену процессі абсолютті қара дененің сәулелену заңына бағынатын болса термодинамиканың тепе-теңдікте болуы мүмкін. Тепе-теңді күйі тура және қайтымды процесстердің жүруі кезінде тұйық жүйеде бірдей жылдамдықтарда орантылады. электрондық соққымен ионизациялану кезінде қайтымды процесс үш соққылаумен жүруі қажет, ал фотоионизацияға сәулелік рекомбинация (қайтымды) сәйкес келуі қажет. Ашық жүйеде тепе-теңдік шарт бөлшектер үлкен тығыздыққа ие болғанда орындалады. Өйткені тығыз плазмада ионизация мен рекомбинация әрқашанда бір жолмен жүреді. Қысымның төмендеуімен бөлшектер арасындағы соққы ықтималдылығы төмендейді, ал плазманың оптикалық қалыңдығы азаяды, электрондар, иондар мен нейтрал атомдарға сыртқы көзден алатын энергиясын беріп үлгермей ыдыс қабырғасына таралады. Бұл жағдай плазмалық күйі екі температурамен сипатталатын қабатшалардың бөлінуіне әкеледі: электрондық және иондық (). Нейтрал атомдар мен иондар массасы біршама жақын болғандықтан, атом атом температурасы ион температурасынан айырмашылығы жоқ . Электрондар, иондар мен атомдар температурасының қысымға байланысты өзгерісі барлық заттар үшін бірдей сипатқа ие, алайда - критикалық қысым мәні заттың табиғатынан тәуелді. Мысалы, литий үшін , ал аргон үшін , сынап үшін . Олай болса, үлкен қысымдарда плазма термиялық тепе-теңдікте, ал төменгі қысымда – термиялық орнықсыз. Плазмадағы термиялық тепе- теңдік шарты

(11.22)

Плазманың электрондық және иондық компоненттері арасындағы температураны теңестіру, электрондар мен иондар соқтығысқанда арасындағы энергия алмасу есебінен жүреді. Егер жылдамдықпен қозғалыстағы электрон ионмен өзара әсер нәтижесінде бұрышқа ауытқыса, онда ионға берілетін импульс мынаған тең: . Осы импульстің әсерінен ион мынадай кинетикалық энергияға ие немесе бұрышта . Уақыт бірлігінде ионмен берілетін энергияны анықтау үшін, - кинетикалық энергияны электрондар мен иондардың соқтығысу жиілігіне көбейту қажет:

(11.23)

Осы өрнектерде: m- электрон массасы; М- ион массасы; - плазмадағы электрондар мен иондар соқтығысуының эффективті қимасы; - ион заряды. Уақыт бірлігінде электронмен ионға берілетін энергияны келесі түрде анықтауға болады.

(11.24)

мұндағы , - электрондар мен иондардың орташа кинетикалық энергиясы, ал - шамасы электрондар мен иондар арасындағы энергия алмасудың интенсивтілігін сипаттайды және ол термолизация немесе релаксация уақыты деп аталады. Егер бастапқы уақытта плазмада болса, онда (11.23) және (11.24) теңдеулерін салыстыра отырып, релаксация уақытын аламыз.

(11.25)

*А*- заттың атомдық массасы. Плазмадағы температуралық тепе-теңдікті орнату уақыты көп болған сайын, соншалықты заттың атомдық массасы көп және бөлшек тығыздығы төмен екендігін алынған өрнектен көруге болады. Соқтығысу кезінде берілетін энергия мөлшері соқтығысатын бөлшекер массасының қатынасына , яғни пропорционал екендігімен түсіндіріледі. Сондықтан ион ауыр болған сайын берілетін энергия мөлшері де аз болады. Плазма тығыздығының төмендеуімен соқтығысу саны төмендейді, ал релаксация уақыты артады. (11.25) өрнегін ширек температура диапазонында - релаксация уақытын анықтау үшін қолдануға болады.

§11.5 Тепе-теңдіктегі плазма құрамы

Термодинамикалық тепе-теңдікті орнатуда ионизациялану дәрежесі температура мен қысымнан тәуелді. Ионизацияның термодинамикалық тепе-теңдік процессін талдау үшін үнді физигі М. Сах химиялық тепе-теңдік заңын (әсерлесетін массалар заңы) қолданды. Егер иондар мен электрондарды химиялық зат ретінде, ал ионизация процессін – қайтымды химиялық реакция ретінде қарастыратын болсақ, онда осы реакцияның аяқталу дәрежесін сипатттайтын тепе-теңдік тұрақтысын мына түрде жазуға болады.

(11.26)

мұндағы және - электрондар, иондар, нейтрал атомдардың парциалдық қысымы.

Егер толығымен ионизацияланатын плазма өзінің құрамында - тығыздықты электрон, ион, нейтрал атомдарға ие болса,онда және электронейтралдылық шарттарын ескеріп, плазма компоненттерінің парциал қысымын былай анықтауға болады:

мұндағы - плазманың жалпы қысымы,- ионизация дәрежесі. және мәндерін (11.26) формуласына қойғанда, тепе-теңдік константасы мен плазма ионизация дәрежесін байланыстыратын Сах теңдеуіне әкеледі.

(11.27)

Алынған өрнек әр түрлі қысым мен температураларда плазманың ионизациялану дәрежесін анықтау үшін қолданылуы мүмкін:

(11.28)

Сах М және Эггерт Э.Р статистикалық физика әдісімен термодинамикалық тепе-теңдік күй шарттарында тепе-теңдік тұрақтысын анықтады.

(11.29)

мұндағы , – және ретті ионизацияланған иондардың электрондық күйі бойынша статистикалық суммалары; –ионизацияның эффективті энергиясы; m,e- электронның массасы мен заряды; h,k- Планк, Больцман тұрақтылары. Практикалық есептеулер үшін (11.29) өрнек келесі түрде жазуға болады.

(11.30)

мұндағы Паскальмен, Кельвинмен өрнектеледі. Газ қоспаларындағы ионизациялану күрделі өтеді. Егер бір атомды газдар қоспасы ионизацияланған жағдайды қарастырамыз. Бұл жағдайда плазманың *j*- компонентасының ионизациялану дәрежесі , барлық қоспаның ионизациялану дәрежесі

(11.31)

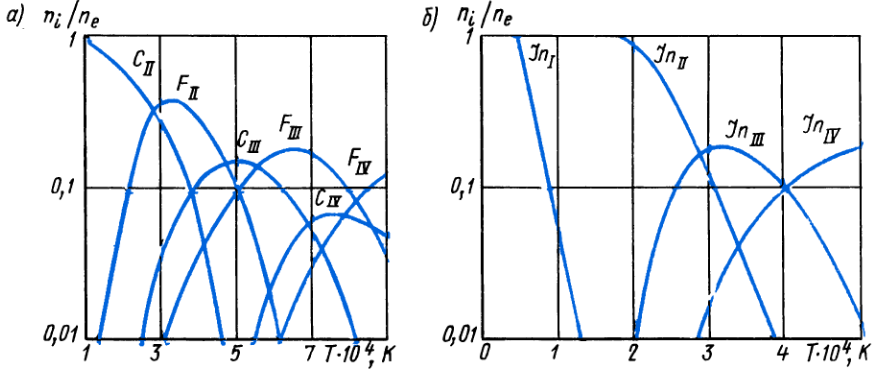
мұндағы *j*- компонентінің салыстырмалы мөлшері; - (11.28) және (11.30) формулаларымен анықталады. Мысалы, магнитті гидродинамикалық генераторларда қажетті электрөткізгішті алу үшін жұмысшы камераға жеңіл ионизацияланатын қоспалар енгізіледі. Бұл жағдайда - қоспаның ионизациялану дәрежесі және - барлық жұмысшы дененің ионизациялану дәрежесі келесі қатынастармен анықталады.

мұндағы - қоспа иондарының тығыздығы; - қоспа тығыздығы; - жұмысшы газ тығыздығы. - жұмысшы газдағы қоспаның массалық немесе молярлық мөлшері. Егер және болса, онда МГД генераторы каналында жұмысшы дененің ионизациялану дәрежесі: . Практикада алынады. Негізінде плазмада термодинамикалық тепе-теңдік барлық уақытта сақтала бермейді. Иондар мен атомдарға қарағанда электрондар біршама үлкен жылдамдыққа ие екендігін ескерсек, электрондар ионизация мен рекомбинация процесстерінде маңызды роль атқарады және (11.30) Сах-Эггерт теңдеулеріндегі жалпы температурасы -электрон температураларына алмастыруға болады. Изотермиялық емес, орнықсыз бірақ стационар плазма жағдайында плазма бөлшектерінің энергиясы Максвелл таралуына бағынбаған жағдайда Сах теңдеуін қолдануға болмайды. Мұндай шарттарда ионизация дәрежесін ионизация мен рекомбинация процесстерінің жылдамдықтарын салыстыру мен талдаулардан алуға болады. Мысалы, сиретілген стационар плазмада ионизация электрондық соққымен, рекомбинация сәулеленумен жүреді. Мұндай жағдайда сәулелену әсерінен ионизацияланумен үш соққыдағы рекомбинацияны ескермеуге болады. Ола болса, ионизация мен рекомбинация процессінің жылдамдықтары бір-біріне тең болады. және мұндағы және - ионизация мен рекомбинация жылдамдықтарының тұрақтылары. Стационар шартынан, яғни теңдігінен - тепе-теңдік константасынан табуға болады.

және болғандықтан, орнықсыз стационар плазма үшін ионизация дәрежесі келесі қатынаспен анықталады.

(11.32)

(11.32) теңдеуі Эльверт формуласы деп аталады. - тепе-теңдік тұақтысын термодинамика заңдарынан табуға болмайд, оны анықтау күрделі. Термодинамиканың тепе-теңдігіндегі плазма компоненттерінің тығыздығы, парциалдық қысым, ионизация дәрежесін анықтау үшін плазмада жүретін барлық реакциялардағы тепе-теңдік тұрақтысының теңдеуін барлық нақты ионизация дәрежесі үшін Сах-Эггерт плазманың электрнейтралдылығы, қысым балансы (Дальтон заңы), плазма күйі теңдеулерімен бірге қарастыру қажет.Осы теңдеулер жүйесінен қысыммен температурада шешу кез келген жұмысшы дененің тепе-теңдік плазмасының құрамын анықтауға мүмкіндік береді (сурет 6).



сурет 6. Плазма құрамының диаграммасы: а) фторпласт, б) индий

Ионизацияның эффективті энергиясын есептеу үшін плазмадағы -электрон тығыздығы мәнін білу қажет. Бір, екі ретті ионизация жүретін төменгі температуралы плазманың құрамын есептеу үшін теңдеулер жүйесі төмендегідей жазылады:

; ;

; ;

, немесе ;

, немесе;

; ; ;

; .

Бұл теңдеулер жүйесінің шешімін төмендегідей түрде көрсетуге болады.

мұндағы , , , нейтралды бөлшектер, электрондар, бір және екі ретті ионизацияланған иондарға сәйкес парциалды қысым (және тығыздық); және бір және екі ретті ионизацияның дәрежесі.

§11.6 Плазманың термодинамикалық параметрлері

Белгілі бір шарттарда плазманы идеал газ ретінде қарастыруға болады..Алайда мұндай шарттардың өзінде плазманың идеалдылықтан ауытқуына әсер ететін электростатикалық тартылыс күштері болады. Электростатикалық тартылыс күші плазманың термодинамикалық параметрін анықтауда ескеріледі. Плазманың ішкі энергиясы оның бөлшектерінің хаосты қозғалысының кинетикалық энергиясынан, бөлшектердің электростатикалық өзара әсерінің орташа энергиясынан және сәулелену энергиясы қосындысынан тұрады.

(11.33)

мәндері тәжірибелік тұрғыдан немесе статистикалық термодинамика әдістерімен анықталады. Идеал газда болғандықтан, . Тепе-теңдікті плазма үшін (11.33) теңдігі келесі түрде жазылады.

(11.34)

мұндағы -көлемдегі зарядталған бөлшектер саны; - бөлшектер арасындағы өзара әсер арақашықтығы; Z-ионның зарядтық саны; - Стефан- Больцман тұрақтысы; - жарық жылдамдығы.

Плазмадағы бөлшектер арасындағы әсерлесу арақашықтығын сипаттаушы -дебай радиусы болғандықтан, плазманың ішкі энергиясы төмендегідей түрде анықталады.

(11.35)

(11.35) ішкі энергия функциясы температурадан тәуелді болғандықтан айнымалысында сипаттаушы функция бола алмайды. Еркін энергиясы немесе Гельмгольц энергиясы плазма үшін сипаттаушы функция қасиетін сақтайды. Еркін энергия,

(11.36)

Олай болса,

; ; .

(11.36) теңдеуден изотермиялық процесстерде жұмыс ішкі энергияның кемуі есебінен емес, еркін энергияның кемуі есебінен атқарылады. , онда плазманың еркін энергиясы:

(11.37)

Нернст теоремасы көмегімен интеграл тұрақтысы екендігін дәлелдеуге болады, олай болса (11.35) теңдеуін (11.37) теңдеуіне қойып мынаны аламыз:

немесе интегралдаудан кейін

(11.38)

Плазманың *F* еркін энергиясының өрнегі арқылы плазманың басқа термодинамикалық параметрлерін внықтауға болады.

қысым

(11.39)

энтропия

(11.40)

кезіндегі жылусыйымдылық

(11.41)

кезіндегі жылусыйымдылық

(11.42)

энтальпия

(11.43)

Екі, үш және одан да көп компонентті плазманың термодинамикалық параметрлері плазмадағы барлық компоненттер суммасымен анықталады. Мысалы көп компонентті плазманың энтальпиясы мен энропиясы мына тәуелділікпен анықталады:

мұндағы *M* және *p*- плазманың молярлық массасы мен қысымы; және - плазмадағы әрбір компонент үшін (11.39), (11.40) және (11.43) теңдеулер бойынша анқталатын өлшемдер. Зарядталған бөлшектер тығыздығы мен температурадан тәуелділігінің термодинамикалық параметрлер үшін алынған теңдік есептеулер үшін өте ыңғайлы, бірақ бұл параметрлердің ионизация дәрежесінен тәуелділігін жеткіліксіз сипаттайды. Егер плазманың ионизация дәрежесі мен идеалды газ параметрлері белгілі болса, онда төменгі температуралы толықтай емес иондалған плазманы термодинамикалық параметрлер арқылы анықтауға болады. Плазманың тығыздығы, ионы және электроны бұл жағдайда мына қатынаспен анықталады:

атомдар, иондар және электрондарға қатысты атомдық массалар. Мұндай шартта, сонымен қатар және ескере отырып, төмендегі теңдіктер үшін алуымызға болады:

плазма күйінің теңдеуі

(11.44)

плазманың меншікті жылусыйымдылығы

(11.45)

(11.46)

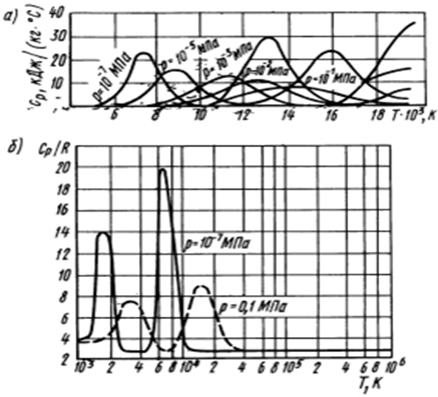
плазма энтальпиясы мен ішкі энергиясы

(11.47)

(11.48)

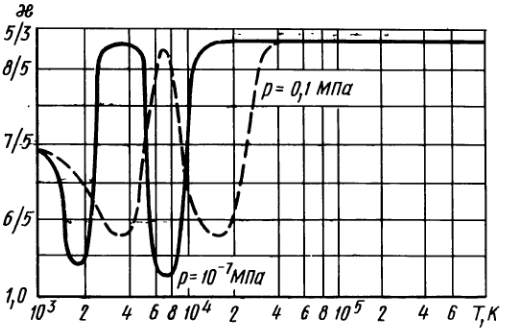
Бұл теңдеулерде - ионизация дәрежесі, - ионизация энергиясы.

Плазманың жылусыйымдылығын практикалық есептеу кезінде (11.41), (11.42), (11.45) және (11.46) теңдіктерінен ғана емес, сонымен қатар графикалық дифференциалмен анықтауға болады, егер тәуелділігі белгілі болса, онда



сурет 7. Плазма жылусыйымдылығының температура мен қысымнан тәуелділігі: а) аргон, б) сутегі

7а,б-суретінде температура мен қысымнан аргон мен сутегі плазмасының жылусыйымдылығының тәуелділігі көрсетілген. Диссоциация мен ионизация аймағында көп мөлшерде жылуды сіңіру кезінде плазманың жылусыйымдылығы күрт жоғарылайды, кейін қайтадан төмендейді. Изоэнтропия көрсеткішінің температура мен қысым бойынша өзгерісі, идеалды газды сипаттайтын мөлшерінен диссоциация мен ионизация аймағында изоэнтропия көрсеткішінің күрт төмендеуін көрсетеді (сурет 8).



сурет 8. Сутегі плазмасының изоэнтропты көрсеткішінің өзгерісі

Қысымның өсуімен жылусыйымдылықтың өзгерісі мен энтропия көрсеткіші аздап деңгейлеседі. Әрбір атом кем дегенде екі бөлшекке бөлінуіне (электрон және ион) байланысты плазманың газ тұрақтылығы мен молярлық массасы ионизация процессінде өзгереді. Көп ретті ионизация кезінде электрондар саны соған сәйкес жоғарылайды. Егер плазманы электрон, ион және нейтралды атомдар қоспасы ретінде қарастырсақ, онда қатысты атомдық массасы мынаған тең:

мұндағы ; және атом, ион және элетронның массалық немесе молярлық бөлігі. деп алатын болсақ, онда

(11.49)

Жалпы түрде көп ретті ионизация кезіндегі қатысты атомдық масса:

(11.50)

мұндағы k-еселік ионизациясы (k=1,2,…,k); - k-еселік ионизациясының дәрежесі. Егер плазмалық күйге газ қоспасын жіберетін болса, онда k-еселік ионизациясының j-қоспа компоненті үшін қатысты атомдық масса төмендегідей көрсетіледі.

(11.51)

ал плазманың қатысты молекулалық массасы сумма бойынша анықталады.

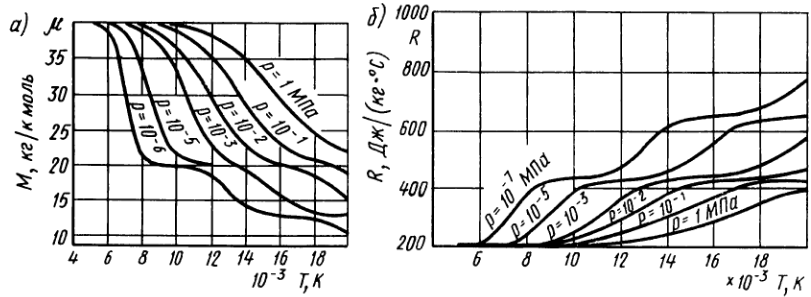
(11.52)

мұндағы бөлшек компонентінің қатысты тығыздығы. Молекулярлық массаның өзгеруімен плазманың газ тұрақтысы да қоса өзгереді, сондықтан

(11.53)

мұндағы - универсал газ тұрақтысы.

Плазманың газ тұрақтысы мен массасының температура мен қысымнан тәуелділігн 9-шы суреттегі қисық түрлерінен көруге болады.



сурет 9. Аргон плазмасы параметрлерінің өзгерісі: а) салыстырмалы атомдық масса, б) газ тұрақтысы

Термодинамикалық параметрлердің барлық қатынастары идеалды плазма үшін алынған. Ал идеалды емес жағдайда (плазманың) плазманың ішкі энергиясы Ферми (11.16) энергиясына сәйкес келеді, ал күй теңдеуі (11.17) теңдеуімен сипатталады. кезінде жүйе параметрлерден тұрмайды және мұндай плазма үшін термодинамикалық параметрлердің аналитикалық теңдігін көрсету мүмкін емес.

Плазманың жұмысшы дене ретінде жұмыс атқаратын, әр түрлі процесстердің есептемелері кезінде арнайы -диаграммасын қолдануға болады.

§11.7 Магниттелген плазманың қасиеті

Күшті магниттелген өрісте орналасқан плазма магнитсізденген плазмаға қарағанда өзіндік қасиеттермен ерекшелінеді. Оның қасиеті әр бағытта әр түрлі, өйткені мұндай плазма анизотропты зат болып табылады. Бұл дегеніміз магниттік өріс зарядталған бөлшектердің қозғалысына әсер етпейді, алайда көлденең бағытта оның қозғалысын едауір шектейді. Осыған байланысты магниттік өрісті бойлай және көлденең магниттелген плазмада зарядталған бөлшектер қозғалысының жылдамдығы әр түрлі және мұндай плазманы екі температурамен сипаттайды: бойлық (немесе параллельді) және көлденең (перпендикуляр). Бұлардың әр температураларына сай өзіндік қысымдары болады (параллель және перпендикуляр қысым).

Мысалы, магниттік өрістің *В* кернеулігі *z* осін бойлай, ал Е электрлі – *х* осін бойлай бағытталады. Көлденең магниттік өрісінің электр өткізгішіне перпендикуляр вектормен бағытталған және B осы өріс жағынан күш әсер етеді. Максвелл теңдеуіне сәйкес магниттік өріс кернеулігі заңына сай ауысадыда, осыдан Олай болса F күш мына теңдікпен анықталады.

(11.54)

Егер магниттік өріс тек көлденең бағытта өзгерсе, онда

(11.55)

Плазманың толық қысымы мен толық ішкі энергиясы көлденең магниттік өрісте сумма бойынша анықталады.

(11.56)

(11.57)

мұндағы және -магнитсізденген плазманың кинетикалық қысымы мен ішкі энергиясы; - плазма тығыздығы. Магнит өрісінің және соңынан магниттік қысымның жоғарылауымен плазма температурасы мен тығыздығының өсуін қамтамасыз етеді. Егер магнит өрісінің кернеулігінің өзгерісі тығыздық өзгерісіне пропорционал деп алатын болсақ, онда плазма энтальпиясы мен ішкі энергия өзгерісі мына теңдікпен анықталады.

және

Алынған қатынасты дифференциалдай отырып, күй теңдеуін ескеріп былай жазамыз:

(11.58)

(11.59)

- плазма энтальпиясы мен меншікті ішкі энергиясы магниттік өріс кезінде оның тығыздығынан тәуелді. Идеалды газда және идеалды магнитсізденген плазмада мұндай тәуелділік қарастырылмайды.

Егер энтропия өзгерісі магниттік өрістің болмауы кезінде мына қатынаспен анықталатын болса, онда магниттік өріс кезінде мына қатынасқа тең: . Бұл қатынастардың анализі плазманың энтропиясы магниттік өрістен тәуелді емес және екендігін көрсетеді.

Тұрақты көлемде плазманың меншікті жылусыйымдылығы мен магниттік өрістен тәуелді емес.

(11.60)

Бұл жағдай кинетикалық қысым тұрақты болғанда мынаған тең:

немесе ескере отырып,

(11.61)

Осыдан адиабата көрсеткіші үшін теңдік мына түрге енеді.

(11.62)

§11.8 Плазманы энергетикалық қондырғыларда қолдану

Плазма-энергетикалық техникада жаңа сапалы жұмысшы дене болып табылады. Ол төменгі температуралы ( дейін) және жоғары температуралы ( жоғары) болуы мүмкін. Төменгі температуралы плазма магнитогидродинамикалық (МГД) генераторда және термоэлектрондық түрлендіруде (ТЭП, ал жоғары температуралы плазма – термоядорлық энергетикалық қондырғыларда ) қолданылады. Сонымен қатар плазманы активті орта ретінде лазерде пайдаланылады.

Химиялық реакцияда атом мен молекулалардың тек сыртқы қабықшасы қатысады да, өзгеріссіз қалады. Сондықтан оттегідегі дейтерияның (сутегінің ауыр изотопы) жану реакциясы Q жылудың бөлінуімен жүреді.

,

мұндағы .

Термоядролық энергетика үшін назар аудартатын, дейтерия мен трития синтезінің термоядролық реакциясы мына түрге ие:

(11.63)

(11.64)

T- тритий (сутегінің аса ауыр изотопы ); n-нетрон;p-протон. Қарапайым шартта жоғарыда көрсетілген (11.63) және (11.64) реакциялар жүрмейді, өйткені кулондық энергия кедергісін жеңуге қажетті активтендіру энергиясы өте жоғары.

(11.65)

мұндағы электр зарядтары; м ядро арасындағы арақашықтық.

Ядро электростатикалық кедергіні кинетикалық энергия есебінен ядролардың тебуінен жеңе алады және сондықтан синтездің термоядорлық реакция өтетін температура өте жоғары және шамалап К құрайды. Мұндай температурада әрбір заттолықтай ионизацияланған плазма күйінде және ядро мен еркін электрондардан тұрады. (11.64) реакциясы энергетикалық тұрғыдан өте тиімді, өйткені К тең температурада өтеді, ал (11.63) реакциясы өтуі үшін К температура қажет.

Энергияның бөліну жылдамдығы химиялық реакция кезіндегі энергияның бөліну жылдамдығына сәйкес болуы үшін дейтерий мен тритий тығыздығын бензин тығыздығынан есе кіші болуы қажет. Алайда (11.63) және (11.64) реакцияларын жүргізу қиын болып табылады. Термоядорлық реакция энергетикалық тиімді болып табылады, егер

(11.66)

мұндағы *η*- ішкі энергияны электрге айналдыратын коэффициент; - термоядролық реакция процессінде бөлінетін энергия; - реакцияның жүруіне жұмсалған энергия. (11.64) реакциясын қарастырсақ, бұл реакция процессінде бірлік көлемде бөлінетін энергия:

(11.67)

Бұл реакцияны жүзеге асыруға кеткен энергия мынаған тең:

(11.68)

мұндағы - реакцияның тепе-теңдік константасы; - -тағы дейтерия мен трития ядроларының саны; - раекция уақыты; -Больцман тұрақтысы; *Т*- реакция температурасы; - бірлік уақытта бірлік көлемдегі плазманың сәулелену энергиясының шығыны. К температура кезінде негізгі сәулелену түрі тежелуші сәулелену болып табылады, интенсивтілігі мынаған тең:

(11.69)

-заряд саны; - ион мен электронға сәйкес концентрация; - электрон температурасы. Сәулелену шығыны әрине жоғары ,алайда оның бәрі температураға байланысты, осыдан теңсіздік реакциясы төмендегідей жазылады:

(11.70)

мұндағы ядроның толық саны. К жұмыстық температура кезіндегі (11.63) реакциясы үшін

(11.71)

(11.70) және (11.71) критерийлері Лоусон шарты деп аталады. Сондықтан термоядорлық реакцияны жүргізу үшін оң энергияның шығуы мен плазманы К температураға дейін белгілі бір концентрацияда қыздыру қажет және Лоусон шарты орындалғанша уақыт аралығында қолдау қажет. Термоядорлық реакция температурасына дейін плазманы қыздырып және оны ұстап тұру қиын ғылыми-техникалық мәселе болып табылады.

Плазманы қажетті температураға дейін қыздыруды ойлап табылған әдісі- омдық әдіс яғни, өзінен ағып жатқан ток арқылы плазманы қыздыру әдісі болып табылады. Бірақ та бұл әдіс қосымша қыздыруды қажет етеді. Қазіргі уақытта инжекциялы, жоғары жиілікті, лазерлі, турбулентті, адиабаттты және т.б. ең көп таралған әдістерге жатады.

Плазманы ұстап тұру жүйесі Лоусон шартын орындау үшін уақыт аралығында орнықты плазмалық түзілуін қамтамасыз етуі қажет. уақыт аралығында термоядорлық энергетикалық қондырғы квазистационарлы және импульсты деп бөлінеді. Квазистационарлы қондырғыларда плазма магниттік өріспен ұсталынады. Сонымен қатар магниттік өрісті туғызатын қысым кинетикалық қысымнан жоғары болуы қажет.

мұндағы - магниттік өрісті ұстап тұратын индукция. Мұндай қондырғылар үшін бөлшек концентрациясының мәні , ұстап тұру уақыты c.

Импульсты термоядорлық қондырғыларда плазманы ұстап тұратын инерциялық әдіс қолданылады. Бұл жағдайда термоядорлық реакция плазманы ұстап тұрмай- ақ қысқа уақыт аралығында аяқтайды. Мұндай типті қондырғыларға концентрация бөлшегі , ұстап тұру уақыты c.

Плазманы магнитті ұстап тұру жүйесінің эффективтілігі плазманың кинетикалық қысымының магниттік өрісті ұстап тұратын қысымға қатынасын сипаттайды.

кезінде магниттік өріс плазмаға өтпегенде магнит өрісінің индукциясы минималды мәнге ие Плазманың термоядорлық параметрі кезінде тең. Нақты жағдайда 𝛽 және .

§11.9 МГД –генераторы бар энергетикалық қондырғы

Энергетикадағы ғылыми-техникалық прогрессті бағыттарының бірі -энергияға аналдыру барысында аралық сатыларсыз, жұмысшы дененің бастапқы температурасын жоғарылату жолымен энергияны алу және ПӘК-ті көтеру болып табылады.

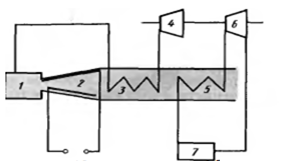
МГД - генераторлары жоғарғы бастапқы температурамен жұмыс істейді және қозғалатын бөлшектері болмайды. МГД- генераторда арнайы аса өткізгіш магнит жүйесін тудыра отырып, магнит өрісін көлденең жоғары жылдамдықпен қозғалатын төменгі температуралы плазма қолданылады. МГД-генераторын қолдану жылуэлектр станциясының ПӘК-ін 40-42 ден 50 дейін, ал болашақта 50 дейін көтереді және қоршаған ортаға зиянды қалдықтармен жылулық шығынды азайтып, отын үнемділігін арттырады.

МГД-генераторы конструкциясы жағынан конфигурациясы мен канал өлшемімен ерекшелінеді. Ең көп таралғаны және қарапайымы плазма ағысының жолында ұлғаятын тік төртбұрышты ағысты сызықтық канал. Дискті МГД-генераторында канал жоғарғы және төменгі дисктер тіреліп тұратын, радиус бойынша орналасқан қабырғалармен түзіледі.Қуаты 25 МВт тең У-25 ИВТАН МГД-генераторының сызықтық каналының геометриясы наминальды режимде канал ұзындығы бойынша тұрақты 900 м/с жылдамдыққа тең. Электродтар-секциялы 60-100мм қадамды, канал ұзындығы 6,4 м, ағыс жүретін бөліктің биіктігі 0,38-0,42 м; шыға берістегі каналдың ені 1,34-2 м.

Бұл генераторда электродтар әр түрлі қоспалармен керамикадан , ал изоляторлар магний оксидінен MgO жасалған. МГД-генераторында мыстан және никель, хром, вольфрамға негіделген жоғары температуралы құймадан жасалған электродтар қолданылады. Изолятор материалы ретінде алюминий оксиді қолданылады. Әрбір МГД-генераторының меншікті қуаты плазманың жылдамдық квадраты мен генератор каналындағы магниттік өріс индукциясының квадратына пропорционал . МГД-генераторы каналында магниттік өріс тудыру үшін арнайы магниттік жүйе қолданылады. Бұл жүйе тек аса өткізгіш магниттік жүйемен шешіледі.

Өндірісті МГД-генераторлар үшін генератор каналында қуаты N 250 МВт магниттік өріс индукциясы шамамен 6Тл құрайды. Аса өткізгіш орамға материал ретінде 4,2К температура кезінде Тл максималды индукция ие қорытпасы қолданылады.

Аса өткізгіш магниттік жүйе МГД-генераторының басқа да бөліктерімен салыстырғанда металл сыйымдылғымен және бағасының жоғарылығымен сипатталады. МГД-генераторы бар құрамдастырылған қондырғы циклда жылу айырымын қолдану дәрежесіне тәуелділігмен, ашық және сонымен қоса тұйық жүйеде де жұмыс істей алады. Қарапайым ашық сұлбада плазма МГД-генераторы каналынан және әр түрлі жылуалмастырғыш аппараттарынан өтіп қоршаған ортаға жіберіледі (сурет 10).



сурет 10. Ашық циклды МГД-генераторы бар қондырғы схемасы: 1-жану камерасы, 2-МГД-генератор, 3-регенератор, 4-компрессор, 5-жылуалмастырғыш, 6-турбина, 7-насос.

Тұйық жүйе сұлбасында плазма тұйық контурда циркуляцияланып, 3 жылуалмастырғышта салқындатылып және 4 арнайы фильтрда тазаланады. Плазманың толық жылуын қолдану және жалпы ПӘК-ін арттыру бір контурлы немесе екі контурлы регенерацияда орындалады. Осыдан плазма жылуын 2 МГД-генераторына (10 сурет), 2 регенераторға және 5 жылуалмастырғышқа тізбектей беріледі.

§11.10 **МГД- генераторының термодинамикалық негізі.**

МГД-генераторында меншікті жұмыс l, каналға кіре берісінде («н» индексі) және шыға берісіндегі («к» индексі) энтальпиялар айырымымен анықталады.

(11.71)

мұндағы -нен дейін температура диапазонындағы орташа жылусымдылық.МГД-генераторы каналындағы плазма ионизация дәрежесі әдетте 1 аспайды, оның жылусыйымдылығы нейтралды газ жылусыйымдылығынан айырмашылығы жоқ. Каналдағы плазманың адиабатты ұлғаю процессі:

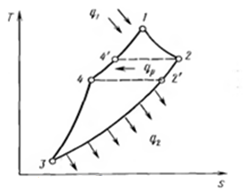
(11.72)

ал каналдағы термиялық ПӘК немесе энергияға айналу ПӘК-ті мынаған тең:

(11.73)

Егер плазманың каналдағы ұлғаю процессі изотермиялық болса, онда

Ұлғаю дәрежесі жоғары болған кезде изотермиялық процесс кезінде жасалған жұмыс адиабаталыққа қарағанда үлкен болады. Регенерациясыз МГД-генераторының термодинамикалық циклы 3-4 компрессордағы газды сығу процессінен тұрады (сурет 11): 4-1 жану камерасындағы газды қыздыру (плазманың түзілу процессі), 1-2 плазманың каналда ұлғаюы және 2-3 жылуалмастырғышта газдың салқындатылуы.



сурет 11. Регенерациялы МГД-генераторының нақты циклы

Осы циклға сәйкес газды сығу кезінде келтірілген жылу мөлшері,

(11.74)

жану камерасында (p=const процессінде)

(11.75)

Плазманың ұлғаю процессінде бөлінетін жылу мөлшері мынаған тең:

(11.76)

ал жылуалмастырғышқа берілген жылу мөлшері мынаған тең:

(11.77)

Бұл теңдіктердегі - үйкелісті жеңуге кеткен энергия шығынын ескергендегі компрессордың механикалық ПӘК-ті; - электр тізбегіндегі энергия шығынын ескергендегі МГД-генераторының электрлік ПӘК-ті; - жылуалмастырғыш кезіндегі энергия шығынын ескергендегі коэффициент.

МГД-генераторындағы энергия өзгерісінің ПӘК-ті:

(11.74)- (11.77) формулаларын ескеріп,

немесе кезінде .

Плазмадан ауаға регенераторға берілетін регенерациялы қондырғыдағы (11.13 сурет) қосымша жылу мөлшері, ( регенрация дәрежесі). Олай болса циклдын жалпы ПӘК-ті мынаған тең:

Егер және болса, онда тең болады. Алынған теңдікке анализ жасай отырып, регенеративті қыздырылуы бар циклдың ПӘК-ті қыздырусызға қарағанда жоғары екендігін көруге болады.

Бақылау сұрақтары

1. Тығыздықты, орташа тығыздықты және сиретілген плазма үшін плазма тербеліс жиілігін қалай сипаттайды?
2. Егер электр өрісіндегі разрядтың кернеулігі Е, ал плазмадағы еркін электрондар жүрісінің ұзындығы болса, электрлік разрядтың плазмасы үшін термиялық тепе-теңдік шартын анықтаңыз.
3. Қандай шарт кезінде плазмада Ферми энергиясы анықтаушы бола алады?
4. Магниттелген плазмадан токты магнитсізденген плазманың термодинамикалық параметрлер айырмашылығы немен түсіндіріледі?
5. Магнитогидродинамикалық қондырғыға сипаттама беріңіз.
6. Жоғары температуралы және төменгі температуралы плазма дегеніміз не?
7. Ионизация газын жоғарылату мақсатында қандай әдістер қолданылады?
8. Жылуэнергетика саласында плазманы қолданудың артықшылығы мен кемшілігі?

XII ТАРАУ. ХИМИЯЛЫҚ ТЕРМОДИНАМИКА ЭЛЕМЕНТТЕРІ

§**12.1 Химиялық термодинамика элементтері.**

**Химиялық реакция классификациясы.**

Химиялық термодинамиканың мазмұны жылуэнергетика мамандығы студенттеріне арналып құрастырылған. Құрылымы бойынша термодинамика жалпы, техникалық және химиялық деп бөлінеді. Жалпы термодинамика математикалық аппарат көмегімен әртүрлі процесстерді қарастыра отырып, термодинамиканың үш бастамасы немесе заңына тіреледі.

Термодинамиканың бірінші бастамасы материяның сақталу заңының дербес жағдайы болып табылады және материя қозғалысының бір формадан екінші формаға түрленуі кезінде энергияның сақталу заңын қарастырады. Неміс ғалымы Гельмгольц «Табиғатта энергия жоғалмайды және жаңадан туындамайды, ол тек бір түрден екінші түрге өзгереді» деп жазды.

Термодинамиканың екінші бастамасы – процесс бағыты жайлы заңдылық және берілген шартта процесстің қай бағытта жүретіндігін болжауға мүмкіндік береді.

Термодинамиканың үшінші бастамасы – энтропия деп аталатын функцияның абсолюттік мәні жайлы заңдылық.

Техникалық термодинамика осы заңдылықтар мен тұжырымдарының жылу двигательдерінде қолдануын қарастырады. Химиялық процесстерді зерттеуге термодинамикалық әдістердің қолданылуы, химиялық реакцияларда пайда болатын жылулық құбылыстар мен энергияның түрленуі химиялық термодинамиканың мазмұнын құрайды. Химиялық реакция нәтижесінде пайда болатын энергия химиялық деп аталады. Химиялық энергия жүйедегі химиялық өзгерістер процесінде пайда болатынішкі энергияның бір бөлігі болып табылады.

Химиялық реакция жылудың бөлінуі немесе жұтылуы арқылы жүреді. Жылуды бөлу арқылы жүретін реакция – экзотермиялық, ал жылудың жұтылуымен жүретін реакция – эндотермиялық реакция деп аталады. Экзотермиялық реакцияға мысал ретінде көміртегі мен сутегі реакциясын келтіруге болады

Эндотермиялық реакцияға мысал ретінде ацетиленнің түзілу реакциясы қарастырылған

Химиялық реакция бастапқы заттың толығымен түрленуіне дейін жүрмейді, ол тек қана белгілі бір шекке дейін жүріп, содан соң тоқтайды. Осы аралықта жүйеде реакция өнімдерімен бірге белгілі бір мөлшерде бастапқы және аралық заттар пайда болады. Ол дегеніміз бір мезетте қарама-қарсы екі бағытта реакцияның жүретіндігін көрсетеді. Реакцияның қарама-қарсы екі бағытта жүруі химиялық қайтымдылық деп аталады және ол стехиометриялық теңдеумен былай жазылады

(12.1)

(12.1) теңдеуіндегі – реакцияға қатысатын заттардың белгіленуі; -стехиометриялық коэффициенттер; жоғарғы стрелка бастапқы заттардан және соңғы өнімдерінің түзілетіндігін, ал төменгі стрелка мен бастапқы өнімдерінің түзілу бағытына қарай реакцияның жүретіндігін көрсетеді. Бастапқы зат мөлшерінің кемуімен процесстің жүруі, яғни реакция жылдамдығы баяулайды, ал кері реакция жылдамдығы артады. Соңында белгілі бір температурада тіке және кері реакция жылдамдықтары теңеседі, жүйедегі зат мөлшері уақыт өтуге байланысты өзгеріссіз қалады да реакция тоқтайды. Мұндай жағдайда химиялық тепе-теңдік орнайды. Кинетикалық тұрғыдан химиялық тепе-теңдіктің орнауы толық тыныштық орнағандығын білдірмейді, керісінше реакция үзіліссіз жүреді, бірақ екі бағытта да бірдей жылдамдықпен жүреді.

Көп жағдайда кері реакция жылдамдығы өте аз, оны ескермей, реакция бір бағытта жүреді деп қарастыруға болады. Реакцияға түсетін молекулалардың санына байланысты қайтымсыз немесе бір бағытта жүретін газ реакцияларын мономолекулалы, бимолекулалы, тримолекулалық деп классификациялауға болады. Егер реакция барысында қандай да бір заттың молекуласы бірнеше молекулаға түрленетін болса, онда мұндай реакцияны ыдырау реакциясы немесе диссоциация деп атайды. Мұндай реакцияға мысал ретіндегі төмендегі ыдырау жатады:

Заттың диссоциациялануы өте жоғары температурада жүреді.Әртүрлі заттардың екі молекуласы басқа заттың бір немесе бірнеше молекуласына өзгеруі бимолекулалық немесе екінші текті реакция деп аталады. Би және тримолекулалық реакциялар реакцияланатын молекулалардың соқтығысы нәтижесінде болуы мүмкін.

§**12.2 Химиялық реакцияға қатысты термодинамиканың бірінші заңының қолданылуы**

Қозғалыс – материаның ең негізгі құрамдас бөлігі, ал қозғалыстың өлшемі энергия болып табылады. Ішкі энергия химиялық термодинамиканың негізгі ұғымдарының бірі. Дененің ішкі энергиясының абсолюттік мәні белгісіз, бірақ химиялық құбылыстарды зерттеу үшін жүйе бір күйден екінші күйге өткенде ішкі энергияның өзгерісін білген жеткілікті. Бір денеден екінші денеге өткенде ішкі энергияның өзгерісін екі топқа бөлуге болады. Бірінші топқа екі жанасып тұрған дене молекулаларының хаосты соқтығысу кезінде энергияның берілу формасы жатады. Осындай әдіспен берілетін энергия өлшемі жылу болып табылады. Екінші топқа сыртқы күштің әсерінен көптеген бөлшектер санынан тұратын массаның орын ауыстыруы кезінде энергияның берілу формасы жатады. Мысалы, газдың ұлғаюы мен денені көтеру және т.б. Мұндай әдіспен энергияны беру өлшемі жұмыс болып саналады.

Ішкі энергия көптеген процесстерде жартылай жылу және жұмыс формасында беріледі. Ішкі энергия, жылу мен жұмыс арасындағы байланысты термодинамиканың бірінші бастамасы орнатады. Термодинамиканың бірінші бастамасы энергияның сақталу заңымен тікелей байланысты: кез келген тұйықталған жүйеде энергия тұрақты болады. Ішкі энергияның өзгерісі процесс жолынан тәуелсіз, ал жүйенің бастапқы және соңғы күйінен тәуелді, яғни ішкі энегия күй функциясы деген түсінік химиялық термодинамика үшін маңызды анықтама болып саналады. Жұмысшы денеге берілген жылу мөлшері ішкі энергияның өзгерісі мен сыртқы күшке қарсы атқарылатын жұмысқа кететіндігі техникалық термодинамикадан белгілі

Осы қарастырып отырған жағдайда жұмысшы денеде химиялық өзгеріс болмайды, тек қана параметрлері өзгереді. Химиялық реакцияның жүруі реакцияланатын заттардың молекуласындағы атом күйінің өзгерісімен байланысты. Атом күйі өзгерісімен бірге жылу немесе жұмыс түрінде байқалатын ішкі энергияның өзгерісі жүреді. Заттың 1 молі үшін, реакцияның жұмысымен қатар реакция кезінде байқалатын ұлғаю, сығылу, электрлік, магниттік және т.б. процесстер үшінхимиялық реакцияға қатысты термодинамиканың бірінші заңы келесі түрде жазылады

(12.2)

мұндағы -жүйедегі ішкі энергияның өзгерісі; -реакция жылуы; -реакция жұмысы. Химиялық термодинамикада ішкі энергияның кемуі мен экзотермиялық реакцияның бөлінетін жылу мөлшері оң, ал ішкі энергияның өсуі мен жылудың жұтылуы (эндотермиялық) теріс деп қабылданған. Қабылданған ережеге сай термодинамиканың бірінші заңы келесі түрге ие

(12.3)

немесе

(12.4)

Реакция жұмысы

(12.5)

мұндағы –ұлғаю немесе сығылу жұмысы

(12.6)

– электрлік, жарықтық, магниттік және басқа күштерге қарсы атқарылған жұмыс. Осыдан

(12.6) теңдеуін интегралдау үшін газдың қысымы мен көлемі арасындағы байланысты, яғни газ күйі теңдеуін білу қажет. Мұндай тәуелділік идеал газ үшін Менделеев-Клапейрон теңдеуімен сипатталады:

(12.7)

мұндағы - идеал газ мөлшері, - молярлық газ тұрақтысы . Изобаралы, изотермалы, адиабаталы, изохоралы, изобаралы-изотермиялық процесстердегі максимал ұлғаю жұмысы үшін өрнектерді қарастырайық.

1. Изобаралық процессте (12.6) теңдеуінен төмендегіні аламыз

(12.8)

және ескере отырып, келесі түрде жазуға болады

(12.9)

2. Изотермиялық процесс үшін (12.6) теңдеуіндегі -ның орнына мәнін қойып, интегралдағаннан кейін, осы процесстегі максимал жұмыс келесі түрге келеді

(12.10)

Изотермиялық процесс үшін екенін ескере отырып,

(12.11)

3. Адиабаталық процессте газдың температурасы мен қысымы бірге өзгереді. Сондықтан газ сырттан жылу алмайды, адиабаталық ұлғаю жұмысы ішкі энергияның кемуі есебінен жүреді де газ салқындатылады:

(12.12)

Ішкі энергияның өзгерісі тұрақты көлемде идеал газдың молярлық жылусыйымдылығынан тәуелді, яғни

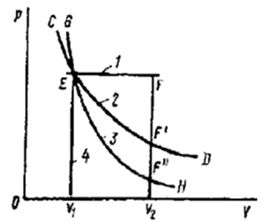
(12.13)

(12.12) мен (12.13) теңдеулерін салыстыра отырып,

(12.14)

мұндағы .

4. Изохоралық процесстегі жұмыс (12.6) теңдеуі бойынша нольге тең екендігі белгілі. диаграммасы бойынша аталған 4 процесс үшін газдардың ұлғаю немесе сығылу жұмыстары 1-суретте көрсетілген.



сурет 1.1-изобаралық, 2-изотермиялық, 3-адиабаталық, 4-изохоралық процесстердегі идеал газдың ұлғаю жұмысы

5. Изобаралы-изотермиялық процессте қысым мен температура тұрақты болады. Химиялық реакция әсерінен газ қоспасында -мольдер саны өзгеретін болса, мысалы

немесе сұйықтың булануы сияқты физикалық процесстерде газдардың изобаралы-изотермиялық ұлғаю немесе сығылу процесстері жүреді. Бұл кезде идеал газдың максимал ұлғаю жұмысы (12.8) теңдеуіне сәйкес

тең болады. Тұрақты қысым мен температурада (12.7) теңдеуінен келесі түрге келеді

осыдан

(12.15)

мұндағы - реакция нәтижесіндегі газдың мольдер санының өзгерісі. шамасы процесс кезінде газдардың мольдер санының өсуі мен кемуіне байланысты оң және теріс мәндерге ие болуы мүмкін.

§12.3 **Термохимия.** Химиялық реакцияның жылулық құбылысы. Гесс заңы

Термохимия әртүрлі физика-химиялық процесстердің жылулық құбылысын есептеу үшін Гесс заңының қолданылуын қарастыратын химиялық термодинамика бөлімі. Химиялық реакциялардың жылулық құбылысы деп, тек қана ұлғаю жұмысы болғанда қайтымсыз реакциядағы бөлінетін және жұтылатын жылу мөлшерін атайды. Егер химиялық реакцияда ұлғаю және сығылу жұмыстарынан басқа жұмыс атқарылмаса, () болып, (12.3) төмендегідей түрде жазылады

(12.16)

Жүйенің ішкі энергиясының өзгерісі реакция жолынан тәуелсіз, бірақ реакцияның бастапқы және соңғы күйімен анықталады. Олай болса жылулық құбылыс та реакцияның бастапқы және соңғы күйімен анықталады. Егер сыртқы жұмыс атқарылмаса, онда жылулық құбылыс реакция жылуына тең болады. Жылулық құбылыс шамасы реакцияның тұрақты көлемде немесе тұрақты қысымда жүретіндігінен байланысты. Химиялық реакция тұрақты көлемде жүргенде сыртқы қысым күшіне қарсы жұмыс атқарылмайды. Бұл жағдайда , және термодинамиканың бірінші заңына сәйкес:

(12.17)

Изобаралық процессте (12.4) теңдеуін интегралдау мен қарапайым түрлендіру төмендегі теңдеуді береді

(12.18)

Химиялық термодинамикада ішкі энергиямен байланысты термодинамикалық функциясы маңызды шама болып табылады

(12.19)

(12.19) теңдеуін ескерсек, (12.18) теңдеуін төмендегідей жазуға болады

(12.20)

Олай болса, изобаралық процесстің жылуы жүйенің энтальпиясының өзгерісіне тең. Изобаралық және изохоралық процесстердегі жылудың шексіз аз өзгерісін төмендегідей жазуға болады

(12.21)

(12.17) және (12.20) теңдеулерінен изохоралы және изобаралы процесстер үшін процесстің жылуы күй функциясы қасиетіне ие екендігі белгілі, яғни жылу процесс жолынан тәуелсіз, ал жүйенің бастапқы және соңғы күйінен тәуелді болады. Жүйеде реакцияның жылулық құбылысының аралық реакциядан тәуелсіздігі Гесс заңы деп аталады. Бұл заң термодинамиканың бірінші бастамасының математикалық салдары және термохимияның теориялық негізі болып саналады.

(12.17) және (12.20) теңдеулеріне сәйкес тұрақты көлемде химиялық реакцияның жылулық құбылысы реакция кезіндегі жүйенің ішкі энергиясының өзгерісіне тең, ал тұрақты қысымда реакцияның жылулық құбылысы жүйенің энтальпиясының өзгерісіне тең:

(12.22)

Тұрақты көлемде жылудың бөлінуімен жүретін, яғни экзотермиялық реакцияның жылулық құбылысын , ал тұрақты көлемде жүретін реакцияның жылулық құбылысын деп белгілейді. Изобаралық процесс үшін (12.9) теңдеуі төмендегідей жазылады

(12.23)

Химиялық реакция үшін (12.23) және (12.15) теңдеулерінен аламыз:

, (12.24)

мұндағы - химиялық реакцияның жүру барысында газтәрізді заттардың моль сандарының өзгерісі. Егер жылулық құбылысы белгілі болса, (12.24) теңдеуінен реакцияның жылулық құбылысын есептеуге болады.

Реакцияның термохимиялық теңдеулерін жазғанда реагенттердің агрегаттық күйі мен реакцияның жылулық құбылысы көрсетіледі. Мысалы,

мұндағы -қатты өнім, -газ тәрізді, -сұйық. Реакцияның жылулық құбылысы тең. Реакцияның жылулық құбылысын есептеуде Гесс заңының қолданылуын темірдің тотығуы мысалы арқылы қарастырайық. Темір ауамен реакцияласа отырып, темір тотығын түзеді.

(12.25)

Бұл реакция 2 атомды темір тотығын - аралық өнім түзе отырып, басқаша жолмен жүруі мүмкін:

(12.26)

(12.27)

Бұл реакциялардың барлығы тұрақты қысымда жүреді. Сонымен қатар реакциялардың бастапқы және соңғы күйлері бірдей. Гесс заңының көмегімен екі реакцияның жылулық құбылысы белгілі болса, қалған реакцияның жылулық құбылысын анықтауға болады. Ол үшін мынадай екі әдіс қолданылады.

1. Термохимиялық теңдеулерді алгебралық қосу. (12.26) және (12.27) реакция теңдеулерін алгебралық қосып, және қысқартып аламыз:

(12.28)

(12.28) термохимиялық теңдеу (12.25) теңдеумен бірдей екендігі байқалады. Осыдан Гесс заңына сәйкес

шығады. Негізінде төмендегі теңдеуден алынған мән (12.25) теңдеудегі мәнімен сәйкес келеді.

2. Термохимиялық схемаларды құру. Жылулық құбылысты есептеу үшін термохимиялық схема төменде келтірілген.



жол бойынша (12.25) реакцияның жылулық құбылысы жол бойынша (12.26) мен (12.27) реакцияларының жылулық құбылыс қосындыларына тең болады.

§12.4 Заттың түзілуі мен жануының жылулық құбылыстары

Реакцияның жылулық құбылысы реакцияланатын заттардың физикалық күйінен және реакция жүретін шарттардан тәуелді. Сондықтан реакцияның жылулық құбылысын жүйелеп, салыстыру үшін стандарттық күй деген ұғым қолданылады. Стандарттық күй ретінде температура мен қысымның мынадай мәндері алынған: . Стандарттық күйдегі шаманы, мысалға былай белгілейді . Термохимияда барлық элементтердің энтальпиясы стандарттық күйде нольге тең деп қабылданған. Гесс заңын қолдана отырып, реакция өнімдері мен реагенттер түзілуінің молярлық жылулық құбылысы арқылы реакцияның жылулық құбылысын анықтауға болады (сурет 2).



сурет 2. Заттың түзілуінің жылулық құбылысы

Реакцияның жылулық құбылысы төмендегі қатынаспен анықталады:

Химиялық реакция процесінде қандай да бір зат түзіледі және осы процесс жылулық құбылыспен қатар жүреді. Реакция барысында жылулық құбылыс мәні жүйенің сыртқы параметрінің өзгерісімен (мысалы, температура) қатар өзгереді. Жылудың түзілуі деп, қандай да бір заттан 1 моль заттың түзілу реакциясының жылулық құбылысын атайды. Стандартты жағдайдағы жылу түзілу белгілі болса, күй параметрлерінің басқа мәндеріндегі жылудың түзілуін анықтауға болады. Химиялық байланыстың жылулық түзілуі молекуладағы атомдар арасындағы байланыс энергиясын анықтай алмайды. Ол үшін атомдардан байлансқын жылудың түзілуін қарастыру қажет. Жылу түзілудің практикалық маңыздылығы, реакцияға қатысатын барлық заттардың жылу түзілуін біле отырып, реакцияның жылулық құбылысын есептеуге болады. Гесс заңы бойынша реакция теңдеуіндегі коэффициенттерін ескеріп, реакцияның жылулық эффектісі соңғы өнімнің жылу түзілу қосындысы мен бастапқы өнімнің жылу түзілу қосындысы айырымдарына тең екендігі белгілі. Реакцияға қатысатын қарапайым заттардың жылу түзілуін шартты түрде нольге тең деп қабылдауға болады. Мысалы, егер термохимиялы теңдеулер белгілі болса,

реакцияның жылулық эффектісін анықтауға болады:

Жылудың түзілуінің есептелуі

Қатты және сұйық отындардың жану жылуын анықтаудың практикалық маңызы ерекше, жану жылуы арқылы реакцияның жылулық құбылысын анықтауға болады. Мысалы, реакциясы бойынша метанның жылу түзілуін анықтау қажет. Егер термохимиялық теңдеуі белгілі болса,

Жану жылуы келесі жолмен анықталады:

Отынның жану жылуын анықтауды қарастырамыз. 1 кг қатты, сұйық отынның немесе газдың толық жануы кезінде бөлінетін жылу мөлшері *отынның жоғарғы жану жылуы* деп аталады. Жану кезіндегі су буының бутүзілу жылуынан басқа 1 кг қатты, сұйық отынның немесе газдың толық жануы кезінде бөлінетін жылу мөлшерін *төменгі жану жылуы* деп атайды. Жоғарғы және төменгі жану жылуы арасындағы қатынасты келесі түрде жазуға болады:

(12.29)

мұндағы 1 кг отынның құрамындағы ылғалдылық массасы мен сутегінің жануы нәтижесінде түзілетін ылғалдылық массасы

(12.30)

ал -бутүзілу жылуы, шамасына тең деп алынады. мен мәндерін (2.29) теңдеуіне қойғаннан соң, жұмысшы масса үшін теңдеу келесі түрге келеді:

(12.31)

Ал құрғақ және жанғыш масса үшін жану жылуы:

(12.32)

(12.33)

Сыртқы шарт өзгерген жағдайда отынның белгілі бір сорты үшін жану жылуын отынның жанғыш массасы бойынша есептеуге болады:

(12.34)

Отынның жұмысшы массасының жану жылуы және құрғақ массасының жану жылуы арасындағы байланыс былай өрнектеледі:

(12.35)

Бу генераторларының оттық қондырғыларында және жану камераларында отынды жағу тұрақты қысымда жүреді. Мұндай жағдайда бөлінетін жылудың бір бөлігі реакцияланатын қоспа көлемінің өзгерісіне байланысты атқарылатын сыртқы жұмысқа кетеді.

(12.36)

мұндағы -газдың моль санының өзгерісі, -универсал газ тұрақтысы. Тұрақты қысымдағы жану жылуы энтальпияның изотермиялық өзгерісімен анықталады, ал тұрақты көлемдегі жану процесінде сыртқы жұмыс атқарылмайды, ал жану жылуы ішкі энергияның изотермиялық өзгерісімен анықталады. (1.22) ескере отырып, тұрақты қысымдағы -жану жылу шамасы мен тұрақты көлемдегі -жану жылуы арасындағы байланысты төмендегідей түрде жазуға болады

(12.37)

§12.5 Жылулық құбылыстың температурадан тәуелділігі. Кирхгофф теңдеуі

Реакция жылуының температурадан тәуелділігі Кирхгоф теңдеуімен анықталады. Бұл тәуелділікіті шығару үшін изохоралы-изотермиялық реакция теңдеуіндегі шамасын температура бойынша дифференциалдаймыз

мұндағы – реакция басталғандағы және соңындағы алынған өнімнің изохоралық жылусыйымдылықтары. Осыған ұқсас изобаралы-изотермиялық процесс үшін келесі өрнекті аламыз

мұндағы –реакция басталғандағы және соңындағы алынған өнімнің изобаралық жылусыйымдылықтары. Жалпы жағдайда Кирхгоф теңдеуі төмендегідей түрде жазылады

(12.38)

Реакцияға дейінгі және кейінгі жылусыйымдылықтардың қосындысы төмендегі формуламен анықталады

(12.39)

мұндағы -бастапқы заттың моль саны мен жылусыйымдылығы; -реакция соңында алынған заттың моль саны мен жылусыйымдылығы; -реакцияның басындағы және соңындағы заттардың компонент саны. (12.39) теңдеуін (12.38) теңдеуіне қойып, келесі өрнекті аламыз

(12.40)

(12.40) теңдеуі Кирхгоф заңының математикалық өрнегі, мұндағы туындысы реакция жылуының температуралық коэффициенті деп аталады. Осы теңдеуден тәуелділігі белгілі болса реакция жылуын анықтауға болады.

§12.6 Термодинамиканың екінші заңын химиялық процесстерге қолдану

Тұйықталған жүйе үшін термодинамиканың екінші заңының аналитикалық өрнегі

мұндағы теңдік пен теңсіздік белгісі қайтымды және қайтымсыз процесстерді білдіреді. Адиабаталық жүйе үшін . Тұйықталған жүйеде қайтымды процесс жүретін болса, оның энтропиясы өзгеріссіз, ал қайтымсыз процесс жүретін болса, жүйе энтропиясы өседі.

Жүйеде орнықсыз қайтымсыз процесстен кейін тепе-теңдік орнаса, жүйенің энтропиясы максимал мәнді қабылдайды. Осыдан и . Сонымен, энтропия процесс бағытын және оның тепе-теңдік шартын анықтайтын функция болып табылады. Бірақ, процесстің қайтымсыздығы мен жүйенің тепе-теңдігін сипаттау үшін энтропияның орнына өте ыңғайлы шама ретінде изохоралы-изотермиялық және изобаралы-изотермиялық потенциалдар қолданылады.

§12.7 Изохоралы-изотермиялық (еркін энергия) және изобаралы-изотермиялық потенциал

Термодинамикада макрожүйені зерттеудің екі әдісі бар: цикл және сипаттаушы термодинамикалық функциялар әдісі. Термодинамикалық функциялар әдісі циклдық әдіске қарағанда термодинамикалық жүйе күйін дәлірек сипаттайды. Термодинамикалық функциялардың ішінде жиі қолданылатын сипаттаушы функцияларға ішкі энергия , энтальпия изохоралы-изотермиялық потенциал (еркін энергия), изобаралы-изотермиялық потенциал (еркін энтальпия) жатады. Жүйенің кез келген қасиетін сипаттайтын шамаларды осы сипаттаушы функциялар арқылы өрнектеуге болады. мен функцияларын қолданғанда тәуелсіз айнымалылардың бірі – энтропия болып табылады және энтропияны өлшеудің мүмкін еместігі аталған функцияларды қолданғанда қиындық туғызады. Сол себепті , немесе , тәуелсіз айнымалыларын өлшеуде еркін энергия мен еркін энтальпия функциялары жиі қолданылады.

, тәуелсіз айнымалыда еркін энергия сипаттаушы функция болады, яғни

Еркін энергияның , тәуелсіз айнымалыларындағы толық дифференциалы

(12.41)

Термодинамиканың бірінші заңына сәйкес

, осыдан немесе

Соңғы теңдеуді тұрақты температурада () интегралдап, аламыз

немесе

мұндағы күй функциясы, белгілеу енгізіп, келесі түрде жазамыз

(12.42)

олай болса

(12.43)

яғни тұрақты температура мен тұрақты көлемде жүйенің жұмысы осы процесстегі функциясының кемуіне тең. (12.42) теңдеуден, тұрақты температура мен көлемде жүйенің ішкі энергиясы толығымен жұмысқа айнала алмайтындығы шығады. Жүйенің ішкі энергиясының бір бөлігі тек қана -еркін энергиясы жұмысқа айналады. Сонымен, еркін энергия деп, тұрақты температурада жүйенің ішкі энергиясының жұмысқа айнала алатын бөлігін ғана атайды. Бұл жұмыс , егер процесс қайтымды болса пайдалы және максимал мәнге ие болады. Максимал пайдалы жұмыстың шамасы құрамында көлем өзгерісіне қарсы атқарылатын жұмыс жоқ, өйткені жүйедегі процесс шарты бойынша процесс тұрақты температура мен көлемде жүреді. Максимал пайдалы жұмыс электрлік жұмыс болуы да мүмкін. Жұмысқа айналмаған ішкі энергияның қалған бөлігі - байланысқан немесе пайдасыз энергия деп аталады. Жүйенің энтропиясы қаншалықты көп болса, соншалықты пайдасыз энергия көп болады. (12.42) теңдеуді дифференциалдап, аламыз

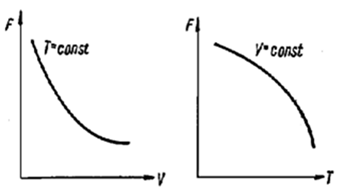
Термодинамиканың бірінші заңы өрнегінен ішкі энергия өзгерісінің мәнін жоғарыдағы теңдеуге қойып, аламыз

(12.43)

(12.40) және (12.43) теңдеулерін салыстыра отырып, табамыз

, (12.44)

Сонымен, жүйеде , ал -ұлғаю болғанда -еркін энергия кемуінің өлшемі, ал жүйеде , ал -ұлғаю болғанда -еркін энергия кемуінің өлшемі болып табылады (сурет 4).



сурет 4

Изобаралы-изотермиялық потенциал және тәуелсіз айнымалыларындағы сипаттаушы функциялар болып табылады, яғни

Еркін энтальпияның тәуелсіз айнымалыларындағы толық дифференциал

(12.45)

Энталпия ішкі энергиядан -шамасымен өзгеше болатындай, термодинамикалық потенциал да еркін энергиядан -шамасымен ерекшеленеді , яғни

(12.46)

Процесс тұрақты қысым мен температурада жүретін болса, онда төмендегі формуланы аламыз

немесе

екендігін ескеретін болсақ, жоғарыдағы теңдеу келесі түрде жазылады

(12.47)

мұндағы -жүйенің тұрақты қысымы мен температурасында термодинамикалық потенциалдың кемуіне тең жүйенің максимал пайдалы жұмысы. Максимал пайдалы жұмыс -максимал пайдалы жұмыс пен сығылу жұмысынан тұрады.

(12.48)

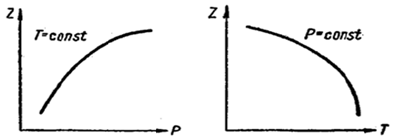
(12.48) теңдеуінен табылған мәнін термодинамиканың бірінші заңы бойынша ішкі энергияның өзгерісі теңдеуіне қойып, келесі теңдікті аламыз

(12.49)

(12.49) теңдеуінен және айнымалыларының мәні шығады:

(12.50), (12.51)

Осы теңдеулерден жүйенің температурасы тұрақты, қысымы артқанда жүйенің көлемі термодинамикалық потенциал өсуінің өлшемі болады, ал жүйе қысымы тұрақты, температурасы өскенде жүйенің энтропиясы термодинамикалық потенциалдың кемуінің өлшемі болады (сурет 5).



сурет 5. Тәуелсіз параметрлер өзгергенде сипаттаушы функциялар өзгерісі

және - сипаттаушы функциялар деп аталады. -тұрақты көлемде жүйенің еркін энергиясы немесе Гельмгольц энергиясы, ал -тұрақты қысымда жүйенің еркін энергиясы немесе Гиббс энергиясы деп аталады.

§12.8 Гиббс-Гельмгольц теңдеулері

(12.42) теңдеуі мен энтропияның мәнін беретін (12.46) теңдеуге сәйкес, келесі теңдеуді аламыз

(12.52)

Бұл тұрақты көлемде жүретін процесстер үшін Гиббс-Гельмгольц теңдеуі. Осы теңдеуді жүйенің екі күйі үшін жазамыз:

және

Бірінші теңдеуден екінші теңдеуді азайтып, аламыз

және

Осыдан:

(12.53)

Бұл (12.52) теңдеуінің басқаша формада жазылуы. (12.46) теңдеулеріне және энтропияның мәнін беретін (12.51) теңдеулеріне сәйкес, тұрақты қысымда жүретін процесстер үшін Гиббс-Гельмгольц теңдеуін аламыз

(12.54)

(12.53) теңдеуіне ұқсас қысымы тұрақты жүйеде атқарылатын жұмыс

(12.55)

§12.9 Химиялық потенциал

Химиялық реакцияларда термодинамикалық процесстерге қарағанда жеке компоненттердің массасы өзгереді. Мұндай жағдайда кез келген жүйенің қасиетін зат мөлшері арқылы анықтайды, яғни көрсетілген параметрлер ішіндегі екі айнымалының функциясы ретінде қарастырылады. Математикалық тұрғыдан химиялық потенциал тәуелсіз параметрлер және жүйедегі басқа компоненттер тұрақты болғанда сипаттаушы функцияның жүйедегі компоненттің моль саны бойынша дербес туындысын береді:

(12.56)

(12.57)

(12.58)

(12.59)

Егер мольдік концентрация (үлесін) енгізетін болсақ

(12.60)

- күй функциясы болғандықтан, болғанда, химиялық потенциал былай өрнектеледі:

(12.61)

Жоғарыда қарастырылған термодинамикалық функциялар -энергияның өлшем бірлігіне ие, олай болса химиялық потенциал берілген уақытта дене массасы өзгерісіндегі энергияның өзгерісін сипаттайды. Химиялық потенциал фазалық ауысу мен химиялық термодинамикада жиі қолданылады. Химиялық потенциал жүйедегі дененің химиялық энергиясының интенсивтілігін көрсетеді, сондықтан химиялық энергияны интенсивтілік факторының сыйымдылық факторы көбейтіндісі ретінде қарастыруға болады. Сыйымдылық факторына – моль саны немесе берілген заттың концентрациясы жатады. Олай болса, химиялық энергия өзгерісін деп көрсетуге болады. Бірақ тепе-теңдік күйде химиялық энергия өзгерісі болмайды, яғни .

Жүйеде берілген заттың концентрациялық өзгерісі процесінде химиялық потенциалды жылулық эффект , немесе атқарылатын жұмыс деп қарастыруға болады. Бірнеше жүйе бірігіп бір жүйе құрайтын болсын, сонымен қатар жаңа құрылған жүйедегі сыйымдылық факторы біріккенге дейінгі бөлек жүйелердің сыйымдылық факторына тең және интенсивтілік факторы да бастапқы мәнімен тең болсын. Егер олай болмаса, жүйеде тепе-теңдік орнау процесі жүреді. Жүйенің тепе-теңдігі үшін жүйенің барлық бөлігіндегі заттардың химиялық потенциалдары тең болуы керек.

§12.10 Тұйықталған біртекті (гомогенді) жүйенің орнықтылық шарты.

Екі элементар жүйеден тұратын және осы екі жүйе тепе-теңдікте болатын тұйықталған біртекті жүйені қарастырайық. Термодинамиканың екінші заңы бойынша, тепе-теңдік критерий ретінде жүйе энтропиясының өзгерісі болмайды, яғни Энтропия аддитивті болғандықтан, былай жазуға болады

(12.62)

Термодинамикалық теңдікті басқаша мына түрде жазуға болады

(12.63)

(12.63) теңдеуін бірінші және екінші элементар жүйе үшін келесі түрде жазамыз

мен мәнін (13.31) теңдеуіне қойып,

(12.64)

Егер ішкі энергия мен көлем бір-бірінен тәуелсіз болса,

Онда ішкі энергия мен көлем дифференциалдары да бір бірінен тәуелсіз. Олай болса (13.33) қатынасынан келесі теңдеулер алынады

Егер және тең болса, соңғы қатынас орындалады. Осыдан, тұйықталған жүйе тепе-теңдікте болғанда жүйенің температурасы мен қысымы барлық бөлігінде бірдей болады. Тұйықталған термодинамикалық жүйе екі элементар жүйеден тұрады және осы екі жүйенің заттары әртүрлі екі фазада ораналасқан, яғни

(12.65)

тұрақты температура мен тұрақты қысымда изобаралы-изотермиялық потенциал тепе-теңдік шартында минимум мәнге ие, яғни

(12.66)

Изобаралы-изотермиялық потенциалдың аддитивтілігіне байланысты жүйенің потенциалы келесі түрде жазылады

(12.67)

(227) қатынасы негізінде бірінші және екінші элементар жүйелер үшін келесі теңдеулер орынды

(12.68)

(12.68) теңдеуді (12.67) теңдеуге қойып, жүйенің тепе-теңдік шартында төмендегі теңдеулер

(12.65) теңдеуінен болатындығын ескерсек .

Температура мен қысымның бірдей болуымен қатар фазалардың химиялық потенциалдар теңдігі шарты орындалса гетерогенді жүйенің тепе-теңдік шарты орындалады. Олай болса, тепе-теңдік шартында екі фазадағы меншікті энергиялар тең болады. Егер фаза саны екеуден көп болса, тепе-теңдік шартында

немесе

. (12.69)

Химиялық реакция тепе-теңдікте болғанда белгілі мөлшердегі моль саны бар қандай да бір компонентті енгізгенде изобаралы-изотермиялық потенциал мәні мынадай шамаға өзгереді

Осыдан изобаралы-изотермиялық потенциал теңдеуі

төмендегідей түрде жазуға болады

немесе

болғанда химиялық реакцияланатын газдар үшін

(12.70)

Идеал газдар үшін химиялық потенциал теңдеуі

(12.71)

мұндағы - қоспадағы -компоненттің изобаралы-изотермиялық потенциалының парциалдық мәні; --компоненттің химиялық потенциалының мәні; --компоненттің парциалдық қысымы.

§12.11 Массалардың өзара әсерлесу заңы және химиялық реакцияның тепе-теңдік тұрақтысы

Егер жүйенің күйі берілген сыртқы шарттарда (температура мен қысым) уақыт бойынша өзгермейтін болса химиялық жүйе тепе-теңдікте болады. Тепе-теңдік жүйенің толық тыныштығын білдірмейді. Керісінше жүйеде қарама-қарсы бағытта процесстер жүріп жатады. Термодинамиканың екінші заңы негізінде (12.52) және (12.54) қатынастары химиялық тепе-теңдік шартын орнатуға мүмкіндік береді. Массалардың өзара әсер заңының термодинамикалық қорытындысын алу үшін гомогендік жүйе үшін газдың химиялық реакциясын қарастырамыз

мұндағы стехиометриялық коэффициенттер, яғни заттарына сәкес мольдер саны. мен заттарының арасында өзараәсерге ұмтылатын ұқсастық бар. Ондай ұқсастық мен арасында да болады. Реакция қарама-қарсы екі бағытта жүреді. Қарама-қарсы бағытталған реакция жылдамдығы үшін келесі өрнектерді жазуға болады:

(12.72)

(12.73)

мұндағы мен реакция жылдамдығының тұрақтылары, ал - молярлық концентрация. Егер болса, мен молекулалары мен арасындағы реакцияға қарағанда көп түзіледі, ал мен концентрациялары азяды, керісінше мен концентрациялары артады. Егер болса, мен молекулалары мен реакция заттарына қарағанда көп түзіледі, ал мен концентрациялары кемиді, мен концентрациялары артады. Егер болса, екі реакция да бірдей жылдамдықтармен жүреді, ешқандай көрінетіндей өзгеріс болмайды, өйткені заттарының молекулалар саны бірдей. Сонымен қатар тепе-теңдік орнайды. Тура және кері реакциялар жылдамдықтары үшін жазылған өрнекті қолдана отырып, тепе-теңдік тұрақтысы деген ұғымға келеміз:

(12.74)

осыдан

(12.75)

мұндағы -тура реакция жылдамдық тұрақтысының кері реакция жылдамдығы тұрақтысына қатынасына тең тепе-теңдік тұрақтысы. Тепе-теңдік тұрақтысының өрнегін жазғанда, бөлшектің алымында теңдеудің сол жағындағы заттардың концентрация көбейтінділері, ал бөлшектің бөлімінде теңдеудің оң жағындағылар жазылады. Барлық уақытта тепе-теңдік тұрақтысы өрнектелетін химиялық реакция теңдеуін жазғанда ерекше көңіл бөлу қажет. Өйткені бірдей реакция бағытына және қанша моль санына жазылған реакцияға байланысты тепе-теңдік тұрақтысы әртүрлі сандық мәнге ие болады. Мысалы, температураға қатысты келесі теңдеулер:

1. 2

Тепе-теңдік тұрақтысының сандық мәні тепе-теңдік күйін сипаттайды және реакцияланатын заттың бастапқы концентрациясы өзгерген жағдайда да тұрақты өзгермейді. Тепе-теңдік тұрақтысының шамасы реакцияға қатысатын заттардың бастапқы өнімі ретінде қандай зат және қандай мөлшерде алынатындығына және тәуелсіз. Тепе-теңдік тұрақтысы реакцияға қатысатын барлық заттардың концентрациясын байланыстырады және реакция барысында заттардың ешқайсысының концентрациясын өзгертуге болмайды. Массаның өзара әсерлесу заңының мазмұны осында.

Массалардың өзара әсер заңының термодинамикалық шешімін қарастырамыз. Тепе-теңдік шартында гомогенді газдың химиялық реакциясы келтірілген

Тепе-теңдіктегі реакцияланатын заттардың химиялық потенциалын деп белгілейміз. Химиялық потенциал компонент мөлшері өзгерген жағдайда сипаттаушы функциялардың өлшемі болғандықтан тепе-теңдік шартында

(12.76)

немесе келесі түрде жазуға болады

мұндағы -стехиометриялық коэффициент, -реакцияның ішкі тәуелсіз параметрі ретінде алынған айнымалы, реакция жүрісінің саны. Химиялық реакцияларға термодинамикалық талдау жасағанда бұл шама өте тиімді. Реакцияның тепе-теңдік күйінде мен заттарының мольдері түзілу процесі заттарының моль сандарының кемуімен жүреді.

(12.77)

(12.78)

(12.77) және (12.78) теңдеулерін қолдана отырып, келесі түрде жазамыз

(12.79)

Олай болса,

(12.80)

Осы теңдеуден

(12.81)

(259) теңдеудің оң жағы тек температурадан тәуелді, оны арқылы белгілеп, келесі теңдеулерді аламыз:

(12.82)

немесе

(12.83)

§12.12 Термиялық диссоциация. Диссоциация дәрежесі

Тепе-теңдік тұрақтысы мен диссоциация дәрежесі арасындағы тәуелділік

Газ күйіне өзгерген және жоғары температураға дейін қыздырылған көптеген заттар бірнеше бөліктерге бөлінеді, сонымен қатар бөліну дәрежесі температураның өсуімен артады. Бөліну немесе ыдырау реакциясы диссоциация деп аталады. Мысал ретінде, су буы мен көмірқышқылының диссоциациясын келтіреміз

және одан да жоғары температурада екі атомды газдар бір атомды газдарға ыдырайды, мысалы

Диссоциация – бұл эндотермиялық реакция, яғни реакцияны жүзеге асыру үшін сырттан алатын энергия шығыны қажет. Диссоциацияланған заттың сандық күйі ыдыраған молекула санының ыдырауға дейінгі молекула санына қатынасын беретін -диссоциациялану дәрежесін сипаттайды. Мысалы, сутегінің бір молі оттегінің жарты молімен қосылып толығымен жанғанда бір моль су буы түзіледі.

Бірақ диссоциация нәтижесінде тепе-теңдікке жақындаған сәтте қоспада бір моль су буы емес, ал моль су буы болады. Қоспада диссоциация өнімі сутек пен оттегі болады, сонымен қатар сутегінің моль саны оттегіден екі есе көп болады. Өйткені су буы ыдырағанда сутегінің бір молекуласы және оттегінің жарты молекуласы түзіледі. Диссоциация дәрежесі тепе-теңдік сәтіндегі реакцияланатын қоспалардың құрамын анықтауға мүмкіндік береді. Тепе-теңдік тұрақтысы арқылы да қоспа құрамын анықтауға болады.

Диссоциациядан кейінгі жалпы молекулалар санының диссоциацияға дейінгі молекулалар санына қатынасы -диссоциация коэффициенті деп аталады. Диссоциация коэффициентін басқаша изотоникалық деп те атайды. Диссоциация дәрежесі мен коэффициенті арасындағы және байланысты анықтау қажет делік. Мысалы, бастапқыда молекула болсын, диссоциация нәтижесінде молекулаға ыдырады. Егер әрбір молекула молекулаға ыдыраса, онда қайтадан түзілетін молекула құрайды. Ыдырамаған молекула мөлшерде қалды. Сонымен, барлығы молекуланы құрайды. Осыдан

,

немесе

(12.84)

Егер диссоциация болмағанда 0-ден толық диссоциация болған кездегі 1-ге дейін мәнді қабылдай алады, ал -диссоциация коэффициенті 1-ден -ге дейінгі мәнді қабылдайды. Сонымен қатар реакция түріне байланысты әртүрлі мән қабылдауы мүмкін. Диссоциация коэффициентінің мәні төмендегі қатынаспен анықталады

, (12.85)

-заттың теориялық молекулалық салмағы; -сол заттың тәжірибелік молекулалық салмағы.Диссоциация дәрежесі мен тепе-теңдік тұрақтысы арасындағы тәуелділік былай жазылады

және

Моль санының кемуімен жүретін сутектің жану реакциясы

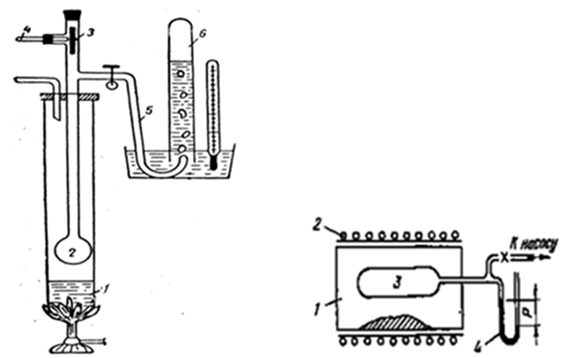
Тепе-теңдік моментінде жану өнімінің құрамы мынадай: сутегі молі, оттегі молі және су буының молі. Газ қоспасының формуласын қолданып, компоненттердің парциалдық қысымын табамыз

Төмендегі формула бойынша тепе-теңдік тұрақтысын анықтауға болады

Соңғы теңдеуден диссоциация дәрежесі диссоциация кезіндегі қысым арқылы анықталатындығы шығады.

§12.13 Тепе-теңдік тұрақтысын тәжірибелік анықтау әдісі

Реакция барысында процесс тепе-теңдігі шартын анықтау үшін реакцияның бірнеше түрі мен реакцияланатын заттардың қасиеттері ескерілетін зерттеудің бірнеше әдістерді ұсынады. Гомогендік газ орнықтылығын зерттеу үшін жүйеде орналасқан газдың парциалдық қысымын білу қажет. Қысым тек сирек жағдайда тікелей өлшенеді. Парциалдық қысымды көбінесе тығыздықты бақылау арқылы анықтайды. Қысымды анықтаудағы ең тиімді В. Мейер әдісі болып табылады (сурет 6). Қолданылатын 1-цилиндрде сұйық орналасқан. Осы сұйық қайнауға дейін қыздырылады да 2-ыдыста белгілі тұрақты температураны ұқстап тұрады. Зерттеліп отырған зат 4-ампулада 2-ыдыстың жоғары жағындағы жіңішке 3-түтікшемен бекітілген. 1-цилиндрдегі сұйықты 5-түтікшеден көпіршік бөлінбейтін жағдайға дейін қайнатады. Қайнаған сұйықты 6-газөлшегіш түтікше деңгейіне дейін келтіріп, 3-түтікшені алып тастап, 4-ампуланы 2-ыдыс ішіне тастайды. Ампула сынып, оның ішіндегі зат буланады, диссоциацияланады немесе олардың өзара әсері жүреді. Осы сәтте ауаның белгілі көлемі ығысып шығады. Өлшеу 6-газөлшегіш түтікше арқылы жүргізіледі. Заттың массасы, көлемі, қысымы мен температурасы бойынша тығыздық анықталынады.



сурет 6 сурет 7

сурет 6. Винтер Майер қондырғысының схемасы

сурет 7. Жартылайөткізгіш тосқауыл әдісі

Бұл әдіс әртүрлі заттың буының тығыздығын анықтау үшін жиі қолданылады. Сонымен қатар осы әдіс диссоциация реакциясын зерттеу үшін де кеңінен қолданылады. Егер газ жүйесінде сутегі болатын болса, онда сутегінің парциалдық қысымы жартылайөткізгіш тосқауыл әдісі бойынша анықталады (сурет 7). 1-сутегі орналасқан жүйеге 2-термостат орналастырылады, 3-ішінен ауасы сорылған платиналық немесе ирридий ыдысты осы жүйе ішіне орналастырады. Бұл ыдыс 4-манометрмен жалғанған. Жоғарғы температурада сутегі 3-ыдысының қабырғасының материалы арқылы диффузияланады, ал басқа газдар диффузияланбайды. Диффузия 1-ші жүйедегі және 3-ші ыдыс ішіндегі қысым теңескенше жүреді. Осы қысым манометрмен өлшенілетін сутегінің парциалдық қысым болып табылады. Осы әдіспен, жүйенің тепе-теңдігін зерттеуге болады:

Егер тепе-теңдікте тұрған жоғары температуралы жүйені жылдам салқындатса, онда теңсіздік орын алып үлгермейді, тепе-теңдік сәтінде соңғы қоспадағы газ мөлшерін анықтауға болады.

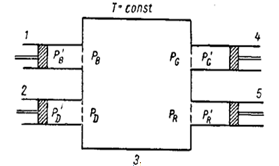
§12.14 Тепе-теңдік тұрақтысы мен максимал жұмыс арасындағы тәуелділік. Химиялық реакцияның изотермиялық теңдеуі.

Әртүрлі денелердің жаңа затты түзе отырып өзара әсерлесуін химиялық ұқсастық деп атайды. Химиялық реакция жылдамдығы мен реакцияның толықтығы реакцияланатын заттардың ұқсастығымен анықталады. Голландиялық физик, әрі химик Вант-Гофф химиялық ұқсастықтың өлшемі ретінде максимал жұмысты қолдануды ұсынды, яғни химиялық ұқсастық дәрежесі максимал жұмыс шамасынан тәуелді. Мысалы, егер реакция тұрақты көлемде жүретін болса, химиялық ұқсастық өлшемі ретінде максимал жұмыс, яғни еркін энергияның өзгерісі қолданылады . Егер реакция тұрақты қысымда жүретін болса, химиялық ұқсастық өлшемі ретінде термодинамикалық потенциал өзгерісі қолданылады . Максимал жұмыс мәні қаншалықты үлкен болса, реагенттердің химиялық ұқсастығы соншалықты көп.

Максимал жұмыс реакцияның жүретін жолынан тәуелсіз, ол тек заттың қасиеті мен бастапқы және соңғы күйінен тәуелді; максимал жұмыс таңбасы реакция бағытын анықтайды, өйткені реакция максимал оң жұмыстың атқарылу бағытымен жүреді; максимал жұмыс реакцияны тоқтату үшін жүйеге қажетті энергия шамасын көрсетеді; максимал жұмыс шамасы тепе-теңдік тұрақтысы шамасын анықтайды.

Химиялық реакцияның максимал жұмысын өлшеу үшін «Вант-Гофф» қорабы қарастырылады (сурет 8). «Вант-Гофф» қорабында 1 мен 2 цилиндр поршеньдері арқылы бастапқы реагенттерді жеке-жеке бастапқы қысымнан тепе-теңдік қысымына дейін сығу немесе ұлғайту процесі жүреді. Содан соң өткізгіш тосқауыл арқылы реагент 3-резервуарға өтеді. 3-резервуарда барлық реагент қоспасының қысымы тепе-теңдікке келеді, содан соң 4 пен 5 цилиндрлік поршеньдер арқылы шығарылып, тепе-теңсіздікке дейін сығылады немесе ұлғайтылады. Резервуардағы зат саны өте көп, сондықтан басқа газды енгізу немесе шығару зат концентрациясы мен қысымын өзгерте алмайды.

Изотермиялық тура және кері атқарылған жұмыстарды қоса отырып, реакцияның максимал жұмысын алуға болады. Тепе-теңдік тұрақтысы реакция толығымен жүргенде кеми бастайды, сондықтан ол максимал жұмыспен белгілі бір тәуелділікте болады.



сурет 8. Вант-Гофф әдісі

Осы екі шаманы байланыстыратын теңдеу химиялық реакцияның изотермиялық теңдеуі деп аталады. Химиялық реакцияның изотермиялық теңдеуін шығару үшін келесі түрде жазылған қайтымды реакцияны қарастырамыз

,

өзара реакцияға түсе алатын газтәрізді заттар; теңдеудің стехиометриялық коэффициенттері; берілген температурада реакцияның жылулық эффектісі. заттарының тепе-теңдік парциалдық қысымдарын арқылы белгілейміз. Бастапқы парциалдық қысымдарды деп белгілейміз. Бастапқы қысымдар тепе-теңдіктегі қысымдармен тең емес, сондықтан жүйе біртіндеп орнықтылық күйге көшеді. Бұл көшу изотермиялық және кері түрде жүзеге асырып, максимал жұмысты аламыз. 1-поршень көмегімен затының молін қысымнан қысымға дейін көшіреміз, содан соң оны 3-резервуарға енгіземіз. Осы сәтте келесі түрдегі жұмыс атқарылады:

Ары қарай 2-поршень көмегімен затының молін қысымнан қысымға дейін көшіреміз, содан соң оны 3-резервуарға енгіземіз. Осы сәтте келесі түрдегі жұмыс атқарылады:

4-поршень көмегімен түзілген затының молін 3-резервуардан қысымнан қысымға дейін поршеньмен сығып шығарады. Осы сәтте атқарылған жұмыс:

.

5-поршень көмегімен түзілген затының молін 3-резервуардан қысымнан қысымға дейін поршеньмен сығып шығарады. Осы сәтте атқарылған жұмыс:

Тепе-теңдікке өту кезіндегі жұмыстардың барлығын қосып, келесі максимал жұмысты аламыз:

Теңдеудегі мүшесі реакцияның тепе-теңдік тұрақтысына тең

(12.86)

Жоғарыдағы теңдеу тұрақты қысымда жүретін реакциялар үшін қолданылады. Тұрақты көлемде жүретін реакция үшін макксимал жұмыстың тепе-теңдік тұрақтысынан тәуелділігі былай жазылады:

(12.87)

Егер , немесе реакция молекулалар саны өзгермей жүретін болса болады, олай болса . Негізінде . (12.90) химиялық реакцияcы изотермиялық немесе Вант-Гофф изотермиялық теңдеуі деп аталады. Сонымен, химиялық ұқсастық заттың өзгеріссіз қасиеті емес, ал керісінше концентрация, парциалдық қысым мен температураның өзгерісімен бірге өзгеріп отырады. Егер реакциялардың максимал жұмысы немесе оң болса, онда

>0 және

және

немесе төмендегідей жазуға болады

және

Сәйкесінше орнықсыз күйде орналасқан жүйе тепе-теңдікке ұмтылады. Сонымен қатар мен заттарының концентрациясы мен парциалдық қысымы кемиді, ал мен заттары үшін концентрация мен парциалдық қысым артады. Реакция төмендегідей көрсетілген бағытта жүреді.

Максимал жұмыс қаншалықты көп болса, жүйенің тепе-теңдік күйінен соншалықты алыс болады және мен заттарының бір-біріне химиялық ұқсастықтары соншалықты көп болады. Егер реакциялардың максимал жұмысы немесе теріс болса, онда

<0,

, ,

осыдан

, .

Сәйкесінше, орнықсыз күйде орналасқан жүйе тепе-теңдік күйге өтеді; мен заттарының концентрациясы мен парциалдық қысымы кемиді, ал мен заттары үшін концентрация мен парциалдық қысым артады. Олай болса реакция кері бағытта жүреді:

Максимал жұмыс аз болған сайын жүйе тепе-теңдіктен күйден соншалықты алыс болады және мен заттарының бір-біріне әсері немесе химиялық ұқсастығы соншалықты көп болады. Егер реакцияның максимал жұмысы нольге тең болса жүйе тепе-теңдік күйде болады

,

,

Реакцияланатын зат әртүрлі қатынаста бола отырып, бір-біріне әртүрлі жолмен әсерлеседі. Әртүрлі заттардың химиялық ұқсастықтарын салыстыру үшін қалыпты (нормаль) ұқсастық түсінігі енгізілген. Реакцияның бастапқы заттарының концентрациясы мен парциалдық қысымы бірге тең десек, қалыпты ұқсастық теңдеуін алу жеңіл. Олай болса

(12.88)

(12.89)

§12.15 Реакция температурасының химиялық тепе-теңдікке әсері. Ле-Шателье принципі

Тепе-теңдік тұрақтысы бойынша берілген температурадағы қоспа құрамын анықтауға болады. Температура өзгергенде жылулық құбылыстың шамасы мен таңбасына байланысты тепе-теңдік ығысады. Температураның әр түрлі мәнінде қоспаның құрамын анықтау үшін тепе-теңдік тұрақтысының температурадан тәуелділігін білу қажет. Ол үшін (12.90) реакцияның изотермиялық теңдеуін дифференциалдап аламыз

(12.90)

Алынған мен өрнектерін Гиббс-Гельмгольц теңдеуіне қойып, аламыз

Гиббс−Гельмгольц теңдігі, (12.91)

(12.92)

осыдан

Көп жағдайда жоғарыдағы теңдеу мынадай түрде жазылады

(12.93)

немесе

(12.94)

Тұрақты көлемде жүретін реакция үшін

(12.95)

немесе

(12.96)

Бұл теңдеулер тепе-теңдік тұрақтысының температура бойыншы өзгерісі мен реакцияның жылулық құбылысы арасындағы байланысты орнатады. (12.93) және (12.94) теңдеулер химиялық реакцияның изобаралық теңдеулері, ал (12.95), (12.96) теңдеулері химиялық реакцияның изохоралық теңдеулері деп аталады. (12.93)-(12.94) теңдеулерін интегралдағаннан кейін келесі өрнекті аламыз

(12.95)

мұндағы немесе . Егер , яғни реакция экзотермиялық болса, температураның өсуімен мен шамасы артады. Тепе-теңдік тұрақтысының өсуі бастапқы зат мөлшерінің артқандығын және осыған сәйкес реакция өнімінің кемігендігін білдіреді, олай болса температураның өсуімен диссоциация дәрежесі ұлғаяды, ал тепе-теңдік бастапқы зат бағытына қарай ығысады. Осыдан шығатын маңызды қорытынды – экзотермиялық реакцияның толық жүруі үшін салыстырмалы түрде өте жоғары емес температура тиімді. Егер болса, реакция эндотермиялық болады. Температураның өсуімен тепе-теңдік тұрақтысы кемиді, диссоциация төмендейді, тепе-теңдік соңғы өнімнің түзілу бағытына қарай жылжиды. Сондықтан жоғары температура эндотермиялық реакциялардағы реакцияның толық жүруіне септігін тигізеді. Температураның өсуімен реакция жылдамдығы жылдам артады.

Әрбір қайтымды реакция реакцияланатын заттардың температура, қысым және концентрациясынан тәуелді белгілі бір аралыққа дейін жүреді. Егер химиялық тепе-теңдікте орналасқан жүйедегі температура, қысым немесе реакцияланатын заттардың концентрациясын өзгертетін болсақ, онда жүйедегі тепе-теңдік бұзылып, басқа жаңадан тепе-теңдікке ұмтылатын процесс басталады.

Кейбір физикалық шарттарда қоспада бастапқы зат (жанғын зат пен тотықтырғыш) мөлшері көп болған жағдайда жану реакциясының тепе-теңдігі орнайды. Отынның химиялық энергиясын толық қолдану үшін жану реакциясын соңына дейін жүргізу қажет. Өнеркәсіпте отынды жағу процесстерінде жану реакциясының өтуі үшін қажетті уақыттың аздығынан тепе-теңдік көп жағдайда орындалмайды.

Реакция тепе-теңдігінің өзгеру бағытын Ле-Шателье принципін қолданып, болжауға болады, оның мағынасы мынадай: егер химиялық тепе-теңдікте орналасқан жүйеге сырттан әсер еткенде, онда жүйеде осы әсерді жоюға ұмтылатын өздігінен жүретін процесстер пайда болады. Осы принциптен, мысалы реакция жылу бөлу арқылы өтіп жатырсын, сонымен қатар тепе-теңдіктегі жүйені қыздырған сәтте реакция кері бағытта жүреді де жүйенің температурасын төмендететін жылуды жұту процесі жүретіндігі шығады. Эндотермиялық процессте керісінше, температураны көтергенде соңғы өнімнің шығымы ұлғаяды.

Егер жүйеден қандай да бір өнім шығатын болса, тепе-теңдік жүйенің концентрациясының артқан жағына қарай ығысады. Ағында жүретін жану процесіне қатысты, жану өнімінің үздіксіз кетуі жану реакциясының толық жүруіне септігін тигізеді.

§12.16 Нернстің жылулық теоремасы

Практикалық есептер үшін термодинамикалық потенциалдың немес реакция тепе-теңдік тұрақтысын анықтау өте маңызды. Максимал жұмысқа тең болатын химиялық тепе-теңдік күйіне жақындау жолындағы термодинамикалық потенциалдың өзгерісі тепе-теңдік тұрақтысымен тығыз байланысты екендігі белгілі. Практикалық есептер үшін термодинамикалық потенциалдың немесе тепе-теңдік тұрақтысының мәнін білген өте маңызды. Тепе-теңдік тұрақтысын жоғары дәлдікпен тәжірибелік тұрғыдан анықтау өте күрделі. Өйткені тепе-теңдік тұрақтысының мәнін үлкен диапазонды және өте жоғары температурада анықтау қажет, ал өте жоғары температурада концентрация мен парциалдық қысымды анықтау өте қиын. Сондықтан реакцияны қатыру тежеу қолданылады.

Төменгі температурада химиялық реакциялар өте баяу жүретіндігі белгілі. Көптеген реакция бөлме температурасына жақын температурада тоқталады. Сондықтан жоғары температурада тепе-теңдік күйде орналасқан химиялық реакцияланатын газдар қоспасын жылдам салқындатқанда, осы қоспаның құрамы ұзақ уақыт бойы үздіксіз өзгеріссіз қалады. Осы әдіс реакцияны тежеу деп атайды.

Тепе-теңдік тұрақтысын жоғары дәлдікпен тәжірибелік тұрғыдан анықтау қиын болғандықтан термодинамикалық потенциалды анықтау қабылданған. Практикалық есептер үшін потенциалдың абсолюттік мәні емес, оның мәндерінің айырымын білу қажет, мысалы, изобаралық-изотермиялық реакция үшін

(12.96)

немесе

(12.97)

(12.97) теңдеуінің оң жағындағы реакцияның - жылулық құбылысын анықтау қиын емес. Жылулық құбылыс мәні температураның үлкен диапазонында белгілі. Теңдеудің шамасына кеңінен тоқталамыз.

мен мынадай өрнектермен бейнеленеді

(12.98)

(12.99)

мұндағы және шамалары температураға қатысты. Энтропия мен жылусыйымдылықтың мынадай қатынаста екенін біле отырып,

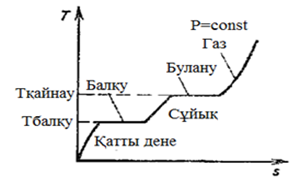
энтропиялар өрнегін келесі түрде жазамыз:

(12.100)

(12.101)

Жоғарыдағы теңдеулер бойынша энтропия мәнін есептеу үшін ұмтылғандағы жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділік сипатын білу қажет. Егер болғанда жылусыйымдылық соңғы шама ретінде қабылданып, жылусыйымдылықты тәжірибелік тұрғыдан анықтау мүмкін емес. Неміс химигі В. Нернст температурада зат энтропиясының абсолюттік мәнін анықтауға мүмкіндік беретін тәжірибелік тұрғыдан дәлелденген Нернст заңын ұсынды. Нернстің жылулық заңының мазмұны мынадай: «абсолюттік ноль температураға жақын температурада тепе-теңдік күйде орналасқан барлық заттардың энтропиясы өзгеріссіз және олар өзара тең». Нернст заңынан энтропия маңайында өзгермейтіндіктен, және туындылары өзгермейді. Сонымен қатар температурада (12.99), (12.100) теңдеулерінің тұрақтылары өзара тең:

Әрі қарай Планк энтропия мәндері өзара тең болуымен қатар, олардың нольге тең екендігін көрсетті. Планк Нернст заңының тұжырымын жалпы былай өрнектеді: «біртекті құрылымыға ие барлық дене көлемінің соңғы энтропиясы абсолюттік нольге ұмтылатын температурада шексіз азяды». интегралын белгілі процесске қатысты есептегенде, сол процесстегі жылусыйымдылықтың температурадан тәуелділігі белгілі болуы керек. Мысалы, изобаралық қыздыру процесінде фазалық ауысулар жүреді, сондықтан энтропияның абсолюттік мәні үшін теңдеу келесі түрге ие:



сурет 9

(12.102)

Нернст заңының практикалық маңыздылығы энтропияның абсолют мәнін есептеуге мүмкіндік береді. -мәнін есептеу үшін Планк формуласы қолданылады. (12.96) теңдеуден:

(12.103)

бірақ

(12.104)

ескере отырып, деп аламыз, мұндағы мен - абсолюттік энтальпиялар, болғандықтан келесі түрде жазуға болады:

(12.105)

ескере отырып, ондық логарифмге көшіріп, аламыз

(12.106)

термодинамикалық потенциалды ескере отырып, тепе-теңдік тұрақтысын келесі түрде жазамыз:

(12.107)

Термиял мәнін анықтауда энтальпия мәндері мен нольге тең деп қабылданады. -бастапқы заттың термиялық қосындысын, ал -реакция өнімі термиялық қосындысын береді. Температураның абсолюттік нольге жақын температурасында заттың энтропиясы өзгермейді және температураның осы аймағында заттың жылу алмасу қабылеті болмайды. Осындай қорытындылар Нернст заңын былай өрнектеуге мүмкіндік берді: жылуды алып кету арқылы денені абсолюттік ноль температураға дейін суыту мүмкін емес.

Бақылау сұрақтары

1. Химиялық потенциал деген не, оның физикалық мағынасы қандай?

2. Реакцияның жылулық эффектісі дегеніміз не?

3. Изохоралық және изобаралық жылулық эффект дегеніміз не және олар өзара қандай байланыста?

4. Гесс заңы қалай өрнектеледі және ол қандай жағдайда нақты орындалады?

5. Гесс заңының негізгі салдары қандай және олар қалай қолданылады?

6. Жылулық эффектінің температура бойынша туындысы үшін Кирхгоф заңы қалай өрнектеледі?

7. Гиббс-Гельмгольц теңдеуінің өрнегі қандай?

8. Максимал пайдалы жұмыс теңдеуінің өрнегі қандай?

9. Әсер ететін масса заңы қалай өрнектеледі және оның физикалық мағынасы қандай?

10. және тепе-теңдік тұрақтылары деген не және олардың арасындағы байланыс қандай?

11. Химиялық реакцияның изотермиялық теңдеуі қалай шығарылады?

12. Химиялық ұқсастық деген не және оның өлшемі қандай?

13. Химиялық реакцияның изобара және изохора теңдеуі қалай шығарылады және олардың жазылуы?

14.Ле-Шателье тепе-теңдік ығысу принципі қалай өрнектеледі?

15.Нернст теоремасы қалай өрнектеледі?

16. Планк постулаты қалай өрнектеледі?

Есептердің шығарылуы

11.1 Қорғасын тотығы, су (бу) және екі атомды қорғасын тотықтарының сәйкесінше 52700, 57800 және 65300 кал/моль стандарт жылу түзілу мәндерін біле отырып, сутегі екі атомды қорғасын мен су (бу) түзілу тотығына дейін қалпына келу реакциясының жылулық құбылысын анықтаңыз.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:*

Гесс заңының төртінші салдарынан

11.2 температура мен қысымда күкірт сутегісінің күкірт пен сутегіге диссоциациялану дәрежесі тең. Осы диссоциациялану реакциясының тепе-теңдік тұрақтысын мен анықтаңыз.

*Берілгені:*

*Т/к*  және

*Шығарылуы:* Қарастырып отырған химиялық реакцияны экзотермиялық бағытта қарастырамыз:

,

олай болса тепе-теңдік тұрақтысын келесі түрде жазамыз:

и

Газдар мен қоспаның парциалдық қысымын анықтаймыз, ол үшін алдын ала анықтап алу қажет. Осы деректерді қолданып, қоспадағы газдардың парциалдық қысымдары бастапқы моль сандарынан тәуелсіз деп , аламыз

Сәйкесінше:

11.3 Егер екі атомды көміртегінің диссоциациялану дәрежесі температура мен қысымда тең болса, осы температурада реакциясы үшін қалыпты химиялық ұқсастықты табу қажет.

*Берілгені:*

*Т/к*

*Шығарылуы:* Қоспадағы газдардың парциалдық қысымын анықтаймыз:

Осыдан

(276) теңдеуі бойынша қалыпты химиялық ұқсастықты анықтауға болады

Бақылау есептері

11.4 реакциясының тепе-теңдік тұрақтысы мына теңдеумен өрнектелуі мүмкін. температурада осы реакцияның жылулық құбылысын анықтау қажет.

*Жауабы:*

11.5 Төмендегі деректер негізінде температурада су мен көміртегі тотығының бірдей көлемінен алынған тепе-теңдіктегі қоспаның құрамын анықтау қажет:

екі атомды көміртегі үшін:

көміртегі тотығы үшін: и

су буы үшін:

сутегі үшін:

*Жауабы:*.

11.6 Егер су буы үшін белгілі болса, реакциясы үшін изобаралық потенциалдың стандарты өзгерісін анықтау.

*Жауабы:*

11.7 Егер мынадай деректер: метан үшін графит сутегі метан белгілі болса, температурада тепе-теңдік тұрақтысын және стандартты шарттарда қарапайым заттардан метанның түзілу реакциясында изобаралық потенциал өзгерісін анықтау.

*Жауабы:*

11.8 Тұрақты қысымда су мен екі атомды көміртегінің стандартты жылу түзілуі шамаларына тең. Метанның стандартты жылу түзілуі тең. Тұрақты қысым мен көлемде қарапайым заттардан метанның жылу түзілуін анықтау.

*Жауабы:*

11.9 берілген стандартты жылу түзілулерін қолданып, реакциясы үшін энтальпия мен ішкі энергия өзгерісін анықтау.

*Жауабы:* .

**Әдебиеттер тізімі**

1. Крутов В.И., Исаев С.И., Кожинов И.А., и др. «Техническая термодинамика», 1991г.
2. Кудинов В.А., Карташов Э.М. «Техническая термодинамика», 2000г.
3. Нащокин В.В. «Техническая термодинамика и теплопередача», 1975г.
4. Рабинович О.М. «Сборник задач по технической термодинамике», 1973г.
5. Вукалович М.П. «Техническая термодинамика»,1968ж.
6. Андрианова Т.Н., Дзампов Б.В., Зубарев Н.В., Ремизов С.А. «Сборник задач по технической термодинамике»,1981г.