

O. Mowlamowa, S. Nazarow

KRIOGEN TEHNIKASY

Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby

*Türkmenistanyň Bilim ministrligi
tarapyndan hödürlenildi*

Aşgabat
«Ylym» neşirýaty
2020

UOK 378:621.56/59

M 78

Mowlamowa O., Nazarow S.

M78 **Kriogen tehnikasy.** Ýokary okuw mekdepleri üçin okuw kitaby. – A.: Ylym, 2020. – 184 sah.

Kriogen tehnikasy pes temperaturalary öndürýän, saklaýan ýa-da ulanylan ulgamlary işläp düzmek, konstruirlemek we ulanmak ýaly soraglary öz içine alýar. Kriogen ulgamynyň aşaky çägi Nernstiň ýylylyk kanunynyň üsti bilen kesgitlenen, ýokarky çägi onçakly anyk kesgitlenen däldir, ýöne şeýle hem bolsa “kriogen tehnikasy” adalgasy suwuk howanyň temperaturasyndan aşaky ulgamlar üçin ulanylyp başlanýar. Şu ýagdaýlara görä, şeýle hem howany suwuklandyрма we bölme bilen bagly çuň sowadyлма tehnikasy okuw we tehniki edebiýatlarda özüniň giň beýanyny tapanlygy bilen baglylykda bu kitapda 0÷80K aralykdaky temperaturalar ulgamyna seredilýär.

Bu kitap inženerçilik hünärinde okaýan talyplary, şeýle hem kriogen ulgamyň işläp düzmek bilen meşgullanýan okyjylary hem-de bu ulgamy ulanyjylary üçin niýetlenilýär.

TDKP № 168, 2020

KBK 32.855 ýa 73

Redaktor	<i>N. Kakaýýewa</i>
Teh. redaktor	<i>A. Nurýagdyýew</i>
Kompýuter bezegi	<i>O. Handöwletowa</i>
Suratçy	<i>H. Annamuhammedowa</i>
Neşir üçin jogapkär	<i>A. Çaryýew</i>

Çap etmäge rugsat edildi 10.11.2020.

Ölçeği 60×90^{1/16}. Times New Roman garniturasy.

Çap listi 11,5. Şertli çap listi 11,5. Hasap-neşir listi 8,96.

Neşir № 55. Sargyt № 3368. Sany 200.

Türkmenistanyň Ylymlar akademiýasynyň «Ylym» neşirýaty.

744000. Aşgabat, 2011-nji (Azady) köçesi, 61.

Türkmen döwlet neşirýat gullugynyň Metbugat merkezi.

744015. Aşgabat, 2127-nji (G. Gulyýew) köçe, 51/1.

© Mowlamowa O., Nazarow S., 2020

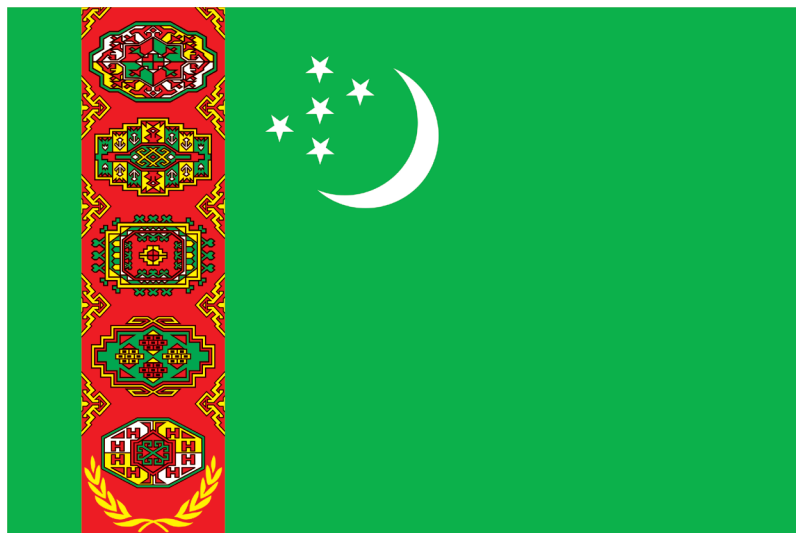
© «Ylym» neşirýaty, 2020



**TÜRKMENISTANYŇ PREZIDENTI
GURBANGULY BERDIMUHAMEDOW**



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET TUGRASY



TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET BAÝDAGY

TÜRKMENISTANYŇ DÖWLET SENASY

Janym gurban saňa, erkana ýurdum,
Mert pederleň ruhy bardyr köňülde.
Bitarap, garaşsyz topragyň nurdur,
Baýdagyň belentdir dünýäň öňünde.

Gaýtalama:

Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

Gardaşdyr tireler, amandyr iller,
Owal-ahyr birdir biziň ganymyz.
Harasatlar almaz, syndyrmaz siller,
Nesiller döş gerip gorar şanymyz.

Gaýtalama:

Halkyň guran Baky beýik binasy,
Berkarar döwletim, jigerim-janym.
Başlaryň täji sen, diller senasy,
Dünýä dursun, sen dur, Türkmenistanym!

GIRIŞ

Hormatly Prezidentimiz Gurbanguly Berdimuhamedow Döwlet Baştutanynyň belent wezipesine girişen ilkinji günlerinden ýurdumyzda halk hojalygynyň dürli ugurlary boýunça il bähbitli döwrebap özgertmeleri giň gerim we güýçli depginler bilen amala aşyrmaga başlady.

Türkmenistan-Hytaý gaz geçirijisiniň, Gazagystan–Türkmenistan–Eýran demir ýolunyň, «Awaza» milli syýahatçylyk zolagynyň gurluşyklaryna başlanmagy, Aşgabatda Birleşen Milletler Guramasyň Öňüni alyş diplomatiýasy boýunça sebit merkeziniň açylmagy, Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň öňe süren başlangyjy bilen Hazarýaka gaz geçirijisini gurmakda hyzmatdaşlyk etmek hakynda Türkmenistanyň, Russiýanyň we Gazagystanyň arasynda üçtaraplaýyn Halkara ylalaşyga gol çekilmegi hormatly Prezidentimiziň parasatly ýolbaşçylygynda gysga döwrüň içinde gazanylan ajaýyp üstünlikleriň aýdyň mysalydyr.

Hormatly Prezidentimiz täze özgertmeleri amala aşyrmakda ýurdumyzyň bilim, ylym ulgamlarynyň işini kämilleşdirmäge uly orun beriljekdigi barada Türkmenistanyň XIX Halk Maslahatynda sözlän sözünde aýdyp geçdi. Hormatly Prezidentimiz bu sözlerini dessine iş ýüzünde hakykata öwürmegi başardy. Onuň «Türkmenistanda bilim ulgamyny kämilleşdirmek hakynda» Permany, «Bilim-terbiýeçilik edaralarynyň işini kämilleşdirmek hakyndaky» Karary we kabul eden beýleki birnäçe resminamalary munuň aýdyň subutnamasydyr. Orta mekdepler onikiýyllyga, ýokary okuw mekdepleri, degişlilikde, baş-alty ýyllyga öwrüldi. Okuw maksatnamalary tazelendi, täze okuw maksatnamalary esasynda okatmak, täze okuw kitapларыny taýýarlamak we neşir etmek işleri ýola goýuldy. Ýokary okuw mekdeplerimize kabul edilýän, daşary ýurtlaryň abraýly ýokary okuw mekdeplerine okuwa iberilýän talyplaryň sany köpeldi.

Ýurdumyzyň bilim, ylym ulgamlaryny kämilleşdirmek hakyndaky Perمانларыndan we Kararlaryndan gelip çykýan belent wezipeleri durmuşa geçirmek işleriniň gelejekde-de depgini gowşadylman alnyp baryljakdygyna şübhe ýokdur.

Kriogen tehnikasy sowadyjy tehnikanyň iň ýaş pudaklarynyň biridir. Kriogen tehnikasynyň ösüşi senagatyň täze pudaklarynyň ösüşi bilen ykjam baglanyşyklydyr. Kriogen tehnikasynyň güýçli depgin bilen ösmegi senagatyň himiýa, metallurgiýa we beýleki pudaklarynda howanyň bölünen önümlerini, tebigy gazy we dürli gaz garyndylaryny giňden ulanmak bilen baglydyr.

Häzirki döwürde suwuk wodorodyň temperaturasy (20,4K) örän giň masştabda ulanylýar. Radiotehnika tejribeliginde, radioelektronikada suwuk geliniň temperaturasy (4,2K) ulanylyp, kriogen tehnikasynyň ähmiýeti has-da artýar.

Köp sanly howa bölüji we gaz bölüji desgalar işe goýberildi. Bu hili desgalar özleriniň uly energiýa sygymy bilen tapawutlanýarlar. Şonuň üçin prosesleriň energetiki netijeliliginiň derňewiniň usullaryny ulanmaklygyň we desgalaryň işiniň amatly düzgünini kesgitlemekligiň uly ähmiýeti bardyr. Kriogen tehnikasynda ýylylyk çalyşma we bölünme meselesine aýratyn üns berilýär, çünki bu prosesler çuň sowadylma tehnikasynda düýpli orun eýelemek bilen, ähli desgalaryň konstruktiv hem-de enjamlaýyn çözümleriniň kesgitleýji tarapyňy öz içine alýar.

Kriogen desgalarynyň gaz garyndylaryny suwuklandyryjylar, doňduryjylar we bölüjiler bilen utgaşdyrylmagynyň netijesinde kislorod, azot, wodorod, geliý we başga inert gazlaryny senagat masştabynda almak bolýar.

Kriogen desgalarynyň gurluşyny, pes temperaturalary almaklygyň usullaryny öwrenmeklik, kriogen ulgamlaryny we maşynlaryny hasaplamak, gazlaryň suwuklyga öwürilmegini we suwuk gazlaryň bölünmek usullaryny talyplara ýetirmek dersiň esasy meseleleriniň biridir. Bu dersi öwrenmeklik fizika, himiýa, ýokary matematika, ýylylyk tehnikasy, ýylylyk-massa çalyşygy, sowadyjy tehnikanyň nazary esaslary dersleriniň berýän bilimine esaslanýar.

Birinji bap

Pes temperaturalary almagyň umumy prinsipleri we sowadylma hadysalary

Umumy maglumatlar

Pes temperaturalary almagyň dürli usuly mälimdir, ol ýa-da beýleki usuly saýlap almak sowadylmanyň temperatura derejesine, yzarlanýan maksada (gazy suwuklandyrmak ýa-da haýsy-da bolsa bir obýekti sowatmak), mashtabyna (laboratoriýa ýa-da önümçilik desgasy) we beýleki dürli faktorlara baglydyr. Sowuklygy almak prosesleriniň hasaplamasy we derňelmesi, olaryň netijeliligine berilýän baha termodinamiki gatnaşyklaryň esasynda amala aşyrylýar. Aşakda sowadylma prosesleriniň düýp manysyna aýdyň düşünmek üçin termodinamikanyň esasy deňlemelerine seredilýär, sowuklygy almagyň mälim bolan usullary we bu maksat üçin ulanylýan desgalar beýan edilýär.

Suwuk azodyň gaýnama temperaturasyndan (77K) pesde ýatýan temperaturalary almaga, esasan hem, wodorody, neony we gelini suwuklandyrmak üçin, şeýle hem 20K we ondan hem aşak derejede refrižerator aýlawlaryna aýratyn üns berilýär. 2K temperaturadan ýokarda ýatýan ulgamy öz içine alýan pes temperaturalary almak usuly tehnikada giňden ulanylýar we ýyl-ýyldan gerimi giňelýär.

Ylmy synaglarda amala aşyrylýan işleriň netijesinde aşa pes temperaturalary almak üçin niýetlenen desgalar işlenip düzülýär. Ol desgalaryň satuwa çykarylmany hem bu ugurda alnyp barylýan işleriň dünýä möçberinde kuwwatynyň artýandygyna şaýatlyk edýär.

Suwuk He³ üstünden buguny aýyrmak bilen 0,71K çenli sowuklyk alnýar, ol suwuklygyň üstündäki basyş 0,363 Pa (0,00273 mm. sim.süt.) deňdir. He³ geliniň ýeňil izotopynyň üstünden bugy aýyrmak bilen 0,31 K çenli sowuklyk almak bolýar, şunlukda, suwuk He³ geliniň üstündäki basyş 0,267 Pa (0,002 mm. sim.süt.) deňdir.

Has pes temperaturalary almak paramagnit duzlaryny iki basgançakly adiabatiki magnitsizlendirmekligiň hasabyna magnitli sowadyлма usuly bilen 0,00114 K, misi ýadro magnitsizlendirme diýlip atlandyrylýan usuly ulanmak bilen bolsa, 0,00002 K töweregi temperaturany almak başardýar.

He³-i He⁴ eretmek bilen pes temperaturalary almak usuly ylmy-barlag tejribesine girýär, şunlukda, 0,008 K temperatura almak bolýar. Özüniň otnositel ýönekeýligi, üzüksiz hereketi we uly sowuklyk öndürjiligi bolan bu hili refrižeratorlar paramagnit duzlarynyň adiabatik magnitsizlenmesine esaslanan desgalardan üstün çykýarlar.

§ 1.1. Termodinamikanyň üçünji kanuny

Termodinamikanyň üçünji kanunynyň açylmagy dürli maddalaryň biri-birine himiki duýgurlyk ukybyny häsiýetlendirýän, ýagny himiki taýdan ýakynlygy bilen bagly bolan ululygy tapmak bilen baglydyr. Bu ululyk reaksiýa wagtynda himiki güýçleriň işi bilen kesgitlenýär.

Termodinamikanyň birinji we ikinji kanuny himiki ýakynlygy käbir näbelli funksiýanyň takyklygyna çenli hasaplamaga mümkinçilik berýär. Bu funksiýany kesgitlemek üçin termodinamikanyň iki kanunynyň üstüne jisimleriniň häsiýetleri barada täze tejribe maglumatlary gerek. Şonuň üçin Nernst tarapyndan pes temperaturada jisimleriň özlerini alyp barşy barada giň eksperimental barlaglar ýola goýulýar. Bu barlaglaryň netijesinde hem termodinamikanyň üçünji kanuny düzülýär. Bu kanuna laýyklykda, temperaturanyň 0K golaýlaşmagy bilen, izotermik prosesde islendik deňagramlaşan ulgamyň (sistemanyň) entropiýasynyň (S) haýsy-da bolsa bir termodinamiki parametrlerden baglanyşygy ýitýär we $T \rightarrow 0K$ çäklerinde ähli ulgam üçin uniwersal hemişelik ululygyna eýe bolýar we ol ululygy nol diýip kabul etmek bolar.

Bu tassyklamanyň umumylygy, birinjiden, onuň islendik deňagramlaşan ulgama degişlidiginden, ikinjiden, $T \rightarrow 0K$ çäginde entropiýanyň ulgamyň parametriniň hiç birine bagly däldiginden durýar.

Şeýlelikde, termodinamikanyň üçünji kanunyna laýyklykda:

$$\lim_{T \rightarrow 0K} [S(T, x_1) - S(T, x_2)] = 0 \quad (1.1)$$

ýa-da

$$\lim_{T \rightarrow 0K} \left(\frac{\partial S}{\partial x} \right)_T = 0, \quad (1.2)$$

bu ýerde: x – islendik termodinamiki parametr.

Entropiýanyň çäklendirilen bahasy ähli ulgam üçin şol bir baha deň bolýandygy üçin hiç hili fiziki manyny bermeýär, şoňa görä hem ol nola deň diýlip hasaplanylýar. Bu soragyň statistiki gözegçiliginiň görkezişi ýaly, entropiýanyň özi erkin hemişeligiň takyklygyna çenli kesgitlenendir (meselem, haýsy-da bolsa bir meýdanyň nokadynda zarýadlaryň gurluşynyň elektrostatiki potensialyna meňzeşlikde). Şeýlelikde, Plankyň we käbir beýleki alymlaryň edişi ýaly, käbir «absolýut entropiýany» girizmegiň manysy ýokdur.

$T \rightarrow 0K$ çäginde entropiýanyň hemişeligi ($S \rightarrow 0$), (1.1.) görä izotermiki proses ($T \rightarrow 0K$), şol bir wagtyň özünde izoentropiýa prosesidir, diýmek, bu ýerden, ol adiabatik proses hem bolup durýar.

Şeýlelikde, termodinamikanyň üçünji kanuny boýunça nolluk izoterma, nolluk izoentropa we adiabata bilen gabat gelýär.

$T \rightarrow 0K$ çäklerinde Δs ululygy noldan tapawutlanmaga ymtylýan käbir maddalar (erginler (splawlar), gliserin, CO, NO we ş.m.) bardyr.

Düýpli barlaglaryň görkezmesine görä, termodinamikanyň üçünji kanunyna gapma-garşy gelýän bu ýagdaý käbir maddalaryň kadaly deňagramlyk ýagdaýyna gelýänçäler uzak wagtyň dowamynda (birnäçe gün ýa-da hepde) pes temperaturada metastabil ýa-da deňagramsyzlyk ýagdaýda «doňdurylmagy» bilen baglydyr.

Her bir ölçegiň arasynda wagt salyp geçirilende $T \rightarrow 0K$ çäklerinde ähli ýagdaýda ΔS entropiýanyň tapawudynyň ýitýändigini görüňär.

Häzirki döwürde üçünji kanunyň ähli termodinamiki deňagramly ulgamlar üçin adalatlydygy esaslandyrylandyr.

Termodinamikanyň üçünji kanunundan $0K$ temperatura ýetmeğiň mümkin däldigi gönüden-göni gelip çykyar.

Hakykatdan hem, sistemanyň sowadylmagy adiabat giňelme (temperaturanyň peselmegi amala aşyrylýar) we izotermiki gysylma (entropiýanyň peselmegi bolup geçýär) hadysalarynyň biri-biriniň zyzndan gaýtalanyp gelmegi bilen amala aşyrylýar. Üçünji kanuna laýyklykda, izotermiki gysylmada temperatura $T \rightarrow 0\text{K}$ golaýlanda, entropiýa gysylma halatynda üýtgemesini bes edýär. Şonuň üçin $S=0$ ýagdaýa görkezilen prosesleriň ahyrky sanlarynda ýetip bolmaýar, şoňa laýyklykda 0K almak mümkin däldir, çünki şol kanuna görä $T \rightarrow 0\text{K}$ -li ýagdaý $S = 0$ ýagdaý bilen gabat gelýär. 0K temperatura diňe asimptotiki golaýlaşmak mümkindir.

Üçünji kanundan gelip çykýan bu netije özüniň mazmuny boýunça üçünji başlangyja ekwiwalentdir, ýagny üçünji başlangyç nädogry bolsa, onda 0K temperatura ýetmek mümkin bolardy, eger 0K alyp bolsa, onda 0K -de entalpiýanyň tapawudynyň ululygy noldan tapawutlanmaly bolardy. Şu sebäplere görä üçünji başlangyja köp halatlarda 0K -e ýetmek mümkin dälik prinsipi diýilýär. Üçünji başlangyjy Nernst şunuň ýaly hem düzýär, çünki ol entropiýa diýen düşüňjani oňlamaýardy we ony ulanmagy hem halamaýardy. Ýöne şoňa garamazdan, üçünji başlangyjy $T \rightarrow 0\text{K}$ -de entropiýanyň özüni alyp barşy baradaky kanun görnüşinde berilmegi örän amatly we oňaly bolup durýar, çünki ol gönüden-göni ýokarda görkezilen täsin matematiki ýazga getirýär.

Bu aýdylanlar aşakdaky ýagdaýy formulirlenmäge mümkinçilik berýär: jisimden ähli ýylylygy alyp, ýagny ony absolýut nola çenli sowatmaga ukyply maşyny döretmek mümkin däldir.

Absolýut noluň golaýynda jisimleriň häsiýeti. Absolýut noluň töwereginde maddalaryň häsiýetini öwrenmek ylym hem-de tehnika üçin örän uly gyzyklanma döredýär.

Otag temperaturasynda ýylylyk hadysalary bilen ýüzüne perde çekilen maddalaryň köp häsiýeti (meselem, ýylylyk galmagaly bilen) temperaturanyň peselmegi bilen bu madda degişli bolan kanunalaýyklygy we baglanyşyklary arassa öwrenmeklige mümkinçilik berip, barha özleriniň üstlerini açýarlar. Pes temperaturalarda geçirilýän barlaglar geliniň aşa akyjylygy we metallaryň aşageçirijiligi ýaly tebigatyň ençeme hadysalarynyň üstüni açmaga mümkinçilik berdi.

Pes temperaturalarda materiallaryň häsiýetleri düýpgöter üýtgeýärler. Käbir metallar pes temperaturada özleriniň berkligini ýitirip, maýyşgak häsiýete eýe bolýan bolsa, beýlekileri aýna ýaly port bolýarlar.

Pes temperaturalarda maddalaryň fiziki-himiki häsiýetlerini öwrenmek gelejekde öňünden berlen häsiýetli täze bir maddany döretmeklige mümkinçilik berer. Bularyň ählisiniň kosmiki gämileri, stansiýalary we enjamlary konstruirlemäge we döretmäge gymmaty ýokarydyr.

Kosmiki jisimleriň radiolokasion barlaglarynda kabul edilýän radiosignalyň örän kiçidigi we ony dürli görnüşli galmagalyň içinden saýlap almagyň kyndygy mälimdir. Ýaňy-ýakynda alymlar tarapyndan döredilen molekulýar generatorlar we güýçlendirijiler örän pes temperaturalarda işleýärler we şonuň üçin olar galmagalyň iň pes derejesini özlerinde jemleýärler.

Metallaryň, ýarymgeçirijileriň we dielektrikleriň pes temperaturada elektrik we magnit häsiýetleri mikroskopik ölçegde prinsipial täze radiotehniki gurluşlary işläp düzmäge mümkinçilik berýärler.

Aşa pes temperaturalar ýadro böljekleriniň äpet tizlendirijilerini işletmek üçin wakuum döretmekde ulanylýar.

§ 1.2. Pes temperaturalary almagyň usullary. Adiabata şertlerinde temperaturanyň peselmegi bilen alnyp barylýan prosesler

Üznüksiz emeli sowadyлма üçin kriogen desgalarynyň dürli görnüşli gaýtalanmalaryny (sikllerini) amala aşyrýarlar. Islendik gaýtalanma birnäçe prosesi özünde jemleýär we olaryň iň bolmanda birisi adiabata şertlerinde temperaturanyň peselme ýa-da izotermiki şertlerinde ýylylygy siňdirme effekti bilen alnyp barylmalı. Bularдан başga-da gaýtalanmaları gurmak üçin beýleki prosesler zerur bolup durýar: gazlaryň we buglaryň gysylmagy; gysylan işçi jisimiň sowadylmagy we gysylma ýylylygyny daşky gurşawa ýa-da haýsy-da bolsa bir ýylylyk kabul edijä berilmegi; sowadylýan jisimden gaýtalanmada işçi jisime ýylylygyň berilmegi, kondensasiýa prosesi,

sowuklygyň rekuperasiýasy we başgalar. Rekuperatiw (ýa-da regeneratiw) ýylylyk çalyşmalaryň netijesinde berlen pes temperaturalara ýetmek üpjün edilýär. Üznüksiz sowuklyk öndürýän kriogen desgasyň islendik gaýtalanmasy üçin sowuklyk öndürmekligi üpjün edýän prosesiň ýa-da prosesler toplumynyň bolmagy zerur bolup durýar. Bu hili prosesleri sowuklyk öndüriji prosesler diýip atlandyrylýar. Işçi jisim akymly pes temperaturalar gaýtalanmalary üçin daşky täsir prosesleri sowuklyk öndüriji proses bolup durýar, ýagny olaryň täsiri netijesinde hem işçi jisimiň entalpiýasy peselýär. Sowuklyk öndüriji proses bolmasa sowuklygy üznüksiz almak mümkin däldir. Bir tapgyr sowadylma üçin temperaturany peseltmegiň zerurlygy we işçi jisimiň ätiýaçlygy bilen alnyp barylýan islendik prosesi (effekti) ulanmak ýeterlikdir.

Temperaturanyň peselmegi bilen alnyp barylýan prosesleriň gaýtalanmalarynda sowuklyk öndüriji proses bolman hem bilýändigini bellemek möhümdir. Gaýtalanmada işçi jisimiň akymynyň entalpiýasyny peseltmek akym tarapyndan iş etmek we ony daşky gurşawa bermek şertini berjaý etmek bilen, ýa-da ýylylygy (umumy ýagdaýda energiýany) akymdan alyp daşky jisimlere bermek şertini üpjün etmek bilen amala aşyrmak bolar. Şunlukda, işçi jisimiň energiýasynyň bir bölegi daşky gurşawa berilýär we onuň entalpiýasy (ýa-da bir bölegi) kemelýär. Bu hili proseslere aşakdakylar degişlidir: bir wagtyň özünde ýa-da geljekde işçi jisimi sowadyjy gysylma prosesi (hal parametrleriniň kesgitli çäginde); daşky iş etmek bilen gazlaryň giňelme prosesi; giňelmäniň tolkunlaýyn prosesi; goşmaça daşky sowuklyk çeşmesi bilen sowadylma prosesi; buglary sorup aýyrmak prosesi; akymyň energetiki bölünmesi bolup geçýän temperaturalaryň gatlaklara bölünmesininiň dinamiki prosesi we ş.m.

Hakykatdan hem, bu prosesler sowuklyk öndüriji prosesler bolup, gaýtalanmada sowuklygyň generasiýasyny üpjün edýär. Gaýtalanmanyň sowuklyk öndürijiligi ähli sowuklyk öndürijili prosesleriň entalpiýalarynyň üýtgemesiniň jemine deňdir.

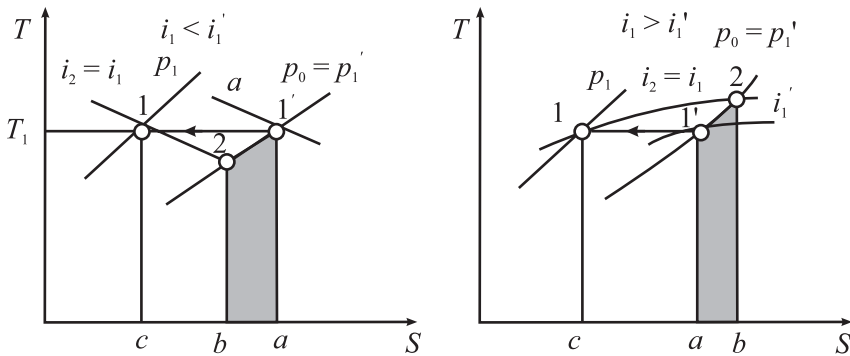
Sowuklyk öndüriji prosesleriň sowuklygyň generasiýasyna jogapkärçiligi beýleki prosesleriň, ýagny adiabatik şertlerde temperaturanyň peselme effekti bilen alnyp barylýan prosesleriň ähmiýetini inkär etmeyär. Olar bolmasa gaýtalanmany gurnamak mümkin däldir.

Bu prosesleriň köpüsi bir wagtyň özünde sowuklyk öndürüji bolup durýarlar, beýlekileri (meselem, drosselirleme, garyşmak prosesleri) sowuklyk öndürüji bolmazdan, işçi jisimiň temperaturasynyň zerur ululyga çenli üýtgemesini üpjün edýär.

§ 1.3. Real gazlar gysylanda esasy termodinamiki parametrleriň üýtgemegi

Gaz görnüşli işçi jisimler ulanylanda gazlaryň gysylmasy sowadyjy gaýtalanmanyň zerur hem-de möhüm hadysalarynyň biridir. Gysylma prosesi kompressorly maşynlarda amala aşyrylýar we dürli görnüşli maşynlarda dürli-dürli bolup, dürli dolanyşyksyzlyk derejesi bilen häsiýetlendirilip bilner. Gazy gysylma bilen bir wagtda ýa-da kompressorlyň yzysüre sowadyjylarda sowatmak bolar.

Birmeňzeş temperaturada gysylan we gysylmadyk gazlaryň ýagdaýlaryny deňeşdirmek möhüm bolup durýar (1.1-nji surat).



1.1-nji surat. Birmeňzeş temperaturada gysylan i_1 we gysylmadyk i_1' hakyky gazyň entalpiýalaryny deňeşdirmek

Ideal gazyň içki energiýasy we entalpiýasy basyşa bagly däldir we birmeňzeş temperaturada 1' we 1 ýagdaýlarda özara deňdirler. Hakyky gazyň içki energiýasy gysylan ýagdaýda birmeňzeş temperaturada hemişe kiçidir. Bu hadysa fizikada şeýle düşündirilýär, ýagny molekularlaryň ýakynlaşmagy bilen içki energiýanyň potensial düzüjisi kemelýär.

Eger izotermiki gysylmada real gazlaryň içki energiýasy hemişe kemelýän bolsa, onda dürli ýagdaýlarda entalpiýalaryň üýtge me häsiýeti birmeñzeş däl dir:

$$i_1 - i_{1'} = (U_1 - U_{1'}) + P_1 V_1 (1 - Z_{1'} / Z_1). \quad (1.3)$$

(1.3) deñlemede $(U_1 - U_{1'})$ hemişe otrisateldir, ikinji goşulyjynyň alamaty bolsa Z gysylma koeffisiýentleriň bahalary bilen kesgitlenýär. $Z_1 < Z_{1'}$, ýagdaýlarda içki energiýasy ýaly gazyň entalpiýasy izotermiki gysylmada kemelýär. $Z_1 > Z_{1'}$, ýagdaýyň çäginde (1.3) aňlatmanyň ikinji goşulyjysy položitel bolar we Δi ululygyň alamaty goşulyjylaryň absolýut bahalarynyň gatnaşygy bilen kesgitlenýär, ýagny bu ýagdaýlarda izotermiki gysylmada real gazlaryň entalpiýasy hem artp, hem kemelip biler.

Eger gysylýan gazyň entalpiýasy $\Delta i = i_1 - i_{1'}$ kemelýän bolsa, onda ol $1'ab2$ meýdana; izotermiki $q_{gys.}$ gysylma ýylylygy $1'ac1$ meýdana; açyk sistemada izotermiki gysylma $\ell_{gys.aç.}$ işi $1'2ac1$ meýdana deňdir; $q_{gys.} > \ell_{gys.aç.}$.

Eger gysylýan gazyň entalpiýasy $\Delta i = i_1 - i_{1'}$ artýan bolsa, onda ol $1'2ba$ meýdana; $q_{gys.} - 1'ac1$; $\ell_{gys.aç.}$ $1'2bc1$ meýdana deňdir; $q_{gys.} < \ell_{gys.aç.}$.

Bu, entalpiýalaryň kemelýän izotermiki gysylma ýagdaýynda, kompressor ähli sowadylma sistemasy bilen bilelikde gaýtalanmada sowuklyk öndüriligi döretmekligi üpjün edýär diýip hasap etmäge mümkinçilik berýär, munuň özi ýönekeý adiabat giňelmede daşyna iş etmezden (meselem, drosselirlemede) amala aşyrylyp bilner. Bu ýagdaýda sowuklyk öndüriljek $1'$ we 1 ýagdaýlarda entalpiýalaryň tapawudyna deňdir.

§ 1.4. Drosselirleme

Akymyň stasionar şertlerinde daşyna iş edilmezden we tizlikleriň wagta görä üýtgemesinde açyk sistemada gazlaryň adiabat giňelmesine **drosselirleme** diýip aýdylýar. Bu ýerden akymyň stasionarlygy, birinji nobatda, drosselirlemeden öň we soň basyşlaryň hemişeligin berýändigini bellemek gerek, seredilýän üstde tizlikleriň wagta görä

üýtgemesiniň ýok bolmaklyk şerti bolsa sistemanyň içinde (meselem, drossel gurлуşyň özünde) onuň ýerli, ýagny berlen aralykda artmagynyň (ýa-da kemelmeginiň) mümkinçiligini aradan aýyрмаýar.

Bu prosesi praktiki amala aşyrmak üçin gazyň ýolunda nähili-de bolsa bir gidrawliki garşylyk: drossel wentili, gapak (zaslonka), kalibrlenen deşijek we ş.m. ýerleşdirilýär.

J. Joul we U. Tomson bu prosesi aşakdaky usulda derňeýärler. Mis turbajygyň içi boýunça ekran bilen goraglanan dykynyň (probka) üstünden geçip, (T_1 başlangyç temperaturaly) kadalaşan gaz akymy akýar. Tejribede $\Delta P = P_1 - P_2$ basyşlaryň tapawudy üýtgände temperaturalaryň üýtgemesini belläp alýarlar (fiksirleýärler).

Dykynyň iki tarapynda turbanyň iki ýerde kese-kesiginiň hem-de dykydan biraz daşlykda, ýagny hereketiň stasionar diýip hasaplap bolýjak ýerinde pessaýja akýan gaz akymynyň elementar göwrümüne seredýäris. Eger seredilýän kese-kesiklerde gazyň tizligi birmeňzeş bolsa, onda drosselirleme prosesi üçin $l = 0$ we $q = 0$ ýagdaýda aşakdakylary alarys:

$$i_2 = i_1 = \text{const}$$

ýa-da

$$U_1 + P_1 v_1 = U_2 + P_2 v_2 = \text{const.} \quad (1.4)$$

Gazlaryň häsiýetleri barada hiç hili gürrüň edilmänligi üçin alnan netije hyýaly gazlara degişli bolşy ýaly hakyky gazlara hem degişlidir: drosselirlemede gazyň entalpiýasy üýtgemeyär. Ideal gazlar üçin islendik prosesde içki energiýanyň we entalpiýanyň üýtgemesi $du = c_v dT$ we $\Delta i = c_p dT$ aňlatmalar bilen kesgitlenilýär, bu ýerden: eger $di = 0$ bolsa, onda dT , şeýle hem du nola deň bolýar.

(1.4) deňlemeden real gazlar üçin drosselirlemede temperaturanyň we içki energiýanyň hemişelikliگی gelip çykmaýar. Hakyky gazlar giňelende molekullaryň arasyndaky uzaklyk artýar we molekullaryň özara dartýşma güýjüniň garşysyna iş edilýär. Ondan başga-da real gazyň akymynda barlanýan ulgamyň girişinde we çykyşyndaky her bir massa birliginiň PV köpeltmek hasylyna deň bo-

lan gidrodinamiki güýjüniň işi dürli gysylma baglylykda dürli bolup durýar. Bu işler içki energiýanyň we temperaturanyň üýtgemesini öňünden kesgitleýärler, şonuň üçin umumy ýagdaýda real gazlar üçin drosselirlemede

$$di = 0 \quad (i = \text{const}); \quad dT \neq 0; \quad du \neq 0. \quad (1.5)$$

Şeýlelikde, hakyky gazyň temperaturasy drosselirlemede peselip hem, ýokarlanyp hem biler.

Drosselirleme prosesi dolanyşyksyz prosesdir. Ideal gazlar üçin ol doly dolanyşyksyzdyr, çünki ol başlangyç ýagdaýyna gaýtaryp biljek effektler bilen alnyp barylmaýar. Entropiýanyň üýtgemesi ýokary derejede bolup, ideal gazyň izotermiki gysylmasynda entropiýanyň kemelmesine deňdir. Real gazlaryň drosselirlenme prosesi bölekleýin dolanyşyklydyr, çünki ol temperaturalaryň üýtgemesi bilen alnyp barylýar; şunlukda, has beýik we has pes temperaturaly «ýylylyk rezurwuary» döredilýär we temperaturalar tapawudyny ulanyp iş etmek mümkinçiligini döredýär (bu işi gazlary başlangyç ýagdaýa bölekleýin getirmek üçin ulanmak bolar). Drosselirlemede real gazyň entropiýasynyň üýtgemesi onuň izotermiki gysylmasynda entropiýasynyň üýtgemesine deň däldir.

Drosselirlemede real gazyň temperaturasynyň üýtgemesini kesgitleýän:

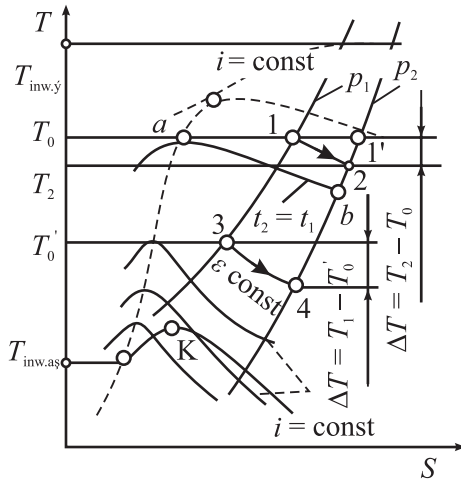
$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i = \alpha_i = \left(\frac{1}{C_p}\right) \left[T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P - V \right]. \quad (1.6)$$

Bu ýerde $\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i = \alpha_i$ drosselirleme prosesinde basyşyň ujypsyz-ja pese düşmesinde temperaturalaryň üýtgemesini kesgitleýän Joul-Tomsonyň differensial effekti.

Drosselirleme hadysasynda hemişe basyşlaryň tapawudy ýüze çykýar, şoňa görä-de bu hili prosesler üçin:

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_i dP \quad (1.7)$$

Bu aňlatma Joule-Tomsonyň integral effektini kesgitleýär (ba-syşlaryň ahyrky tapawudynda temperaturalaryň tapawudy). Drosse-lirlemäniň integral effektini, adatyça, tablisalar ýa-da diagrammalar boýunça kesgitleýärler (1.2-nji surat).



1.2-nji surat. T-S diagrammada drosselirleme prosesi

Drosselirleme effektiniň alamaty dürli bolup biler.

Eger $\Delta T / \Delta P = (T_2 - T_1) / (P_2 - P_1) > 0$, onda $T_2 < T_1$ (sowadylma), çünki hemişe $P_2 < P_1$; eger $\Delta T / \Delta P < 0$, onda $T_2 > T_1$, bu bolsa gyzdyrylma degişlidir.

Drossel effektiniň alamatynyň üýtgemesine inwersiýa diýilýär. Inwersiýa nokadynda

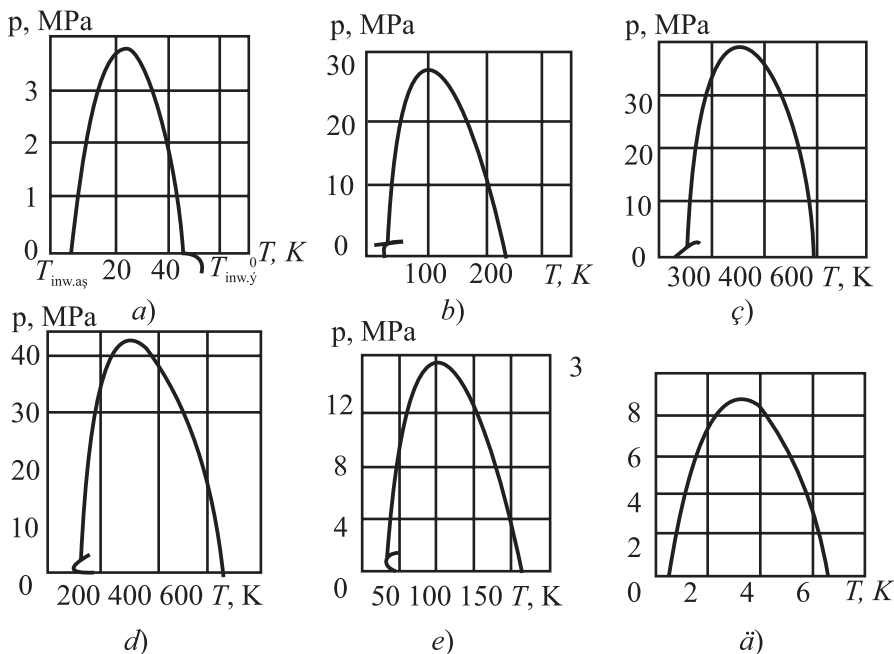
$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_i = 0.$$

$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_i = 0$. halyndaky egri **inwersiýa egrisi** diýlip atlandyrylýar.

Inwersiýa egrisi drossel effektiniň položitel (sowadylma) we otrisatel (gyzdyrylma) ýagdaýlaryny araçäkleşdirýär.

1.3-nji suratda käbir gazlar üçin inwersiýa egrileri getirilendir. Inwersiýa egrisiniň aşagyndaky çäk položitel drossel effekte degişlidir.

Her bir madda üçin $T_{\text{inw.ý}}$ – iň ýokary inwersiýa temperaturasy bardyr, ondan ýokarda islendik basyşda drossel effekti otrisateldir. Bu temperatura **inwersiýanyň ýokarky temperaturasy** diýilýär. Ondan başga-da suwuklyklar çäginde $T_{\text{inw.aş}}$ – aşaky (pes) inwersiýa temperaturasy hem bardyr.



1.3-nji surat. Käbir gazlar üçin inwersiýa egrileri:

- a) – geliy üçin; b) – neon üçin; c) – azot üçin; d) – howa üçin;
- e) – wodorod üçin; f) – Wan-der-Waalsyň gazy üçin

T - S koordinatalarda inwersiýa egrisi izoentalpiýanyň ($i = \text{const}$) ekstremal bahasynyň üstünden geçýär we pes basyşlaryň inwersiýa temperaturasyna ýakynlaşmasy ýaly, $T_{\text{inw.ý}}$ – tarap asimptotiki ýakynlaşýar. Dürli gazlar üçin inwersiýa temperaturasy dürlüdir.

Käbir gazlar üçin (howa, azot, kislorod) ýokardaky inwersiýa temperaturasy daşky gurşawyň ortaça temperaturasyndan ýokarydyr, beýleki gazlar üçin (geliy, neon, wodorod) pesdir. Drosselirlemede gazy sowatmak üçin, ilki bilen, onuň temperaturasyny $T_{\text{inw.ý}}$ – ýokarky inwersiýa temperaturasynyň bahasyna çenli peseltmeli. Eger bu şert

ýerine ýetirilen bolsa, onda şeýle sorag ýüze çykar: ýagny T_0 başlangyç temperatura belli bolan ýagdaýynda (T_0 – adatça, daşky gurşawyň temperaturasy ýa-da deslapky sowadylma temperaturasy) iň ýokary ΔT integral effekte ýetmek üçin gazy haýsy P_1 basyşa çenli gysmak gerek bolar.

Integral drossel-effekt üçin berlen aňlatmany P boýunça differensirläp we alnan aňlatmany nola deňläp, alarys:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_i = 0. \quad (1.8)$$

Bu aňlatma gözlenýän nokadyň inwersiýa egrisinde ýerleşýänliginiň, gözlenýän basyşyň bolsa berlen temperaturada inwersiýanyň basyşyna deňliginiň şerti bolup durýar. Şoňa garamazdan drosselirlenmeli gaýtalanmalarda gysylmanyň maksadalaýyk basyşy inwersiýa nokadynyň basyşyndan kiçi bolup biler, meselem, howa gysylan ýagdaýynda ($T = 300\text{ K}$ bolanda 39 MPa derek $P \approx 20\text{ MPa}$ bilen çäklenýärler). Gelili we wodorodly drosselirlenmeli gaýtalanmalarda gysylmanyň optimal basyşy inwersiýa basyşyna golaýdyr.

Uly bolmadyk basyşda α_i ululyk berlen gazlar üçin diňe temperatura baglydyr. Gaz görnüşli ýagdaýyň çäginde temperatura peselende, differensial drossel-effekt artýar.

Gazyň dykzlygy artanda α_i basyşa bagly bolup başlaýar. Basyş artanda α_i kemelýändigini, α_i – n p - den baglanyşygy bolsa çyzykly baglanyşyga golaýdygy tejribe üsti bilen ýüze çykaryldy. Basyşyň α_i ululygy bolan täsiri has ýokary basyşlarda ýüze çykyp biler.

Integral effekti ýokarlandyrmak üçin drosselirlenme hadysasynyň başlangyç temperaturasyny peseltmegiň gerekdigi beýan edilenlerden aýdyň görünýär. Şoňa garamazdan, drosselirlenmeli pes temperaturaly gaýtalanmalarda sowuklyk ýitgisi bolmaýan nazary gaýtalanmalarda sowuklyk öndürjiligi drosselirlenme başlaýan temperaturadan bagly dældigine aýdyň düşünmek gerekdir (gaýtalanmada drosselirlenme prosesi sowuklyk öndürjisi dälidir).

Temperatura peselende integral drossel-effekti artdyrmak sowuklyk öndürjiliginini artdyrmagyň diňe prinsipial mümkinçiligine ýol açýar. Onuň üçin deslapky sowadylma diýip alynýan proses zerurdyr.

Deslapky sowadylmanyň wezipesi daşky gurşawyň T_0 temperatura-ly ýylylyk rezerwuaryny döretmeklige syrykdyrylýar. Şunlukda, položitel drossel effektiniň çäginde birmeňzeş temperaturada gysylan we gysylmadyk gazlaryň entalpiýalarynyň tapawudy artýar, bu bolsa gaýtalanmada sowuklyk öndürjiliginiň artmagyna getirýär. Entalpiýalaryň bu tapawudyny, köplenç, inžener hasaplamalarda ulanylýar, ol umumy ýagdaýda Δi_T bilen belgilenýär we izotermiki drossel effekt diýip atlandyrylýar. Δi_T ululygyň bahasy berlen temperatura-da gysylan we gysylmadyk gazlaryň entalpiýalarynyň tapawudy hökmünde tablisalar ýa-da ýylylyk diagrammalary boýunça tapylýar.

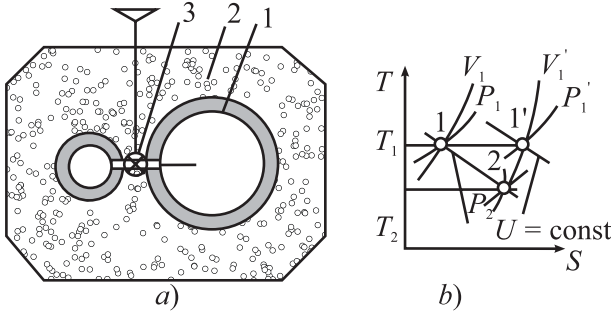
«Ýylylyk» ýa-da «izotermiki drossel effekt» terminlerini aşakda-ky ýaly düşündirmek bolar. Eger 1 we 2 nokatlara degişli iki ýagdaý deňeşdirilse, i_1 – i_2 , entalpiýalar tapawudy drosselirlemede temperaturalaryň peselme effektini ulanyp, daşky gurşawyň temperaturasynda ýerleşýän jisimden aýryp boljak ýylylyk mukdaryny kesgitleýär. Başga tarapdan, Δi_T gazyň izotermiki gysylmasynda ýa-da giňelmesinde entalpiýalaryň üýtgemesini aňladýar. Stasionar akym şertlerinde gazy giňeltmek üçin daşky iş etmezden we temperaturany üýtgetmezden, ýagny Δi_{T_0} deň bolan ýylylyk akymyny izotermiki bermek zerur bolar. Položitel drossel effektinde Δi_T gaýtalanmanyň sowuklyk öndürjiligine kompressoryň goşandyny kesgitleýär.

§ 1.5. $U = \text{const}$ prosesi

Eger gazyň giňelme hadysasyny drosselirleme prosesiniň şertlerine meňzeş şertlerde amala aşyrylsa (daşky jisimler bilen ýylylyk alyşmazdan we daşyna iş etmezden), ýöne drosselirlemeden tapawutlylykda gazy, ýagny stasionar akym şertlerinde däl-de, berk diwarly gurluşda ýapyk sistemada giňeldilse, onda bu hili sistemada doly içki energiýa hemişelik bolar. Bu giňelme prosesi $U = \text{const}$ bolar; onuň başga hili häsiýetli atlandyrylmasy bolup bilmez. $U = \text{const}$ prosesi amala aşyrmagyň shemasy Joul-Geý-Lýussagyň tejribesiniň shemasyny berýär (1.4-nji surat).

Barlanýan sistema (1) iki sany berk diwarly gapdan durýar. Gaplar biri-biri bilen galtaşmada bolup, daşky gurşawdan (2) izolýasiýa gatlagy bilen berk izolirlenendir. Gaplarda gazyň başlangyç ba-

syşlary dürlüdir, temperaturalary bolsa birmeňzeşdir; başlangyç stasionar temperaturasy T_1 . (3) ventiliň kömegi bilen gaplardaky basyşy deňläp bolar. Bir gapdan gazy goýberilende, onuň basyşy we temperaturasy peseler; şol wagt beýleki gaba gazyň akyp geçmegi bilen onuň basyşy we temperaturasy ýokarlanar. Basyşlar deňleşenden soň, T_2 temperaturaly stasionar ýagdaýa gelýänça esli wagt gazlaryň temperaturalarynyň deňleşmesi bolup geçýär.



1.4-nji surat. $U = \text{const}$ prosesiniň shemasy (a) we onuň T-S diagrammada şekillendirilişi (b)

$U = \text{const}$ prosesinde gazyň temperaturasynyň üýtgemesini aşakdaky deňlemeden kesgitlemek bolar:

$$\alpha_u = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_u = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T}{\left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_P}. \quad (1.9)$$

Ideal gazlar üçin $\left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial P} \right)_T = 0$, şonuň üçin $U = \text{const}$ prosesinde $dT = 0$ bolýandyr. 1807-nji ýylda Joule-Geý-Lýussak tarapyndan pes basyşlar çäginde gazlaryň giňelmesinde tejribe üsti bilen subut edilen bu netije hyýaly gazyň içki energiýasynyň diňe temperaturanyň funksiýasydygy we onuň basyşa (dykzlyga) bagly däldigi baradaky fundamental kanunyň subutnamasydyr.

Ýöne bu tejribäni örän gaty gysylan gazyň giňelmesi üçin geçirilse, onda temperatura hemişelik bolmaz, ol peseler: $T_2 < T_1$. Şeýlelik bilen, $U = \text{const}$ prosesinde islendik gaz üçin a_u – hemişe položitel ululykdyr, ýagny temperatura peselýändir.

$U = \text{const}$ prosesiniň drosselirleme ($i = \text{const}$) prosesi ýaly onçakly uly tejribelik ähmiýeti ýokdur, şoňa garamazdan getirilen akyl ýetirmeler açyk hem-de ýapyk sistemalar şertinde daşyna iş etmezden gazlaryň adiabatik giňelme prosesleriniň düýp manysyna düşünmäge mümkinçilik berýär.

§ 1.6. Gazlaryň deňagramly adiabat giňelmesi

Adiabatik şertlerinde, ýagny daşky ýylylyk çalyşma ýok ýagdaýynda gazyň giňelme hadysasy hiç hili içki sürtülme prosesi bolmazlygynda entropiýany üýtgetmän bolup geçer. Şonuň bilen baglanyşyklyda $s = \text{const}$ şertini kanagatlandyrmak üçin gysylan gazyň ähli energiýasyny hiç hili ýitgisiz daşky işe özgertmek zerurdyr. Görşümüz ýaly, bu ýagdaýda gazyň içki energiýasy köp derejede azalýar (birmeňzeş başlangyç parametrde we giňelme derejesinde beýleki giňelme prosesleri bilen deňeşdirilmesine görä); şonuň üçin bu hili proses temperaturanyň ýokary derejede peselmesi bilen alnyp barylýar. Bu prosede gaz tarapyndan ýerine ýetirilýän iş hökmany ýagdaýda gazdan izolirlenen gurluşa doly geçirilmelidir.

Gaz tarapyndan ýerine ýetirilen iş we oňa deňgüýçli ýylylyk effektleri $s = \text{const}$ prosesinde açyk hem-de ýapyk sistemalar üçin tapawutlanýarlar:

$$l = q_y = U_1 - U_2; \quad (1.10)$$

$$l_{\text{aç}} = q_{\text{aç}} = i_1 - i_2. \quad (1.11)$$

Soňky aňlatma gaz akymynyň girişinde hem çykyşynda tizlikleri birmeňzeş bolan ýagdaýyna degişlidir. Gazyň akyşy hem-de giňelmesi real proseslerde sürtülmesiz bolup geçmeýär, şol sebäplide, adiabata şertlerinde, hakykatdan hem $S = \text{const}$ prosesini amala aşyrmak mümkin däldir. Oňa real prosesler üçin ideal ýakynlaşma ýaly seredýärler, şonuň üçin onuň derňelmesi düýpli ähmiýete eýedir. Temperaturalaryň üýtgemesi izoentrop prosesinde ($s = \text{const}$) açyk we ýapyk sistemalarda birmeňzeşdir we aşakdaky aňlatma bilen aňladylýar:

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s = \left(\frac{T}{C_p} \right) \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \quad (1.12)$$

Birnäçe özgertmelerden soň alarys:

$$\alpha_s = \alpha_i + V / C_p. \quad (1.13)$$

Alnan gatnaşykdan soň aşakdakylar gelip çykar:

1. Işçi jisimiň giňelmä mümkinçilik berýän islendik çäginde α_s ululygynyň bahalary položitelidir.

2. Temperaturanyň artmagy bilen α_s artýar; şuna laýyklykda giňelme işi hem artýar.

3. Basyşyň artmagy bilen, ýagny udel göwrümiň kiçelmegi we işçi jisimiň dykzlygynyň artmagy bilen α_s kemelýär.

4. Şeýlelikde, giňelme prosesinde $s = \text{const}$, α_s bolsa üýtgeýän ululykdyr.

Kritiki ýagdaýyň golaýynda we gaýnaýan suwuklygyň ýagdaýynyň çäginde α_s we α_i örän ýakyndyr. α_s bilen α_i ululyklaryň arasyndaky gatnaşyk gazlaryň parametrlerine, jynsyna we olaryň garyndylaryna baglydyr. Meselem, metan üçin 293 K temperatura çäginde hem-de 6 MPa basyşyň golaýynda $\alpha_i/\alpha_s \approx 1,2/2,3 = 0,5215$; howa üçin bu temperaturalar we basyşlar çäginde $\alpha_i/\alpha_s \approx 0,22/1,2 = 0,1835$ deňdir. α_i/α_s gatnaşyk näçe uly bolsa, detan-derleri ulanmaklygyň ähmiýeti şonça-da pesdir.

α_s real gazlar üçin ideal gazlara garanynda α_i ululygynyň alamatyna baglylykda uly hem-de kiçi bolup biler.

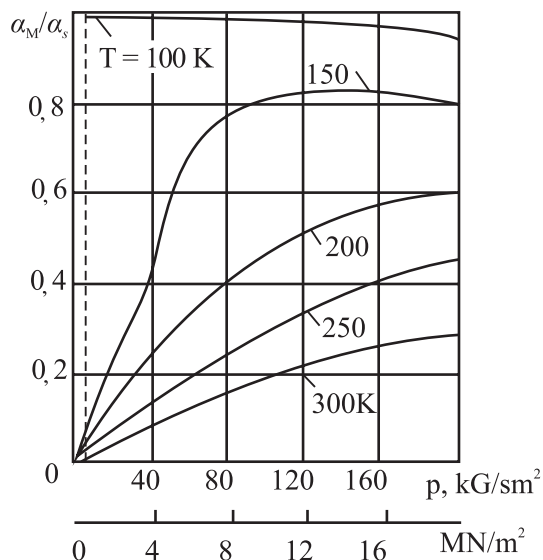
Maşynda adiabat giňelmede real gazlaryň sowadylmasyny α_M molekulýarara güýçleriň we daşky işiň α_{pdv} täsiri bilen şertlendirilen iki effektiň jemleri hökmünde aňlatmak bolar:

$$\alpha_s = \alpha_M + \alpha_{pdv}. \quad (1.14)$$

Içki güýçleriň hasabyna sowadylma effektiniň α_M bölejik mukdary umumy sowadylma effekti α_s bilen deňeşdirilende basyşa hem temperatura baglydyr.

$P \rightarrow 0$ ýagdaýynda $\alpha_M/\alpha_s \rightarrow 0$, diýmek, molekulalar biri-birinden daşlaşanlygy sebäpli içki güýçler hiç hili täsir etmeýärler.

1.5-nji suratda howa üçin α_M/α_s gatnaşygyň dürli temperaturada basyş bilen baglanyşygy getirilen:



1.5-nji surat. Howa üçin α_M/α_s gatnaşygyň basyş we temperatura baglanyşygy

Tejribede daşyna iş etmek bilen gazlaryň giňelme prosesleri detander diýlip atlandyrylýan dürli giňeldiji maşynlarda amala aşyrylýar. Detanderlerde gysylan gazlaryň energiýasy özgerýär we bu proses ol ýa-da beýleki çäklerde izoentropa prosesine ýakynlaşýar. Bu iş tormoz gurлуşyna ýa-da giňelýän gazdan hökmany suratda izolirlenen haýsy-da bolsa bir daşky gurşawa geçirilýär.

Detander maşynlarynyň birnäçe konstruktiv görnüşleri bardyr, olary göwrümleýin we pilçeli (gazodinamiki) kysymly maşynlara bölmek bolar. Bu iki kysymly maşynlarda işçi prosesler düýpli tapawutlanýarlar. İşçi prosesleriniň analizine galtaşman, diňe esasy prinsiplerine seredip geçýäris.

Göwrümleýin maşynlarda daşky iş etmek bilen gazyň adiabat giňelmesi. Göwrümleýin maşynlarda gazyň energiýasy gönüden-göni gazyň basyş güýjüniň hasabyna işe özgerýär. Muňa porşenli detander mysal bolup biler. Gazyň basyş güýçleri porşene täsir edýärler we gazyň energiýasy hereket mehanizminiň üsti bilen tormoz gurлуşyna

berilýär. Gazyň basyş güýçleri tükeniksiz kiçi ululygyň takykglygyna çenli tormozyň garşylyk güýçleri bilen deňagramlaşýar we teoretiki giňelme prosesi deňagramlaşan proses bolup durýar. Detanderiň işi gaýtalanmaly häsiýete eýedir. Her bir gaýtalanmanyň dowamynda maşynyň işçi göwrümünde, ýagny silindriň diwary bilen porşeniň arasynda kesgitli prosesleriň ençemesi gaýtalanýar.

Bu zygyderlikler aşakdaky prosesleri özünde jemleýär: içine goýberme, doldurylma, içki giňelme, işlenen gazyň çykyşy (wyhlop), daşyna itekleme we tersine (yzyna) gysylma. Maşynyň içine gaz sorulma klapandan düşýär we çykaryjy klapanyň üsti bilen hem daşyna çykarylýar. Porşeniň ädiminiň içine goýberiji klapanyňnyň açyk meýdanyny, köplenç, doldurylma bölegi diýip atlandyrýarlar.

Porşeniň täsiri ýetmeýän göwrüm (porşeniň iň aşaky çetki işçi giňişliginiň göwrümi) hemişe bardyr, ol käbir maşynlaryň görnüşleri üçin, meselem, klapanсыз detanderler üçin hökmandyr. Dürli nazary indikator diagrammaly detanderleriň dürli hilli görnüşleri mälimdir.

Içine goýberiji we daşyna çykaryjy klapany klassyky görnüşli detanderler üçin adiabatik PTK $\eta = 0,7-0,9$.

Pilçeli maşynlarda (turbodetanderde) gazyň daşyna iş etmek bilen adiabatik giňelmesi. Porşenli detanderlerde gazyň energiýasy gazyň basyş güýjüniň porşene täsiri nätijesinde işe özgerýär. Görşümüz ýaly, eger gysylan gazyň energiýasy akymyň energiýasyna özgerdilsen, onda gaz şol ululykdaky işi ýerine ýetirer we ony iş almak üçin ulanmak bolar.

Şunlukda, gazyň giňelme derejesi we başlangyç parametrleri birmeňzeş diýlip kabul edilýär.

Turbodetanderde işçi proses porşenli detanderiň işçi prosesinden düýpli tapawutlanýar, ýöne maşynyň girişinde we çykyşynda gazlaryň tizlikleriniň deň bolan şertlerinde energetiki balansyň integral gatnaşyklary doly adalatlydyr.

Gysylan gazyň energiýasyny akymyň energiýasyna özgertmek bilen, ony daşky işi almak üçin ulanmaklygy dürli ýollar bilen amala aşyrmaklygyň mümkindigini bellemek zerurdyr. Meselem, ilki bilen, hereketsiz pilçeli enjamynda gazy doly giňeltmek, ondan soň uly tizlik bilen hereket edýän gaz akymyny turbinanyň pilçelerine

ugrukdyrmak we şonuň bilen pilçe diskini aýlanmaga mejbur etmek bolar. Şu ýagdaýda turbodetanderi aktiw diýip kabul edilendir.

Gazy pilçeli lüle enjamynda hiç hili deslapky giňeltmezden tigrin pilçeara giňişliginde gönüden-göni doly giňeltmek bolar. Bu ýagdaýda turbodetander reaktiw diýlip atlandyrylýar.

Bu iki usulyň bilelikde ulanylmagynyň ykdysady ähmiýetiniň örän uludygyny bellemek gerek. Tejribede şeýle hem edilýär. Gaz P_1 basyş bilen ugrukdyryjy pilçe enjamyna berilýär, ol ýerde gaz P' aralyk basyşa çenli giňelýär, ondan soň uly tizlik bilen turbinanyň pilçara giňişligine düşýär, bu ýerde onuň P_2 basyşa çenli giňelmesi amala aşyrylýar. Hereketsiz pilçelerde we turbodetanderiň iş tigrinde gazyň hereketiniň ugry radial, oklaýyn ýa-da radial-oklaýyn bolup biler.

Turbodetanderiň işiniň effektiwligine porşenli detanderiňki ýaly, izoentropiki PTK – η_s bilen baha berýärler. Turbodetanderiň köp bölegi üçin: $\eta_s = 0,65-0,85$.

§ 1.7. Işlenen gazyň çykarylyşy (wyhlop) ýa-da gazyň ballondan erkin çykarylması. Içine goýberilme prosesi

Haýsy-da bolsa bir göwrümden (ballondan, silindrdan we ş.m.) çykarylanda gazyň daşyna adiabatik giňelme prosesine seredeliň. Bu hili prosese, köplenç, gazyň daşyna erkin çykarylması diýlip aýdylýar. Bu proses in köp ýaşran prosesleriň biridir. Ony köphalada pes temperaturaly maşynlarda gaýtalanmalaryň işçi prosesleriniň biri hökmünde ulanýarlar. Işlenen gazyň çykarylma prosesini gurnamagyň shemasy örän ýönekeýdir. Gysylan gaz doldurylan ballonyň goýberiji klapany bardyr, ony açylanda gaz bat bilen ballondan çykyp, turbageçirijä tarap ugrugýar.

Işlenen gazyň çykarylma (wyhlop) prosesi daşyna iş edýän stasionar däl we deňagramсыз gazyň adiabatik giňelme prosesidir. Berlen şert boýunça gazyň diwarlar bilen ýylylyk çalyşmasy aradan aýrylan, deňagramсызlygy bolsa göwrümi üýtgände sistemanyň seredilýän üstünde gazyň basyş güýjüniň basyşa garşy güýçleri bilen deňagramlaşmaýandygy bilen şertlendirilýär.

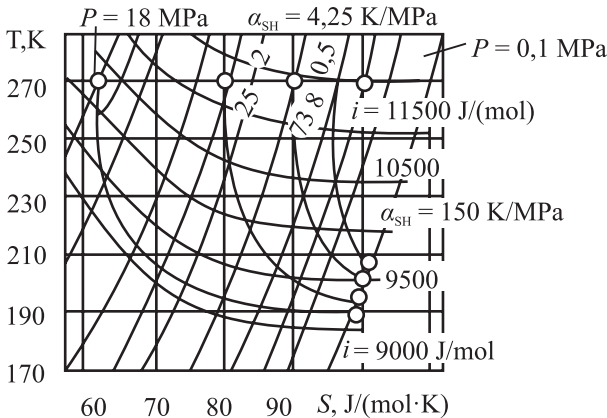
Ballondaky gazyň başlangyç parametrleri T_b we P_b . Ballon klap-gapak bilen germetiki ýapylan. Boşadylandan soň zadwižka goýberiji turbada sürtülmesiz hereket edip başlaýar. Gaz kem-kemden pese düşýän basyş bilen zadwižka täsir edýär. Beýleki tarapdan, gazyň hemişelik basyş P_{ah} çäğine akyp geçýänligi üçin zadwižka basyşa garşy hemişelik güýç täsir edýär. Ballondaky basyş P_{ah} ýetensoň, zadwižka durar. Proses togtandan käbir wagt geçensoň, diffuziýa we garyşma netijesinde sistemanyň ähli böleginde T_{ah} temperatura deňagramlaşan ýagdaýa geler, ony aşakdaky aňlatma boýunça kesgitlemek bolar:

$$T_b / T_{ah} = k / [1 + (P_{ah}/P_b) \cdot (k - 1)]. \quad (1.15)$$

Birmeňzeş T_b temperaturalarda, P_b, P_{ah} deňagramsyz adiabatik prosesde temperaturanyň peselmesi izoentrop prosesine garanynda azdyr. $\Delta P = (P_b - P_{ah}) \rightarrow dp$ bolanda kwazideňagramlylyk şertleriniň berjaý edilyändigine üns bermek gerek. Bu ýagdaýda işlenen gazyň çykarylma hadysasy bilen izoentrop prosesiniň α_w defferensial effektleri birmeňzeşdir:

$$\alpha_w = (dT/dP)_w = \alpha_{sh} = \text{const}. \quad (1.16)$$

(1.16) deňlemeden ugur alyp, T_b we P_b berlen bahalarynda T - S koordinatalar sistemasynda işlenen gazyň çykarylma hadysasy üçin $\alpha_w = \alpha_{sh} = \text{const}$ çyzyklary gurmak kyn däldir (*1.6-njy surat*).



1.6-njy surat. Howa üçin T-S diagrammada işlenen gazyň çykarylma hadysasynyň çyzyklary

Suratdan görnüşi ýaly, sowuklyk öndüriji ýagdaý hökmünde işlenen gazyň çykarylma hadysasy ulanylanda bir basgançakda uly giňelme derejesi rasional däl. Giňelme derejesi näçe kiçi bolsa, işlenen gazyň çykarylma hadysasynyň netijeliligi şonça-da ýokarydyr.

Eger işlenen gazyň çykarylma hadysasyna wagta görä seretsek, onda ballondan çykýan gazyň akymynda «temperaturanyň gatlaklara bölünmesini» ýa-da temperatura gradiýentiniň ýüze çykmasyny hökmany suratda hasaba almaly bolýar.

Ilkinji gezek işlenen gazyň çykarylma hadysasy 1877-nji ýylda L.Kalýete tarapyndan kislorody we beýleki gazlary suwuklandyrmak üçin ulanylýar. Soňra bu proses E.Olşewskiý we S.Wroblewskiý tarapyndan suwuk gazlary almak üçin ulanylýar. 1932-nji ýylda Ž. Simon bu prosesi gelini suwuklandyrmak üçin örän üstünlikli ulanmagy başarýar. 1959-njy ýylda U. Jifford we Mak-Magon işlenen gazyň çykarylma hadysasy üznüksiz gaýtalanýan örän täsin kriogenerator guryarlar. Gazyň erkin goýberilme prosesi pulsasion turbada ulanylýar. İşlenen gazyň çykarylma hadysasy porşenli detanderiň in möhüm işçi prosesleriniň biridir.

Netijede, haýsy-da bolsa bir gabyň içine gazyň goýberilme işi özüniň fiziki manysy boýunça wyhlop (gazyň ballondan erkin çykarylması) hadysasyna garşylykly ýagdaý diýip bellemek bolar. Bu ýagdaýda ballonyň içinde deslapky bar bolan gazyň deňagramsyz adiabat gysylması bolup geçýär. Eger ozalky ballonda bar bolan gysylýan gaz üstüne täze gelýän gazyň mukdaryndan izolirlenen bolup galsa, onda bu ýagdaý üçin aşakdaky aňlatmany ýazmak bolar:

$$T_{ah}/T_b = [1 + (k-1)(P_{ah}/P_b)]/k. \quad (1.17)$$

T_{gir} temperaturaly gazy içine goýberilende ballonyň T_{ah} temperaturasyny gysylýan we üstüne gelýän gazyň garyşmasyny hasaba alyp, doldurylandan soň kesgitleýärler. Degişli hasaplamalary ýerine ýetirip, aşakdaky aňlatmany alarys:

$$T_{ah} = (kT_{gir} \cdot T_b \cdot P_{ah}/P_b) / [T_b(P_{ah}/P_b - 1) + kT_{gir}]. \quad (1.18)$$

Wagtyň dowamynda gazyň içine goýberilme prosesine seretmek bilen, goýberilýän gazyň akymynda temperatura gradiýentiniň ýüze çykmasyny hem hasaba almak zerurdyr. Goýberilmeden ozal bar bolan, gysylýan gazyň zonasynda goýberiji klapandan daşda ballonyň

içinde temperatura ýokarydyr. Temperatura datçikleri temperaturanyň gysga wagtlaýyn ýerli artmasyny kesgitläp bilýärler.

Has pes temperatura giriş penjiresiniň ýa-da klapanynyň golaýyndaky gaz akymynda duýulýar. Intensiw garyşma bolanda temperatura gradiýenti ýitýär we ballonda (1.18) deňleme bilen nazary kesgitlemek bolýan temperatura kadalaşýar.

Gazyň girýän gabyndaky deňagramsyz temperatura meýdanyny, wagta görä kesgitli konstruksiýada kadalaşdyrmak we gysylýan gazyň temperaturasynyň artma energiýasyny daşky gurşawa bermek üçin ulanmak bilen sowadyjy gurluşy almak bolar. U. Jifford we R. Longswort şuna meňzeş hadysalary pulsasion turbada amala aşyryp görkezýärler.

§ 1.8. Üýtgeýän massaly adiabat sistemadaky hadysalar

Köp kriogen sistemalar üçin, aýratyn hem, pes temperaturaly gaz maşynlarynda, aýratyn böleklerde (zolaklarda) işçi prosesler işçi jisimiň üýtgeýän massasynda bolup geçýär. Bu prosesleriň çalt bolup geçýänligine görä, olary adiabatik diýip seretmek bolar.

Işçi jisimiň üýtgeýän mukdarynda açyk adiabat sistemada parametrleriň üýtgemesiniň esasy kanunalaýyklygyna gysgaça seredeliň.

Işçi jisimi üýtgeýän mukdarly islendik termodinamiki sistemany klassyky termodinamikanyň usulyny ulanmak bilen derňemek we beýan etmek bolar. Ýöne üýtgeýän massaly sistema üçin meseleleriň çözüdiniň usullary dürli bolup biler.

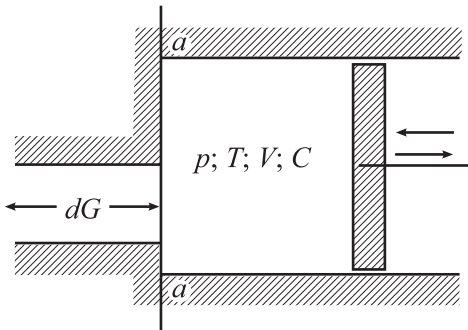
Kähalatda meseläniň çözülişi üçin hemişelik massaly goşmaça sistemany ýa-da oňa golaý sistemany saýlamak we olaryň özara täsirine seretmek amatly bolup durýar. Beýleki ýagdaýlarda işçi jisimi üýtgeýän massaly sistemany gönüden-göni derňemek ýeňil bolar. 1.7-nji suratda adiabatik açyk sistemanyň shemasy getirilen, onuň barlag (kontrol) üsti işçi göwrümiň araçäkleri bilen gabat gelýär. Sistema $a-a$ kese kesikde T_a temperaturaly akym akyp gelýär. Porşen hereket edende sistemanyň parametrleri üýtgeýär. Sistemanyň üýtgeýän parametrlerini baglanyşdyrýan deňleme aşakdaky görnüşe eýedir:

$$dp/p = \left[(T_a - T) dv/v - T_a dT/T \right] / (T/k - T_a). \quad (1.19)$$

Meseläniň şertine baglylykda T_a temperatura üýtgeýän ýa-da üýtgeýän bolup biler. Soňky aňlatma umumy bolup durýar. Ondan hususy çözümleri alyp bolýar. Meselem, eger, gazyň temperaturasy T_a a-a kese kesikde hemişe gazyň gelýän T temperaturasyna deň bolsa, (bu iki ýagdaýda mümkindir: haçan-da gaz sistema gelmese ýa-da gaz sistemadan gidende), onda (1.19) aňlatma Puassonyň mälim bolan deňagramly adiabata deňlemesini berer:

$$dP/P = \left[k/(k-1) \right] dT/T. \quad (1.20)$$

Eger T_a temperatura sistemadaky gazyň temperaturasyna deň bolmasa, onda öwrülişiksiz süýşme bolup geçýär. Eger süýşme ýylylygy nola deň bolsa, (1.20) deňleme adalatly bolup galar.



1.7-nji surat. Işçi jisimi üýtgeýän mukdarly açyk adibat sistemanyň ýönekeý shemasy

Meselem, haýsy-da bolsa bir göwrüme gazyň goýberilme prosesi üçin $dV = 0$ we $T_a = T_{gir} = \text{const}$. Onda deňlemeden

$$dP/P = \left[1/T - 1/(T - kT_{gir}) \right] dT \quad (1.21)$$

alarys.

Bu deňleme içine goýberilme prosesiniň differensial deňlemesidir. Bu deňlemäni P_b – den P_{ah} çäklerde integrirläp, (1.21) deňleme bilen doly gabat gelýän aňlatmany alarys.

Üýtgeýän massaly ýene-de bir duş gelýän proses – bu ($dP = 0$) hemişelik basyşda we $T_a = T_{gir} = \text{const}$ ýagdaýynda doldurylma prosesidir. Bu ýagdaýda (1.19) deňlemeden aşakdaky aňlatmany alarys:

$$dv/v = dT/T - dT/(T - T_{gir}). \quad (1.22)$$

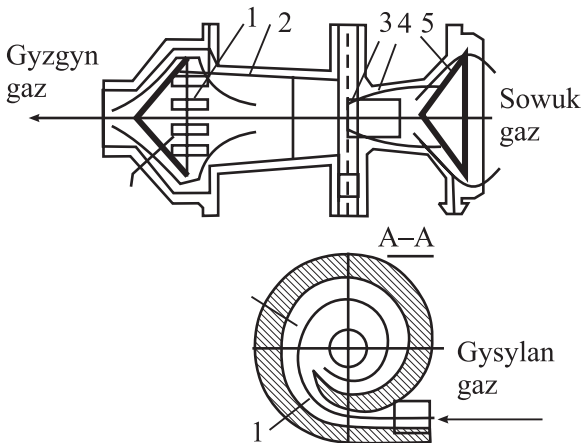
Bu $P = \text{const}$ -da doldurylma prosesiniň differensial deňlemesidir. (1.22) deňlemäni V_b -dan V_{ah} çäklerde integrirläp alarys:

$$T_{ah} = T_{gir} \cdot V_{ah} / (V_{ah} - V_b + V_b \cdot T_{gir} / T_b). \quad (1.23)$$

Şeýlelikde, (1.19) deňlemäniň hakykatdan hem umumy bolup durýandygy görkezilýär. Ony öwrülişiksiz prosesler üçin hem ulanmak bolýar. Şeýle hem, (1.19) deňlemeden atylyp çykma prosesinde ballonda galýan gazyň temperaturasynyň ($T_a = T$) Puassonyň adiabatasy boýunça üýtgeýändigini gelip çykýar.

§ 1.9. Rank – Hilşiň adiabatik köwlenme turbasynda gazyň giňelmesi

1931-nji ýylda Ž. Rank köwlenme akymynda gaz akymynyň temperaturasynyň bölünme effektini ýüze çykarýar. 1.8-nji suratda Rankyň effektini amala aşyrmak üçin niýetlenen gurluşyň shemasy berlen.



1.8-nji surat. Adiabatik tüweleý turbanyň shemasy

Gysylan gaz (1) tangensial pilçäniň (soplonyň) üsti bilen intensiw aýlaw akym kadalaşýan (2) ulitka berilýär. Şunlukda, stasionar däl temperatura meýdany ýüze çykýar. Oka golaý ýerleşýän gaz

gatlagy girýän gaza garanda has sowuk bolup çykýar, köwlenýän akymyň periferiýa (uzak aradaky) gatlagy bolsa gyzýar. Gazyň μ bölegi sowuk akym görnüşinde (3) diafragmanyň, (4) nasadkanyň we 8 yşly (şelewoý) diffuzoryň, beýleki $(1-\mu)$ bölegi bolsa ýyly akym görnüşinde (5) nasadkanyň we (7) torly (6) pilçeli diffuzoryň üsti bilen alnyp gidilýär. Köwlenme turbasynyň bu hili shemasy optimala has ýakyndyr. Has ýönekeý konstruksiýalar diffuzorsyz ýerine ýetirilýär. Köwlenme turbasynyň işini ýyly akymda drossel zaslonka bilen sazlamak bolar.

Eger gazyň μ bölegi giňelenden soň has sowuk bolup, beýleki $(1-\mu)$ bölegi bolsa has gyzgyn bolup çyksa, diýmek, birinji (μ) akymyň energiýasynyň bir bölegi ikinji akyma berlen bolýar; şonuň üçin köwlenme turbasyna kähalatda akymyň energetiki bölüjisi diýip hem atlandyryrlar. Bu ýerde köwlenme turbada gaz akymynyň mehanizminiň has çylşyrymly häsiýetine seredilmeyär. Ýöne tejribe barlaglarynyň üsti bilen ýüze çykarylyşyna görä köwlenýän akymyň periferiýa gatlagynyň oklaýyn tizligi turbanyň gyzgyn ahyryna ugrukdyrylandygyny bellemek gerek. Okdan 0,35 D golaý aralykda okuň ugry boýunça tizlik nola golaýdyr. Kiçi radiuslarda turbanyň sowuk ahyryna tarap ugrukdyrylan, kem-kemden ösýän oklaýyn tizlik ýüze çykýar. Okuň golaýynda oklaýyn tizlik ýene-de kemelýär.

Merkezdäki gazyň massasynyň burç tizligi okdan başlap, belli bir radiusa çenli hemişelikdir, bu çäk **mejbury tüweleý** diýlip atlandyrylýar. Towlanýan akymyň periferiýa çäginde radiusynyň artmagy bilen burç tizligi kemelýär; bu çäk **erkin tüweleý** diýlip atlandyrylýar.

Temperatura bölünme effektiniň ýönekeý düşündirilişi aşakdakylarda jemlenýär. Merkeze tarap hereket edýän gazyň bölejikleri burç momentini saklamaga ymtylýrlar we oka golaýlaşdygyça ösýän burç tizligi bilen aýlaw hereket etmeli bolýrlar. Ýöne muňa gurşawyň şepbeşikligi garşylyk görkezýär. Şonuň netijesinde merkezi gatlaklar birmeňzeş tizlik bilen aýlanýrlar we merkeze tarap hereket edýän gaz bölejikleri özleriniň kinetik energiýalarynyň bir bölegini gaz tüweleýiniň beýleki gatlagyna bermäge mejbur bolýrlar we şunlukda, olar sowaýrlar.

Aýlanýan gazyň periferiýa gatlagy bu energiýany kabul edip, gyzýarlar. Bu düşündiriş takmynandyr we köwlenme turbasynda ýüze çykyan ençeme hakyky hadysalary hasaba almaýar.

Adiabat köwlenme turbasy üçin energiýanyň saklanma kanunyň deňlemesi aşakdaky görnüşde aňladylýar:

$$G i_{gir} = G_s i_s + G_g i_g$$

ýa-da

$$i_{gir} = \mu i_s + (1 - \mu) i_g \quad (1.24)$$

$$\mu = G_s / G; \quad 1 - \mu = G_g / G; \quad G_s + G_g = G \quad (1.25)$$

bu ýerde: G_s we G_g – degişlilikde sowuk hem-de gyzgyn gazyň mukdary.

Köwlenme turbasynyň udel sowuklyk öndürijiligi

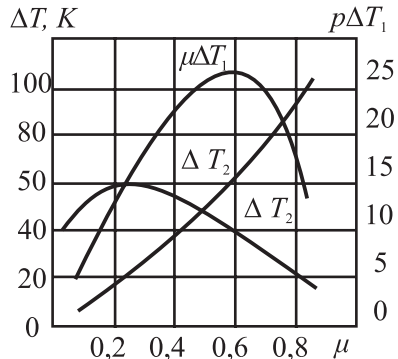
$$q_K = \mu (i_{gir} - i_s) = (1 - \mu) \cdot (i_g - i_{gir}). \quad (1.26)$$

Sowuk akymyň temperaturasynyň ΔT_s peselmegi köwlenme turbasynyň in gowy konstruksiýalarynda hem izoentrop prosesinde temperaturalar tapawudy 50–55%-e ýetýär. $\Delta T_s / \Delta T_e$ gatnaşygy, köplenç, köwlenme turbasynyň temperatura effektivligi diýip atlandyryýarlar.

Ondan başga-da eger, sowuk akymyň bary-ýogy 25–35%-i düzýändigini hasaba alsak, onda köwlenme turbanyň sowuklyk generatory hökmünde effektivliginiň pesligi mese-mälim bolup galýar. Ýöne onuň konstruktiv taýdan ýönekeýligi, käbir ýagdaýlarda, aýratyn hem, ykdysady tarapy möhüm bolmadyk ýagdaýlarda kesgitleýji rol oýnaýar.

1.9-njy suratda köwlenme turbasynyň häsiýetnamasy getirilen.

Sowuk akymyň temperatura-synyň ΔT_s in köp üýtgemesine



1.9-njy surat. Adiabat köwlenme turbasynyň adaty häsiýetnamasy:

($P_{gir} = 0,6 \text{ MPa}$; $T_{dx} = 303 \text{ K}$;
 $P_x = 0,101 \text{ MPa}$; *işçi jisim-howa*)

$\mu = 0,25$ -de gözegçilik etmek bolýar. $\mu \Delta T_x$ köpeldiji bilen häsiýetlendirilýän udel sowuklyk öndürjiligi $\mu = 0,6$ -da ýokarydyr. Köwlenme turbasynyň häsiýetnamasyna gazyň diňe bir termodinamiki parametrleri täsir etmän, köp halatda onuň geometriki ölçegleri, ýagny diafragmanyň diametri, gyzgyn we sowuk akymyň alyp gidilmegi üçin nasadkanyň uzynlygy, onuň geometriýasy, soplonyň ölçegleri täsir edýär. Gyzgyn akymyň basyşynyň hemişe sowuk akymyň basyşyndan uly bolýanlygy üçin, köp halatda $(1-\mu)$ çykýan gyzgyn akymy, sowuk akymyň temperaturasynyň köp üýtgemesini, takmynan $(0,25)$ derek) $0,35$ çenli alyp bolýan, μ ters akymyň ežeksiýasy üçin ulanýarlar.

§ 1.10. Gazyň tolkunlaýyn giňelme hadysasy

Maşynsyz giňeldiji gurluşda amala aşyrylýan drosselirleme prosesi derňelende, drossel wentilde akýş prosesinde gysylan gazyň energiýasynyň akymyň kinetik energiýasyna özgermegi bilen alnyp barylýandygy görkezilýär.

Giňeldiji gurluşyň özünü düýpli çylşyrymlaşdyrmazdan giňelmäniň temperatura efektini artdyrmak üçin akymyň kinetik energiýasyny beýleki görnüşli energiýa özgermek usullaryny tapmak we onuň bir bölegini çylşyrymly maşynlary, adatyça, bu maksatlar üçin ulanylýan detanderleri ulanmazdan alyp gitmek zerurdyr. Tolkunlaýyn giňelme diýip atlandyrylýan prosesi amala aşyrmak tejribede duş gelýän usullaryň biridir: kadalaşan akymyň şertlerinde tolkunlaýyn (akustiki) energiýanyň generasiýasy bilen giňeltmek we bu energiýanyň bir bölegini giňeldilýän gazdan özgerdilen görnüşde aýyrmak.

«Kriogen maş», «Geliý maş» ÝÖB (ylmy önümçilik birleşiginde), ВНИИХОЛОДМАШ we РФ ylmymlar akademiýasynyň Akustiki instituty bilen bilelikde N.E.Bauman adyndaky MBTV-da geçirilen ylmy barlaglaryň netijesinde kriogen we sowadyjy sistemalarda ulanmaga ýaramly giňelmäniň tolkunlaýyn prosesini amala aşyrmaklygyň mümkin bolan käbir usullary kesgitlenildi. Işläp düzülen giňeldiji gurluşlar tolkunlaýyn kriogeneratorlar (TKG) diýlip atlandyrylýarlar, usulyň özi bolsa sowuklygy almagyň gazodinamiki maşynsyz usuly diýen ada eýe bolýar.

Tolkunlaýyn awtoyrgyldyly režimi oýarmak üçin doly giňelmedik akymda gaz inçelýän soplodan akyp geçişinde ýüze çykýan dykylmanyň bökmesini ulanmak bolar. Soplonyň çäginde daşda gazyň akymynyň sesiň tizliginden ýokary tizligi duýulýar.

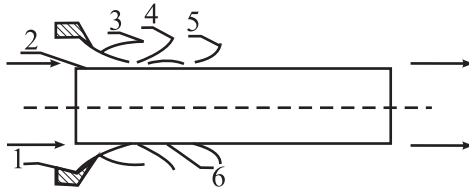
1.10-njy suratda halkalaýyn doly giňelmedik akymyň gurluşy görkezilen. Bu hili akymyň haýsy-da bolsa bir ýapyk boşluga girende dykylma bökmesi belli bir şertlerde tolkunlaýyn prosesini (Gartmanyň effekti) generirlemek bilen ossillirlenip başlaýar.

Gurşawyň yrgyldysynyň energiýasyny energiýanyň başga formasyna özgertmek we ony giňelýän gazdan aýyrmaklygy dürli usullar bilen amala aşyrmak bolýar. Meselem, rezonans trubkaly tolkunlaýyn kriogeneratorlarda trubkanyň ýapyk ahyrlary örän güýçli gyzýar (Şprengeriniň effekti) we bölünip çykýan ýylylyk alnyp gidilip bilner.

Tolkunlaýyn kriogeneratoryň beýleki görnüşinde şöhlendiriji gysga rezonator we ellipsoid konsentratory ulanylandyr. Ellipsoidiň çep fokusynda rezonator-şöhlendiriji ýerleşdirilen, sagynda bolsa tolkunlar fokusirlenende tolkunlary kabul ediji (priýomnik) gyzýar, ondan hem ýylylyk alnyp gidilýär.

Başga hili konstruksiýalar, ýagny şonuň bilen bir hatarda tolkunlaýyn energiýanyň elektrik energiýasyna gönüden-göni özgerdilmesi amala aşyrylýan konstruksiýalar hem mümkindir.

Rezonans trubkaly TKG-de (tolkunlaýyn kriogeneratorlarda) işçi prosesleriň barlagynda iki sany periodiki gaýtalanýan prosesleriň stadiýasynyň barlygy görkezilýär: rezonans trubkasyna gazyň girişi we ondan soplodan çykýan akyma garşy gelýän çykyşy. Şeýlelikde, rezonans trubkasynda awtoyrgyldyly proses kadalaşýar. Merkezi sterženiň bar bolmagy bu prosesini kadalaşmagyna itergi berýär.



1.10-njy surat. Halkalaýyn ses tizliginden ýokary doly giňelmedik akymyň shemasy: 1 – daralýan pilçe; 2 – steržen; 3 – birinji ýaçeýkanyň zonasında akymyň çägi; 4-5 – dykyzlanmanyň birinji we ikinji bökmesi; 6 – araçäk gatlagyň üzülme çägi

Turbanyň düýbünden ýüze çykan we serpilen gysylma hem-de seýreklenme tolkunlary özara täsirleşip, turbanyň açyk ahylaryndan käbir aralykda ahyrky amplitudanyň güýçli tolkunyny emele getirýärler. Göni we turbanyň düýbünden serpikdirilen urgy tolkunlarynyň turba boýunça geçişi basyşyň intensiw yrgyldylarynda, entropiýanyň ösüşinde we ýylylygyň bölünip çykmasynda ýüze çykýar. Iň ýokary amplitudaly yrgyldyly basyş režimleri ýokary durnuklylygy we ýylylyk bölüp berijiligi bilen häsiýetlendirilýär. Gazyň yrgyldylarynyň A amplitudasy rezonans ýygylgynda beýleki ýygylklardaka garanda takmynan 8–15 dB ýokary bolýar. Tolkun prosesinde energiýanyň dykzlygy ilkinji ýakynlaşmada yrgyldynyň amplitudasynyň kwadratyna proporsional bolýanlygynda, ähli energiýanyň 80–90%-e golaýy esasy rezonans ýygylgyyna geçirilýänligi gelip çykýar.

Girişde temperaturanyň peselmegi bilen gazyň basyşynyň yrgyldy amplitudasy peselmeyär. Bu bolsa pes temperaturalarda sowadylma effektini saklamak üçin zerur bolan hökmanylyk bolup durýar.

Rezonans trubkasynyň uzynlygy boýunça temperatura paýlanyşy birnäçe konstruktiv ýagdaýlara we gazyň girişdäki temperaturasyna bagly bolup durýar. Konstruktiv kämilleşdirmek ýoly bilen trubkada iň ýokary temperaturany howa üçin 800 K çenli, geliý üçin 1000 K çenli artdyrmak bolar. Tolkunlaýyn kriogeneratorda gazyň giňelmeğinde entalpiýasynyň kemelmegi onuň sowuklyk öndürilijiligi kesgitleýär:

$$i_{\text{gir}} - i_{\text{çyk}} = q. \quad (1.27)$$

bu ýerde: q – alyp gidilýän ýylylygyň mukdary.

Turbanyň ýyly tarapyndan gyzgyn gazyň bir bölegini saýlap almak bilen ýylylyk alyp gidilmäni amala aşyrmak bolar. Şu ýagdaýda TKG (tolkunlaýyn kriogenerator) öndürýän effekti boýunça köwlenme turbasyna meňzeşlikde, özboluşly akymy energetiki bölüji hökmünde işleýär.

TKG-da gaz giňelende temperaturanyň üýtgemesi umumy ýagdaýda:

$$\Delta T = T_{\text{gir}} - T_{\text{çyk}} = \Delta T_w \pm \Delta T_i \quad (1.28)$$

bu ýerde: ΔT_w – tolkun energiýasynyň bir böleginiň aýrylmagy netijesinde gazyň temperaturasynyň peselmegi;

ΔT_i – integral drossel-effekt.

bu ýerden

$$\Delta T / \Delta T_i = \Delta T_w / \Delta T_i \pm 1 \quad (1.29)$$

Bu gatnaşyk, adatça, 3–4 deň bolýar, ýagny giňelmeden öň we soň temperaturalar tapawudy integral drossel-effektinden 3–4 we ondan hem ýokary bolýar.

TKG-ň (tolkunlaýyn kriogenerator) effektiwligine «tolkunlaýyn» detanderdäki ýaly, adiabatik PTK-si bilen baha bermek bolýar:

$$\eta_{ad} \approx q / \Delta i_s \quad (1.30)$$

bu ýerde: Δi_s – izoentropiki giňelmede entalpiýanyň tapawudy.

TKG-ň kämilleşip ýeten derejesinde PTK-niň ortaça bahasy $\eta_{ad} = 0,12-0,18$, käbir aýratyn kadalarda $\eta_{ad} = 0,2-0,25$ (has kämil konstruksiýalar üçin). TKG-ň maşynsyz sowuklyk generatory hökmünde artykmaçlygy onuň ýönekeýligi, ygtybarlylygy, dürli gaz görnüşli işçi jisimler üçin parametrleriň giň çäginde işiniň durnuklylygy bilen häsiýetlendirilýär.

Doýgun ýagdaýynyň çäginde TKG-ň netijeli işçi prosesini amala aşyrmak heniz başartmaýar. Bu bolsa olaryň ulanylyşyny çäklendirýär. TKG-ny geliý desgasynyň gaýtalanmalarynda ulanylanda TKG-dan aýrylýan ýylylyk sowadylmanyň deslapky basgançagyna berilýär.

§ 1.11. Gaýnaýan suwuklygyň buguny sorup aýyrmak

Izolirlenen gapda basyşyň peselmegi bilen suwuklygyň ýüzünde bolup geçýän proses gaýnama prosesini ýada salýar. Suwuklygyň gatlagynyň üstünden wakuum nasosy bilen sorulyp alynýan buguň düwmelikleri ýokary galýar. Ýöne sorulyp alnanda, diňe üstden bugarma režimi bolup biler. Meselem, He-geliniň bugy sorulyp alnanda A nokadyň üstünden geçenden soň, gaýnamanyň görünýän prosesi kesilýär. Üst bugarma režimi azody we kislorody çuň wakuumlaşdy-

rylanda hem duýmak bolýar. Ähli ýagdaýlarda bugaryan bug suwuklykdan we gabyň içki diwarlaryndan energiýany alyp gidýär, şonuň netijesinde galan suwuklygyň we diwarlaryň temperaturasy peselýär (1.11-nji surat).

Kesgitli geometriýasy bolan gabyň içindäki suwuklygyň temperaturasynyň üýtgemesi, esasan, onuň buguny sorup almagyň intensiwligi bilen, ýagny wakuum nasosynyň öndürijiligi bilen kesgitlenýär.

Dürli kriogen suwuklyklaryň doýgun bugunyň basyşynyň we olaryň ýylylyk sygymynyň temperaturadan baglylygy dürli-dürlüdür, şonuň üçin birmeňzeş nasos ulanylanda sowadylma tempi şonuň ýaly birmeňzeş şertlerde dürlüdür.

Sowadylmany togtatmak, energiýanyň azalmasyny daşdan gelýän ýylylyk akymy bilen kompensirleýän basyşyň kemelmeginde alnyp barylýar. Şu sebäp bilen, iň kuwwatly wakuum nasosy bilen hem ^4He üçin 0,5 K-den pes temperaturany almak başartmaýar.

Goý, r – suwuklygyň bugarmasynyň gizlin ýylylygy; m – gapdaky suwuklygyň massasy; m_b – suwuklygyň başlangyç massasy; m_{div} – içki diwarlaryň massasy; c_s we c_{div} – suwuklygyň we diwaryň materialynyň ýylylyk sygymy; Q_d – izolýasiýanyň üstünden gelýän ýylylyk akymy bolsun.

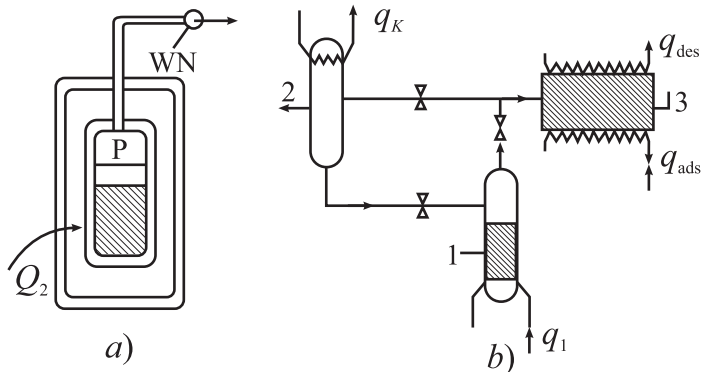
Birinji ýakynlaşmada Δm paýynyň sorulyp alynmagynda suwuklygyň temperaturasynyň peselmegi:

$$\Delta T \approx (r_{\text{or}} \Delta m_{\text{get}} - q_{\text{c.get}}) \cdot [(1 - \Delta m_{\text{get}}) c_{\text{s.or}} + 0,5 \Delta m_{\text{get}} c_{\text{s.or}} + m_{\text{div.get}} c_{\text{or.div}}]^{-1} \quad (1.31)$$

bu ýerde: Δm_{get} we $q_{\text{c.get}} - m_b$ -e getirilen ululyk.

Tejribede bu usul, köplenç, doly gyzdyrylmadyk suwuklyklary (aşa sowadylan diýip atlandyrylýan) almak üçin ulanylýar. Hakyky şertlerde goşmaça ýitgiler döreýär, bu deňagramsyzlykdan we bugaran suwuklygyň gizlin ýylylygyny doly ulanlymazlykdan ýüze çykýär. Gidýän bug temperatura gradiýenti bar bolan suwuklykda galýan öz massasy bilen deňagramlylykda bolmaýar. Suwuklygyň aýnasynyň golaýyndaky gatlagy has intensiw sowaýar. Suwuklygyň temperaturalar tapawudy gaýnama režiminde, adatça, 2 K-den ýokary bolmaýar, üst bugarma kadasynda bolsa 5 K çenli ýetip biler. Goşmaça

ýitgiler sorulma kadasynda, köp konstruktiv ýagdaýlara, garyjylaryň bar bolmagyna we ş.m. bagly bolýar.



1.11-nji surat. Shemalar:

a – kriogen suwuklygyň buguny sorup aýyrmak; b – adsorbsion nasosly ýapyk aýlawly refreratorada gazy sorup aýyrmak; WH – wakuum nasosy; 1 – bugardyjy, 2 – kondensator, 3 – adsorbsion nasos, q_p , q_k , q_{ads} , q_{des} – degişlilikde, berilýän kondensasiýa, adsorbsiýa we desorbsiýa ýylylyk akymlyry

ΔT -ň hakyky bahasy (1.31) formula boýunça hasaplanandan kiçidir, ony sanawja umumy görnüşde goşmaça $q_{goş}$ ýitgini girizip, anyklamak bolar.

Suwuklygyň buguny sorup almak dürli guruluşlar bilen, şol san-da kriogen wakuum nasoslaryň kömegi bilen amala aşyrmak bolýar. 1.11-nji suratda adsorbsion nasosly kriorefrizeratoryň esasy shemasy görkezilen. Adsorbsion prosesinde buglary sorup almak bolup geçýär we suwuklygy bugartma ýylylygy sowadylma üçin ulanylýar. Desorbsiýa prosesinde bir wagtyň özünde kondensatorda işçi jisimiň kondensasiýa prosesi bolup geçýär we bu proses bilen gaýtalanma utgaşýar.

§ 1.12. Gaty ýagdaýyndaky işçi gurşawy ulanmak bilen sowadylma prosesleri

Kriogen tehnikasynda ýaýran termodinamiki sistemanyň görnüşi, bu işçi gurşawy gaz görnüşli we suwuk ýagdaýda bolan termomehaniki sistemadyr. Ýokarda seredilen klassyky prosesler şunuň ýaly

termomehaniki sistemany ulanmak bilen gurlandyr. Ýöne, käbir ýagdaýlarda, sowadylma üçin gaty jisimi ulanmak maksadalaýyk bolup durýar. Şunlukda, mehaniki işiň deregine magnitlenme we elektriklelenme ýaly özara täsirler ýüze çykýar.

Gaty halyndaky işçi gurşawy ulanmaklyga esaslanan, pes temperaturalary almak üçin ulanylýan, birnäçe termodinamiki prosesler bardyr. Olaryň içinden käbirleri örän seýrek ulanylýar, ýöne olaryň gelejegi bardyr we gelejekde giňden ulanylyşa giriziler. Gaty jisimi işçi gurşaw hökmünde ulanmak bilen pes temperaturalary almaklygyň birnäçe ýagdaýlaryna seredeliň.

Adiabat magnitsizlenme. Jisimiň temperaturasyny peseltmek üçin ol ýa-da beýleki usul bilen öňürti entropiýany kemeltmek zerurdyr. Basyşy üýtgetmek bilen S -i kemeltmegiň has ýaýran termomehaniki usuly 1 K ýakyn temperaturalarda netijeli däldir, çünki bu çäkde tertipsizligiň (entropiýa) P we V parametrlerden baglanyşygy pesdir. 1 K töwereginde sowatmak üçin hallaryň (ýagdaýlaryň) X parametrleri üýtgände entropiýasy hem düýpli üýtgäp biljek, başga bir fiziki gurluş zerurdyr.

1926-njy ýylda W. Jiook we P. Debaý biri-birinden aýratynlykda bu hili gurluş hökmünde paramagnetikleri ulanmaklygy hödürleýärler. Ýöne 1905-nji ýylda P. Lanžewen paramagnit maddalaryň magnitlenmesiniň üýtgemesi temperaturanyň öwrülişikli üýtgemesi bilen alnyp barylmaladygyny görkezdi. Paramagnit maddalary, magnit momenti bar bolan, ýöne özara täsiri örän pes bolan, elementar magnit dipollardan durýan sistema hökmünde seretmek bolýar. Dipollar geliý temperaturasyna çenli haotiki ýerleşýärler, bu bolsa olaryň ýylylyk hereketleri we özara gowşak täsirleri bilen şertlendirilendir. Ýöne olary daşky magnit meýdanyny goýmak bilen tertipli ýagdaýa getirmek bolar. Ony diňe gözenegiň yrgyldy energiýasy az bolanda we magnit sistema täsir etmedik ýagdaýynda amala aşyrmak bolar.

H güýjenmesini hallaryň X parametrleri hökmünde seretmek bolýan daşky magnit meýdanynyň kömegi bilen sistemanyň entropiýasyny azaltmak mümkinçiligi ýüze çykýar. Şeýlelik bilen, bu sistemany sowadylma üçin ulanmaklyga prinsipial mümkinçiligi alýarys.

Termomagnet sistema ulanarlykly käbir termodinamiki gatnaşyklaryna seredeliň, onuň üçin entropiýa temperaturanyň we meýdanyň güýjenmesiniň $S = f(T, H)$ funksiýasy bolup durýar. Termodinamikada elementar iş üçin aňlatmany umumy ýagdaýda aşakdaký görnüşinde ýazarys: $dL = XdY$, bu ýerde X – umumylaşdyrylan güýç; Y – umumylaşdyrylan koordinata. Termodinamiki sistemada iş göwrümiň üýtgemegi bilen baglanyşykly, ýagny $X = P$, Y bolsa $Y = V$ deňdir. Magnit sistemada iş H güýjenmeli daşky magnit meýdanyň goýulmagynda dipollaryň polýarizasiýalaşmagyndan durýar; şunlukda, materialyň H magnitlenmesi üýtgeýär. Mälim bolşy ýaly, $X = H$ we $Y = M$, şoňa laýyklykda $dL = -HdM$. Bu ýerde minus alamaty magnitlenme artanda magnetikleriň üstünde iş edilýändigini aňladýar. Bu ýagdaýda termodinamikanyň birinji kanunyny $du = dq + HdM$ görnüşde ýazmak bolar (bu ýagdaýda magnit maddasynyň göwrümüne üýtgemesini hasaba alynmaýar). Ikinji başlangyjy hasaba alyp, ýazarys:

$$du = Tds + HdM. \quad (1.32)$$

Görşümüz ýaly, şuna meňzeşlikde magnit entalpiýany hem girizmek bolar:

$$e = u - HM.$$

Sowadylma üçin magnit sistema ulanylanda temperaturanyň üýtgemesini kesgitleýäris. Sowadylmanyň has effektiv öwrülişikli prosesine – izoentrop magnitsizlenmä seredeliň. $s = \text{const}$ proses üçin $s = f(T, H)$ gatnaşygy ulanarys:

$$ds = (\partial s / \partial T)_H dT + (\partial s / \partial H)_T dH = 0 \quad (1.33)$$

ýa-da

$$(\partial T / \partial H)_S = -(\partial s / \partial H)_T (\partial s / \partial T)_H. \quad (1.34)$$

$H = \text{const}$ proses üçin $Tds = c_H dT$ gatnaşykdan alarys:

$$(\partial s / \partial T)_H = c_H / T, \quad (1.35)$$

bu ýerde: c_H – H meýdanyň hemişelik güýjenmesinde paramagnit maddanyň ýylylyk sygymy.

Magnit sistema üçin Makswelliň deňlemesini ulanyp,

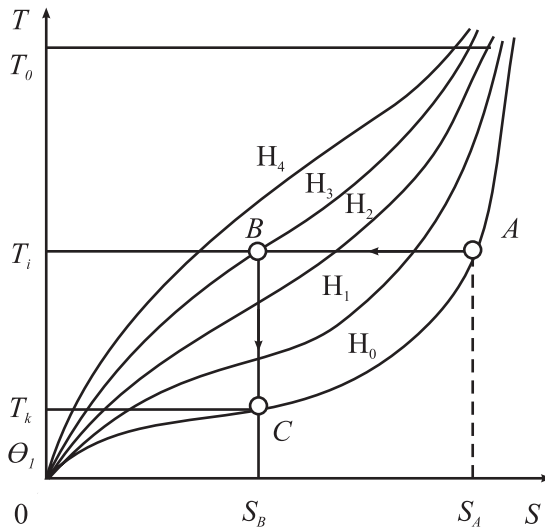
$$(\partial S/\partial H)_T = (\partial M/\partial T)_H \quad (1.36)$$

magnitokalori koeffisiýent üçin aşakdaky formulany alarys:

$$\alpha_M = (\partial T/\partial H)_S = - (T/c_H) (\partial M/\partial T)_H. \quad (1.37)$$

Bu deňleme termomehaniki sistemada $s = \text{const}$ proses üçin analogiki deňleme bilen meňzeşdir. Ol sowadylma prosesiniň differensial effektini häsiýetlendirýär. Umuman aýdylanda, eger effekt ýeterlik uly bolsa, islendik magnit jisimini (paramagnetik ýa-da ferromagnetik) sowadylma üçin ulanmak bolar.

Magnit sowadylma prinsipini paramagnit maddalar üçin TS diagrammanyň üsti bilen şekillendirmek bolar (1.12-nji surat); ($H_0, -H_4$) – hemişelik güýjenme çyzyklary).



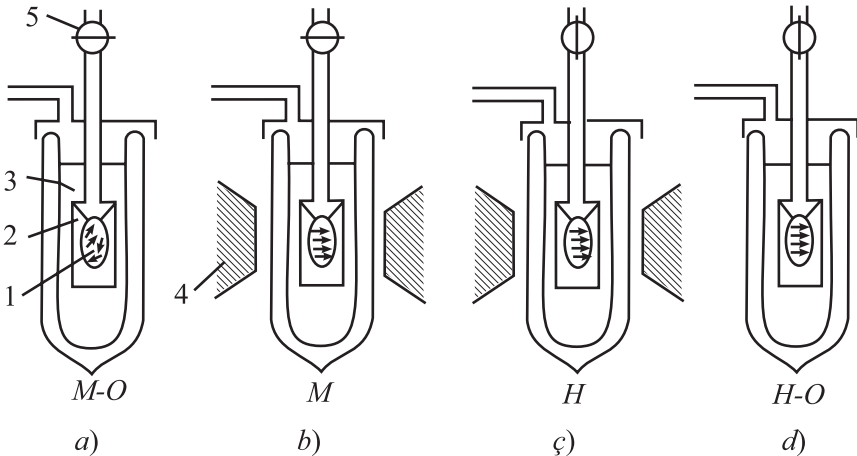
1.12-nji surat. T - S diagrammada magnit sowadylma hadysasy

Magnit sowadylma iki tapgyrdan durýar: A - B proses – hemişelik T_b başlangyç temperaturada $H_0 = 0$ -dan H_3 çenli izotermiki magnitlenme we B - C izoentropiki magnitsizlenme, onuň netijesinde $S_B = \text{const}$ -da meýdanyň güýjenmesi H_3 -den $H_0 = 0$ çenli kemelýär we temperatura T_K çenli peselýär. Paramagnit maddalaryň izotermiki magnitlenmesinde (A - B proses) magnit dipollary meýdana parallel

ugrugýarlar, entropiýa S_A -den S_B çenli peselip, daşky gurşawa $q = T_H (S_A - S_B)$ ýylylygy bermek bilen alnyp barylýar. Termomehaniki sistema üçin bu prosesiniň analogy gazyň izotermiki gysylmasy bolup durýar. $B-C$ adiabat magnitsizlenmede hemişelik entropiýada temperatura T_K çenli peselýär. Bu prosesiniň analogy – detanderde gazyň giňelmesidir.

Adiabat magnitsizlenme usulyny, köplenç, 1-den 0,001 K çenli interwalda pes temperatura almak üçin ulanylýar. Bu usulyň ulanylyşynyň ýokary araçägi T_0 temperatura bilen kesgitlenilýär. Ondan ýokarda ýylylyk yrgyldylary örän intensiwdir we sistemany daşky magnit meýdanynyň täsiri bilen tertipleşdirip bolmaýar. Aşaky araçäge bölejikleriň özara täsir energiýasy olaryň ýylylyk energiýasy bilen deňleşýän temperaturasy bilen kesgitlenýär. Şunlukda, tertipleşme ýagdaýyna daşky magnit meýdanyny goýmazdan öz-özünden ýetip bolýar.

1.13-nji suratda adiabat magnitsizlenme hadysasynyň tapgyrlary görkezilen.



1.13-nji surat. Adiabat magnitsizlenme hadysasynyň shemasy:

- a – sowadyлма; b – magnitlenme; ç – ýylylyk çalşyjy gazy sorup almak;*
- d – magnitsizlenme; 1 – nusgalyk; 2 – konteyner; 3 – suwuk gelili;*
- 4 – magnit; 5 – wentil*

Paramagnit maddanyň (1) nusgalygy suwuk gelili (3) wannada oturdylan (2) konteýnerde ýerleşdirilen. Ilki bilen, nusgalygyň sowa-

dylmasy bolup geçýär; şunlukda, konteýner suwuklyk bilen paramagnitiň arasynda ýylylyk geçirijilerine ýardam berýän gaz görnüşli geliý bilen doldurylan; suwuk geliý wannada, adatça, $T_H \approx 1\text{K}$ çenli wakuumirlenýär. Ondan soň nusgalyk $T_H = \text{const}$ -da magnitlenýär, magnitlenme ýylylygy suwuk gelä geçirilýär. Ondan soň adiabat şertlerini döretmek üçin (2) konteýnerden ýylylyk çalşygy gaz sorulyp aýrylýar. Soňra magnit meýdany aýrylýar ($H = 0$), nusgalyk magnitsizlenýär we temperatura T_K çenli peselýär.

(1.37) formuladan temperaturanyň ahyrky üýtgemesini kesgitlemek üçin paramagnit maddalaryň halynyň deňlemesini $f(T, H, M)$ ulanmak zerurdyr. Magnitsizlenmede temperaturanyň üýtgemesini kesgitlemek üçin magnit ýylylyk sygymynyň C_H temperatura we meýdanyň güýjenmesine baglanyşygy bilmek zerurdyr.

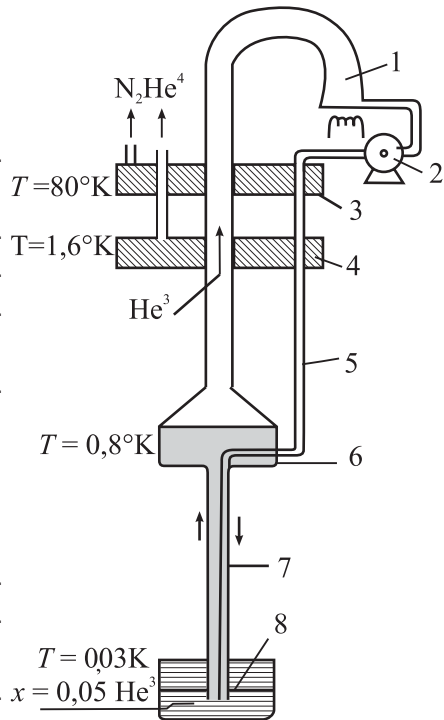
Paramagnitlere demirammoniy, hromkaliý görnüşindäki paramagnit duzlar; sulfatlar (mis – kalili, kobaltammonili, gadoliniý) we ş.m. ulanylýar. Her bir paramagnit duzlar, ulanylmasy has effektiv bolan, çäklenen temperatura interwalyna eýedir. Bu interwalyň çägi magnit ýylylyk sygymy iň ýokary temperatura baglydyr, şeýle hem ol magnit ionlarynyň özara täsir energiýasy bilen olaryň ýylylyk energiýasynyň gatnaşygyndan kesgitlenýär. Has giň ýaýran duzlar oňat öwrenilendir, olar üçin entropiýa, entalpiýa we ýylylyk sygymy boýunça maglumatlar doly mälimdir.

§ 1.13. He³ we He⁴-ň häsiýetlerine esaslanan usul bilen aşa pes temperaturalary almak

1951-nji ýylda G.London suwuk He³ we He⁴-ň ereme hadysasy sowadylma effekti bilen alnyp barylmaladygy baradaky pikir ýöretmesini öňe sürýär. Bu pikir ýöretme geljekde ylmy barlag işlerinde synagdan geçip, kriogen laboratoriyalarynda işleýän refrizeratorlaryň işleýiş prinsipiniň esasy düzýär. Bu usul özüniň ýönekeýligi, sowadylma prosesini dowamly üpjün edip bilmegi bilen, şeýle hem adiabat magnitsizlendirme usuly bilen deňeşdirilende özüniň ýokary sowuklyk öndürilijiligi bilen tapawutlanýar. He³ we He⁴-ň eremeginde alynýan sowadylma effekti suwuk He³ we He⁴-ň gowşak er-

gininiň molýar ýylylyk sygymalarynyň we entropiýalarynyň örän uly tapawudy bolany sebäpli ýüze çykýar.

Arassa suwuk He^3 tertipli gurluşa we kiçi entropiýa eýedir, emma $\text{He}^3 - \text{He}^4$ -ň garyndysynyň häsiýetleri başgaçadyr. Suwuk He^4 -ň aýratynlygy, ol hem aşa akyjylygy we $T < 0,5 \text{ K}$ -de entropiýanyň nola golaý bahasynda ol gidrodinamiki we termiki taýdan inertiliginde we $\text{He}^3 - \text{He}^4$ erginde özüni He^3 -ň atomlary üçin bary-ýogy «goldaw beriji» ýagdaý hökmünde alyp barýanlygyndadyr. He^3 we He^4 -ň gowşak garyndysyna özara täsirleşmeýän He^3 -ň atomlaryndan durýan ideal gaz hökmünde garmak bolar; ideal gazyň $3/2R$ ýylylyk sygymy, şeýle hem onuň entropiýasy uludyr. Şeýlelik bilen, He^3 we He^4 eremegi sistemasynyň tertiplilik ýagdaýynyň üýtgemegine getirýär. Bu proses suwuklygyň bugarmasynyň adaty prosesine meňzeşdir we ol arassa suwuk He^3 fazadan onuň gowşak konsentrasiýaly fazasyna geçiş halında ýylylygy kabul etmegi bilen alnyp barylýar. Geçişin bu ýylylygy örän uludyr we ony aşa pes temperaturalar ulgamynda sowadylma üçin ulanylýar. He^3 bilen baýlaşdyrylan faza suwuklygyň roluny oýnaýar, He^4 bilen baýlaşdyrylan faza bolsa buguň roluny oýnaýar; erginiň osmotiki basyşy buguň basyşyna ekwiwalentdir.



1.14-nji surat. Suwuk He^3 we He^4 -i eretmek usuly bilen sowadylma hadysasynyň shemasy

Eger He^3 we He^4 adiabat şertlerde eredilse, onda bu proses temperaturalaryň peselmegi bilen alnyp barlar.

Geliniň atomlarynyň bir suwuk fazadan beýleki suwuk faza geçmekligini ýarymgeçiriji berkitmäniň üsti bilen amala aşyrmak mümkindir, ýöne fazalaýyn separasiýanyň tebigy – spontan pro-

sesi has effektiw hasaplanylýar. $T < 0,8^\circ\text{K}$ temperaturada He^3 we He^4 -ň suwuk garyndysynda fazalaryň öz-özünden bölünmesi ýüze çykarylýar; He^3 – bilen baýlaşdyrylan faza ýokarda, He^4 bilen baýlaşdyrylan faza bolsa aşakda ýerleşýär. He^3 atomlaryň bu iki fazalaryň araçäginden geçmegi, ereme prosesindäki ýylylygy kabul etmek bilen alnyp barylýar. Üznüksiz sowadylma prosesini amala aşyran gurluşyň esasy shemasy 1.14-nji suratda görkezilen.

Ýokary konsentrasıýaly ($x \approx 100\%$) gaz görnüşli He^3 diffuzion wakuum – nasosyň (1) we rotasion (2) nasosyň kömegi bilen sorulyp alynýar we 50–60 mm sim. süt. basyşy bilen göni akyma tarap iteklenýär. Suwuk azotly (3) wannadan we $T = 1,6\text{ K}$ temperaturaly suwuk He^4 -li (4) wannadan geçip, He^3 sowadylýar, kondensirlenýär we (5) kapillýar boýunça akýar. Ol ýerde onuň basyşy mese-mälim pese düşýär. Soňra suwuk He^3 bugardyjy (6) wannada (7) ýylylyk çalşyjyda sowaýar we 8 wannanyň ýokarky bölegine düşýär. (8) wannanyň aşaky böleginde baýlaşdyrylan He^4 ýerleşýär; He^3 akymy He^4 -de ereýär. He^3 -ň aşaky faza geçmegi ýylylygy kabul etmek bilen alnyp barylýar, şunlukda, sowadylma bolup geçýär. (8) wannadan He^3 diffuziýa ýoly bilen (7) kapillýar boýunça (6) bugardyjy wanna ugrukdyrylýar, bu ýerde $5 \cdot 10^{-3}$ mm sim.süt. basyşda bugaryp, wakuum nasoslar bilen sorulyp alynýar, şeýlelik bilen, doly bir gaýtalanma amala aşyrylýar. Konsentirlenen He^3 -ň we He^4 -ň gowşak ergininiň döremegine getirýän fazalaryň bölünme prosesi temperaturanyň $\sim 0,8\text{K}$ ýetmeginde (8) wannada başlanýar. Aşaky fazada He^3 -ň konsentrasıýasy $\sim 5\%$ düzýär. He^3 -ň atomlarynyň ýokarky suwuk fazadan aşaka geçmegi bugarma meňzeşdir, şonuň üçin izotermiki geçiş prosesindäki ýylylyk aşakdaky formula bilen hasaplanylýar:

$$q = T(S_1 - S_2), \quad (1.38)$$

bu ýerde:

S_1 – He^3 ergin fazasyndaky entropiýa;

S_2 – eremäge gelýän suwuk He^3 -ň entropiýasy.

W. Peşkowyň getirip çykaran hasaplamalaryna görä: arassa suwuk He^3 üçin ($T < 0,1^\circ\text{K}$ -de) entropiýa $S_2 = 24 T \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{grad})$; He^3 -ň 5% ergini üçin ($T < 0,04\text{K}$) entropiýa $S_1 = 124 T \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{grad})$; onda (1.38) formula boýunça geçiş ýylylygy

$$q = 100T^2 \text{ J/mol.}$$

Ýitgini hasaba almazdan desganyň sowuklyk öndürjiligi:

$$Q = qVWt,$$

bu ýerde: V mol/s – sistemada sirkulirlenýän He³-ň mukdary.

Häzirki döwürde bar bolan bu hili desgalar 0,008°K çenli pes temperaturalary almaga mümkinçilik berýärler. Bu usulyň gelejegi uludyr we ol aşa pes temperaturalary tehniki maksatlar üçin ulanmaga mümkinçilik berýär.

§ 1.14. Sowadylmanyň dürli hadysalary

Seredilen hadysalar bilen bir hatarda dürli gurşawlary we dürli effektlere ulanmaklyga esaslanan birnäçe beýleki hadysalar bardyr.

Islendik sowadylma hadysasy ulanylanda käbir hallaryň X parametriniň hasabyna entropiýasyny ep-esli üýtgedip bolýan termodinamiki sistemanyň bolmagy zerur şertleriň biridir:

$$S = f(T, X). \quad (1.39)$$

Şeýlelikde, termomehaniki sistema üçin X – bu P basyşdyr, magnit sistema üçin – H meýdanynyň güýjenmesi, ereme refrižeratory üçin erginiň konsentrasiýasy x (himiki potensial μ), termoelektriki sistema üçin geçirijilerde elektronlaryň dykzlygy (Fermi-Gaaza) we ş.m.

Entropiýanyň üýtgemegi Q ýylylygyň siňdirilmegini, ýagny sowuklyk öndürjiligi üpjün edýär. Umumy ýagdaýda öwrülişikli proses üçin $dQ = TdS$; izotermiki proses üçin ($T = \text{const}$)

$$Q = T\Delta S, \quad (1.40)$$

bu ýerde:

$\Delta S = S_{\text{tz}} - S_{\text{ti}}$ (S_{tz} – işçi sredanyň tertipsiz ýagdaýyna degişli bolan, entropiýanyň ýokary bahasy);

S_{ti} – tertiplenen ýagdaýyna degişli bolan entropiýanyň pes bahasy.

Şoňa görä suwuklyk bugaranda buguň entropiýasy (S_{tz}) suwuklygyň entropiýasyndan (S_{ti}) ep-esli köpdür. Paramagnetikler üçin $\Delta S = f(\Delta H)$ ep-esli üýtgeýär. Eremek refrižeratorynda $3H_e$ ergin üçin entropiýa arassa suwuklyga garanynda örän ýokarydyr. Adsorbirlenen gaz üçin entropiýa desorbirlenen gaza garanynda köp derejede azdyr.

Şeýlelikde, umumylaşdyrylan X güýçleriň sistema täsiri netijesinde (mikrobölejikleriň tertipleşmedik-tertipleşen ýagdaýy) entropiýanyň üýtgemesi ýüze çykýan dürli termodinamiki sistemada sowadylma prosesiniň amala aşyrylmasy mümkindir. Ýokarda seredilen, heniz ulanylyş tejribesinde orun tapmadyk käbir sistemalara aşakda gysgajyk seredip geçeris.

Elektrokaloriki (EK) sowadylma effekti. Bu sowadylma prosesi ozalky seredilen magnitakaloriki sowadylma efektine meňzeşdir. EK sistemada işçi gurşaw bolup, sengetoelektrik diýip atlandyrylýan p -dipol elektrik momentiniň elektrik meýdanynyň E güýjemesinden bagly bolan dielektrikler topary hyzmat edýär. Bu hili sistema üçin T - S diagramma 1–12-nji suratda berlen H – magnit meýdanynyň güýjenmesiniň ornuna elektrik meýdanynyň E guýjenmesi şekillendiriler. Berlen ýagdaýda umumylaşdyrylan güýçleriň X funksiýasyny ýerine ýetirýän, goýlan elektrik meýdanynyň E güýjenmesine baglylykda öz ugruny üýtgetmäge ukyply bolan mikroderejede işçi sreda bolup elektrik dipollary (ionlary) hyzmat edýär.

Termodinamikanyň birinji kanunyna laýyklykda dielektrik üçin:

$$du = Tds + EdP. \quad (1.41)$$

Bu ýerden adiabat prosesde elektrokaloriki koeffisiýent üçin aşakdaky aňlatmany alarys:

$$\alpha_E = \left(\frac{\partial T}{\partial E} \right)_S = - \left(\frac{T}{C_E} \right) \cdot \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_E, \quad (1.42)$$

bu ýerde: $E = \text{const}$ ýagdaýynda C_E ýylylyk sygymy.

Bu hili sistemada sowadylma prosesini E güýjenmeli meýdany goýmak ýoly bilen segnetoelektigi izotermiki polýarizirläp, ýylylygy alyp gitmek bilen amala aşyrylýar. Netijede, entropiýa kemelýär we E güýjenmäniň soňraky kemelmegi ΔT temperaturanyň peselmegini kesgitleýär. Bu usulyň artykmaçlygy elektrik meýdanyny döretmegiň tehniki taýdan mümkinligindedir; bu effekt temperaturalaryň 0-dan 300 K aralygyndaky giň interwalynda amala aşyrylyp bilner. Effektiň maksimumy Kýuriniň nokadynyň golaýynda ýerleşýär, şunlukda, KH_2PO_4 üçin $T_{\text{kýuri}} = 122 \text{ K}$. Ýöne ΔT kiçidir we ol 0–4MB/m interwa-

lynda E – güýjenmäniň üýtgemesinde 0,5–1K-den ýokary artmaýar. Köp halatlarda bu hili sistemalar effektiv bolup bilerler.

Termomagnit sowadylma. Bu usul Etingsshauzeniň (1886 ý.) efektine esaslanandyr we ol aşakdaky ýaly amala aşyrylýar. Magnitiň polýuslarynyň ugrunda ýarymgeçiriji steržen ýerleşdirilýär, onuň gapdal taraplaryndan elektrik togy goýberilýär. Elektrik we magnit meýdanlarynyň özara täsiri steržende toguň we magnit meýdanynyň ugruna perpendikulýar wertikal okunuň ugry boýunça temperaturalar tapawudynyň ýüze çykmagyna getirýär. Sterženiň aşaky granynda Q_x ýylylygy özüne kabul etmek bilen, elektron-deşik parasy ýüze çykýar, ýokarky granynda Q_o ýylylygy bölüp çykarmak bilen paralaryň rekombinasiýasy bolup geçýär. Bu hili sistema üçin iň oňat material wismut-surma (30% Sb) bolup durýar; sowadylma effekti 10K we ondan ýokary bahalary düzýär.

Aşageçirijileriň magnitlenmesi. Metalyň kadaly ýagdaýdan aşageçirijilik ýagdaýa geçmegi entropiýanyň kemelmesi bilen alnyp barylýar, çünki bu ýagdaýda elektron struktura tertipleşýär. Bu ýerden görnüşi ýaly, ters prosesde tertipleşme pese düşse, ýylylygyň siňdirilmesine (kabul edilmesine) getirjekdigi mese-mälimdir.

Bu hili sistemany aşakdaky ýaly amala aşyryp boljak sowadylma üçin ulanmak bolar. Berlen nusgalyk materialy aşageçirijilik ýagdaýyna geçiş T_{as} tempraturadan pes bolan T_p temperatura çenli öňürti sowadýarlar. Ondan soň nusgalyk materialy izolirleýärler we ony kadaly ýagdaýda izoentropiki geçişine getirýän H güýjenmeli daşky magnit meýdanynda ýerleşdirýärler. Nusgalyk materialyň öz massasyndan ýylylyk siňdirilýänligi üçin, ol $\Delta T = T_p - T_k$ ululykça sowadylýar.

Bu usul $T < T_{as}$ ýagdaýynda, ýagny 0–20 K interwalynda amala aşyrylýar; ýöne bu temperaturalarda gaty jisimleriň ýylylyk sygymy örän pes bolany üçin onuň netijeliligi pesdir.

Mehanokaloriki effekt. Suwuk H_e II häsiýetleri seljerilende mehanokaloriki effekt onuň özüni alyp barşyny suwuklykda kadaly we aşa akyjy komponentiň barlygyny göz önünde tutýan «iki suwuklykly» modeli ulanmak bilen ýokary hilli we örän oňat düşündirmek bolýar. Aşa akyjy komponent şepbeşikligi bolmansoň, H_e II-li iki

göwrümi birikdiriji inçejik kapillýardan erkin geçýär. Şol bir wagtyň özünde şepbeşik kadaly düzüji, hamala süzülip galýan kimin, kapillýardan geçmeýär. Netijede, H_e II-niň iki suwuklyga bölünmesi bolup geçýär: biri aşa akyjy düzüja baýdyr, beýlekisi kadaly.

Aşa akyjy komponentiň entropiýasy nola deň bolany üçin şepbeşik kadaly düzüjini goýbermeýän inçe kapillýar «entropiýa süzgüji» ýaly hereket etmeli. Netijede, süzgüçden geçen aşa akyjy düzüjiniň entropiýasynyň nola ýakynlygy bilen şertlendirilen, süzgüçden soň temperaturanyň peselmegi bolup geçýär. Bu effekt ilkinji gezek P.Kapisa tarapyndan ýüze çykarylýar we tejribede doly tassyklanýar.

Garyşdyrma bilen sowadylma. Garyşdyrylmanyň ýylylyk effektini hem sowadylma üçin ulanmak bolar. Ozal bu hili usul kwant suwuklyklarynyň 3H_e – 4H_e garyndysyna ulanylyp seredilipdi. Garyşma prosesi öwrülişiksizdir, şonuň üçin garyndynyň entropiýasy aýratyn komponentleriň entropiýasynyň jeminden köpdür. Şeýlelikde, ideal gazynyň komponentleri garyşanda entropiýanyň goşmaça artmasy (garyşma entropiýasy):

$$\Delta S_{gar} = -R \sum (x_i \cdot \ln x_i), \quad (1.43)$$

bu ýerde: x_i – i komponentiň konsentrasiýasy.

Berlen ýagdaýda konsentrasiýa, sistemanyň entropiýasynyň üýtgemesine getirýän umumylaşdyrylan güýç bolup durýar. Izotermiki şertde garyşma ýylylygy siňdirilmä getirýär, adiabatik şertde temperaturanyň peselmegine getirýär. Garyşma prosesine gazlar, suwuklyklar we gaty jisimler gatnaşyp bilýärler. Garyşdyrylma bilen sowadylmanyň klassyky mysaly hem nahar duzy bilen buzuň garyşmasynda temperaturanyň peselmegidir. Duzuň buz bilen garyşmagy we 21% NaCl düzýän garyndynyň emele gelmegi, temperaturanyň 273 den 252 K çenli peselmegine getirýär. Garyşma prosesiniň öwrülişiksizligini we komponentleri başlangyç ýagdaýa gaýtaryp getirmekde garyndyny gaýtadan bölmekligiň zerurlygyny hasaba almak bilen, bu usulyň ýokary netijeliligine bil baglamak kyndyr. Şol bir wagtyň özünde birnäçe ýagdaýlar üçin, meselem, bir wagtlaýyn sowadylmada, bu usul ýeterlik tygşytly hem-de maksadalaýyk bolup biler. Hasaplamalaryň görkezşişine görä, kritiki parametrleri örän uly tapawutlanýan gazlaryň garyşmasynda has

uly sowadyлма effektini almak bolýar. Meselem, metan-geliý garyndysy üçin $T=200$ K temperaturada we $P \approx 10$ MPa basyşda temperaturanyň peselmesi $\Delta T = 50$ K. Prosesiň PTK-si 50%.

Maýyşgak sredanyň deformasiýasy. Maýyşgak deformasiýa (gysylma-süýnme) dolanyşykly prosesdir, bu hem sowadylmada ulanmak bolýan prosesdir. Termodinamikanyň esasy deňlemesini maýyşgak steržen üçin aşakdaky görnüşde aňlatmak bolar:

$$TdS = du - \psi dl, \quad (1.44)$$

bu ýerde:

ψ – steržene täsir edýän güýç;

l – çyzykly ölçeg.

Termodinamikanyň umumy gatnaşyklaryny bu hili sistema ulanmak bilen, onuň entropiýasyny, energiýasyny we beýleki häsiýetnamalaryny, şeýle hem adiabatik deformasiýada temperaturanyň ahyrky üýtgemesini hasaplamak bolar:

$$\Delta T = -\alpha T_{or} \sigma / (c\rho), \quad (1.45)$$

bu ýerde:

α – sterženiň materialynyň uzynlygyna giňelmesiniň temperatura koeffisiýenti;

T_{or} – ortaça temperatura;

σ – naprýaženiýe;

ρ – dykzlyk.

T , c we ρ položitel ululyklar bolanlary üçin, ΔT -ň alamaty σ bilen α -ň alamaty boýunça kesgitlenýär. Naprýaženiýe süýnmede položitel, gysylanda bolsa otrisateldir.

Adatça, $\alpha > 0$, we diňe rezin üçin $\alpha < 0$.

Bu, adatça, izotermiki deformasiýada ösýän entropiýa hem degişlidir, rezin barada aýdylanda bolsa süýnende uzyn molekulýar zynjyry tertiplenýänligi üçin ol kemelýär. Şeýlelik bilen, metal sterženler süýnende sowaýarlar, rezin bolsa gyzýar. Metallarda bu effekt uly däldir. Şeýlelikde, polat üçin $\sigma = 200$ MPa basyşda $\Delta T = 0,16$ K, rezin üçin $\Delta T = 8$ K ýetýär.

Ikinji bap **Pes temperaturalary ulanmak**

§ 2.1. Sowadylmanyň temperatura ulgamlary

Emeli sowuklyk adaty ýaşaýyş durmuşynda, senagatda, harby tehnikada, ylmy-barlag işlerinde giňden ulanylýar. Soňky ýyllaryň içinde emeli sowuklygyň adaty ulanylyş çägi düýpli giňemek bilen, 4-20K aralykda has pes temperaturalarynyň täze tehniki ulanylyş çägi ýüze çykyp başlady. Şoňa laýyklykda sowadyjy tehnikasynyň täze maşynlarynyň we enjamlarynyň taýýarlanyşynda senagatda uly ösüşler gazanylýar.

-100°C (173 K) temperaturany almak aram sowadylma tehnika-syna degişli bolup durýar.

170–70K temperatura çägi çuň sowadylma tehnikasyna degişlidir.

Ondan hem pes 70–0,3 K temperaturalaryň çägi we olaryň ulanylyş çygry «Kriogen tehnikasy» diýip atlandyrylýan bu kitabyň mazmunyny düzýär. Has pes (0,0008 K) temperaturalary almaklyk magnit sowadylma – paramagnit duzlaryny adiabatik magnitsizlendirme hem-de ýadro sowadylma usullaryny ulanmak bilen amala aşyrylýar. Ylmy-tehnikanyň güýçli depgin bilen ösýän ýyllary bolan häzirkki döwürde suwuk He³-iň suwuk He⁴-de eredilmegi bilen pes temperaturalary (0,01–0,02 K) almak usuly aýratyn gyzyklanma döredýär.

1945-nji ýyla çenli 70 K-den pes bolan temperatura derejesi örän seýrek ulanylýardy. Wodorody, neony, gelini suwuklandyrmak bilen alynýan pes temperaturalar dünýäde bar bolan (örän az) laboratoriyalarda diňe ylmy barlag işleri üçin ulanýardylar.

Raketa tehnikasynyň ösmegi bilen, kosmiki barlaglaryň meýilnamalarynyň ýerine ýetirilmegi kriogen tehnikasynyň ösmegine itergi berdi hem-de senagatyň täze bir pudagynyň ulgamyna öwrüldi.

§ 2.2. *Aram sowadyлма tehnikasy*

Aram sowadyлма tehnikasynda pes temperaturalary almak kritiki temperaturasy daşky gurşawyň adaty temperaturasyndan ýokary bolan sowadyjy jisimleri ulanmak bilen amala aşyrylýar. Ammiagyň kritiki temperaturasy 132°C-e, kömürturşy gazynyňky 31°C, freon 12-ňki 112°C, freon 22-ňki 96°C deňdir; olaryň suwuklandyrylmasy suwy ýa-da howany ulanmak bilen položitel temperaturada kondensasiýa ýylylygyny aýyrmak bilen amala aşyrylýar. Bu ýagdaý aram sowuklyk tehnikasynyň çuň sowuklyk tehnikasyndan düýpli tapawudyny kesgitleýär. Sowuklyk häzirki zaman ýaşaýyş şertleriniň aýrylmaz elementleriniň biri bolup durýar. Uly şäherlerde häzirki zaman ýaşaýyş durmuşynda, azyk senagatynda (et, süýt, balyk we ş.m.) we söwdada dürli kuwwatly sowadyjy agregatsyz durmuşy göz önüne getirmek mümkin däldir.

Aram sowadyлма tehnikasynda iri kompression gurluşlaryň sagatdaky sowuklyk öndürijiligi $-10\div-20^{\circ}\text{C}$ bugarma temperatura-synda ýüz müňden birnäçe million kilojoula (kJ) ýetýär. Bu sowadyjy gurluşlar ummasyz mukdardaky azyk önümleriniň ýokary hilli saklanmagyny üpjün edýär.

Aram sowadylmanyň kömegi bilen önümçilik we ýaşaýyş jaýlarynda howany kondisionirmek amala aşyrylýar. Aram sowadyлма hlory suwuklandyrmak, uçujy eredijileriň bugunyň rekupe-rasiýasy, koks gazyndan benzoly aýyrmak, garyndydan duzlaryň kristallizasiýasy, gazlaryň degidratasiýasy we olary CO_2 -den hem-de kükürtli birleşmelerden arassalamak, ylmy, hususan-da, biologik barlaglarda himiki reaksiýalaryň tizligini sazlamak we ş.m. üçin ulanylýar.

Sporty ösdürmek maksady bilen emeli buzly typançaklary döretmekde hem aram sowadyлма ulanmak talap edilýär.

Tomus aýlarynda buz öndürmekde sowadyjy maşynlary ulanmak meselesine aýratyn üns berilýär.

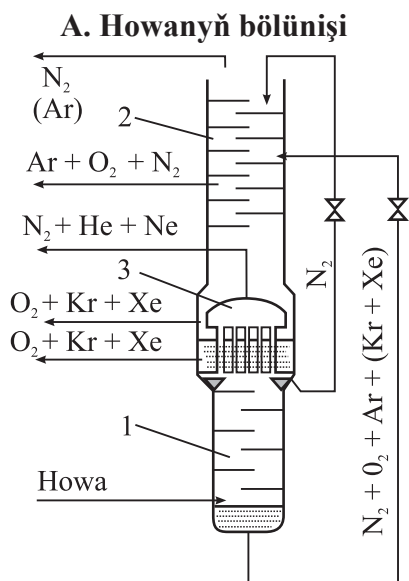
§ 2.3. Çuň sowadyлма tehnikasy

Çuň sowadyлма tehnikasy eýýäm öňräkden bári uly senagat ähmiýetine eýedir. Bu pes temperaturaly ulgamda sowadyjy agent bolup metan, kislorod, argon, azot hyzmat edýär. Çuň sowadyлма tehnikasy iki ugur boýunça giňden ulanylýar:

1) arassa gazlary almak maksady bilen (O_2 , N_2 , Ar, Kr, Xe, He, Ne, H_2 , C_2H_4 we başgalar) fraksionirlenen kondensasiýa, deflegmasiýa, rektifikasiýa ýa-da talap edilýän düzümiň (H_2-N_2 we başgalar) fraksiýa usullaryny ulanyp, howanyň, koks gazynyň, nebit gazynyň, geliý göteriji tebigy gazyň gaz garyndylaryny bölmek üçin;

2) suwuklandyrylan gazlary almak üçin: CH_4 , O_2 , N_2 , Ar, F.

§ 2.4. Gaz garyndylarynyň bölünişi



2.1-nji surat. Inert gazyny saýlamak üçin howanyň ikeldilen rektifikasiýa apparatynyň shemasy: 1 – ýokary basyşly kolonna; 2 – pes basyşly kolonna; 3 – kondensator-bugardyjy

Çuň sowadyлма usuly bilen howany bölmek tehnikasy möhüm senagat ähmiýete eýe boldy. Bu usul bilen gaz görnüşli kislorod, azot, şeýle hem (seýrek) inert gazlary bolan geliý, neon, argon, ksenon, kripton gazlaryny almak bolýar.

2.1-nji tablisada howanyň düzümi we komponentleriň düzüjileriniň (atmosfera basyşynda) kadaly gaýnama temperaturalary getirilen.

Agrondan başga inert gazlarynyň mukdary azdyr; meselem, 1000 m^3 howada $9,43\text{ m}^3$ argon, $18,18\text{ l}$ neon, $5,24\text{ l}$ geliý, $1,4\text{ l}$ kripton we 86 sm^3 ksenon saklanýar. Howa bölüji kolonnalarda tehniki ($99,5-99,7\%$ O_2) ýa-da teh-

nologik (95% O₂) kislorody, şeýle hem azody we argony almak bilen üçeldilen O₂-Ar-N₂ garyndyny rektifikasiýa prosesi bolup geçýär (2.1-nji surat).

Soňky ýyllarda gara we reňkli metallurgiýada tehnologik prosesleri has tizleşdirmek üçin himiýa senagatynda, gaty ýangyjyň gazifikasiýa tehnikasynyda, sintetiki ýangyjy almakda, gaty gatlagy gazoplazmalaýyn burawlamak üçin kislorod bilen doýrulan (30–40% O₂) kislorodyň we howanyň ulanylyş problemlaryna aýratyn gyzyklanma döreýar. Bu bolsa tehnologik we tehniki kislorodyň iri, köp tonnažly önümçiligini ýola goýmaklygy talap edýär. Kislorody iň kop sarp ediji (umumy önümiň 70%-den gowragy) gara metallurgiýadyr. Ferrosilisiýany we ferromarganesi eretmek üçin kislorod bilen baýlaşdyrylan howany ulanmak domna peçleriniň öndürjiliginini takmynan 15–20%-e çenli artdyrýar, kislorod bilen doýrulan howa tebigy gaz bilen bilelikde ulanylanda peçleriň öndürjiliginini 25%-e çenli artdyrýar. Tehniki kislorody ulanmak azodyň iň az mukdary bilen häsiýetlendirilýän polat öndürmegiň konwertor usulynyň ähmiýetini artdyrýar. Polat eretmegiň kislorod-konwertor usuly örän ýokary depgin bilen ösýär.

2.1-nji tablisa

Howanyň düzümi

Gaz	Konsentrasiýa,%		Gaýnama temperaturasy (p = 760 mm.sim.süt), K
	göwrümleýin	massalaýyn	
Kislorod	20,946	23,139	90,18
Azot	78,084	75,521	77,36
Argon	0,934	1,288	87,27
Neon	$1,818 \cdot 10^{-3}$	$1,267 \cdot 10^{-3}$	27,09
Geliý	$5,239 \cdot 10^{-4}$	$0,724 \cdot 10^{-4}$	4,21
Kripton	$1,14 \cdot 10^{-4}$	$3,29 \cdot 10^{-4}$	119,80
Ksenon	$0,86 \cdot 10^{-5}$	$0,39 \cdot 10^{-4}$	165,05

Tehnikanyň täze pudaklary: ýadro, raketa, metallurgiýanyň ýörite pudaklary, ýarymgeçiriji materiallaryň tehnologiýasy, kebşirlemek, ýagtylyk tehnikasy, kriogen tehnikasy seýrek (inert) gazlaryny ulanýarlar. Soňky ýyllarda neon sowadyjy agent hökmünde ulanylyp başlandy. 27,09 K gaýnama temperaturaly bu inert sowadyjy agent gaty O_2 ýa-da N_2 ulanmak bilen alynýan örän pes temperaturanyň we suwuk wodorodyň kadaly gaýnama temperaturasynyň (20,4 K) arasyndaky üzňeligi gysgaltmaga mümkinçilik berýär.

B. Tebigy geliýgöterişi gazlaryň bölünişi

Geliýgöterişi tebigy gazlar – bu çuň sowadylma usuly bilen senagatda gelini almagyň esasy çeşmesi bolup durýar. Geliniň (beýleki ulanylyş ulgamlaryndan başga) 0,3–15K interwalda pes temperaturalary almak üçin örän amatly sowadyjy agentdigini ýatlamak ýerliklidir. Geliýgöterişi tebigy gazlaryň (0,2–2% He) baý resurslary ABŞ-nyň günorta-gunbatar çäklerinde Kanzas, Oklahoma, Tehas, Nýu-Meksika, Ýuta, Arizona ştatlarynda jemlenendir.

Geliýgöterişi tebigy gazlar metan (60–80%), azot (20–25%), etan (2–3%), propan (1–2%), kömürturşy gazy (0,5–0,8%), wodorod (0,04–0,05%), geliý (0,2–2%), beýleki uglewodorodyň garyndylaryny: n-buton, izobutan, n-pentan; kükürtli birleşmeleri düzüminde saklaýarlar. Geliýgöterişi tebigy gaz agyr uglewodorodlardan, kükürtli birleşmelerden önürti arassalanyp we 3 MPa basyş astynda guradylandan soň, bölüji bloga düşýär, ol ýerde dürli temperatura derejelerinde (–160; –185°C) yzygider fraksionirlenen kondensasiýa usuly bilen etanyň, metanyň, azodyň fraksiýalaryny saýlaýarlar we netijede, geliý bilen doýrulan uçujy fraksiýany-80% H_c düzümlü çyg gelini, 18–20% N_2 , H_2 (0,1–0,15%) we uglewodorod (0,05–0,1%) garyndysyny alýarlar. Çyg gelini 20 MPa çenli gysýarlar we guradylandan soň çuň sowadylma bloguna ugradýarlar; gysylan çyg gelini sowuk azodly (–196%) turba şekilli enjamda sowadýarlar, bu bolsa azodyň esasy massasynyň kondensasiýasyna we beýleki gazlaryň garyndysynyň bölekleyin aýrylmasyna getirýär. Soňra gazy (98% He) wakuum astynda gaýnaýan suwuk azot bilen –206 ÷ 207°C çenli sowadýarlar, we geliniň arassalygyny 99,5%-e ýetirýärler. 20 MPa çenli gysylan geliniň N_2 , CH_4 , H_2 garyndylardan doly arassalanmasy suwuk azot

bilen sowadylýan aktiwirlenen kömürli adsorberlerde amala aşyrylýar. Adsorberlerden soň geliniň arassalygy 99,995%-e ýetýär.

1921-nji ýylda ABŞ-da geliniň öndürilişi $55 \cdot 10^3 \text{m}^3$ -dan ýokary galmaýardy. Raketa we atom tehnikasynyň, kosmiki barlaglaryň, aşagçirijilik ulgamynda geçirilýän işleriň ösmegi 1968-nji ýylda öndürilişi $26 \cdot 10^3 \text{m}^3$ barabar bolan geliniň sarp edilişini mese-mälim artdyrdy.

Ç. Koks gazynyň bölünişi

Koks gazy benzoldan, naftalinden, kükürtli wodoroddan arassalanandan soň 50-60% H_2 , 6–8% N_2 , 22–25% CH_4 , 2–5% CO , 1–2% C_2H_4 , 2–3% CO_2 we beýleki garyndylary özünde saklaýar. 1925–1927-nji ýyllarda Linde firmasy tarapyndan bu çylşyrymly gaz garyndysyny fraksionirlenen kondensasiýa usuly bilen bölmek üçin pes temperatura desgalary döredilipdi. Prosesiň esasy wezipesi ammiagyň sintezi üçin azot-wodorod garyndyny almak, organiki sintez üçin beýleki çäksiz uglewodorodlary we etileni saýlap almaktan durýar.

N_2 – H_2 garyndy NH_3 sinteziň kolonnasyna ugrukdyrylmazdan ozal uglerodyň okisiniň garyndysyndan doly arassalanmaly, bu meseläni garyndyny suwuk azot bilen ýuwmak usulyny ulanyp çözmek bolar.

D. Krekingiň gazlarynyň we nebitiň piroliziniň bölünişi

Çuň sowadyлма tehnikasynyň bu ulanylyş ulgamy organiki sintez senagaty üçin aýratyn gyzyklanma döredýär. Bu prosesiniň öňünde durýan esasy meseleleriň biri hem etileniň we propileniň çäksiz uglewodorodlaryny almak bilen baglydyr.

Başlangyç gaz garyndysy (H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8 we beýleki agyr uglewodorodlar) H_2O , H_2S , CO_2 , C_2H_2 birleşmelerden we agyr uglewodorodlardan öňürti (deslapky) boşadylýar. Soňra pes temperaturaly fraksionirlenen kondensasiýanyň kömegi bilen birnäçe fraksiýalar bölünýär: 1) metan-wodorodly (70% CH_4 , 25% H_2 , 2% C_2H_4); 2) etilenli (96–99% C_2H_4 , 1–4% C_2H_6); 3) etanly; 4) propilen-propanly (75–80% C_3H_6); 5) butilen-amilenli (75–80% C_4).

Aýratyn gazbölüji agregatlaryň goýberijilik ukyby başlangyç gazlaryň $35\,000 \text{m}^3/\text{s}$ ýetýär. Häzirki zaman gazbölüji desgalarda metan sowadyjy gaýtalanmasy ulanylýar, bu bolsa etileni saýlap almak koeffisiýentini 98%-e çenli artdyryýar.

§ 2.5. Gazlary suwuklandyrmak

A. Metany suwuklandyrmak

Metan ýokary kaloriýaly ýangyç bolmak bilen, ýaşaýyş durmuşynda, senagatda, şeýle hem motor ýangyjy hökmünde giňden ulanylýar.

Gaz üpjünçiligiň häzirki zaman masştabynda iň ýokary zerurlygy üpjün etmek üçin tebigy gazyň (esasan, metan) rezerwini döretmek meselesi örän çylşyrymlydyr; metanyň suwuk ýagdaýynda saklanmagy bilen, bu meseläniň has effektiv çözüdini gazanmak bolýar. Bu gymmatly ýangyjy özünüň tebigy gaz resurslary bolmadyk ýurtlara transport etmek meselesi hem çylşyrymly meseleleriň biri bolup durýar. Bu mesele tebigy gazy suwuklandyrmak (metanyň gaýnama temperaturasy – 161,3°C), saklamak hem-de suwuk metany ýörite tankerlerde transport etmek bilen üstünlikli çözülýär.

Tebigy gazyň dünýä boýunça gory 175 10¹² m³, olar ABŞ-da (22%), Afrikada, Gündogar ýurtlarynda we Latyn Amerikasy (40%), Ýewropa ýurtlarynda we Orta Aziýada (36%) jemlenendir.

Suwuklandyrylan tebigy gazyň uly mukdaryny deňiz we gury ýer boýunça transport etmek meselesi Kriogen tehnikasy boýunça halkara konferensiýalarynda we Halkara sowuklyk institutynyň bölümleriniň ýygnaclarynda zygider ara alyp maslahatlaşylýar.

B. Kislorodyň we azodyň suwuklandyrylmasy

Suwuk kislorody almak, saklamak we transportirmek häzirki zaman tehnikasynyň masştabynda örän uly gerime eýe bolýar. ABŞ-da dürli göwrümlü awtosisternalaryň kömegi bilen suwuk O₂, N₂, Ar paýlaýjy 500-den gowrak stansiýalar işleýär. 50 m³ iri göwrümlü we ondan hem uly sisternalar demir ýol platformalarynda ýerleşdirilýär we uzak aralyga ugradylýar. Bu hili sisternalar emele gelen bugy gaýtadan kondensirlär ýaly sowadyjy gurluşlar bilen üpjün edilýär, ýagny saklananda bugaran kislorod täzedan suwuklandyrylýar we sisterna akdyrylýar. Stasionar saklaýjylaryň göwrümi 250–750 m³ ýetýär.

Suwuk O₂-ň öndürilişiniň artdyrylmagy raketa tehnikasynyň talaplary bilen baglydyr.

Raketa tehnikasynda ulanylýan suwuk azodyň öndürilişine hem aýratyn üns berilýär. Suwuk azot neony, wodorody, gelini suwuklandyrmak üçin sowadyjy agent hökmünde, suwuk H_2 , H_e salnan gaplary ekranirlmek, wakuum tehnikasynda lowuşkalary sowatmak, şeýle hem Ne , H_2 , He -ni beýleki gazlaryň garyndysyndan (CO_2 , O_2 , N_2) adsorbsion usul bilen arassalamak üçin ulanylýar.

Suwuk azodyň biologiýada we lukmançylykda ulanylyşyna uly üns berilýär. Ol hirurgiýa operasiýalary ýerine ýetirilende gany konserwirlmekde, spermany transport etmekde we ş.m. ulanylýar. Suwuk azot azyk senagatynda käbir önümleri doňdurmak we uzak möhletde saklamak, kriohimiki tehnologiýada täze ugurlary ösdürmek üçin giňden ulanylýar. Kriohimiki tehnologiýada kadaly däl, ýokary işjeň maddalary (O_3 , erkin radikallar we beýlekiler) uzak möhletleýin saklamak tehnologiýasy, izomer önümleri (H_2O_4 we beýlekiler) almak reaksiýasy, talap edilýän önümleriň çykyşyny şol bada sowatmak bilen (ters reaksiýanyň öňüni almak üçin) artdyrmak, täze birleşmeleriň (hususan-da, ksenonyň we kriptoniň fluor bilen himiki birleşmesi we beýlekiler) sintezi täze ugurlar bolup, ylmy taýdan dünýä möçberinde örän uly ähmiýeti bardyr.

Öndürijiligi 1400 kg/sag bolan suwuk azot öndüriji desgalar döredilen we ulanylyş hem-de maýa goýum harajatlary boýunça ep-esli amatly bolan 2000–20000 kg/sag öndürijilikli desgalaryň taslamasy ýerine ýetirilýär.

§ 2.6. Kriogen tehnikasy

Has pes temperatura çäginini (70-0,3 K) bellemek üçin soňky ýyllarda tehnikada «Kriogenika» adalgasyndan giňden peýdalanylýar.

Raketa tehnikasynyň ösmegi, kosmiki barlaglaryň meýilnamasyny ýerine ýetirmek laboratoriyä çäginde daşyna çykan we industriýanyň täze ulgamyna öwürülen kriogen tehnikasynyň güýçli ösmegine itergi berdi. 1959-njy ýylda suwuk wodorodyň iri desgasynyň gurluşygyna başlandy we gysga wagtyň içinde ummasyz köp mukdarda suwuk wodorod (1 m^3 suwuk H_2 massasy 70 kg) önümçiligi ýola goýuldy.

Öndürijiligi bir gije-gündizde 30–60 tonna bolan H_2 suwuklandyryjylary işläp başlady. 1961–1968-nji ýyllarda ABŞ-da suwuk H_2 öndürilişi bir gije-gündizde 14 tonnadan 151 tonna ýetirildi. H_2 saklaýjy uly göwrümler döredildi; Newada ştatynda raketalaryň synaglary amala aşyrylýan (ABŞ) poligonda göwrümi 209 m^3 bolan suwuk H_2 saklaýjy göwrüm guruldy. Alýuminiden $378,5\text{ m}^3$ göwrümlü sferiki suwuk H_2 saklaýjy göwrüm döredildi. Partlama howply -253°C gaýnaýan suwuk wodorodyň uly mukdaryny almak, saklamak we transport etmek akyla sygmajak zatlardy, häzirkî döwürde suwuk wodorod raketanyň ýokary basgançaklarynda ýangyç hökmünde hem-de köpürjikli kamerada ulanylýar. Suwuk wodorody awiasiyada ýangyç hökmünde ulanmak meselesine hem uly üns berilýär.

Gelini suwuklandyrmak tehnikasy hem uly ösüş ýoluna düşýär. 1946-njy ýyla çenli dünýä boýunça bary-ýogy 15 laboratoriya gelini suwuklandyrmak boýunça işleýärdi, häzirkî döwürde dürli ýurtlarda müňden gowrak gelini suwuklandyryjylar işleýär. Artur D. Litl firmasy tarapyndan soňky ýyllar dürli öndürijilikli 300-den gowrak gelini suwuklandyryjylar döredildi, olara 500 l/sag öndürijilikli gelini suwuklandyryjy degişlidir. Linde firmasy (ABŞ) 650 l/sag we 720 l/sag öndürijiligi bolan gelini suwuklandyryjylary çykarýar. 1000 l/sag gelini suwuklandyryjylary işläp düzmegiň üstünde işlenilýär. Ýewropanyň, Ýaponiýanyň dürli firmalary $2\text{--}15\text{ K}$ temperatura derejesinde refrizatorlaryň we gelini suwuklandyryjylaryň dürli görnüşli nusgalaryny çykarýarlar. Esasan, häzirkî zaman ylmy we inžener meseleleri: edara edilýän termoyadro sintezi, ýokary energiýanyň sintezi, energiýany özgertmegiň magnitogidrodinamiki usuly, kosmonawtiki, elektronika $4\text{--}70\text{ K}$ derejede sowuklygy ulanmagy talap edýär.

§ 2.7. Deýteriy gazynyň alnyşy

Kriogen tehnikasynyň ulanylyşynyň möhüm ulgamlarynyň biri kadaly gaz görnüşli izotoplaryň pes temperaturalara bölünmesidir.

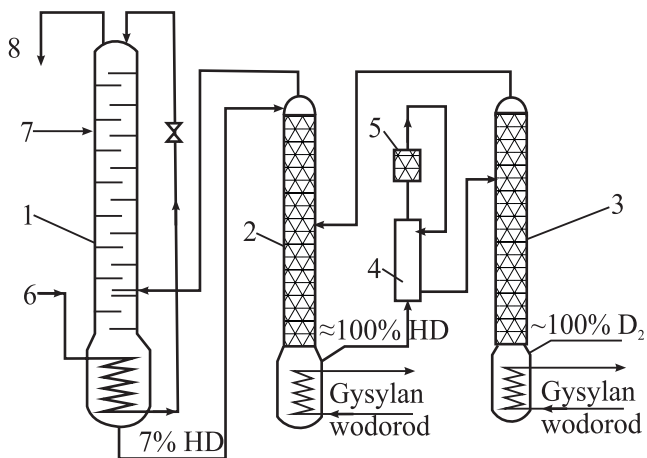
Neytronlary haýallandyryjylar ýadro reaktorlarynyň zerur elementleridir. In oňat haýallandyryjy D_2O agyr suwdur. Uglerodyň, berilliniň, suwuň we agyr suwuň haýallandyryjy koeffisiýentleri degişlilikde 169; 160; 67 we 5820 deňdir.

Atom massasy 1,008 bolan tebigy wodorod iki sany kadaly izotopyň garyndysyndan: massa sany 1 bolan H wodoroddan we massa sany 2 bolan D deýteriden durýar. Bu izotoplar wodorodda 6400:1 gatnaşykda saklanýarlar, ýagny başlangyç garyndynyň 10^6 atomyna deýteriniň 150 atomy düşýär. Hakykatdan wodorod H_2 we HD molekularyň garyndysyndan 3200:1 gatnaşyk bilen düzülýär.

Suwuk wodorody rektifikasiýa prosesinde deýteriy alynýar, ýagny (H_2 , HD) garyndyny D_2O agyr suwy almak maksady bilen H_2 we HD gaýnamak temperaturalary degişlilikde 20,38 we 22,13 K deňdirler. Kolonnada basyş 0,15 MPa bolanda bu garyndynyň bölünme faktory takmynan 1,505 deňdir, bu bolsa onuň ýeterlik takyk bölünmesi bilen deýteriniň 90% çykarylmasyny üpjün edýär. Başlangyç gazy (H_2) garyndylardan öňürti oňat arassalanyp berlende rektifikasion kolonnanyň üzüksiz iş dowamlylygy 8000 sag (1 ýyla golaý) ýetýär. Wodorod boýunça 1000 m^3 /sag öndürjiligi bolan desga kadada işlände arassalygy 99,8% bolan deýteriniň bir ýylda 1080 m^3 mukdaryny berýär.

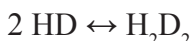
Rektifikasion kolonnada alnan HD konsentrasiýa soňraky ýakylmasy we (H_2O , D_2O) garyndynyň rektifikasiýasy deýteriniň uly ýitgisine getirmeýär, ýagny her bir 1000 m^3 /sag tebigy wodoroda, bir ýylda 970 kg D_2O almak bolar. Elbetde, bu hili usul bilen deýterini almak, deýteriy aýrylanson, ammiagy, metanoly sintez etmek üçin esasy çig mal hökmünde ulanylýan arzan wodorodyň kuwwatly çeşmelerini talap edýär.

2.2-nji surat.
Deýterini bölüp almak üçin desganyň shemasy:
 1-3 – rektifikasion kolonnalar;
 4 – ýylylyk çalşyýjy,
 5 – reaktor;
 6 – sirkulýasion wodorod,
 7 – bölünmäge berilýän wodorod (0,03% HD),
 8 – sarp edija berilýän wodorod (0,03% HD)



Russiyada pes temperaturaly rektifikasiya usuly bilen wodorod-dan deýterini almak üçin senagat desgasy döredilýär. Bu kriogen tehnikasynyň senagat derejesinde ulanylmagynyň aýdyň mysalydyr.

Rektifikasiya ulgamynda pes temperaturalar tehnika 80 K derejeden (suwuk howanyň rektifikasiýasy) 20K derejä (suwuk wodorodyň rektifikasiýasy) geçdi, bu bolsa birnäçe täze we çylşyrymly meseleleriň çözüdini talap edýär. Garyndy (H_2 , HD) zygider birikdirilen kolonnalaryň seriýasynda (2.2-nji surat) rektifikasiya täsirine sezewar edilýär. Başlangyç gaz doýgun temperatura çenli öňürti sowadylýar 7(0.03% HD) we (1) kolonnanyň ortaky bölegine düşýär. (1) kolonnany suwarmak üçin flegma bolup (1), kolonnanyň ýylanjygyndan geçýän sirkulýasion ýokary basyşly H_2 hyzmat edýär, ol (1) kolonnadan geçip suwuklanýar we onuň ýokarky bölegine 8(0,003% HD) drosselirlenýär. Ýokary basyşly wodorodyň bu akymy bir wagtyň özünde sowuklygyň ýitgisini kompensirlemegi üpjün edýär. (1) kolonnanyň kubundan 5–10% HD saklaýan konsentrat aýrylýar. HD aýyrmak derejesi 90%-e ýetýär. Alnan konsentrat (2) rektifikasion kolonna ugradylýar, bu kolonnanyň aşaky önümi arassa HD, HD-ň köp mukdaryny özünde saklaýan ýokarky önüm HD-ni dolý aýyrmak üçin (1) kolonna gaýdyp gelýär. Arassa HD (2) kolonnanyň kubundan aýrylýar, (4) ýylylyk çalşygyda gyzdyrylýar, soňra



reaksiya boýunça dargatmak üçin (5) reaktora ugradylýar.

Alnan HD, H_2 , D_2 (25%) üçeldilen garyndy arassa D_2 almak üçin (3) kolonna iberilýär (aşaky önüm). (3) kolonnanyň ýokarky önümi HD almak üçin (2) kolonna ugradylýar. Alnan D_2 arassa O_2 bilen ýakylanda arassa agyr suw alynýar.

Gurluşyň iň uly desgasy gazyň uly akymly iberilýän birinji rektifikasion kolonnadyr, kolonnalaryň ölçegleri has kiçidir.

1 kg D_2O hasaplananda sarp edilýän elektrik energiýasy 12000–18000 Mj deňdir. Deýterini almak üçin häzirkki zaman gurluşlarynyň öndüriligi bir ýylda D_2O -nyň 5-15T berýär.

Beýan edilenlerden başga-da, pes temperaturalary ulanmagyň ýene-de ençeme ulgamlary bardyr. Olar barada ýörite edebiyatlarda ýeterlik maglumatlar berilýär.

Üçünji bab

Pes temperaturaly prosesleriň we gaýtalanmalaryň hasaplamasy hem-de derňewi

Her bir pes temperaturaly desganyň esasynda ýönekeý prosesleriň (gysylma, ýylylyk çalyşma, giňelme) toplumyny özünde jemleýän termodinamiki shema ýatyr.

Çuň sowadylma boýunça okuw we tehniki edebiýatlarda prosesleriň bu hili toplumu gaýtalanma diýip atlandyrmak kabul edilendir.

Gaýtalanma düşünjesi sistemanyň öwrülip başlangyç ýagdaýyna gelýän ýapyk ýa-da aýlawly proseslere degişlidigini bellemek gerek. Ýöne pes temperaturaly desgalaryň uly topary (suwuklandyrylan gaz öndürýän) ýapyk däl prosesleriň toplumyna esaslanýarlar, çünki bu desgalarda işçi jisimiň bir bölegi suwuklyk görnüşinde alnyp gidilýär we başlangyç ýagdaýyna gaýdyp gelmeýär.

Takyk aratapawudyny kesgitlemek maksady bilen, proses diýip halyň üýtgemek ýagdaýlaryna (kesgitli terminologiýadan biraz süýşüp), gaýtalanma diýip bolsa bu prosesleriň (gysylma, ýylylyk çalyşma, giňelme we ş.m.) toplumyna düşüneris.

Pes temperaturaly shemalaryň sany örän köpdür. Olaryň käbirleri, meselem, Lindäniň, Kloduň, Geýlandtyň, Kapissanyň gaýtalanmalary giňden ulanylýar we düýpli öwrenilen.

Konstruktor pes temperaturaly desgalary işläp düzende, desganyň ýönekeýligini, ygtybarlylygyny, ykdysady taýdan ähmiýetini üpjün edip biljek has maksadalaýyk gaýtalanmany saýlamaly bolýar.

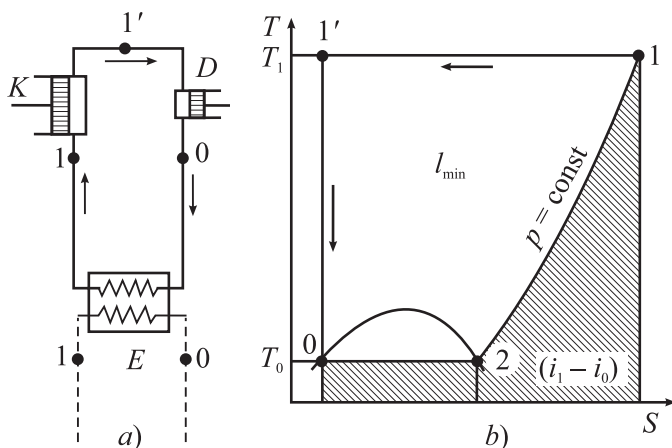
Gaýtalanmanyň we onuň esasy parametrleriniň (temperaturalary, basyşlary, ähtimal ýitgileri) şowly saýlanmagy pes temperaturaly desgalary döretmekde geljekki üstünligi köp babatda kesgitleýär, ýöne mümkin bolan görnüşleriň giň gerimine we üýtgeýän ululyklaryň köp sanyna görälikde bu meseläniň çözüdi köp kynçylyklara duş gelýär. Bu mesele, esasan hem, köpbasgançakly çylşyrymly gaýtalanmalar ulanylýan, temperaturalaryň kriogen ulgamyna degişlidir. Şol sebäp-

den hem gaýtalanmanyň anyk saýlanmasyna, olaryň içinden has laýygyny saýlamaga mümkinçilik berýän görnüşleriň derňewi itergi berýär.

Häzirki döwürde pes temperaturaly desgalarda ulanylýan ähli shemalar iki sany esasy toparlara bölünýärler: suwuklandyrylan gazy almak üçin shemalar–suwuklandyryjy gaýtalanmalar; dürli obýektleri sowatmak üçin gaýtalanmalar-refrižerator gaýtalanmalary. Bu toparlaryň her birine seredip geçeris, şunlukda, ony has umumy görnüşde amala aşyrarys.

§ 3.1. Suwuklandyrmanyň ideal gaýtalanmasy we onuň derňewi

Gazy suwuklandyрма usulyna doly öwrülişikli hökmünde seredip, biz suwuklandyrmanyň ideal gaýtalanmasyny alýarys (3.1-nji surat).



3.1-nji surat. Gazy suwuklandyrmanyň ideal gaýtalanmasy

Suwuklandyрма prosesi T_1 , T_0 iki sany izotermalardan we $1'-0$ adiabatadan durýar. Suwuklandyрма $1-1'$ izotermiki gysylma we $1'-0$ izoentrop giňelme bilen amala aşyrylýar, netijede, sirkulirlenýän ähli gaz doly suwuklanýar. Gaýtalanmany ýapmak üçin emele gelen suwuklygy bugartmaly we hemişelik basyşda T_0 -dan T_1 çenli

(0–2–1 izobarik proses) gyzdymaly. Bu gaýtalanmada aýrylýan ýylylyk E ýylylyk çalşyja gelýän akymy üznüksiz suwuklandyrmak üçin ulanylýar. Suwuklandyrmanyň minimal işi l_{\min} kompressorda izotermiki gysylma sarp edilen $l_k = T_1 \cdot (s_1 - s_2)$ iş bilen detanderde giňelen gaz tarapyndan edilen işiň tapawudy hökmünde kesgitlenýär:

$$l_d = i_1 - i_0,$$

bu ýerden

$$l_{\min} = T_1(s_1 - s_0) - (i_1 - i_0). \quad (3.1)$$

Käbir gazlar üçin (3.1) formula bilen kesgitlenen in pes derejedäki işiň ululygy:

Gaz	Geliý	Wodorod	Neon	Howa
(3.1) formula boýunça MJ/kg-da kesgitlenen iş	6,64	11,34	1,23	0,68

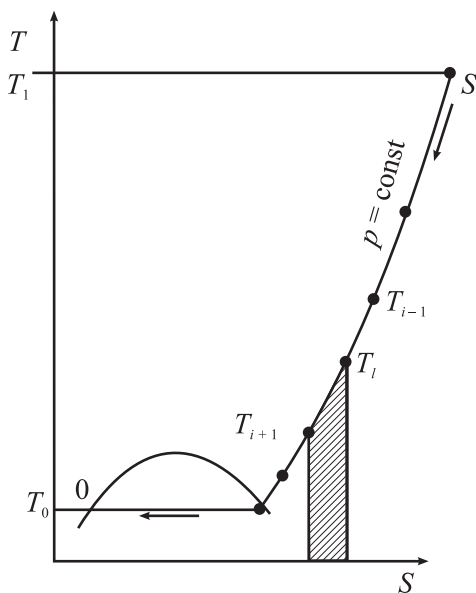
Käbir prosesleriň öwrülišiksizligi sebäpli real şertlerde sarp edilen iş ideal gaýtalanmalara garanynda birnäçe esse köpdür. Görşümüz ýaly, ideal gaýtalanma deňşdirilme üçin etalon hökmünde, real gaýtalanmalary kämilleşdirmekde nusga hökmünde aýratyn gyzyklanma döredýär.

Ideal gaýtalanmalara şu nukdaýnazardan seretmek bilen, real gaýtalanmalaryň gurluşynyň rasional usuly barada käbir netijelere gelmek bolýar.

(3-1) formulada ikinji agza, başlangyç 1 ýagdaýdan suwuk 0 faza geçirmek üçin 1 kg gazdan aýrylmaly ($i_1 - i_0$) ýylylygyň mukdaryny kesgitleýär. Ideal gaýtalanmanyň häsiýetli aýratynlygy, ol hem ýylylygyň iki stadiýada alnyp gidilýänligindendir: T_1 den T_0 çenli üýtgeýän temperaturada ($i_1 - i_2$) ýylylyk, T_0 – hemişelik temperaturada – ($i_2 - i_0$) kondensasiýa ýylylygy alnyp gidilýär. 1–2 aralykda ilki bilen has ýokary, soňra has pes temperaturada ýylylygy alyp gitmekligiň üznüksizligi işiň az sarp edilmegini üpjün etmäge mümkinçilik berýär. T_1 we T_0 izotermalarda gurlan, Karnonyň öwrülišikli gaýtalan-

masynyň suwuklandyрма maksady üçin ideal gaýtalanma garanyňda has amatsyzdygyny bellemek gerek, çünki Karnonyň gaýtalanmasyndaky ähli ýylylyk temperaturalaryň has pes T_0 derejesinde alnyp gidilýär. Bu ýagdaý kondensasiýa ýylylygyny sowadylma (i_1-i_2) ýylylygy bilen deňeşdirilende uly bolmadyk geliý, wodorod, neon ýaly maddalar üçin aýratyn möhümdür. 1–2 aralykda ýylylygy alyp gitmegiň üzüksiz prosesini nazary taýdan, T_1-T_0 temperaturalar interwalynda amala aşyrylýan, tükeniksiz köp mukdarda Karnonyň elementar gaýtalanmalarynyň zygiderliligi hökmünde göz öňüne getirmek bolar.

Bu hili sowadylma shemasyna käbir ýakynlaşma, temperaturalaryň aralyk derejesinde ýylylygy alyp gitmegiň birnäçe basgançagyňy ulanmak ýoly bilen ýetmek bolar.



3.2-nji surat. Dürli temperatura derejelerinde ýylylygy alyp gidilýän köp basgançakly suwuklandyрма gaýtalanmasy

Köpbasgançakly gaýtalanmalar kriogen tehnikasynda giňden ulanylýar. Mälim bolşy ýaly, basgançaklaryň sany köp boldugyça gaýtalanmanyň termodinamiki häsiýetnamasy gowulanýar, ýöne beýleki tarapdan bu shemany çylşyrymlaşdyrýar, ony işletmek kynlaşýar, şonuň bilen birlikde ygtybarlylygy peselýär. T_0 temperatura näçe pes

boldugyça, şonça-da sowadyлма basgançagyň köp sany talap edilýär, ýöne onuň maksadalaýyk sanyny takyk kesgitlemek zerurdyr.

Ideal gaýtalanmany berýän gazy suwuklandyrmagyň köpbasgançakly usulyna seredeliň (3.2-nji surat). Ýylylyk birnäçe temperatura derejelerinde T_{i-0} , T_i , T_{i+0} we ş.m. (sowadyлма basgançagyň doly sany n) alnyp gidilýär. i – basgançagynda sarp edilen iş:

$$l_i = \frac{Q_i}{\varepsilon_i}, \quad (3.2)$$

bu ýerde: ε_i – berlen basgançagyň sowadyjy koeffisiýenti.

ε_i ululygyň bahasy sowadyлма usulyna bagly bolup, dürli baha eýe bolup biler.

Has umumy netije almak üçin her bir basgançakda Karnonyň ters gaýtalanmasynyň kömegi bilen $Q_i = c_p(T_i - T_{i+1})$ ýylylyk alyp gidilýär diýip kabul edýäris, ýagny $E_i = E_{\text{karno}}$; onda (3.2) formuladan

$$l_i = A_p(T_i - T_{i+1}) \left(\frac{T_i}{T_{i+1}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

T_i we T_{i+1} temperaturalaryň bahalaryny kesgitlemek zerurdyr. Bu maksat üçin ähli $T_1 - T_0$ temperatura interwalyny aýratyn böleklere bölmekligiň kesgitli usulyny kabul etmeli. Islendik iki ýanaşyk sowadyлма basgançagy üçin aşakdaky gatnaşyk bar diýip hasap edýäris:

$$\frac{T_i}{T_{i+1}} = \frac{T_{i+1}}{T_{i+2}} = \frac{T_{i+2}}{T_{i+3}} = \dots A = \text{const} \quad (3.4)$$

Temperatura derejesiniň şunuň ýaly saýlama usulynda ýokarky basgançaklarda köp ýylylyk, aşaklarda bolsa az ýylylyk aýrylýar.

(3.4) formulada ähli n agzalary, soňra birinji i agzalary köpeldip alarys:

$$\frac{T_1}{T_0} = A^n; \quad \frac{T_1}{T_i} = A^i. \quad (3.5)$$

(3.5) deňlemeden A ululygy aýyrmak bilen, gaýtalanmanyň i basgançagy üçin temperaturanyň bahasyny taparys:

$$T_i = \sqrt[n]{T_1^{n-i} \cdot T_0^i}. \quad (3.6)$$

Şeýle hem (3.4) we (3.5) deňlemelerden aşakdaky aňlatma gelip çykýar:

$$\frac{T_i}{T_{i+1}} = \sqrt[n]{\frac{T_1}{T_0}}. \quad (3.7)$$

(3.3), (3.6) we (3.7) deňlemeleri özgertmek bilen alarys:

$$l_i = C_p T_1 \left(\sqrt[n]{\frac{T_1}{T_0}} - 1 \right) \left[1 - \sqrt[n]{\left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{i+1}} \right].$$

Gaýtalanmanyň ähli basgançaklary üçin doly iş l_i ululyklaryň ählisini jemlemek bilen, şeýle hem $T_0 = \text{const}$ -da r kondensasiýa ýylylygyny hasaba alýan, goşmaça agzany girizmek bilen kesgitleýär:

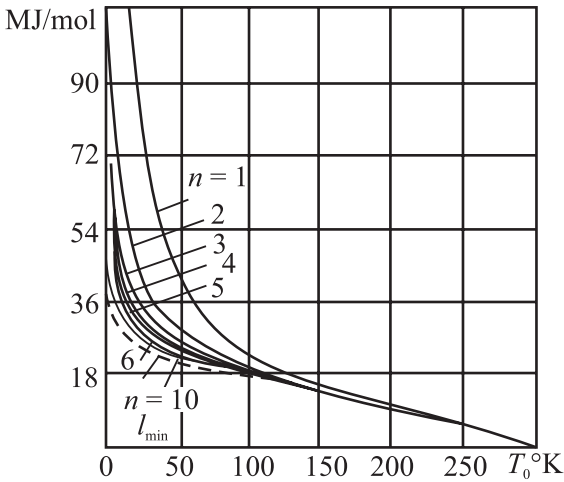
$$l_\Sigma = C_p T_1 \left(\sqrt[n]{\frac{T_1}{T_0}} - 1 \right) \sum_{i=0}^{i=n-1} \left[1 - \sqrt[n]{\left(\frac{T_0}{T_1} \right)^{i+1}} \right] + r \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right). \quad (3.8)$$

Kondensasiýa (r) ýylylygy T_0 funksiýada aňladylyp bilner. Alnan baglanyşyk suwuklandyrmanyň basgançakly, kaskad gaýtalanmasyny seljermäge mümkinçilik berýär.

Bir atomly gaz üçin $T_1 = 300$ K temperaturada (3.8) formula boýunça T_0 -dan we n -den baglylykda l_Σ - ululygyň üýtgemegini görkezýän egriler toplumyny gurmak bolar (3.3-nji surat). Aşaky ştrihlenen egri (3.1) formula boýunça ideal gaýtalanmada suwuklanmanyň in pes derejedäki işine degişlidir.

Ýokarky egri ($n = 1$) Karnonyň bir basgançakly gaýtalanmasynda gazy suwuklandyrylandaky işine degişlidir. Aralykdaky egriler basgançaklaryň sanynyň suwuklandyрма prosesiniň effektiwligine täsirini görkezýär. 3.3-nji suratdan görnüşi ýaly, oňositel ýokary temperaturalarda ($120 \div 150^\circ\text{K}$) köp basgançakly shemalary ulanmagyň zerurlygy ýokdur. Howa suwuklandyrylanda $T_0 \approx 80^\circ\text{K}$ sowadylma basgançaklarynyň sanyny ikiden ýokary artdyrmak maksadalaýyk däl. Has pes temperaturalarda köp basgançakly shemalaryň ulanylmagy zerurdyr. Meselem, $T_0 = 20,4^\circ\text{K}$ temperaturada wodarody

suwuklandyrmada bir basgançakly prosesde $l_{\Sigma} = 95,5$ MJ/mol, iki basgançakly prosesde $l_{\Sigma} = 49$ MJ/mol, üç basgançakly prosesde $l_{\Sigma} = 32,5$ MJ/mol. Mälim bolşy ýaly, bu hili ýagdaýda iki-üçden az bolmadyk basgançak maksadalaýykdyr. Gelini suwuklandyрма temperaturasyna golaý, 5°K derejede basgançaklaryň sanynyň birden ikä çenli artdyrylmagy işiň harajatyňy 374-den 87,3 MJ/mol çenli, üçünji basgançak ulanylanda $l_{\Sigma} = 57,6$ MJ/mol azaldýar, bu ýerden iň bolmanda üçbasgançakly sowadylmanyň maksadalaýyklygy gelip çykýar. Görşümüz ýaly, Karnonyň gaýtalanmasynyň kaskadyna esaslanýan, bu hili köpbasgançakly gaýtalanma ideallaşdyrylan bolmak bilen, şonça basgançagy bolan hakyky (real) gaýtalanma üçin nusga bolup hyzmat edýär.



3.3-nji surat. l_{Σ} suwuklandyрма işiniň kaskadyň dürli n sanly basgançagynda aşaky T_0 temperatura derejesine baglanyşygy

3.3-nji suratdaky maglumatlar kaskadyň basgançagyňyň rasional sanyny saýlamak üçin başlangyç hödürnama bolup hyzmat edip bilerler.

Anyk (takyk) desgalar proyektirlenende ulanylyşda ýönekeýlik we ygtybarlylyk talaplaryny hasaba almaly; diňe şunuň ýaly toplumlaýyn seredilme netijesinde basgançaklaryň sany we gaýtalanmanyň strukturasy barada çözümleri kabul etmek bolar. Tejribehanalarda işletmäge niýetlenen uly bolmadyk suwuklandyryjylar işlenip düzülende onuň ýönekeýligine we ulanylyş amatlylygyna üns beril-

ýär. Iri suwuklandyryjylar döredilende, adatça, ýokary derejedäki tygşylylyga ymtlyýarlar.

Basgançaklaryň sanyny kesgitlemek bilen, her bir basgançakda sowadylma usulyny saýlamak meselesine hem aýratyn üns berilýär.

Ýokarda seredilen esasy sowadylma usullary: detanderde giňelme, drosselirlenme we işlenen gazyň çykarylmasy. Drosselirlenmäniň netijeliligi temperaturanyň peselmegi bilen artýar; detanderde suwuklyk almak mümkin däl. Şonuň üçin drosselirlenme basgançagy iň aşaky temperatura derejesinde ulanylýar.

Köp ýagdaýlarda her bir aýratyn basgançaklarda daşky sowadylma çeşmeleri ulanylýar, ol ýerde sowadyjy suwuklykly wannalar ýada gazly sowadyjy maşynlar ulanylyp bilner. Ahyrky netijede daşky çeşmeleriň sowuklyk öndürijiligi, seredilýän gaýtalanmanyň çäginde daşda bolup geçýän şol bir sowadylma usullary bilen üpjün edilýär.

Şeýlelik bilen, kriogen suwuklandyryjylary üçin her bir aýratyn basgançakda dürli sowadylma usuly bolan köpbasgançaklary gaýtalanma häsiýetlidir. Aşakda bu hili gaýtalanmalaryň hasaplama zygyderliligine seredilýär.

§ 3.2. Köp basgançakly gaýtalanmalaryň hasaplama

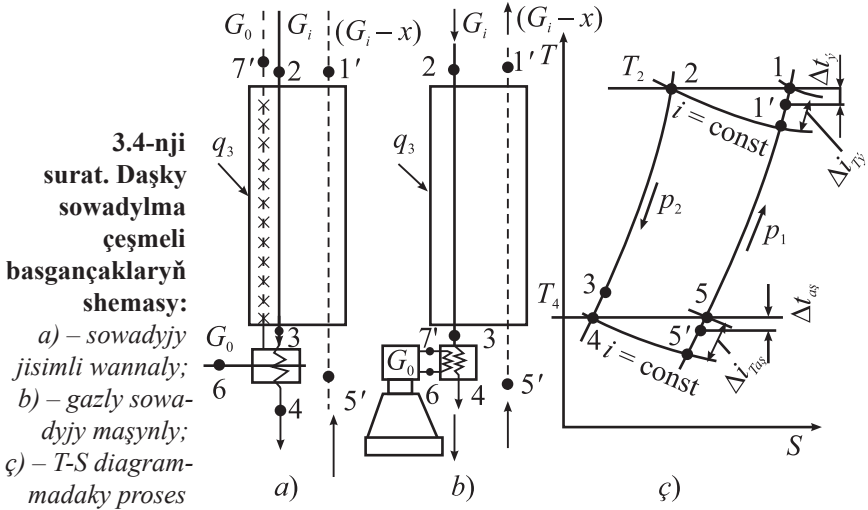
Adatça, gaýtalanmalaryň hasaplama onuň material we ýylylyk akymalaryny kesgitlemäge we häsiýetli nokatlarynda parametrlini kesgitlemäge syrykdyrylýar. Islendik çylşyrymly gaýtalanma aýratyn basgançaklaryň zygyderliligi hökmünde berlip bilinýär we olaryň her birinde sowadylma ol ýada beýleki usulyň kömegi bilen amala aşyrylýar.

Dürli görnüşli gaýtalanmalaryň toplumyna girýän basgançaklaryň sany deňeşdirilende onçakly köp däl. Uniwersal hasaplama shemasyny gurmak üçin suwuklandyryjy gaýtalanmasyny düzýän aýratyn basgançaklaryň häsiýetnamasyny kesgitlemek gerek bolýar.

Sowadylmanyň aýratyn basgançaklarynyň has giň ýaýran görnüşlerine seredeliň we olaryň ýylylyk we material akymalaryny kesgitleliň.

Daşky sowadylma çeşmeli basgançaklar. Daşky sowadylma çeşmeli basgançakda (3.4-nji surat) suwuk sowadyjy jisim ýada gazly

sowadyjy maşyn («Filips» maşyny; Mak-Magon-Jiffordyň ýylylyk nasosy; refrižerator gaýtalanmasy boýunça işleýän maşyn) ulanylyp bilner.



Göni akym G_i ýylylyk çalşyjyda T_2 -den T_3 – çenli we daşky çeşmäniň G_0 akymynyň hasabyna T_3 -den T_4 çenli sowadylýar. Ters akym G_i-x (x – suwuklandyrylan mukdary) T_5' -den T_1' – çenli gyzdyrylýar. Nedorekuperasiýalar: ýokarky temperatura derejesinde $\Delta t_y = T_1 - T_1'$, aşaky temperatura derejesinde $\Delta t_{as} = T_5 - T_5'$; daşky gurşawdan ýylylyk akymy q_3 .

Basgançagyň ýylylyk balansy

$$G_i i_2 + (G_i - x) i_{5'} + G_i q_3 + G_0 i_6 = G_i i_4 + (G_i - x) i_{1'} + G_0 i_{7'}$$

bu ýerde

$$i_{1'} = i_1 - c_p \Delta t_y, i_{5'} = i_5 - c_p \Delta t_{as}$$

deňligi göz öňüne tutup, alarys:

$$Q_{das} = G_0 (i_{7'} - i_6) = x (i_{1'} - i_{5'}) + G_i \left[(\Delta i_{Tas} - \Delta i_{Ty}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{as}) + q_3 \right], \quad (3.9)$$

bu ýerde: Δi_{Tas} we Δi_{Ty} – aşaky we ýokarky basgançakda drosselirlenmäniň ýylylyk effekti. (3.9) formulanyň sag bölegi berlen

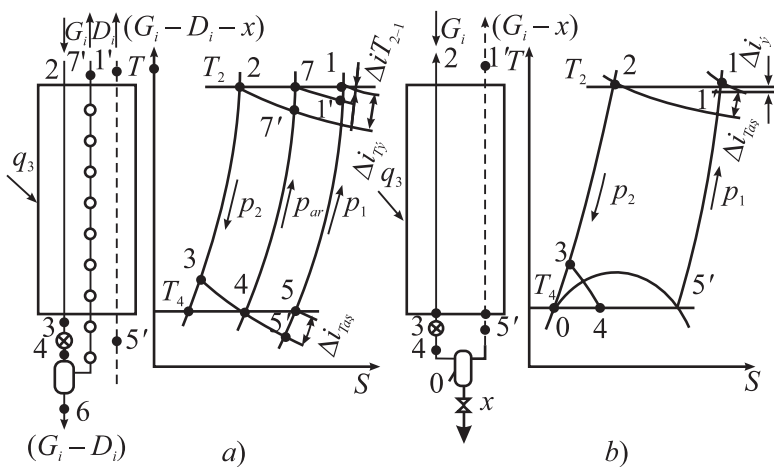
basgançakda sarp edilen sowuklygy, çep bölegi-daşky çeşmäniň $Q_{daş}$ sowuklyk öndürijiligini häsiýetlendirýär.

(3.9) formuladan suwuk sowadyjy jisimiň sowadyjy çeşme bolup hyzmat edýän görnüşi üçin suwuk sowadyjy jisimiň mukdary gönüden-göni kesgitlenip bilner:

$$G_o = \frac{Q_{daş}}{\Delta q},$$

bu ýerde: $\Delta q = i_{7'} - i_6$.

Drosselirlenmeli basgançaklar. Bu hili basgançagyň iki görnüşine (3.5-nji surat) seredeliň. Birinji görnüşde (3.5-nji a surat) drosselirlenme prosesi aralyk basgançakda sowadyjy çeşme hökmünde ulanylýar; bu hili basgançak drossel akymynyň sirkulýasiýaly shemasy üçin häsiýetlidir. Aşaky sepleşdiriji basgançak (3.5-nji b surat) özbaşdak ýönekeý bir basgançakly gaýtalanmany aňladyp biler – Lindeniniň gaýtalanmasy. Birinji görnüşde G_i göni akym ýylylyk çalşyjyda sowamak bilen, 4 nokatda aralyk basyşa çenli drosselirlenýär. Onuň D_i bölegi gerekli sowuklyk öndürijiligi üpjün edip, tersine barýar, beýleki $(G_i - D_i)$ bölegi indiki basgançaga düşýär.



3.5-nji surat. Drosselirlenmeli basgançaklaryň shemasy:

a) – aralyk basyşa çenli drosselirlenme; b) – gaýtalanmanyň aşaky basgançagynda drosselirlenme

Basgançağyň energetiki balansy:

$$G_i i_2 + (G_i - D_i - x) i_{5'} + G_i q_3 = (G_i - D_i) i_4 + D_i i_{7'} + (G_i - D_i - x) i_{1'}.$$

Özgerdip we ululyklaryň ornuny çalşyp, alarys:

$$i_{1'} = i_1 - c_p \Delta t_{y,1}; i_{7'} = i_7 - c_p \Delta t_{y,2};$$

$$i_{5'} = i_5 - c_p \Delta t_{aş}; \Delta t_{y,1} = \Delta t_{y,2},$$

$$\begin{aligned} Q_{dr.} = D_i (\Delta i_{Taş} - \Delta i_{T1-7} - c_p \Delta i_{Taş}) = x (i_{1'} - i_{5'}) + \\ + G_i \left[(\Delta i_{Taş} - \Delta i_{T_{yok}}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş}) + q_3 \right]. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Bu formuladan basgançağyň zerur bolan sowuklyk öndürijiligi ni üpjün etmek üçin aralyk basyşda sirkulýasiýa ugrukdyrylmaly D_i akymy kesgitlemek bolar. Ikinji görnüşde (3.5-nji b surat) ähli akym ahyrky P_1 basyşa çenli drosselirlenýär; soňky basgançak ýok. Bu basgançağyň ýylylyk balansyndan:

$$\begin{aligned} G_i i_2 + G_i q_3 = x i_0 + (G_i - x) i_{1'}, \\ Q_{dr.} = G_i \Delta t_{T,y} = x (i_{1'} - i_0) + G_i \left[c_p \Delta t_y + q_3 \right]. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Berlen ýagdaýda T_1 derejede drosseleffekt sowuklyk öndürijiligi ni Q_{dr} ululygyny kesgitleýär.

Detanderli basgançak. G_i göni akym (3.6-njy surat) ýokarky ýylylyk çalşyýyda T_3 temperatura çenli sowadylýar, soňra onuň D_i bölegi ters akymynyň basyşyna çenli giňelmäge (5' nokat) detandere düşýär. D_i akym berlen basgançakda zerur bolan sowuklyk öndürijiligi ni üpjün edýär.

Basgançağyň energetiki balansy:

$$G_i i_2 + (G_i - D_i - x) i_{5'} + G_i q_3 = (G_i - D_i) i_4 + (G_i - x) i_{1'} + h_i \eta_i D_i,$$

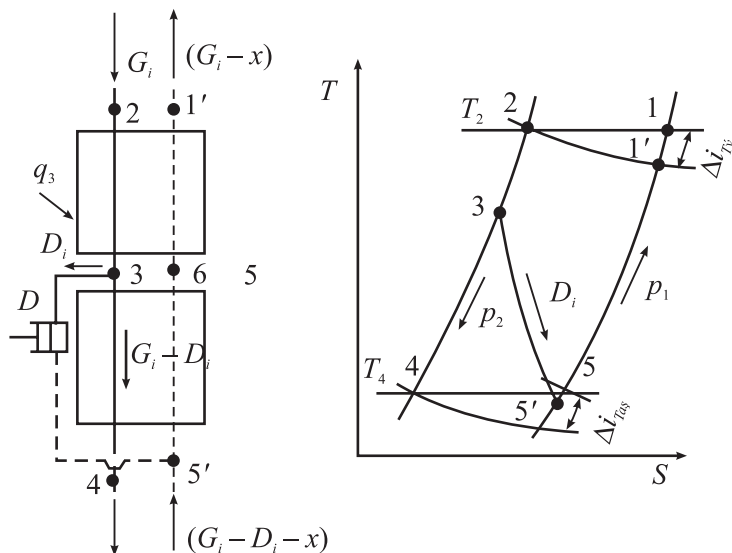
bu ýerde: $h_i \eta_i = (i_3 - i_{5'})$ gazyň detanderde giňelmeginde entalpiýanyň üýtgemegi; η_i – detanderiň PTK-si.

Çalyşmalary girizip, $i_{1'} = i_1 - c_p \Delta t_y$, we $i_{5'} = i_5 - c_p \Delta t_{aş}$, alarys:

$$\begin{aligned} Q_{\partial} = D_i \left[h_i \eta_i + \Delta i_{Taş} - c_p \Delta t_{aş} \right] = x (i_{1'} - i_{5'}) + \\ + G_i \left[(\Delta i_{Taş} - \Delta i_{T_y}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş}) + q_3 \right]. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Bu formula D_i detander akymyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär. (3–12) aňlatma berlen basgançagyň dürli modifikasiýasynda, meselem, ýokarky ýylylyk çalşyjynyň ýok ýagdaýynda hem öz strukturasyny saklaýar (Geýlandtyň gaýtalanmasynda basgançak ýokdur). Eger-de aşaky ýylylyk çalşyjyny aradan aýrylsa we ähli G_i akymy 4 nokatdaky käbir aralyk basyşa çenli detanderde giňeldilse, onda (3.12) deňleme aşaky görnüşe eýe bolýar:

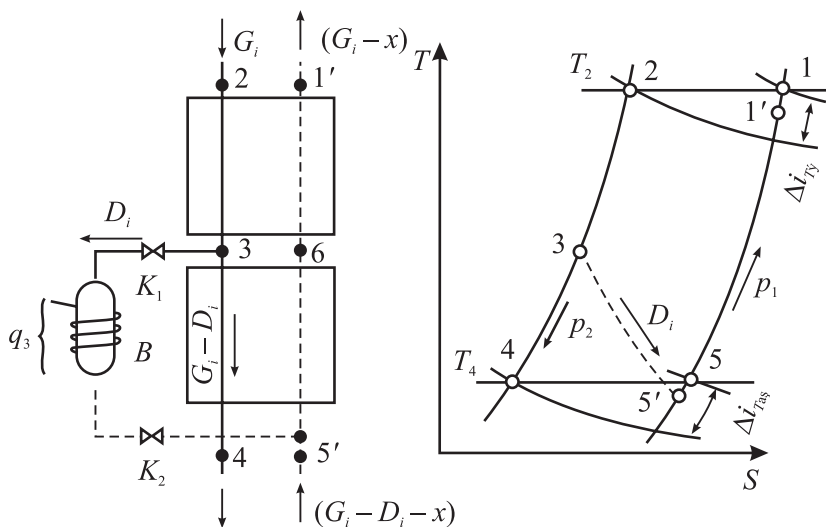
$$Q_{\partial} = G_i h_i \eta_i$$



3.6-njy surat. Detanderli basgançagyň shemasy we T-S diagrammadaky proses

İşlenen gazyň çykarylma (wyhlop) hadysasyny ulanýan basgançak. Sowadylmanyň bu usuly örän seýrek ulanylýar, ýöne ony mümkin bolan görnüş hökmünde hasaplamanyň umumy shemasyna goşmak maksadalaýykdyr.

G_i akym (3.7-nji surat) ýokarky ýylylyk çalşyjyda T_3 temperatura çenli sowadylýar, soňra onuň D_i bölegi B gaba doldurylýar, bu ýerde gysylma ýylylygy daşky gurşawa alnyp gidilýär. q_B ekwiwalent sowuklyk öndürijiligi k_2 wentilde D_i akymyň giňelmeginde döredilýär. T - S diagrammada işlenen gazyň çykarylma hadysasy strihlenen egri bilen şertli görkezilen.



3.7-nji surat. İşlenen gazyň çykarylma hadysasyny ulanýan basgançağyň shemasy

Basgançağyň energetik balansy:

$$G_i i_2 + (G_i - D_i - x) i_{5'} + G_i q_3 = (G_i - D_i) i_4 + (G_i - x) i_{1'} + q_B D_i.$$

Özgermek bilen:

$$i_{1'} = i_1 - c_p \Delta t_y; \quad i_{5'} = i_5 - c_p \Delta t_{aş}.$$

alarys

$$\begin{aligned} Q_B = D_i \left[q_B + \Delta i_{Taş} - c_p \Delta t_{aş} \right] = x (i_{1'} - i_{5'}) + \\ + G_i \left[(\Delta i_{Taş} - \Delta i_{Ty}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş}) + q_3 \right]. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Hemişelik görürden wyhlop prosesinde entalpiýalaryň $q_B = i_3 = i_{5'}$ üýtgemesi aşakdaky formula boýunça kesgitlenýär:

$$q_B = P_3 \vartheta_3 \left(1 - \frac{P_5}{P_3} \right).$$

Sowadylma basgançaklarynyň seredilen ähli görnüşleri tejribede duş gelýän ýagdaýlardyr we köpbasgançakly shemalaryň toplumyna girýän esasy görnüşler bolup durýar.

Bu basgançaklaryň islendigidinden aýrylýan ýylylygyň mukdary (3.9) we (3.13) formulalar boýunça hasaplanýar we ähli ýagdaýlar üçin aşakdaky aňlatma bilen kesgitlenýär:

$$Q_i = x(i_1 - i_5)_i + G_i \left[(\Delta i_{T_{aş}} - \Delta i_{T_y}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş}) + q_3 \right]_i. \quad (3.14)$$

Gaýtalanmany baglaşdyrýan drosselirlenmeli aşaky basgançakda tapawut bolýar. Soňky basgançagyň ýoklugy sebäpli (3-14) formuladan $\Delta t_{aş}$ we $\Delta i_{T_{aş}}$ aýrylýar, Δi_{T_y} bolsa çep bölege geçýär.

Geljekde ýazgyny ýönekeýleşdirmek üçin aşakdaky belgiden peýdalanýarys:

$$\left[(\Delta i_{T_{aş}} - \Delta i_{T_y}) + c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş}) + q_3 \right]_i = q_{\Sigma_i}. \quad (3.15)$$

Umumy (3.14) aňlatmada birinji $x(i_1 - i_5)_i$ agza berlen basgançakda akymyň suwuklandyrylýan mukdaryndan aýrylýan ýylylygy kesgitleýär. Bu ululyk peýdaly sowuklyk öndürijiligini aňladýar, şol bir wagtyň özünde ikinji $G_i q_{\Sigma_i}$ agza ýitginiň we real gazyň häsiýetleriniň täsirini görkezýär. Bu agzanyň düzüljelerine seredeliň.

$(\Delta i_{T_{aş}} - \Delta i_{T_y})$ ululyk – bu aşaky we ýokarky temperatura derejelerinde drossel effektiň tapawudy bilen kesgitlenilýän ýylylykdyr. Berlen basgançak üçin bu sowuklyk ýitgisidir. Ýöne iň aşaky basgançak üçin Δi_T – sowuklyk öndürijilik çeşmesidigini hasaba almalydyr, diýmek, Δi_T -ň artmagy ahyrky netijede bähbitlidir.

$c_p (\Delta t_y - \Delta t_{aş})$ ululyk – bu iki sany iç-içine geçýän basgançaklarda nedorekuperasiýanyň tapawudyna ekwiwalent ýylylykdyr.

$\Delta t_y \rangle \Delta t_{aş}$ kabul edip, berlen basgançakda kesgitli sowuklyk ýitgisi bar diýip alýarys; ýöne şonuň bilen birlikde aşaky basgançaklarda nedorekuperasiýadan ýitgi peselýär, bu ýerde onuň ululygy has pes bolmaly. Şeýle hem Δt_y ululygyň ýokary bahasynyň ýylylyk çalşyjlaryň ölçeglerini kiçeltmäge mümkinçilik berýändigini ýatlamak gerek, bu bolsa ahyrky netijede ykdysady taýdan maksadalaýykdyr. Eger ýylylyk sygymy düýpli üýtgeýän bolsa, onda bu agza $(c_{p,y} \Delta t_y - c_{p,aş} \Delta t_{aş})$ görnüşde aňladylar.

q_3 ululyk – bu peýdaly sowuklyk öndürijiligiň doly ýitgisini aňladýan, daşky gurşawdan gelýän ýylylyk akymydyr. G_i köpeldiji

berlen basgançaga gelýän gazyň mukdaryny aňladýar. Daşky sowadyjy çeşmeleriň barlygyn-da hem G_i üýtgemeyär.

(3.14) formulanyň sag tarapyna girýän ululyklar, öňünden saýlanyp alnan akymyň basyşynyň bahasy, basgançaklaryň temperatura derejeleri we kabul edilen ýitgiler boýunça termodinamiki diagrammalaryň kömegi bilen kesgitlenýär. (3.14) formulanyň çep bölegine girýän Q_i – basgançagyň sowuklyk öndürijiligi sowadylma usulyna baglylykda (3.9)–(3.13) deňlemeler boýunça hasaplanýar. Q_i – ululygy aşaky görnüşde aňladyp bolar:

$$Q_i = D_i q_i, \quad (3.16)$$

bu ýerde:

D_i – sowuklyk öndüriji akym;

q_i – berlen basgançakda udel sowuklyk öndürijiligi (ol termodinamiki diagrammanyň üsti bilen hem kesgitlenýär).

Gaýtalanmanyň hasaplamasy deňlemeleriniň sany basgançagyň n sanyna deň bolan, deňlemeler sistemasyny çözmeklige syrykdyrylýar:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= x(i_1' - i_5')_1 + G_1 q_{\Sigma_1} \\ Q_2 &= x(i_1' - i_5')_2 + G_2 q_{\Sigma_2} \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ Q_i &= x(i_1' - i_5')_i + G_i q_{\Sigma_i} \\ &\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ Q_n &= x(i_1' - i_5')_n + G_n q_{\Sigma_n} \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

(3.17) deňlemelerden we material balansyň goşmaça deňlemesinden x suwuklandyryjy koeffisiýenti, şeýle hem ähli G_i we D_i akymalary kesgitlemek bolar. Daşky sowadylma çeşmeleri ulanylanda mesele has ýönekeý çözülyär; bu ýagdaýda $Q_i = Q_{\text{daş}}$ ululyk gaýtalanmanyň G_i esasy akymy bilen bagly däl dir we (3.14) formula boýunça ýeňil hasaplanyp çykarylýar. İçki sowadylma çeşmeleri bar bolan ýagdaýynda D_i sowuk öndüriji akym esasy G_i akymyň az mukdardaky paýyny düzýär, bu bolsa meseläniň çözülişini çylşyrymlaşdyrýar.

Içki sowadylma çeşmeli görnüşe has içgin seredeliň. Şunlukda, (3-17) sistemanyň çözügüdine iki hili çemeleşme bolup biler. Aşaky

başgançağa gelyän akym $G_n = 1$ kg diýip kabul etmek bolar; beýleki ýagdaýda kompressordan ýokarky başgançağa gelyän G_1 akym 1 kg diýip kabul edilýär. Ikinji ýagdaýdan ugur alyp, material balansynyň goşmaça deňlemesini ýazarys:

$$\left. \begin{aligned} G_1 &= D_1 + D_2 + \dots + D_n = 1 \\ G_i &= D_i + D_{i+1} + \dots + D_n. \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Onda birinji başgançağyň sowuklyk öndürijiligi

$$Q_i = D_i q_i = x(i'_1 - i'_s)_i + (D_i + D_{i+1} + \dots + D_n) q_{\Sigma_i}.$$

D_i ululygy çep tarapa geçirip we ony aşakdaky ýaly belgiläp alarys:

$$q_i - q_{\Sigma_i} = q'_i. \quad (3.19)$$

(3.17) sistemany aşakdaky görnüşde aňladýarys:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= x \frac{(i'_1 - i'_s)_1}{q_1} + \frac{q_{\Sigma_1}}{q_1}; \\ D_2 &= x \frac{(i'_1 - i'_s)_2}{q_2} + \frac{q_{\Sigma_2}}{q_2} (D_3 + D_4 + \dots + D_n); \\ &\dots \dots \dots \\ D_i &= x \frac{(i'_1 - i'_s)_i}{q_i} + \frac{q_{\Sigma_i}}{q_i} (D_{i+1} + D_{i+2} + \dots + D_n); \\ &\dots \dots \dots \\ D_n &= x \frac{(i'_1 - i'_s)_n}{q_n}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Eger (3.20) sistemanyň sag böleginde aşaky n başgançakdan başlap, zygider ornuny çalyşma usuly bilen D akymy aýyrsak, ýagny $D_n -$ ululygy D_{n-1} -ň ornuna, $D_{n-1} -$ ululygy D_{n-2} -ň ornuna goýup we ş.m., onda i başgançak üçin aşakdaky aňlatmany alarys:

$$D_i = C_i x. \quad (3.21)$$

x koeffisiýent köpeldiji hökmünde sag bölegine girer, C_i parametrisi bolsa termodinamiki diagrammalar boýunça hasaplanýan, $\frac{(i'_1 - i'_s)_i}{q'_i}$

we $\frac{q_\Sigma}{q}$ görnüşli belli ululyklaryň funkisýasy bolar. Şeýlelik bilen, (3.17) başlangyç deňlemeler sistemasy aşakdaky görnüşe getiriler:

$$\left. \begin{aligned} D_1 &= C_1 x + \frac{q_{\Sigma 1}}{q_1} \\ D_2 &= C_2 x \\ \dots\dots\dots \\ D_i &= C_i x \\ \dots\dots\dots \\ D_n &= C_n x \end{aligned} \right\} \quad (3.22)$$

(3.22) sistemanyň çep we sag bölegini jemläp, (3.18) deňlemäni hasaba alyp, kesgitläris:

$$x = \frac{1 - \left(\frac{q_\Sigma}{q_1} \right)_1}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}. \quad (3.23)$$

(3.22) we (3.23) formulalar ähli üýtgeýän ululyklaryň funkisýasynda köpbaşgançakly gaýtalanmanyň akymyny kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

C_i ululygy kesgitlemek üçin umumy aňlatmadan peýdalanmak amatly bolýar. (3.20) formuladan $D_i = C_i x$ göz önünde tutup alarys:

$$D_i = x \frac{(i_1 - i_5)_i}{q_i} + \frac{q_{\Sigma i}}{q_i} (C_{i+1} x + C_{i+2} x + \dots + C_n x),$$

bu ýerden $x-i$ çykaryp, alarys:

$$C_i = \frac{D_i}{x} = \frac{(i_1 - i_5)_i}{q_i} + \frac{q_{\Sigma i}}{q_i} (C_n + \dots + C_{i+2} + C_{i+1}).$$

Bu formuladan, aşaky başgançak üçin C_n bahasyny bilip, ýokarda ýerleşen başgançaklar üçin C_i -ň ähli bahalaryny yzygiderlilikde tapmak bolar. Aşaky başgançakda detanderli we drosselirlenmeli shemaları esas hökmünde alyp, getirilen baglanyşyklaryň ulanylyş my-

salyna seredeliň. (3.11), (3.12), (3.15) we (3.19) formulalardan öňürti q_1 we q_2 ululyklary kesgitleýäris.

Aşaky drossel basgançagy üçin

$$q'_n = q_n - q_{\Sigma n} = \Delta i_{T_y} - (c_p \Delta t_y + q_3) = (\Delta i_{T_y} - \sum q)_n. \quad (3.24)$$

Detanderli basgançak üçin

$$\begin{aligned} q_1 &= h\eta + \Delta i_{T_{a\check{s}}} + c_p \Delta t_{a\check{s}})_1 = (h\eta - \sum q)_1; \\ q'_1 &= q_1 - q_{\Sigma_1} = (h\eta + \Delta i_{T_{a\check{s}}} + c_p \Delta t_{a\check{s}})_i - \\ &- \left[(\Delta i_{T_{a\check{s}}} - \Delta i_{T_y}) + c_p (\Delta i_{T_y} - \Delta i_{T_{a\check{s}}}) + q_3 \right]_i = \\ &= h_i \eta_i - (-\Delta i_{T_y} + c_p \Delta t_y + q_3)_i = (h\eta - \sum q)_i. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Ähli ýitgileriň jemi $\sum q$ bilen belgilenýär. Bir detanderli we drosselirlenmeli gaýtalanma seredýäris. (3.20) deňleme bilen baglanyşyklykda iki deňlemeler sistemasyňy alarys:

$$D_1 = x \frac{(i_1 - i_5)_1}{q_1} + \frac{q_{\Sigma_1}}{q_1}; \quad D_2 = x \frac{(i_1 - i_5)_2}{q_2}.$$

Detanderli basgançak üçin q_1 bahasyny, drosselirlenmeli basgançak üçin $q_2' = q_n'$ bahasyny goýup, (3.25) we (3.24) deňlemeler bilen baglanyşyklykda X -ň ýanynda köpeldiji hökmünde C_1 we C_2 ululyklary kesgitleýäris:

$$C_1 = \frac{(i_1 - i_5)_1}{(h\eta - \sum q)_1}; \quad (3.26)$$

$$C_2 = \frac{(i_1 - i_5)_2}{(\Delta i_{T_y} - \sum q)_2}. \quad (3.27)$$

(3.23) formula boýunça suwuklandyрма koeffisýienti

$$x = \frac{1 - \frac{q_{\Sigma_1}}{(h\eta - \sum q)_1}}{\frac{(i_1 - i_5)_1}{(h\eta - \sum q)_1} + \frac{(i_1 - i_5)_2}{(\Delta i_{T_y} - \sum q)_2}} \quad (3.28)$$

Iki detanderli we drosselirlenmeli gaýtalanma seredyäris. Sistema (3.20) bu ýagdaýda üç deňlemäni özünde jemleýär:

$$\begin{aligned} D_1 &= x \frac{(i_1 - i_5)_1}{q_1} + \frac{q_{\Sigma_1}}{q_1}; \\ D_2 &= x \frac{(i_1 - i_5)_2}{q'_2} + \frac{q_{\Sigma_2}}{q'_2} D_3; \\ D_3 &= x \frac{(i_1 - i_5)_3}{q'_3}. \end{aligned}$$

C_1 parametr öňki meseledäki ýaly (3.26) formula bilen kesgitlenir, C_3 parametr – (3.27) formula bilen, ýöne 3 indeks bilen, C_2 ululyk bolsa C_i -ni kesgitlemek üçin berlen formula boýunça kesgitlenir:

$$C_2 = \frac{(i_1 - i_5)_2}{(h\eta - \sum q)_2} + \frac{(i_1 - i_5)_3}{(\Delta i_{T_2} - \sum q)_3} \cdot \frac{q_{\Sigma_2}}{(h\eta - \sum q)_2}.$$

C_1, C_2 we C_3 ululyklary (3.23) formulada goýup, alarys:

$$x = \frac{1 - \frac{q_{\Sigma_1}}{(h\eta - \sum q)_1}}{\frac{(i_1 - i_5)_1}{(h\eta - \sum q)_1} + \frac{(i_1 - i_5)_2}{(h\eta - \sum q)_2} + \frac{(i_1 - i_5)_3}{(\Delta i_{T_2} - \sum q)_3} \left[1 + \frac{q_{\Sigma_2}}{(h\eta - \sum q)_2} \right]} \quad (3.29)$$

D_1, D_2 we D_3 akymlar x hasaplanandan soň ýeňillik bilen kesgitlenýär. Şeýle usul bilen x ululygy we has çylşyrymly gaýtalanmalaryň galan akymalaryny kesgitlemek bolar.

Şuňa meňzeş formulalar beýleki sowadyjy çeşmeleri ulanýan köpbasgançakly gaýtalanmalar üçin hem alnyp bilner. Bu ýagdaýda C_i kesgitlenende $(h\eta - \sum q)_i$ aňlatmanyň ornuna degişli çeşmäniň q_i sowuklyk öndürijiligini girizmek gerekdir. Tejribe hasaplamalar üçin C_i -ň san bahalaryny aýratyn hasaplamak, soňra (3.23) we (3.22) deňlemelerden x ululygy we D_1 akymy tapmak amatlydyr. Gaýtalanmany derňemek üçin (3.28) we (3.29) görnüşli umumy formulalardan peýdalanmak amatly bolýar.

Çylşyrymly gaýtalanmalaryň hasaplamasy amala aşyrylanda ýylylyk sygymlarynyň mese-mälim üýtgeýän zolagynda ýerleşýän ýylylyk çalşygy enjamlaryň iş ukybyny barlamak zerurdyr. Adatça, bu ýylylyk çalyşmanyň bozulmagynyň mümkin bolan kritiki çägi-ne degişlidir. Bu maksat üçin temperatura baglylykda entalpiýalaryň üýtgemesi berlen T - i diagrammadan peýdalanmak örän amatly bolýar.

Suwuklandyryjy koeffisiýentden başga-da gaýtalanmanyň möhüm häsiýetnamalarynyň biri hem sarp edilen L işdir. Umumy ýagdaýda L ululyk aşakdaky formulalar bilen kesgitlenip bilner:

$$\left. \begin{aligned} L &= L_k \pm L_\delta; \\ L_k &= \frac{RT_1}{\eta_{iz}} \ln \frac{P_2}{P_1}. \end{aligned} \right\} \quad (3.30)$$

Bu ýerde:

L_k – kompressorda gazy gysmak üçin sarp edilen iş;

η_{iz} – kompressoryň izotermiki PTK-si;

T_1 – gysylma temperaturasy;

$\frac{P_2}{P_1}$ – basyşlaryň gatnaşygy.

L_δ – ululyk goşmaça harajaty, meselem, daşky sowadyjy çeşme bilen sowadyjy suwuklygy öndürmekligi häsiýetlendirýär. Şol bir wagtyň özünde L_δ gaýtaryp berilýän işi kesgitleýär, bu detanderli proseslerde duş gelýär. Işin udel harajaty $l = \frac{L}{x}$ has bir häsiýetli ululyk bolup, L ululygyň alynýan x önümiň mukdaryna bolan gatnaşygy bilen kesgitlenýär. Gaýtalanmanyň has ýokary termodinamiki effektivligini üpjün etmek üçin esasy parametrleriň saýlanyp alnyşyna dogry çemeleşmeli, ilkinji nobatda, basyşyň we her bir basgançakda temperatura derejesiniň bahalaryna aýratyn üns bermeli.

Bu ululyklaryň optimal bahalaryny kesgitlemek gaýtalanmanyň ahyrky hasaplamalaryna kesgitleýji täsirini ýetirýär.

Aşakda pes temperaturaly gaýtalanmalar üçin umumy analitik baglanyşyklara esaslanan, P basyşyň we T_i temperatura derejeleriniň bahalarynyň kesgitleniş usuly seljerilýär.

§ 3.3. Kaskad gaýtalanmanyň basgançaklarynyň temperatura derejesi

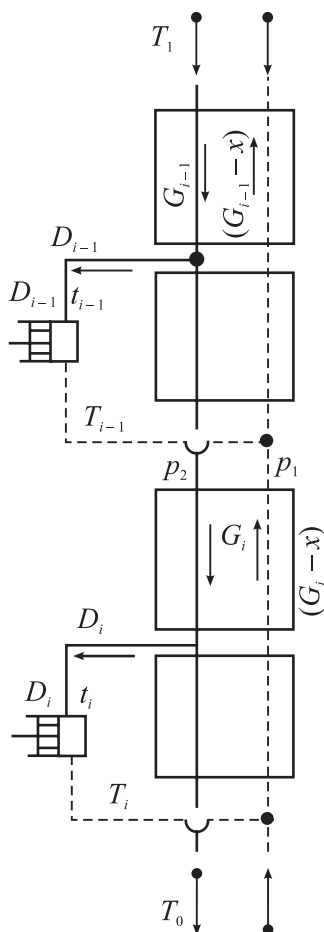
Kaskadyň basgançaklarynyň n sany we gaýtalanmanyň shemasy saýlanandan soň, her bir sowadylma basgançagy üçin temperaturalaryň T_i bahasyny kesgitlemek zerurdyr. Adatça, birbada temperaturanyň iki bahasy belli bolýar: T_i – daşky gurşawyň temperaturasyna deň bolan, gaýtalanma girýän akymyň temperaturasy we T_0 – suwuklandyrylan gazyň temperaturasy. Aralyk T_i temperatura derejeleri erkin saýlanyp bilmeýärler we olar gaýtalanmanyň optimal häsiýetnamasyna laýyk gelmelidirler. Bu mesele detanderleriň gaýtalanma kaskadlaýyn birikdirilmesine (çatylmasyna) ulanylýan, pes temperaturalar gaýtalanmasy üçin P. Kapissa tarapyndan ilkinji gezek işlenip çözülýär; hasaplamalar ýitgileri we real gazyň häsiýetlerini hasaba almazdan amala aşyrylýar. Şeýle köp basgançakly desganyň (temperatura derejeleri T_{i-1} we T_i) iki sany üstaşyry basgançaklaryna seredeliň (3.8-nji surat).

Bu hili basgançagyň energetiki balansy (3.12) formula bilen kesgitlenilýär. P. Kapissanyň meselesinde gaz ideal diýip alynýar, nedorekuperasiýa we daşky gurşawyň ýitgileri hasapdan aýrylýar; şu şertlerde (3.12) deňlemeden alarys:

$$D_i h_i \eta_i = x c_p (T_{i-1} - T_i), \quad (3.31)$$

bu ýerde: $h_i \eta_i = (t_i - T_i) \cdot c_p$;

t_i – detanderiň girişindäki temperatura.



3.8-nji surat. Detanderleriň kaskadlaýyn çatylma shemasy

Hyýaly gazyň detanderde izoentrop giňelmeginde prosesin ahyrynda T_i^* temperatura aşakdaky formula laýyklykda kesgitlenýär:

$$T_i^* = t_i \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}. \quad (3.32)$$

Detanderiň PTK-si

$$\eta_i = \frac{t_i - T_i}{t_i - T_i^*}. \quad (3.33)$$

(3.32) we (3.33) deňlemelerden birnäçe özgertmelerden soň, T_i^* -ni aradan aýryp alarys:

$$t_i = \frac{T_i}{1 - \eta_i \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

t_i -ni (3.31) deňlemede ornuna goýup we özgertmelerden soň alarys:

$$D_i T_i \alpha_i = x (T_{i-1} - T_i) \quad (3.34)$$

bu ýerde:

$$\alpha_i = \frac{\eta_i \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{1 - \eta_i \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (3.35)$$

Ol ölçegsiz ululyk bolup, basyşlaryň gatnaşygyna we PTK-sine baglylykda, detanderde entalpiýalarynyň üýtgemesini häsiýetlendirýär.

i -nji detandere gelýän akym

$$D_i = \frac{x}{\alpha_i} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right),$$

n detanderlere gelýän gazyň mukdary

$$\sum_n D_i = x \sum \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right).$$

T_i temperaturanyň optimal bahasy ähli detandere gelýän gazyň akymynyň jeminiň minimumynyň şerti bilen kesgitlener, ýagny

$$\frac{\partial \sum_n D_i}{\partial T_i} = 0.$$

bu ýerden,

$$\frac{\partial}{\partial T_i} \left[x \sum_n \frac{1}{\alpha_i} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right) \right] = x \left[\frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{T_{i-1}}{\alpha_i T_i} - 1 \right) + \frac{\partial}{\partial T_i} \left(\frac{T_i}{\alpha_{i+1} \cdot T_{i+1}} - 1 \right) \right] = 0.$$

Differensirläp, alarys

$$-\frac{T_{i-1}}{\alpha_i T_i^2} + \frac{1}{\alpha_{i+1} \cdot T_{i+1}} = 0,$$

bu ýerden,

$$\frac{T_{i-1}}{\alpha_i T_i} = \frac{T_i}{\alpha_{i+1} \cdot T_{i+1}} = \dots A = \text{const.} \quad (3.36)$$

(3.36) formulada ähli n agzalary, soňra ilkinji i agzalary biri-birine köpeldip, alarys

$$\frac{T_{i-1}}{T_o \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n} = A^n; \quad \frac{T_1}{T_i \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_i} = \dots A^i.$$

A hemişeligi aradan aýryp, her bir detanderden soň temperatura derejeleriniň optimal bahalaryny kesgitlemek üçin aşakdaky formulany alarys:

$$T_i = \sqrt[n]{T_1^{n-i} T_o^i \frac{(a_1 a_2 \dots a_n)^i}{(a_1 a_2 \dots a_i)^n}}. \quad (3.37)$$

$\alpha_i = \text{const}$ bahasynda (3.37) deňlemeden alarys:

$$T_i = \sqrt[n]{T_1^{n-i} T_o^i}. \quad (3.38)$$

Alnan kanunalaýyklygy daşky sowadyлма çeşmeli kaskadly gaýtalanmalaryň toparyna ulanmak bolar. Bu hili gaýtalanmalaryň aýratynlygy, ol hem sowuklyk öndüriji hem-de suwuklandyrylýan akymyň özara garaşsyzlygydyr, ýagny $G_i = 1$.

Ýylylyk balansynyň (3.9) deňlemesinden, ters akym boýunça hyýaly gaz barada kabul edilen goýberilmeleri hasaba alyp, aşakdakylary alarys:

$$Q_{\text{daş},i} = x \cdot c_p (T_{i-1} - T_i) + q_{\Sigma_i} \cdot \quad (3.39)$$

Daşky çeşmäniň $Q_{\text{daş},i}$ sowuklyk öndürijiligini aşakdaky görnüş-de aňlatmak bolar:

$$Q_{\text{daş},i} = G_{oi} \cdot q_i,$$

bu ýerde:

G_{oi} – sowadyjy akymyň massasy;

q_i – onuň udel sowuklyk öndürijiligi.

Eger q_i ululyk T_i sowadyлма temperaturasyna proporsional bol-sa, onda

$$Q_{\text{daş},i} = G_{oi} \cdot T_i \cdot \rho_i, \quad (3.40)$$

bu ýerde ρ_i koeffisiýent sowadylmanyň takyk usulyňa baglylykda kesgitlenýär. i basgançakda, şeýle hem kaskadyň ähli basgançagynda sowadyjy akymyň mukdaryny kesgitleýäris:

$$G_{oi} = \frac{xc_p}{\rho_i} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right) + \frac{q_{\Sigma_i}}{\rho_i T_i}; \quad (3.41)$$

$$\sum_n G_{oi} = xc_p \sum_n \left[\frac{1}{\rho_i} \left(\frac{T_{i-1}}{T_i} - 1 \right) + \frac{1}{\rho_i} \frac{q_{\Sigma_i}}{xc_p T_i} \right]. \quad (3.42)$$

$\frac{q_{\Sigma_i}}{xc_p} = b_i$ bilen belgiläp we $\frac{\partial \sum G_{oi}}{\partial T_i} = 0$ şertden jemiň minimumy kesgitlep, i sowadyjy çeşmäniň optimal temperaturasy üçin baglanyşygy taparys:

$$\frac{T_{i-1} + b_i}{\rho_i b_i} = \frac{T_i}{\rho_{i+1} \cdot T_{i+1}}. \quad (3.43)$$

Eger $q_{\Sigma i} = 0$ (ýagny $b_i = 0$) diýip kabul edip, idealizirlenen gaý-talanma seretsek, onda (3.43) deňlemeden Kapissanyň formulasyna gelip çykýan (3.36) gatnaşygy alarys. Şu netije başgançakdan başgançaga odnositel ýitginiň hemişeliginde hem alynýar, ýagny

$$\frac{q_{\Sigma i}}{T_i} = \text{const.}$$

Dürli sowadyлма usuly üçin ρ_i parametri kesgitleýäris. Sowadyjy sowuklyk ulanylanda

$$Q_{\text{daş}_i} = G_{o_i} \left[r + c_{p\text{daş}} (T_{i-1} - T_i) \right]. \quad (3.44)$$

Diňe bug emele gelme «r» ýylylyk ulanylýan, has ýönekeý görnüşe seretmek bilen, Trutonyň düzgünini $\frac{r_i}{T_i} = C = \text{const}$ hasaba alyp aşakdaky deňlemäni alarys:

$$Q_{\text{daş}} = G_{o_i} \cdot T_i \cdot C. \quad (3.45)$$

Şeýlelik bilen, $\rho_i = \text{const}$ ululyk (3.42) formulada jem belginiň daşyna çykarylyp bilner. Görşümüz ýaly, bu ýagdaýda ρ_i ululyk (3.43) formuladan aýrylýar. Gazyň alyp gidýän $c_{p,\text{daş}} (T_{i-1} - T_i)$ ýylylygyny hasaba almak has çylşyrymly baglanyşyga getirýär.

Gazly sowadyjy maşyn ulanylanda (hemişelik göwrümde işlenen gazyň çykarylmagyny ulanýan) ideal maşynyň sowuklyk öndüriligi aşakdaky formula görnüşinde aňladylýar:

$$c_{p,G.S.M.} (T_{\text{ibaş}} - T_i^*) = RT_{\text{ibaş}} \left(1 - \frac{P_1}{P_2} \right),$$

bu ýerde:

$T_{\text{ibaş}}$ – işlenen gazyň çykarylma hadysasynyň başyndaky temperatura;

T_i^* – hadysanyň ahyryndaky temperatura.

Maşynyň peýdaly täsir koeffisiýenti

$$\eta_{w,i} = \frac{T_{\text{ibaş}} - T_i}{T_{\text{ibaş}} - T_i^*},$$

bu ýerde: T_i – giňelmäniň ahyrynda hakyky temperatura.

Hakyky sowuklyk öndürijiligi aşakdaky aňlatma bilen kesgitlener:

$$Q_{\text{daş-i}} = G_{oi} (T_{\text{ibaş}} - T_i) A_{p.G.S.M.}$$

Soňky üç deňlemäni bilelikde çözüp ($T_{\text{ibaş}}$ we T_i^* ululyklary içinden aýryp), alarys:

$$Q_{\text{daş-i}} = G_{oi} T_i \cdot c_{p.G.S.M.} \left[\frac{\eta_{wi} \frac{k-1}{k} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)}{1 - \eta_{wi} \frac{k-1}{k} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)} \right].$$

$c_{p.G.S.M.}$ hemişelik ululygy hasaba almazdan, alarys:

$$\rho_i = \left[\frac{\eta_{wi} \frac{k-1}{k} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)}{1 - \eta_{wi} \frac{k-1}{k} \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right)} \right]. \quad (3.46)$$

Stirlingiň gaýtalanmasy boýunça işlenýän gazly sowadyjy maşyn ulanylanda, ideal maşynyň sowuklyk öndürijiligi izotermiki giňelme bilen kesgitlener:

$$Q_{\text{daş-i}} = G_{oi} R T_i \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right).$$

Real şertler üçin maşynyň termodinamiki PTK-ni hasaba alyp, aşakdaky formulany alarys:

$$Q_{\text{daş-i}} = G_{oi} R \cdot T_i \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \eta_{Ti}.$$

Bu formulada $R \ln \left(\frac{V_1}{V_2} \right) = \text{const}$. Onda (3.40) we (3.42) formulardan (hemişelik köpeldijiler jem belginiň daşyna çykarylýar) aşakdaky gelip çykýar:

$$\rho_i = \eta_{Ti} \quad (3.47)$$

Seredilen ýagdaýlar üçin ρ_i ululygynyň bahasyny bilip, (3.37) formula boýunça aralyk basgançaklaryň temperaturasyny kesgitlemek bolar.

Getirilen formulalar, işçi sredanyň real häsiýetleriniň täsiri uly bolan ýerinde, ýagny kaskad shemanyň aşaky basgançaklary üçin takyk dälidir. Takyk gaýtalanmalaryň aşaky basgançaklarynyň temperatura derejelerini saýlamak boýunça hödürnamalar IV bölümde getirilýär.

§ 3.4. Akymalaryň basyşyny kesgitlemek

Basyşlaryň rasional saýlanmagy gaýtalanmanyň termodinamiki effektiwligine örän uly täsir edýär. Düzgün bolşy ýaly, ters akymyň basyşy 0,1–0,14 MPa; göni akymyň basyşy bolsa P_2 -ň giň çäklerinde üýtgäp bilýär. Hasaplama formulalarynda P_1 we P_2 adatça, gatnaşyklar görnüşinde berilýär, ýagny

$$\sigma = \frac{P_2}{P_1}.$$

σ -ň ösmegi bilen bir wagtda Q_0 sowuklyk öndürijilik üýtgeýär, şeýle hem L işiň harajaty artýar. Netijede, termodinamiki häsiýetnamalar ($\varepsilon = Q_0/L$ we termodinamiki PTK η_T) optimuma eýedirler. η_T ululyk ε ululygynyň ideal gaýtalanmanyň $\varepsilon_{id} = Q_0/L_{id}$ sowadyjy koeffisiýentine gatnaşygy bilen kesgitlenýär.

Şeýlelikde, suwuklandyrmanyň ideal gaýtalanmasy üçin sowadyjy koeffisiýent (3.1-nji surat)

$$\varepsilon_{id} = \frac{Q_o}{L_{id}} = \frac{(i_1 - i_0)}{T_1(S_1 - S_0) - (i_1 - i_0)}.$$

ε_{id} koeffisiýent P basyşa bagly dälidir, şonuň üçin ε bilen η_T uluklaryň maksimumy P -ň şol bir funksiýasy bolup durýar. Suwuklandyryjy gaýtalanmanyň sowadyjy koeffisiýenti üçin umumy aňlatma (3.30) formula laýyklykda aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$\varepsilon = \frac{Q_o}{L} = \frac{x(i_1 - i_0)}{\frac{RT_1}{\eta_{iz}} \ln \sigma \pm L_o} \quad (3.48)$$

Gaýtalanmanyň aýratyn basgançagy üçin

$$\varepsilon_i = \frac{Q_{oi}}{L_i} = \frac{x(i'_1 - i'_5)_i}{D_i \frac{RT_1}{\eta_{iz}} \ln \sigma \pm L_{oi}} \quad (3.49)$$

σ -ň ululygyny sowadyjy koeffisiýentiň iň ýokary derejesi boýunça kesgitläliň:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = \frac{i_1 - i_0}{\frac{RT_1}{\eta_{iz}}} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{x}{\ln \sigma \pm L_o \frac{\eta_{iz}}{RT_1}} \right) = 0$$

diýip, aşakdakylary alarys:

$$\ln \sigma = \frac{x \left[1 \pm \sigma \left(\frac{\partial M}{\partial \sigma} \right) \right]}{\sigma \left(\frac{\partial x}{\partial \sigma} \right)} \pm M, \quad (3.50)$$

bu ýerde:

$$M = L_o \frac{\eta_{iz}}{RT_1}.$$

Şuňa meňzeş aňlatma gaýtalanmanyň aýratyn basgançagy üçin hem alnyp bilner. (3.50) deňlemäni çözmek üçin suwuklandyryjy koeffisiýentiň basyşlaryň gatnaşygyndan $x = f(\sigma)$ baglanyşygyny, şeýle hem $L_o = f(\sigma)$ ululygy bilmek gerekdir. $x = f(\sigma)$ baglanyşyk umumy ýagdaýda (3.23) deňleme bilen aňladylýar. Çylşyrymly she-malar üçin bu aňlatma örän uly göwrümlü hem-de hasaplama üçin hem köp zähmeti talap edýär. Eger ýitgileri hasaba alýan q_{Σ} we $\sum q_i$ agzalary basyşdan bagly däl diýip hasap edilse, σ ululygynyň takmy-nan bahasyny almak bolar.

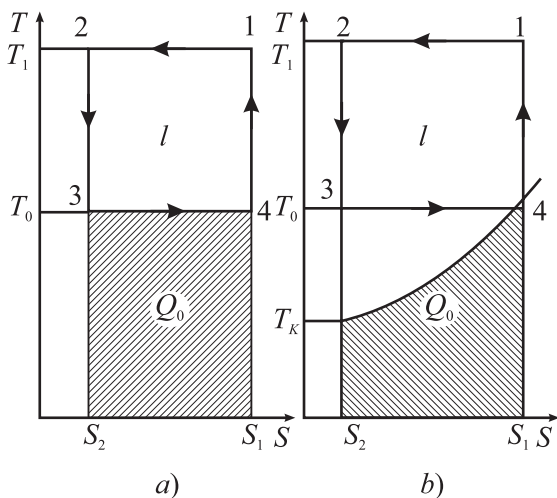
§ 3.5. Refrižerator gaýtalanmalary

Refrižerator gaýtalanmalary kriogen temperaturada ýerleşýän dürli obýektleri sowatmak üçin niýetlenilýär. Şu hili sistemalar örän köpsanly we köp görnüşlidir; olara kriogen-wakuum nasoslar, kriogen suwuklyklarynyň uzak wagtlap saklanýan döwründe buglaryny kondensirmek üçin desgalar, radioelektron apparaturalarynyň sowadylýan elementleri, aşa geçiriji gurluşlaryň dürli görnüşleri we ş.m. degişlidir.

Bu sistemalaryň esaslanýan refrižerator gaýtalanmalary suwuklandyryjy gaýtalanmalaryňky ýaly elementlerden durýar we olar bilen köpsanly umumylyklary bardyr.

Refrižerator gaýtalanmalarynyň suwuklandyryjy gaýtalanmalardan prinsipial aýratynlygy bardyr, ol hem refrižerator gaýtalanmalarynda ähli akymyň suwuklandyrylan önümi bermän, ýapyk kontur boýunça sirkulirlenýänligi bilen düşündirilýär.

Refrižerator gaýtalanmasynyň peýdaly ýüki, gaýtalanmada emele gelýän suwuklyk bugaranda ýa-da gaz görnüşli akym gyzdýrylanda sowadylýan obýektde alyp gidilýän ýylylygyň mukdary bilen kesgitlenilýär.



3.9-njy surat. Ideal refrižerator gaýtalanmalary:

a – Karno; *b* – izotermik-adiabat

Karnonyň ters gaýtalanmasy termodinamiki ideal refrižerator gaýtalanmasy bolup durýar (3.9-njy a surat). Karnonyň gaýtalanmasy Q_0 ýylylygy hökmany T_0 hemişelik temperaturada alyp gidilen ýagdaýynda, ideal nusga bolup biler. Eger sowadylýan obýektiň temperaturasy $T_0 - T_k$ interwalynda üýtgeýän bolsa, onda izoterm-adiabat gaýtalanma ideal bolar (3.9-njy b surat). Hemişelik T_0 temperaturada sowadylma kriogen suwuklygy bugartma usuly bilen; üýtgeýän temperaturada sowadylma-gaz görnüşli işçi sredany T_k temperaturadan T_0 temperatura çenli hemişelik basyşda gyzdyrmak ýoly bilen amala aşyrmak bolar.

Bu gaýtalanmalaryň sowadyjy koeffisiýenti peýdaly ýüküň Q_0 sarp edilen l işe bolan gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

Karnonyň gaýtalanmasy üçin

$$\varepsilon_k = \frac{T_0}{T_1 - T_0}.$$

Izotermik – adiabat gaýtalanma üçin

$$\varepsilon_{ad} = \frac{i_4 - i_k}{T_1(s_1 - s_2) - (i_4 - i_k)}.$$

Izotermik – adiabat gaýtalanmada ideal gaz üçin

$$\varepsilon_{ad} = \frac{T_0 - T_k}{T_1 \ln \frac{T_0}{T_k} - (T_0 - T_k)}. \quad (3.51)$$

Şol bir T_0 temperaturada $\varepsilon_k > \varepsilon_{ad}$, T_0/T_k gatnaşygyň artmagy bilen hem olaryň tapawudy ulalýar. Real gaýtalanmalaryň sowadyjy koeffisiýenti ε_k -dan we ε_{ad} -dan mese-mälim kiçidir, bu bolsa aýratyn prosesleriň amala aşyrylmagynda ýitgileriň üsti bilen düşündirilýär.

$T_0 = \text{const}$ ýagdaýynda hem köp basgançakly gaýtalanmanyň ulanylýandygyny bellemek gerek. Bu ýagdaýda refrižerator gaýtalanmasynda diňe bir peýdaly Q_0 ýüki üpjün etmek bilen çäklenmän, eýsem suwuklygyň ähli ýitgisiniň üstüni dolmaklygy şertlendirýär, bir basgançakly gaýtalanmada bolsa bu iň pes temperatura derejesinde bolup geçýär.

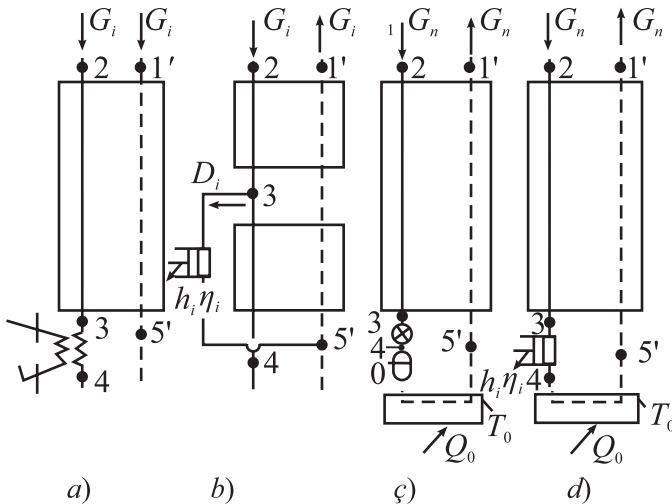
Birnäçe basgançaklaryň ulanylmagy has ýokary T temperaturada nedorekuperasiýadan we daşky gurşawdan gelýän ýylylyk akymlyryndan ýitginiň esasy bölegini kompensirlemäge mümkinçilik berýär. Şeýlelik bilen, peýdaly sowuklyk öndürjiligi döredilýän in pes basgançakda az ýitgi üpjün edilýär. Şoňa laýyklykda, birnäçe temperatura derejesinde Q_{oi} peýdaly ýylylyk ýüküni üpjün ediji, refrižerator gaýtalanmasy mümkindir; elbetde, bu hili gaýtalanmalar kaskadly bolmalydyrlar.

Refrizižerator gaýtalanmalarynyň iki sany esasy toparý bardyr: suwuklandyryjylarynyň prinsipi boýunça gurlan gaýtalanmalar; gazly sowadyjy maşynlarynyň gaýtalanmalary.

Gaýtalanmanyň birinji toparýna seredeliň.

Umuman alanynda, islendik suwuklandyryjy desga refrizižerator düzgüninde işläp bilýär, şunlukda, onuň käbir elementlerinde ýylylyk hem-de material akymlyry biraz üýtgeýär. Suwuklandyryjy hem-de refrizižerator desgalary bilen bir hatarda, ol ýa-da beýleki düzgünde işläp biljek kombinirlenen shemalar hem bardyr.

Refrizižerator gaýtalanmalarynyň hasaplama usuly aşakdakylardan durýar.



3.10-njy surat. Refrizižerator gaýtalanmalarynyň aýratyn basgançaklarynyň shemasy:

a – önürti sowadylmaly; *b* – detanderli; *c* – drosselirlenmeli (aşaky);
d – detanderli (aşaky)

Bu sistemanyň çözgüdi ähli material we ýylylyk akymalaryny kesgitlemäge mümkinçilik berýär. (3.53) deňlemäni özgerdip we onuň içindäki D_1 näbelli ululyklaryň ornuny çalşyryp, gaýtalanmanyň ähli basgançaklarynyň parametrleriniň funksiýasynda peýdaly Q_o sowuklyk öndürijiliginiň umumy baglanyşygyny almak bolar. Diňe bir aşaky basgançakda däl-de, eýsem aralyk basgançakda hem $Q_{oi} = D_i q_{oi}$ peýdaly sowuklyk öndürijilik döredilen ýagdaýynda (3.53) sistemanyň deňlemelerine aşakdaky ululygy girizmek zerurdyr:

$$Q_i = D_i q_{oi} + G_i q_{\Sigma i},$$

bu ýerde: $D_i - q_{oi}$ ýylylygy alyp gitmäge gatnaşýan akym.

Şunlukda, ähli q_{oi} ululygyň bahalarynyň arasyndaky baglanyşygy bilmek zerurdyr. Refrižerator gaýtalanmalarynda sarp edilen iş L (3.30) formula bilen kesgitlenilýär. Işiň udel harajaty aşaky gatnaşyk bilen aňladylýar:

$$\ell = \frac{L}{Q_o}. \quad (3.55)$$

Mysal hökmünde, öňürti sowadylmaly, detanderli we drosselirlenmeli gaýtalanma üçin ýylylyk we material akymalaryny kesgitläris. Bu hili gaýtalanma sowadylmanyň üç basgançagyň yzygider birikdirilmegi bilen emele gelýär (3.10-njy a, b, ç surat). Bu ýagdaýda üç deňlemeler sistemasyny alarys:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{daş}} &= G_o (i_7 - i_6) = q_{\Sigma 0}; \\ Q_1 &= D_1 (h\eta + \Delta i_{T_{\text{aş}}} - c_p \Delta t_{\text{aş}})_1 = q_{\Sigma 1}; \\ Q_2 &= D_2 \Delta i_{T_{y2}} = Q_0 + D_2 q_{\Sigma 2}. \end{aligned} \right\} \quad (3.56)$$

Bu ýerde: $q_{\Sigma 2} = (c_p \Delta t_{yok} + q_3)_2$.

Ikinji we üçünji deňlemelerden $D_1 + D_2 = 1$ göz önünde tutup we $(-\Delta i_{T_{\text{aş}}} + c_p \Delta t_{\text{aş}})_1 = q_{\Sigma 1}$ belgiläp, peýdaly sowuklyk öndürijiligini tapýarys:

$$Q_o = (\Delta i_{T_{yok.2}} - q_{\Sigma 2}) \left[\frac{q_{\Sigma 1}}{(h\eta - \sum q)_1} \right]. \quad (3.57)$$

Detandere akym

$$D_1 = \frac{q_{\Sigma 1}}{(h\eta - \Sigma q)_1}.$$

Ýokarky basgançakda sowadylýan suwuklygyň mukdary

$$G_o = \frac{q_{\Sigma o}}{(i_{\gamma'} - i_{\delta'})}.$$

Seredilen gaýtalanmalarda sowadylma gaz drosselirlenende emele gelen suwuklyk bugartma ýoly bilen amala aşyrylýar.

Suwuklandyrma bolup geçmeýän, şoňa laýyklykda ähli akymy detanderde giňeltmek mümkinçiligi bolan gazly refrižerator gaýtalanmasy aýratyn gyzyklanma döredýär. Bu hili basgançakly gaýtalanmanyň shemasy 3.10-njy d suratda görkezilen. Gysylan gaz ýylylyk çalşyjyda sowadylýar, detanderde giňelýär we sowadyjy kamera düşýär, bu ýerde T_4 -den T_5 , çenli gyzdyrylyp, Q_0 peýdaly ýylylyk ýüküni aýyrýar. Gaz ters akym boýunça ýylylyk çalşyjydan geçip, kompressora gaýdyp gelýär. Gaýtalanmanyň suwuklyk öndürijiligi detanderde adiabat giňelme bilen üpjün edilýär. Ideal detanderde giňelme hadysasy izoentrop bolup, hakyky detanderde bolsa (η_0 PTK-ni hasaba almak bilen) bu ýagdaý 3–4 bilen görkezilýär.

Köplenç ýagdaýda, Q_0 ýylylygy sowadylýan obýektiň hemişelik T_0 temperaturasynda alyp gitmek talap edilýär, şeýlelikde, sowadyjy akym T_4 -den T_5 -e çenli gyzdyrylýar we kamerada $\Delta t_x = T_4 - T_5$, temperaturalar tapawudyny üpjün edýär.

(3.52) formula laýyklykda berlen gaýtalanmanyň ($G_n=1$) suwuklyk öndürijiligi

$$Q_0 = h\eta + \Delta i_{T_{yok}} - (c_p \Delta t_{yok} + q_3). \quad (3.58)$$

Berlen gaýtalanmada sarp edilen iş kompressorda sarp edilen bilen detanderde gaýtaryp berilýän işiň tapawudy ýaly kesgitlenilýär:

$$L = \frac{RT_1}{\eta_{iz}} \ln \sigma - h\eta \eta_{meh}.$$

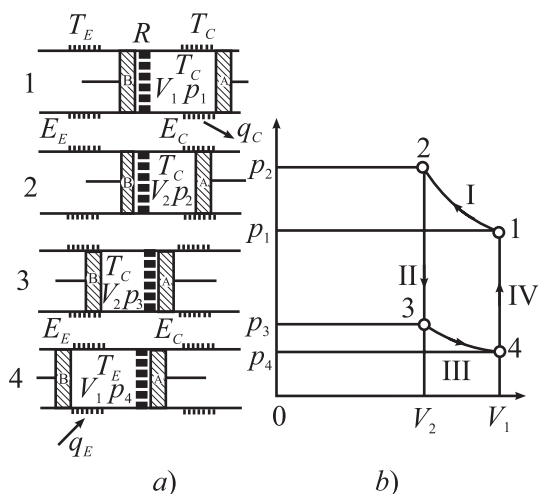
Bu gaýtalanmanyň sowadyjy koeffisiýenti $\varepsilon = \frac{Q_0}{L}$ ýitginiň ýoklugynda we real gazyň häsiýetlerini hasaba almazdan (3.51) formula bilen aňladylar. Ähli ýitgileri hasaba almak bilen, ε ululygyň bahalarynyň seljerilmesi ýörite edebiýatlarda getirilýär.

§ 3.6. Gazly sowadyjy maşynlar

Gazly sowadyjy maşynlar (GSM) örän giň ýaýrandyrlar; olar kriogen desgalarynyň görnüşleriniň has effektiwleriniň biri bolup durýarlar. Gazly sowadyjy maşynlaryň işçi gaýtalanmalary adaty refrižerator gaýtalanmalarynda ulanylýan, gysylma, ýylylyk çalyşma we giňelme hadysalaryna esaslanýar. Ýöne GSM konstruktiv ýerine ýetirilişi we aýratynlygy birnäçe tehniki meseleleriň çözügünde gazly sowadyjy maşynlary kriogen sistemalaryň özbaşdak görnüşine degişli edilmegine mümkinçilik berýär. Gazly sowadyjy maşynlar ýokary termodinamiki netijeliligi, kiçi göwrümi, şeýle hem iş ýüzünde ýönekeýligi we ygtybarlylygy bilen tapawutlanýarlar.

«Filips» maşyny. «Filips» maşyny özüniň işçi gaýtalanmasy, şeýle hem örän şowly tehniki çözügütleri boýunça has kämil GSM-ň görnüşleriniň hataryna degişli bolup durýar.

«Filips» GSM-ň işiniň esasynda şotlandiýaly Stirlingiň 1816-njy ýylda hödürlän termodinamiki gaýtalanmasy ýatyr. Bu gaýtalanma XIX asyrlarda giňden ulanylan ýylylyk hereketlendirijilerinde ulanylypdyr. Bu hili gaýtalanmanyň esasynda sowadyjy maşynlary döretmegiň mümkinçiligi barada ir döwürden mälim bolsa-da, bu ideýa 1954-nji ýylda Keller we Ýonkers tarapyndan durmuşa ornaşdyrylýar. Bu gaýtalanmany amala aşyran maşynyň esasy elementleri (3.11-nji surat): silindr, A we B porşenler, R -regenerator (silindriň orta böleginde ýerleşen), E_c we E_E ýylylyk çalyşyjylar (silindriň giňişligi bilen daşky gurşawyň arasynda ýylylyk galtaşmasy (kontaktyny) amala aşyran). Silindriň sag böleginiň temperaturasy daşky gurşawyň T_c temperaturasyna deň, çep bölegi sowadylma T_E temperaturasyna deň. Gaýtalanmada aşakdaky dört proses amala aşyrylýar (3.11-nji surat).



3.11-nji surat. Stirlingiň gaýtalanmasy:

a) – gaýtalanmanyň fazalary; b) – P - V diagrammada gaýtalanma

Izotermiki gysylma (1–2), bu ýerde B porşen hereketsiz, A porşen bolsa gazy izotermiki ($T_c = \text{const}$) gysýar, gysylma q_c ýylylygy daşky gurşawa alyp gidýär.

Izohor ýylylyk çalyşma (2–3), bu ýerde T_E temperaturaly giňişlige gazy süýürüp, iki porşen hem çepä hereket edýär (bu ýagdaýda basyş peselýär).

Izotermiki giňelme (3–4), bu ýerde A porşen hereketsiz, B porşen çepä gidýär, gaz giňelýär. Daşky gurşawdan gelýän q_E ýylylyk $T_E = \text{const}$ temperaturany goldaýar.

Izohor ýylylyk çalyşma (4–1), bu ýagdaýda iki porşen hem saga, başlangyç ýagdaýa süýşýär, gaz T_c temperaturaly giňişlige geçýär.

Gazyň bir giňişlikden beýleki giňişlige geçmeginde temperaturanyň üýtgemesi R regeneratory tarapyndan üpjün edilýär. Regeneratory uly ýylylyk sygymly massasy we giň ýylylyk çalyşma üsti bolan ýylylyk çalşyjy enjamdyr.

2–3 prosesde gaz regeneratorya ýylylygyny berýär; şunlukda, gazyň temperaturasy T_c -den T_E çenli peselýär. 4–1 prosesde gaz regeneratory sowadýar; gazyň özi T_E -den T_c temperatura çenli gyzdyrylýar. Diňe ýylylygyň ýokary regenerasiýasynda (98%-den hem ýokary) uly PTK-li gaýtalanmany amala aşyrmak mümkin. 3–4 prosesde m mas-

saly gazyň izotermiki giňelme işine ekwiwalent, maşynyň diňe bir gaýtalanmanyň dowamyndaky sowuklyk öndürilijligi:

$$q_E = mRT_E \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

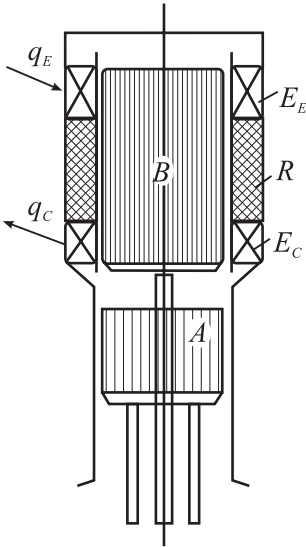
Gaýtalanmanyň dowamynda sarp edilen iş gysylma we giňelme işleriniň tapawudy ýaly kesgitlenilýär:

$$L = mRT_c \ln \frac{V_1}{V_2} - mRT_E \ln \frac{V_1}{V_2} = mR(T_c - T_E) \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

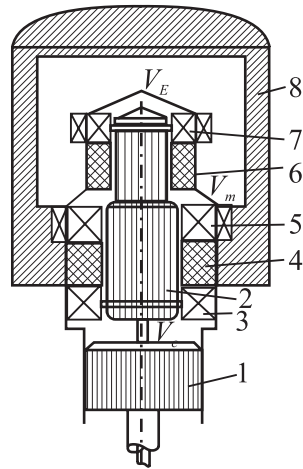
Sowadyjy koeffisiýent

$$\varepsilon = \frac{q_E}{L} = \frac{T_E}{T_c - T_E}.$$

Bu aňlatma Karnonyň gaýtalanmasynyň PTK-sine, ýagny T_c we T_E temperaturalar interwalynda mümkin bolan iň ýokary PTK deňişlidir. Elbetde, bu netije ähli prosesleriň doly öwrülişikli bolan ýagdaýyndaky ideal gaýtalanma deňişlidir.



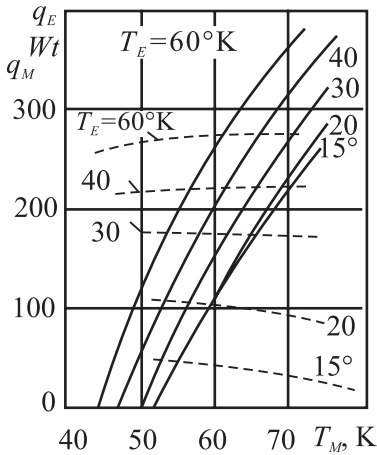
3.12-nji surat. Gysyp itekleýji maşynyň shemasy



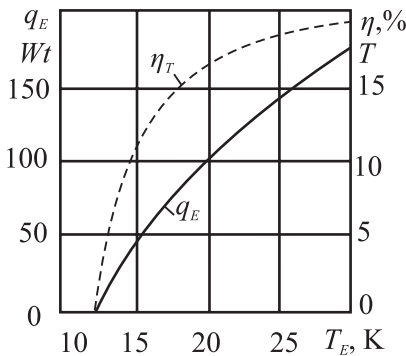
3.13-nji surat. Iki basgançakly «Filips» maşynyň gysylma shemasy

«Filips» maşyny konstruktiv işlenip düzülende, B porşene derek gysyp itekleýjini ulanyp, gaýtalanmany amala aşyrmagyň usulyny biraz üýtgetmek maksadalaýyk bolýar (3.12-nji surat). Esasy porşen A gysylma we giňelme işini amala aşyryp, işçi giňişligiň göwrümini üýtgedýär.

Gysyp itekleýji B prosese baglylykda gazy sowuk boşlukdan ýyly tarapa we tersine süýşürmek üçin hyzmat edýär. Ideal maşynda gysyp itekleýjiniň iki tarapynda hem basyş birmeňzeşdir,



a)



b)

3.14-nji surat. Iki basgançakly «Filips» maşynyň häsiýetnamalary

diýmek, ol iş ýerine ýetirmeýär. Göwrüleriň we basyşlaryň üýtgemesiniň seredilen häsiýeti gysyp itekleýji maşynlara degişlidir.

Prast tarapyndan işlenip düzülen, iki basgançakly maşynda (3.13-nji surat) dürli temperatura derejesinde bir V_c gysylma boşlugy, iki V_M we V_E giňelme boşlugy, 6 we 4 iki sany regeneratory we differensial porşen görmüşli gysyp itekleýji bardyr. V_M we V_E göwrümlerde gazyň dürli massasy basyşyň bir interwalyn-da giňelýärler. Birinji basgançakda (V_M boşluk) giňelýän gaz T_M temperatura derejesine çenli ähli ýitgileri ýapmaga gidýän sowuklyk döredýär. Ikinji basgançakda giňelende T_E temperaturada peýdaly sowuklyk döredilýär. Maşyny q_M we q_E peýdaly sowuklyk öndürjiligiň iki basgançakda hem bolmagyny üpjün eder ýaly konstruirlemek bolýar.

3.14-nji (a) suratda q_E we q_M sowuklyk öndürjilikleriniň hasaplama ululyklarynyň T_E we T_M temperaturalarynyň bahalaryndan baglanyşygy getirilen. 3.14-nji (b) surat-

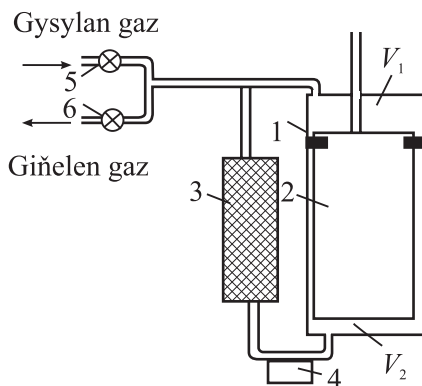
da $q_M = 0$ bolanda $q_E = f(T_E)$ sowuklyk öndürjiligi berlen. Şu ýerde hem gaýtalanmanyň termodinamiki PTK-si getirilen (20 K-de $\eta = 17\%$). Bu maşynda alnan iň pes temperatura 12 K ýakyn bahany berýär. Bu maşynyň ýokarky has sowuk böleginiň ýylylyk izolýasiýasyna aýratyn üns bermelidir. Ýokarky regeneratoryň nasadkasy pes temperaturalarda ýokary ýylylyk sygymy özünde saklaýan galaýydan (ownuk däneli ýa-da sapajyk görnüşli) taýýarlanmalydyr.

Bu hili gazly sowadyjy maşynlar kriogen tehnikaşynda aýratyn gzykylanma döredýärler we wodorodyň kondensasiýasyny hem-de gelini suwuklandyrmagyň meselelerini çözmekde giňden ulanylýar.

Mak-Magon-Jiffordyň ýylylyk nasosy. Gazly sowadyjy maşynyň ýene bir görnüşi Jifford we Mak-Magon tarapyndan işlenip düzülen, «ýylylyk nasosy» diýip atlandyrylan maşyndyr. Porşenli maşyn görnüşinde ýerine ýetirilen bu agregatyň gaýtalanmasynyň aýratynlygy esasy sowuklyk öndürji proses hökmünde hemişelik göwrümden işlenen gazyň çykarylma hadysasyny (wyhlop) ulanmaklygy bilen aňladylýar.

Porşenli maşynda gazyň giňelmesi işiň däl-de, energiýanyň ýylylyk görnüşinde daşky gurşawa berilmegi bilen alnyp barylýandygy onuň häsiýetli aýratynlygydyr; çykýan akym maşyna girýän akyma garanynda has ýokary entalpiýa eýedir. Porşenli-gysyp-itekleýjili

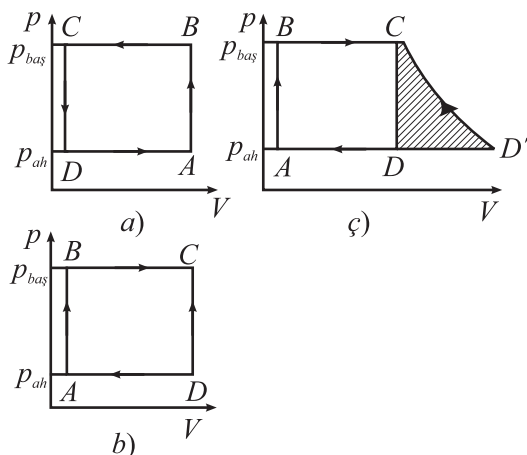
silindr – bu maşynyň (3.15-nji surat) esasy elementi bolup durýar. Iki işçi göwrüm – V_1 ýyly we V_2 sowuk (2) gysyp itekleýjiniň süýşmegi bilen üýtgeýär. Göwrümleriň ikisi hem (3) regeneratoryň üsti bilen birikdirilen; gaz ýyly ahyrynda ýerleşdirilen (5 we 6) klapanalaryň üsti bilen berilýär hem-de daşyna goýberilýär. Ideal maşynda (regeneratoryň garşylygyny hasaba almazdan) V_1 we V_2 göwrümlerde basyş birmeňzeş-



3.15-nji surat. Ýylylyk nasosynyň shemasy: 1 – silindr; 2 – gysyp-itekleýjisi; 3 – regeneratoryň üsti bilen birikdirilen; 4 – ýylylyk çalşyjy; 5 – içine goýberiji klapany; 6 – daşyna goýberiji klapany

dir we gysyp itekleýjiniň süýşmesi işi sarp etmek bilen bagly däl. V_2 sowuk göwrümde ýylylyk ýüküni aýyrmak üçin ýylylyk çalşygy bardyr. Gaýtalanmadaky prosesleriň zzygiderliligine seredeliň.

Gaz bilen doldurylanda gysyp-itekleýji aşaky derejede ýerleşýär ($V_2 = 0$). Açyk goýberiji klapa boýunça V_1 göwrüm we regenerator gazdan doldurylýar. Basyşyň artmagy temperaturanyň ýokarlanmagy bilen alnyp barylýar. Gaz içine goýberilende goýberiji klapa açyk, gysyp itekleýji gazy V_1 göwrümden V_2 göwrüme süýşürüp, ýokary tarapa hereket edýär. Regeneratordan geçip, gaz sowadylýar; hemişelik basyşy saklamak üçin kompressordan goşmaça mukdarda gaz berilýär. Goýberilmäniň ahyrynda klapa ýapylýar. Giňelende daşyna goýberiji klapa açylýar, gysyp itekleýjiniň hereketsiz ýagdaýynda basyş peselýär, giňelmekden soňra gaz regeneratoryň üsti bilen daşyna çykýar. İşlenen gazyň çykarylma hadysasy V_2 temperaturanyň peselmegi bilen alnyp barylýar. Çykýan akym ýylylyk çalşygyda ýylylyk ýüküni aýyrýar. Gaz çykarylmanda daşyna beriji klapa açyk, gysyp itekleýji aşak süýşýär, $V_2 = 0$. Prosesiň ahyrynda klapa ýapylýar we sistema baglangyç ýagdaýa gaýdyp gelýär.



3.16-njy surat. Ýylylyk nasosynyň we porşenli detanderiň P-V diagrammalary:

a – V_1 – ýyly göwrüm; *b* – V_2 – sowuk göwrüm; *ç* – porşenli detander

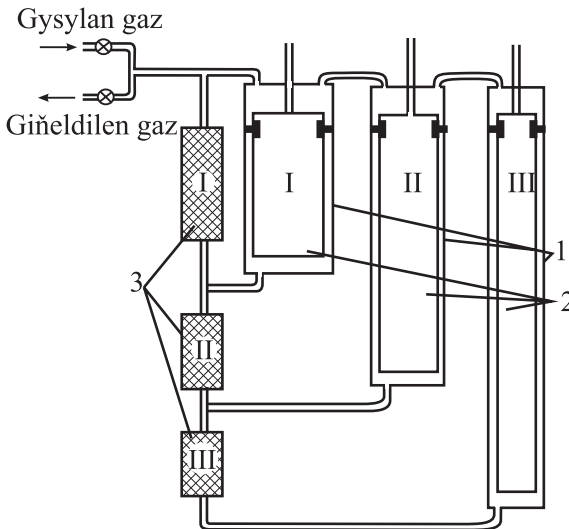
Iki boşlukda hem prosesler (3.16-njy a, b surat) birmeňzeşdir, ýöne ugurlary boýunça dürlüdürler. V_1 göwrümde ýylylyk generirlenýär we gaz gyzýar, V_2 göwrümde ýylylyk siňdirilýär we gaz sowa-

dylýar. PV diagrammadaky meýdan gaýtalanmada entalpiýanyň üýt-gemesini kesgitleýär; iki göwrüm üçin ($V_1 = V_2 = V$ hasaba alyp) ýaz-mak bolar:

$$\Delta I = V(P_{\text{baş}} - P_{\text{ah}}) \quad (3.59)$$

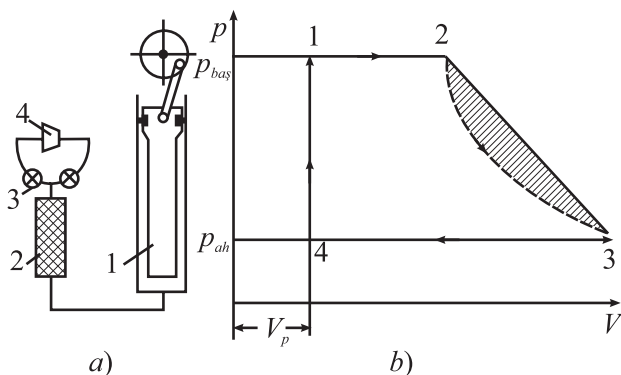
Sowuk göwrüm üçin bu ululyk ideal gaýtalanmanyň sowuklyk öndürjiligin, ýyly göwrüm üçin daşky gurşawa berilýän ýylylyk mukdaryny kesgitleýär. V_2 göwrümde bolup geçýän gaýtalanmany porşenli detanderdäki gaýtalanma (3.16-njy ç surat) bilen deňşdi-rilende, detanderde gaz giňelme işini ýerine ýetirmän, goýberiji kla-panyň üsti bilen erkin çykyp gidýän ýagdaýynda bu gaýtalanmalaryň özara meňzeşligini görmek bolar. Ştrihlenen meýdança $C-D'-D$ izo-

entrop giňelmäniň $L = \int_{V_C}^{V_{D'}} PdV$ işini kesgitleýär. Ýylylyk nasosynda bu iş ýerine ýetirilmeýär, şonuň üçin hem onuň sowuklyk öndürjiligi detanderdäki garanynda $C-D'-D$ ululykça azdyr. Şeýlelikde, ýylylyk nasosynyň, detander hem «Filips» maşynyna garanynda termodina-miki effektivligi has pesdir.



3.17-nji surat. Üç basgançakly nasosyň shemasy:
 1 – silindrler; 2 – gysyp itekleýjiler; 3 – regeneratörler
 (I, II, III – basgançaklar)

Üç basgançakly nasosda iki klapan we V_1 ýyly göwrüm saklanýar, goşmaça giňelme boşlugy (2) gysyp itekleýjiler we (3) regeneratolar ýüze çykýar (3.17-nji surat). Aşaky basgançaklaryň işine bir basgançakly sistemanyň işi hökmünde seretmek bolar, çünki soňky basgançaklara baryan gaz öň ýanyndaky basgançagyň temperaturasy bilen düşýär. Üç basgançakly ýylylyk nasosy 80, 35 we 14°K temperatura derejelerinde sowadylmany üpjün edýär, bu bolsa onuň gelini suwuklandyrmakda ulanylmagyna mümkinçilik berýär.



3.18-nji surat. Silindrinde regeneratolar ýerleşdirilen detanderiň shemasy:

a: gaýtalanmanyň P-V – diagrammasy; b: 1 – porşen; 2 – regeneratolar; 3 – klapanlar; 4 – kompressor

Detanderli refrižerator gaýtalanmasy. Mak-Magon we Jifford ýylylyk nasosy bilen bir hatarda gazly sowadyjy maşynyň ýene bir görnüşini işläp düzdüler, bu bolsa silindrde porşeniň täsiri ýetmeýän giňişliginde (3.18-nji surat) ýerleşen regeneratoly detander hökmünde kesgitlenip bilner. Kiçi effektiw regeneratolar adaty detanderde porşeniň täsiri ýetmeýän giňişliginde ýerleşdirilen, şonuň üçin iki klapany hem ýyly zonada ýerleşdirilip bilner. Bu gaýtalanmada prosesleriň zygiderliligine seredeliň.

Gaz bilen doldurylma porşeniň täsiri ýetmeýän aşaky nokadyna ýerleşen ýagdaýynda amala aşyrylýar, şu pursat içine goýberilme klapany açyk. İçine goýberilme porşeniň V_{1-2} ululyga süýşmegi bilen alnyp barylýar; regeneratoryň üstünden geçip, gaz sowaýar.

Giňelme, içine goýberme klapanynyň ýapyk halynda, porşeniň ýokarky iň ahyrky ýagdaýa süýşmeginde amala aşyrylýar. Daşyna goýberilme, porşeniň aşak süýşmeginde we çykyş klapanynyň açyk halynda bolup geçmek bilen sowadylýan obýektde ýylylygy alyp gitmek we gazyň regeneratorda daşky gurşawyň temperaturasyna çenli gyzdrylmagy bilen amala aşyrylýar. Porşeniň täsiri ýetmeýän göwrüminiň uly bolmagy silindri doldurmak üçin kompressordan gelýän gazyň mukdarynyň artdyrylmagyny talap edýär.

Gazyň bu goşmaça mukdary, umuman alanynda, ýitgini häsiýetlendirýär, ýöne onuň giňelme prosesine gatnaşmagy goşmaça sarp edilen işi kompensirleýär. 3.18-nji suratda indikator diagrammasynyň meýdanynyň (strihlenen bölegi) artmagy regeneratordan giňelýän gazyň goşmaça sowuklyk öndürjiliginde häsiýetlendirýär, şoňa laýyklykda bu sistemanyň netijeliligi örän ýokary bolup galýar. Bu kriogen gurluşy adaty detander bilen deňeşdirmäni diňe ýylylyk çalşyjylary seljermäni öz içine almak bilen amala aşyryp bolýandygyny bellemek gerek. Ulaldylan porşeniň täsiri ýetmeýän giňişligi detanderiň häsiýetnamasyny ýaramazlaşdyrýar, ýokary netijeliligi bolan regeneratör bu ýitgileri kompensirleýär. Bir basgançakly maşynda basyşlaryň gatnaşygy $\sigma = 5 \div 6$, tirsekli walyň aýlaw ýygylgy 500 aýl/min bolanda 55–60°K derejesine, deňeşdirilmede aňsatlyk bilen ýetmek bolýar. Konstruktiv taýdan detanderli refrižerator gaýtalanmasynyň elementleri ýylylyk nasosyndaky ýaly ýerine ýetirilýär. Käbir ýagdaýlarda detanderli refrižeratoryň regeneratory porşeniň içinde ýerleşdirilýär, bu bolsa agregaty has ykjam görnüşe getirýär. Bu gaýtalanma ýylylyk nasosyna garanynda termodinamiki taýdan has netijelidir, ýöne ýylylyk nasosynda porşeniň dykzlandyrylmagy ýeňil amala aşyrylýar we porşeniň ştoguna az agram düşýär.

Seredilen iki sany gazly sowadyjy maşynlar kesgitli artykmaçlygy özünde jemleýärler (klapanlar we porşeniň dykzlandyrylmagy ýyly zonada ýerleşýärler, bu bolsa olaryň ygtybarlylygyny artdyrýar; regeneratoryň ýokary netijeliligi; maşynlar gazdaky garyndylara duýgur dälirler; maşynyň konstruksiýasy deňeşdirilmede ýönekeý we ykjam). Görkezilen ýagdaýlardan ugur alyp, Mak-Magonyň we Jiffordyň sistemalary mikrokriogen gurluşlarynda öz orunlaryny tapdylar.

§ 3.7. Pes temperaturaly prosesleriň we gaýtalanmalaryň termodinamiki derňewi

Termodinamiki derňew usuly pes temperaturaly prosesleriň we gaýtalanmalaryň kämillik derejesini çuňňur derňemäge, dürli proseslerdäki ýitgini ýüze çykarmaga we pes temperaturaly desgalaryň görkezijilerini gowulandyrmagyň ýollaryny kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Pes temperaturaly prosesleriň termodinamiki derňewiniň döwrebap usulyny 1933-nji ýylda W. Kizom işläp düzýär. Bu usul termodinamikanyň birinji we ikinji kanunlaryny ulanmaklyga esaslanýar. Derňewiň düýp manysy dürli proseslerde öwrülişiksizliklerden ýitgileri hasaplamaklyga syrykdyrylýar. Bu ýerde energiýanyň başga bir görnüşe öwürlip biljek peýdaly energiýasynyň ýitgisi barada gürrüň gidýändigini aýratyn bellemeli, çünki termodinamikanyň ikinji kanunyna görä ýylylyk energiýasy diňe mehaniki we elektrik energiýasyndan başga energiýa doly öwürlip bilmeýär.

Häzirki döwürde öwürülen energiýany eksergiýa E diýip atlandyrmak kabul edilendir. Öwrülişikli proseslerde ýitgi ýokdur, ulgamyň entropiýasy we eksergiýasy üýtgemän saklanýar; öwrülişiksiz proseslerde entropiýa ösýär, eksergiýa bolsa kemelýär. Entropiýanyň artmagyny ýa-da eksergiýanyň üýtgemesini hasaplamak bilen, dürli proseslerde we gaýtalanmalarda öwrülişiksizlikden ýitgileri kesgitlemek bolar. Soňky ýyllarda pes temperaturaly ulgamlaryň termodinamiki derňew usuly giňden ulanylýar.

Islendik proseslerde peýdaly energiýanyň Π_i ýitgisi Klauziusyň formulasy boýunça kesgitlenilýär:

$$\Pi_i = T_1 \sum \Delta s_i, \quad (3.60)$$

bu ýerde:

$\sum \Delta s_i$ – prosese gatnaşan jisimleriň entropiýalarynyň üýtgemeleriniň jemi;

T_1 – daşky gurşawyň temperaturasy.

Islendik prosesin ýitgi koeffisiýenti Π_i ýitginiň sarp edilen işe l_h gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

$$\Omega_i = \frac{\Pi_i}{l_h}. \quad (3.61)$$

Birnäçe prosesleri özünde jemleýän gaýtalanmanyň ýitgisiniň doly koeffisiýenti:

$$\Omega = \frac{\Pi_1 + \Pi_2 + \dots + \Pi_n}{l_h} = \frac{\sum_n \Pi_i}{l_h} = \sum \Omega_i. \quad (3.62)$$

Şeýlelik bilen, öwrülišiksiz prosesde bolup geçýän ýapyk ulgamyň entropiýasynyň artmasy ýitgileri derňemek üçin ulanylyp bilner. Ýitginiň täsiri (Π_i) bu ululygy termodinamiki PTK η_T girizilende aýratyn aýdyň bolýar. η_T ululyk aşakdaky formula boýunça kesgitlenilýär:

$$\eta_T = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{id}} = \frac{l_{id}}{l_h}, \quad (3.63)$$

bu ýerde:

l_{id} – öwrülišikli ideal gaýtalanmada sarp edilen iş;

l_h – ideal gaýtalanmada hakyky sarp edilen iş.

(3.63) formula ýönekeý we ol giňden ulanylýar, ýöne çylşyrymly proseslerde we gaýtalanmalarda aýratyn elementleriň netijeliligini hasaba almazdan, ýitginiň täsirini integral bahalandyryar.

Eger ideal gaýtalanmada sarp edilen iş hakyky sarp edilen iş bilen ýitgileriň arasyndaky tapawut hökmünde kesgitlenende $l_{id} = l_h - \sum \Pi_i$, PTK η_T bilen ýitgileriň ähli kompleksiniň arasyndaky arabaglanyşyk alnyp bilner. Bu ululygy (3.63) formulada ornuna goýup, alarys:

$$\eta_T = \frac{l_h - \sum \Pi_i}{l_h} = 1 - \frac{\sum \Pi_i}{l_h} = 1 - \sum \Omega_i. \quad (3.64)$$

Şeýlelik bilen, PTK η_T -nyň strukturasyny we aýratyn Π_i ýitgileriň onuň ululygyna täsirini derňemek mümkinçiligi gelip çykýar. Şunuň ýaly zygiderliligiň netijesinde berlen usuly uniwersallaşdyrýan derňewiň çuňlugyna aralaşmak bolýar.

(3.64) formula boýunça hasaplamanynyň zygiderliligi aşakdakylardan durýar: gaýtalanma, her biri üçin entropiýalarynyň balansynyň deňlemesi düzülýän aýratyn proseslere (elementlere) bölünýär,

bu bolsa $\sum \Delta S_i$ we degişlilikde Ω_i kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Hasaplamanýň bu usuly umumy ýagdaýda

$$\Delta s_{1-2} = \int_2^1 \frac{dQ}{T} \quad (3.65)$$

formula boýunça hasaplanýan entropiýanyň üýtgemesini kesgitlemek üçin ýylylyk diagrammalarynyň ulanylmasy talap edýär.

Energetiki balansyň kömegi bilen ähli akymlyry kesgitlemek üçin öňürti gaýtalanmanyň adaty ýylylyk hasaplama amala aşyrylýar, ondan soň entropiýa usuly bilen ýitgi ululyklary we Ω_i kesgitlenilýär. Gaýtalanmanyň aýratyn parametrlerini (temperaturasyny, maşynyň PTK-ny we beýl.) üýtgetmek bilen, aýratyn prosesleriň öwrülişiksizligine olaryň täsirini yzarlamak bolar. Bu mümkin bolan ýagdaýlarda has umumy netijeleri almak üçin analitiki gatnaşyklary ulanmak maksadalaýykdyr. Bu halyň parametrleriniň funksiýasynda $\Delta s = f(P, T)$, şeýle hem gönüden-göni (3.65) formuladan prosesniň beýleki ähli parametrlerinden baglanyşyklykda entropiýanyň üýtgemesini kesgitlemäge mümkinçilik berýär.

Entropiýanyň üýtgemesini we ýitgileri kesgitlemegiň analitiki usuly diňe kesgitli ýönekeýleşdirmelerde mümkündür, bu bolsa, elbetde, netijeleriň takyklygyny peseldýär. Aýratyn hem bu ýokary basyşlar we pes temperaturalar (T_{kr} – golaýynda) çäginde real gazlaryň häsiýetlerini hasaba almak zerur bolan we termodinamiki diagrammalary ulanmak gerek bolan ýerlerde täsir edýär.

Aşakda has ýönekeý adiabatik-izotermik refrižerator gaýtalanmasy (3.19-njy surat) üçin analitiki gatnaşyklary ulanmak bilen, PTK we ýitgileri hasaplamaýyň mysalyna seredilýär. Gaýtalanmanyň amala aşyrylýan desgasy dört sany esasy elementden durýar: kompressordan, ýylylyk çalşyjydan, detanderden we ýüklenme ýylylyk çalşyjysyndan durýar; her bir elementde Π_i ýitgi bardyr.

Öwürülen energiýanyň jemi ýitgisi (eksergiýasy)

$$\sum \Pi_i = \Pi_k + \Pi_{yç} + \Pi_{det} + \Pi_{gyzd} + \Pi_{goşm}$$

$\Pi_{goşm}$ goşmaça ýitgileri hasaba alýar. (3.60) formuladan Π_i hasaplamak bilen, her bir element üçin entropiýanyň üýtgemesini kesgitläris.

Kompressorda gazyň gysylmasy. Bu prosesde entropiýanyň öwrülişiksiz üýtgemesi gysylma q_{gys} ýylylygy aýrylanda entropiýanyň üýtgemesiniň we ideal gazyň öwrülişikli izotermiki gysylmasynda $\Delta s_T = R \ln \sigma$ entropiýanyň üýtgemesiniň arasyndaky tapawut hökmünde kesgitlener:

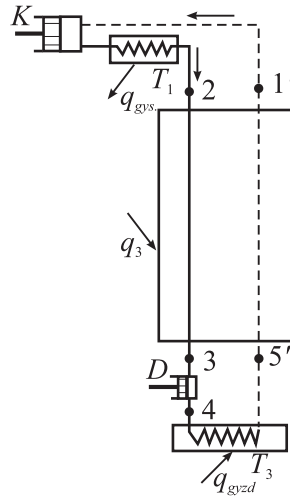
$$\sum \Delta s_K = \frac{q_{gs}}{T_1} - \Delta s_T = \frac{\eta_{iz}}{T_1} - R \ln \sigma = \left(\frac{1}{\eta_{iz}} - 1 \right) R \ln \sigma, \quad (3.66)$$

bu ýerde:

σ – gaýtalanmada basyşlaryň gatnaşygy;

η_{iz} – kompressoryň izotermiki PTK-sy.

3.19-njy surat. Adiabatik-izotermik gaýtalanmanyň shemasy



Ýylylyk çalşygyda ýylylyk çalyşma. Entropiýanyň doly üýtgemesi – bu akymalaryň gyzdyrylmagynda we sowadylmagynda entropiýalaryň üýtgemesiniň tapawudydyr:

$$\Delta s_{ý.ç.} = \Delta s_{1'-5'} - \Delta s_{2-3}$$

Izobarik prosesde ideal gaz üçin

$$\Delta s_{ý.ç.} = c_p \left(\ln \frac{T_{1'}}{T_{5'}} - \ln \frac{T_2}{T_3} \right).$$

T_1 , we T_5 , temperaturalar aşakdaky formulalar boýunça kesgitlenilýär:

$$T_1 = T_2 - \Delta t_{\dot{y}}; T_5 = T_3 - \Delta t_{\text{aş}},$$

bu ýerde: $\Delta t_{\dot{y}}$ we $\Delta t_{\text{aş}}$ – ýylylyk çalşyjynyň ýokarky we aşaky ahyrlarynda temperaturalar tapawudy.

Ahyrda alarys:

$$\sum \Delta s_{\dot{y}\dot{ç}} = c_p \ln \left[\frac{1 - \frac{\Delta t_{\dot{y}\text{ok}}}{T_2}}{1 - \frac{\Delta t_{\text{aş}}}{T_3}} \right]. \quad (3.67)$$

Detanderde giňelme. Bu prosesde entropiýanyň artmagy $q_{\dot{y}it}$ ýitgä ekwiwalent ýylylygyň degişli ortaça temperatura T_{or} gatnaşygy hökmünde kesgitlener:

$$\sum \Delta s_{\text{det}} = \frac{q_{\dot{y}it}}{T_{or}} = \frac{c_p (T_4 - T_{ad})}{\frac{T_4 + T_{ad}}{2}},$$

bu ýerde: T_{ad} – izoentrop giňelmäniň ahyryndaky temperatura.

Ideal gaz üçin gatnaşykdan alarys:

$$T_{ad} = T_3 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^\delta;$$

$$T_4 = T_3 \left\{ 1 - \eta_0 \left[1 - \left(\frac{1}{\sigma} \right)^\delta \right] \right\},$$

bu ýerde:

η_0 – detanderiň PTK-sy;

$\delta = \frac{k-1}{k}$ – adiabata görkezijisiniň funksiýasy.

T_{ad} we T_4 aradan aýryp we ony özgertmek bilen, alarys:

$$\sum \Delta s_{\text{det}} = \frac{2c_p (\sigma^\delta - 1)}{\left[\sigma^\delta + \frac{1 + \eta_0}{1 - \eta_0} \right]}. \quad (3.68)$$

Peýdaly ýylylyk ýüküni çykarmak. Bu prosesde entropiýanyň öwrülişiksiz üýtgemesi gaýtalanmanyň işçi jisimi we sowadylýan gurşaw üçin onuň üýtgemesiniň tapawudydyr:

$$\sum \Delta s_{\text{gyzd.}} = \Delta s_{4-5'} - \Delta s_{\text{gurş.}}$$

Sowadylýan gurşawyň T_0 temperaturasy T_3 deň diýip, alarys:

$$\sum \Delta s_{\text{gyzd}} = c_p \ln \frac{T_{5'}}{T_4} - \frac{c_p (T_{5'} - T_4)}{T_3}.$$

$T_{5'}$, we T_4 temperaturalary T_3 -ň üsti bilen aňladyp, alarys:

$$\sum \Delta s_{\text{gyzd}} = c_p \left\{ \ln \left[\frac{1 - \frac{\Delta t_{\text{aş}}}{T_3}}{1 - \eta_0 \left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta} \right)} \right] - \left[\eta_0 \left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta} \right) - \frac{\Delta t_{\text{aş}}}{T_3} \right] \right\}. \quad (3.69)$$

Goşmaça ýitgiler. Kompressoryň girişinde gazyň T_1 -den T_1 -e çenli gyzdyrylmasy we daşky gurşawdan göz önünde tutulmadyk ýylylyk akymlyary goşmaça ýitgileriň çeşmesi bolup durýar. Bu öwrülişiksiz prosesler bilen kesgitlenen entropiýanyň artmagy çak bilen aşakdaky ýaly ýazylar:

$$\sum \Delta s_{\text{goşm}} = \frac{c_p \Delta t_{\text{ýok}}}{T_1} + \frac{2q_3}{T_1 + T_3}. \quad (3.70)$$

Berlen gaýtalanmada işiň hakyky sarp edilmesi kompessoryň we detanderiň işleriniň tapawudy hökmünde kesgitlener:

$$l_{\text{hak.}} = l_{\text{k}} - l_{\text{det}}$$

ýa-da

$$l_h = \frac{RT_1 \ln \sigma}{\eta_{\text{iz}}} - h_0 \eta_0 \eta_{\text{meh}},$$

bu ýerde:

$h_0 = c_p (T_3 - T_{\text{ad}}) = c_p T_3 \left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta} \right)$ – detanderde entalpiýalaryň izoentropiki üýtgäp durmaklygy;

η_{meh} – detanderiň mehaniki PTK-sy.

Özgertmek bilen alarys:

$$l_h = \frac{RT_1}{\eta_{iz}} (\ln \sigma - D), \quad (3.71)$$

bu ýerde:

$$D = \left[\frac{T_3}{T_1} \frac{\left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta}\right)}{\delta} \eta_{iz} \eta_0 \eta_{meh} \right].$$

Alnan gatnaşyklar ähli prosesleriň energetiki Ω_k ýitgi koeffisiýentlerini we gaýtalanmanyň termodinamiki η_T PTK-ni kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Her bir proses üçin (3.61) formula boýunça kesgitläp, (3.64) formula ornuna goýup, aşakdaky aňlatmany alarys:

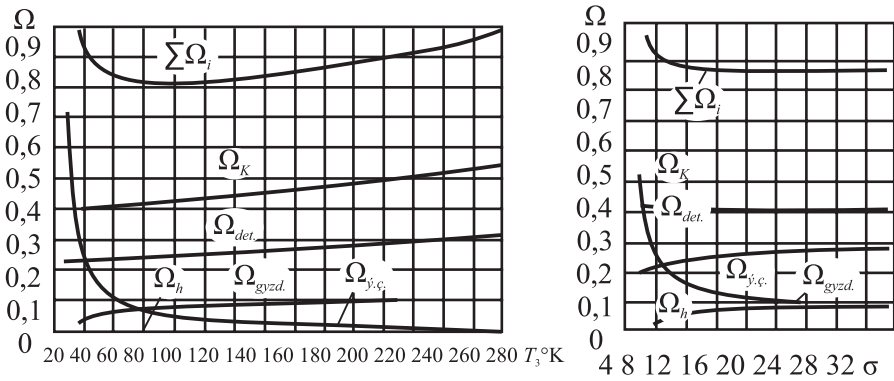
$$\eta_T = 1 - (\Omega_K + \Omega_{\dot{Y}C} + \Omega_{det} + \Omega_{gyzd} + \Omega_{goşm.})$$

ýa-da

$$\eta_T = 1 - \left\{ \frac{(1 - \eta_{iz})}{1 - \frac{D}{\ln \sigma}} + \frac{\eta_{iz} \ln \left[\frac{1 - \frac{\Delta t_{\dot{y}ok}}{T_2}}{1 - \frac{\Delta t_{aş}}{T_3}} \right]}{\delta (\ln \sigma - D)} + \frac{2\eta_{iz} (\sigma^\delta - 1)}{\delta (\ln \sigma - D) \left(\sigma^\delta + \frac{1 + \eta_0}{1 - \eta_0} \right)} + \frac{\eta_{iz}}{\delta (\ln \sigma - D)} \times \right. \quad (3.72)$$

$$\left. \times \left[\ln \frac{1 - \frac{\Delta t_{aş}}{T_3}}{\left[1 - \eta_0 \left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta} \right) \right]} - \left[\eta_0 \left(1 - \frac{1}{\sigma^\delta} \right) - \frac{\Delta t_{aş}}{T_3} \right] \right] + \frac{\eta_{iz}}{\delta (\ln \sigma - D)} \left(\frac{\Delta t_{\dot{y}ok}}{T_1} + \frac{2q_3/c_p}{T_1 + T_3} \right) \right\}.$$

Bu aňlatmadan birnäçe netijeler gelip çykýar. Eger detanderiň işi ni hasaba alynmasa (düzgün bolşy ýaly, $D \ll \ln \sigma$), onda kompressor-daky ýitgi Ω_k diňe η_{iz} -dan baglydyr. Ýylylyk çalşyjy-daky $\Omega_{ýyl.çal.}$ ýitgi $\ln \sigma$ ters proporsionaldyr, ol Δt_y we Δt_{as} temperaturalar tapawudyna we T_3 sowadylma derejesine baglydyr. Detanderdäki ýitgi ($D \ll \ln \sigma$ bolanda) basyşlaryň gatnaşygyndan we detanderiň PTK-den kesgitlenýär, ýöne detanderiň girişindäki temperatura bagly däldir. (3.72) formula η_T -ni gaýtalanmanyň islendik parametrine baglylykda derňemäge, aýratyn proseslere bolşy ýaly, ähli desganyň öwrülişik-sizlik derejesine onuň täsirini kesgitlemäge mümkinçilik berýär. Bu baglanyşygyň grafiki şekili 3.20-nji suratda getirilýär.



3.20-nji surat. Adiabatik-izotermik gaýtalanma üçin ýitgi koeffisiýentiniň $\sigma = 8$ -de T_3 temperaturadan (a) we $T_3 = 30K$ -de σ basyşlaryň gatnaşygyndan (b) baglanyşygy (işçi jisim-geliý; $\eta_{iz}=0.6$; $\eta_e=0.7$; $\eta_{meh} = 0.9$; $q_3 = 6kj/kg$; $\Delta t_y = 5 grad$; $\Delta t_{as} = \Delta t_y + q_3/c_p = 6.2 grad$; $T_1 = T_2 = 300 K$)

3.20-nji suratyň derňewi kompressordaky ýitginiň esasydygyny görkezýär, ýöne σ we T_3 -ň pes bahalarynda ýylylyk çalşyjy-daky ýitginiň kesgitleýjidiği görünýär, ol σ -ň, şonuň ýaly-da T_3 -ň artmagynda mese-mälum peselýär. Detanderdäki Ω_{det} ýitginiň udel agramy örän uludyr; onuň ululygyny kesgitleýän esasy faktor detanderiň PTK-sidir. Galan ýitgiler deňşdirilende onçakly uly däldir. Jemi ýitgileriň $\Sigma \Omega_i$ egrileri η_T -ň iň ýokary baha degişli bolan, σ we T_3 ululyklaryň kesgitli bahalarynda iň pes baha eýedirler [(3.64) formula seret]. η_T ululyk $\Sigma \Omega_i$ egride ordinata oky boýunça birlikleriň arasyndaky tapawut hökmünde kesgitlenýär.

Dördünji bab

Pes temperaturalar tehnikasy

§ 4.1. Kriogen ulgamlarynyň topary

1. Refrižerator ulgamlary, R .
2. Suwuklandyryjy ulgamlar, L .
3. Dargadyjy ulgamlar, D .

R kriorefrižerator ulgamlary $T < 120$ K temperatura interwalyn-da, islendik sowadylýan obýektiň ýylylygyny almak üçin ulanylýar.

L kriosuwuklandyryjylar $T < 120$ K ýagdaýda maddany gaz hal-yndan suwuk, gaty halyna geçirmeklik üçin ulanylýar.

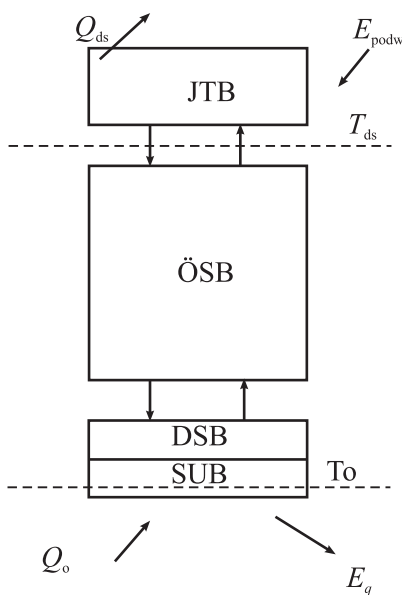
D dargadyjy (bölüji) ulgamlar pes temperaturada gaz erginlerini

dargatmak üçin (ýagny howany, te-bigy gazlary, koks we nebit gazlary-ny we ş.m.) ulanylýar.

Pes temperaturalar tehnikasynda, esasan hem, drossel guruluşlarynda, detanderlerde pes temperaturalary almaklykda işçi jisimleriň giňelme prosesleri giňden ulanylýar.

Kriorefrižeratorlaryň guruluşyny hem, bug kompressor sowadyjy desgalaryň guruluşy ýaly, umumy bir görnüşe getirmek bolýar (4.1-nji surat).

Ýokarky basgançak T_{ds} daşky gurşawyň temperaturasyndan ýokar-da ýerleşip, işçi jisimini taýýarla-mak üçin (işçi jisimi taýýarlaýyş basgançagy – JTB) ulanylýar. Bu



4.1-nji surat. Refrižeratoryň guruluş shemasy

basgançak desganyň işlemegi üçin gerek bolýan işçi jisimiň eksergiýasyny ýokarlandyrýar. Bu hadysa ýylylyk akymynyň belli bir mukdarynyň dasky gurşawa berilmegi bilen işçi jisimiň entropiýasynyň peselmeginde, basyşyň P_n -den P_m çenli ýokarlanmagy netijesinde ýerine ýetirilýär. JTB-yň ýerine ýetirýän işi haýsam bolsa bir görnüşli eksergiýanyň üpjün edilmegi bilen ýerine ýetirilýär, termomehaniki ulgamlarda, esasan hem, mehaniki iş, käýarym ýylylyk energiýasy ulanylýar. JTB-dan soňra işçi jisimi öňinçä sowatmak basgançagy (ÖSB) ýerleşýär. Bu basgançakda işçi jisimi ýylylygy regenerirlemek ýoly bilen sowadylýar. Doly sowadyş basgançagynda (DSB) işçi jisim içki sowadylma hadysasy netijesinde ulgamda gaty pes temperaturany almaklygy üpjün edýär. Sowuklygy ulanyjy basgançakda (SUB) obýektiň ýylylygyny Q_0 almaklyk bilen işçi jisimiň eksergiýasy ýokarlanýar (gerekli ýylylyk eksergiýa E_q obýekte berilýär).

Kriorefrižeratorlar içki sowadylma hadysasynyň hiline görä iki görnüşe bölünýär:

1. Gutarnykly sowadylma hadysasy işçi jisimiň drosselirlemegi netijesinde ýerine ýetirilýär.

2. Gutarnykly sowadylma hadysasy işçi jisimiň detanderde giňelmeği netijesinde ýerine ýetirilýär.

Berlen sistemada T_2 -daşky gurşawyň temperaturasyndan (howa, suw) aşak T_1 -temperatura çenli sowatmak we ony bu temperaturada saklamak, T_1 derejeden T_2 derejä Q_1 ýylylygy geçirmek talap edilýär. Termodinamikanyň II kanunyna laýyklykda, bu hili proses öz-özünden geçmeýär, bu diňe başga bir sistemanyň iş etmegi bilen mümkin bolýar. Meselem, mehaniki energiýanyň ýylylyga öwürilmegi ýa-da ýokary potensially ýylylygy ulanmak bilen amala aşyrylýar.

§ 4.2. Käbir termodinamiki gatnaşyklar

Ulgamy daşky gurşawyň (howa, suw) T_2 temperaturasyndan pes T_1 temperatura çenli sowatmak we ony şu temperaturada saklamak T_1 derejeden T_2 derejä Q_1 ýylylygy geçirmegi talap edýär. Termodinamikanyň ikinji kanunyna laýyklykda, bu hili geçiş prosesi öz-özünden

bolup bilmeýär, ol diňe başga bir sistemanyň iş ýerine ýetirmegi bilen amala aşyrylar.

Sistema berilýän dQ energiýa ulgamyň içki energiýasynyň dU üýtgemesine we sistemanyň daşky iş Pdv ýerine ýetirmegine sarp edilýär.

$$dQ = dU + Pdv. \quad (4.1)$$

Adiabatik prosesde $dQ = 0$ we

$$dU = -Pdv. \quad (4.2)$$

ýagny islendik gazyň daşyna iş etmegi bilen giňelmesi içki energiýasynyň kemelmegine, şonuň bilen birlikde gazyň temperaturasynyň hem peselmegine getirýär.

Sowadylma proseslerine seredilende:

$$di = dU + d(Pv) = dU + Pdv + vdP \quad (4.3)$$

baglanyşyk bilen kesgitlenýän i entalpiýa düşünjesi giňden ulanylýar. Bu ýerde: di – ulgamyň entalpiýasynyň üýtgemesi.

Bu baglanyşykdan peýdalanyp, termodinamikanyň birinji kanunyny (4.1) aşakdaky görnüşde getirmek bolar:

$$dQ = di - vdP. \quad (4.4)$$

Termodinamikanyň ikinji kanunynyň esasynda s entropiýanyň üýtgemesi:

$$dS = \frac{dQ}{T} \quad (4.5)$$

deňleme bilen aňladylýar. (4.1) we (4.4) deňlemeleri hasaba alyp, (4.5) formulany aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$dS = \frac{dU + Pdv}{T} = \frac{di - vdP}{T}. \quad (4.6)$$

Adiabatik proses üçin $dQ = 0$, şoňa laýyklykda $S = \text{const}$, ýagny entropiýa üýtgemän galýar (adiabatalar izoentropalar bilen gabat gelýär).

Bir tarapdan i we S ululyklaryň we beýleki tarapdan P we T termiki parametrleriň arasyndaky baglanyşygy tapalyň:

$$di = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dP \quad (4.7)$$

ýa-da

$$di = c_p dT + \left(\frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dP. \quad (4.8)$$

bu ýerde: c_p – hemişelik basyşda udel molýar ýylylyk sygymy.

Analogiýa boýunça

$$dS = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dP \quad (4.9)$$

ýa-da

$$dS = \frac{c_p}{T} dT + \left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dP \quad (4.10)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial T} \right)_p \quad (4.11)$$

bolany üçin

$$dS = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial \mathcal{G}}{\partial T} \right)_p dP \quad (4.12)$$

bolar.

Izoentalpiýa ($i = \text{const}$) proses üçin (4.3) deňlemäniň esasynda

$$di = dU + Pdv + v dP = 0 \quad (4.3a)$$

(4.1) we (4.5) deňlemelerden

$$TdS = dQ = dU + Pdv. \quad (4.13)$$

(4.3a) we (4.13) deňlemelerden taparys:

$$TdS + v dP = 0. \quad (4.14)$$

Soňra dS -ň bahasyny (4.12) den (4.14) goýup alarys:

$$c_p dT - T \left(\partial v / \partial T \right)_p dP + v dP = 0. \quad (4.15)$$

Soňky gatnaşykdan izoentalpiýa giňelmede (drosselirlemede) gazyň temperaturasynyň üýtgemesini häsiýetlendirýän α_i koeffisien-tiň aňlatmasyny almak bolýar:

$$\alpha_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{1}{c_p} \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right]. \quad (4.16)$$

α_i koeffisiýente **Joul-Tomsonyň differensial effekti** diýilýär.

Izoentropiýa proses üçin ($s = \text{const}$) (4.12) deňlemäniň esasynda izoentropiýa giňelmede gazyň temperaturasynyň üýtgemesini häsiýetlendirýän α_s koeffisiýent üçin aşakdaky aňlatmany alarys:

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p. \quad (4.17)$$

Alnan aňlatmadan görnüşi ýaly, α_s koeffisiýent α_i koeffisiýentden tapawutlylykda položitel ululykdyr: gazyň izoentropiýa giňelmesinde, nähili halda bolmagyna garamazdan, hemişe temperaturanyň peselmesi bolup geçer. Şeýle hem temperaturanyň artmagy we basyşyň peselmegi bilen (bu V -niň artmagyna getirýär), α_s artýar. Sowuklygy öndürmek üçin gazyň giňelmesinde seredilen prosesleri ulanýan pes temperaturalary almak tehnikasynda (4.16) we (4.17) aňlatmalaryň fundamental ähmiýeti bardyr.

§ 4.3. Sowuklygy almak

Sowadylma prosesini amala aşyrmak üçin entropiýasy diňe bir temperatura bagly bolman, eýsem başga gözegçilik edilýän parametre, meselem, basyşa bagly bolan işçi jisim (sowadyjy agent) zerurdyr. Bu hili baglanyşyk gazlar we buglar üçin häsiýetlidir. Sowadyjy desgalarda bu görkezijilere daýanyp, iki sany esasy prosesleri amala aşyrýarlar:

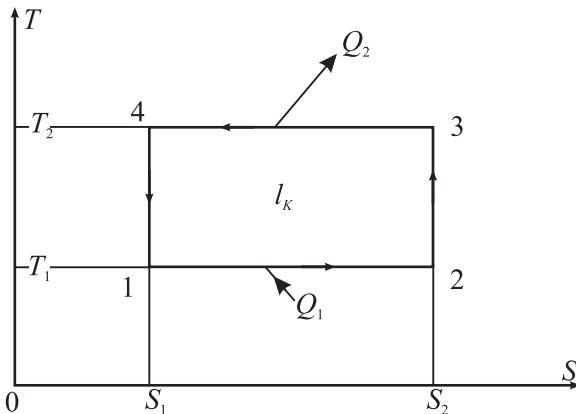
1. Hemişelik temperaturada entropiýanyň kemelmegi bilen alnyp barylýan izotermiki gysylma.
2. Basyşyň we temperaturanyň peselmegi bilen alnyp barylýan adiabatik giňelme.

Ähli mälim bolan sowadylma usullarynyň (mehaniki, magnit, elektrik) termodinamiki mazmuny birmeňzeşdir: diňe gözegçilik edilýän görkezijiniň (basyş, magnit meýdan, tok we ş.m.) häsiýetleri üýtgeýär.

Obýektiň üznüksiz sowadylmasyny amala aşyrmak üçin pes temperatura derejesinden ýokary temperatura derejesine wagt birliginde kesgitli ýylylyk mukdaryny bölüp çykarýan sowadyjy jisimi başlangyç ýagdaýyna getirmek, ondan soň prosesi gaýtalamak gerekdir. Bu sowadyjy gaýtalanmany düzýän sowadyjy jisimiň ýagdaýynyň üýtgemesiniň elementar prosesleriniň belli bir zygyderlikde gezeleşdirilmegi bilen alynýar.

Sowadyjy jisimiň fiziki häsiýetleri sowadylma şertlerinden gelip çykýan talaplary, birinji nobatda, sowadylma temperaturasyny kanagatlandyrmalydyr. Sowadyjy jisim hökmünde ammiak, freon, kömürturşy kislotasy, etilen, metan, kislorod, azot, neon, wodorod, geliý ulanylýar.

Real aýlawly prosesleriň netijeliligine baha bermek we olary derňemek üçin kesgitli iş sarp edilmek bilen teoretiki taýdan sowuklygyň iň ýokary mukdaryny almaga mümkinçilik berýän Karnonyň ters aýlawynyň ähmiýeti uludyr (4.2-nji surat).



4.2-nji surat. T - S diagrammada Karnonyň aýlawy

Karnonyň aýlawynyň sowadylma koeffisiýenti ýokary bolup, ol diňe T_1 we T_2 temperaturalaryň bahalary bilen kesgitlenilýär we sowadyjy jisimiň häsiýetine bagly däldir. 1–2-izoterma, bu ýerde

sowadylýan obýektiden Q_1 ýylylyk aýrylýar, 3–4-izoterma, bu ýerde Q_2 ýylylyk daşky gurşawa berilýär, 2–3 we 4–1 izoentropalar.

Karnonyň aýlawly prosesi (4.2-nji surat) iki sany izotermadan we iki sany adiabatadan durýar. Q_1 ýylylyk hemişelik we has pes temperaturada 1–2 çyzyk boýunça aýrylýar. Sowadyjy jisim adiabatiki gysylýar (2–3 çyzyk), bu bolsa onuň temperaturasynyň T_2 çenli artmagyna getirýär. Bu temperaturada Q_2 ýylylyk mukdary 3–4 çyzyk boýunça daşky gurşawa (howa ýa-da suw bilen sowadyлма) berilýär:

$$Q_2 = Q_1 + L_k. \quad (4.18)$$

bu ýerde: L_k – aýlawly prosesde sarp edilýän iş.

Soňra sowadyjy jisim adiabatiki giňelýär (4–1 çyzyk), bu bolsa onuň temperaturasynyň T_1 çenli peselmegi bilen alnyp barylýar. Şeýlelikde, işi jisim ilkibaşdaky ýagdaýyna gelýär.

Karnonyň gaýtalanmasy üçin

$$L_k = Q_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1}. \quad (4.19)$$

Karnonyň aýlawly prosesinde sarp edilýän iş pesdir we ol real gaýtalanmalaryň netijeliligine baha bermekde kriteriý bolup hyzmat edýär. (4.18) we (4.19) deňlemelerden aşakdaky gatnaşyk gelip çykýar:

$$Q_1 = Q_2 \frac{T_1}{T_2}. \quad (4.20)$$

Aýlawly prosesiň termodinamiki effektiwligini häsiýetlendirmek üçin T_1 temperatura derejesindäki sowuklyk mukdarynyň aýlawly prosesde sarp edilen işe bolan gatnaşygy bilen aňladylýan sowadyş koeffisiýentinden peýdalanylýar:

$$\varepsilon_k = \frac{Q_1}{L_k}. \quad (4.21)$$

Karnonyň aýlawly prosesiniň sowadyş koeffisiýenti

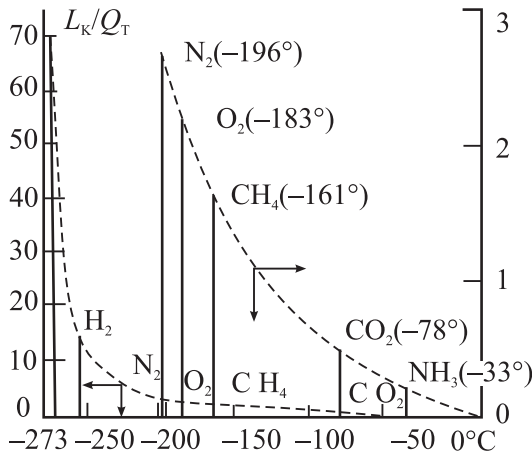
$$\varepsilon_k = \frac{Q_1}{L_k} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}. \quad (4.22)$$

(4.22) deňlemeden görnüşi ýaly, Karnonyň aýlawly prosesiniň sowadyş koeffisiýenti diňe T_1 we T_2 temperaturalaryň bahalary bilen kesgitlenilýär we sowadyjy jisimiň häsiýetine bagly däldir. 4.3-nji suratda L_k/Q_1 ululygynyň $T_2 = 288\text{K}$ (15°C) bahasynda T_1 -den baglylygynyň çyzgysy görkezilen. Çyzgydan görnüşine görä, sowadylma T_1 temperaturasynyň peselmegi bilen sarp edilýän iş, ylaýta-da, $T_1 < 20\text{K}$ bahasynda okgunly ösýär. Bu bolsa temperaturanyň peselmegi bilen sowuklygynyň artýandygyny aňladýar. Sowadylma temperaturasynyň peselmegi bilen real sikliň termodinamiki PTK-niň azalmagy goşmaça kynçylyk döredýär. Termodinamiki PTK:

$$\eta = \varepsilon_r / \varepsilon_k \quad (4.23)$$

bu ýerde: ε_r – real sikliň (2-21 boýunça) sowuklyk koeffisiýenti.

Meselem, eger $T_1 = 243 \div 273\text{K}$ bahasynda $\eta = 0,78 \div 0,89$ bolýan bolsa, $T_1 = 4 \div 20\text{K}$ -de termodinamiki PTK. $0,08 - 0,2$ çenli azalýar, bu temperaturanyň peselmeginde öwrülişiksiz ýitgileriň artmagy bilen baglanyşyklydyr.

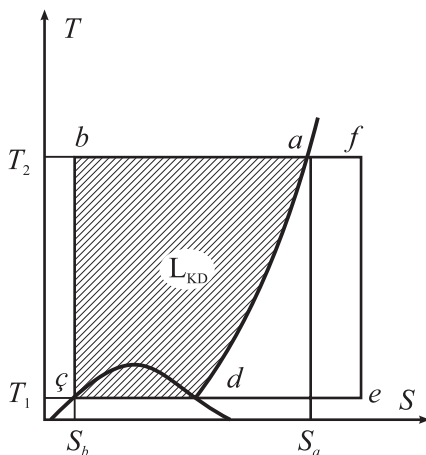


4.3-nji surat. Karnonyň aýlawly prosesinde L_k/Q udel işiň sowadylma temperaturasyna baglylygy (daşky gurşawyň 15°C temperaturasynda)

Gazy suwuklandyrmagyň ideal aýlawly prosesine seredeliň. Bu hili sikl 4.4-nji suratda görkezilen (T - S diagramma).

Diagrammanyň aşaky çep burçundaky ýapyk egri çyg buguň çä-gini çäklendirýär.

Gazyň ktiriki temperaturasyndan örän ýokary bolan T_2 temperaturada **ab** izoterma boýunça P_1 basyşdan P_2 basyşa çenli gaz gysylýar, soňra **bc** izoentropa boýunça P_1 basyşa çenli giňelýär, şunlukda, gazyň doly suwuklandyrylmasy bolup geçýär (ç nokat



4.4-nji surat. Gazy suwuklandyrmagyň ideal aýlawly prosesi

doýgun suwuklygyň egrisinde ýatýar). Ýylylyk P_1 basyş astynda suwuklygyň T_1 gaýnama temperaturasynda aýrylýar (**çd**-çyzyk). Görnüşi ýaly, suwuklyk d we $ç$ nokatlarda entalpiýanyň tapawudyna ekwiwalent bolan ýylylygy, ýagny P_1 basyşda bugarmagyň gizlin ýylylygyny aýyrmaga ukyplydyr, d nokada degişli bolan doýgun bug **da** izobaranyň ugry boýunça T_2 temperatura çenli gyzýar we aýlawly prosesleşýär.

Izotermiki gysylanda:

$$Q_2 = Q_1 + L_{id} \quad (4.24 \text{ a})$$

formula bilen kesgitlenilýän Q_2 ýylylyk mukdary bölünip çykýar.

Bu ýerde:

L_{id} – ideal aýlawly prosesde sarp edilýän iş;

Q_1 – sowadyjy jisimiň alyp gidýän ýylylyk mukdary (4.4-nji suratda aralykda bugarmanyň gizlin ýylylygy we **da** izobara boýunça gyzdyrylma ýylylygy).

Görnüşü ýaly:

$$Q_2 = T_2 (S_a - S_b) \quad (4.24)$$

$$Q_1 = i_a - i_{ç} \quad (4.25)$$

bu ýerde: $i_a, i_{ç}$ – gaýnama temperaturasynda we P_1 basyşda gazyň we suwuklygyň entalpiýasy.

Getirilen deňlemelerden aşakdaky aňlatma gelip çykýar:

$$L_{id} = Q_2 - Q_1 = T_2 (S_a - S_b) - (i_a - i_ç) = T_2 \Delta S - \Delta i, \quad (4.26)$$

bu ýerde: ΔS we Δi – şol bir P_1 basyşa degişli bolan T_2 başlangyç temperaturada gazyň we gaýnama temperaturasynda suwuklygyň entropiýasynyň we entalpiýasynyň bahalarynyň tapawutlary.

Ideal aýlawly prosesde sarp edilýän iş Karnonyň aýlawly prosesindäkä garanynda azdygyna göz ýetirmek kyn däl. Bu ýylylygyň Q_1 ähli mukdarynyň has pes T_1 temperatura derejesinde aýrylmalydygy bilen düşündirilýär, şol bir wagtyň özünde ideal siklde onuň bir bölegi temperaturanyň has ýokary bahasynda (4.4-nji surat) **da** çyzygyň ugry boýunça aýrylýar. 4.4-nji suratda **çda** çyzygyň aşagyndaky meýdan Karnonyň aýlawlyndaky Q_1 degişli bolan **çde** çyzygyň aşagyndaky meýdana deňdir, şeýlelik bilen, Karnonyň aýlawlyndaky sarp edilen iş ideal siklde sarp edilen işi häsiýetlendirýän **abçd** meýdandan uly bolan **çefb** meýdana ekwiwalentdir.

4.1-nji tablisa

Ideal sikl L_{id} we Karnonyň L_k sikli boýunça gazlary suwuklandyrmaga sarp edilýän iş

Gaz	Kadaly şertlerde gaýnama temperaturasy, T, K	Suwuklandyrmada aýrylýan ýylylyk, Δi , kJ/kg	Bug emele gelmegiň gizlin ýylylygy, r, kJ/kg	Ideal sikl boýunça iş, L_{id} , Mj/kg	Karnonyň sikli boýunça iş, L_k , Mj/kg	L_{id}/L_k
Geliý	4,2	1565	20,3	6,85	110	0,063
Wodorod	20,4	3960	455	11,9	54,3	0,219
Azot	77,4	434	197	0,79	1,25	0,635
Howa	82	429	205	0,74	1,13	0,660
Kislorod	90,2	407	213	0,64	0,95	0,674
Metan	111,7	914	507	1,11	1,53	0,720
Etilen	169,4	666	482	0,43	0,52	0,830

4.1-nji tablisada 1 kg suwuk gazy almak üçin zerur bolan Karnonyň aýlawly L_k -nyň we ideal aýlaw boýunça L_{id} -iň bahalary getirilen.

Hasaplamalar $T_2 = 300 \text{ K}$ we $P_1 = 0,1 \text{ MPa}$ bahalarda ýerine ýetirilen, şeýle hem bu tablisada bug emele gelmeginiň gizlin ýylylygy we 1 kg gazy suwuklandyrmakda aýrylmaly doly ýylylyk, ýagny Δi görkezilen.

Geliý bilen wodorod üçin alnan netijeleri deňeşdirmek gyzyklydyr. Bug emele gelmeginiň gizlin ýylylygy az bolan we şol bir wagtyň özünde pes gaýnama temperaturaly geliý suwuklandyrylanda ideal aýlawly prosesde gaýnama temperatura görä has ýokary temperaturada $98,7\%$ ýylylyk aýrylýar. Karnonyň aýlawly prosesi boýunça sowadylma koeffisiýentiň örän az bahasynda ($\epsilon_k = 0,014$), temperaturanyň has pes bahasynda (42 K), ýylylygyň ählisi alnyp gidilýär. Ideal aýlawly proses boýunça wodorod suwuklandyrylanda $88,8\%$ ýylylyk gaýnama temperaturasyndan ýokary bolan temperaturada alnyp gidilýär, bu ýagdaýda Karnonyň aýlawly prosesiniň koeffisiýenti $0,07$ -e çenli artýar. Geliý we wodorod üçin 4.1 -nji tablisada getirilen görkezijileriň gatnaşyklary şunuň bilen düşündirilýär.

Gazlary suwuklandyrmagyň ideal aýlawly prosesini amala aşyrmak mümkin däl diýen ýalydyr, mysal üçin, howany suwuklandyrmak üçin ony $50\,000 \text{ MPa}$ ($500\,000 \text{ kg} \cdot \text{g}/\text{sm}^2$) çenli gysmak gerek bolardy.

Senagat tejribesinde pes temperaturany almagyň üç sany umumy usullary ulanylýar:

- a) pes temperaturada gaýnaýan suwuklandyrylan gazyn bugarmasy;
 - b) Joule-Tomsonyň efektini ulanmak (drosselirleme);
 - ç) daşky iş etmek we etmezlik bilen gazyň adiabatik giňelmesi.
- Köplenç ýagdaýda, bu usullar utgaşdyrylýar.

Pes temperaturada gaýnaýan suwuklyklaryň bugarmasyna esasanan sowadyjy aýlawly prosesler aram sowadylma ulgamynda örän giňden ýaýrandyr.

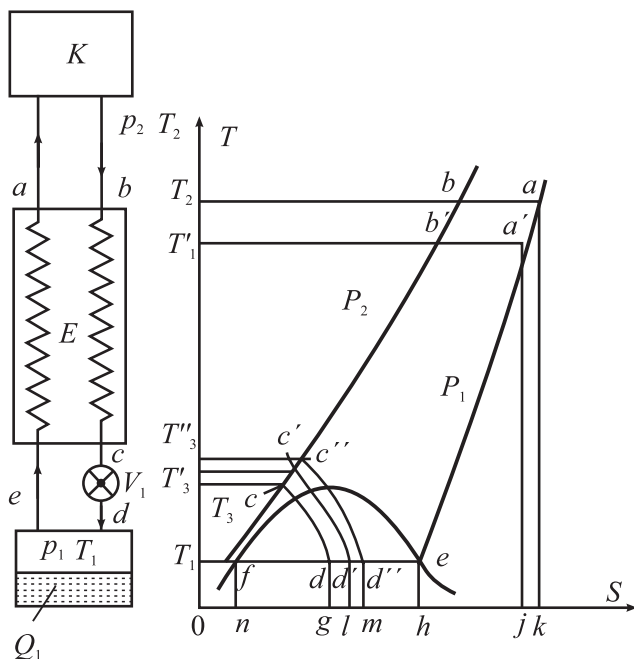
Kriogen tehnikaasy ylmy-tehnikanyň 120 K -den aşak bolan pes temperaturalary (kriogen temperaturalary) almaklygy, belli bir derejede saklamaklygy we ulanmaklygy öwrenýän pudaklarynyň biridir. Esasy ýerine ýetirilýän meseleler: gazlaryň suwuklyga geçmegi, pes temperaturada suwuk gaz erginleriniň dargamagy, ýokary geçiriji we elektro-tehniki gurluşlaryň temperaturalaryny belli bir derejede saklamak.

§ 4.4. Ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma we drossel gurluşlary bolan sowadyjy desgalar

A. Ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma

Bu ýönekeý aýlaw XIX asyryň ahyrlarynda howany suwuklandyrmak üçin K.Linde tarapyndan hödürilenildi. Ilki bilen ýönekeý drosselirlenmeli teoretiki sowadyjy aýlaw seredeliň, bu aýlawda suwuklandyrylan gaz çykarylman, has pes T_1 temperatura derejesinde Q_1 ýylylyk berilmegi bilen bugarýar.

Howa basyşyň P_1 we temperaturanyň T_2 bahasynda kompressora düşýär we ol gysylandan soň P_2 we T_2 bahalar bilen häsiýetlendirilýär, ýagny proses izotermiki ýagdaýda amala aşyrylýar ($P_2 > P_1$).



4.5-nji surat. Ýönekeý drosselirlmeli aýlaw:

a) aýlawyň shemasy; b) T - S diagrammada aýlawyň şekili

Soňra gysylan howa P_2 hemişelik basyşda E ýylylyk çalşyjyda T_2 temperaturadan T_3 temperatura çenli sowaýar. V_1 drossel wentiliniň oň ýanynda gazyň ýagdaýy c nokat bilen aňladylýar. V_1 – wentilde

P_2 -den P_1 basyşa çenli gazyň drosselirlenmesi hemişelik entalpiýada ($i = \text{const}$) amala aşyrylýar we ol gazyň sowamagyna alyp barýar; gazyň drosselirlenmeden soňky ýagdaýyny häsiýetlendirýän d nokat geterogen çäkke ýerleşýär, ýagny gazyň bölekleyin suwuklandyrylmasy bolup geçýär.

Aýlawyň shemasy we onuň T - S diagrammada aňladylyşy aşakdaky suratda görkezilen (4.5-nji *a*, *b* surat).

Suwuklandyrylan gazyň otnositel mukdary x belli bolan ryçagyň düzgüni boýunça degişli kesimleriniň gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

$$x = \frac{de}{ef}.$$

e we f nokatlar doýan buguň we suwuklygyň T_1 temperaturada we P_1 basyşdaky ýagdaýyny şekillendirýärler. Emele gelen suwuklandyrylan gaz daşyndan berilýän Q_1 ýylylygyň täsiri astynda buga rýar we suwuklanmadyk gaz bilen bilelikde ýylylyk çalşyja düşýär, ol ýerde hem başlangyç T_2 temperatura çenli gyzdrylýar. Seredilýän nazary aýlawda ýylylyk çalşyjy daşky gurşawdan ýylylyk almaýar (adiabatiki şert), onuň ýyly ahyrlarynda iki gaz akymalarynyň temperaturalary birmeňzeşdir we T_2 deňdir ($\Delta T_r = 0$).

T - S diagrammada (4.5-nji *b* surat) stasionar proses şekillendirilendir. Režim doly kadalaşýança gazyň endigan sowadylmasy bolup geçýär ($T_2 < T_{\text{inw}}$).

T_1 derejede aýlawda berilýän ýylylyk, ýagny aýlawyň Q_1 sowuklyk öndürjiligi T - S diagrammada meýdan $dehgd = i_e - i_d$ bilen aňladylýar.

K-kompressordan aşakda ýerleşýän shemanyň bir bölegine seredeliň. 1 kg ýa-da 1 mol sirkulirlenýän gazyň energetiki balansyny entalpiýanyň üsti bilen aňlatmak bolar:

$$i_a = i_b + Q_1, \quad (4.27)$$

bu ýerde:

$$Q_1 = i_a - i_b = \Delta i_r. \quad (4.28)$$

Şeýlelikde, ýönekeý drosselirlenmeli aýlawyň sowuklyk öndürjiligi ýylylyk çalşyjynyň ýyly ahyrlarynda P_1 we P_2 basyşlarda we T_2 temperaturada entalpiýanyň tapawudyna, ýagny izotermiki gysylma

netijesinde gazyň entalpiýasynyň kemelmegine deňdir. Bu tapawut drosselirlemäniň Δi_T izotermiki effekti diýlip atlandyrylýar.

Teoretiki aýlawda kompressorda sarp edilen iş izotermiki gysylma işine deňdir:

$$L_{iz} = Q_2 - Q_1 = Q_2 - \Delta i_T = T_2(s_a - s_b) - (i_a - i_b). \quad (4.29)$$

Häsiyetleri boýunça ideal gazlara golaý gazlar üçin

$$L_{iz} = RT_2 \ln \frac{P_2}{P_1}, \quad (4.30)$$

R – gaz hemişeligi.

Nazary aýlawyň sowadyjy koeffisiýenti

$$\varepsilon_T = \frac{Q_1}{L_{iz}} = \frac{\Delta i_T}{T_2(S_a - S_b) - (i_a - i_b)} = \frac{\Delta i_T}{T_2(S_a - S_b) - \Delta i_T}. \quad (4.31)$$

Hakyky işçi aýlawyň ýylylyk çalşyjysynyň ýyly ahylarynda hemişe belli bir temperaturalaryň tapawudy bolýar, şoňa görä-de $T'_2 < T_2$ temperaturada çykýan ters akymynyň ähli sowuklygyny reku-perirmek mümkin däl. 4.5-nji b suratda ýylylyk çalşyjydan çykýan gazyň ýagdaýy a' nokat bilen aňladylýar. Degişlilikde, gysylan gaz has ýokary $T'_3 > T_3$ temperatura çenli sowadylýar, onuň ýagdaýy c' nokat bilen aňladylar hem-de

$$i'_a - i'_e = i_b - i'_c \quad (4.32)$$

görnüşde berler.

Bu ýerde: $i'_c > i_c$.

Drosselirlemeden soň emele gelen çyg buguň doýgunlyk derejesi kiçi bolar, çünki onuň entalpiýasy ýokarydyr (d' nokat). Aýlawyň sowuklyk öndürjiligi hem azalar we

$$Q'_1 = i_e - i'_d$$

bolar, ýagny ol nazary aýlawdan $Q_N = i'_d - i_d$ esse kiçi bolar.

Ýylylyk balansyndan gelip çykyşyna görä, nedorekuperasiýa netijesinde sowuklyk öndürjiliginin azalmasy aşakdaky deňleme bilen aňladylar:

$$Q_N = i'_d - i_d = i'_c - i_c = i_a - i'_a. \quad (4.33)$$

$\Delta T = T_a - T'_a$, adatça, birnäçe gradusy berýänligi sebäpli (4.15), temperaturanyň bu interwalynda ýylylyk sygymynyň üýtgemesi örän az bolar we

$$Q_N = \bar{c}_p(T_a - T'_a) = \bar{c}_p\Delta T_T \quad (4.34)$$

hasap etmek bolar.

4.5-nji b suratda T - S diagrammada

$$Q_N = \text{meýdan } aa'jka = \text{meýdan } dgld'd.$$

Hakyky aýlawda sowuklyk öndürjiligi azalmagynyň beýleki sebäbi hem daşky gurşawdan ýylylyk akymynyň gelmegidir, başgaça aýdylanda, daşky gurşawyň sowuklyk ýitgisidir: Q_{ds} . Olaryň täsiri drossel wentiliniň oň ýanynda gysylan gazyň temperaturasynyň artmagynda ýüze çykýar, bu ýerde gazyň ýagdaýy c'' ($T''_3 > T'_3$ we $i''_c > i'_c$) nokat bilen aňladylar.

Ýylylyk balansynyň esasynda

$$Q_{ds} = i''_c - i'_c = i''_d - i'_d. \quad (4.35)$$

T - S diagrammada $Q_{ds} = \text{meýdan } d'ldm'd'$ bilen aňladylýandygy görünýär.

Hakyky aýlawda peýdaly sowuklyk öndürjiligi T - S diagrammada $Q_1^R = \text{meýdan } d''mhed''$ ýa-da

$$Q_1^R = Q_1 - Q_N - Q_{ds} = \Delta i_T - \sum Q, \quad (4.36)$$

bu ýerde: $\sum Q = Q_N + Q_{ds}$.

Nazary aýlawyň (4.5-nji surat) sowadyjy koeffisiýenti kesgitle-nende gazyň izotermiki gysylmasy göz önünde tutulýardy. Hakykatdan bolsa gysylma prosesi izotermiki dälir we hakyky gysylma işi izotermikiden takmynan 70% ýokarydyr (kompressoryň izotermiki PTK-si $\eta_{iz} = 0,59$ we $1/\eta_{iz} = 1,7$).

Hakyky sowadyjy aýlaw hasaplananda onuň ideal şertlerden tapawudyny göz önünde tutmalydyr.

Effektiwliginiň peselmegi gidrawliki garşylyklaryň täsiri netijesinde hem bolup bilýär, bu bolsa hasaplamalarda göz önüne tutulan dälir.

Indi bolsa ýönekeý drosselirlmeli suwuklandyrylan gazy daşy-na berýän teoretiki gaýtalanma seredeliň (4.6-njy surat). Ol ýokarda görkezilen (4.5-nji surat) ýapyk gaýtalanmadan tapawutlydyr, ýagny bu gaýtalanmada suwuklanmadyk gazyň ýylylyk çalşyjydan geçýän ters akymy gysylan gazyň göni akymyndan x ululykça azdyr (gysylan gazyň göwrümleýin ýa-da massalaýyn birliگیçe suwuklandyrylan gazyň mukdary). Suwuklandyryma prosesiniň kadaly geçme-gi üçin gaýtalanma şonça mukdardaky gaz T_2 temperatura bilen be-rilmelidir.

Ýylylyk balansynda

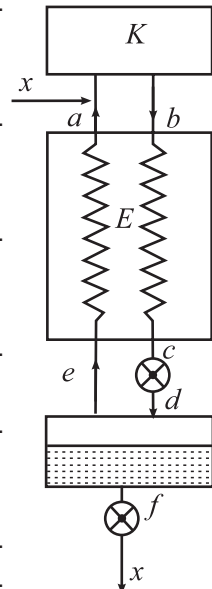
$$i_b = (1 - x_T)i_b + x_T i_f \quad (4.37)$$

suwuklandyryma koeffisiýenti

$$x_T = (i_a - i_b)/(i_a - i_f) = Q_1/(i_a - i_f) = \Delta i_T/(i_a - i_f), \quad (4.38)$$

bu ýerde: $i_f - P_1$ basyşda we T_1 temperaturada suwuk-lygyň entalpiýasy.

P_2 we T_2 inwersiýa egrisinde ýatýan nokatlara gabat gelende x_T koeffisiýent iň ýokary baha eýe bo-lar. Meselem, howa üçin $T_2 = 293$ K temperaturada x_T -ň maksimumy $P_2 = 44$ MPa basyşda alnar, ýöne inžener hasaplamalara görä, hereket edýän desga-larda $P_2 < 20$ MPa deňdir. Wodorod üçin $T_2 = 80$ K temperaturada (suwuk azot bilen sowadylma) $P_2 = 15.4$ MPa optimal bolup durýar, bu hem tej-ribede drosselirlenmeli aýlaw boýunça wodorody suwuklandyrmakda ulanylýar. Geliý üçin I.L. Zel-manowyň alan maglumatlaryndan peýdalanylýp we $T_2 = 15$ K diýip alsak (wakuum astynda gaýnaýan, suwuk wodorod bilen sowadylma), $P_2 = 3$ MPa opti-mal bahany alarys. Şunlukda, P_2 basyşy takyk saýla-mak zerurlygy talap edilmeýär, çünki x_T -ň P_2 bagla-nyşygy aňladýan egrileri ýaýbaň maksimuma eýedirler. Bu G.Jonstonyň we beýlekileriň berýän maglumatlaryna görä, ýagny wodorod üçin T_2 tem-peraturanyň dürli bahalarynda x_T -ň P_2 -den bagla-



4.6-njy surat.
Ýönekeý
drosselirlenmeli
we suwuklygy
daşy-na çykarýan
schema

nyşygyndan görünýär. (4.38) deňlemedäki entalpiýalaryň tapawudy $(i_a - i_p)$ gazy doly suwuklandyrmak üçin ondan alyp gidilmeli ýylylyga degişlidir; T - S diagrammada bu meýdan *aefnka* (4.5-nji b surat) bilen aňladylýar. Bu ýylylygyň mukdary gazyň tebigatyna we onuň T_2 başlangyç temperaturasyna baglydyr.

Suwuklandyrylan gazyň massa birligine düşýän energetiki harajet (4.30) deňlemäniň esasynda kesgitlenilýär:

$$L_{iz} = RT_2/x_T \cdot \ln P_2 / P_1. \quad (4.39)$$

Hakyky gaýtalanma üçin suwuklandyрма koeffisiýenti kesgitle-nende nedorekuperasiýa netijesinde Q_N we daşky gurşaw $Q_{d.s.}$ sowuklyk ýitgisini göz önünde tutmaly. Bu ýagdaýda

$$x_R = \Delta i_T - Q_N - Q_{d.s.} / (i_a - i_p) - Q_N. \quad (4.40)$$

$(i_a - i_p) \gg Q_N$ bolany üçin (4.40) deňleme aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$x_R \approx \Delta i_T - Q_N - Q_{d.s.} / (i_a - i_p) = (i_a - i_b) - Q_N - Q_{d.s.} / (i_a - i_p). \quad (4.41)$$

Gysylma işi ýokarda görkezilişi ýaly, kompressoryň izotermiki PTK-ni hasaba almak bilen kesgitlenýär.

B. Ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma boýunça işleýän desgalar.

Ýönekeý drosselirlenmeli gaýtalanmalaryň netijeliligi örän pesdir, ýagny bu gaýtalanmada sowuklygy almak ýa-da gazlary suwuklandyrmak energiýanyň uly mukdarda sarp edilmesini talap edýär. Ondan başga-da bu gaýtalanmany amala aşyrmak üçin inwersiýa temperaturasy daşky gurşawyň temperaturasyndan ýokary bolan gazlary ulanmaga ýaramlydyr, şonuň üçin hem neon, wodorod, geliý bu gaýtalanmada işçi jisim bolup bilmeýär we olary suwuklandyrmak mümkin däldir. Şol bir wagtyň özünde bu gaýtalanma örän ýönekeýligi bilen tapawutlanýar.

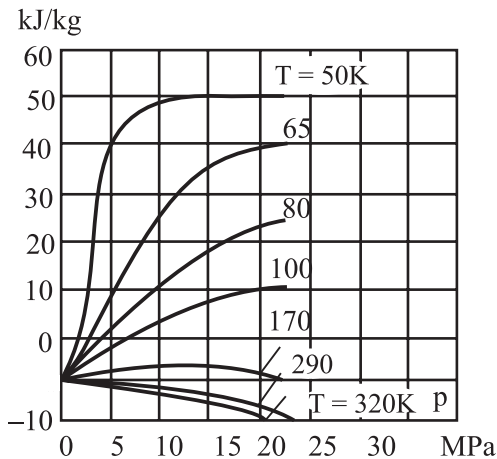
Beýan edilen sebäplere görä, ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma energiýa sarp edijiliginiň kesgitli ähmiýeti bolmadyk, kiçi öndüriljekli desgalar üçin kabul edilýär. Rektifikasiýa usuly bilen howany bölmek üçin hödürlenen desgada bu gaýtalanma ulanylýar. Häzirki döwürde 30 m³/sag gaz görnüşli kislorod öndürýän desgalarda ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma ulanylýar.

Ýönekeý drosselirlenmeli gaýtalanma esaslanan, sowadyjy jisimiň üstünde seýreklandirme döretmek mümkinçiligi bolan sowadyjy sistemalar radioelektron gurluşlary 80 K ýa-da ondan hem aşak temperatura çenli sowatmakda ulanylýar.

§ 4.5. Drosselirlenmeli we gazy aralyk sowadylmaly gaýtalanma hem-de bu gaýtalanma boýunça işleýän desgalar

A. Drosselirlenmeli we gazy aralyk sowadylmaly gaýtalanma

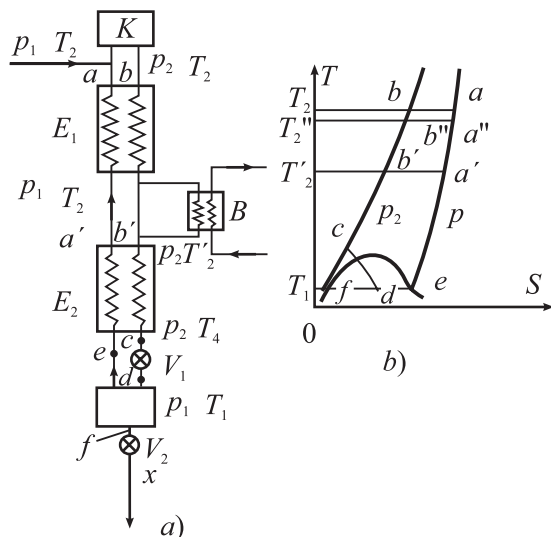
Bu gaýtalanmanyň tapawutly aýratynlygy kömekçi sowadyjy jisim bilen T_2-T_1 diapazonda gazy aralyk sowadylmadan durýar, bu bolsa drosselirlenmäniň izotermiki effektiniň artmagyna getirýär. Meselem, howa üçin 293-den 228-çenli sowadyлма (-45°C) Δi_T -ň 1,8 esse ($P_2=20$ we $P_1=0,1$ MPa-da) artmagyna getirýär. Şol bir wagtyň özünde howany -45°C -e çenli sowatmak goşmaça energetiki harajatlary az talap edýär.



4.7-nji surat. Dürli temperaturada we basyşda neony drosselirlemegiň izotermiki effekti

Inwersiýa temperaturalary pes bolan neony, wodorody we gelini suwuklandyrmak örän pes temperatura çenli aralyk sowadyлма şertinde amala aşyrylýar (neon bilen wodorody suwuk azot bilen, gelini

bolsa suwuk wodorod bilen sowadyrlyklar). 4.7-nji suratda neon üçin Δi_T -ň basyşa (P) we temperatura (T) baglylykda üýtgemesi görkezilen. Seredilýän gaýtalanma T_1 derejede sowuklygy almaklyga, şonuň ýaly-da gazy suwuklandyrmakda hyzmat edip biler.



4.8-nji surat. Drosselirleme we aralyk sowadylmaly aýlaw:

*a – aýlawyň shemasy; b – aýlawyň T-S – diagrammada şekillendirilişi;
B – bugardyjy*

4.8-nji suratda gaýtalanmanyň shemasy we onuň T-S diagrammada şekillendirilişi ýerleşdirilen. Gaz deslapky E_1 ýylylyk çalşyjydan geçip, daşyndan berilýän sowadyjy jisimiň kömegi bilen (howa üçin – ammiak ýa-da freon, wodorod ýa-da neon üçin – suwuk azot) bugardyjyda sowaýar. Soňra gaz esasy E_2 ýylylyk çalşyja düşýär, ol ýerde berlen gaz pes basyşly gazyň ters akymy bilen sowadylýar. Gazyň giňelmesi ýygnaýjy gaba V_1 drosseliň üsti bilen amala aşyrylýar, ol ýerde suwuklyk Q_1 ýylylygy alyp gitmek bilen bugaryýar ýa-da geljekde ulanylmak üçin çykarylýar.

Görşümüz ýaly, gaýtalanmanyň bugardyjydan aşakda ýerleşýän bölegi (4.8-nji surat) ýönekeý drosselirlenmeli gaýtalanma meňzeş bolup durýar (4.5-nji surat); onuň bir tapawudy, ýagny E_2 ýylylyk çalşyja gelýän gazyň temperaturasy ep-esli pesdir, çünki ol kompressoryň sowadyjysyndaky sowadyjy suwuň temperaturasy bilen

däl-de, bugardyjdaky sowadyjy jisimiň T_2 gaýnama temperaturasy bilen kesgitlenýär. Şonuň üçin suwuklandyrylan gazy çykarylmaýan, aralyk sowadylmaly ideal gaýtalanmanyň Q_1' suwuklyk öndürijiligi (4.28) meňzeşlikde aşakdaky deňleme bilen aňladylar:

$$Q_1' = i_a' - i_b' = \Delta i_T' \quad (4.42)$$

ýagny bu aralyk sowadylmanyň T_2 temperatura derejesindäki drosselirlenmäniň izotermiki effektine deňdir.

Gaýtalanmada sarp edilen iş:

$$L_T = L_{iz} + L_{ar.s.}, \quad (4.43)$$

bu ýerde:

L_{iz} – kompressorda izotermiki gysylma işi;

$L_{ar.s.}$ – aralyk sowadylmaly gaýtalanmada nazary iş.

E_2 ýylylyk çalşyjynyň ýyly ahyrlarynda Q' doly däl rekuperasiýa netijesinde hem-de $Q'_{d.s.}$ daşky gurşawyň suwuklyk ýitgisini hasaba almak bilen real gaýtalanmanyň peýdaly suwuklyk öndürijiligi aşakdaky deňleme bilen aňladylar:

$$Q^h_1 = Q'_1 - Q'_N - Q'_{d.s.} = \Delta i_T' - Q'_N - Q'_{d.s.} \quad (4.44)$$

Bu gaýtalanmanyň düýpli aýratynlygy iki dürli T_1 we T_2 temperatura derejelerinde suwuklyk ýitgisini kompensirlenmäge mümkinçiligi bilen baglydyr, ýönekeý drosselirlenmeli gaýtalanmada ähli ýitgiler iň pes T_1 temperatura derejesinde kompensirlenýärler.

Gaýtalanmanyň aýratyn bölekleri üçin ýylylyk balansynyň deňlemesini düzüp, bugardyjyda gaýnaýan sowadyjy jisime berilýän ýylylygyň mukdaryny taparys:

$$Q_b = (\Delta i_T)' - (\Delta i_T) + (Q_N - Q'_N) + (Q_{d.s.} + Q''_{d.s.}), \quad (4.45)$$

bu ýerde:

$\Delta i_T - T_2$ derejede drosselirlenmäniň izotermiki effekti (E_1 ýylylyk çalşyja gelýän gazyň temperaturasynda);

$Q_N = c_p(T_a - T_b'') - E_1$ ýylylyk çalşyjynyň ýyly ahyrlarynda nedorekuperasiýa sebäpli suwuklyk ýitgisi;

$Q_{d.s.}, Q''_{d.s.} - E_1$ ýylylyk çalşyjy bilen bugardyjynyň daşky gurşawa suwuklyk ýitgisi.

Aýlanýan gazyň bir birligine bugardyjyda daşky sowadyjy jisimiň sarp edilýän mukdary

$$G_x = Q_b / r_x \quad (4.46)$$

bu ýerde: r_x – bugardyjdaky berlen basyş astynda we T_x gaýnama temperaturasynda sowadyjy jisimiň bug emele gelmeginiň gizlin ýylylygy.

Nazary gaýtalanmadan gelýän gazyň bir birligine suwuklandyrylan gazyň mukdary (ýagny x_T suwuklandyрма koeffisiýenti) aşakdaky deňleme bilen kesgitlenýär (4.38 meňzeşlikde):

$$x_T = \frac{i'_a - i'_b}{i'_a - i'_f} = \frac{Q'_1}{i'_a - i'_f} = \frac{\Delta i'_T}{i'_a - i'_f}. \quad (4.47)$$

Käbir gazlar üçin x_T -ň bahasynyň basyşdan we aralyk sowadyлма T'_2 temperaturasyndan baglanyşygy 4.2-nji tablisada berilýär.

4.2-nji tablica

p_2 dürli bahasynda T'_2 temperatura çenli drosselirlemeli we aralyk sowadylmaly aýlawda x_T nazary suwuklandyrmagyň koeffisiýenti

Gaz	T'_2, K	p_2, MPa	x_T	Gaz	T'_2, K	p_2, MPa	x_T
Metan	228	20	0,428	Neon	66	20	0,376
	228	10	0,331		66	15	0,347
	228	0	0,171		66	10	0,285
Howa	228	20	0,184	Wodorod	66	5	0,155
	228	10	0,108		80	13,3	0,180
	180	20	0,320		75	13,3	0,200
Neon	80	20	0,238	69	13,3	0,240	
		75	0,284	64	13,3	0,245	
		20					

Hakyky gaýtalanmada

$$x_h = \frac{\Delta i'_T - Q'_N - Q'_{d.s.}}{(i'_a - i'_f) - Q'_N} \quad (4.48)$$

ýa-da

$$x_h \approx \frac{\Delta i'_T - Q'_N - Q'_{d.s.}}{i'_a - i'_f}. \quad (4.49)$$

Wodorod bilen geliý suwuklandyrylanda (4.48) deňlemeden peýdalanmak maslahat berilýär.

Bugardyjyda gaýnaýan sowadyjy jisim bilen alnyp gidilýän ýylylyk mukdary

$$Q_b = \Delta i'_T - \Delta i'_T + x_h(i'_a - i'_a) + (1 - x_h)(Q'_N - Q'_N) + (Q_{d.s.} + Q''_{d.s.}). \quad (4.50)$$

(4.48) we (4.50) deňlemelerden görnüşi ýaly $Q_{d.s.}$ bilen $Q'_{d.s.}$ ýitgileriň x_h – ululyga we gaýtalanmanyň netijeliligine täsiri düýpgöter dürlüdir: $Q'_{d.s.}$ ýitgiler iň pes T_1 temperatura derejesinde kompensirlenýärler, bu bolsa x_h – suwuklandyryma koeffisiýentiniň ýa-da Q'_1 – gaýtalanmanyň sowuklyk öndürilijiniň gönüden-göni kemelmegine getirýär; $Q_{d.s.}$ ýitgiler T_2 – aralyk sowadylyma derejesinde kompensirlenýärler, x_h bilen Q'_1 ululyklara täsir etmeýärler we diňe Q_b -ň artmagyna ýardam berýärler.

Bu bolsa termodinamiki nukdaýnazardan we ähli babatda örän amatly bolýar. Beýan edilen sebäplere görä neony, wodorody, gelini suwuklandyrymak üçin niýetlenen desgalarda enjamlaryň ähli sowuk bölekleri, suwuk azot bilen sowadylyan ekranlar bilen goraglanýarlar. Daşky gurşawdan gelýän ýylylygyň akymy bu ekranlar tarapyndan kabul edilýär we gaýnaýan suwuk azodyň kömegi bilen aýrylýar, bu bolsa şonuň ýaly desgalaryň netijeliligini artdyrýar.

Real gaýtalanmada gelýän gazyň bir birligine sarp edilýän energiýa aşakdaky deňleme bilen kesgitlenýär:

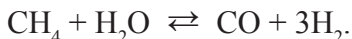
$$L = 1,7 L_{iz} + Q_b / Q_{s.b.}, \quad (4.51)$$

bu ýerde: $Q_{s.b.}$ – aralyk sowadylyma üçin udel sowuklyk öndürilijigi.

B. Wodorod suwuklandyryjylary we wodorod refrižerator enjamlary

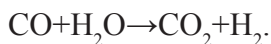
Wodorod – bu periodiki sistemanyň iň köp ýaýran elementleriniň biridir, ýöne ol erkin ýagdaýda duş gelmeýär; wodorody almak üçin ýörite çylşyrymly enjam gerekdir. Wodorodyň howanyň düzümindäki mukdary (göwrümi boýunça) bary-ýogy 5–10%; görşümüz ýaly, ony howadan almak maksadalaýyk däl. Wodorody almaklygyň esasy çeşmeleri bolup tebigy gaz we ýolugra gazlar, nebit, kömür we suw

hyzmat edýär. Tebigy gazdan katalitiki konwersiýa usuly bilen (metanyň suw bugy bilen özara täsiri) wodorod alynýar:

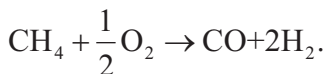


Bu reaksiýa nikel katalizatorynyň goşulýşmagy bilen 750–800°C temperaturada bolup geçýär.

Bölünip çykýan CO hem konwersiýa sezewar edilýär:



Soňra alynýan önüm CO₂-den we beýleki goşundylardan arassalanýar. Kähalatda ýanma reaksiýasyna esaslanan bölekleýin okislenme usuly hem ulanylýar.



Elektroliz usuly bilen wodorod almakda elektrolit hökmünde NaOH ýa-da KOH garyndylary ulanylýar. Alynýan wodorod 0,3–0,6% garyndyny düzýär (aýratyn-da, kislorod we azodyň yzlary). 1 m³ wodorod almak üçin 0,9 l suw sarp edilýär; sarp edilýän energiýanyň mukdary hem örän uly bolýar (5–6 kWt × sag/m³). Bu usullaryň ählisi hem tehnikada ulanylýar; elektroliz wodorody örän gymmat durýar, bu usul örän az mukdarda H₂ almak üçin ulanylýar.

Wodorodan başga-da (atom massasy 1), onuň ýene iki sany seýrek izotopy bar: deýteriý D₂ (atom massasy 2) we tritiý T₂ (atom massasy 3); agyr wodorod (deýteriý) wodorodyň düzüminde adaty wodoroda 1:6400 gatnaşykda bolýar we HD birleşme görnüşinde berilýär.

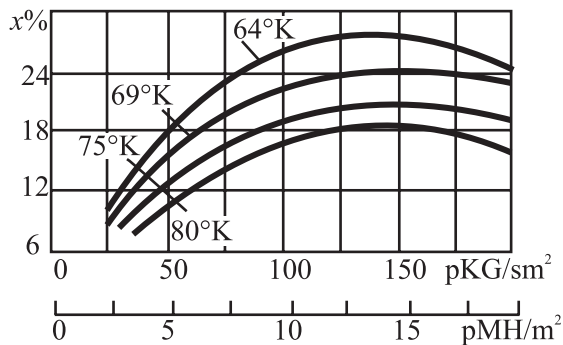
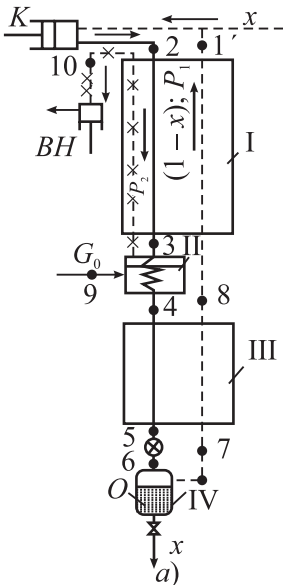
Wodorodyň häsiýetli parametrleri onuň ýokary ýylylyk geçirijiligi hem-de pes dykzlygy bilen tapawutlanýar. Wodorod periodiki sistemanyň iň ýeňil elementleriniň biri bolup durýar, bu hem onuň köp häsiýetlerini kesgitleýär.

1898-nji ýylda J. Dýuar ilkinji bolup wodorody suwuklandyrdy. Bu maksat bilen ol wodorody suwuk howa bilen deslapky sowadyjy hökmünde Lindäniň gaýtalanmasyndan peýdalanyp, drosselirleme prosesini ulanýar. Häzirki döwürde H₂ suwuklandyrmak üçin ýönekeý we çylşyrymly desgalaryň dürli görnüşleri ulanylýar. Ýöne Dýuaryň ulanan gaýtalanmasy (sikli) özünüň ýönekeýligi hem-de ygtybarlygy bilen şu günki güne çenli giňden ulanylýar.

Drosselirleme usuly bilen wodorody suwuklandyrmak. Öňürti sowadylmaly drosselirleme usuly bilen wodorody suwuklandyryjynyň prinsipial shemasyna seredeliň (4.9-njy a surat). Gaz görnüşli wodorod kompressorda P_2 basyşa çenli izotermiki gysylýar we I ýylylyk çalşyja düşýär, bu ýerde onuň temperaturasy T_3 çenli sowadylýar; soňra wodorod öňürti (deslapky) sowadyjy II wanna düşýär, bu ýerde onuň temperaturasy T_4 çenli peselýär. Ondan aşakdaky III ýylylyk çalşyjyda temperaturanyň peselmegi P_1 basyşa çenli drosselirleme-den (5-6 proses) soň IV ýygnaýjy gapda xg/kg mukdarda suwuklygy almaga mümkinçilik berýär. Emele gelen suwuklyk gaýtalanmadan alynýar, galan bug $(1-x)$ III we I ýylylyk çalşyjyda göni akymy sowatmak bilen, ters akyma düşüp gidýär.

Bu usul bilen wodorody suwuklandyrmak üçin $T_4 < T_{inv}$ ($T_{inv} = 204,6 K$) temperatura gerekdir. T_4 öňürti (deslapky) sowadylma temperaturasy näçe pes bolsa, şonça-da x -suwuklandyрма koeffisiýenti ýokarydyr, şoňa görä-de gaýtalanmanyň ykdysady görkezijisi ýokarydyr.

x -koeffisiýentiň bahasy basyşa hem baglydyr (4.9-njy b surat).



4.9-njy surat. Drosselirleme usuly bilen wodorody suwuklandyryjy shemasy (a) we suwuklandyryjy koeffisiýentiň basyşa we öňürti sowadylma temperaturasyna baglylygy (b)

Suratdan (4.9-njy b surat) görnüşi ýaly, basyş $P_2=12-14$ MPa-dan ýokary bolmaly däldir, emma T_4 temperatura, mümkin boldugyça, pes bolmaly.

Öňürti (deslapky) sowadylma üçin suwuk azot ýa-da howa ulanmak amatlydyr. Kadaly atmosfera basyşynda azodyň gaýnama temperaturasy $77,3^\circ\text{K}$, howanyňky bolsa $78,8^\circ\text{K}$ deňdir. Has pes temperaturany almak üçin gaýnaýan suwuklykly wannada basyşy peseltmek usulyňy (buglary wakuum nasosy bilen sorup almak) ulanmak bolar. Azodyň üçeldilen nokady $63,2^\circ\text{K}$, bu bolsa azot bilen öňürti sowadylma çäginin derejesini görkezýär. Basyşy ondan aşak peseltme suwuklygyň gatmagyna (doňmagyna) getirýär, bu bolsa bug bilen ýylylyk çalşyjynyň diwarlarynyň arasynda bug gatlagynyň emele gelmegi sebäpli ýylylyk çalşygyny mese-mälim peseldýär.

Tejribede azodyň iň pes gaýnama temperaturasy $\sim 65^\circ\text{K}$ deňdir.

Suwuk howany we kislorody öňürti sowadylmada ulanmak bilen has pes temperaturalary almak bolýar, ýöne azot ulanylanda onuň bilen işlemek howpsuz bolup durýar. Kislorody ulanmak aýratyn netijeliligi bilen tapawutlanýar, çünki onuň doňma temperaturasy $T_{\text{üç}} = 54,4^\circ\text{K}$ deňdir. Eger $\text{N}_2\text{-O}_2$ garyndy ulanylsa (77% O_2 we 23% N_2), onda onuň doňma temperaturasy $\sim 50^\circ\text{K}$ düzer. Bu ýerde x ululygyň artjakdygy mese-mälimdir, şoňa garamazdan onuň kemçiligi hem bardyr, ýagny II wannada basyş örän pes bolar we kislorodyň partlama howpy dörär.

Eger öňürti sowadylmany atmosfera basyşynda, soňra wakuum astynda gaýnaýan suwuklykly iki wannada amala aşyrylsa, onda sarp edilýän suwuklygyň mukdary azalýar, ykdysady görkezijisi bolsa artýar. Şu ýagdaýda wannalaryň arasynda aralyk ýylylyk çalşyjyny ýerleşdirmek zerurdyr.

Suwuk azot we howa daşyndan getirilip bilner ýa-da gönüden-göni suwuklandyryjynyň özünde öndüriler.

Seredilýän kislorody suwuklandyryjy shema iki basgançakly gaýtalanmany özünde jemleýär: ýokarky basgançak–daşky sowadyjy çeşmeli, aşaky basgançak–drosselirlenmeli.

Material we ýylylyk akymalaryny kesgitlemek üçin degişli basgançaklaryň ýylylyk balansynyň deňlemelerinden peýdalanarys:

$$x = \frac{\Delta i_{T4} - (c_P \Delta i_N + q_3)}{(i_8 - i_0)}; \quad (4.52)$$

$$Q_{\text{das}} = x(i_1' - i_8) + q_{\Sigma 1}.$$

x – suwuklandyryjy koeffisiýent kesgitlenende wodorod suwuklandyryjylarynda aşaky basgançak üçin $\Delta t_{\text{as}} = T_4 - T_8$ – nedorekuperasiýa ululygynyň 3 gradusdan geçmeli dældigini göz önünde tutmaly.

Izolýasiýa ýokary hilli bolanda q_3 ýylylyk akymlyryndan ýitgi sowuklyk öndürijiliginden 3–5%-i düzýär.

Ýokarky basgançakda $\Delta t_{\text{yok}} = T_2 - T_1$ nedorekuperasiýa, adaty, 15-10 grad diýip kabul edilýär. Ýokarlandyrylan nedorekuperasiýa azodyň ters akymynyň sowuklygyny ulanylyşyndaky döreýän kynçylyk bilen, şeýle hem onuň I ýylylyk çalşyjynyň ölçeglerini kiçeltmäge mümkinçilik berýändigini bilen düşündirilýär.

Sowadyjy suwuklygyň udel sarp edilişi aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$G_o = \frac{x(i_1' - i_8) + q_{\Sigma 1}}{(i_{10} - i_9)N_2}.$$

Suwuklandyryjylar hakyky şertlerde ulanylanda suwuklygyň hakyky sarp edilişiniň G_{oh} hasaplama sarp edilişinden ýokarydygyny bellemek zerurdyr, çünki desganyň bloguny arassalamak we onuň ekranyny sowatmak üçin, şeýle hem doldurylanda bolup biljek goşmaça ýitgiler bardyr:

$$G_{\text{oh}} = G_o + G_{\text{arassalamak}} + G_{\text{ekr.}} + G_{\text{ýitgi}} \quad (4.53)$$

Suwuklygyň sarp edilişiniň beýleki bölümleri hem bolup biler. (4.53) formuladaky ýitgiler takyk hasaplanan däl, şonuň üçin

$$G_{\text{oh}} \approx (1,3 \div 1,5)G_o$$

diýip kabul etmek bolar.

Berlen gaýtalanma üçin energiýanyň udel sarp edilişi aşakdaky formula bilen kesgitlenir:

$$\ell = \frac{RT_1 \ell n \frac{P_1}{P_2}}{\eta_{\text{iz}} \cdot x} + G_{o,h} \frac{\ell_o}{x} + \frac{\ell_{\text{goş}}}{x}. \quad (4.54)$$

Bu aňlatmanyň birinji agzasy kompressorda wodorodyň gysylmasyna sarp edilýän energiýany aňladýar. Ikinji agzasy sowadyjy suwuklygy almak üçin sarp edilýän energiýa, şol bir wagtyň özünde l_0 – ony öndürmek üçin sarp edilýän energiýadyr.

Suwuk azot ulanylanda $l_0=4,3 \div 5$ MJ/kg ($1,2 \div 1,4$ kWt·sag/kg) kabul edilýär. Üçünji agzasy energiýanyň goşmaça harajatlaryny (wakuum nasoslar, ýşyklandyryş we ş.m.) hasaba alýar.

Seredilen shema uly bolmadyk ýa-da ortaça öndürijilikli suwuklandyryjylarda ulanylýar.

§ 4.6. Beýleki gaýtalanmalary ulanmak bilen wodorody suwuklandyrmak

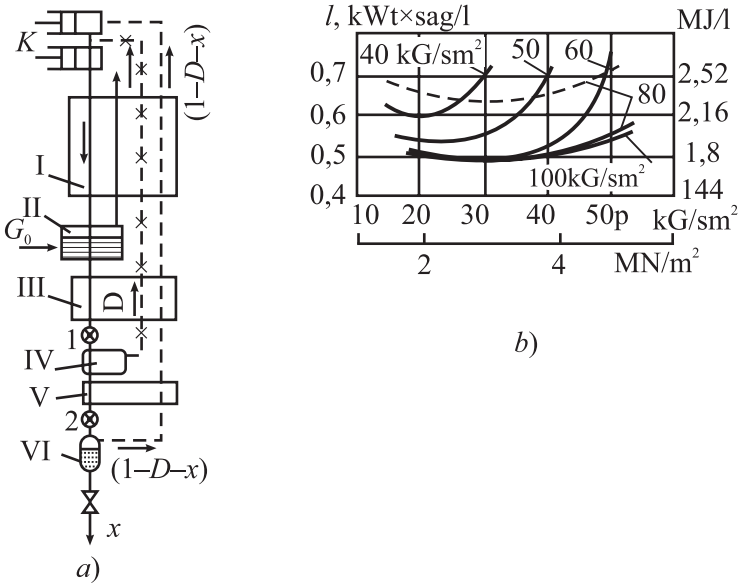
Öňürti (deslapky) sowadylmaly drosselirlemeli usuldan başga-da wodorody suwuklandyrmak üçin ýene-de birnäçe gaýtalanmalar ulanylyp bilner, olar aşakda serediler. Bu shemalar derňelende başlangyç kabul edilýän maglumatlar indikilerden durýar: deslapky sowadyлма температурасы 65°K , deslapky sowadyлма derejesinde nedorekuperasiýa $\Delta t_N = 1^\circ\text{C}$; daşky gurşawdan gelýän ýylylyk akymy $q_3=0$. Gaýtalanmanyň netijeliligi kompressorda gazy gysmak üçin sarp edilen işiň udel ululygy bilen häsiýetlendirilýär.

Bu şertlerde alnan häsiýetnamalar biraz umumylaşdyrylan bolmagyna garamazdan, olar gaýtalanmalary özara deňeşdirmek üçin umumy kanunalaýyklygy ýüze çykarmakda amatly bolup durýarlar.

Iki basyşlar gaýtalanmasy (4.10-njy surat).

Aralyk basyşa çenli drosselirleme usuly bilen sowadylmanyň goşmaça basgançagy ulanmak, ýönekeý drosselirlemeli usula garanyňda, netijeliligini has ýokarlandyrýar (4.10-njy surat). Wodorodyň ýokary basyşly akymy I, II, III ýylylyk çalşyjylaryň üsti bilen geçip, IV gaba aralyk basyşa çenli drosselirlenýär. Wodorodyň iň köp mukdary V ýylylyk çalşyjyda sowadylýar we VI ýygnaýjy gaba drosselirlenýär. Wodorodyň galan bölegi VI gapdan ýylylyk çalşyjylaryň üsti bilen aralyk basyşda kompressora gaýdyp gelýär. Kompressorda gysylma işi mese-mälim azalýar we x suwuklandyryjy koeffisiýentiň käbir mukdara çenli kemelmegine garamazdan, energiýanyň

udel sarp edilişi kemelýär. Berlen shemanyň howany suwuklandyrmak üçin ulanylýan shemadan tapawudy, ol hem aralyk V ýylylyk çalşyjynyň çatylmagy bilen baglydyr. Aralyk basyşda (4.10-njy b surat) energiýa az sarp edilýär, bu ýokary basyşdakynyň takmynan ýarysyna deňdir. Ýokary basyş 8,0 MPa-dan artdyrylanda hem gaýtalanmanyň häsiýetnamasyny üýtgetmeýär, şunlukda, aralyk basyşyň ululygy örän az täsir eder. Gaýtalanmanyň hasaplamasy (3–9), (3–10), (3–11) deňlemeler boýunça alnyp barlar, bu ýerde (3–9) deňlemede ýokary basgançakdaky aralyk basyşyň sirkulýasion akymyny hasaba almak zerurdyr.



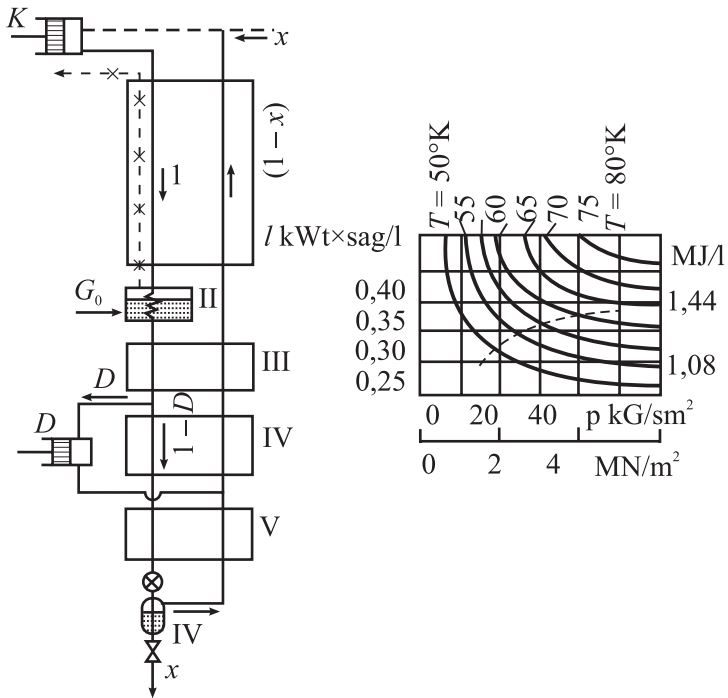
4.10-njy surat. Iki basyşyň aýlawynyň shemasy we onuň häsiýetnamasy:

K – kompressor; I, III, V – ýylylyk çalşyjylar; II – suwuk azotly wanna; IV – aralyk drosselirleme üçin gap; VI – suwuk wodorody ýygnamak üçin gap (1,2 – drossel wentiller)

Iki basyşlar shemasyňa ýokarky drosseliň ornuna detander çatylsa, drosseldäki öwrülişsiz giňelme prosesini detanderde has effektiv giňelme hadysasy bilen çalyşmaga mümkinçilik berer.

Detander akymy sirkulirlenýän gaýtalanmanyň hasaplamasy $P_2 = 10 \text{ MPa}$ başlangyç basyşda energiýanyň iň az sarp edilişi aralyk $P_{ar} \approx 3 \text{ MPa}$ basyşa degişli bolýandygyny görkezýär.

Detanderde giňelmeli gaýtalanma (4.11-nji a surat).



4.11-nji surat. Detanderli shema we onuň häsiýetnamasy:

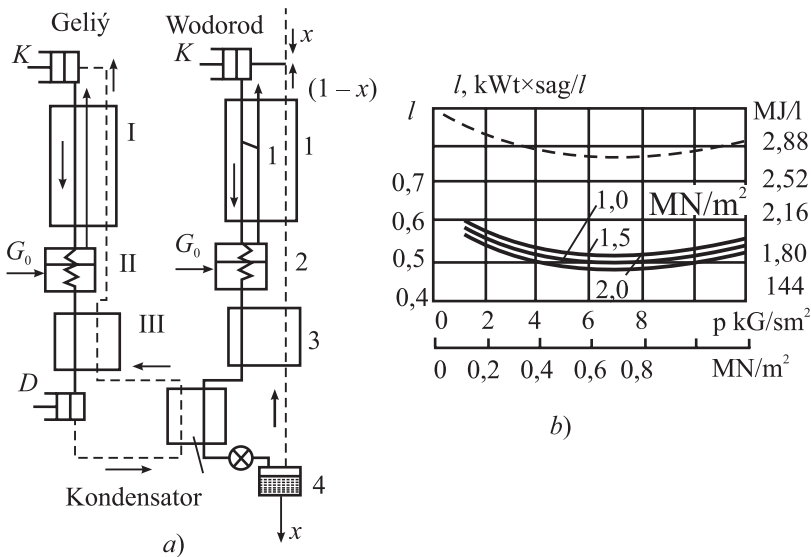
K – kompressor; *I, III, IV, V* – ýylylyk çalşyjylar; *II* – suwuk azotly wanna; *VI* – suwuk wodorody ýygnamak üçin gap (detanderiň PTK $\eta_0 = 0,8$)

Kloduň shemasy boýunça gurlan shemada detanderiň ulanylmasy goşmaça sowadylma basgançagyňy üpjün etmek bilen, deslapky (öňürti) sowadyjy wanna bilen drosseliň arasynda ýerleşdirilen ýagdaýynda, özüni ykrar edip biler (4.11-nji a surat). Detandere gelýän gazyň mukdary basgançagyň ýylylyk balansyndan hasaplanýar. Şunlukda, IV ýylylyk çalşyjyda ýylylyk çalyşmanyň mümkinçiligini barlap durmak zerurdyr. Detanderiň girişinde basyşa we temperatura baglylykda energiýanyň sarp edilişi 4.11-nji b suratda görkezilýär.

Detanderiň girişinde temperaturanyň peselmegi energiýanyň sarp edilişini peseldýär; basyşyň 5,0 ÷ 6,0 MPa-dan ýokary artmagy az täsir edýär. Ştrihlenen egriniň aşagyndaky ýer çyg buguň zonasy-na degişlidir. Detanderiň ulanylmasy suwuklandyryjylaryň ykdysady görkezijisini düýpli gowulandyryan hem bolsa, ol diňe iri des-

galarada maksadalaýykdyr, çünki ol shemanyň çylşyrymlaşmagyna we ygtybarlylygynyň peselmegine getirýär. Bu gaýtalanmanyň hasplamasy (3–9), (3–10) we (3–11), (3–12) deňlemeleriň üsti bilen alnyp barylýar.

Geliý-wodorodly kondensasion gaýtalanma. Wodorody suwuklandyrmak üçin geliý refrižeratorynyň kömeginden peýdalanylýp, wodorody kondensirlemek usuly bilen amala aşyrmak bolar. Bu gaýtalanma kondensator bilen baglanyşdyrylan iki sany özbaşdak konturdan (gelili we wodorodly) durýar.



4.12-nji surat. Geliý-wodorod kondensasion aýlawyň shemasy:

K – kompressor; D – detander; I, II, III, – gelili konturyň ýylylyk çalşyjlary; (1,2,3 – wodorod konturyň ýylylyk çalşyjlary; 4 – suwuk wodorody ýygnamak üçin gap)

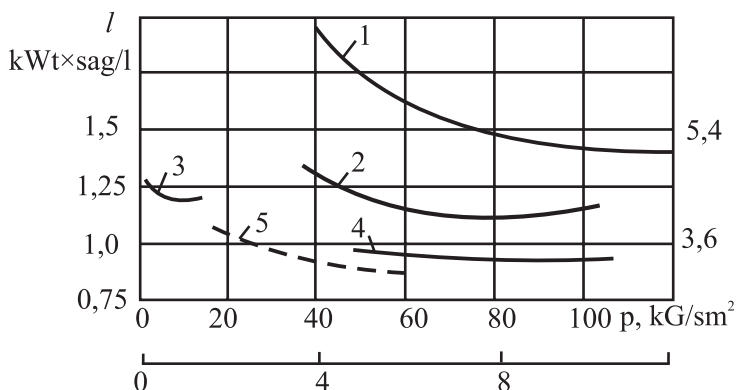
Geliý (4.12-nji a surat) I ýylylyk çalşyjdandan, II suwuk azotly wannadan, III ýylylyk çalşyjdandan gelýär we D detanderde wodorodyň kondensasiýa temperaturasyndan hem pes temperatura çenli giňelýär. Wodorod öz konturynyň 1, 2 we 3 ýylylyk çalşyjlaryndan geçýär, kondensatorda suwuklanyp we atmosfera basyşyna çenli drosselirlenip, 4 suwuklyk ýygnaýja dolýar. Energiýanyň sarp edilişi wodorodyň we geliniň basyşyna örän az derejede baglydyr. Parawodorodyň

öndürilişinde energiýanyň sarp edilişi mese-mälim artýar (ýokarky ştrihlenen egri).

Gaýtalanmanyň artykmaçlygy: wodorodyň barlygy bilen bagly bolan partlama howpunyň azalmagy; iki akymyň pes basyşlarynda gaýtalanmany amala aşyrmagyň mümkinçiligi.

Gaýtalanmanyň hasaplamasy üçin her bir kontura (3–9), (3–11) we (3–12) deňlemeler ulanylýar. Wodorod konturynda 1 kg, geliý konturynda bolsa G kg/kg gaz sirkulirlenýär. Iki deňlemeler sistemasynyň arasyndaky baglanyşyk kondensatoryň ýylylyk balansyndan gelip çykýar.

Bu paragrafda seredilen gaýtalanmalary (4.13-nji surat) öňürti sowadylma sarp edilen energiýany hasaba alyp, ozalky kabul edilen parametrlr boýunça deňşdireliň (alynýan önüm 95%-li parawodorod). Grafik real şertler üçin energiýanyň sarp edilişiniň takyk sanlaryny bermeyär, ýöne gaýtalanmalaryň oňnositel netijeliligini aýdyň häsiýetlendirýär. Detanderli shema ykdysady taýdan has tygşytlý; ýöne drosselirlenmede energiýanyň sarp edilişi 50% ýokary, kondensation gaýtalanmada 25%, iki basyşlar gaýtalanmasynda 20% ýokary. Detanderli gaýtalanma we detanderli iki basyşlar gaýtalanmasy, takmynan, birmeňzeş görkezijileri berýär.



4.13-nji surat. Wodorody suwuklandyрма gaýtalanmalary üçin energiýanyň sarp edilişiniň basyşa baglylygy:

1 – bir gezek drosselirleme; 2 – iki basyşyň aýlawy; 3 – geliý-wodorod aýlaw;
4 – detanderli iki basyşyň aýlawy; 5 – detanderli aýlaw

Termodinamiki görkezijileriň gaýtalanmalaryň netijeliliginiň ýeke-täk kriteriýasy bolup bilmejekdigini bellemek zerurdyr. Desganyň

ýönekeýligi, başlangyç bahasy, ulanylyş harajarlary we onuň ygtybarlylygy hökmany hasaba alynmalydyr. Şu nukdaýnazardan iki basyşlar gaýtalanmasy aýratyn üns berilmegine mynasypdyr, ol ýönekeý we ygtybarlydyr. Iri suwuklandyryjylar üçin detanderli iki basyşlar gaýtalanmasy hödürlenip bilner. Detander hatardan çykan ýagdaýynda hem bu sistema drosselli iki basyşlar shemasy boýunça işläp biler. Seredilen shemalardan başga hem wodorody suwuklandyrmak üçin başga görnüşli gaýtalanmalar bolup biler.

§ 4.7. Wodorody suwuklandyryjylar

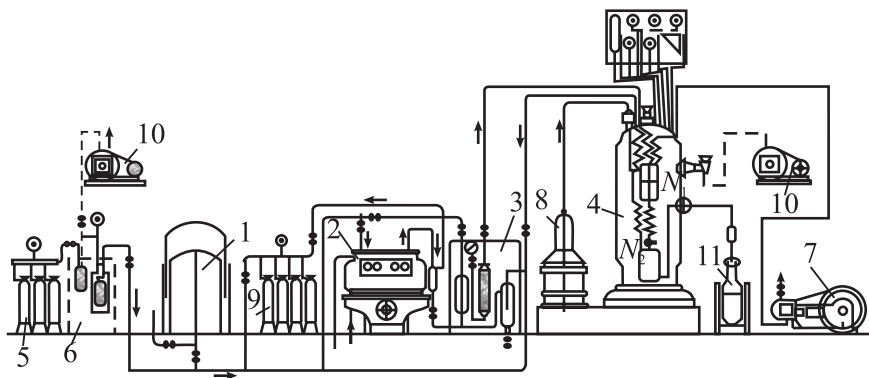
Dýuaryň ilkinji suwuklandyryjysynyň döwründen 50-nji ýyllaryň ortalaryna çenli wodorod örän az mukdarda, diňe laboratoriya maksatlary üçin alynýardy. Bu hili desgalaryň öndürjiligi 10–15 l/sag bolup, käbir ýagdaýlarda 40 l/sag ýetýärdi. Soňky ýyllarda suwuk wodorod köp mukdarda öndürilip başlandy. Has iri döwrebap zawodlaryň wodorody öndürjiligi sagatda 30000 litrden hem artdyryldy. Bu hili wodorody suwuklandyryjlaryň shemalary we gurluşlary adaty suwuklandyryjylardan düýpli tapawutlanýarlar.

Kiçi we ortaça öndürjilikli desgalar işlenip düzülende esasy bildirilýän talaplar olaryň ýönekeýligi we ygtybarlylygydyr. Uly desgalar konstruirlenende gaýtalanmanyň termodinamiki netijeliligine we ykdysady görkezijisine aýratyn üns berilýär.

BOC-3 suwuklandyryjy-laboratoriya görnüşli suwuklandyryjy bolup durýar. Ol drosselirlenmeli ýokary basyşly we aralyk sowadylmaly gaýtalanma boýunça işleýär. Onuň öndürjiligi 8–10 l/sag (4.14-nji surat).

Wodorod (2) kompressorda 12,0 ÷ 15,0 MPa çenli gysylýar we ýag arassalaýjy (3) bloga düşýär, ol ýerde damjalaýyn ýaglar ýag bölüjide, buglary bolsa aktiwirlenen kömürlü adsorberde bölünýärler. Ondan soň wodorod (4) suwuklandyryja düşýär, ol ýerde ýylylyk çalşyjy enjamlardan geçip, sowadylyp, suwuklyk ýygnaýjy gapda drosselirlenýär. Suwuklandyрма koeffisiýenti 15%-i düzýär. Wodorod 8 Duýaryň gabyndan berilýän suwuk azotly wannada öňürti (deslapky) sowadylýar (7), wakuum-nasos tarapyndan döredilýän ~0,035 MPa basyş astynda gaýnaýar. Sarp edilýän azodyň mukdary 12–13 kg/sag.

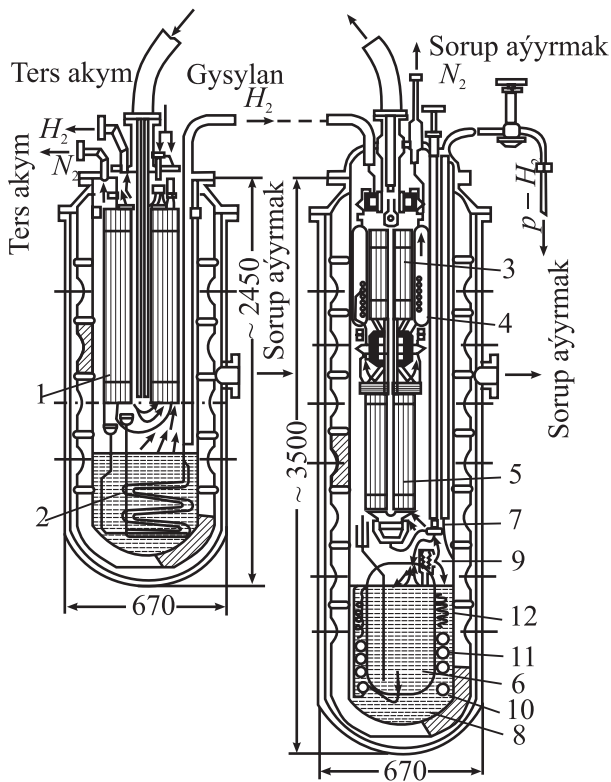
Suwuk wodorod (11) Dýuaryň gabyna akdyrylýar, buglary bolsa ýylylyk çalşyjylaryň üsti bilen kompressora gaýdyp barýar. Alnan suwuklygyň mukdaryna ekwiwalent, gaz görnüşli wodorodyň mukdary (1) gazgolderiň üsti bilen kompressora berilýär. Bu wodorod (5) ballondan gelýär we (6) adsorbsion blokda suw buglaryndan we gaz garyndylaryndan doly arassalanyp geçirilýär. Blok (6) çyglylygy siňdiriji silikagel adsorberinden we beýleki gazlaryň garyndysyny siňdiriji kömür adsorberinden durýar. Kömür adsorberi suwuk azotly gapda ýerleşdirilýär, bu bolsa adsorbentiň siňdirijilik ukybyny mese-mälim artdyrýar. Adsorberleriň regenerasiýasy 100°C-e çenli gyzdyrylyp, (10) wakuum-nasosyň kömegi bilen sorulma arkaly amala aşyrylýar. (9) ballonlar arassa wodorod bilen doldurylyp, soňra saklanmaga niýetlenendir. Ýylylyk çalşyjylar göni hem-de ters akym üçin özara kebşirlenip, spiral görnüşde saralan turbajyklaryň dessesini berýärler.



4.14-nji surat. BOC-3 wodorody suwuklandyryjynyň shemasy:

- 1 – gazgolder; 2 – kompressor; 3 – ýag arassalaýjy blok; 4 – suwuklandyryjy;
 5 – tehniki wodorod ballony; 6 – arassalaýjy blok; 7 – wakuum-nasos;
 8 – suwuk azotly gap; 9 – arassa wodorod ballony;
 10 – forwakuum nasosy; 11 – suwuk wodorodly gap

Azot wannasynyň içki bölegi suwuk wodorodyň ýygnaýjy gaby üçin ekran bolup hyzmat edýär. Ýylylyk izolýasiýa bolup, içki boş giňişligi dolduryjy, mipora (wakuum astynda) hyzmat edýär. Ähli apparatura korpusyň gapyjygyna berkidilýär, bu bolsa montaj işlerini ýeňilleşdirýär hem-de termiki deformasiýanyň mümkinçiligini üpjün edýär.



4.15-nji surat. BO-2 desganyň suwuklandyryjy blogy:

- 1 – öňüsyra ýylylyk çalşyjy; 2 – suwuk azotly wanna; 3 – aralyk ýylylyk çalşyjy;
 4 – wakuumly suwuk azotly wanna; 5 – aşaky ýylylyk çalşyjy; 6 – aralyk ýygnaýjy H_2 ;
 7 – drossel wentil; 8 – esasy ýygnaýjy H_2 ; 9 – pnevmatiki klapany;
 10, 11 – reaktory; 12 – zmeýewik-kondensator

Soňra suwuklandyryjy BOC-3 A. B. Fradkow tarapyndan modernizirlenip, parawodorod almak üçin niýetlenilýär.

A. Zeldowich we Ýu. Pilipenko tarapyndan işlenilip düzülen BO-2 suwuklandyryjy suwukwodorodly uly köpürjikli kamera hyzmat etmek üçin niýetlenen. Bu suwuklandyryjyda kadaly wodorod we parawodorod almak bolýar; ol refrižerator režimde hem işläp bilýär.

Desganyň öndürilijiligi örän ýokary we kadaly wodorod boýunça 230 l/sag, parawodorod boýunça 140 l/sag. Suwuklandyryjy drosselirlenmeli we iki wannada suwuk azot bilen aralyk sowadylmaly gaýtalanma boýunça işleýär: bir wannada azot atmosfera basyşynda

gaýnaýar ($T = 81^\circ\text{K}$), ikinjide wakuum astynda gaýnaýar ($T = 66^\circ\text{K}$). Suwuklandyryjy blok wakuum-poroşok izolýasiýaly Dýuaryň gaby görnüşinde iki korpusda ýerleşýär (4.15-nji surat). Birinji blokda (4.15-nji a surat) deslapky ýylylyk çalşyjy we atmosferada suwuk azotly wanna ýerleşýär, ikinji blokda (4.15-nji b surat) aralyk ýylylyk çalşyjy, wakuumly azot wannasy, aşaky ýylylyk çalşyjy, wodorody ýygnaýjy gap, (10 we 11) reaktorlar, zmeýewik, drossel wentili we akdyryjy gurluş ýerleşýär.

Wodorod ähli ýylylyk çalşyjy enjamlary geçip, ýokary basyşly wodorod ($p \approx 12,5 \text{ MPa}$) artykmaç basyşda ($0,5 \text{ MPa}$) (6) suwuklygy ýygnaýja drosselirlenýär, bu ýerden bug we suwuklygyň bir bölegi (9) klapanyň üsti bilen (8) göwrüme düşýär.

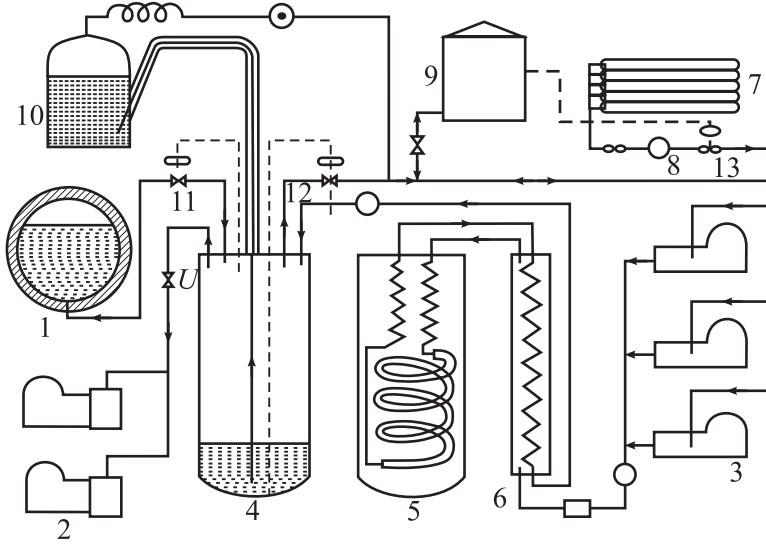
Refrižerator režimde suwuklyk (6) ýygnaýjy gapdan gönüden-göni sarp edijä barýar, ol ýerde bugarýar, sowuk bug bolsa suwuklandyryja gaýdyp gelýär. Ýygnaýjyda artykmaç basyş refrižerator akymy üçin zerur bolan napory üpjün edýär. Parawodorod alnanda suwuklyk (6) ýygnaýjydan arasynda ýylylygy alyp gitmek üçin niýetlenen zmeýewikli iki sany zygider ýerleşdirilen (10 we 11) reaktorlara gelýär.

Desganyň esasy režimi–refrižeratorly, şonuň üçin shemada suwuk wodorodyň temperaturasynda bir basgançakly konwersiýa kabul edilen. Konwersiýada uly ýylylyk bölüme bolýanlygy sebäpli, reaktorda temperatura uly bolýar, bu bolsa parawodorodyň pes deňagramly konsentrasiasyna alynýan önümiň ondan hem pes konsentrasiasyna degişlidir. Aralyk zmeýewikli iki reaktoryň ulanylmagy konwersiýa temperaturasyny peseltmäge we şonuň bilen birlikde alynýan parawodorodyň konsentrasiasyny artdyrmaga mümkinçilik berýär. Katalizatoryň göwrümi reaktorlaryň ikisinde hem $3,5 \text{ l}$ düzýär, suwuk wodorodyň massalaýyn tizligi $1160 \text{ gr}/(\text{sm}^2 \cdot \text{sag})$ deňdir. Birinji reaktordan soň parawodorodyň konsentrasiasy $93\text{--}94\%$, ikinjiden soň 98% . Katalizator hökmünde $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ulanylýar. Katalizatorlar belli bir wagt aralygynda aktiwasiýany talap edýär, bu 50°C temperaturaly wodorodyň $20\text{--}30 \text{ m}^3/\text{sag}$ mukdaryny sarp etmek bilen 6 sagadyň dowamynda ýerine ýetirilýär. Kadaly wodorod öndürişinde suwuklandyrma koeffisiýenti 25% berýär, azodyň sarp edilişi

180 l/sag ($P = 0,1$ MPa basyşda gaýnaýan) we 85 l/sag (wakuum astynda gaýnaýan).

BO-2 suwuklandyryjy berlen görnüşli desgalaryň iň döwrebapларыnyň hataryna degişlidir.

НБС-суwuklandyryjy (4.16-njy surat) АБŞ-nyň standartlar býurosynyň kriogen laboratoriyasynda işlenilip düzülen.



4.16-njy surat. НБС wodorody suwuklandyryjynyň shemasy:

- 1 – suwuk azotly gap; 2 – wakuum-nasoslary; 3 – kompressorlar;
 4 – suwuklandyryjy blok; 5 – adsorber; 6 – guradyjy-doňduryjy; 7 – wodorodly
 ballon; 8 – kontakt enjamy; 9 – gazgolder; 10 – suwuk wodorodly gap;
 11, 12, 13 – awtomatiki klapanlar

Bu desga BOC-3 we BO-2 desgalaryň gaýtalanmasyna meňzeş gaýtalanma boýunça işleýär. Wodorod (7) ballonlardan 0,35 MPa basyşda (8) kontakt enjamyna düşýär, bu ýerde palladiý katalizatorynyň goşulşmagy, wodorod bilen garyşma ýoly bilen kislorody aýyrmaklyk (arassalamak) bolup geçýär. Emele gelen suw soňra aýrylýar. Soňra wodorod (3) kompressorlara berilýär. Wodorod beriji (13) klapan (9) gazgolder bilen awtomotiki baglanyşykly we gazgolderde göwrümiň üstüni ýetirip durýar. 12,5 MPa çenli gysylandan soň, wodorod separatora we filtre düşýär, ol ýerde çyglylygyň, ýagyň damjalary we ýag dumany aýrylýar. Ondan soň wodorod (6) gura-

dyjy-doňduryja we (5) silikagel adsorbere barýar. Bu enjamlarda uçujy garyndylaryň kondensasiýasy we azot hem-de beýleki gazlardan adsorbision arassalamaklyk işleri amala aşyrylýar. Adsorberde 65°K temperatura suwuk azot bilen üpjün edilýär. Arassalanan wodorod (4) blokda suwuklandyrylýar, suwuklyk (10) göwürüme dökülýär, buglary bolsa gyzdryjynyň üsti bilen sorulma ugruna (liniýasyna) gaýdyp gelýär. Awtomatika klapnlar (11 we 12) wodorodyň ters akymynyň basyşyny we suwuk azodyň sarp edilişini sazlaýar.

Suwuklandyryjy bloguň ýylylyk çalşyryjy diametri $d_{\text{daş}} = 3$ mm bolan mis turbajyklaryň burma enjamlary görnüşinde ýerine ýetirilen. Korpusyň poslamaýan polatdan bolan suwuklandyryjy aşaky böleginde azot ekranly Dýuaryň gaby görnüşinde taýýarlanan; korpusyň ýylylyk izolýasiýasy-wakuumdur; konwersiýa, demriň gidrookisi, ýagny katalizator bilen suwuklygyň gönüden-göni kontakt ýoly bilen, suwuk wodorodyň wannasynda amala aşyrylýar.

Suwuk azodyň temperaturasynda konwersiýanyň dowam edilmegi bilen suwuklandyryjynyň öndürjiligi has-da artýar.

Bu desganyň suwuklandyryjy koeffisiýenti azot wannasynyň 66°K temperaturasynda 24,5%-e deňdir we bu derejede nederekuperasiýa $\Delta t_N = 2$ grad. Azodyň 360 l/sag sarp edilmeginde kadaly wodorod öndürjiligi 320 l/sag deňdir.

§ 4.8. Wodorod bilen işlemekde tehniki howpsuzlygyň düzgünleri

Wodorod suwuklandyryjylary konstruirlenende we wodorod bilen işlenende howpsuzlygy ýokary derejede üpjün ediji çäreleriň berjaý edilmegi zerurdyr.

Wodorod bilen kislorodyň özara reaksiýasy örän intensiw bolup, partlama netijesinde ummasyz köp energiýa bölüp çykarýar. Wodorodyň tutaşmagy üçin talap edilýän enegiýa örän az bolup, ol uglewodorodyň tutaşmagy üçin zerur bolan energiýanyň 0,1 mukdaryna deňdir. Howada H₂-ň howply konsentrasiyasynyň (4–74%) giň çäginin bolmagynda, şonuň bilen hem wodorod ýalnynyň ýaýrama tizliginiň ýokary bolmagy bilen ýagdaý has hem çylşyrymlaşýar. Suwuk wo-

dorod düzüminde howanyň kondensasiýasy bar bolmagy bilen, esasy howpuň çeşmesi bolup durýar.

Gaz görnüşli ýa-da suwuk wodorodyň barlygynda hem-de olaryň howa bilen kontakty netijesinde iki hili howply ýagdaý, ýagny partlama ýa-da ýangyn dörrär. Wodorod bilen kislorodyň gaz görnüşli fazada özara täsiri netijesinde prosesin geçişine öňünden häsiýetnama bermek kyn. Howa-wodorod garyndysynda wodorodyň 30-40% konsentrasiýasy bar bolan ýagdaýynda we ýangyny oýandyryjy bolanda açyk howada partlamanyň has ähtimaldygy ylmy barlaglar esasynda kesgitlenildi. Ähli göz önünde tutulýan çäreler howply ýagdaýa getirýän ähtimallyklary aradan aýyrmalydyr.

Iki sany esasy sebäpler howpuň döremegine: ýangyna ýa-da partlama getirýän wodorodyň kislorod ýa-da howa bilen garyndysynyň döremegine hem-de ýangyny dörediji çeşmäniň bar bolmagyna getirýär.

Şeýlelik bilen, wodorod bilen işlenilende beýan edilen sebäpleri aradan aýryp, howply ýagdaýlaryň önüni almaly. Howply ýagdaýlaryň ýüze çykmasynyň çeşmelerine we howpsuz iş şertlerini üpjün etmek üçin berjaý etmeli çärelere seredeliň.

Wodorod bilen kislorodyň garyşmasy ýangynyň ýa-da partlamanyň esasy sebäpleriniň biridir, şonuň üçin ony aradan aýyrmak esasy mesele bolup durýar. Wodorod kommunikasiýasynyň, ylaýta-da suwuklandyryjynyň içine howanyň düşmegi sistemany wodorod bilen doldurmazdan ozal sistemada howanyň galyndysynyň bar bolmagy ýa-da kompressora sorulmada basyşyň peselmegi bilen atmosferadan howanyň düşmegi howply ýagdaýlaryň ýüze çykmagyna sebäp bolup bilýär. Sistemany doldurma işi wakuum-nasos bilen howanyň sorulmasy amala aşyrylandan soň, ol azot bilen doldurylýar, diňe şondan soň azot wodorod bilen çalşyrylýar.

Doldurylmadan soň howanyň galyndysy kompressoryň kömegi bilen çykarylýar, munuň üçin suwuklandyryjy işe goýberilmezden ozal birnäçe sagadyň dowamynda absorbsion arassalaýjy bloguň üsti bilen wodorodyň sirkulýasiýasyny amala aşyrmaly. Sistemany arassalamak üçin hem bu usul ulanylýar. Apparaturanyň üflenmesi arassa gaz görnüşli azot bilen ýerine ýetirilýär.

Atmosferadan howanyň sorulmasyny aradan aýyrmak üçin ähli ýagdaýda basyş atmosfera basyşyndan ýokary bolmalydyr. Komp-

ressoryň sorulma ýolunda gazgolderi gurnamak bilen artykmaç basyş üpjün edilýär. Iri suwuklandyryjylarda wodorodyň basyşy atmosfera basyşyndan ýokary bolýança wodorod kompressorlaryny işe goýbermez ýaly blokirlleme üpjün edilýär.

Wodorod bilen kislorodyň garyşmasynyň ýene bir çeşmesi hem wodorod kommunikasiýasynyň bozulmagy ýa-da yzygider syzylyp çykmasydyr. Bu ýagdaýda jaýyň içinde partlama howply garyndy toplanýar.

Wodorod sistemasynyň kämil germetizasiýasy howpsuz iş şertleriniň girewidir. Wodorod sistemasy konstruirlenende flanes birikmeleriniň sanyny minimuma getirmeli, mümkin boldugyça, bu birikmeleriň ornuna kebşirlenmäni ulanmaly. Kebşirlenme hem-de birikdirme işleriniň hiline aýratyn üns bermeli. Kommunikasiýalarda we wodorodly gaplarda goraýjy klapynlary goýmak zerurdyr. Turbagçirijilerde pes temperaturaly naprýaženiýäniň önüni alyjy kompensatorlar goýulmaly.

Wodorodyň jaýlara düşmeginiň ähtimallygyny doly aradan aýyrmak mümkin däldir, şonuň üçin wodorod stansiýalarynyň güýçli wentilýasiýasyny göz önünde tutmalydyr. HBC suwuklandyryjysynyň jaýlarynda her 2 minutdan howanyň doly çalyşmasy amala aşyrylýar. Howada wodorodyň düzümini üzüksiz barlag işleri howply ýagdaýlaryň önüni almaga mümkinçilik berýän möhüm serişdeleriň biri bolup durýar. Wodorod stansiýalarynyň jaýlarynyň gurluşynda, partlama ýüze çykan ýagdaýynda weýrançylygyň, mümkin boldugyça, az bolmagyny göz önünde tutmaly.

Suwuk wodorodyň içine howanyň düşmeginiň önüni almak üçin biri-birine guýlanda sistemanyň germetikligini üpjün etmeli, şeýle hem wodorod bilen doldurylmazdan ozal, önürti sowadylan göwrümde (gapda) howanyň kondensasiýasyna ýol bermeli däl. Howply ýagdaýlaryň ikinji sebäbi hem ýangyny oýandyryjy (inisiýasiýa) çeşmäniň bar bolmagydyr. Wodorod bilen kislorodyň garyndysy özbaşyna bir-birine täsir etmeyär, ýangynyň we partlamanyň ýüze çykmagy üçin sistema käbir energiýa bermelidir.

Inisirlenmäniň mümkin bolan çeşmesi: ýalyn ýa-da uçgun, himiki reaksiýalaryň ýylylygy, sürtülme ýa-da urgy ýoly bilen käbir mehaniki energiýanyň berilmegi we ş.m. Ýanmanyň mümkin bolan

serişdeleri çakdanaşa köpdür, olary aradan aýyrmak üçin ähli çäreleri ulanmak zerurdyr. Wodorod stansiýalarynda açyk ot bilen işlemek gadagan edilýär. Uçgun beriji elektrik enjamlary ulanmaga rugsat berilmeýär. Elektrik hereketlendirijileriň, goýberijileriň we elektrik enjamlaryň beýleki elementleriniň uçgun çykarmasyna ýol bermeli däldir we olary howply zolakdan uzakda ýerleşdirmelidir. Jaýlaryň pollary elektrostatik zarýadlary aýyrmaga ukyply elektrik geçiriji materiallardan bejerilýär. Şol sebäpli ähli enjamlary ýere çatma bilen baglamalydyr. Işlenilende uçgun berijiligi bolmaýan enjamlar ulanylmalydyr.

Beýan edilen howpsuzlyk çäreleri doly berjaý edilende, wodorod sistemasynyň işinde howply ýagdaýlar döremez.

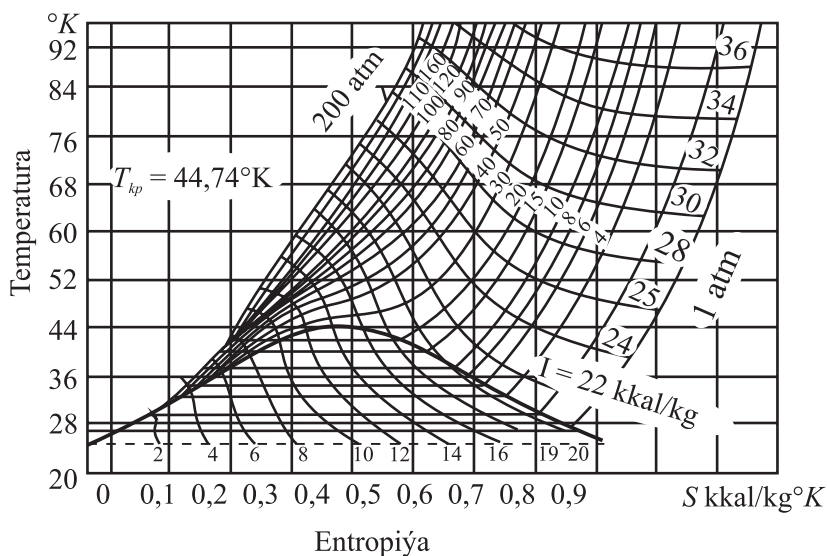
§ 4.9. Neon we ony suwuklandyrmak

Neon ençeme kriogen sistemasy üçin geljegi uly bolan işçi jisim bolup, pes temperaturalar tehnikasynda örän giňden ulanylmaga başlady. Neonyň gaz hem-de suwuk görnüşleriniň artykmaçlygy wodorod bilen deňeşdirilende mese-mälim duýulýar, onuň ýetýän temperatura derejesi wodorodyňka ýakyndyr. Sowadyjy jisim hökmünde neon absolýut howpsuzlygy we ýokary udel sowuklyk öndürjiligi bilen tapawutlanýar. Neon inert gazdyr, bu bolsa onuň wodoroddan esasy tapawudydyr (tehniki howpsuzlyk düzgünlerini köp derejede ýönekeýleşdirýär). Neon bugaranda şol bir mukdardaky wodorod bugarandakydan 3,3 köp ýylylyk alyp gidilýär. Neonyň gaýnama temperaturasy wodorodyň gaýnama temperaturasyndan 7°K ýokarydyr we kadaly atmosfera basyşynda $27,2^{\circ}\text{K}$ deňdir.

Neon $T_{\text{üç}} = 24,57^{\circ}\text{K}$ temperaturada gataýar (doňýar), bu üçeldilen nokada deňişli basyş 323 mm sim.süt. deňdir. Neon konwersiýa sezewar edilen däldir, onuň temperaturasyny kadaly derejede saklamak ýeňildir. Neon suwuk gelijy bilen doldurylýan enjamlary öňürti sowatmak üçin amatly işçi jisim bolup, suwuk geliniň sarp edilişini ep-esli azaltmaga mümkinçilik berýär.

Bug emele gelmeginiň ýokarylygy suwuk neony uzak wagtlap saklamaklyga mümkinçilik berýär. Uly bolmadyk göwrümde hem bir

áýyň dowamynda suwuklygyň 10%-e golaýy bugarýar. Neon diňe howadan alynýar (onuň düzümi $1,8 \times 10^{-3}\%$). Bu bolsa onuň bahasy-nyň ýokarylygyny we kriogen tehnikasynda az ýaýranlygyny kesgit-leyär. Neon howabölüji desgalarda neon-geliý garyndy görnüşinde alynýar, ol ýerde azotdan arassalanandan soň 30% He we 70% Ne galýar, garyndynyň geliden arassalanmasy kondensasion ýa-da ad-sorbsion usul bilen amala aşyrylýar.



4.17-nji surat. Neonyň T - S diagrammasy

Neon bilen işleýän kriogen sistemasy işlenip düzülende, onuň ýylylyk tehniki konstantalaryny, halynyň parametrlerini we temperaturalaryň, şeýle hem basyşlaryň giň interwalynda hallarynyň diagrammalaryny bilmekligi talap edýär. Bu häsiýetnamalaryň köpüsi ýaňy-ýakynda açylandyr.

4.17-nji suratda 25–190 K temperaturalar we 1–200 atm. basyşlar interwalynda neon üçin T - S diagramma şekillendirilen.

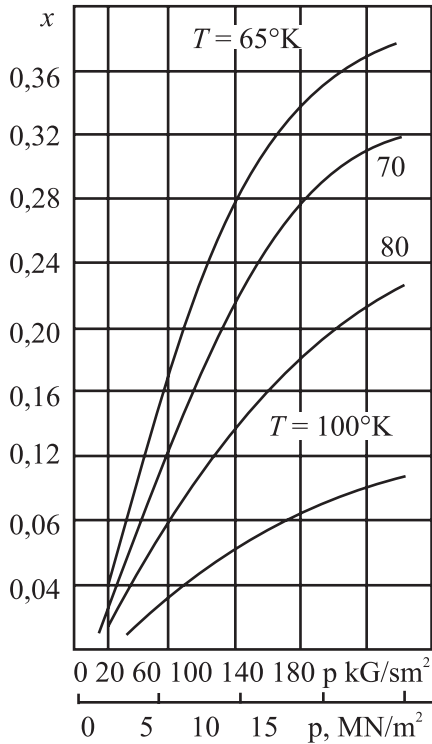
Neonyň inwerisiýa temperaturasy 250 K deňdir, diýmek, ony drosselirleme usuly bilen suwuklandyrmak üçin bu temperaturadan ep-esli pes öňürti sowadylma amala aşyrmak zerurdyr.

Neony drosselirleme usuly bilen suwuklandyрма wodorodyňka meňzeşdir (4.9-njy surat).

Öňürti sowadylma çeşmesi bolup metan ($T_{\text{gäý}} \approx 112\text{K}$) hyzmat edip biler, ýöne has pes temperaturalary üpjün edişi azody ulanmak has maksadalaýykdyr. Bu hili gaýtalanmanyň suwuklandyрма koeffisiýenti aşakdaky formula bilen kesgitlenilýär:

$$x = \frac{\Delta i_T - \sum q}{i_8 - i_0}.$$

4.18-nji suratda x -ň bahalary basyşyň we öňürti sowadylmanyň temperaturasynyň funksiýasy görnüşinde getirilýär.



4.18-nji surat. Neonyň suwuklandyryjy koeffisiýentiniň basyşa baglanysygy

x – kesgitlenende daşky gurşawdan gelýän ýylylyk akymy hasaba alynmaýar, nedorekuperasiýdan ýitgi $q_2 = c_p \Delta t_N$ bolsa $\Delta t_N = 3$ grad bahasynda kesgitlenýär. 4.18-nji suratdan görşümüz ýaly, suwuk azod ulanylanda suwuklandyрма koeffisiýenti örän uly, wakuum astynda

gaýnaýan azot ($T_{N_2} = 65K$) ulanylanda x -ň 60–70% artmagyna getirýär, proporsionallykda energetiki çykdajylar hem azalýar.

Suwuk neony ulanmaklyk kuwwatly elektromagniti sowatmakda maksadalaýykdygy gelip çykýar. 27 K çenli sowadylanda bu hili magnitiň sarymlarynda elektrik garşylyk mese-mälim pese düşýär. Bu hem kuwwatyň sarp edilişiniň ep-esli peselmegine getirýär. Elektromagniti sowatmak üçin işlenip düzülen neon sowadyjy gaýtalanma bir gije-gündizde 2000 kg çenli suwuk neony almaga mümkinçilik berýär. Mikrokrigen gurluşlaryň käbir görnüşleri üçin neon örän üstünlikli ulanylýar, çünki bu gurluşlar neony örän az talap edýär.

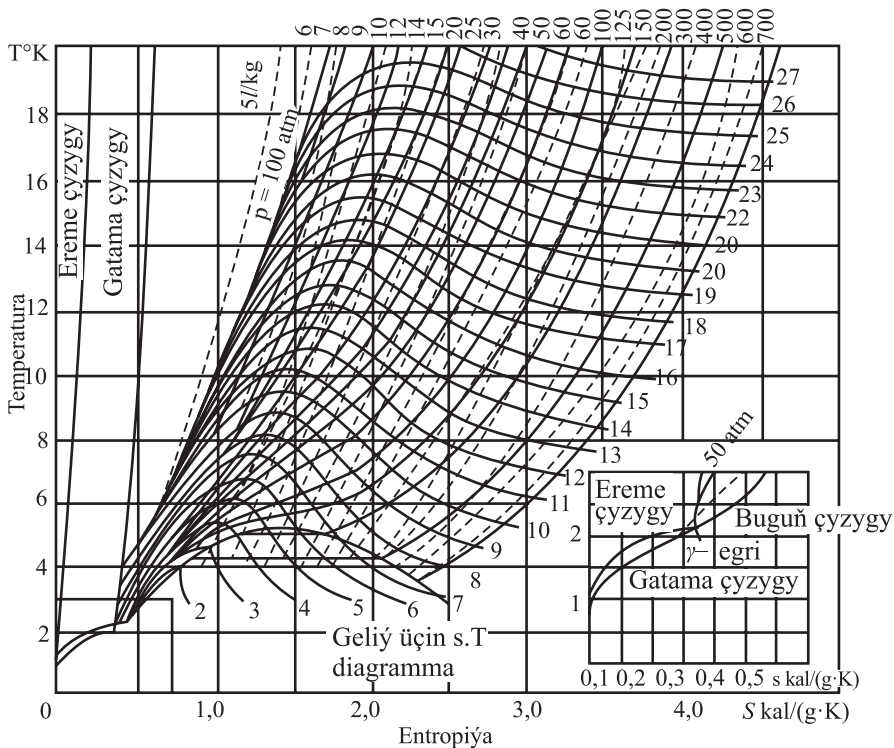
§ 4.10. Gelini almak we onuň esasy häsiýetleri

Geliý inert gazy dürli kriogen ulgamlarynda has giň ýaýran işçi gurşawdyr. Kriogen ulgamlarynda geliniň giňden ulanylmagy onuň birnäçe täsin fiziki häsiýetleriniň bolmagy bilen baglydyr.

Ž. Žansen we N. Lokkýer Günüň atmosferasyny öwrenýärkäler täze näbelli bir elementniň spektral çyzygynyň üstüni açýarlar we ony geliý diýip atlandyrýarlar, şeýlelikde, 1868-nji ýylda bu alymlar geliý diýip atlandyrylýan (grek sözünden gelip çykýan, «gelios»–gün) täze bir elementniň ýüze çykmagyna sebäp bolýarlar. 27 ýyldan soň Ramzaý minerallardan bölünip çykýan gazy öwrenende Ýeriň üstünde geliniň ýüze çykmagyny açýar. Tiz wagtda howanyň düzümünde göwrümi boýunça $5,24 \cdot 10^{-4}$ mukdarda geliniň bardygy anyklanylýdy.

Geliniň senagat möçberinde alynýan çeşmesi bolup käbir tebigy gazlar hyzmat edýärler: olaryň düzümindäki geliý 1-2%-i düzýär. Geliýgöteriji gaz ýataklary, esasan, Russiýada, ABŞ-da we Kanadada jemlenendir. Geliniň öndürilişi we sarp edilişi günsaýyn artýar.

Häzirki döwürde geliniň gorlaryny gorap saklamak we doly ulanmak üçin ähli çäreler görülýär. Esasan, metan bilen azotdan durýan, tebigy gazdan geliý çuň sowadylma usuly bilen alynýar. Tebigy gaz guýulardan çykarylansoň, ilki bilen, CO_2 -den we çyglylykdan (suw buglaryndan) arassalanýar, soňra bölüji desga ugradylýar, ol ýerde hem çygy geliý alynýar.



4.19-njy surat. Geliň $T-S$ – diagrammasy

Çyg geliý alnanda metan we beýleki uglewodorodlar pes temperaturada kondensasiýa bilen aýrylýarlar. Prosesiň ikinji döwründe azot we galan garyndylar aýrylýar. Wodorod platinaly katalizatorada kislorod bilen baglaşdyrma usuly bilen aýrylýar. Azodyň esasy mukdary kondensasiýa usuly bilen aýrylýar, galan garyndylar adsorberde siňdirilýär. Sarp ediljilere gelýän tehniki geliý $\sim 15,0$ MPa basyşda (ballonlarda) $0,5-0,8\%$ garyndyny özünde saklaýar.

Mälim bolşy ýaly, geliniň dykzlygy uly däl, ýylylyk sygymy bolsa örän uludyr; bu häsiýetleri bilen geliý wodorodyň yz ýanynda durýar. Gaz görnüşli geliý özüniň ýokary ýylylyk geçirijiligi bilen iň gowy ýylylyk göteriji bolup durýar. Geliý inert gaz bolany sebäpli, onuň bilen işlemek wodoroda garanynda örän ýeňil bolup durýar. Geliý örän giň temperatura hem-de baryşlar interwalynda ideal gazyň kanunalaýyklygyna ýeterlik derejede takyk boýun egýär. Tempera-

tura derejesiniň 20K-den aşaky çäkke real gazlaryň häsiýetleri ýeterlik takyk ýüze çykýar (4.18-nji surat).

4.19-njy suratda T - S diagrammanyň 0°K golaý bölegi aýratyn görkezilýär; bu ýerde 2K-den başlap entropiýanyň mese-mälim kemelmesi aýratyn bellemäge mynasypdyr. Geliý örän pes kondensasiýa temperaturasyna eýedir (atmosfera basyşynda $T_k = 4,215\text{ K}$), bu bolsa onuň kriogen tehnikasynda ulanylmagynyň esasy sebäbidir. Geliý – bu absolýut nol temperaturanyň golaýynda suwuk fazada bolup bilýän ýeke-täk maddadyr.

Geliniň inwersiýa temperaturasy $\sim 40^\circ\text{K}$, şonuň üçin drosselirleme usuly bilen He-ni suwuklandyrmak üçin diňe suwuk wodorodyň kömegi bilen öňürti sowadylmany üpjün etmek bolar. Temperaturasynyň peselmegi bilen drossel-effekt mese-mälim artýar; iň ýokary drossel effekti üpjün edýän inwersiýanyň basyşynyň bahasy $20\text{--}10^\circ\text{K}$ temperatura interwalynda $3,0\text{--}1,5\text{ MPa}$ deňdir. Suwuklygyň üstündäki buglary $0,12\text{ mm sim.süt.}$ çenli sorup almak bilen geliniň gaýnama temperaturasyny 1°K çenli peseltmek bolar. Bu usul bilen temperaturany peseltmegi dowam etmek, He-ň buglarynyň aşa pes maýyşgaklygy sebäpli, wakuum-nasosyň mümkinçiliklerine görä çäklendirilýär. Meselem, $0,1\text{K}$ temperaturada buglaryň deňagramly basyşy bary-ýogy $4,2\text{--}10^{-32}\text{ mm.sim.süt.}$ berýär. Geliniň bug emele gelme ýylylygy $2,8\text{ kJ/l}$ bolup, ähli bar bolan suwuklyklar üçin (He³-den başga) has pesdir. Bu ýagdaýlar suwuk gelini öndürmekde, saklamakda we onuň bilen işlemekde ýüze çykýan kynçylyklaryň esasy sebäbi bolup durýar.

Gaz görnüşli geliniň pes dykzlygy, ony gysmak üçin turbomaşyny ulanmakda kynçylyk döredýär. Adiabata görkezijisiniň ýokarylygy sebäpli, gysylanda geliý örän gaty gyzyar, geliý kompressorunyň basgançagynda basyşlaryň gatnaşygy howanyňka garaňda pes bolmaly. Kriogen tehnikasyndan başga-da geliý ýadro energetikasynda, raketa tehnikasynda we beýleki pudaklarda kebsirleme işlerinde giňden ulanylýar.

Suwuk geliniň özüni alyp barşy suwuklyklaryň häsiýetleri barada ozalky ornaşan pikirleri köp babatda üýtgedýär hem-de örän uly ylmy gyzyklanma döredýär.

Suwuk geliniň häsiýetleri. Suwuk geliý reňksiz, dury suwuklykdyr, häsiýeti boýunça onuň özüne taý geljek madda ýokdur.

G.Kamerling-Onnes (niderland fizigi) 1908-nji ýylda ilkinji bolup suwuk gelini alyp, suwuklygyň üstündäki buglaryň basyşyny peseltmek bilen, onuň üçler nokadyny kesgitlemäge synanyşýar, emma ol şowsuz bolýar. Soňra geçirilen derňewler geliniň üçler nokadynyň ýokdugyny görkezýär; ol 0°K çenli suwuklygyna galýar.

Geliniň T - P deňagramly diagrammasyndan (4.20-nji surat) görnüşi ýaly, gaty jisimiň hem-de suwuklygyň çyzyklary kesişmeýär we üç fazalar bir wagtda deňagramly ýagdaýda bolup bilmeýärler. Gaty gelini almak üçin daşyndan $P \approx 2,54$ MPa ($T < 1,5$ K temperaturada) basyşy bermek zerurdyr. Beýleki suwuklyklara degişli bolmadyk geliniň bu häsiýeti kwant teoriýasynyň esasynda düşündirilýär.

Klassyky teoriýa laýyklykda 0°K-de mikrobölejikleriň ýylylyk hereketleri doly togtayar. 0°K-temperaturada atomlar giňişlikde iň az enegiýa degişli bolan ýagdaýy eýeleýärler we doly dynçlyk ýagdaý döreyär. Ýöne kwant teoriýasy her bir atomyň iň pes kinetik enegiýa eýedigini görkezýär:

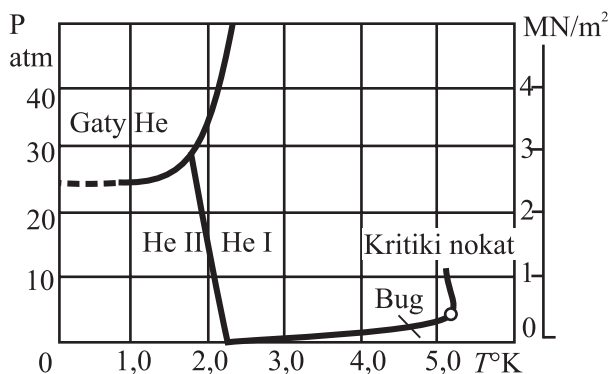
$$E_0 = \frac{1}{2} h\nu.$$

bu ýerde:

$h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·sek – Plankyň hemişeligi;

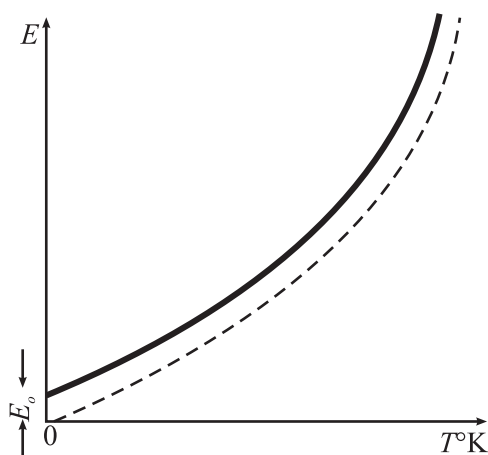
ν – atomyň yrgyldy ýygylgy.

Bu ululyk temperatura bagly däldir; 0°K-de madda nol E_0 enegiýa eýe bolmalydyr.



4.20-nji surat. Geliniň T-P diagrammasy

Nolluk energiýanyň ululygy onçakly uly däldir, adaty temperaturada onuň umumy energetiki ýagdaýa ýylylyk energiýasyna garanda goşandy ujypsyzdyr.



4.21-nji surat. Sistemanyň E doly energiýasynyň temperatura baglylygy

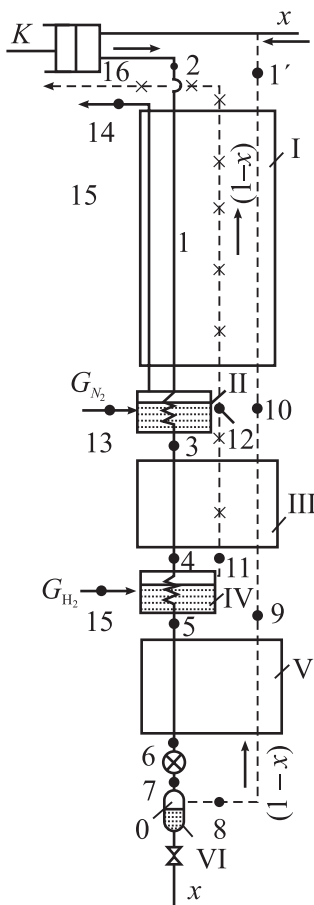
Ýöne 0°K - golaýynda E_0 ululyk doly energiýanyň belli bir bölegini düzmek bilen, maddalaryň özünü alyp barşyna düýpli täsir edýär.

§ 4.11. Gelini suwuklandyrmagyň usullary

G. Kamerling-Onnes Leyden laboratoriyasynda (tejribehanasynda) öňürti (deslapky) sowadylmaly drosselirleme usuly bilen gelini suwuklandyrýar. Bu usuly ulanmak üçin gelini inwersiýa temperaturasyndan ep-esli pes temperatura çenli sowatmaly, bu bolsa wodorodyň kömegi bilen amala aşyrylýar. Gelini suwuklandyrmak usullary, göräýmäge beýleki gazlary suwuklandyрма usullaryndan düýpli tapawutlanmaýan hem bolsa, onuň örän pes temperaturasy tehnikä häsiýetli birnäçe kynçylyklara sezewar edýär. Meselem, prosesi rasional amala aşyrmak üçin, iň bolmanda, üç sany sowadylma basgançagy zerur bolup durýar. Örän pes bugarma temperaturasy enjamlaryň we gaplaryň ýylylyk izolýasiýasyna aýratyn talap bildirýär.

Kamerling-Onnes bilen bir hatarda geliý suwuklandyryjylarynyň täze görnüşlerini işläp düzmekde P. Kapissa, F. Simon we S. Kollins

uly goşant goşýarlar. Olaryň işläp düzen usullary we prinsipleri gelini suwuklandyryjylaryň täze döwrebap konstruksiýalarynyň esasyny düzýär.



4.22-nji surat. Drosselirleme usuly bilen gelini suwuklandyрма usuly

Drosselirlenmeli gaýtalanma. Gelini öňürti sowatmakda wakuum astynda gaýnaýan suwuk wodorod ulanylanda 15–16 K çenli sowadyлма üpjün edilýär. Öňürti sowadylmanyň diňe bir basgançagy ulanylanda suwuk wodorodyň köp mukdary sarp edilýär; bu hili she-ma termodinamiki taýdan maksadalaýyk däl-dir.

Iň bolmanda sowadylmanyň ýene bir basgançagy zerurdyr, ol bolsa suwuk azodyň kömegi bilen üpjün edilýär.

Şeýlelik bilen, gelini suwuklandyrmanyň klassyky shemasy iki sany öňürti sowadyлма basgançagyňy we soňra drosselirlemäni özünde jemleýär: birinji basgançakda N_2 , ikinjide bolsa H_2 ulanylýar. Bu hili gaýtalanmany amala aşyrmagyň dürli görnüşi bardyr. Has giňden ýaýran shemada suwuk azot atmosfera basyşynyň astynda, wodorod bolsa geliniň iň ýokary drossel-effektini üpjün edip, wakuum astynda gaýnaýar.

Bu hili üçbasgançakly gaýtalanmanyň (4.22-nji surat) shemasy-na seredeliň. Seredilýän shemada suwuk N_2 we H_2 daşyndan berilýär. Kompresordan gelýän geliniň akymy ähli ýylylyk çalşyjylardan I–IV zygider geçip, VI-ýygnaýjy gaba drosselirlenýär. Emele gelen x suwuklyk bölünip aýrylýar, $(1-x)$ ters akym bolsa V, III, I ýylylyk çalşyjylarda gyzdrylyp, kompressora gaýdyp barýar. Kompresoryň sorulma ugruna bölünip aýrylan x mukdardaky suwuklygyň mukdaryna deň bolan gaz görnüşli geliý gelip goşulýar. Azodyň we wodorodyň buglary gysylan geliniň akymyny sowadyrlar we ýylylyk çalşyjylaryň üsti bilen suwuklandyryjydan çykarylýarlar. Bu shemanyň hasaplanmasyny amala aşyrmak üçin x suwuklandyryjy koeffisiýenti, azodyň G_{N_2} hem-de wodorodyň G_{H_2} mukdaryny, şeýle hem sarp edilen l energiýany kesgitlemek zerurdyr. Hasaplamaný zolaklar boýunça alyp barmalydyr, ýagny her bir basgançak üçin temperaturalaryň bahasyny öňürti kabul edip, şeýle hem q_3 ýitgini we nedorekuperasiýany hasaba almalydyr. Hasaplama formulalary degişli sowadyлма basgançaklarynyň ýylylyk balansyndan gelip çykýar. (3–11) formula degişlilikde aşaky basgançak üçin

$$x = \frac{\Delta i_{T5}(c_p \Delta t_{5-9} + q_3)}{(i_9 - i_0)} \quad (4.55)$$

Δi_T – drossel effekt wodorod wannasynyň temperatura derejesinde hasaplanýar.

$c_p \Delta t_{5-9}$ – nedorekuperasiýadan ýitgi örän pes temperaturalarda suwuklyk öndürijiligine uly täsir edýär, şonuň üçin $\Delta t_{5-9} = 1 \div 0,5$ grad kabul edilýär. Ýylylyk izolýasiýasynyň hiliniň ýokary bolan ýagdaýynda q_3 , adatyça, 3–5% düzýär.

(3–9) aňlatma degişlilikde wodorodyň akymy aşakdaky formula boýunça hasaplanýar:

$$G_{H_2} = \frac{x(i_{10} - i_9) + q_{\Sigma_2}}{(i_{12} - i_{15})_{H_2}}. \quad (4.56)$$

Azot wannasynyň derejesinde nedorekuperasiýa ululygyny $\Delta t_{3-10} = 3 \div 2$ grad kabul edilýär. (3–9) formula boýunça azodyň G_{N_2} mukdary kesgitlenende, G_{H_2} -ň ters akymynyň I ýylylyk çalşyjdandan geçip, öňürti sowadylma prosesine gatnaşmak bilen, onuň hem öz suwuklygyny gelä berýändigini göz önünde tutmalydyr.

Bu ýagdaýlary hasaba alyp, ýokarky basgançak üçin ýylylyk balansynyň deňlemesi aşakdaky görnüşe eýe bolar:

$$G_{N_2}(i_{14} - i_{13})_{N_2} + G_{H_2}(i_{16} - i_{12})_{H_2} = x(i_{17} - i_{10}) + q_{\Sigma_1}. \quad (4.57)$$

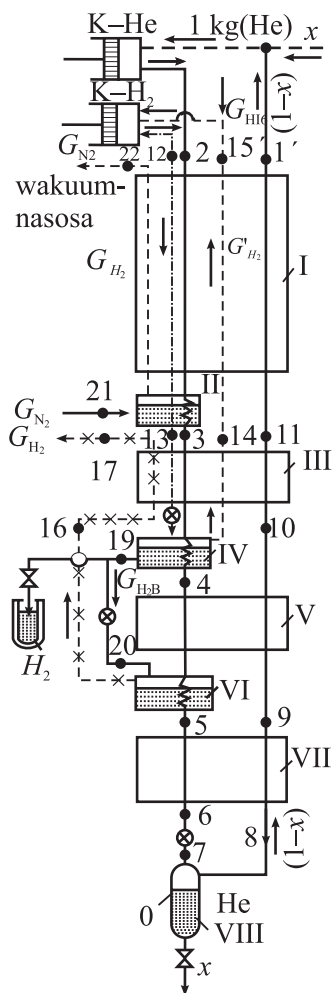
Bu deňlemeden azodyň G_{N_2} zerur bolan mukdaryny kesgitläris. Wodorod suwuklandyryjysyndaky ýaly ýyly ahyrlaryndaky nedorekuperasiýa $\Delta t = 10 \div 15^\circ\text{C}$ -e deňdir.

(4.55)–(4.57) formulalara girýän entalpiýalaryň bahalary geliý, wodorod we azot üçin degişli termodinamiki diagrammalar boýunça kesgitlenilýär.

Bu gaýtalanmada sarp edilen energiýa dört sany düzüjiden durýar:

$$l = \frac{RT_i \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{iz} x} + G_{H_2} \frac{l_{H_2}}{x} + G_{N_2} \frac{l_{N_2}}{x} + \frac{l_{goş}}{x}. \quad (4.58)$$

Bu düzüjiler degişlilikde gelini P_1 -den P_2 basyşa çenli gysmak üçin sarp edilen energiýadan, G_{N_2} azody we G_{H_2} wodorody öndürmek üçin we goşmaça zerurlyklara sarp edilen energiýadan durýar. Şunlukda, guýlandaky ýitgisi we goşmaça sarp edilmeler sebäpli, azodyň haýky mukdarynyň hasaplama mukdaryndan 30–50% aralygyny göz önünde tutmaly. Bu gaýtalamanyň has çylşyrymly görnüşi, gapdalyndan çatylan wodorod gaýtalanmasynyň kömegi bilen, gönüden-göni geliý suwuklandyryjysynda suwuk wodorody almaklygy göz önünde tutýar. Bu hili shema has maksadalaýyk bolup, önümçilikde giň ýaýran shemalaryň biridir (4.23-nji surat).



4.23-nji surat. Gaptaldyndan çatylan wodorod gaýtalanmaly, drossel usuly bilen gelini suwuklandyrma çyzgysy:

K – geliý we wodorod kompressory; I,III,V,VII – ýylylyk çalşyjylar;

II – suwuk azotly wanna; IV – suwuk wodorodly wanna;

VI – wakuumly suwuk wodorodly wanna;

VIII – suwuk geliýli ýygnaýjy gap;

IX – suwuk wodorody ýygnaýjy gap

Bu çyzgynyň esasy artykmaçlygy – uniwersallygy we suwuk H_2 wodorody üpjün ediji çeşmä bagly däldigi; kemçiligi – käbir çylşyrymlylyklar.

Geliý we wodorod I, III ýylylyk çalşyjylary we II azot wanasyny geçýärler, soňra wodorod IV ýygnaýjy gaba drosselirlenýär we bölekleýin suwuklanýar. Suwuk H_2 VI wakuum wodorodly wanna düşýär, geliniň akymy bolsa wodorodly iki wannalary we V, VII ýylylyk çalşyjylary geçip, ýygnaýjy gaba drosselirlenýär. Ters akymlar ähli ýylylyk çalşyjylaryň üstünden yzygiderlilikde geçip, daşky gurşawyň temperaturasyna çenli gyzdyrylýarlar. VI wannanyň wakuumirlenmesini ýeňilleşdirmek üçin ondan çykan ters akym I we V ýylylyk çalşyjylardan geçmeýär. Bu gaýtalanma goşmaça dördünji sowadylma basgançagyň girizilmegi sebäpli, termodinamiki taýdan örän amatlydyr.

Bu hili gaýtalanmada akymalaryň kesgitlenilmesi, geliý-wodorod kombinirlenen shemanyň bar bolmagy sebäpli çylşyrymlaşýan hem bolsa, (3–9)–(3–11) başlangyç gatnaşyklara esaslanýar. Suwuklandyрма koeffisiýenti x we wakuum wodorodynyň mukdary G_{H_2w} , indeksleriniň degişli üýtgetmesini hasaba alyp, (4.55) we (4.56) formulalar boýunça tapylýar.

Sirkulirlenýän wodorodyň doly mukdary G_{H_2} , III ýylylyk çalşyjyny we IV wannany özünde jemleýän ikinji basgançagyň ýylylyk balansyndan kesgitlenýär.

$$\begin{aligned} i_3 + G_{H_2} i_{13} + G_{H_2w} i_{16} + (1-x) i_{10} + q_3 = \\ = G_{H_2w} i_{19} + i_4 + G'_{H_2} i_{14} + G_{H_2w} i_{17} + (1-x) i_{11}. \end{aligned}$$

IV wannadan ters akym $G'_{H_2} = G_{H_2} - G_{H_2w}$ deňligini göz önüne alyp we ony özgerdip, wodorodyň doly akymyny kesgitlemek üçin aşakdaky aňlatmany alarys:

$$G_{H_2} (i_{14} - i_{13})_{H_2} = x(i_{11} - i_{10}) + q_{\sum_2} + G_{H_2w} q_{\sum_{H_2}} \quad (4.59)$$

bu ýerde: $q_{\sum_{H_2}} = [(i_{16} - i_{19}) - (i_{17} - i_{14})]$.

Bu formulanyň sag tarapynda geliý akymynyň sowuklygyna sarp edilýän harajaty häsiýetlendirýän birinji iki agzadan başga goşmaça $G_{H_2w} q_{\sum_{H_2}}$ goşulyjy bardyr. Bu goşulyjy wakuum wodorodynyň akymyny döretmek üçin sarp edilen sowuklygy aňladýar.

Berlen basgançakda sowuklygyň çeşmesi gysylan wodorodyň drossel effekti bilen kesgitlenilýär:

$$(i_{14} - i_{13})_{H_2} = \Delta i_{T13} - c_p \Delta t_{13-14}.$$

Azodyň mukdary iki sany özbaşdak böleklerden: geliý we wodoroddan durýan basgançak hökmünde seretmek bolýan ýokarky basgançagyň ýylylyk balansyndan hasaplanýar.

Geliý seksiyasy üçin

$$G'_{N_2} (i_{22} - i_{21}) = x(i'_{11} - i_{11}) + q_{\Sigma_1}.$$

Wodorod seksiyasy üçin

$$G''_{N_2} (i_{22} - i_{21}) = G_{H_2,w} (i_{15'} - i_{14}) + G_{H_2} q_{\Sigma_1 H_2}.$$

Azodyň jemi akymy

$$G_{N_2} = G'_{N_2} + G''_{N_2} = \frac{x(i'_{11} - i_{11}) + q_{\Sigma_1} + G_{H_2,w} (i_{15'} - i_{14}) + G_{H_2} q_{\Sigma_1 H_2}}{(i_{22} - i_{21})_{N_2}}. \quad (4.60)$$

q_{Σ} görünüşli ululyklar her bir basgançak üçin deňişli indeksleri hasaba alyp, (3–15) formula boýunça kesgitlenilýär.

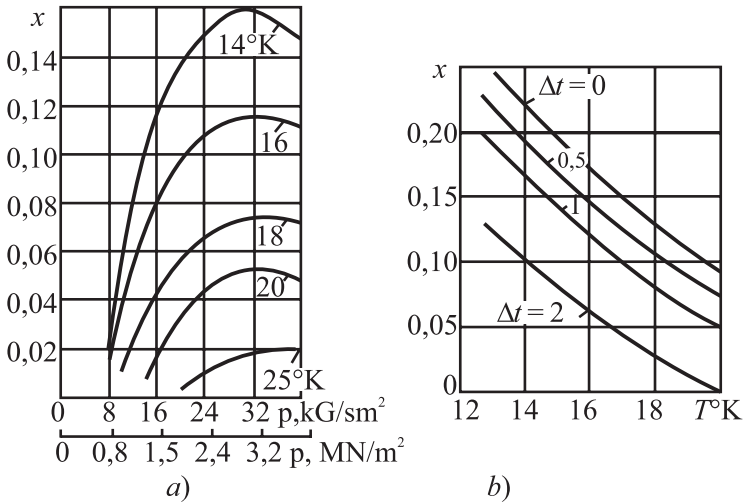
Sarp edilen energiýa gönüden-göni geliý suwuklandyryjysynda wodorodyň öndürilişini hasaba alyp, aşakdaky formula boýunça kesgitlenip bilner:

$$l = \left[\frac{RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{iz} x} \right]_{He} + G_{H_2} \left[\frac{RT_1 \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}{\eta_{iz} x} \right]_{H_2} + G_{N_2} \frac{l_{N_2}}{x} + \frac{l_{goş}}{x}. \quad (4.61)$$

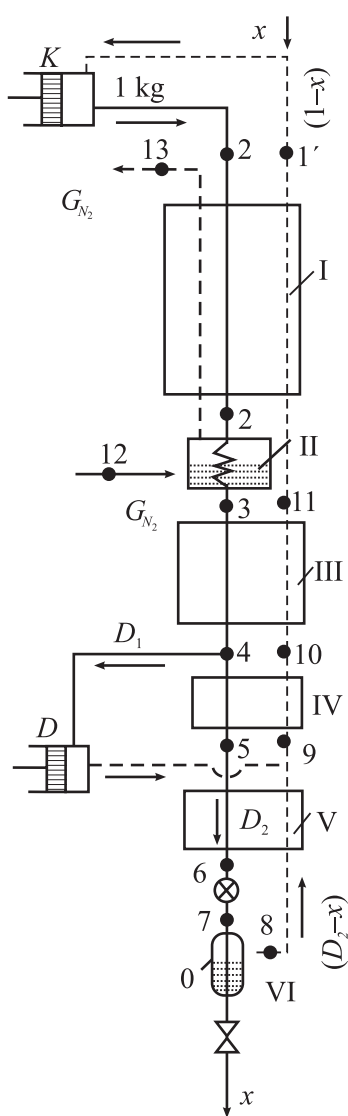
Bu suwuklandyryjylaryň hasaplama häsiýetnamasy 4.24-nji suratda getirilen.

Suwuklandyryjy koeffisiýent x öňürti sowadylma temperatura-syna köp derejede baglydyr. Bu temperaturanyň 20-den 16°K çenli üýtgemegi sowuklygyň çykyş mukdaryny iki esse artdyrýar. Egrileriň maksimumy berlen temperaturalar üçin inwersiýa ýagdaýyna deňiş-

li bolan $P_2 \approx 3,0 \div 3,5$ MPa basyşlarda ýatýar. Bu grafikde $T = 25^\circ\text{K}$ üçin hem egri getirilen, bu bolsa gelini suwuklandyrmakda öňürti sowadylmada neony ulanmak mümkinçiligine şaýatlyk edýär, ýöne şunlukda suwuklandyryma koeffisiýenti örän az bolup durýar. Egriler $\Delta t_N = \Delta t_{5,9} = 1$ grad nedorekuperasiýada we $q_3 = 0$ – bahalarda gurlan. Nedorekuperasiýanyň x ululyga täsiri 4.24-nji b suratdan görünýär (bu ýerde x -ň ululygy optimal basyşlarda hasaplanan). Suwuklandyryjylaryň ekspluatasiýasynda suwuklygyň iň köp çykyşy (alynýan mukdary) 2,0–2,5 MPa basyşlara degişlidigini bellemek gerek (bu 4.24-nji a suratda berilýän maglumatlara gapma-garşy gelýär). Bu sowaşyklyk geliniň göni akymynyň basyşynyň peselmeginde ýylylyk sygymynyň artmagy bilen düşündirilýär; şonuň netijesinde drosseliň öň ýanyndaky temperatura we degişlilikde aşaky ýylylyk çalşyjynyň sowuk ahyrynda temperaturalar tapawudy artýar. Ýylylyk çalşyjyda temperaturalar tapawudynyň ortaça bahasynyň öňküligine galýandygy sebäpli, bu onuň ýyly ahyrlarynda nedorekuperasiýanyň peselmegine getirýär. Netijede, basyşlaryň 2,0–2,5 MPa çenli peselmeginde drossel effektiň peselmegi nedorekuperasiýadan ýitginiň ep-esli peselmegi bilen kompensirlenýär we x artýar.



4.24-nji surat. Drosselirlenmeli we öňürti sowadylmaly gaýtalanmada gelini suwuklandyryjy koeffisiýentiň basyşa we öňürti sowadyлма температурасына (a) hem-de temperatura we aşaky başgançakdaky nedorekuperasiýa (b) baglylygy



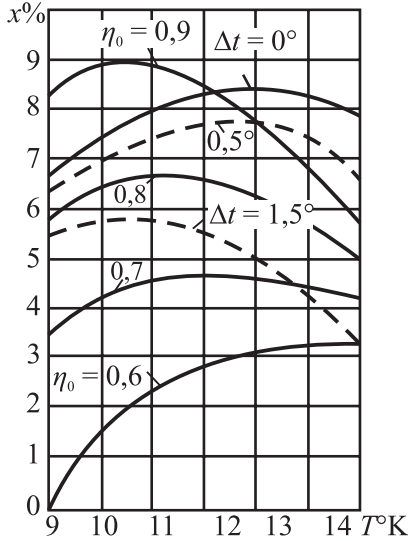
4.25-nji surat. Detanderli gaýtalanma boýunça gelini suwuklandyрма shemasý:

K – kompressor; D – detander; I, III, IV, V – ýylylyk çalşyjylar; II – suwuk azotly wanna; VI – suwuk gelini ýygnaýjy gap

Suwuklandyryjy blokda hereket edýän bloklaryň ýoklugy, ýönekeýligi, işleýşiniň ygtybarlylygy – bu şuna meňzeş desgalaryň düýpli artykmaçlygy bolup durýar, ýöne wodorodyň bar bolmagy olaryň ähmiýetini peseldýär.

Detanderli gaýtalanma. Detanderi ulanmak bilen wodorodly öňürti sowadyлма aradan aýrylýar. Detanderde gysylan geliniň akymynyň bir bölegi giňelýär. Ilkinji gezek detanderli geliý suwuklandyryjysyny döretmek taglymaty 1934-nji ýylda P.Kapissa tarapyndan amala aşyrylýar. Bu hili gaýtalanmanyň shemasy 4.25-nji suratda getirilen. Kaskadyň birinji basgançagy hökmünde öňürti sowadylmaly azot wannasy saklanýar; wodorodly basgançagy detanderli bilen çalşyrylýar, aşaky basgançakda drosselirlenme galýar. Wodorody aradan aýyrmakdan başga-da detanderde termodinamiki has effektiv prosesi ulanylmaklygy bu çyzgynyň artykmaç taraplaryny kesgitleýär. Geliý kompressordan gaýdyp, I – ýylylyk çalşyjydan, II – azot wannasyndan we III – ýylylyk çalşyjydan geçip iki akyma bölünýär: D_1 detandere düşýär, D_2 bolsa IV we V ýylylyk çalşyjylardan geçip, ýygnaýjy gaba drosselirlenýär. D_1 akym detanderde giňelýär. Porşenli paranyň dykzylygynyň gowşaklygy netijesinde geliniň syzylp, ýitgisi ($4 \div 6\%$) bolup biler; bu ýitgiler ters akymyň ugruna gönükdirilýär. Detanderde giňelmeden soň geliniň temperaturasy 9–12K ýetýär; temperaturanyň bu derejesi wo-

dorod bilen sowadylmadan pesdir, şoňa laýyklykda drosseleffektiň ýokary ululygyny üpjün edýär. Drosselirlmä geliniň diňe bir $D_2 = 1 - D_1$ bölegi düşýär, şonuň üçin, umuman alanyňda, suwuklandyрма koeffisiýenti wodorodly sowadylma bilen deňeşdirilende pes gelýär we 5–6%-i düzýär.



4.26-njy surat. Detanderli gaýtalanmada gelini suwuklandyрма koeffisiýentiniň detanderden soňky temperatura baglylygy (ştrihlenen çyzyklar – $\eta_0 = 0,8$ degişli; tutuş çyzyklar $\Delta t = 1$ grad degişli)

Sarp edilen energiýa aşakdaky formula boýunça kesgitlenýär:

$$l = \frac{RT_1 \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{iz} x} + G_{N_2} \frac{l_{N_2}}{x} + \frac{l_{goş}}{x}. \quad (4.62)$$

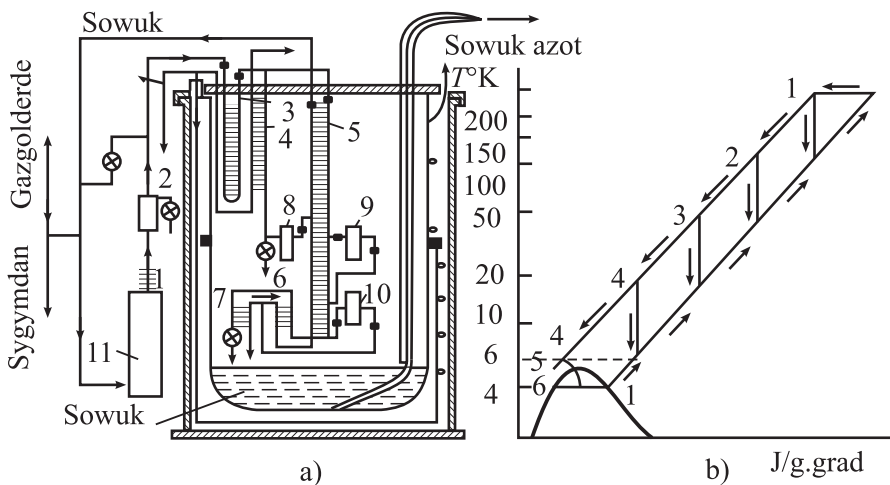
Şunlukda, detanderiň gaýtaryp berýän energiýasy $D_1 \frac{h_o \eta_o \eta_{meh}}{x}$ örän az, şoňa görä-de ol hasaba alynmaýar. Suwuklandyрма koeffisiýentiniň egrileri 4.26-njy suratda getirilen. Geliniň basyşy $P_2 = 2,16$ MPa kabul edilen, bu hili gaýtalanma üçin görkezilen basyş optimal diýip hasaplanylýar.

4.26-njy suratda suwuklandyрма koeffisiýentiniň detanderiň η_0 PTK-den örän köp babatda baglydygy görünýär, şonuň bilen bagly-

lykda η_0 – ñ ösmegi bilen maksimum has pes temperatura çäGINE süýşýär. Şoňa meňzeş shemalar örän giňden ulanylyp başlanýar; bu hili suwuklandyryjylaryň esasy kemçiligi porşenli paranyň we detanderiň klapanyň işi bilen bagly pes ygtybarlylygydyr.

Seredilen shemanyň geljekde has kämilleşdirilmegi azot bilen sowadylmany aradan aýryp, onuň ornuna detanderiň ulanylmagy bilen baglydyr. Daşky sowadyjy jisimleriň aradan aýrylmagy shemanyň artykmaç tarapy ny kesgitleýär we şonuň bilen birlikde gelini daşky sowadyjy jisimlerden garaşsyz suwuklandyrmaga mümkinçilik berýär.

Bu hili gaýtalamanyň shemasy her bir detanderde gysylan geliniň akymynyň bir bölegini alyp gitmek bilen, galan böleginiň drosselirlenmegini göz önünde tutýar. Şeýlelik bilen, öňki shemalardaky ýaly üç kaskadly gaýtalanma saklanýar, ýöne bu azotly sowadylmanyň ornuna detander çalşylmagy bilen termodinamiki taýdan has netijeli çyzgy bolup durýar.



4.27-nji surat. S. Kollins gaýtalanmasy boýunça gelini suwuklandyрма shemasy: a – suwuklandyryjynyň shemasy (1 – sowadyjy; 2, 3 – azot bilen sowadylmaly deslapky ýylylyk çalşyjylar; 4 – azotly ýylylyk çalşyjy; 5 – esasy ýylylyk çalşyjy; 6, 7 – aşaky ýylylyk çalşyjylar; 8, 9, 10 – detanderler; 11 – kompressor); b – T-S diagrammada hyýaly gaýtalanma

Iki detanderli shema boýunça işleýän suwuklandyryjy P. Kapissa we J. Danilow tarapyndan işlenip düzülýär. Detanderler kaskadly köp basgançakly suwuklandyryjylaryň döredilme ideýasynyň ösüşine

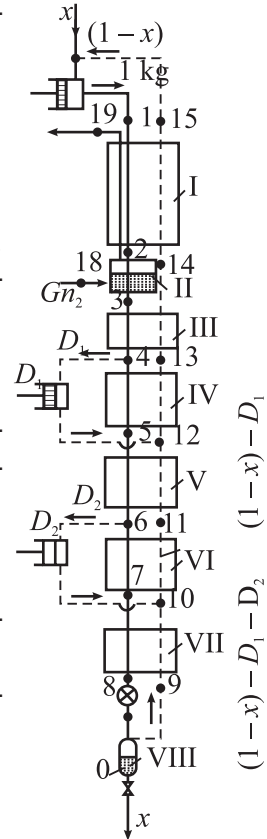
S.Kollins uly goşant goşýar we şeýle desgalaryň birnäçesini işläp düzýär. Mälim bolşy ýaly, sowadyлма basgançagyňyň sanynyň artdyrylmagy suwuklandyrmagyň ideal gaýtalanmasyna düýpli ýakynlaşmaga mümkinçilik berýär; bu ýagdaý baş basgançakdan durýan Kollinsiniň shemasynyň esasyna ornaşdyrylan ýagdaýdyr.

Kollinsiniň gaýtalanmasy (4.27-nji surat) azotly öňürti sowadylmagy, detanderli üç basgançagy we drosselirlämäni özünde jemleýär. Elbetde, bu hili çylşyrymly shemalar ykdysady we termodinamiki effektiwligiň esasy rol oýnaýan ýerinde, diňe iri suwuklandyryjy desgalar üçin maksadalaýykdyr.

Bu shemanyň hasaplamasynda x suwuklandyryjy koeffisiýent we üç detandere bölünýän D_1, D_2, D_3 akymlyar (3–11) we (3–12) görnüşli deňlemeler sistemasynyň bilelikde işlenmegi bilen kesgitlenýär. Azodyň mukdary x koeffisiýent kesgitlenenden soň, (3–9) formula boýunça tapylýar.

Has giňden ýaýran Kollinsiniň suwuklandyryjysynyň beýleki görnüşi dört sany sowadyлма basgançagyňy özünde jemleýär (4.28-nji surat): azot wannasy, iki detander we drosselirlеме.

Gelini suwuklandyrmagyň has köp ýaýran gaýtalanmasynda ýitginiň entropiýa derňewiniň netijesi 4.3-nji tablisada getirilýär. Görnüşi ýaly, detanderiň sanynyň artdyrylmagy bilen gaýtalanmanyň häsiýetnamasy gowulanýar, ýöne onuň ygtybarlylygyny peseldýär, ekpluatasiýasyny çylşyrymlaşdyrýar. Bu ýagdaý hem azotly sowadylmagy, bir detanderi we drosselirlernmäni özünde jemleýän shemanyň has giňden ulanylmagyň düýpli sebäbi bolup durýar; ýöne bu shema ikinji detanderiň goşulmagy baradaky tendensiýa hem dowam edýär.



4.28-nji surat. Iki detanderli öňürti sowadyлма we drosselirlемeli gaýtalanma boýunça gelini suwuklandyryjy shema:

K – kompressor; D_1, D_2, D_3 – detanderler; I, III, IV, V, VI, VII – ýylylyk çalşyjylar; II – suwuk azotly wanna; VIII – suwuk gelini ýygnaýjy gap

**Gelini suwuklandyrmagyň has köp ýaýran gaýtalanmasynda
ýtginini entropiýa derňewi**

Gaýtalanmalar	Termodinamiki PTK, %	Sarp edilen energiýa kwt. sag/l	Suwuklandyрма koef-fisiýenti, %	Bellikler
Azotly we wodorodly wannalarda sowadylmaly we drosselirlenmeli	6,7	3,4	~12	1l suwuk geliý üçin sarp edilen azot 1,5 l/l, $P \approx 2 \div 2,5 \text{ MPa}$
Azotly sowadylmaly, detanderli we drosselirlenmeli	8,8	2,6	~6	1l suwuk geliý üçin sarp edilen azot 1-0,8l/l $P \approx 2, \text{ MPa}$ $\eta_{\text{de}} t = 0,8$
Iki detanderli we drosselirlenmeli	11,6	2,2	~5	$\eta_{\text{det I}} = 0,7$ $\eta_{\text{det II}} = 0,8$

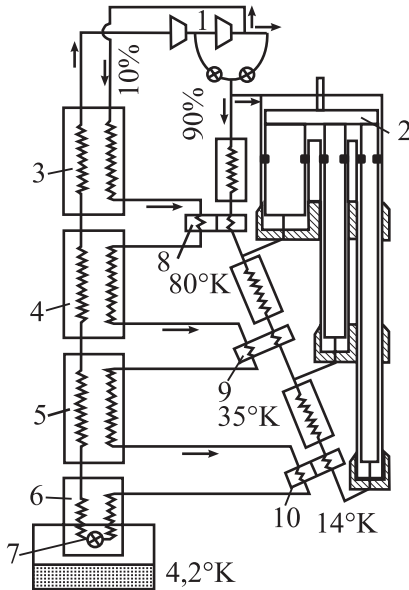
Ähli detanderli shemalarda drossel basgançagyňyň oň ýanyndaky optimal temperatura 9–11K bolup durýar. Optimal basyş hem hasaplamalar netijesinde, adatyça, 2MPa diýip alynýar. Seredilen shemalar has giň ýaýran hasaplanylýar; olardan başga-da gelini suwuklandyrmakda aýratyn gyzyklanma döredýän ýene iki usul bardyr.

§ 4.12. Gazly sowadyjy maşynlary ulanmak bilen sowadylma

Mak-Magonyň – Jiffordyň ýylylyk nasosy görnüşinde gazly sowadyjy maşynlar ýa-da «Filips» maşynlary drosselirlenme usuly boýunça suwuklandyrylma gaýtalanmasynda gelini öňürti sowatmak üçin ulanylyp bilner. Bu hili suwuklandyrylma azot we wodorod bilen öňürti sowadylmaly drosselirlenmeli usuldan prinsipial taýdan tapawutlanmaýan hem bolsa, çylşyrymly gurluşy bolan gazly sowadyjy maşynyň (GSM) ulanylmagyny talap edýär.

Gelini suwuklandyrmak 20 K çenli öňürti sowadylmany talap edýär, ýylylygy alyp gitmekligi bolsa her bir temperatura derejesin-

de amala aşyrmaly, şonuň üçin sowadyjy maşynlar köp basgançakly bolmaly. Bu hili gaýtalanma häsiýetlä mysal edip üç basgançakly ýylyk nasosynyň esasynda ýerine ýetirilen geliý suwuklandyryjysyny görkezme bolar (4.29-njy surat).



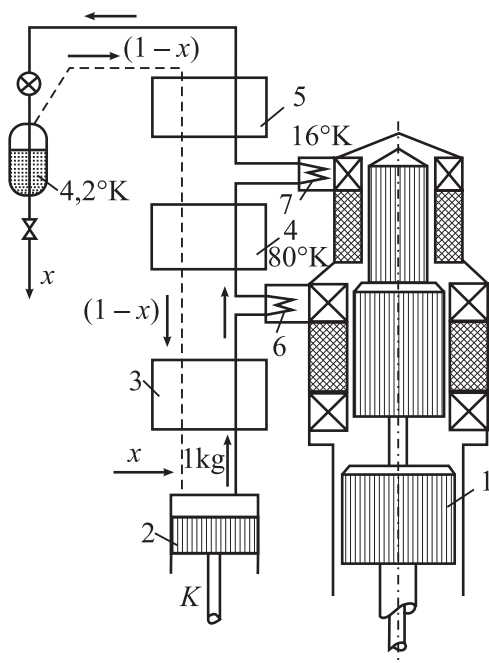
4.29-njy surat. Üç basgançakly ýylyk nasosynyň esasynda gelini suwuklandyрма shemasy:

- 1 – kompressor; 2 – üç basgançakly ýylyk nasosy;
 3, 4, 5, 6 – suwuklandyryjy konturyň ýylyk çalşyjylary;
 7 – drossel; 8, 9, 10 – aralyk ýylyk çalşyjylary

Bu shemada 2,06 MPa basyşa çenli gysylan geliý (ýylyk nasosynda sirkulirlenýän geliniň 10% mukdary) üç sany ýylyk çalşyjydan yzygider geçýär we olaryň her biriniň arasyndaky 80, 35, 14 K temperatura derejesinde ýylygy alyp gitmek amala aşyrylýar. Aşaky basgançakda drosselirlenmeden soň geliý bölekleyin suwuklanýar, ters akym bolsa ýylyk çalşyjylaryň üsti bilen kompressora ugrukdyrylýar. Bu suwuklandyryjynyň suwuk gelini öndürijiligi 1,5 l/sag, sarp edilýän energiýa 18 MJ/l (5 Kwt·sag/l).

Gelini suwuklandyrmak iki basgançakly Filips maşynynyň (4.30-njy surat) kömegi bilen öňürti sowadylma usulyňy ulanyp amala aşyrylyp bilner. Suwuklandyrylýan akymdan 80 we 15–16 K tem-

peratura derejelerinde ýylylygy alyp gitmek maksadalaýykdyr. Filips maşynynyň ýokary termodinamiki effektiwligi suwuklandyрма prosesini amala aşyrmakda Mak-Magon-Jiffordyň sowadyjy maşynynyň esasynda amala aşyrylýan prosese garanyňda has öndürijiliklidir.

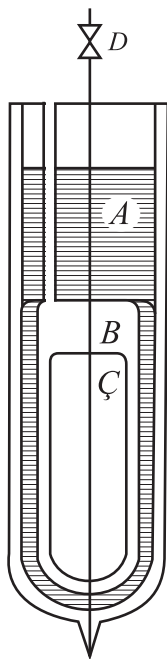


4.30-njy surat. Iki basgançakly Filips maşynynyň esasynda gelini suwuklandyрма shemasy: 1 – Filips maşyny; 2 – kompressor; 3, 4, 5 – suwuklandyryjy konturyň ýylylyk çalşyjylary; 6-7 – aralyk ýylylyk çalşyjylar

GSM esaslanan suwuklandyryjylar döredilende, ilkinji nobatda, berlen temperatura derejesinde zerur bolan sowuklyk öndürijiligini we GSM-da sirkulirlenýän gaz bilen suwuklandyrylýan gelij akymynyň arasyndaky has effektiw ýylylyk çalyşmany üpjün edýän köp basgançakly GSM-ň effektiwlik we ygtybarlylyk meselesine degişli soragy çözmeli. Bu maksat üçin niýetlenen ýylylyk çalşyjylar basyşlaryň ujypsyzja ýitgisinde akymalaryň arasynda temperaturalar tapawudynyň az bolmagyny üpjün etmeli. Üç basgançakly ýylylyk nasosynda bu maksat üçin ýylylyk çalşyjylaryň täze konstruksiýasy (içinden gaz akymy geçýän deşikli gezekleşip gelýän disklerden) ulanylýar. GSM ulanylýan gaýtalanmalaryň ha-

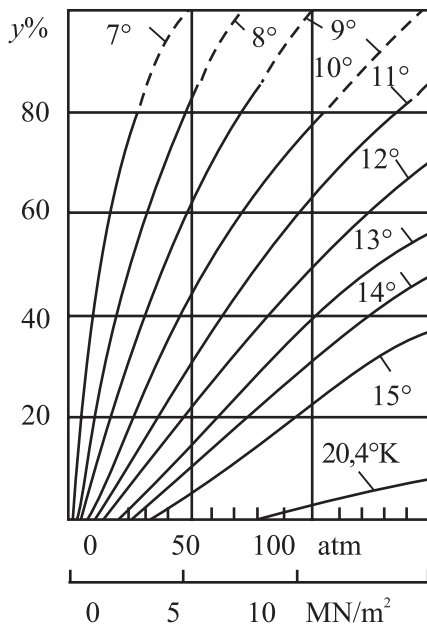
saplamaşy ýerine ýetirilende x suwuklandyryjy koeffisiýenti we her bir basgançakda geliniň suwuklandyrylýan paýynyň sowatmak we sowuklygyň ýitgisiniň üstüni ýapmak üçin GSM-ň ýylylyk ýüküni kesgitlemek gerekdir. Bu gaýtalanmalarda kompressordan gelýän ähli akym drosselirlenmä barýar, şonuň üçin x suwuklandyрма koeffisiýenti (3–11) formula boýunça kesgitlenýär, bu ýerde Δ_i drosselleffekt GSM-ň aşaky basgançagynda sowadylma temperaturasynda hasaplanýar. GSM-ň aýratyn basgançaklarynda $Q_{\text{daş}}$ ýylylyk ýüki (3–9) formuladan kesgitlenýär.

Ekspansion usul. Hemişelik göwrümden gazyň adiabat giňelmesinde temperaturanyň peselme efektine esaslanan gelini suwuklandyrmak usuly 1932-nji ýylda F. Simon tarapyndan hödürülenýär we amala aşyrylýar (4.31-nji surat).



4.31-nji surat. Gelini suwuklandyrmagyň ekspansion usulybyň shemasy:

A – suwuk wodorod; B – ýylylyk çalşyjy gazly gap; Ç – geliý gap; D – drossel gurluşy



4.32-nji surat. Gelini suwuklandyrmagyň ekspansion usulynda geliniň çykyşynyň başlangyç basyşa we temperatura baglylygy

Gaz görnüşli geliý Ç gaba 10–15 MPa basyşa çenli iteklenýär, ol ýerde hem suwuk wodorod A bilen sowadylýar. Ýylylygyň alyp gidilmesi gaz bilen doldurylan ýylylyk çalşyjy B boşlugyň üsti bilen amala aşyrylýar. Geliniň 10–12 K çenli has çuň sowadylmasy gaty wodorod bilen amala aşyrylyp bilner. Soňra göwrüm ýylylyk çalşyjy gazy sorup aýyrmak bilen, adiabatiki izolirlenýär, pes temperaturada ýerleşýän geliý D wentiliň üsti bilen atmosfera basyşyna çenli giňelýär. Giňelmä we iteklenmä sarp edilen işiň ululygyça geliniň içki energiýasy kemelýär, gaz sowaýar we bölekleýin suwuklanýar. Wodorodyň sarp edilişini kemeltmek üçin suwuk azot bilen öňürti sowadyлма ulanylýar. Bu usuly derňemekligiň netijesinde basyşdan we atylyp çykmanyň öňüsyrasyndaky temperatura baglylykda geliniň çykyşyny häsiýetlendirýän egriler (4.32-nji surat) Pikar we Simon tarapyndan gurulýar. Simonyň usuly ýokary netijeliligi bilen tapawutlanýar (doly öwrülişikli giňelmede iň ýokary mümkin bolanyndan 60% golaýy).

Ekspansion usul He-ni suwuklandyrmakda has netijeli usuldyr; wodorody suwuklandyrmakda bu usul pes netijeleri berýär, howa üçin ulanmaklyga bu usul ýaramly däldir.

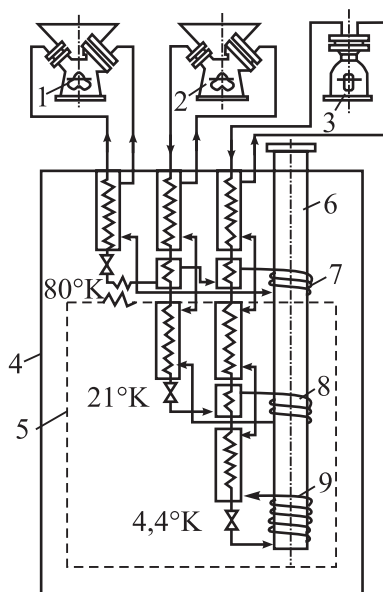
§ 4.13. Gelili refrižerator gaýtalanmasy

Geliý desgalarynyň birnäçe görnüşiniň suwuklandyryjy režimde işleýşi ýaly, refrižerator režiminde hem işläp bilýärler. Bu kriogen tehnikasynda örän köp ulanylýar. Laboratoriýa tejribesinde geliý suwuklandyryjylary köphalatda kriostat hökmünde ulanylýar, bu ýerde ýygnanan suwuklyk tejribe üçin ulanylýar, onuň hemişelik mukdary suwuklandyryjynyň refrižerator režimde işlemegi bilen üpjün edilýär. Refrižerator režimi hemişe gelini suwuklandyrmak bilen alnyp barylmaýar, köphalatda sowadylýan obýektiň ýylylygy gaz görnüşli geliniň gyzdyrylmagy bilen alnyp gidilýär.

Refrižerator gaýtalanmasyň hasaplama usuly §3.5.-de seredilendir. Kombinirlenen desgalar taslananda shemanyň suwuklandyryjy hem-de refrižerator režimlerdeki işlerini aýratynlykda hasaplamagyň zerurdygyny aýratyn bellemek gerekdir. Dürli režimlerde detandere gelýän akymlar, ýylylyk çalşyjylarda temperaturalar tapawudy we beýleki parametrler üýtgeýärler.

Käbir refrižerator sistemalaryna seredeliň.

Iki detanderli Kollins konstruksiýasynyň suwuklandyryjysy refrižerator režimi boýunça işlemek bilen kriostat hökmünde ulanylýar. Bu desgalar suwuk geliniň temperaturasyna çenli temperaturany saklap bilýän ýörite eksperimental kamera bilen üpjün edilen. Bu hili kriostatlar işlemäge örän amatlydyr we örän tanyml bolmak bilen, giňden ulanylýarlar; Littl firmasy bu hili kriostatlaryň 200-den hem köp sanyny taýýarlap çykardy (4.33-nji surat).



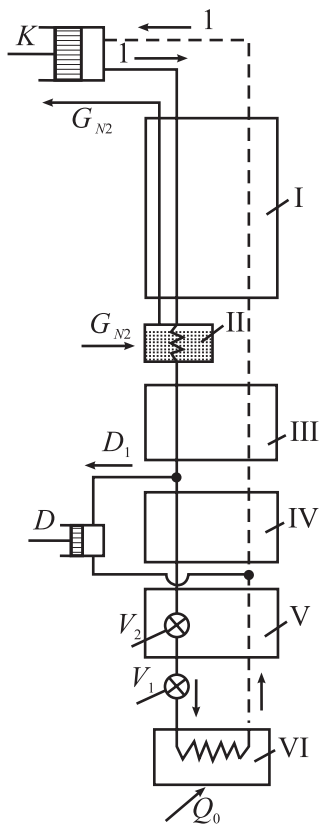
4.33-nji surat. Üç akymly refrižerator desgasy:

- 1, 2, 3 – kompressorlar (azotly, wodorodly, gelili);
- 4 – kožuh;
- 5 – ekron;
- 6 – kamera;
- 7, 8, 9 – bugardyjylar (degişlilikde azotly, wodorodly, gelili)

Drosselirlenmeli üç akymlaýyn gaýtalanmany ulanýan refrižerator desgasyyna seredeliň (4.33-nji surat). Gaýtalanmanyň häsiýetli aýratynlygy 80, 21 we 4,4 K temperatura derejeleri bilen şertlendirilýän üç sany ýapyk sirkulýasion akymalaryň (azotly, wodorodly we gelili) barlygyndadyr. Membrana kompressorlary sistemanyň germetikligini we sirkulirlenýän akymyň ýokary arassalygyny üpjün edýärler, bu bolsa desganyň ygtybarly işiniň möhüm şertleri bolup durýar.

Suwuk azot we wodorod öňürti sowadylmada gelini sowatmak bilen çäklenmän, has sowuk zona ýylylyk akymyny azaltmak bilen (6) işçi kamerada ýylylygy aýyrmak üçin hyzmat edýärler. Desganyň

sowuklyk öndürjiligi 4,4 K derejä 1,25 Wt düzýär. Suwuk geliý bilen ýadro reaktorynyň eksperimental kanalyny sowatmak üçin niýetlenen Mýünhen desgasy iň iri geliý refrižeratorynyň bir mysalydyr. 54 we 14 K temperaturalarda iki sany porşenli detanderi ulanýan bu refrižerator gaýtalanmasy 4,3 K derejede 200 Wt peýdaly sowuklyk öndürjiliginini üpjün edýär. Kapissanyň suwuklandyryjysynyň klassyky shemasy refrižerator shemada işlemäge örän amatlydyr (4.34-nji surat).



4.34-nji surat. Detanderli geliý refrižeratorynyň shemasy:

K – kompressor;
D – detander; *I*, *III*, *IV*, *V*,
VI – ýylylyk çalşyjylary;
II – suwuk azotly wana;
V₁, *V₂* – drossel wentilleri

dyryjysynyň klassyky shemasy refrižerator shemada işlemäge örän amatlydyr (4.34-nji surat).

Bir detanderiň ulanylmagy gaýtalanmanyň ýönekeýligini we ykdysady görkezijisiniň ýokary bolmagyny üpjün edýär. Berlen shemanyň suwuklandyryjy görnüşini bilen deňeşdirilmesi boýunça aýratynlygy hem VI ýüklenme ýylylyk çalşyjynyň we aşaky V ýylylyk çalşyjynyň orta böleginde V_2 ikinji drossel wentiliniň bar bolmagyndadyr.

Refrizižerator režiminde ters akym göni akyma deňdir, şoňa görä-de örän az nederekuperasiýada V ýylylyk çalşyjyda ýylylyk çalyşma mümkin däl. Munuň sebäbi «otrisatel» temperaturalar tapawudyna getirýän göni akymyň ýylylyk sygymynyň pes ululygydyr.

Aralyk drosselirlenme göni akymyň basyşyny peseldýär, bu bolsa onuň ýylylyk sygymynyň artmagyna getirýär we ýylylyk çalşyjynyň kadaly iş şertlerini üpjün edýär. Beýleki usul göni akym boýunça V ýylylyk çalşyjynyň garşylygyny mese-mälim artdyrmakdan durýar, bu bolsa kem-kemden drosselirlenme bilen deňgüýçlüdir, şeýle hem islenýän effekti almaga getirýär.

Peýdalanylan edebiyatlar

1. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. 1-nji tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2010.
2. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistanyň durmuş-ykdysady ösüşiniň döwlet kadalaşdyrylyşy. 2-nji tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2010.
3. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 6-njy tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2013.
4. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Bilim – bagtyýarlyk, ruhubelentlik, rowaçlyk. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2014.
5. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 7-nji tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2014.
6. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 8-nji tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2015.
7. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Bitarap Türkmenistan. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2015.
8. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Parahatçylyk sazý, dostluk, doganlyk sazý. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2016.
9. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 9-njy tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2016.
10. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Ösüşin täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. 10-njy tom. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2017.
11. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistan – Beýik Ýüpek ýolunyň ýüregi. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2017.
12. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistan durnukly ösüşin maksatlaryna ýetmegiň ýolunda. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2017.
13. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistan – Beýik Ýüpek ýolunyň ýüregi. II kitap. – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2018.
14. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmenistan durnukly ösüşin maksatlaryna ýetmegiň ýolunda. – A.: TDNG, 2018.
15. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Atda wepa-da bar, sapa-da. – A.: TDNG, 2019.
16. *Gurbanguly Berdimuhamedow*. Türkmen alabaýy. – A.: TDNG, 2019.

17. *Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmeniň döwletlilik ýörelgesi.* – A.: TDNG, 2020.

18. *Annageldiyew A., Nazarow S. Kompresorlar we nasoslar.* – Aşgabat: Türkmen döwlet neşirýat gullugy, 2014.

19. *Soltanmyradow A.S., Annageldiyew A., Nazarow S. Maşyn guruluşygyň tehnologiýasy.* – Aşgabat: Ýlym, 2014.

20. *Annageldiyew A., Nazarow S. Sowadyjy tehnikanyň nazary esaslary.* – Aşgabat: Ýlym, 2015.

21. *Архаров А. М. Термодинамический метод и некоторые задачи техники низких температур.* Высшая школа, 1962.

22. *Архаров А. М., Буткевич К. С. и др. Техника низких температур под ред. Микулина Е. И. и Марфениной И. В. Энергия,* 1964.

23. *Бродянский В. М. Термодинамический анализ низкотемпературных процессов.* МЭИ, 1966.

24. *Герш С.Я. Глубокое охлаждение.* Ч. 1-я 3-е изд., Госэнергоиздат, 1957, Ч. 2-я, 1960.

25. *Мальков М.П., Данилов И.Г., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения.* Госэнергоиздат, 1963.

26. *Микулин Е.И. Криогенная техника.* Издательство “Машиностроение”. – Москва, 1969.

27. *Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.Е.,* под редакцией проф. В.Г.Фастовского. Криогенная техника. – Москва: Энергия, 1967.

28. *Фастовский В.Г., Петровский Ю.В., Ровинский А.Е.* под редакцией В.Г.Фастовского. Издание второе, переработанное и дополненное. Криогенная техника. – Москва: Энергия, 1974.

29. *Лось В.И. Криогенная техника. Конспект лекций для студентов, обучающихся по специальности 8.090520. (Холодильные машины и установки).* Одесса, 2003.

MAZMUNY

Giriş	7
-----------------	---

Birinji bap

PES TEMPERATURALARY ALMAGYŇ UMUMY PRINSIPLERI WE SOWADYLMA HADYSALARY

Umumy maglumatlar	9
§ 1.1. Termodinamikanyň üçünji kanuny	10
§ 1.2. Pes temperaturalary almagyň usullary. Adiabata şertlerinde temperaturanyň peselmegi bilen alnyp barylýan prosesler.	13
§ 1.3. Real gazlar gysylanda esasy termodinamiki parametrleriň üýtgemegi	15
§ 1.4. Drosselirleme	16
§ 1.5. $U = \text{const}$ prosesi.	22
§ 1.6. Gazlaryň deňagramly adiabat giňelmesi.	24
§ 1.7. Işlenen gazyň çykarylyşy (wyhlop) ýa-da gazyň ballondan erkin çykarylmasy. Içine goýberilme prosesi.	28
§ 1.8. Üýtgeýän massaly adiabat sistemadaky hadysalar	31
§ 1.9. Rank – Hilşin adiabatik köwlenme turbasynda gazyň giňelmesi	33
§ 1.10. Gazyň tolkunlaýyn giňelme hadysasy	36
§ 1.11. Gaýnaýan suwuklygyň buguny sorup aýyrmak	39
§ 1.12. Gaty ýagdaýyndaky işçi gurşawy ulanmak bilen sowadyлма prosesleri.	41
§ 1.13. He^3 we He^4 -ň häsiýetlerine esaslanan usul bilen aşa pes temperaturalary almak	46
§ 1.14. Sowadylmanyň dürli hadysalary.	49

Ikinji bap

PES TEMPERATURALARY ULANMAK

§ 2.1. Sowadylmanyň temperatura ulgamlary	54
§ 2.2. Aram sowadyлма tehnikasi	55
§ 2.3. Çuň sowadyлма tehnikasi	56

§ 2.4. Gaz garyndylarynyň bölünişi	56
§ 2.5. Gazlary suwuklandyrmak	60
§ 2.6. Kriogen tehnikasy	61
§ 2.7. Deýteriý gazynyň alnyşy	62

Üçünji bap

PES TEMPERATURALY PROSESLERİŇ WE GAÝTALANMALARYŇ HASAPLAMASY HEM-DE DERŇEWI

§ 3.1. Suwuklandyrmanyň ideal gaýtalanmasy we onuň derňewi	66
§ 3.2. Köp basgançakly gaýtalanmalaryň hasaplamasy	72
§ 3.3. Kaskad gaýtalanmasynyň basgançaklarynyň temperatura derejesi	85
§ 3.4. Akymalaryň basyşyny kesgitlemek	91
§ 3.5. Refrižerator gaýtalanmalary	93
§ 3.6. Gazly sowadyjy maşynlar	99
§ 3.7. Pes temperaturaly prosesleriň we gaýtalanmalaryň termodinamiki derňewi	108

Dördünji bap

PES TEMPERATURALAR TEHNIKASY

§ 4.1. Kriogen ulgamlarynyň topary	116
§ 4.2. Käbir termodinamiki gatnaşyklar	117
§ 4.3. Sowuklygy almak	120
§ 4.4. Ýönekeý drosselirlmeli gaýtalanma we drossel gurluşlary bolan sowadyjy desgalar	127
§ 4.5. Drosselirlenmeli we gazy aralyk sowadylmaly gaýtalanma hem-de bu gaýtalanma boýunça işleýän desgalar	133
§ 4.6. Beýleki gaýtalanmalary ulanmak bilen wodorody suwuklandyrmak	142
§ 4.7. Wodorody suwuklandyryjylar	147
§ 4.8. Wodorod bilen işlemekde tehniki howpsuzlygyň düzgünleri	152
§ 4.9. Neon we ony suwuklandyrmak	155
§ 4.10. Gelini almak we onuň esasy häsiýetleri	158
§ 4.11. Gelini suwuklandyrmagyň usullary	162
§ 4.12. Gazly sowadyjy maşynlary ulanmak bilen sowadyлма	174
§ 4.13. Gelili refrižerator gaýtalanmasy	178
Peýdalanylýan edebiýatlar	181