

**TÜRKMENISTANYŇ BILIM MINISTRRLIGI  
TÜRKMEN POLITEHNIKI INSTITUTY**

**O.Mowlämowa**

**Kriogen tehnikasy**

**Hünär:** "Sowadyjy, kompressor maşynlary we  
desgalary".

Aşgabat 2010

## Giriş

Türkmenistanyň Prezidenti 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 Guramasynyň 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 Gazagyztanyň arasynda üçtaraplaýyn Halkara ylalaşyga gol çekilmegi hormatly Prezidentimiziň parasatly ýolbaşçylygynda gysga döwrüň içinde gazanylan ajaýyp üstünlikleriň aýdyň mysalydyr.

Hormatly Prezidentimiz täze özgertmeleri amala aşyrmakda ýurdymyzyň 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 on ýyllyga, ýokary okuw mekdepleri, degişlilikde, baş-alty ýyllyga öwrüldi. Okuw maksatnamalar tazelendi, täze okuw maksatnamalar esasynda okatmak, täze okuw kitaplaryny taýýarlamak we neşir etmek işleri ýola goýuldy. Ýokary okuw mekdeplerimize kabul edilen, daşary ýurtlaryň abraýly ýokary okuw mekdeplerine okuwa iberilýän talyplaryň sany köpeldi.

Ýurdymyzyň bilim, ylym ulgamlaryny kämilleşdirmek hakyndaky Permanlaryndan we Kararlaryndan gelip çykýan belent wezipeleri durmuşa geçirmek işi gelejekde-de alnyp baryljakdygyna şübhe ýokdyr.

“Kriogen tehnikasy” dersi barada aýdanymyzda, dersi öwrenmekligiň maksady – çuň pes-krio temperaturalarynda ýylylyk çalyşygy enjamlarda bolýan prosesleriň we hadysalaryň fiziki, himiki esaslaryny öwrenmeklikden we özleşdirmekden ybaratdyr. Bu pes temperaturalarda işleýän sowadyjy desgalaryň görnüşlerini, çyzytlaryny we iş sikllerini öwrenmekden ybaratdyr.

Kriogen desgalaryň gurluşyny, pes temperaturalary almaklygyň usullaryny öwrenmeklik, kriogen ulgamlaryny we maşynlaryny hasaplamak, gazlaryň suwuklyga öwürlmeginiň we suwuk gazlaryň bölünmek usullaryny talyplara ýetirmek dersiň esasy meseleleriniň biridir.

Kriogen tehnikasy elektronikanyň, radiotehnikanyň, elektrotehnikanyň ösmegine uly ýardam edýär.

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

Bu dersi öwrenmeklik fizika, himiýa, ýokary matematika, ýylylyk hereketi, ýylylyk-massa çalyşygy, sowadyjy tehnikanyň nazary esaslary dersleriniň berýän bilimine esaslanýar.

## **BAP I. Pes temperaturalary ulanmak**

### **1.1 Sowadylmanyň temperatura ulgamlary**

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

- 100<sup>0</sup>C (173K) temperaturany almak aram sowadylma tehnikasynda degişli bolup durýar.

170-70K oblast çuň sowadylma tehnikasynda degişlidir.

Ondan hem pes 70-0,3K temperaturalaryň oblasty we olaryň ulanylyş sferasy kriogen tehnikasynda öwrenilýär. In pes (0,0008 K) temperaturalar ultra pes temperaturalar diýlip atlandyrylýär we olar ylmy barlag işlerinde ulanylýär.

1945-nji ýyla çenli 70<sup>0</sup>K-den pes bolan temperatura derejesi örän seýrek ulanylýardy. Wodorody, neony, gelini suwuklandyrmak bilen alynýan pes temperaturalary dunýäde bar bolan (örän az) laboratorýalarda diňe ylmy barlag işleri üçin ulanýardylar.

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

### **1.2 Aram sowadylma tehnikasy**

Aram sowadylma tehnikasynda kritiki temperaturasy daşky sradanyň adaty temperaturasyndan ýokary bolan sowadyjy agentleri ulanmak bilen pes temperaturalary almak bolýar. Ammiagyň kritiki temperaturasy 132<sup>0</sup>C, freon 12-ňki

112<sup>0</sup>C, freon 22-ňki 96<sup>0</sup>C deňdir; olaryň suwuklandyrylmasy kondensasiýa ýylylygyny aýyrmak üçin suwy ýa-da howany ulanmak bilen položitel temperaturada bolup geçýär. 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 söwda-da dürli kuwwatly sowadyjy agregatsyz durmuşy göz getirmek mümkin dälir.

Aram sowadylma tehnikasynda iri kompression gurluşlaryň sagatdaky sowuklyk öndürijiligi -10 ÷ 20<sup>0</sup>C bugarma temperaturasynda 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 sowadylma hlory suwuklandyrmak üçin, uçujy eredijileriň bugunyň rekuperasy üçin, koks gazyndan benzoly aýyrmak üçin, garyndydan duzlaryň kristallizasiýasy üçin, gazlaryň degidratasiýasy we olary CO<sub>2</sub>-den hem-de kükürtli birleşmelerden arassalamak üçin, ylmy, hususanda biologik barlaglarda himiki reaksiýalaryň tizligini sazlamak we ş.m. üçin ulanylýar.

Sporty ösdürmek maksady bilen emeli buzly typançaklary almakda hem aram sowadylma ulanmak talap edilýär.

### **1.3 Çuň sowadylma tehnikasy**

Çuň sowadylma tehnikasy eýýäm öňräkden bäri 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, Xe, He, Ne,  $H_2$ ,  $C_2H_4$  we başgalar) fraksionirlenen kondensasiýa, deflegmasiýa, rektifikasiýa usullaryny ulanyp howanyň, koks gazynyň, nebit gazynyň, geliý göteriji tebigy gazynyň gaz garyndylaryny bölmek üçin ýa-da talap edilýän düzümiň ( $H_2$ - $N_2$  we başgalar) fraksiýalary.

2. Suwuklandyrylan gazy almak üçin:  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , Ar, F.

### 1.4 Gaz gazyndylarynyň bölünişi Howanyň bölünişi

Çuň sowadyлма usuly bilen gaz görnüşli kislorody, azody, şeýle hem (seýrek) inert gazlaryny: gelini, neony, arkany, kriptonu, tehnikasy möhüm senagat ähmiýete eýe boldy.

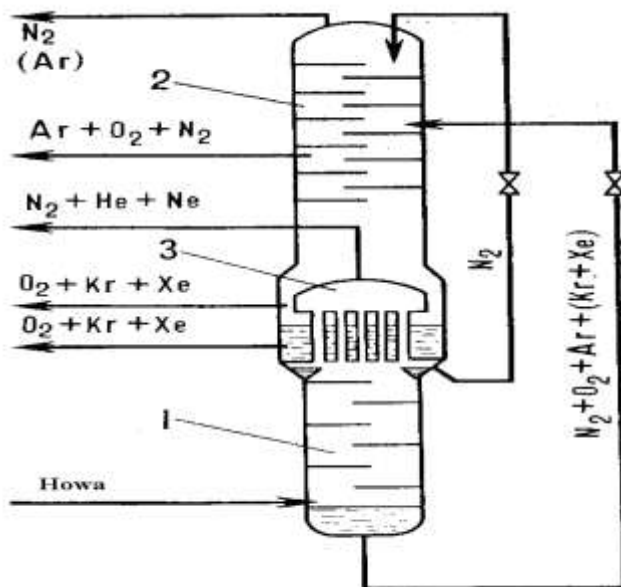
Tablisa 1-de howanyň düzümi we düzümi komponentleriň kadaly gaýnama temperaturalary (atmosfera basyşynda) getirilen.

#### Howanyň düzümi.

**Tablisa 1.**

Gaz	Konsentrasiýa, %		Gaýnama temperaturasy ( $p=760\text{mm.sim.süt}$ ), 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
Kseon	$0,86 \cdot 10^{-5}$	$0,39 \cdot 10^{-4}$	165, 05

Agrondan başga inert gazlarynyň mukdary azdyr; 1000 m<sup>3</sup> howada 9,43 m<sup>3</sup>, 18,18 ℓ neon, 5,24 ℓ geliý, 1,43 ℓ kripton we 86 sm<sup>3</sup> kseon saklanýar. Howa bölüji kolonnalarda tehniki (99,5-99,7 % O<sub>2</sub>) ýa-da tehnologiki (95 % O<sub>2</sub>) kislorody, şeýle hem azody we argony almak bilen üçeldilen O<sub>2</sub>-Ar-N<sub>2</sub> garyndyny rektifikasiýa prosesi bolup geçýär (surat 1).



Surat 1. Inert gazyny saýlamak üçin howanyň ikeldilen rektifikasiýa apparatynyň shemasy. 1-ýokary basyşly kolonna; 2-pes basyşly kolonna; 3-kondensator-bugardyjy.

Soňky ýyllarda gara we reňkli metallurgiýada, himiýa senagatynda, gaty ýangyjy gazifikasiýa tehnikasynnda, sintetiki ýangyjy almakda, gaty gatlagy gazonplazmalaýyn burawlamak üçin kislorod bilen doýurylan (30-40 % O<sub>2</sub>) kislorodyň we howanyň ulanylyş problemalaryna gyzyklanma artýar. Bu tehnologiki we tehniki kislorodyň iri, köp tonnažly

önümçiligini döretmegi talap edýär. Kislorody iň kop sarp ediji (umumy önümiň 70 % gowragy) gara metallurgiýadyr. Ferrosilisiýa we ferromanganesi eretmek üçin kislorod bilen doýurylan howany ulanmak domma peçleriniň öndürjiligin takmynan 15-20 % çenli artdyrýar, kislorod bilen doýurylan howany tebigy gaz bilen bilelikde ulanylanda peçleriň öndürjiligin 25 % çenli artdyrýar, tehniki kislorody ulanmak düzüminde minimal azot bilen häsiýetlendirilýän polat öbdürmegiň konwertor usulynyň ähmiýetini artdyrýar.

Bir wagtyň özünde arassa azody alynýan kuwwatly kislorod desgalary üstünlikli işleýärler. ABŞ-da kislorodyň öndürilişi 5-15 %, azodyň öndürilişi 15-20% ýylsaýyn ösýär.

Tehnikanyň täze pudaklary: ýadro, raketa, metallurgiýanyň ýörite pudaklary, ýarymgeçiriji materiallaryň tehnologiýasy, kebşirmek, ýagtylyk tehnika, kriogen tehnikaşynyň seýrek gazlaryny ulanýarlar. Soňky ýyllarda neon sowadyjy agent hökmünde ulanylyp başlandy. 29,09 K gaýnama temperaturaly bu hili inert sowadyjy agent gaty O<sub>2</sub> we N<sub>2</sub> ulanmak bilen alynýan örän pes temperaturanyň we suwuk wodorodyň kadaly gaýnama temperaturasynyň (20,4 K) arasyndaky üznäligi gyzgaltmaga mümkinçilik berýär.

## **Tebigy geliogöteriji gazlaryň bölünişi**

Geliogöteriji tebigy gazlar-çuň sowadyлма usuly bilen amala aşyrylýan, senagatda gelini almagyň esasy çeşmesi bolup durýar. Geliý (beýleki ulanylyş ulgamlaryndan başga) 0,3-15 K interwalda pes temperaturalary almak üçin örän amatly sowadyjy agentdigin ýatlamak ýerliklidir. Geliogöteriji tebigy gazlaryň (0,2-0 % He) baý resurslary ABŞ-ň günortagunbatar çäklerinde-Kanzas, Oklahoma, Tehas, Nýu-Meksika, Ýuta, Arizona ştatlarynda jemlenendir.

Geliogöteriji 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: H-buton, izobuton, H-pentan; kükürtli birleşmeleri düzüminde saklaýarlar. Geliogöteriji tebigy gaz agyr uglewodorodlardan, kukurtli birleşmelerden önürti arassalanyp we 3 MPa ýasyş astynda guradylandan soň, bölüji bloga düşýar, ol ýerde dürli temperatura derejelerinde (-160; -185<sup>0</sup>C) yzygider fraksionirlenen kondensasiýa usuly bilen etanyň, metanyň, azodyň fraksiýalaryny saýlaýarlar we netijede geliý bilen doýurylan uçujy fraksiýany-80 % He düzümlü çyg gelini, 18-20 % N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> garyndysyny (0,1-0,15 %) we uglewodorody (0,05-0,1 %) alýarlar. Çyg gelini 20 MPa çenli gysýarlar we guradylandan soň çuň sowadyлма blogyna ugradýarlar; gysylan çyg gelini, sowuk azody (-196 %) turba şekilli apparatda 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<sup>0</sup>C çenli sowadýarlar, we geliniň arassalygyny 99,5 % ýetirýärler. 20 MPa çenli gysylan geliniň N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> garyndylardan doly arassanmasy aktiwirlenen kömürti suwuk azot bilen sowadylýan absorberlerde amala aşyrylýar. Absorberlerden soň geliniň arassalygy 99,995 % ýetýär.

1921-nji ýylda ABŞ-da geliniň öndürilişi 55·10<sup>3</sup>m<sup>3</sup>-dan ýokary galmaýardy. Raketa we atom tehnikasynyň, kosmiki barlaglaryň, aşageçirijilik ulgamynda geçirilýän işleriň ösmegi 1968-nji ýylda öndürilişi 26·10<sup>3</sup>m<sup>3</sup> bara-bar bolan geliniň sarp edilişini mese mälum artdyrdy.

### **Koks gazynyň bölünişi**

Koks gazy benzoldan, naftalinden, kükürtli wodoroddan arassalanandan soň 50-60 % H<sub>2</sub>, 6-8 % N<sub>2</sub>, 22-25 % CH<sub>4</sub>, 2-5 % CO, 1-2 % C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, 2-3 % CO<sub>2</sub> we beýleki garyndylary özünde saklaýar. 1925-1927-nji byllarda 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 almakdan durýar.

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

### **1.5 Gazlary suwuklandyrmak Metany suwuklandyrmak**

Metan-ýokary kaloriýaly ýangyç-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 problemsy örän çylşyrymlydyr, metany suwuk ýagdaýynda saklanmagy bu meseläniň effektiv çözüdini berbär. Bu gymmatly ýangyjy özüniň tebigy gaz resurslary bolmadyk ýurtlara transport etmek meselesi hem çylşyrymly meseleleriň biri bolup durýar. Bu problema tebigy gazy suwuklandyrmak, (metanyň gaýnama temperaturasy- $-161,3^{\circ}C$ ), saklamak hem-de suwuk metany ýörite tankerlerde transport etmek bilen üstünlikli çözülýär.

Tebigy gazynyň dünýä boýunça gory  $17540000000000m^3$ , olar ABŞ-da (22 %), Afrikada, Gundogar ýurtlarynda we Latyn Amerika (40 %), Ýewropa ýurtlarynda we Orta Aziýada (36 %) jemlenendir.

Suwuklandyrylan tebigy gazynyň uly mukdaryny deňiz we gury ýer boýunça transport etmek problemsy Kriogen tehnikasy boýunça halkara konferensiýalarynda we Halkara

sowuklyk institutynyň seksiýalarynyň ýygnaclarynda yzygider ara alyp maslahatlaşylýar.

### **Kislorodyň we azotyň suwuklandyrylmasy**

Suwuk kislorody almak, saklamak we transportirlemek häzirkî zaman tehnikasynyň masşabynda örän uly gerime eýe bolýar. ABŞ-da suwuk  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $Ar$  dürli göwrümlü awtosisternalaryň kömegi bilen ýaýradyjy 500 den gowrak stansiýalar işleýär.  $50\text{ m}^3$  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  $250\text{--}750\text{ m}^3$  ýetýär.

Suwuk  $O_2$  öndürilişiniň giňelmegi raketa tehnikasynyň talaplary bilen baglydyr. Raketa tehnikaşynda ulanylýan suwuk azotyň öndürilişine hem aýratyn üns berilýär. Suwuk azot neony, wodorody, gelini suwuklandyrmak üçin sowadyjy agent hökmünde, suwuk  $H_2$ ,  $He$  salynan gaplary ekranirlemek üçin, wakuum tehnikaşynda lowuşkalary sowatmak üçin, şeýle hem  $Ne$ ,  $H_2$ ,  $He$ -ni beýleki gazlaryň garyndysyndan ( $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ) adsorbsion usul bilen arassalamak üçin ulanylýar.

Suwuk azotyň biologiýada we medisina ulanylyşyna uly üns berilýär. Ol hirurgiýa operasiýalary ýerine ýetirilende gany konserwirlemekde, spermany transport etmekde we ş.m. ulanylýar. Suwuk azot azyk senagatynda käbir önümleri doňdurmak we uzak möhletde saklamak üçin, täze ugury ösdürmek üçin kriohimiki tehnologiýada giňden ulanylýar.

Öndürijiligi  $1400\text{ kg/sag}$  bolan suwuk azotyň gurluşy döredilen we  $2000\text{--}20000\text{ kg/sag}$  öndürijilikli gurluşlaryň taslamasy ýerine ýetirilýär.

## 1.6 Kriogen tehnika

“Kriogenika” termininden soňky baş-atly ýyllykda tehnikada giňden ulanylýan has pes temperatura oblastyny (70-0,3 K) bellemek üçin peýdalanylýar.

Ikinji jahan urşuna çenli (1941-1945 ýý.) 70K –den aşaky temparaturalar örän seýrek ulanylýardy (wakuum astyndaky suwuk azot). Neony, wodorody, gelini, suwuklandyrmak bilen alynýan has temparaturalar dünýäniň käbir laboratoriyalarynda ylmy-barlag işlerinde ulanylýardy, ol işler özleriniň ylmy netijesi bilen ýokary öndürijilik gözkeçýärler.

Raketa tehnikasynyň ösmegi, kosmiki barlaglaryň meýilnamasyny ýerine ýetirmek laboratoriya çäginde daşyna çykan we industriýanyň täze ulgamyna öwürülen kriogen tehnikasynyň güýçli ösmegine itergi berdi. 1959-njy ýyl suwuk wodorodyň iri desgasynyň gurluşygyna başlandy we gysga wagtyň içinde ummasyz köp mukdarda suwuk wodorod önümçiligi döredildi ( $1\text{m}^3$  suwuk  $\text{H}_2$  massasy 70 kg).

Öndürijiligi sutkada 30-60 tonna bolan  $\text{H}_2$  suwuklandyryjylary işläp başlady. 1961-1968-nji yy. ABŞ-da suwuk  $\text{H}_2$  saklaýjy göwürümler döredildi, Newada ştatynda raketalaryň synaglary amala aşyrylýan (ABŞ) poligonda göwrümi  $209\text{m}^3$  bolan suwuk  $\text{H}_2$  saklaýjy göwürüm guruldy. Alýuminden  $378,5\text{ m}^3$  göwürümlü sferiki suwuk  $\text{H}_2$  saklaýjy göwürüm döredildi. Partlama howply  $-253^\circ\text{C}$  gaýnaýan suwuk wodorodyň uly mukdaryny almak, saklamak we transport etmek akyla sygmajak zatlardy, häzirki döwürde suwuk wodorod raketanyň ýokary basgançaklarynda ýangyç hökmünde hem-de köpürjikli kamerada ulanylýar. Suwuk wodorodyň awiasiýada ýangyç hökmünde ulanylmak problemsyna hem uly uns berilýär.

Gelini suwuklandyrmak tehnikasy uly ösüş ýoluna düşýär. 1946-njy ýyl çenli dünýä boýunça bary-ýogy 15 laboratoriya gelini suwuklandyrmak boýunça işleýärdi, häzirki

döwürde dürli ýurtlarda münden göwrak gelini suwuklandyryjylar işleýär. Artur D.Litl firmasy tarapyndan soňky ýyllar dürli öndürijilikli 300-den gowrak gelini suwuklandyryjylar döredildi, olara 500  $\ell$ /sag öndürijilikli gelini suwuklandyryjy degişlidir. Linde firmasy (ABŞ) 650  $\ell$ /sag we 720  $\ell$ /sag öndürijiligi bolan gelini suwuklandyryjylary çykarýar. 1000  $\ell$ /sag gelini suwuklandyryjylary işläp düzmegiň üstünde işlenilýar. Ýewropanyň, Ýaponiýanyň dürli firmalary 2-15 K temperatura derejesinde refrižeratorlaryň we gelini suwuklandyryjylaryň dürli görnüşli modellerini çykarýarlar. Esasan häzirki zaman ylmy we inžener problemalar edara edilýan termoýadro sintezi, ýokary energiýanyň sintezi, energiýany özgertmegiň magnitogidrodinamiki usuly, kosmonawtiki, elektronika 4-70 K derejede suwuklygy ulanmagy talap edýär.

## BAP II. Pes temperaturalar tehnikasy

### 2-1. Umumy maglumatlar

Pes temperaturalary almagyň dürli usuly mälimdir, ol ýa-da beýleki usuly saýlap almak sowadylmanyň temperatura derejesinden, yzarlanýan maksatdan (gazy suwuklandyrmak ýa-da haýsyda bolsa bir obýekti sowatmak), masştabynda (laboratoriýa ýa-da önümçilik desgasy) we beýleki dürli faktorlardan baglydyr. Sowuklygy almak prosesleriniň hasaplamasy we derňemesi, olaryň effektivligine 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 azotyň gaýnama temperaturasyndan (77K) pes-de 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 ýokarda ýatýan ulgamy öz içine alýan pes temperaturalary almak usuly tehnikada giňden ulanylýar we ýyl-ýyldan gerimi giňeýär.

Ylmy synaglarda amala aşyrylýan has pes temperaturalary almak işleriniň ýyl-ýyldan gerimi giňeýär, aşa pes temperaturalary almak üçin niýetlenen desgalaryň satuwa çykarylmagy hem şunuň bilen düşündirilýär.

Suwuk  $H^4_e$  üstünden buguny aýyrmak bilen 0,71K çenli sowuklyk alynýar, ol sowuklygyň üstündäki basyş 0,363 Pa (0,00273 mm sim süt) deňdir.  $H^3_e$  geliniň ýeňil izotopynyň üstünden bugy aýyrmak bilen 0,31 K çenli sowuklyk almak bolýar, şunlukda suwuk  $H^3_e$  geliniň üstündäki basyş 0,267 Pa (0,002 mm. Sim.süt) deňdir.

Has pes temperaturalary almak paramagnit duzlaryny iki basgançakly adiabatiki magnitsizlendirmek bilen magnitli

sowadylma usuly bilen 0,00114 K, misi ýadro magnitsizlendirme diýlip atlandyrylýan usul bilen 0,00002 K töweregi temperaturany almak başardýar.

$H^3_e$  -i  $H^4_e$  eretmek bilen pes temperaturalary almak usuly ylmy-barlag tejribesine girýar, şunlukda 0,008 K temperatura almak bolýar. Özüniň oňnositel ýönekeýligi üznüksiz hereketi we uly sowuklyk öndürilijligi bolan bu hili refrižeratorlar paramagnit duzlarynyň adiabatik magnitsizlenmesine esaslanan desgalaradan üstün çykýarlar.

## 2-2. Käbir termodinamiki gatnaşýklar

Ulgamy daşky gurşawyň (howa, suw)  $T_2$  temperaturasyndan pes  $T_1$  temperatura çenli sowatmak we ulgamy 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 bilmeyär, ol diňe başga bir sistemanyň iş ýerine ýetirmegi bilen amala aşyrylar.

Sistema berilýän  $dQ$  energiýa onuň içki energiýasynyň  $dU$  üýtgemesine we sistemanyň daşky iş  $p dv$  ýerine ýetirmegine sarp edilbär.

$$dQ = dU + p dv \quad (1)$$

Adiabatik prosesde  $dQ = 0$  we

$$dU = - p dv \quad (2)$$

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

Sowadylma proseslerine seredilende:

$$di = dU + d(pv) = dU + p dv + v dp \quad (3)$$

baglanyşyk bilen kesgitlenýän i entalpiýa düşünjesi giňden ulanylýar.

Bu baglanyşykdan peýdalanyň, termodinamikanyň birinji kanunyny (1) aşakdaky görnüşde getirmek bolar:

$$dQ = di - vdp \quad (4)$$

Termodinamikanyň ikinji kanunynyň esasynda S entropiýanyň üýtgemesi:

$$ds = \frac{dQ}{T} \quad (5)$$

deňleme bilen aňladylýar, (1) we (4) deňlemeleri hasaba alyp, (5) formulany aşakdaky görnüşde ýazmak bolar:

$$dS = \frac{dU + p dv}{T} = \frac{di - v dp}{T} \quad (6)$$

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

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

$$di = \left( \frac{\partial i}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp \quad (7)$$

ýa-da

$$di = C_p dT + \left( \frac{\partial i}{\partial p} \right)_T dp \quad (8)$$

bu ýerde:  $C_p$ -hemişelik basyşda udel molýar ýylylyk sygymy.

Analogiýa boýunça

$$dS = \left( \frac{\partial S}{\partial T} \right)_p dT + \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dp \quad (9)$$



ýa-da

$$dS = \frac{C_p}{T} dT + \left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T dp \quad (10)$$

$$\left( \frac{\partial S}{\partial p} \right)_T = - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (11)$$

bolany üçin

$$dS = \frac{C_p}{T} dT - \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp \quad (12)$$

bolar.

Izoentalpiýa ( $i=\text{const}$ ) proses üçin (3) deňlemäniň esasynda

$$di = dU + Pd v + v dP = 0 \quad (3a)$$

(1) we (5) deňlemelerden

$$TdS = dQ = dU + Pd v \quad (13)$$

(3a) we (13) deňlemelerden taparys:

$$TdS + v dP = 0 \quad (14)$$

Soňra  $dS$ -ň bahasyny (12) den (14) goýup alarys:

$$C_p dT - T \left( \partial v / \partial T \right)_p dp + v dP = 0 \quad (15)$$

Soňky gatnaşykdan izoentalpiýa giňelmede (drosselirlmede) gazynyň temperaturasynyň üýtgemesini häsiýetlendirýän  $\alpha_i$  koeffisientiniň aňlatmasyny almak bolýar:

$$\alpha_i = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_i = \frac{1}{C_p} \left[ T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] \quad (16)$$

$\alpha_i$  koeffisiente Joul-Tomsonyň differensial effekti diýilýär.

Izoentropiýa proses üçin ( $S=\text{const}$ ) (12) deňlemäniň esasynda izoentropiýa giňelmede gazyň temperaturasynyň üýtgemesini häsiýetlendirýän  $\alpha_s$  koeffisient üçin aşakdaky aňlatmany alarys:

$$\alpha_s = \left( \frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \frac{T}{C_p} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (17)$$

Alynan aňlatmadan görnüşi ýaly,  $\alpha_s$  koeffisient  $\alpha_i$  koeffisientden tapawutlylykda položitel ululykdyr: gazyň izoentropiýa giňelmesinde, nähili halda bolmagyna garamazdan, hemişe temperaturanyň peselmegi bolup geçer. Şeýle hem temperaturanyň artmagy we basyşyň peselmegi bilen (bu  $v$ -niň artmagyna getirýär),  $\alpha_s$  artýar. Sowuklygy öndürmek üçin gazyň giňelmesinde seredilen prosesleri ulanýan pes temperaturalary almak tehnikasynda (16) we (17) aňlatmalaryň fundamental ähmiýeti bardyr.

### 2-3. Sowuklygy almak

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

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

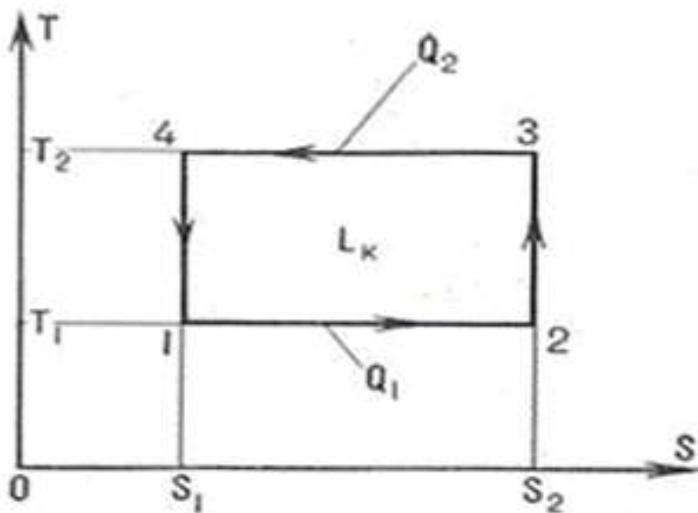
Ähli mälum bolan sowadylma usullarynyň (mehaniki, magnit, elektrik) termodinamiki mazmuny birmeňzeşdir: diňe gözegçilik edilýän parametriň (basyş, magnit meýdan, tok we ş.m.) häsiýeri üýtgeýär.

Obýektiň üznüksiz sowadylmasyny amala aşyrmak üçin, pes temperatura derejesinden ýokary temperatura derejesine wagt birliginde kesgitli ýylylyk mukdaryny bölüp

çykaryan sowadyjy jisimi baglangyç ýagdaýyna getirmek, ondan soň prosesi gaýtalamak gerekdir. Bu sowadyjy sikli düzyän sowadyjy agentiň ýagdaýynyň üýtgemesiniň elementar prosesleriniň belli bir yzygiderlikde gezeleşdirilmegi bilen alynýar.

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

Real siklleriň effektiwligine baha bermek we olary derňemek üçin, kesgitli iş sarp edilmek bilen teoretiki taýdan sowuklygyň maksimal mukdaryny almaga mümkinçilik berýän Karnonyň ters sikliniň ähmiýeti uludyr. Surat 2-1.



**Surat 2-1. T-S diagrammada Karnonyň sikli. Karnonyň sikliniň sowadylma koeffisienti maksimal, ol diňe  $T_1$  we  $T_2$  temperaturalaryň bahalary bilen kesgittenýär we sowadyjy jisimiň häsiýetine bagly däldir.**

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

Karnonyň sikli (surat 2-1) iki sany izotermadan we iki sany adiabatadan durýar.  $Q_1$  ýylylyk hemişelik we has pes temperaturada 1-2 çyzyk boýunça aýrylýar. Sowadyjy agent 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:

$$Q_2 = Q_1 + L_k \quad (18)$$

bu ýerde:  $L_k$ -sikilde sarp edilýän iş.

Soňra sowadyjy agent adiabatiki giňelýär (4-1 çyzyk), bu bolsa onuň temperaturasynyň  $T_1$  çenli peselmegi bilen alnyp barylýar. Şeýleleikde işçi jisim ilki başdaky ýagdaýyna gelýär.

Karnonyň sikli üçin

$$L_k = Q_1 \frac{T_2 - T_1}{T_1} \quad (19)$$

Karnonyň siklinde sarp edilýän iş minimaldyr we ol real sikleriň effektiwligine baha bermekde kriteriý bolup hyzmat edbär. (18) we (19) deňlemelerden aşakdaky gatnaşyk gelip çykýar.

$$Q_1 = Q_2 \frac{T_1}{T_2} \quad (20)$$

Sikliň termodinamiki effektiwligini häsiýetlendirmek üçin  $T_1$  temperatura derejesindäki sowuklyk mukdarynyň sikilde sarp edilen işe bolan gatnaşygy bilen aňladylýan sowadyş koeffisientinden peýdalanylýar.

$$\varepsilon_k = \frac{Q_1}{L} \quad (21)$$

Karnonyň sikliniň sowadyş koeffisienti

$$\varepsilon_k = \frac{Q_1}{L_k} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (22)$$

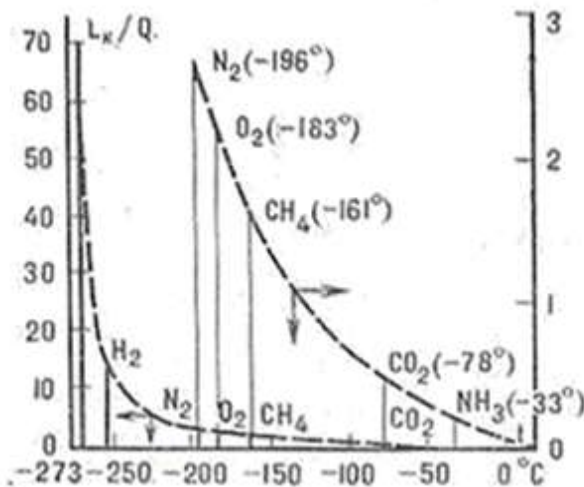
(22) deňlemeden görnüşi ýaly, Karnonyň sikliniň sowadyş koeffisienti diňe  $T_1$  we  $T_2$  temperaturalaryň bahalary

bilen kesgitlenilýär we sowadyjy agentniň häsiýetine bagly däl. 2-nji suratda  $L_k/Q_1$  ululygynyň  $T_2 = 288\text{K}$  ( $15^\circ\text{C}$ ) bahasynda  $T_1$ -den baglylygynyň çyzgysy görkezilen. Çyzgydan görnüşine görä, sowadylma  $T_1$  temperaturasyň peselmegi bilen sarp edilýän iş ylaýtada  $T_1 < 20\text{K}$  bahasynda, okgunly ösýär. Bu bolsa temperaturanyň peselmegi bilen sowuklygynyň artýandygy aňladýar. Sowadylma temperaturasyň peselmegi bilen real sikliniň termodinamiki p.t.k.-ň azalmagy goşmaça kynçylyk döredýär. Termodinamiki p.t.k.:

$$\eta = \varepsilon_r / \varepsilon_k \quad (23)$$

bu ýerde:  $\varepsilon_r$ -real sikliniň (21 boýunça) sowuklyk koeffisienti.

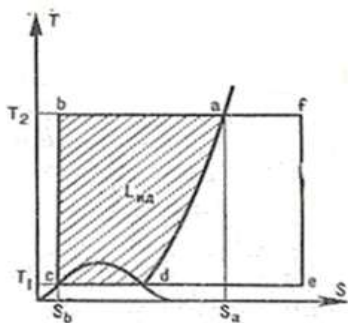
Meselem, eger  $T_1 = 243 \div 273\text{ K}$  bahasynda  $\eta = 0,78 \div 0,89$  bolýan bolsa,  $T_1 = 4 \div 20\text{ K}$ -de termodinamiki p.t.k.  $0,08 - 0,2$  çenli azalýar, bu temperaturanyň peselmeginde öwrülişiksiz ýitgileriň artmagy bilen baglanyşyklydyr.



**Surat 2-2. Karnonyň siklinde  $L_k/Q$  udel işiň sowadylma temperaturasyňa baglylygy (daşky gurşawyň  $15^\circ\text{C}$  temperaturasynda)**

Gazy suwuklandyrmagyň ideal sikline seredeliň. Bu hili sikl 2-2 suratda görkezilen (T-S diagramma).

Diagrammanyň aşaky çep burçundaky ýapyk egri çyg buguň oblastyny çäklendirýär.



**Surat 2-3. Gazy suwuklandyrmagyň ideal sikli**

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 (c nokat doýgun suwuklygyň egrisinde ýatýat). Ýylylyk  $P_1$  basyş astynda

suwuklygyň  $T_1$  gaýnama temperaturasynda aýrylýar (**cd**-çyzyk). Görnüşi ýaly, suwuklyk d we c nokatlarda entalpiýanyň tapawudyna ekwiwalent bolan ýylylygy, ýagny  $P_1$  basyşda bugarmagyň gizlin ýylylygyny aýyrmaga ukyplydyr, d nokada deňişli bolan doýgun bug **da** izobaranyň ugry boýunça  $T_2$  temperatura çenli gyzçar we sikl sepleşýär.

Izotermiki gysylanda:

$$Q_2 = Q_1 + L_{id} \quad (18a)$$

formula bilen kesgitlenilýän  $Q_2$  ýylylyk mukdary bölünip çykýär.

bu ýerde:  $L_{id}$ -ideal siklde sarp edilýän iş;

$Q_1$ -sowadyjy agentiň alyp gidýän ýylylyk mukdary (3-nji suratda aralykda bugarmanyň gizlin ýylylygy we **da** izobara boýunça gyzdyrylma ýylylygy).

Görnüşi ýaly:

$$Q_2 = T_2 (S_a - S_b) \quad (24)$$

$$Q_1 = i_a - i_c \quad (25)$$

bu ýerder:  $i_a$ ,  $i_c$  – gaýnama temperaturasynda we  $P_1$  basyşda gazyň we suwuklygyň entalpiýasy.

Getirilen deňlemelerden aşakdaky aňlatma gelip üykýar:

$$L_{id} = Q_2 - Q_1 = T_2 (S_a - S_b) - (i_a - i_c) = T_2 \Delta S - \Delta i \quad (26)$$

bu ýerde:  $\Delta S$  we  $\Delta i$  – şol bir  $P_1$  basyşa degişli bolan  $T_2$  başlangyç temperaturada gazyň we gaýnama temperaturasynda suwuklygyň entropiýasynyň we entalpiýasynyň bahalarynyň tapawutlary.

Ideal siklde sarp edilýän iş Karnonyň siklindäki garanda azdygyna göz ýetirmek kyn däldir. 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 (surat 3)-da çyzygyň ugry boýunça aýrylýar. 3-nji suratda **cda** çyzygyň aşagyndaky mebdan Karnonyň siklindäki  $Q_1$  degişli bolan **cde** çyzygyň aşagyndaky meýdana deňdir, şeýleleik bilen Karnonyň siklindäki sarp edilen iş ideal siklde sarp edilen işi häsiýetlendirýäm **abcd** meýdandan uly bolan **cefb** meýdana ekwiwalendir.

2-1 tablisada 1 kg suwuk gazy almak üçin zerur bolan Karnonyň sikli boýunaça  $L_k$ -nyň we ideal sikl boýunça  $L_{id}$ -niň bahalary getirilen.

Hasaplamalar  $T_2 = 300K$  we  $P_1 = 0,1 \text{ MPa}$  bahalarda ýerine ýetirilen. Ol ýerde bug 1 kg gazy suwuklandyrmakda aýrylmaly doly ýylylyk, ýagny  $\Delta i$  görkezilen.

Tablisa 2-1. Ideal sikl  $L_{id}$  we Karnonyň  $L_k$  sikli boýunça gazlary suwuklandyrmaga sarp edilýän iş.

**Tablisa 2-1**

<b>Gaz</b>	<b>Kadaly şertlerde gaýnama temperaturasy T,K</b>	<b>Suwuklandyrmada aýrylýan ýylylyk <math>\Delta i</math>, ki/kg</b>	<b>Bug emele gelmegiň gizlin ýylylygy r, kJ/kg</b>	<b>Ideal sikl boýunça iş <math>L_{id}</math>, Mj/kg</b>	<b>Karnonyňsikli boýunça iş <math>L_k</math>, mj/kg</b>	<b><math>L_{id}/L_k</math></b>
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

Geliý bilen wodorod üçin alynan netijeleri deňeşdirmek gyzyklydyr. Bug emele gelmegiň gizlin ýylylygy az bolan we şol bir wagtyň özünde pes gaýnama temperaturaly geliý suwuklandyrylanda ideal siklde gaýnama temperatura görä has ýokary temperaturada 98,7% ýylylyk aýrylýar. Karnonyň sikli boýunça sowadyлма koeffisientiň örän az bahasynda ( $\epsilon_k = 0,014$ ), temperaturanyň has pes bahasynda (42K), ýylylygyň ählisi alnyp gidirýär. Ideal sikl boýunça wodorody suwuklandyrylanda 88,8 % ýylylyk gaýnama temperaturasyndan ýokary bolan temperaturada alnyp gidilýär, bu ýagdaýda Karnonyň sikliniň koeffisienti 0,07 çenli artýar. Geliý we wodorod üçin 2-1 tablisada getirilen parametrleriň gatnaşyklary şunuň bilen düşündirilýär.

Gazlary suwuklandyrmagyň ideal siklini amala aşyrmak mümkin däl diýen ýalydyr, mysal üçin howany



suwuklandyrmak üçin ony 50000 MPa ( $500000 \text{ kg} \cdot \text{g}/\text{sm}^2$ ) çenli gysmak gerek bolardy.

Senagat tejribesinde pes temperaturany almagyň üç sany umumy usuly:

- 1) pes temperaturada gaýnaýan suwuklandyryň bugarmasy;
- 2) Joule-Tomsonyň efektini ulanmak (drossel irleme);
- 3) daşky iş etmek we etmezlik bilen gazyň adiabatik giňelmesi.

Köplenç ýagdaýda bu usullar kombinirlenýär.

Pes temperaturada gaýnaýan suwuklyklaryň bugarmasyna esaslanan sowadyjy sikler aram sowadylma ulgamynda örän giňden ýaýrandyr.

1959-njy ýyldan başlap, wodorody suwuklandyryjylaryň agirt uly desgalarynyň gurluşygyna başlandy.

Öndüriligi 30-60tonna bolan wodorody suwuklandyryjylar işläp başlady. Häzirki döwürde suwuk wodorod raketanyň ýokarky basgançagynda, köpürjikli kamerada ýangyç hökmünde ulanylýär.

Gelini suwuklandyrmak tehnikaşy hem uly ösüş depgini bilen ýola goýulýar. Artur D.Litl (ABŞ) firmasy tarapyndan soňky on ýyllykda 300-e golaý geliý suwuklandyryjylary guruldy, onuň içinde 500  $\ell/\text{s}$  öndüriligi bolan desga aýratyň orun eýeleýär. Ondan başga-da Linde (ABŞ) firmasy 650-720  $\ell/\text{s}$  öndüriligi bolan geliý suwuklandyryjysyny işläp düzýär. Şuňa meňzeş ençeme suwuklandyryjylar ylmyň we tehnikaşyň ösmegi bilen has kamilleşýarler we olaryň kuwwatlyklary artýar.

Häzirki döwürde esasy inžener we ylmy problemalar: edara edilýän termoýadro sintezi, ýokary energiýanyň fizikaşy, energiýanyň öwrülişiginde magnitogidrodinamiki usul, kosmonawtika, elektronika, elektrotehnika 4-70°K derejedäki suwuklygy ulanmagy talap edýär.

Kriogen tehnika-ylmy-tehnikanyň 120K-den aşak bolan pes temperaturalary (kriogen temperatutalar) 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 elektrotehniki gurluşlaryň temperaturalaryny belli bir derejede saklamak.

## **2.4. Kriogen ulgamlarynyň topagy**

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

R-kriorefrižerator ulgamlary  $T < 120\text{K}$  temperatura interwalynda, islendik sowadylýan obýektiň ýylylygyny almak üçin ulanylýar.

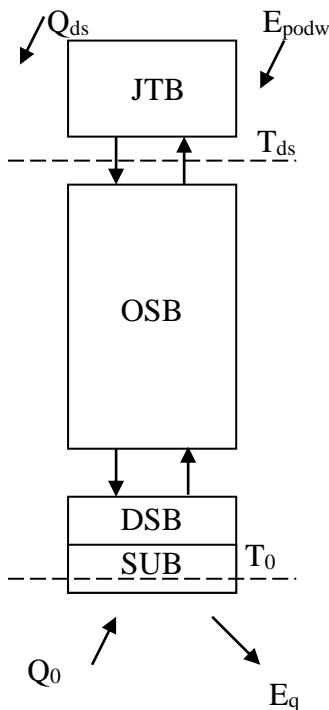
L-kriosuwuklandyryjylar  $T < 120\text{K}$  ýagdaý-da maddany gaz halyndan suwuk, gaty halyna geçirmeklik üçin ulanylýar.

D-dargadyjy (bölüji) ulgamlar pes temperaturada gaz erginlerini dargatmak üçin ulanylýar, (ýagny howany, tebigy gazlary, koks we nebit gazlaryny we ş.m.).

Pes temperaturaly tehnikada esasan hem, drossel gurluşlarynda, detanderlerde iş jisimleriniň giňelmegi netijesinde pes temperaturalary almaklyk prosesinde diňden ulanylýar.

Kriorefrižeratorlaryň gurluşyny hem, bug kompressor sowadyjy desgalarynyň gurluşy ýaly, umumy bir görnüşe getirmek bolýar.

Ýokarky basgançak  $T_{ds}$ -daşky sredanyň temperaturasyndan ýokarda ýerleşip, iş jisimini taýýarlamak üçin (iş jisimini taýýarlaýyş basgançagy-JTB) ulanylýar. Bu basgançak desganyň işlemegi üçin gerek bolýan iş jisiminiň eksergiýasyny ýokarlandyrýar. Bu hadysa ýylylyk akymynyň belli bir mukdarynyň dasky sreda berilmegi bilen iş jisiminiň entropiýasynyň peselmeginde, basyşyň  $P_n$ -den  $P_m$  çenli



**Surat 2-4. Refrižeratoryň gurluş shemasy.**

ýokarlanmagy netijesinde ýerine ýatirilýär. JTB-yň ýerine ýetirýän işi haýsam bolsa bir görnüşli eksergiýanyň üpjün edilmegi bilen ýerine ýetirilýär, termomehaniki ulgamlarynda esasan hem mehaniki iş, käýärym ýylylyk energiýasy ulanylýar. JTB-dan soňra iş-jisimini öňümçä sowatmak basgançagy (Ö.S.B.) ýerleşýär. Bu basgançakda iş jisimi ýylylygy regenerirlmek ýoly bilen sowadylýar. Doly sowadyş basgançagynda (D.S.B.) iş jisimi içki sowadylma hadysasy netijesinde ulgamda gaty pes temperaturany almaklygy üpjün edýär. Sowugy ulanyjy basgançakda (S.U.B.) obýektiň ýylylygyny  $Q_0$  almaklyk bilen iş jisiminiň eksrgiýasy ýokarlanýar (gerekli ýylylyk eksergiýa  $E_q$  obýekte berilýär.)

Kriorefrižeratorlar içki sowadylma hadysasynyň hiline görä iki görnüşe bölünýär.

Birinji görnüşde gutarnykly sowadylma hadysasy işçi jisiminiň drosselirlmegi netijesinde ýerine ýetirilýär.

Ikinji görnüşde gutarnykly sowadylma hadysasy işçi jisiminiň detanderde giňelmegi netijesinde ýerine ýetirilýär.

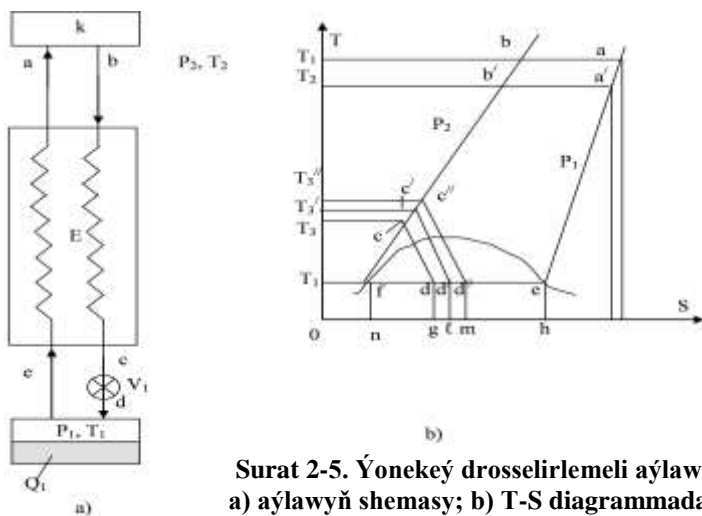
Berlen sistemany  $T_2$ -daşky gurşawyň temperaturasyndan (howa, suw) aşak  $T_1$ -temperatura çenli sowatmak we ony bu temperaturada saklamak  $T_1$  derejeden  $T_2$  derejä  $Q_1$  ýylylygy geçirmek talap edilýär. Termodinamikanyň II-kanunyna laýyklykda bu hili proses öz-özünden geçmeýär,

bu diňe başga bir sistemanyň iş etmegi bilen mümkin bolýär. Meselem, mehaniki energiýanyň ýylylyga öwrülmegi bilen ýa-da ýokary potensial ýylylygy ulanmak bilen amala aşyrylýär.

## 2.5. Drosselli gutarnykly sowadylma basgançakly (GSB) kriorefrižeratorlar. Lindeniň prosesi

Bu ýenekeý aýlaw XIX asyryň ahylarynda howany suwuklandyrmak üçin K.Linde tarapyndan hödürlendi. Ilki bilen ýönekeý drosselirlenmäniň suwuklandyrylan gazy çykarylan has pes  $T$ , temperatura derejesinde  $Q_1$  ýylylyk berilmegi bilen sowadyjy aýlawyna serediliň.

Aýlawyň shemasy we onuň T-S diagrammada aňladylyşy aşakdaky suratda görkezilen (surat 2-5. a,b).



Surat 2-5. Ýönekeý drosselirlenmeli aýlaw  
a) aýlawyň shemasy; b) T-S diagrammada  
aýlawyň şekili.

Howa basyşyň we temperaturanyň  $P_1$  we  $T_2$  bahasynda kompressora düşýär, we ol gysylandan soň  $P_2$  we  $T_2$  bahalar bilen häsiýetlendirilýär, şeýlelikde  $P_2 > P_1$ , ýagny proses izotermiki ýagdaý-da amala aşyrylýär.

Soňra E ýylylyk çalşygyda gysylan howa  $P_2$  hemişelik basyşda  $T_2$  temperaturadan  $T_3$  temperatura çenli sowayar.  $V_1$  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 barylýar; gazyň drosselirlenmeden soňky ýagdaýyny häsiýetlendirýän  $\alpha$  - nokat geterogen oblastda ýerleşýär, ýagny gazyň bölekleyin suwuklandyrylmasy bolup geçýär.

Suwuklandyrylan gazyň otnositel mukdary  $x$ , belli bolan ryçagyň düzgüni boýunça degişli kesimlerin gatnaşygy bilen kesgitlenilýär:

$$x = \frac{d\ell}{\ell f}$$

$\ell$  we  $f$  nokatlar doýan buguň we  $T_1$  temperaturada we  $P_1$  basyşda suwuklygyň ýagdaýyny şekillendirýärler. Emele gelen suwuklandyrylan gaz daşyndan berilýän  $Q_1$  ýylylygyň täsiri astynda bugarýar we suwuklanmadyk gaz bilen bilelikde ýylylyk çalşyja düşýär, ol ýerde hem başlangyç  $T_2$  temperatura çenli gyzdrylýär. Seredilýän teoretiki aýlawda ýylylyk çalşygy daşky sredadan ýylylyk almaýar (adiabatiki şert), onuň ýyly ahyrlarynda iki gaz akymalarynyň temperaturalary birmeňzeşdir we  $T_2$  deňdir ( $\Delta T_T = 0$ ).

T-S diagrammada (sur 1,b) stasionar proses şekillendirilendir. Režim doly düzülýänçä gazyň endigan sowadylmasy bolup geçýär ( $T_2 < T_{\text{inw}}$ ).

$T_1$  derejede aýlawda berilýän ýylylyk, ýagny aýlawyň sowuklyk öndürjiligi T-S diagrammada  $Q_1 = \text{meýdan dehd} = i_t - i_d$  bilen aňladylýar.

K-kompressordan aşakda ýerleşýän shemanyň bir bölegine seredeliň. 1kg ýa-da 1 mol sirkulirlenýän gazyň energetiki balansyny entalpiýanyň üsti bilen aňlatmak bolar:

$$i_b = i_a + Q_1 \quad (1)$$

bu ýerde:

$$Q_1 = i_a - i_b = \Delta i_T \quad (2)$$

Şeýlelikden, ýönekeý drosselirlenmeli aýlawyň sowuklyk öndürijiligi ýylylyk çalşyjynyň ýyly ahyrlarynda  $P_1$  we  $P_2$  basyşlaryň tapawudyna, ýagny izotermiki gysylma netijesinde gazyň entalpiýasynyň kemelmegine deňdir. Bu  $\Delta i_T$  tapawudy drosselirlenmäniň izotermiki effekti diýip atlandyrylýar.

Teoretiki aýlawda kompressorda sarp edilen iş, izotermiki gysylma işine deňdir:

$$AL_{iz} = Q_2 - Q_1 = Q_2 - \Delta i_T = T_2(S_a - S_b) - (i_a - i_b) \quad (3)$$

Häsiýetleri ideal gazlara golaý gazlar üçin:

$$L_{iz} = RT_2 \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (4)$$

R - gaz hemişeligi

Teoretiki aýlawyň sowadyjy koeffisienti:

$$\varepsilon_T = \frac{Q_1}{AL_{iz}} = \frac{\Delta i_T}{T_2(S_a - S_b) - (i_a - i_b)} = \frac{\Delta i_T}{T_2(S_a - S_b) - (i_a - i_b) - \Delta i_T} \quad (5)$$

Real işçi aýlawyň ýylylyk çalşyjysynyň ýyly ahyrlarynda hemişe belli bir temperaturalaryň tapawudy bolýar, şol sebäpli  $T_2' < T_1$  temperaturada çykýan ters akymynyň ähli sowuklygyny rekuperirmek mümkin däl. 1-nji (b) suratda ýylylyk çalşyjydan çykýan gazyň ýagdaýy  $a'$  nokat bilen aňladylýar. Şoňa laýyklykda gysylan gaz has ýokary  $T_3' > T_3$  temperatura çenli sowadylýar, onuň ýagdaýy  $c'$  nokat bilen aňladylar, hem:

$$i_a' - i_e = i_b - i_c' \quad (6)$$

görnüşde beriler.

bu ýerde:  $i_c' > i_c$

Drosselirlemeden soň emele gelen çyg buguň doýgunlyk derejesi kiçi bolar, sebäbi onuň entalpiýasy ýokarydyr ( $d'$  nokat). Aýlawyň sowuklyk öndürijiligi hem azalar, we  $Q_1' = i_e - i_d'$  bolar, ýagny ol teoretiki aýlawdan  $Q_H = i_d' - i_d$  - esse kiçi bolar.

Ýylylyk balansyndan gelip çykyşyna görä, sowuklyk öndürijiliginiň nedorekuperasiýa netijesinde azalmasy aşakdaky deňleme bilen aňladylar:

$$Q_H = i_d' - i_d = i_c' - i_c = i_a - i_a' \quad (7)$$

$\Delta T = T_a - T_a'$  adatça birnäçe gradusy berýänligi sebäpli temperaturanyň bu interwalynda ýylylyk sygymynyň üýtgemesi örän az bolar, we

$$Q_H = \check{C}_p (T_a - T_a') = \check{C}_p \Delta T_T \quad (8)$$

hasap etmek bolar:

5-nji suratda (b) T-S diagrammada.

$$Q_H = \text{meýdan aa'jka} = \text{meýdan dgld}'\alpha$$

Real aýlawda sowuklyk öndürijiliginiň azalmagynyň beýleki sebäbi, ol hem daşky sredadan ýylylyk akymynyň gelmegidir, başgaça aýdylanda daşky sreda sowuklyk ýitgisidir  $Q_{ds}$ . Olaryň täsiri drossel wentiliniň oň ýanynda gysylan gazyň temperaturasynyň artmagynda ýüze çykýar, bu ýerde gazyň ýagdaýy  $C''$  nokat bilen aňladylar ( $T''_3 > T'_3$  we  $i''_c > i'_c$ ).

Ýylylyk balansynyň esasynda:

$$Q_{ds} = i''_c > i'_c - i''_d > i'_d \quad (9)$$

T-S diagrammada:  $Q_{ds} = \text{meýdan d' lmd}'' d'$ .

Real aýlawda peýdaly sowuklyk öndüriligi T-S diagrammada  $Q_1^R =$  meýdan  $d''$  mhed'' ýa-da:

$$Q_1^R = Q_1 = Q_H - Q_{ds} = \Delta i_T - \sum Q \quad (10)$$

bu ýerde:  $\sum Q = Q_H - Q_{ds}$

Teoretiki aýlawyň sowadyjy koeffisienti kesgitlenende izotermiki gysylma göz önünde tutulýardy. Hakykatdan bolsa gysylma prosesi izotermiki däldir we hakyky gysylma işi izotermikiden takmynan 70 % ýokary (kompressoryň izotermiki p.t.k.sy  $\eta_{iz} = 0,59$  we  $1/\eta_{iz} = 1,7$ ).

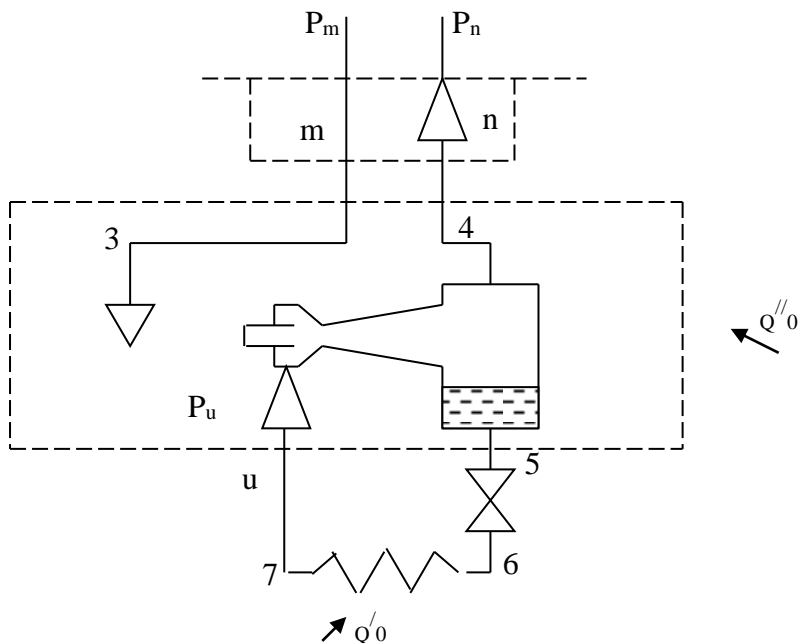
## **2.6. Drossel-ežektorly gutarnykly sowadyлма basgançakly (GSB) kriorefrižeratorlar**

Islendik kriogen sistemasy esasy gutarnykly içki sowadyлма prosesi bilen bir hatarda ýene üç sany esasy prosesi öz içine almalı. Olaryň her haýsysy kriogen sistema degişli basgançakda amala açyrylýar.

1. Işçi jisimi taýýarlamak basgançagy (IJTB). Bu ýerde işçi jisimiň umumylaşdyrylan güýjini (P)  $Q_{ds}$  - ýylylygy daşky sreda bermek bilen ulaltmak amala aşyrylýar.
2. Öňürti sowadyлма basgançagy (ÖSB). Bu ýerde işçi jisim  $T \geq T_{ds}$ -den  $T_a$  - içki sowadyлmanyň gutarnykly sowadyлма temperaturasyна çenli sowadyлýär (ýa-da  $T_a$  derejede aşaky kaskadda ýylylyk ýa-da entalpiýa görnüşindaky energiýany alyp aýyrmak).
3. Sowuklyk effektini ulanmak basgançagy (SUB). Bu ýerde öňüm sowuklyk (R-klasly) ýa-da kondensirlenen krioagent (L-klass) görnüşinde çykarmaklyk üpjün edilýär.
4. Gutarnykly sowadyлма basgançagy (GSB). Bu ýerde  $T_o$  temperatura çenli içki sowadyлма prosesi ÖSB we SUB basgançaklary arasynda alynyp barylýar. Ol bölekleyin ýa-da dolulygyna SUB bilen gabat gelip bilýär.



Işçi jisim (m-akym) 3 nokatdaky ýagdaýynda ežektoryň soplosyna düşýär, ol ýerde onuň basyşy  $P_n$  derejä çenli giňelýär, m-akymynyň kinetik energiýasyny 7-nokatdaky parametrleri bilen bugardyjydan u mukdardaky bugy çekip almaga (ežektirlema) sarp edilýär. Ežektorda işçi m we inžektirlenýän u akymynyň garyşmasy we garyndynyň  $P_n$  ters akymyň basyşyna çenli gysylmasy amala aşyrylýär. Gaz-suwuklyk emulsiýa separatorda bolunýär. Bu ters akym ýaly akidilýär (4 nokat), u mukdardaky suwuklyk (5 nokat) drosselirlenmä düşýär.



39

Alynan  $Q_0$  sowadyjy effekt bugardyjyda ulanylýär. Şeýlelik bilen akymyň giňelmesi iki stadiýa-da alynyp barylýär:

- ežektorda  $P_m$ -den  $P_n$  çenli we drosselde  $P_n$ -den  $P_u < P_n$  çenli.

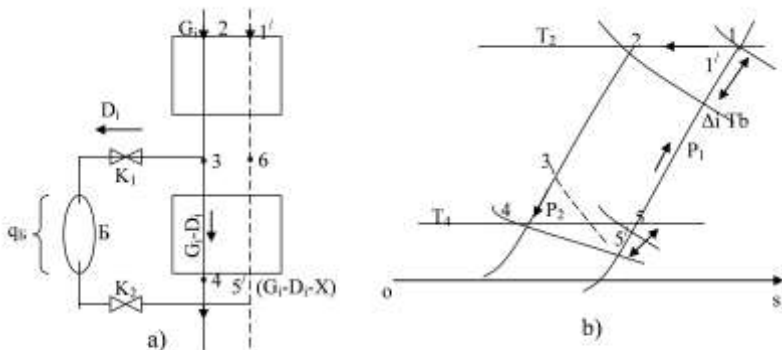
Şunuň bilen ikeldilen peýdaly effekt alynýär:

1. Giňeldilýän  $m$  akymyň kinetik energiýasy ulanylýar (u akymy gysmak üçin). Drosselirlemede bu energiýa ulanylmaýar, ol energiýa dolylygyna entalpiýa geçýär.
2. Drosseliň önünde temperatura we basyş peselýär ( $P_5 < P_3 = P_m$  we  $T_5 < T_3$ ). Bu bolsa drosselirlemanıň p.t.k.ň ulalmagyna getirýär.

## **2.7. Drosselli gutarnykly sowadylma basgançakly (GSB) we ýylylygy daşky sreda berýän önürti sowadylma basgançakly (ÖSB) kriofrežeratorlar**

Ýylylyk daşky sreda berýän önürti (ÖSB) sowadylma usuly beýleki usullara garanda seýrek ulanylýär, şoňa garamazdan ony mümkin bolan wariant hökmünde hasaplamalaryň umumy shemasyna goşmak maksadalaýykdyr.

Suratda görkezilişi ýaly  $G_i$  akym ýokarky ýylylyk çalşyjyda  $T_3$  temperatura çenli sowadyjylar, siňra bu akymyň  $D_i$  bölegi  $B$  gaba doldurylýär, ol ýerden  $q_B$  gysylma ýylylygy daşky sreda berilýär.  $q_B$  - ululyga ekwiwalent sowuklyk öndürijiligi  $D_i$  - akymyň  $K_2$  wentilden geçip giňelmesi netijesinde döredilýär. S-T diagrammada ýylylygyň daşky sreda berilmeklik prosesi ştrihlenen egri çyzyk bilen şertli görkezilendir.



Surat 2.7. Drosselli gutarnykly sowadyлма basgançakly kriorefrižeratoryň shemasy

Basgançagyň energetiki balansy:

$$G_i i_2 + (G_i - D_i - x) i_5 + G_i q_3 = (G_i - x) i_1 + q_B D_i$$

$i_1 = i_2 - G_p \Delta t_b$ ;  $i_5 = i_5 - c_p \Delta t_H$  Göz öňüne alyp, formulany üýtgedip alarys:

$$Q_B = D_i [q_B + \Delta i_{TH} - c_p \Delta t_H] = x(i_1 - i_5) + G_i [(\Delta i_{TH} - \Delta i_{Tb}) + C_p (\Delta T_b - \Delta T_H) + q_3] \quad (1)$$

Hemişelik göwrümden  $q_B = i_3 - i_5$ , ýylylygy daşky sreda bermek prosesinde entalpiýanyň üýtgemesi

$$\Delta i_{BHX} = i_H - i_K = P_H V_H \left( 1 - \frac{P_K}{P_H} \right) \text{ formula laýyklykda}$$

hasaplanylýar, onda

$$q_B = P_3 V_3 \left( 1 - \frac{P_5}{P_3} \right)$$

Bu prinsip bilen işleýän Simonyň suwuklandyryjysynyň aşaky ýylylyk çalşyjysy ýokdur, Bgapda izotermiki gysylan  $G_i$  ähli akym 5 ýagdaýa çenli giňelýär we bu ýerde bir bölegi suwuklanýar.

1. Daşky çeşme sowadyлма basgançagy
2. Drosselli basgançak,

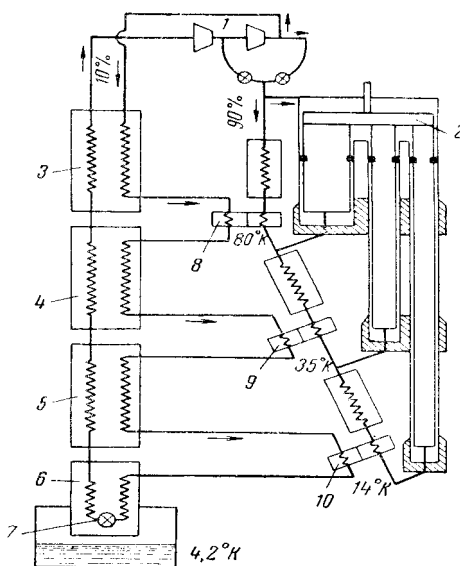
3. Detanderli basgançak
4. Ýylylygy daşyna bermek prosesini ulanmak basgançagy

Bu basgançaklaryň islendiginde daşyna berilýän ýylylyk

$Q_i = x (i_1 - i_5) + G_i [(\Delta i_{TH} - \Delta i_{TB}) + C_p(\Delta t_b - \Delta t_H) + q_3]$  formula bilen hasaplanylýar.

## 2.8 Gutarnykly sowadylma basgançagynda iki basgançagy bolan geliýrefrižeratory

Ýylylyk nasosly prinsipde işleýän maşynlaryň tapawutly aýratynlygy bardyr, ol hem ondan gelýän gaz daşky iş etmeýär. Şonuň üçin ýylylyk nasosly sikllerin kompressorly sikllerden effektivligi azdyr. Şeýle hem bolsa ýylylyk nasos prinsipinde işleýän maşynlaryň birnäçe artykmaçlygy bardyr: gurluşynyň ýönekeýli, ýokary derejeli ygtybarlygy: olar köp basgançakly ýerine ýetirilip bilinýär, ol hem 10 - 15°K temperaturany almaga mümkinçilik berýär.



Suratda ýylylygy alyp gidiji üç basgançakly geliýrefrižerator şekillendirilen. Pes tempraturaly (ikinci, üçinji) basgançaklar birinji ýaly işleýärler. Onuň bir aýratynlygy, gaz her gezekdäki basgançaga pes temperaturada barýar.

Köp basgançakly maşynlaryň temperaturanyň sowadylma derejesiniň

peselmegine esaslanyp ulanylmaklygynyň maksadalaýaklygy iki sany esasy düşünje bilen kesgitlenilýär.

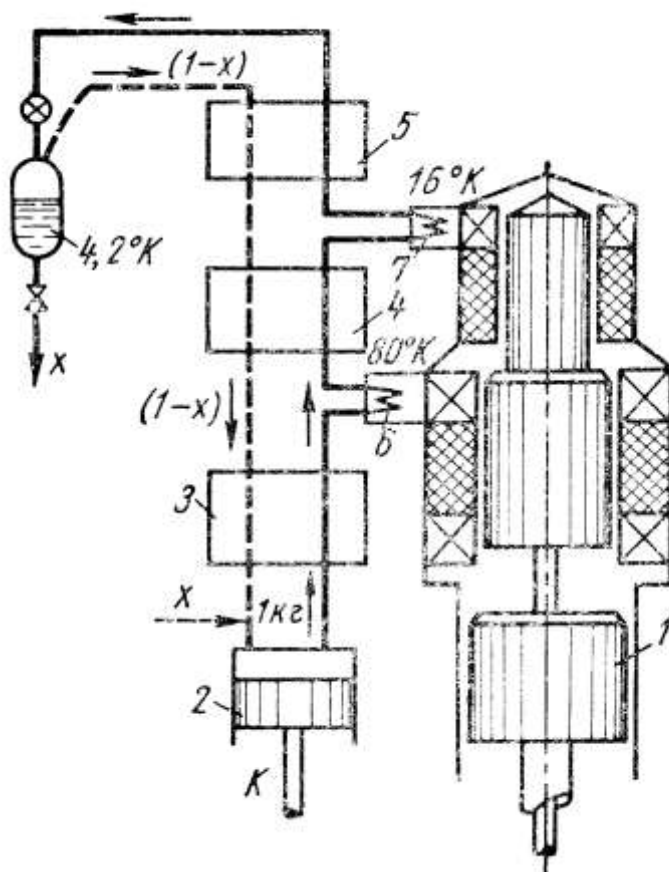
1. Sowuklyk öndürjiligi ýokary basgançakda termodinamiki nukdaý nazardan örän amatly sarp edilip biliner. Meselem, wodorody suwuklandyrylanda alynýan sowuklygyň ýarsyndan köpüsi gazy otag temperaturasyndan  $80^{\circ}\text{K}$  çenli sowatmaklyga sarp edilýär.

2. Bir basgançakly maşynlarda sowatmaklyk ( $20^{\circ}\text{K}$  çenli) birnäçe ýitgiler sebäpli mümkin däl. Suratda görkezilen üç basgançakly maşyn  $14^{\circ}\text{K}$  derejede ýylylygy alyp gitmäge mümkinçilik berýär we gelini suwuklandyrmak üçin ulanulýan desganyň esasy elementi bolup durýar. Ol wodorody we dürli gazlary suwuklandyrmaga ulanylyp bilinýär.

A.D.Littliň firmasy (ABS) 2wt sowuklyk öndürijilikli  $4,2^{\circ}\text{K}$  temperatura derejesinde Džifford-Mak Magonyň modifisirlenen siklinde işleýän desgany gurýar.

Desga iki basgançakly geliý refrižeratorydyr.





Surat 2.10. Iki basgançakly Filips maşynynyň esasynda geliýni suwuklandyryjynyň shemasy.

## 2.9 Detanderli gutarnykly sowadyлма basgançakly (GSB) kriorefrežeratorlar

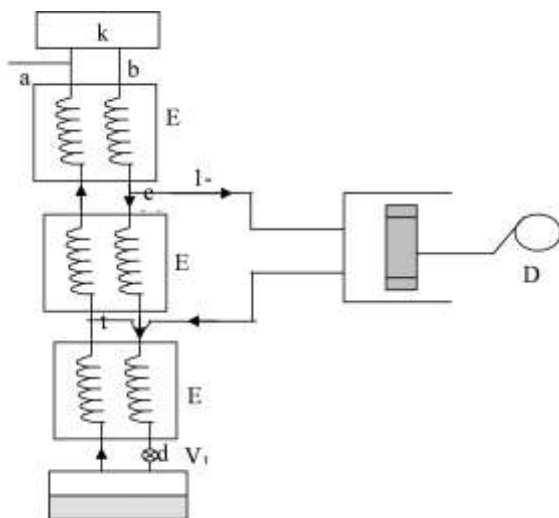
Sowuklyk almak usullaryna seredilende gazlaryň detanderde izoentropik giňelmesi drosselirlemä garanda has effektivligi bellenilýär, sebäbi ol dolanysykly proses bolup

durýar. Ähli gaz görnüşli kislorod öndüriji, hem-de suwuk kislorod we azot öndüriji iri howa bölüji desgalar detanderli sikller boýunça gurulýar. Uly mukdarda suwuklandyrylan wodorody almak üçin soňky onýylyklarda gurulýan desgalaryň ählisinde gerekli mukdarda sowuklyk almak üçin detanderler ulanylýar. Suwuklandyrylan gelini öndürmek üçin işleýän desgalarda detanderi ulanmak usuly aralyk sowadylma prosesini aradan aýyrmaga mümkinçilik berýär, bu bolsa desgany partlama howpundan goraýar we tygşytlylygy üpjün edýär.

Gaz giňelende detanderde suwuk gazy alyp bolmayar, şonuň üçin gazyň belli bir mukdaryny drosselirlemeli bolýar, ol yerde gaz suwuklandyrylýar. Suwuklandyrylan gazy ýygnamaga niýetlenýän desgalara we peýdaly sowuklyk öndürijiligi sistemanyň daşyna çykarylmaýan suwuklandyrylan gazyň gaýnamasyna sarp edilýän refrižeratorlara degişlidir.

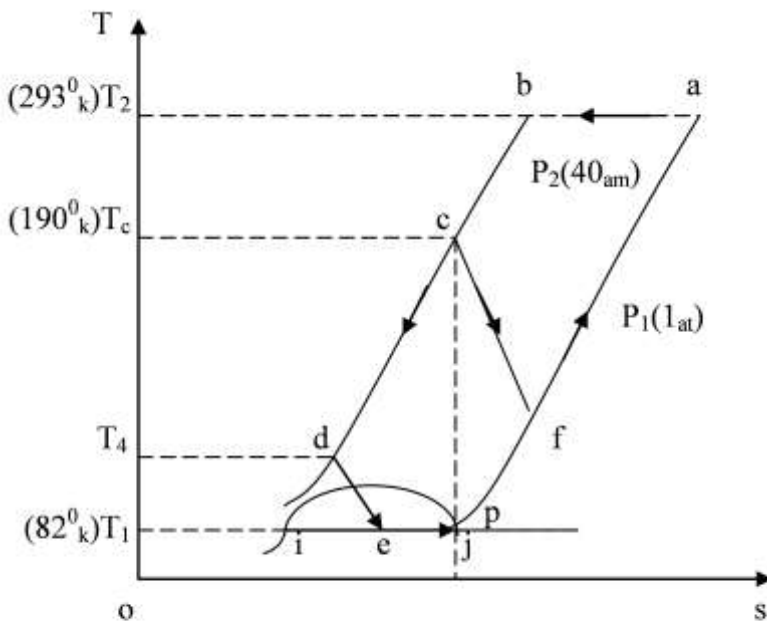
Detander ilkinji gezek 1902-nji ýylda Klod tarapyndan howany suwuklandyrmak üçin ulanylypdyr.

Suratda desganyň shemasy we sikli şekillendirilýän T-S diagramma ýerleşdirilen.



a)





b)

**Surat 2.11. Detanderli gutarnyky sowadyлма  
başgançakly  
(GSB) kriorefrežeratoryň shemasy**

Howa kompressoryň kömegi bilen  $P_2 \approx 40\text{at}$  çenli gysylýär,  $E_1$ -de sowadylýär, ondan soň onuň  $M$  mukdary indiki  $E_2$  ýylylyk çalşyja düşýär,  $I$ - $M$  bölegi bolsa  $D$  detandere düşýär.  $D$ -de giňelme bilen howa güýçli sowaýar we ters akyma goşulýär  $E_2$ ,  $M$  howa  $E_3$ -de sowaýar we  $V^{dr}_1$  wentilden geçip ýygnaýja berilip giňelýär. Bu ýerde ol bölekleýin suwuklanýar.

Suwuklanmadyk howa ýylylyk çalşyjylar arkaly alyp gidirýär we şunlukda gyzdrylýär.

Teoretiki siklde ýylylyk balansynyň esasynda düzülen suwuklandyrmak koeffisienti aşakdaky deňleme bilen aňladylýär.

$$x_r = \frac{(i_a - i_b) + (1-M)(i_c - i_f)}{i_a - i_i} = \frac{\Delta i_T + (1-M)h_o \eta_o}{i_a - i_i} \quad (1)$$

$h_o \eta_o = (i_c - i_f)$ - giňelme prasesiniň dolanyşyksyzlygyny hasaba alyp, detanderde gazyň entalpiýasynyň üýtgemesi.

$h_o = i_c - i_p - cp$  çyzykda gazyň izoentropik giňelmesinde entalpiýanyň üýtgemesi (sur.)

$\eta_o$  – detanderiň adiabatik p.t.k.si.

(1)-deňlemeden görnüşini ýaly, sowuklandyрма koeffisienti, ähli gazyň izotermiki drosselirlenmesi  $\Delta i_T$  bilen, detanderde entalpiýanyň üýtgemesi  $h_o \eta_o$  we detandere düşýän  $1-M$  gazyň mukdary bilen kesgitlenilýär.

Eger ýylyk çalşyjylary ideal diýip hasap etsek, onda olaryň birinjisi E, üçin aşaky şert ýerine ýetirilmeli:

$$i_b - i_c = (1-M)C_p(T_2 - T_c) \quad (2)$$

Eger  $M$ -örän az bolsa, onda gysylan gaz detanderde giňelen  $1-M$  akymy gyzdymaga güýji ýetmez, ol E,-den pes temperaturada çykar. Bu ýerde nedorekuperasiýa sebäpli  $Q_H$  sowuklyk ýitgisi köp bolar we  $x$ -sowuklandyрма koeffisienti azalar, onda real sikl üçin:

$$X_p = \frac{\Delta i_T + (1-M)h_o \pi_o - Q_u - Q_{o,c}}{i_a - i_i - Q_u} \quad (3)$$

$h_o$ - detandere gelyän gazyň  $T_c$  temperaturasyyna baglydyr  $T_c$  ulalmagy bilen  $h_o$  ulalar, ýöne giňelmäniň ahyrynda bir wagtda gazyň temperaturasy artar.

Serediýän sikli analiz etmek bilen,  $P_2$  – ñ her bir bahasyna detanderde giňelýän gazyň  $(1-M)_{opt}$  optimal bahasynyň we gazyň detanderiň öň ýanynda  $T_{opt}$  temperaturasyynyň degişlidigi anyklanyldy.

Suratda detanderli howa sikliniň häsiýetnamasy getirilen. (shemasy 1-suratda)

$$M = \frac{\text{drosselirlenýän howanyň mukdary}}{\text{howanyň umumy mukdary}}; \quad q = \text{sarp}$$

edilýän energiý.

Real siklde sarp edilen iş:

$$AL = \frac{ART, \ell n \frac{P_2}{P_1}}{\eta_{\mu 3}} - (1 - M) h_o \eta_o \eta_M \quad (4)$$

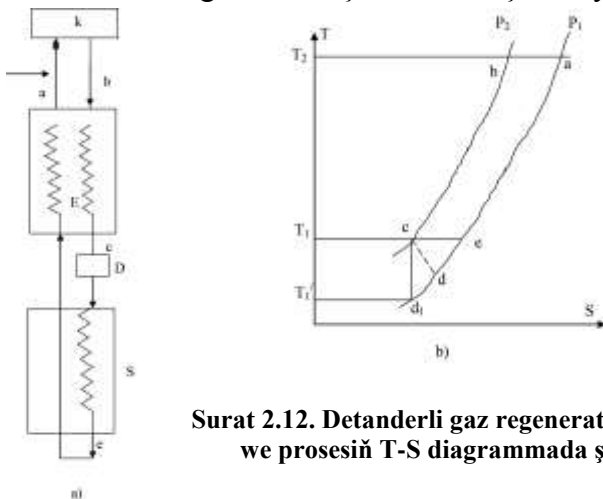
Sag tarapdaky ikinji çlen detanderde edilýän işe degişlidir. ( $\eta_M$ - detanderiň mehaniki p.t.k.)

Bu iş adatça kompressorda gysylma işiniň 10% -den uly bolmaýar. Beýan edilen detanderli siklden başgada birnäçe detanderli sikliň modifikasiýasy bardyr: detanderde gazyň iki basgançakly giňelmesi, iki basyşly we iki basgançakly giňelme, aralyk sowadylma we detanderde giňelme.

## 2.10. Gazly sowadyjy aýlawlar

a) Adibat - izotermiki aýlaw.

Suratda detanderli gaz regeneratiw sikliň shemasy we prosesiniň T-S diagrammada şekillendirilişi berilýär.



Surat 2.12. Detanderli gaz regeneratiw sikliň shemasy we prosesiniň T-S diagrammada şekillendirilişi

K - kompressorda gysylýar, E - ýylylyk çalşygyda sowaýar, detanderde, D doly giňelýär, X - sowadyjy kamerada sowadylýan obýektden yylylygy alyp geçýär, soňra E ýylylyk çalşygyda gyzdrylyp, kompressor bilen sorulýar.

Teoretiki aýlawyň sowuklyk öndürijiligi (sur).

$$Q_1 = h_0 \eta_0 + \Delta i_T = i_d - i_e \quad (1)$$

bu ýerde:  $h_0 = i_c - i_d$  - gazyň  $cd'$  çyzyk boýunça izoentropiki giňelmesinde entalpiýasynyň üýtgemesi;

$\Delta i_T = i_d - i_e$ ;  $T_2$  - temperatura derejesinde drosselirlenäniň izotermiki effekti.

Real aýlawyň sowuklyk öndürijiligi:

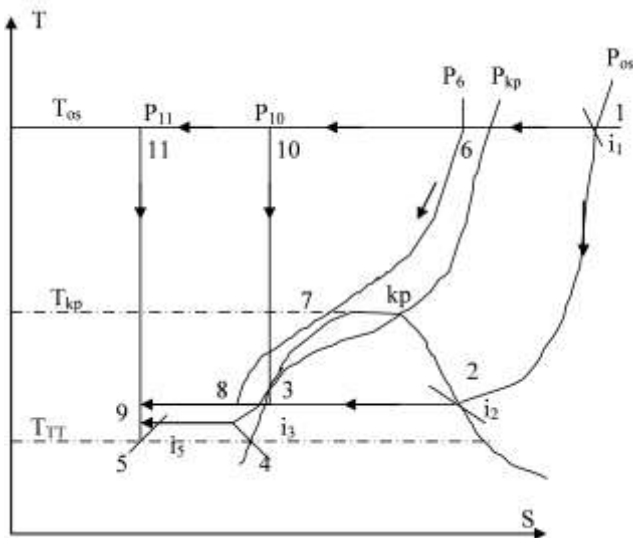
$$Q^P_1 = h_0 \eta_0 + \Delta i_T - Q_H - Q_{oc} \quad (2)$$

bu ýerde:  $Q_H - Q_{oc}$  - doly däl rekuperasiýa netijesinde hem daşky sredadan gelýän ýylylyk akymy netijesinde sowuklyk ýitgisi.

## BAP III. L-suwuklandyryjy we doňduryjy ulgamlar

### 3.1 Gazlary suwuklandyrmaklygyň we doňdurmaklygyň ideal hadysalary

T-S- diagrammanyň kömegi bilen gazlaryň suwuk we gaty halyna geçmek hadysasyna seredeliň (surat 3-1).



Surar 3-1. Gazlaryň suwuk we gaty halyna geçmeklik hadysasynyň T-S-diagrammada aňladylyşy

Gazyň başky ýagdaýy daşky sredanyň şertlerine gabat gelýär  $T, P$ ; 1-nji nokatda daşky sredanyň basyşy gazyň ktitiki' (ds kritiki basyş, jisimiň gaz halyndan suwuk halyna geçiş basyşy) basyşyndan kiçi  $P_{d.s} < P_{kr}$ .

Eger-de gaz sowadyjy desgalaryň ýa-da kriogen desgalaryň kömegi bilen,  $P_{d.s} = \text{const}$  ýagdaýda sowadylanda, onda gazyň temperaturasy 2-nji nokadynyň ýagdaýyna çenli peselýär. Gazyň soňky sowadylmagy onuň temperaturasynyň üýtgemezligine, emma entalpiýanyň kiçelmegine getirýär.

Entalpiýanyň kiçelmegi ähli bug suwukluga geçýänçä dowam edýär (3 nokat); şeýlelik-de gaz belli bir basyşda gaz halyndan suwukluga geçýär. Suwukluga geçmek hadysasynda jisimden aýrylýan ýylylygyň mukdary şu aşakdaky formula boýunça aňladylýar  $q_{\text{suw}} = i_1 - i_3$ . Eger-de sowamaklygy dowam etsek, onda gaz suwuk halyndan gaty halyna geçýär, iki fazaly ergin emele gelýär (gaty jisim-suwukluk). (4 nokat), soňra  $T = T_4$  ýagdaýda gaty hala geçýär (5 nokat).

Gazlary suwuk we gaty halyna ilki başgada basyşyň daşky sredanyň basyşyndan ýokary bolan ýagdaýda hem geçirip bolýar. Bu ýagdaýda gazlaryň suwuklyga geçmek temperaturasy has ýokarlanýar.

Gazlaryň suwuklyga geçmek hadysasyny üç hilli geçirmek bolýar:

1. Hemmişelik  $P_{d.s}$  basyşda, temperaturalaryň daşky sredanyň  $T$  temperaturasyndan täze gazyň faza üýtgeşiklik temperaturasyňa çenli üýtgemekligi bilen.
2. Hemmişelik daşky sredanyň  $T$  temperaturasynda izotermiki gysylma hadysasynda ýylylygyň belli bir mukdaryny alyp, soňra izobar ýagdaýda sowadylmak bilen temperaturalaryň peselmegi.
3. Gazlaryň izotermiki gysylmagy bilen,  $T_{d.s}$  temperaturasynda ýylylygy daşky sreda bermek bilen, soňra daşky sredanyň  $P_{d.s}$  basyşyna çenli izobar halda sowaýar.

Birinji görnüşde gazlary suwuklyga geçirmek üçin, sarp edilen iş boýunça işleýän islendik bir  $R$  ulgamy gerek bolýar.

Ikinji görnüşde gazlaryň suwuklyga geçmekligi üçin sarp edilýän işiň bölegi öňünçä ýerine ýetirilýän gysylma hadysasyna, beýleki bölegi  $R$  ulgamyna sarp edilýär.

Üçünji görnüşde gazlaryň suwuklyga geçmek hadysasy olaryň gysylmagy we giňelmegi netijesinde ýerine ýetirilýär. Sarp edilýän iş diňe gazlaryň gysylmagyna sarp edilýär (gysylma sarp edilen işiň bir bölegi, gazlaryň giňelme hadysasynda gaýdyp gelýär). Bu hadysa tehnikada

ulanylmaýar, sebäbi ony ýerine ýetirmek üçin ýüzlerçe Mpa basyş gerek bolýar.

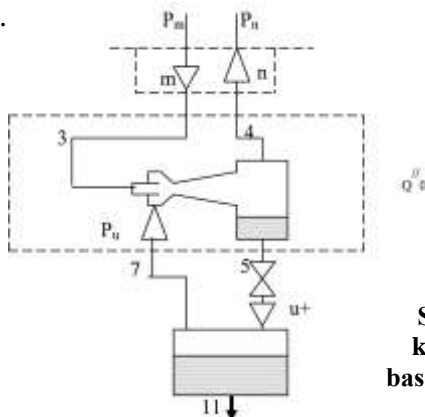
Senagatda we ylmy-barlag işlerinde suwuk we gaty halyndaky gazlar sowadyjy agent hökmünde giňden ulanylýar. Käbir gazlar tehnikada reaktiw dwigatellerde ýangyç hökmünde ulanylýar. Daşamak we saklamak üçin gazlaryň uly mukdaryny suwuk we gaty halyna geçirilýär.

Suwuk howa pes temperaturada dargadylanda  $N_2$  azoda,  $O_2$  kisloroda we Ar argona dargaýar. Azot himiýa senagatynda ammiak önümçiliginde ulanylýar. Nebiti täzeden işlemekde azot gorag inert sredasy hökmünde ulanylýar. Suwuk azot kosmos giňişliginiň şertlerini döretmek we raketa tehnikasynda giňden ulanylýar. Mundan başga-da azot energetikada, radioelektronikada we lazerleri, mazerleri sowatmaklykda giňden ulanylýar.

Suwuk howa suwuk wodorody almak üçin ulanylýar, suwuk wodorod suwuk geliýni almak üçin ulanylýar. Suwuk howany almak üçin Lindäniň we Kloduň sikli ulanylýar.

### 3.2 Drosseli we drossелеžektorly basgançakly gutarnykly sowadylma basgançakly suwuklandyryjylar

Suratda Lindäniň L-suwuklandyryjysynyň shemasy görkezilen.



Surat 3.2. Lindäniň kriosuwuklandyryjy basgançagyň shemasy.

$$G_{o\dot{z}} \Delta i_{o\dot{z}} = \sum G_m \Delta i_{Tm} + \sum G_n \Delta i_{Tn} - \sum G_n \Delta i_H - Q_{iz} \quad (1)$$

görnüşi berer. Onuň her bir agzasyny sarp edilen mukdary hem entalpiýalaryň tapawudy bilen çalşyryp alsak:

$$G_{onc} \Delta i_{onc} = (G_s + G_{onc}) \Delta i_{T,m} - G_s \Delta i_{Tn} - G_s \Delta i_H - (G_s + G_{onc}) Q_{iz}$$

bu ýerde:

$$G_s(\Delta i_T - \Delta i_H - q_{iz}) = G_{o\dot{z}}(\Delta i_{onc} - \Delta i_T + Q_{iz})$$

$$(2)\text{-ni üýtgedip, hem } y = \frac{G_{onc}}{G_{onc} + G_s} = \frac{\Delta i_T - \Delta i_H - Q_{iz}}{\Delta i_{onc} - \Delta i_H} \quad (3)$$

y = o bahasynda (1 formula)

Lindanyň refrižeratory üçin energetiki bahasynyň formulasyna öwürüler. Ol

$$Q_o = G \Delta i_T - G \Delta i_H = G Q_{iz} \text{ -- deňdir ol ýerde } \Delta i_T - \Delta i_H = Q_{iz}$$

(3) formula drossel-effekte, nedorekuperasiýa, hem  $\Delta i_{onc}$ -baglylykda suwuklygyň çykyşynyň esasy kanunalaýaklygyny ýüze çykarmaga mümkinçilki berýär.

(3)-den Lindanyň basgançagynda suwuklygy alnak diňe  $\Delta i_T$  suwuklandyrylan krioagentiň  $\Delta i_T$ -si daşky sredanyň derejesinde položitel bahasynda mümkin bolýandygy gelip çykýar.

Ondan başgada bu formula  $\Delta i_{onc} = i, -i_5$  näçe kiçi bolsa y - şonça kiçidigini görkezýär. Şeýle hem bolsa y öz-özünden suwuklandyryma prosesiniň effektiwligini görkezmeýär, ol diňe onuň netijesini häsýetlendirýär. (işçi jisimi gysmaga sarp edilen energiýany görkezmezden.)

Sistemanyň effektiwligi çykyşyň girişe bolan gatnaşygy bilen, ýagny  $\eta_{e-p.t.k-eksergetiki}$  balansyň esasynda çykarylan ululygy bilen bahalandyrmaly.

Lindäniň suwuklandyryjysynyň kriobloguýynyň eksegetiki balansy:

$$G_{onc} \Delta l_{o\dot{z}} = G_m \Delta l_m - G_n \Delta l_m - Q_{eiz} \quad (4)$$



görnüşde berilyär:

## Suwuklandyrma sistemasynyň krioblogy üçin p.t.k.

$$\eta_e = \frac{y\ell_5}{\ell_2 - (1-y)\ell_1} \quad (5)$$

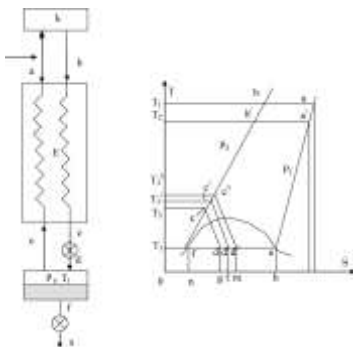
Lindaniñ ulgamynda ÖSB – serti sowadyjy ulgamynda ulanmazdan  $\eta_e$  – ulaltmak mümkinçiligi gäklidir. Ol diňe ikeldilen drosselirleme amala aşyryp mümkin bolar.

Bu shemanyň esasyna goýulan ideýa, adaty pes effektiv Lindanyň kriogen prosesine şol bir krioagentde işleýän we ÖSB amala aşyran ýylylyk çalşygyda has effektiv drossel siklini girizmekden durýar. Bu hili siklde ters akymyň basyşyny ulaldyp  $P_n' > P_n$  effektivligi artdyrmak mümkindir.

### 3.3 Ýylylygy daşky sreda berýän öňürti sowadylma basgançakly (ÖSB) suwuklandyryjylar

Lindonyň L- ulgamy.

Suwuklandyrylan gazy çykarýan ýönekeý drosselli teoretiki aýlawa serediliň. Onuň ýokarda seredilen ýapyk aýlawyndan tapawudy, ýylylyk çalşyjydan gaçýan suwuklandyrylmadyk gazyň ters akymy gysylan gazyň göni akymyndan  $x_t$  ululykca azdyr. ( $x_t$  -gelýän gazyň suwuklandyrylan mukdary) (3.3 surat (a,b)).



### Surat 3.3. Ýylylygy daşky sreda berýän suwuklandyryjynyň shemasy

Ýylylyk baglanşykda.

$$i_a = (1 - x_t) i_b + x_t i_f \quad (10-1)$$

Suwuklandyrylma koeffisienti:

$$x_T = \frac{i_a - i_b}{i_a - i_f} = \frac{Q_1}{i_a - i_f} = \frac{\Delta i_T}{i_a - i_f} \quad (10-2)$$

bu yerde:  $i_f$ -p<sub>1</sub>- basyşda we T<sub>1</sub> temperaturada suwuklygyn entalpiýasy.

$x_t$  –ň maksimal bahasyny P<sub>2</sub>-niň we T<sub>2</sub>-niň inwersiýa egrisindäki nokada degişli bolanda alyp bolýar. Mysal üçin, howa üçin T<sub>2</sub> = 293<sup>0</sup>K- de  $x_t$ -ň maksimal bahasy P<sub>2</sub> = 440 at bolanda alynýar. Wodorod üçin T<sub>2</sub> = 80<sup>0</sup>K- de (suwuk azot bilen sowadylma) P<sub>2</sub>=157 at optimal bolýar, bu hem tejribede yönekeý drosselirleme aýlawy boýunça wodorody suwuklandyrmak üçin amala aşyrylýar.

Geliý üçin Zermanow tarapyndan alynan maglumatlar boýunça, T<sub>2</sub> = 15<sup>0</sup>K (suwuk wodorod bilen sowatmak) hasaplap, P<sub>2</sub> = 31at optimal bahany alarys.

(10-2) deňlemede ( $i_a - i_f$ ) entalpiýalaryň tapawudy doly suwuklanmagy üçin gazdan alyp gidilmeli ýylylyk mukdaryna degişli bolýar; T-S diagrammada ol a e f n k a meýdan bilen aňladylýar. Bu ýylylyk mukdary gazyň tebigatyna we başlangyç T<sub>2</sub> temperaturasyna bagly bolýar.

Suwuklandyrylan gazyň agram birligine sarp edilen energiýa aşakdaky formula laýyklykda hasaplanýar:

$$L_{iz} = \frac{kT_2}{x_T} \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (10-3)$$

Real aýlaw üçin suwuklandyryma koeffisienti kesgitlenende Q<sub>n</sub>-nedorekuperasiýa we Q<sub>ds</sub> - ýitgisini hasaba almak zerur bolýar.

Bu ýagdaýda:

$$x_k = \frac{\Delta i_T - Q_n - Q_{d.s}}{(i_a - i_f) - Q_n} \quad (10-4)$$

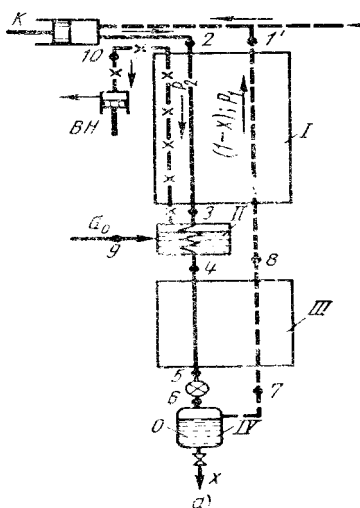
$(i_a - i_f) \gg Q_n$  bolany üçin (10-4) deňlemäni aşakdaky görnüşde bermek bolar:

$$x_k = \frac{\Delta i_T - Q_n - Q_{d.s}}{(i_a - i_f)} = \frac{(i_a - i_b) - Q_n - Q_{d.s}}{i_a - i_b} \quad (10-5)$$

Gysylma işini kompressoryň izotermiki p.t.k hasaba alyp kesgitlenilýär.

### **3.4. Wodorody suwuk azadyň üsti bilen daşky suwuklandyrmagyň netijesinde suwuklyga öwrülmeginiň shemasy**

Öňürti sowadylmaly drosselirleme usuly bilen wodorody suwuklandyrmaklygyň shemasyna serediliň. 3.3-njy suratda gaz görnüşli wodorod kompressorda  $P_2$  basyşa çenli izotermiki gysylýär we I-ýylylyk çalşyja düşýär, ol ýerde hem  $T_3$  temperatura çenli sowaýar. Soňra wodorod öňürti sowadylma II wanna gelýär we  $T_4$  temperatura çenli sowaýar. III ýylylyk çalşygyda temperaturanyň ýene-de peselmegi bilen  $P_1$  basyşa çenli drosselirlenmesi (5-6 proses)

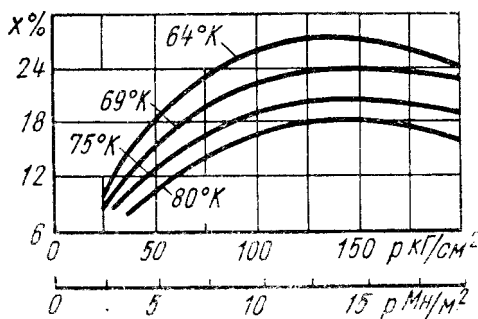


**Surat 3.4. Wodorody drosselirleme usuly bilen suwuklandyryjynyň shemasy.**

IV gapda  $x$  mukdarda suwuklygy almaga mümkinçilik berýär. Suwuklyk siklden alynyp gidilýär, galan  $(1-x)$  buglar bolsa ters akym bilen III we I ýylylyk çalşygyda göni akymy sowadyp geçip gidýär.

Bu usul bilen wodorody  $H_2$  suwuklandyrmak üçin  $T_4 < T_{inw}$  ( $T_{inw} = 204,6^0K$ ) temperaturany almak zerurdyr. Öňürti sowadylma  $T_4$  temperatura näçe pes boldugyça,  $x$  suwuklandyryjy koeffisient şonçada uludyr, diýmek, aýlawyň ykdysady görkezijisi şonça uludyr. Şeýle hem  $x$  ululyk  $P$  basyşdan hem baglydyr (17 surat). Bu ýerden görnüşi ýaly

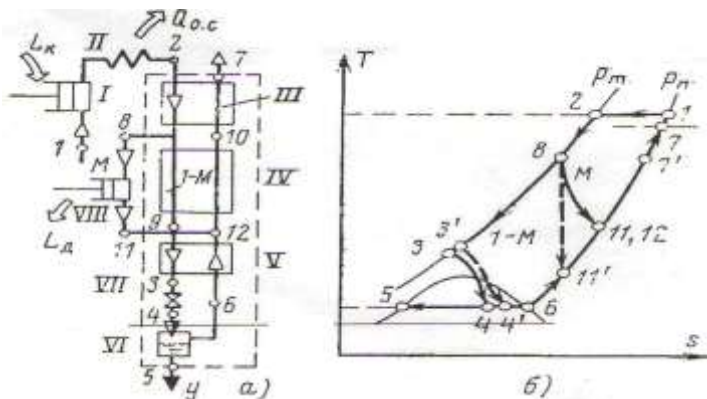
basyş  $P_2 = 12 \div 14 \text{ Mn/m}^2$ -dan uly bolmaly däl,  $T_4$  temperatura bolsa mümkin boldugyça pes bolmalydyr.



**Surat 3.5. Suwuklandyrma koeffisientiniň öňürti sowadylma temperaturasyndan baglylygy.**

Gaýnaýan suwuklykly wannada basyşy peseltmek usuly bilen (buglary wakuum nasos bilen çekip almak bilen) has pes temperaturany üpjün etmek mümkindir. Azodyň uçeldilen nokadynyň temperaturasy 63,2°K deňdir, bu bolsa suwuk azot bilen öňurti sowadylmanyň aňryçak derejesi bolup durýandyr. Basyşy ondan aşak peseltmek suwuklygyň gatamagyna getirýär, bu bolsa ýylylyk çalşyjyda buz bilen diwaryň arasynda bug gatlagynyň bar bolmagy sebäpli, wodorod bilen ýylylyk çalşygynyň mese-mälim peselmegine getirýär.

Gaz adiabatiki ýagdaýda giňeldilende peýdaly iş ýerine ýetirilýär, şeýlelik-de gazyň temperaturasy drosselirlenme hadysasy bilen deňeşdirilende has aşak peselýär. Bu prinsip Klodyň siklinde ulanylýar, şonuň üçin hem Klodyň sikli Lindäniň siklinde görä effekti ýokarydyr (surat 3.5).



59

Gysylan gaz I kompressoryň we II sowadyjynyň üsti bilen geçip III ýylylyk çalyşyja gelýär, ol ýerde giňelen gazyň ters akymy, bilen sowadylýar (nokat  $T_8$ ); soňra gaz iki akyma bölünýär. Gazyň (1-M) bölegi IV, V ýylylyk çalyşyjalaryň üsti bilen geçip soňra basyşa deňiş drosselirlenýär. Göni m akymyň M bölegi detandriň üsti bilen geçýär we IV ýylylyk çalyşyjyda gazyň (1-M) mukdaryny goşmaça sowadýar.

Klodyň L-ulgamynyň energetik balansynyň deňlemesi:

$$i_2 + q_{iz} = y i_5 + (1-y) i_7 + M \Delta i_d;$$

$$y = \frac{\Delta i_T - \Delta i_H + M \Delta i_d - q_{iz}}{q_{oj} - \Delta i_H}$$

$M \Delta i_d$  – detanderiň sowuklyk öndürjiligi.

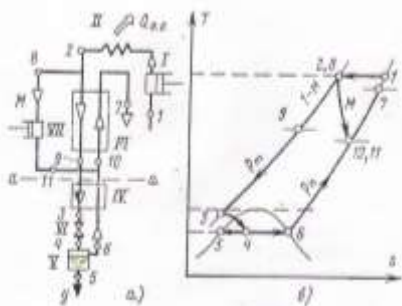
Klodyň kwazisikliniň peýdaly täsir koeffisienti

$$\eta = \frac{y(l_5 - l_1)}{(l_5 - l_1) / \eta_{iz,k} \eta_{em,k} - M \Delta i_d \eta_{em,d}}; (6)$$

$$l_5 - l_1 = i_2 - i_1 - T_{d.s.}(S_1 - S_2);$$

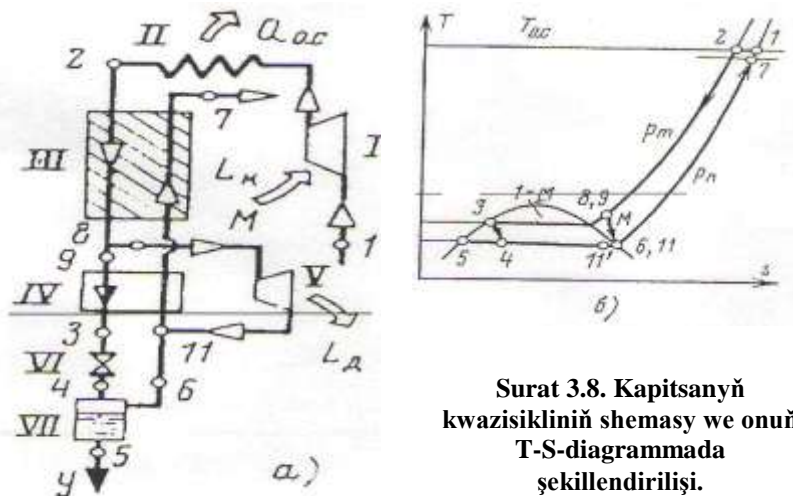
Detanderiň kömegi bilen gaz giňelýär we temperaturasy peselýär (içki sowadyлма).

### 3.6. Geýlandtyň Kapissanyň L- ulgamlary



**Surat 3.7 . Geýlandtyň kwazisikliniň shemasy we onuň T, S – diagrammada şekillendirilişi.**

. Shemada görnüşi ýaly, 20 MPa çenli gysylan howa sowadyjydan soňra deňçäk iki bölege bölünýär. M mukdardaky gaz detandere, beýleki bölegi ýylylyk çalşyja gelýär. Geýlandtyň ulgamynda  $T_{2-7} = 10\text{ K}$ .



**Surat 3.8. Kapitsanyň kwazisikliniň shemasy we onuň T-S-diagrammada şekillendirilişi.**

Klodyň, Geýlandtyň, Kapisanyň ulgamyny deňeşdiremizde, olaryň hemmesi gazlaryň suwuklanmak hadysasynyň şol bir modifikasiýasy bolup, detanderlerde gazlaryň içki sowadylmagyna esasanandyr. Geýlandtyň sikli gysylan gazyň ýokary basyşy we detanderiň üstinden geçýän gazyň mukdary, gazyň umumy mukdaryny 50 % bilen häsiýetlendirilýär. Kapitsanyň sikli bolsa tersine, gysylmanyň pes basyşy bilen we detanderdäki gaz böleginiň mukdary gazyň umumy mukdarynyň 92-95 % bilen häsiýetlendirilýär. Klöguň sikli aralyk ýagdaý bilen häsiýetlendirilýär.

Gelini suwuklandyryjy desgalarda detanderleriň ulanylmasy, gelini suwuk wodorod bilen aralyk sowadylma prosesini aradan aýyrmaga mümkinçilik berýär, bu bolsa desgany partlama howpundan halas edýär. Şoňa garamazdan pes temperaturada işleýän, porşenli maşynlary ýerine ýetirmek birnäçe tehniki kynçylyklara serewar bolýar. 1934-nji ýylda

P.L.Kapisa bu kynçylykdan üstun çykmak başardýar. P.L.Kapisa suwuklandyryjylaryň maksimal effektiwligini gazanmak üçin, gelini suwuklandyryjy siklde we olaryň işlejek temperatura derejesinde detanderleriň maksadalaýyk sany baradaky meselelere seredýär.

Keseki sowadyjy agentsiz siklde, otag temperaturasyndan 10-15K çenli drossel wentiline gelýän, gysylan geliniň akymyny sowatmak üçin, iň bolmanda iki detander gerek. Üçünji detanderi ulanylanda sowuklyk öndürilijiligi 40 % ýokarlanmaly, dördünjide ýene 20 %, onda aňlyk detanderiň sanyny köpeltmek maksadalaýyk bolmaýar. Tejribede köplenç 2-detander bilen çäklenýärler, ýöne dürli temperatura derejesinde işleýän, üç detander ulanylýan desgalar hem duş gelýär.

Tablisa 1

Detanderiň kömegi bilen suwuklandyryjy ulgamlarynyň  
görkezijileri  
(1kg suwuk howa görä)

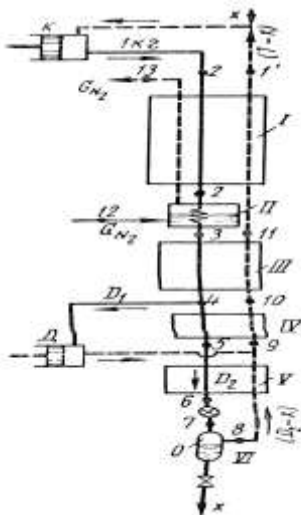
Sistema	Içki basyş $P_{m3}$ MPa	Suwuk howanyň möçberi y, %	Detandere howanyň berilmeli mukdary, M	Detanderiň önündäki T temperatura K	Işniň udel çykdajysy, kWt sag /kg	PTK, $\eta_e$
Ýokary basyş:						
Geyland	20,0	26	0,58	273-263	0,75-0,78	0,26-0,25
Klod-Geyland	16,0	22	0,62	253-248	0,78-0,81	0,26-0,24
Orta basyş:						
Klod	6,0	18	0,74	213-208	0,82-0,84	0,24-0,23
Klod	2,0	11	0,82	153-148	1,0-1,2	0,2÷0,16
Pes basyş:						
Kapis	0,6	6	0,9	113-111	1,40-1,45	0,14-0,13

Regeneratoryň ýyly tarapyndaky temperaturanyň tapawudyny 4 K-deň diýip kabul edilen  $\eta_{ad.k} = 0,8$ .

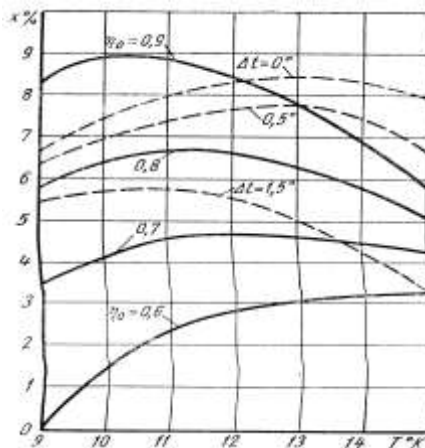


### 3.7. Kapisa-Kollinz desgasyňň shemasy. Detanderli gutarnykly sowadylma basgançakly suwuklandyryjy

Gelini suwuklandyrmagyň birnäçe usullaryny öwrenmek bilen detanderli aýlawlaryň birnäçe artykmaç taraplarynyň bardygyny belläp geçdik. Bilişimiz ýaly P.Kapisa 1934-nji ýylda detanderli geliy suwuklandyryjylaryny döretmegiň ideýasyny amala aşyrdy. Ol wodorod bilen öňurti sowadylma basgançagyny detander bilen çalşyryp, onuň netijesinde öran ýokary effektiň mümkinçiligini subut etdi.



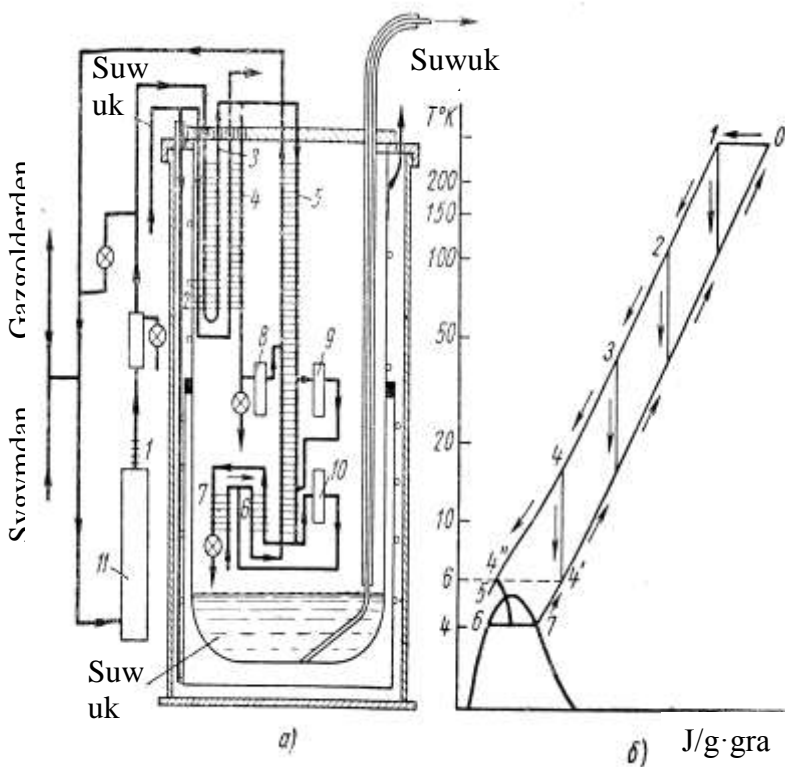
Surat 3.9. Detanderli  
gutarnykly sowadylma  
basgançakly  
suwuklandyryjynyň  
shemasy.



Surat 3.10. Detanderli aýlaw  
boýunça gelini suwuklandyrmak  
shemasy.

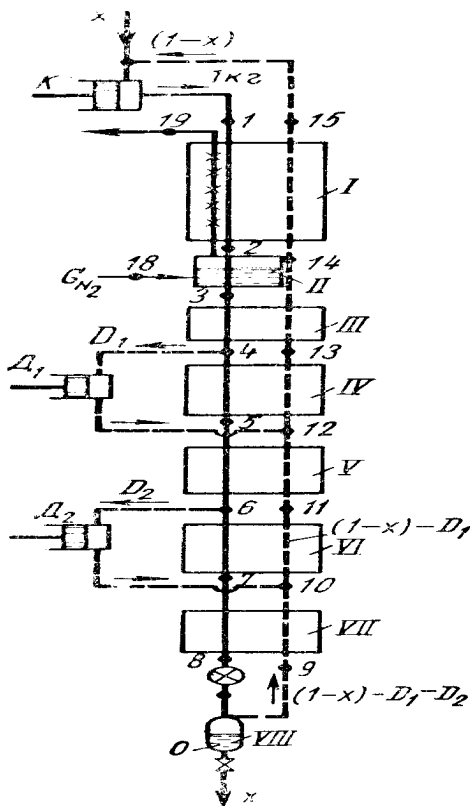
Soňra 3.10-njy suratda berilýän shemada azot wannasyny ikinji detander bilen çalşyryp, has kämil shemany hödürleýärler. Bu hili suwuklandyryjy P.Kapisa we J.Danilow

tarapyndan işlenip düzülýär. Bu ýerde daşky sowadyjy agentleri aradan aýyryp, gelini daşky çeşmelere garaşsyz suwuklandyrmak usuly has öndüriji bolup, özüniň artykmaç tarapyny subut edýär. Detanderli köp basgançakly suwuklandyryjylary ösdürmek ideýasynda örän uly goşant gosan S.Kollins, birnäçe desgalary işläp düzýär. Malim bolşy ýaly, sowadyjylaryň basgançagynyň sanyny artdyrmak ideal suwuklandyрма sikline düýpli golaýlaşmaga mümkinçilik berýär. Bu bolsa Kollinsiniň baş basgançakdan durýan shemasynyň özeni bolup durýar.



Surat 3.11. S.Kollins aýlawy boýunça gelini suwuklandyrmak shemasý.

Kollinsiň suwuklandyryjysynyň ýene bir warianty ol hem dört basgançakly sowadylmany özünde jemleýär (3.11. surat) azot wannasy, iki detander hem drosselirleme. Malim bplşy ýaly detanderiň sanynyň köpeldilmegi bilen, siklin häsiýetnamasy oňatlaşýar, ýöne onuň ygtybarlygy we ulanylmasy çylşyrymlaşýar.



Surat 3.12. Iki detanderli, öňürti sowadylmaly we drosselirlemeli aýlaw boýunça gelini suwuklandyrmak shemasy.

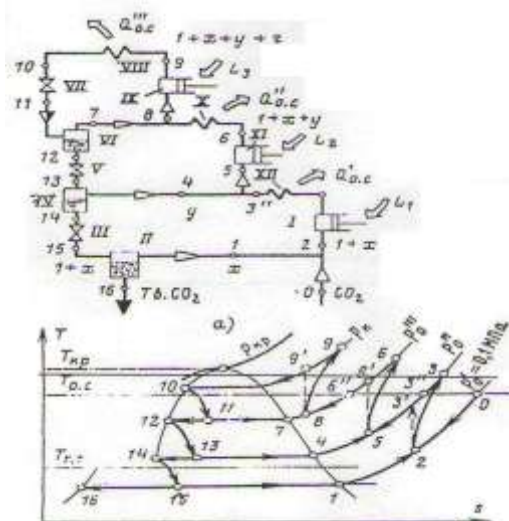
### 3.8. Gury buzyň (CO<sub>2</sub>) öndürlişi

Gury buzy öndürmekde bug görnüşli uglerodyň ikili okisi ulanylýar. CO<sub>2</sub> üçin çig mal hökmünde tüsse gazy ulanylýar.

Bug görnüşli CO<sub>2</sub> P = 0,1 MPa basyşly sowadyjy desga girýär (0 nokat) Soňra 1 nokadyň ýagdaýyny häsiýetlendirýän gury buzyň II generatoryndan çykýan bug görnüşli CO<sub>2</sub> bilen birleşip, iki nokady häsiýetlendirýän (1+x) mukdardaky garyndy emele gelýär.

Bu garyndy aşaky basgançakly I kompressora barýar we gysgalmak bilen basyşy P<sub>0''</sub> = 0,6÷0,65 MPa çenli ýokarlanýar.

Bu basyş üçler nokadynyň P<sub>T1T0</sub> = 0,53 MPa basyşyndan ulydyr. 3 nokady häsiýetlendirýän gysylan gaz I kompressordan çykyp XII sowadyja barýar, Q<sub>d.c.</sub> ýylylyk akymyny daşky sreda bermek bilen, onuň temperaturasy T<sub>3</sub> - den T<sub>3''</sub> - e çenli peselýär.



Surat 3.12 . Uglerodyň ikili okisiniň gaty hilini öndürmek üçin üç basgançakly drossel desganyň shemasy.

Soňra 4 nokady häsiýetlendirýän şol bir basyşly IV aralyk gapdan gelýän bug görnüşli gaz bilen birleşip  $(1+x+y)$  mukdardaky garyndy emele gelýär.

5-nji nokady häsiýetlendirýän bug erginleri orta basgançakly XI kompressora barýar we  $P_o'''$  basyşa çenli gysylýar.  $P_o''' = \sqrt{P_o'''} \cdot P_k$

$P_k$  - kondensatordaky basyş.

6-njy nokady häsiýetlendirýän, gysylan bug XI kompressordan soň X sowadyjynyň üstünden geçip, daşky sreda ýylylygynyň berilmegi netijesinde, onuň temperaturasy  $T_6$ -dan  $T_6''$  -çenli sowaýar.

XII we X sowadyjylarda  $CO_2$  -niň buglary sowuk suwuň kömegi bilen sowadylýar. X sowadyjydan soňra  $CO_2$  bugy, aralyk VI gapdan gelýän, 7-nji nokady häsiýetlendirýän degişli basyşdaky  $CO_2$  bugy bilen garyşyp, 8-nji nokady häsiýetlendirýän  $(1+x+y+z)$  mukdardaky garyndyny emele getirýär. Bu garyndy ýokary basgançakdaky IX kompressorda  $P_k$  basyşa çenli gysylýar.

Kompressordan soňra 9 nokady häsiýetlendirýän gysylan bug VIII kondensatora gelýär we daşky sreda ýylylygyny bermek bilen sowaýar hem-de suwukluga geçýär.

Suwuk  $CO_2$  kondensatordan soňra, ýokary basgançakdaky VII drossel wentile gelýär. Wentilden soňra  $P_o$ , basyşly  $CO_2$ , 11 nokady häsiýetlendirýän iki fazaly garyndydan, ýagny suwuk (nokat 12 ) we bug (nokat 7) halyndaky  $CO_2$ -dan ybaratdyr.

Bu garyndy VI aralyk gapda, IX kompressora barýan buga we V drossel wentile gelýän suwuklygy dargaýar. Wentilden (V) soňra emele gelen iki fazaly garyndynyň bug halyndakysy XI kompressora barýar, suwuklyk bolsa aşak basgançakdaky III drossel wentiline barýar. Suwuklyk (14 nokat) wentilden soňra bugdan we gaty jisimden durýan iki fazaly garynda öwürlýär. Bu garyndy gury bugyň generatoryndan (II) fazalara bölünýär. Uglerodyň ikili okisiniň gaty halyndakysy (16 nokat) gury buz görnüşinde wagtly-

wagtynda generatorndan çykarylyp durýar. Bug görnüşli CO<sub>2</sub> (1 nokat) aşak basgançakdaky kompressora (I) barýar.

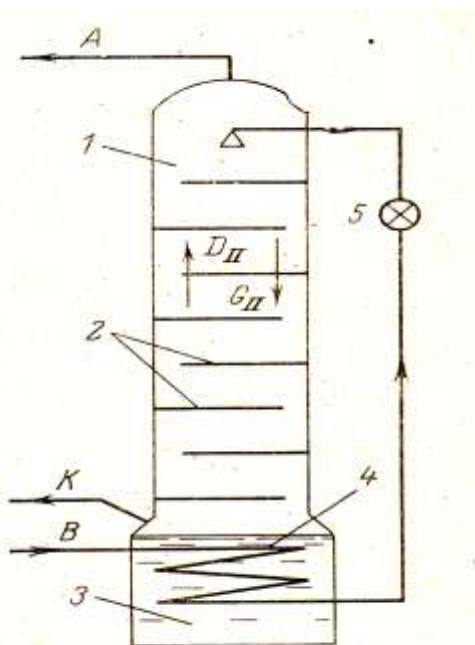
Gaty CO<sub>2</sub> buz genaratorynda gaz görnüşinde bolýar, şonuň üçin ony basyjy porşeniň kömegi bilen has gaty görnüşe getirýär, dykzlygy 1400-1500 kg /m<sup>3</sup> bolup, agramy 10 klogramdan 100 kg çenli bolýar.

## BAP IV. D-suwuk gaz garyndylary bölüji ulgamlar

### 4.1. Bir tapgyrly rektifikasiýa

Islendik tapgyrly derejesinde rektifikasiýa prosesini amala aşyrmak bugarma üçin  $Q_b$  ýylylygy bermek we kondensasiýa wagtynda ýylylygy  $Q_K$  alyp gitmek zerurlygy bilen baglydyr.

Eger kolonnadaky temperatura  $T$  daşky sredanyň  $T_{ds}$  temperaturasyndan uly bolsa ( $T > T_{ds}$ ), onda ýylylygy bermek we ony alyp gitmek, doýgun ýa-da aşagyzyrylan suw buglary we sowadyjy suw ulanmak bilen amala aşyrylýar.



Surat 4.1. Bir tapgyrly rektifikasiýa kolonnasy

Pes temperaturanyň şertlerinde ( $T < T_{ds}$ ) garyndyny bölmekde hil taýdan başgaça ýagdaýlarda syn etmek bolýar. Bu ýagdaýda ýylylyk çalşygy örän uly.  $\Delta T$ -de (temperatura natorynda) bolup geçýändigini üçin, daşky sredadan bugarma üçin ýylylyk berme mümkin bolsada, ol örän uly ýitgi bilen alynyp barylýar. Bu ýitginiň öwezini dolmak üçin goşmaça energiýa talap edilýär.  $T_K < T_{ds}$  bolany üçin  $Q_H$  ýylylygy daşky sreda bermek mümkin däl. Şonuň üçin bugarma we kondensasiýa prosesini amala aşyrmak üçin degişli kriogen üpjünçiligi talap edilýär (daşky, içki we kombinirlenen sowadyjy aýlawlary ulanmak). Munuň bilen bagly bolan konstruktiv we shemalaýyn çözgütleriň aýratynlyklary garyndany pes temperaturada bolmek apparatlaryny  $T > T_{ds}$ -de işleýän rektifikasiýa kolannadan tapawutlandyryýar.

Pes temperaturaly bölüji apparatyň görnüşi onuň niýetlenişine görä kesgitlenýär. Garyndydan komponentleriň birini almaly zerurlygy bolanda konsentrasion ýa-da otgonnaýa kolonna ulanylýar. Bir wagtda iki komponenti almaly bolanda konsentrasion bilen birlikde otgonnyý seksiýany özünde jemleýän apparatlarda amala aşyrmak bolar.

Ondan başga-da birtapgyrly we iki tapgyrly rektifikasiýa apparatlary bardyr. Iki tapgyrly rektifikasion apparatlarda iki kolonnany ulanmak göz önünde tutulýar. Olar önürti we gutarnykly bölünme kolonnalarydyr.

Suratda Linde tarapyndan işlenip düzülen, howadan kislorody almak üçin, işlenip düzülen, howadan kislorody almak üçin, birtapgyrly rektifikasiýa apparatynyň shemasy görkezilen.

Bölünme prosesi otgonnyý kolonna mahsus bolan  $G > D$  şertde amala aşyrylýar. Apparat icinde 2 tarelkalar ýerleşdirilen 1 silindrik korpusdan we 4 ýylylyk çalşyjy ýerleşen 3 kubdan durýar. Rektifikasiýa kolonnadaky we bölümiň desgadan çykyş ýolundaky gidrawlik basyşyn ululygyça atmosfera basyşyndaky uly bolan  $P_K = 0,12 \div 0,14$  MPa basyşda amala aşýar. Önürti garyndylardan arassalamak,



sowadylan we  $P_h$  basyşa çenli gysylan howa ýylylyk çalşyja berilýär, ol ýerde öz ýylylygyny kubda gaýnaýan kisloroda berip, suwuklanýär. Şeýlelikde ýylylyk çalşygy kondensator-bugardyjy bolup hyzmat edýär, ýagny howa kondensirlenýär we bir wagtyň özünde kub suwuklygy (kislorod) bugardýär. Suwuklandyrylan howa ýylylyk çalşygydan çykyp, 5 dresselden geçip öz basyşyny  $P_n$ -dan  $P_k$  çenli peseldýär, we ýokarky tarelkany suwarmaga düşýär.

Suwuklyk kolonna boýunça aşak akyp, kisloroddan baýlaşýar we kubda  $Y_k$  berlen konsentrasiýa ýetýär. Tarelkalaryň sanyny köpeldir, ýokary derejeli arassa kislorody almak bolýär.

Apparatyň ýokarky böleginden alyp gidilýän bug, teoretiki taýdan  $Y_A^R$  konsentrasiýa eýedir ol ýokarky tarelka düşýän suwuk howa bilen deňagramlydyr, bu bolsa  $P_K = 0,13\text{MPa}$  bahasynda 93,4 %  $N_2$  düzýär.

$y_K$  düzümlü alynan kislorodyň mukdary bu ýagdaýda maksimal bolar:

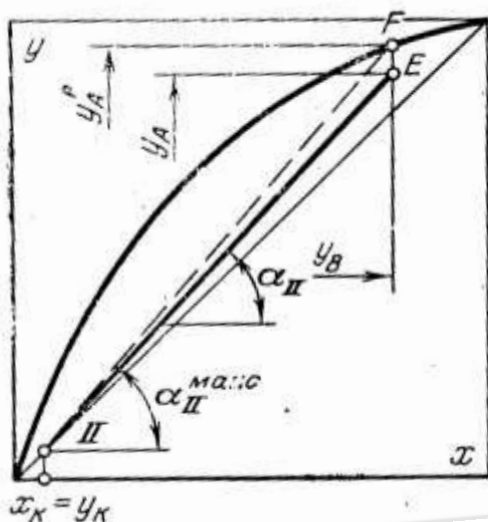
$$K_{\max} = B \frac{y_A^R - y_B}{y_A^R - y_K} \quad (1)$$

we aýyrmak  $\beta$  koeffisientiniň iň uly bahasy (74-75 %) degişli bolýar, ol:

$$\beta = 100 \frac{K(1 - y_K)}{B(1 - y_B)} \quad (2)$$

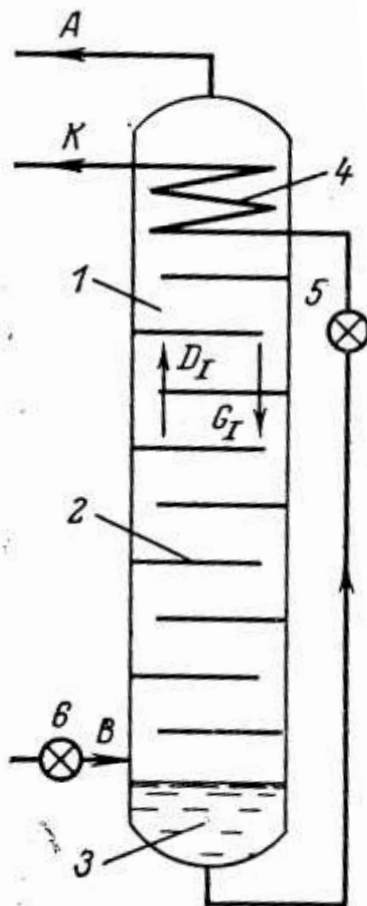
formula bilen hasaplanýär.

Apparatyň seredilýän režimine sur 2.  $x = y_B$  abssissaly F nokatda deňagramlyk egrisini kesip geçýän II-F işçi çyzyk degişli bolýär. Alynýän buguň göwrümleýin mukdary  $Y_A$  deňagramlykdakysyndan 2-4 % (F - nokat) pes bolýar we adatça 89-92 %  $N_2$  bahadan artmaýar.



**Surat 4.2. Alynýan bugyň göwrümleýin mukdarynyň suwuklandyryjy koeffisienden baglylygy.**

Şeýlelik bilen, otgonnaýa kolonna režiminde işleýän bir tapgyrly rektifikasiýa apparatynda diňe 60-65-deň uly bolmadyk  $\beta$  aýyrma koeffisienti ýokary gaýnaýan komponent (kislorod) arrasa görnüşinde almak bolar, oniň  $\frac{1}{3}$  düzümi howada zyňylýan azot bilen ýityär. Howanyň pes gaýnaýan ýokary konsentrasiýaly komponentini (azody) almak üçin konsentrasion kolonna ( $D_1 > G_1$ ) ulanylýär, onuň shemasy 3-suratda görkezilýär.



**Surat 4.3. Azoty almak üçin bir tapgyrly  
rektifikasion kolonnanyň shemasy.**

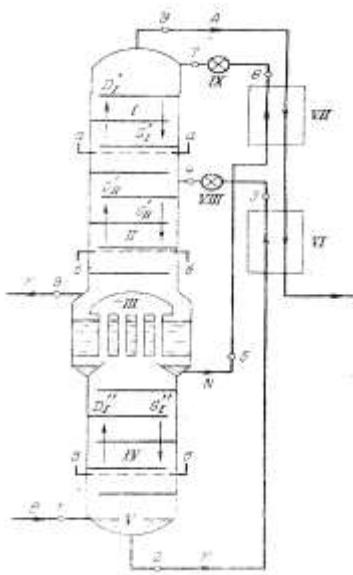
#### **4.2. Iki tapgyrly rektifikasiýa**

Howany doly bölmäge niýetlenen, has kâmil apparatlaryň görnüşine, 1907-nji ýylda K.Linde tarapyndan işlenilip düzülen iki tapgyrly rektifikasiýa apparaty degişlidir

(4-nji surat). Ol aralygynda kondensator-bugardyjy III ýerleşdirilen iki kolonnadan ybaratdyr.  $P_a = 0,55 \div 0,6$  MPa basyşda işleýän, ýokary basyşly IV aşaky kolonna 3 suratda görkezilen azot üçin bir tapgyrly rektifikasiýa kolonnasyna meňzeşdir.

Konsentrasiýa I we otgonnyý II seksiiýany özünde jemleýän pes basyşly ýokarky kolonna  $P_n = 0,13 \div 0,14$  MPa basyş astynda işleýär.

Howa doýgun buguň ýagdaýyna golaý görnüşde V kuba berilýär, ol ýerde hem onuň azota we (36-39 %) ýokary düzümlü kislorodyň kub suwuklygyna öňürti bölünmesi amala aşyrylýär.



**Surat 4.4. Iki tapgyrly rektifikasion kolonnanyň shemasy.**

Aşaky kolonnanyň ýokarky tarelkasyndan göterilýän azodyň buglary kondensator-bugardyja düşýärler, ol ýerde gaýnaýan kisloroda öz  $Q_K$  ýylylygyny berip, doly kondensirlenýärler. Emele gelen suwuk azodyň bir bölegi ýörite ýygnaýja (jubilere) akyp düşýärler, ol ýerden VII azot flegmasyny sowadyjynyň we IX drossel wentiliniň üsti bilen ýokarky kolonnany suwarmaga berilýär.

Beýleki bölegi aşaky kolonna dolanyp barýar. Azot flegmasynyň konsentrasiýasy HGD (BPY) niýetlenişine görä 95 %  $N_2$  - den we ýokary aralykda

üýtgap dürli-dürli bolup bilýär.

Kub suwuklyga VI sowadyjydan soň  $0,13 \div 0,14$  MPa çenli drosselirlenýär we ýokarky kolonnanyň araky bölegine düşýär. N azot flegmanyň we R kub suwuklygynyň mukdary aşaky kolonnanyň material balansynyň deňlemesinden kesgitlenilýär:

$$N = B \frac{y_1 - x_2}{x_5 - x_2} \quad (1)$$

$$R = B - N \quad (2)$$

bu ýerde:  $y_1$ ,  $x_2$  we  $x_5$  howanyň konsentrasiýasy (1-nokat), kub suwuklygy (2-nokat) we daşky gaýnaýan komponent (azot) boýunça azot flegma (5-nokat).

Ýokarly kolonnada ýokardan alyp gidilýän, gaz görnüşli azoty almak bilen howanyň we kondensator-bugardyjydan alynýan gaz ýa-da suwuklyk görnüşli kislorodyň gitarnykly bölünmesi amala aşýär.

Kislorodyň bir bölegi bug görnüşinde tarelka boýunça akýan flegma garşy kolonna boýunça göterilýär. Azodyň  $y_A = y_9$  (9 nokat) we kislorodyň  $y_k = y_8$  (nokat 8) belli bolan konsentrasiýalarynda A we K önümiň mukdary ähli apparat üçin massalaryň balansynyň deňlemesinden tapylýär:

$$K = B \frac{y_9 - y_1}{y_9 - y_8} \quad (3)$$

$$A = B - K \quad (4)$$

### 4.3. Deýteriy gazynyň alynyşy

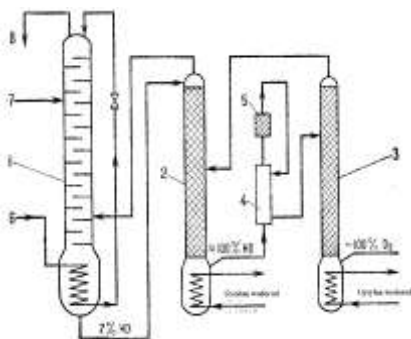
Kriogen tehnikasynyň ulanylyşynyň möhüm ulgamlarynyň biri kadaly gaz görnüşli izotoplaryň pes temperaturalara bölünmesidir.

Neýtronlary haýallandyryjylar ýadro reaktorlarynyň zerur elementidir. Iň oňat haýallandyryjy  $-D_2O$  agyr suwdyr. Uglerodyň, berilliniň, suwuň we agyr suwuň haýallandyryjy koeffisientleri degişlilikde 169; 160; 67 we 5820 deňdirler.

Atom massasy 1,008 bolan tebigy wodorod iki sany kadaly izotopyň garyndysyndan: massa sany 1 bolan H wodoroddan we massa sany 2 bolan D deýteriyden durýar. Bu izotoplar wodorodda 6400:1 gatnaşykda saklanýarlar, ýagny başlangyç garyndynyň  $10^6$  atomyna deýteriniň 150 atomy düşýär. Hakykatdan wodorod  $H_2$  we HD molekulalaryň 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 deňişlilikde 20,38 we 22,13 K deňdirler. Kolonnada basys 0,15 MPa bolanda bu garyndynyň bölünme faktory takmynan 1,505 deňdir, bu bolsa onuň ýeretlik takyk bölünmesi bilen deýteriň 90 % çykarylmasyny üpjün edýär. Başlangyç gazy ( $H_2$ ) garyndylardan öňürti oňat arassalanyp berilende rektifikasion kolonnanyň üznüksiz iş dowamlylygy 8000 sag (1 ýyla golaý) ýetýär. Wodorod boýunça  $1000 \text{ m}^3/\text{sag}$  öndürilijligi bolan desga kadada işlände arassalygy 99,8 % bolan deýteriniň bir ýylda  $1080 \text{ m}^3$  mukdaryny berýär.

Rektifikasion kolennada alynan HD konsentratyň soňraky ýakylmasy we ( $H_2O$ ,  $D_2O$ ) garyndynyň rektifikasiýasy deýteriniň uly ýitgisine getirmeyär, ýagny, her bir  $1000 \text{ m}^3/\text{sag}$  tebigy wodoroda, bir ýylda 970 kg.  $D_2O$  almak bolar. Elbetde, bu hili usul bilen deýterini almak, deýteriy aýrylansoň, ammiagy, metanoly sintez etmek üçin esasy çig mal hökmünde ulanylýan arzan wodorodyň kuwwatly çeşmelerini talap edýär.

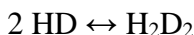


**Surat 4.5. Deýterini bölüp almak üçin desganyň shemasy.**

1-2-3-rektifikasion kolonnalar, 4-ýylyk çalşygy, 5-reaktor, 6-sirkulyasion wodorod, 7-bölünmäge berilýän wodorod (0,03 % HD), 8- sarp edija berilýän wodorod (0,03 % HD).

Russiýada pes temperaturalary rektifikasiýa usuly bilen wodoroddan deýeterini almak üçin senagat desgasy döredilýär.

Rektifikasiýa ulgamynda pes temperaturalar tehniki 80 K derejeden (suwuk howanyň rektifikasiýasy) 20K derejä (suwuk wodorodyň rektifikasiýasy) geçdi, bu bolsa birnäçe täze we çylşyrymly meseleleriň çözügüdini talap edýär. Garyndy ( $H_2$ , HD) yzygider birikdirilen kolonnalaryň seriýasynda (surat 4.5) rektifikasiýa täsirine sezerar edilýär. Başlangyç gaz doýgun temperatura çenli öňürti sowadylýar we 1 kolonnanyň ortaky bölegine düşýär. 1 kolonnany suwarmak üçin flegma bolup 1 kolonnanyň yylanjygyndan geçýän sirkulýasion ýokary basyşly  $H_2$  hyzmat edýär, ol 1 kolonnadan geçip suwuklanýar we onuň ýokarky bölegine 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 % ýetýär. Alynan konsentrat 2 rektifikasion kolonna ugradylýar, bu kolonnanyň aşaky önümi-arassa HD, HD-ň, köp mukdaryny özünde saklaýan ýokarky önüm HD-ni doly aýyrmak üçin 1 kolonna gaýdyp gelýär. Arassa HD 2 kolonnanyň kybundan aýrylýar, 4 ýyllyk çalşyjyda gyzdrylýar, soňra



reaksiýa boýunça dargatmak üçin 5 reaktora ugradylýar.

Alynan 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. Alynan  $D_2$  arassa  $O_2$  bilen ýakylanda arassa agyr suw alynýar.

Gurluşyň iň uly desgasy gazyň uly akymlyry iberilýän birinji rektifikasion kolonnadyr, kolonnalaryň ölçegleri has kiçidir. 1kg  $D_2O$  hasaplananda sarp edilýän elektroenergiýa 12000-18000MJ deňdir. Deýterini almak üçin häzirki zaman gurluşlarynyň öndüriljiligi bir ýylda  $D_2O$ -nyň 5-15T berýär.

## **Edebiýatlar:**

1. Türkmenistanyň Konstitusiýasy. Aşgabat, 2008.
2. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. I tom. Aşgabat, 2008.
3. Gurbanguly Berdimuhamedow. Ösüşiň täze belentliklerine tarap. Saýlanan eserler. II tom. Aşgabat, 2009.
4. Gurbanguly Berdimuhamedow. Garaşsyzlyga guwanmak, Watany, Halky söýmek bagtdyr. Aşgabat, 2007.
5. Gurbanguly Berdimuhamedow. Türkmenistan – sagdynlygyň we ruhubelentligiň ýurdy. Aşgabat, 2007.
6. Türkmenistanyň Prezidenti Gurbanguly Berdimuhamedowyň Ministrler Kabinetiniň göçme mejlisinde sözlän sözi. (2009-njy ýylyň 12-nji iýuny). Aşgabat, 2009.
7. Türkmenistanyň Prezidentiniň «Obalaryň, şäherleriň, etrapdaky şäherçeleriň we etrap merkezleriniň ilatynyň durmuş-ýaşaýyş şertlerini özgertmek boýunça 2020-nji ýyla çenli döwür üçin» Milli maksatnamasy. Aşgabat, 2007.
8. «Türkmenistany ykdysady, syýasy we medeni taýdan ösdürmegiň 2020-nji ýyla çenli döwür üçin Baş ugry» Milli maksatnamasy. «Türkmenistan» gazetiniň, 2003-nji ýylyň, 27-nji awgusty.
9. «Türkmenistanyň nebitgaz senagatyny ösdürmegiň 2030-njy ýyla çenli döwür üçin Maksatnamasy». Aşgabat, 2006.
10. Тихонов Б.С., Бабакин Б.С. «Массообмен при хранении замороженных продуктов». М.: МГУПБ, 2003 г.
11. Рогов И.А., Бабакин Б.С., Выгодин В.А. «Электрофизические методы в холодильной технике и технологии». М.: Колос, 1996 г.
12. Бабакин Б.С., Тихонов Б.С., Юрчинский Ю.М. «Совершенствование холодильной техники и технологии» 1992 г.



13. Малкова М.П. «Вопросы глубокого охлаждения». Москва. 1961 г.
14. Герш С.Я. «Глубокое охлаждение». Москва, 1985.
15. В.М.Бродянский, А.М.Семенов «Термодинамические основы криогенной техники». Москва. Энергия, 1980 г.
16. В.Г.Фастовский, Ю.В.Петровский. А.Е.Ровинский «Криогенная техника». Москва. Энергия, 1967 г.
17. Е.И.Микулин «Криогенная техника». Издательство «Машиностроение», Москва 1969 г.
18. В.А.Григорьев, Ю.И.Крохин «Тепло и массообменные аппараты криогенной техники». Москва Энергоиздат 1982 г.

## Mazmuny:

<b>Giriş.....</b>	<b>7</b>
<b>BAP I. Pes temperaturalary ulanmak.</b>	
1-1. Sowadylmanyň temperatura ulgamlary.....	9
1-2. Aram sowadylma tehnikasy.....	9
1-3. Çuň sowadylma tehnikasy.....	10
1-4. Gaz gazyndylarynyň bölünişi.....	11
1-5. Gazlary suwuklandyrmak.....	15
1-6. Kriogen tehnika.....	17
<b>BAP II. Pes temperaturalar tehnikasy</b>	
2-1. Umumy maglumatlar.....	19
2-2. Käbir termodinamiki gatnaşyklar.....	20
2-3. Sowuklygy almak.....	23
2.4. Kriogen ulgamlarynyň topagy.....	31
Drosselli gutarnykly sowadylma	
2.5. basgançakly (GSB) kriorefrižeratorlar.	
Lindenin prosesi.....	33
2.6. Drossel-ežektorly gutarnykly sowadylma	
basgançakly (GSB) kriorefrižeratorlar.....	37
Drosseli gutarnykly sowadylma basgançakly	
(GSB) we ýylylygy daşky sreda berýän önürti	
2.7. sowadylma basgançaklzy (ÖSB)	
kriofrežeratorlar.....	39
2.8. Gutarnykly sowadylma basgançagynda iki	
basgançagy bolan geliý refrižeratory.....	41
2.9. Detanderli gutarnykly sowadylma	
basgançakly (GSB) kriofrežeratorlar.....	44
2.10. Gazly sowadyjy aýlawlar.....	48
<b>BAP III. L-suwuklandyryjy we doňduryjy ulgamlar</b>	
3.1. Gazlary suwuklandyrmaklygyň we	
doňdurmaklygyň ideal hadysalary.....	50
Drosseli we drosseležektorly basgançakly	
3.2. gutarnykly sowadylma basgançakly	
suwuklandyryjylar.....	52

3.3.	Ýylylygy daşky sreda berýän öňürti sowadylma başgançakly (ÖSB) suwuklandyryjylar.....	54
3.4.	Wodorody suwuk azadyň üsti bilen daşky suwuklandyrmagyň netijesinde suwuklyga öwrülmeginiň shemasy.....	56
3.5.	Klodyň sikli.....	58
3.6.	Geylandtyň Kapitsanyň L- ulgamlary.....	59
	Kapisa – Kollinz desgasynyň shemasy.	
3.7.	Detanderli gutarnykly sowadylma başgançakly suwuklandyryjy.....	62
3.8.	Gury buzyň (CO <sub>2</sub> ) öndürlişi.....	65
<b>BAP IV. D-suwuk gaz garyndylary bölüji ulgamlar</b>		
4.1.	Bir tapgyrly rektifikasiýa.....	68
4.2.	Iki tapgyrly rektifikasiýa.....	72
4.3.	Deýteriň gazynyň alynyşy.....	74
	Edebiýatlar .....	77