



Q.F. KARIMOV

KRIOGEN TEXNIKASI

DARSLIK

**O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI
OLIV VA O'RTA MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI**

**ISLOM KARIMOV NOMIDAGI
TOSHKENT DAVLAT TEXNIKA UNIVERSITETI**

Q.F.KARIMOV

KRIOGEN TEXNIKASI

DARSLIK

**Toshkent
"Universitet"
2021**

Karimov Q.F. Kriogen texnikasi. Darslik.

–T.: “Universitet”, 2021. 188 bet.

UO‘K: 536.483(07)

KBK: 31.26ya7

K 25

Darslikda o‘ta past temperatura olishning fizik asoslari, kriogen mashinalarning ishlash prinsiplari, tuzilishi bayon qilingan. Kriogen mashinalarni xarakterlovchi kattaliklarni hisoblash tushuntirilgan. O‘zR Oliy va o‘rta-mahsus ta‘lim vazirligi tomonidan 5320300 – “Texnologik mashinalar va jixozlar (sovutish mashinasozligi)” bakalavriatura ta‘lim yo‘nalishi uchun darslik sifatida tavsiya etildi.

Taqrizchilar:

A.Aminjonov – “O‘zmetkombinat” aksiyadorlik jamiyati
kislород-kompressor tsex boshlig‘i

R.Rahmonov – “O‘zmetkombinat” aksiyadorlik jamiyati
O‘quv markazi boshlig‘i

S.G.Zokirov – Toshkent davlat texnika universiteti professori,
texnika fanlari doktori

O‘zbekiston Respublikasi Oliy va o‘rta maxsus ta‘lim vazirligining
2021-yil 23-noyabrdagi 500-sonli buyrug‘i bilan nashrga ruxsat berilgan.
Ro‘yxatga olish raqami 500-421.

ISBN: 978-9943-7884-9-7

© “Universitet” nashriyoti, Toshkent, 2021 y.

“Kriogen texnikasi” faniga kirish

Greklardan tarjima qilganda “krio” soʻzi sovuqlik, “genos” – tugʻilish maʼnolarini anglatadi. Hozirgi paytda kriogenika deyilganida sovuq texnikasi va texnologiyasini emas, balki ularning 120 K haroratdan past darajalarni olish yoki qoʻllash obʻastlari tushuniladi. Demak, kriogen texnikasi bu yer yuzi va unga yaqin kengliklarda mavjud boʻlmagan oʻta past haroratlarni olish va qoʻllash texnikasidir.

Kriogenikaning sanoat va ilm uchun muhim ahamiyati, uning yutuqlariga boʻlgan katta qiziqish hamda uning sohalarga tobora keng qoʻllanilayotganini quyidagilar bilan tushuntiriladi.

Birinchidan, sanoatning koʻpgina tarmoqlari (metallurgiya, ximiya, energetika, atom, aviatsiya, raketa-kosmik texnikalar, qishloq xoʻjaligi, tibbiyot, oziq-ovqat sanoati va boshqalar) tomonidan sanoat gazlari deb ataluvchi kislorod, azot, metan (tabiiy gaz), argon, vodorod, geliy, neon, kripton kabi turli gazlar isteʼmoli koʻpayib borayapti. Bu suyuq va gaz hollarda ishlatiluvchi gazlar kriogen obʻastlariga taalluqli past qaynash haroratlariga ega. Shu tufayli, ularni olish, qoʻllash, tashish, saqlash texnologiyalari kriogenika bilan bogʻliq boʻlib, kriogenikaning katta qismini tashkil qiladi.

Mamlakatimizda sanoat gazlarini ishlab chiqaruvchi yirik korxonalar «Oʻzmetkombinat», «Maxam-CHirchiq» zavodlari, «Navoiyazot», Olmaliq togʻ-kon metallurgiya kombinatlaridir. Birgina «Oʻzmetkombinat» AJning metallni eritish uchun kislorodga boʻlgan talabi yiliga 37440 m³ ni tashkil etadi. Kombinatni soʻnggi rekonstruksiya ishlarida oʻrnatilgan havo ajratish qurilmasi 10000 m³/soat gazsimon kislorod, 650 m³/soat suyuq kislorod, 2000 m³/soat gazsimon azot, 120 m³/soat suyuq argon olish imkonini bergan.¹

Birgina 2020 yilning iyul oyida Olmaliq togʻ-kon metallurgiya kombinati Toshkent va poytaxt viloyatidagi tibbiyot muassasalari uchun suyuq kislorodni olti marotaba koʻp – 296,19 tonna miqdorida yetkazib berdi. Avgust oyida Jizzax, Surxondaryo, Namangan, Samarqand viloyatlariga ham koronavirus infeksiyasi va pnevmoniyani davolash maqsadi uchun 1174,46 tonna suyuq kislorod yetkazildi.²

¹ <https://podrobno.uz/cat/economic/Y3metkombinatv3doxnetpolnojrydu/>

² <https://uzdaily.uz/ru/post/54913>

Ikkinchidan, past haroratlarda elektr qarshilik kamayadi va materiyaning o'ta o'tkazuvchanlik, o'ta oquvchanlik kabi xossalari namoyon bo'ladi. Hozirgi paytda energetika, asbobsozlikda, transport hamda texnikaning boshqa yangi, kelajagi porloq sohalarida elektr mashinalari va apparatlarining hamda o'ta o'tkazgichlarning chulg'amlarini juda past haroratlargacha sovutiladi. Yuqori haroratli o'ta o'tkazuvchanlik hodisasi ham kashf qilingan va 92÷98 K haroratlarda o'ta o'tkazuvchanlik holatiga o'tuvchi materiallar yaratilgan. Bu materiallarni amaliy qo'llanilishi prinsipial texnik yangiliklarga olib keladi.

Kriogenikaning muhim ahamiyatini tushuntiruvchi uchinchi faktor harorat pasayishi bilan entropiyani pasayishidir, boshqacha aytganda ichki "shovqinlarni" kamayishidir. Bu hodisalarning amaliy ahamiyati uzoq koinot radio aloqasi uchun, infraqizil va lazer texnikasida bebahodir. Shuni ham ta'kidlash kerakki, muzlatish, kondensatsiya va kriosorbsiya kabi past harorat jarayonlari mustaqil ahamiyatga ham ega, chunki ular o'ta yuqori vakuumga erishish vositalari hamdir. Bundan tashqari, biologik va tibbiy tadqiqotlardan ma'lumki, past haroratda tirik to'qima va biomateriallarning yangi muhim xossalari namoyon bo'ladi hamda biologiya, meditsina, qishloq xo'jaligining rivojlanishiga katta imkoniyatlar paydo bo'ladi. Va nihoyat, kriogen asbob va qurilmalar murakkab fizik tadqiqotlarni o'tkazish vositalari hamdir.

Shunday qilib, kriogen texnikasi, kriofizika, krioelektronika, kriobiologiya va kriomeditsina sovuqlik va uning qo'llanilishi haqidagi fanning muhim tashkil etuvchilaridir. Bu fan kriologiya deb ataladi.

Kriogenikaning tarixi fizika tarixi bilan, birinchi navbatda past harorat olish, gazlarni suyuqlantirish va past haroratlarda moddalar fizik xossalarini tadqiqoti bilan bog'liq. Shu bilan birga past haroratning amaliyotga doimiy keng qo'llanilishi kriogen texnikasi va texnologiyasining turli sohalarini shakllantirdi. XX asrning 60-yillarigacha harorat darajasi 70K gacha bo'lgan havo ajratish qurilmalari asosiy amaliy ahamiyatga ega bo'lgan. 60-yillardan boshlab harorat darajasi 4K bo'lgan vodorod va geliy sistemalarini ishlab chiqarish rivojlandi. 80-yillarda $\approx 1,8K$ harorat darajasida ishlovchi geliyli qurilmalar amaliyotga qo'llanila boshlandi. Tabiiy gazni (metan) suyuqlantirish, tashish va saqlash texnologiyasi muhim ahamiyat kasb etdi. Argon, neon va boshqa nodir gazlar iste'moli doimiy ortmoqda. Yangi samarador sistemalar yaratildi: elektr mashinalari va magnitlarning o'ta

o‘tkazuvchanlik chulg‘amlarini sovutish sistemalari; lazer va mazerlar sovutish sistemalari; past haroratli sorbsiya va rektifikatsiya usullari bilan gazlarni tozalash qurilmalari; yuqori vakuum hosil qiluvchi unumdor krionasoslar; krioxirurgik tibbiyot jihozlari va boshqalar. Yirik suyuqlantirish qurilmalari va kriogeneratorlar yaratilishi bilan birqatorda radio elektronika va hisoblash texnikasining taraqqiyoti miniatyur sovutgichlarni yaratishni taqozo etdi. Mikrocriogen texnikasi kriogenikaning mustaqil yo‘nalishiga aylandi. Kriogenika rivojining muhim bosqichlari [1] da ko‘rsatilgan.

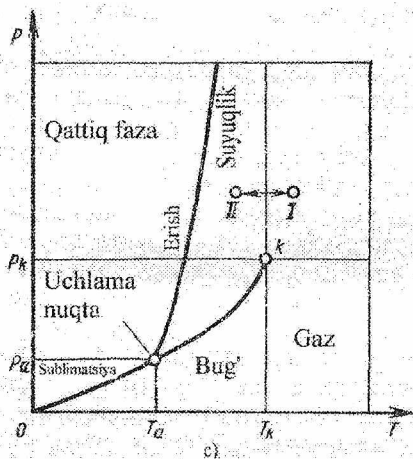
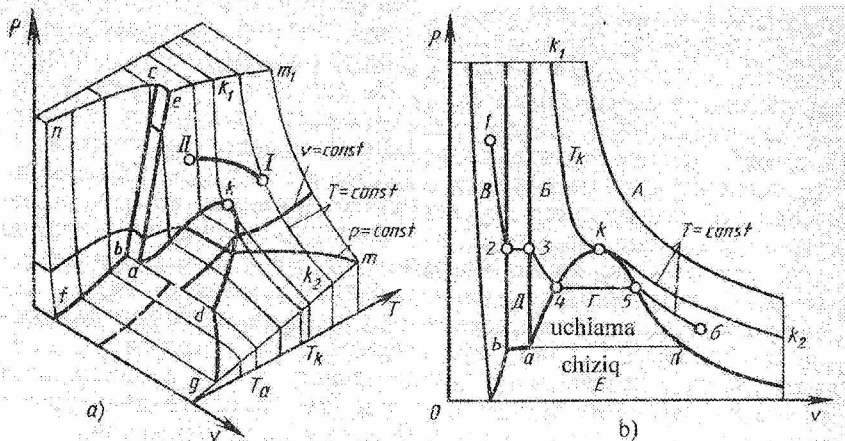
O‘zbekiston iqtisodiyotida kriogen mashinasozligi mavjud bo‘lmada, xorijiy kriogen qurilmalar ishlab chiqarish tarmoqlarida yordamchi texnologik vazifani bajarib kelmoqda, kriogen mahsulotlariga talab oshib bormoqda. O‘ta past temperatura olish mashinalarini ishlatuvchi injener-texnik xodimlarga ehtiyoj ortib bormoqda. Shuning uchun oliy ta‘limning bakalavriat bosqichida 5320300 – «Texnologik mashinalar va jixozlar (sovutish mashinasozligi)» o‘quv yo‘nalishi bo‘yicha tegishli mutaxassislar tayyorlanib kelinmoqda. Mutaxassislarga bo‘lgan ehtiyojni yanada qondirish uchun ixtisoslashgan alohida o‘quv yo‘nalishi – 5314900 – «Sovutish, kriogen texnikasi va mo‘‘tadillash tizimlari mashinalari hamda agregatlari» 2019 yili ochildi. Bu bakalavriat yo‘nalishlari o‘quv rejasida «Kriogen texnikasi» fani ko‘zda tutilgan bo‘lib, ushbu darslik fan bo‘yicha o‘zbek tilida yozilgan birinchi darslikdir.

1-bob. Kriogen sistemalari ishchi jismlarining xossalari

1.1. Muvozanat holatlari va sof moddalarning fazaviy o'tishlari

Moddalarning muvozanat holatlari holat parametrlarining qiymatlari bilan xarakterlanadi. Holat parametrlarini harorat bilan bog'lovchi ifodalar holat tenglamalari deb ataladi. Masalan, gazsimon yoki suyuq sof (bir komponentli) moddalar uchun p va v parametrlarini harorat bilan bog'liqligi umumiy ko'rinishda quyidagicha yoziladi [1]:

$$T = f(p; v) \quad \text{yoki} \quad F(p; v; T) = 0 \quad (1.1)$$



1.1-rasm. Qotishda hajmi kichrayuvchi real moddaning $p - v - T$ holat yuzalari (a – umumiy ko'rinish; b, c – proektsiyalar). $A, B, B, \Gamma, \Delta, E$ – mos ravishda gazsimon, suyuqlik, qattiq fazalar hamda suyuqlik va gazsimon (qaynash – kondensatsiya), suyuq va qattiq (erish – qotish), qattiq va gazsimon (sublimatsiya – muzlash) fazalar hududlari

Holat tenglamasi geometrik jihatdan holat yuzalari deb qaraladi. Real moddalarning holat yuzalari ularning umumiy xususiyatini aks ettiradi – turli agregat holatlarida

(gazsimon, suyuq va qattiq) bo'lishi mumkinligini (1.1-rasm). Suyuq holatlar (1.1, *a*-rasm) k_1kae yuza uchastkasi bilan chegaralangan; qattiq holatlar – $ncbf$ uchastkasi bilan; gazsimon holatlar – k_1kdgmm_1 uchastkasi bilan. Agar qotish vaqtida hajm kamaysa, u holda bunday moddalarning qattiq fazasi ("muz") suyuqlikda cho'kadi, ya'ni zichligi katta bo'ladi (masalan, CO_2 , O_2 , N_2 , He, Ar, Ne, Kr). Shu bilan birga termodinamik yuzalarda bir nechta xarakterli hududlar mavjud. Bu hududlar geterogen hududlar deb atalib, unda modda ikki fazaga ajraladi; bu fazalar hamkorlikda mavjud bo'lib, harorat esa faqat bosim funksiyasidir. Masalan, shunday hududlar bo'lib akd qaynash-kondensatsiyalanish hududi; $ceab$ erish-qotish hududi va $fbdg$ sublimatsiya-muzlash hududi hisoblanadi [1].

Har qanday ikki faza muvozanatidagi bosim va haroratlar qiymatlari to'yinish bosimi hamda to'yinish harorati deb ataladi, fazalarning o'zi esa to'yinish fazalari (to'yingan bug', to'yingan suyuqlik, to'yingan "muz") deb yuritiladi. To'yinish haroratidan past haroratdagi suyuqlik yoki muz o'ta qizimagan suyuq o'ta qizimagan "muz" deb ataladi. 1.1, *a*-rasmda ak chiziqdagi nuqtalar to'yingan suyuqlik holatiga, dk chizig'idagi nuqtalar esa suyuqlik bilan muvozanatdagi to'yingan bug' holatiga mos keladi. Kritik nuqtaga k yaqinlashish bilan suyuqlik va bug' zichliklari qiymatlari ham o'zaro yaqinlashadi. Kritik nuqtada suyuqlik va bug' bir-biridan farqlanmaydi va bir xil zichliklarga ega. Shunday hossaga k_1k chiziqdagi nuqtalar ham ega.

Kritik nuqtada

$$\begin{aligned} (\partial p / \partial v)_T = 0; \quad (\partial p / \partial s)_T = 0; \quad (\partial T / \partial v)_p = 0; \quad (\partial T / \partial s)_p = 0 \\ (\partial^2 p / \partial v^2)_T = 0; \quad (\partial^2 T / \partial v^2)_p = 0; \quad (\partial^2 T / \partial s^2)_p = 0 \end{aligned} \quad (1.2)$$

Kritik nuqtada izotermik va izobarik siqish koeffitsientlari hamda issiqlik sig'imi c_p aniqlanmagan kattaliklardir.

Kritik nuqta bosimidan yuqori bosimlarda ($p > p_k$) gaz hududidan suyuqlik hududiga va bunga teskari yo'nalishda o'tish faza o'zgarish belgilarisiz uzluksiz kechadi. 1.1, *a*-rasmda bunday o'tish I-II chizig'i bilan belgilangan. Bu (Van-der-Vaals bo'yicha) gazsimon va suyuq holatlar uzluksizligining mazmunidir. p_k bosimdan kichik bosimlarda gazdan suyuqlikka va teskari yo'nalishda o'tish uzluksiz emas: qaynash-kondensatsiyalanish geterogen hududi mavjud bo'lib, unda modda

muvozanat holati ikkita fazaga to'g'ri keladi (1.1, b-rasmdagi 4-5 chiziq). Demak, har qanday gazni suyuqlantirish va uni bug' bilan muvozanatda olishning zaruriy sharti gaz haroratini kritik qiymatdan pasaytirish ekan. Kritik haroratdan yuqorida modda suyuq holda faqatgina o'zining muzi bilan muvozanatlashgandagina bo'ladi (yuqori bosimlarda): erish-qotish hududidagi holatlar [1].

Faza deb moddaning nafaqat turli agregat holatlari, balki uning turii allotropik ko'rinishlari ham hisoblanadi. Fazalarning xarakterli jihati – ular orasida ajratish chegaralarning yaqqolligidir. Har qanday modda turli agregat holatlarida bo'lishi mumkin, lekin barcha moddalar uchun ham allotropik ko'rinishlar ma'lum emas. Odatda, allotropiya moddalarning qattiq holatiga mos va muzning turli tuzilishi (kristal panjarasi)da namoyon bo'lishi mumkin. Masalan, suv yettita kristall ko'rinishiga ega, oltingugurt – ikkita (rombsimon va monoklinik); qattiq geliy – uchta.

Allotropik o'zgarishlar qattiq kislorod, azot, fluor uchun xos. Termodinamik yuzaning qattiq holatlar hududida barcha allotropik turlarga ma'lum qismlar tegishli bo'lib, bu qismlar o'rtasida geterogen hududlar mavjud. Geterogen hududlarda allotropik turlar birgalikda mavjud bo'ladi [1].

Gibbs fazalar qoidasiga ko'ra sistema uchun erkinlik darajasi

$$E = K - F + 2, \quad (1.3)$$

bu yerda K – komponentlar soni; F – fazalar soni.

Sof modda uchun $K=1$ va bir fazali holat ($F=1$) uchun erkinlik darajasi $E=2$. Bu, masalan, harorat va bosim mustaqil parametrlar bo'lib, ixtiyoriy tanlanishi mumkinligini anglatadi. Ikki fazali ($F=2$) hududlarda $E=1$. Bu hududlarda bosim va harorat bir-biriga bog'liq tarzda aniqlanadi: har bir to'yinish harorati qiymatiga to'yinish bosimining ma'lum qiymati mos keladi. Masalan, p qiymatini qabul qilib T aniqlash mumkin va aksincha. Har bir ikki fazali quduklar uchun sof modda holat yuzasining tenglamasi $F(T; p) = 0$ ko'rinishga ega. Bular chiziqli yuzalardir (ularni tashkil etuvchisi v o'qiga parallel); ular pT tekisligiga perpendikulyar bo'lib, tekislikka chiziq ko'rinishida proektsiyalanadi. Natijada sof modda uchun ancha yaqqol $p-T$ diagrammani hosil qilamiz (1.1-rasm) [1].

Sublimatsiya egri chiziqi qattiq va gazzimon fazalar muvozanati hududlaridagi to'yinish harorati va to'yinish bosimi o'rtasidagi bog'liqlikni

aks ettiradi, erish egri chizig'i – qattiq va suyuq fazalar uchun, qaynash egri chizig'i – suyuq va gazsimon fazalar uchun aks ettiradi. Qaynash egri chizig'i kritik nuqta k bilan cheklangan (1.1, a -rasmga qarang). Erish egri chizig'i cheklanmagan, chunki juda yuqori bosimlar hududida ham suyuqlikdan qattiq holatga o'tish jarayonlari uchun kritik nuqta aniqlanmagan va bu o'tish zichlikni keskin o'zgarishi bilan kuzatiladi. Bu hodisani qattiq jism molekulyar tuzilishi nuqtai nazaridan ham tushuntirish mumkin. Tortirish kuchlari molekullarni tartibli panjara hosil qiluvchi muvozanat markazlari yaqinida ushlab turadi. Issiqlik harakati (ushbu holda molekullarni muvozanat markazlari yaqinida tebranishi) katta ta'sir etmaydi. Harorat ko'tarilganida tebranishlar kuchayadi va erish haroratiga erishilganida tartibli panjarani buzadi.

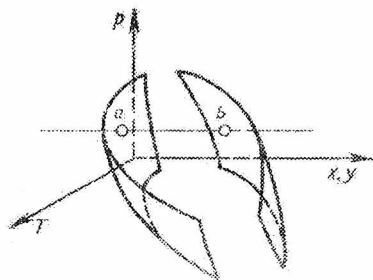
Ko'pgina moddalarning qaynash, erish va sublimatsiya haroratlari bosim pasayishi bilan kamayadi (1.1-rasm). Ammo bundan mustasno moddalar ham mavjud: masalan, suv uchun erish harorati bosim ortishi bilan pasayadi va p - T diagrammadagi erish egri chizig'i a nuqtadan chapga og'adi.

Uchta ikki fazali yuzalar uchlama nuqta a deb ataluvchi umumiy nuqtaga ega. Uchlama nuqtadagi erkinlik darajasi nolga teng, bu invariant holat deb ataladi. Uchlama nuqtaning p_a bosim va T_a haroratida bir vaqtning o'zida uchta faza – bug', suyuqlik va "muz" muvozanatda bo'lishi mumkin. Mumkin bo'lgan allotropik holatlar soni ortishi bilan p - T diagrammasining ko'rinishi murakkablashadi; boshqa "uchlama" nuqtalar soni kristall panjaralar modifikatsiyalari soniga teng. Lekin, faqat bitta, ba'zan asosiy deb yuritiluvchi, nuqtadagina gazsimon, suyuq va qattiq fazalardan birigina muvozanatda bo'ladi. Bundan mustasno bo'lib asosiy uchlama nuqtaga ega bo'lmagan geliy hisoblanadi; 2,5 MPa dan kam bosimda geliy $T \rightarrow 0$ gacha suyuq holda qoladi [1].

1.2. Binar sistemalarning muvozanat holatlari va fazaviy o'tishlari

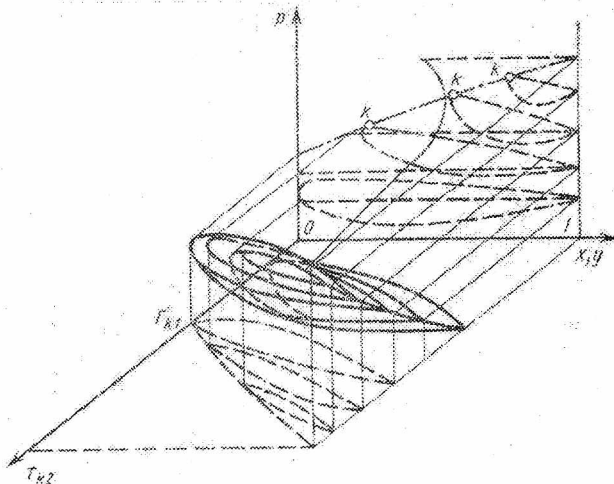
Ko'p komponentli moddalarning bir fazali, gazsimon va suyuq holatlar hududidagi termodinamik yuzalari sof moddaning termodinamik yuzalariga o'xshash. Turli fazalarning birgalikda bo'lish hududida, ya'ni fazalar muvozanati hududlarida xarakterli farqlar mavjud. Ko'p komponentli sistemalarning fazaviy o'zgarish qonuniyatlari tahlilini ikki komponentli (binar) sistemalar misolida ko'ramiz [1].

Agar harorat T , bosim p va komponentlardan birining hajmiy yoki massaviy ulushi x berilgan bo'lsa, binar sistemaning holati aniqlangan bo'ladi. Bir fazali holatlar hududida bu uchta mustaqil o'zgaruvchilarni ixtiyoriy o'zgartirish va tanlash mumkin; binar sistema uchta erkinlik darajasiga ega. Fazalar muvozanati hududlarida (qaynash-kondensatsiya, erish-qotish, sublimatsiya-muzlash) binar sistemaning ($K=2$) erkinlik darajasi sof moddanikidan bittaga ko'p, ya'ni $E=2$. Muvozanat holatda fazalar bosim va haroratlari teng bo'lishi shart, bir fazadagi komponentning har bir ulushiga x boshqa fazadagi shu komponentning ma'lum muvozanat ulushi y mos kelishi shart. Bu fazalardagi komponentlar kimyoviy potentsiallarining muvozanat sharoitlardagi tenglik natijasidir. Shu tariqa, ikki fazadagi muvozanat hududlarida binar aralashmaning faqatgina ikkita parametri mustaqil va ixtiyoriy tanlanishi mumkin. p va T ning har qanday qiymatlari to'plamiga x ning ma'lum bir qiymati mos keladi, demakki, y ning ham; T va x ning har qanday qiymatlari to'plamiga ma'lum p va y mos keladi, p va x ning har qanday to'plamiga T va y ning ma'lum qiymatlari to'g'ri keladi.



1.2-rasm. $T-p-x$ koordinatalaridagi muvozanat holatlar yuzalari

$T-p-x$ koordinatalarida ikkita fazalardan har birining muvozanat holatlari yuzalarini tasvirlash mumkin (1.2-rasm). Muvozanat holatda p va T ning qiymatlari ikkala fazalar uchun bir xilligi sababli, bu yuzalarning $p-T$ tekisligiga perpendikulyar bilan kesishish nuqtalari muvozanat holatlarga (a va b nuqtalar) mos keladi. Sof moddadagi kabi binar aralashmaning ikki fazali hududi p, T, x parametrlarning ma'lum qiymatlari bilan chegaralangan; shuning uchun ikki fazaning holatlari yuzasi tutashadi va fazada murakkab shaklni hosil qiladi (1.3-rasm) [1].

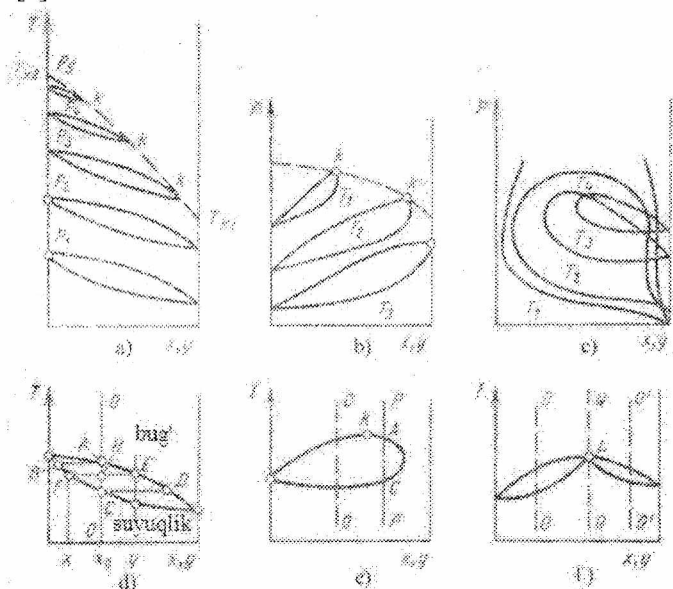


1.3-rasm. Muvozanat yuzalarining mumkin bo'lgan shakli

Turli aralashmalar muvozanat yuzalarining har xil shakllariga ega. $x=0$ va $x=1$ tekisliklar bilan muvozanat yuzalarining kesishish chiziqlari sof komponentlar qaynash chiziqlaridan iborat: $T = f(p)$. Muvozanat yuzalari kesimlarining proektsiyalari amaliyotda ko'p ishlatiluvchi muvozanat holatlar diagrammalarini beradi (1.4-rasm). Muvozanat egri chiziqlari muvozanat yuzalari bilan $T = const$ va $p = const$ tekisliklar kesishish chiziqlarining proektsiyasidir, shuning uchun har bir egri chiziqqa haroratning ($p-x$ koordinatalarida) va bosimning ($T-x$ koordinatalarda) ma'lum qiymatlari mos keladi. Yuqorigi muvozanat egri chizig'i kondensatsiya, quyi egri chiziq esa qaynash egri chizig'i deb ataladi. Qaynash haroratining ko'tarilishi oqibatida bosim ortganda muvozanat egri chiziqlari grafikda (1.4, a-rasm) ko'tariladi. Komponentlardan birining kritik haroratiga T_{k1} erishilganida muvozanat egri chiziqlari $x=1$ o'qidan uzoqlashadi va haroratni yana ortishi bilan asta qisqarib ikkinchi komponentning kritik haroratiga T_{k2} tenglashganda yo'qoladi. $p-x$ koordinatalarda (1.4, b-rasm) muvozanat egri chiziqlari shunday xarakterga ega [1].

Komponentlarning kritik haroratlari keskin farqlanuvchi binar aralashmalar uchun muvozanat egri chiziqlari boshqa ko'rinishga ega bo'lishi mumkin (1.4, c-rasm).

Agar $x = x_0$ li binar aralashmani doimiy bosimda asta sovuqtilsa, u holda jarayon OO chizig'i bilan tasvirlanadi (1.4, *d*-rasm). Bunda kondensatsiya A nuqtada boshlanadi va suyuqlikning birinchi tomchilari tarkibi qaynash egri chizig'idagi B nuqta parametrlariga mos bo'ladi; rasmdan ko'rinib turibdiki, bu tarkib bug' faza tarkibidan ancha farq qiladi. Keyingi kondensatsiyalanish pasayib boruvchi haroratda kechadi (doimiy haroratda kondensatsiyalanuvchi sof moddlar kondensatsiyasidan farqli ravishda). Bunda suyuqlik tarkibi B nuqtadan C gacha o'zgaradi, bug' tarkibi esa – A nuqtadan D gacha. Bug'ning oxirgi zarralari tarkibi D nuqtaga mos keladi. Dastlabki aralashma suyuq fazaga to'liq o'tib bo'lganida (C nuqta), uning tarkibi dastlabki (x_0) holatga mos bo'ladi. Oraliq nuqta H da suyuqlik g va bug' G miqdorlari nisbatini $g/G = (x_0 - y)/(x - x_0) = EH/HF$ dan aniqlash mumkin [1].

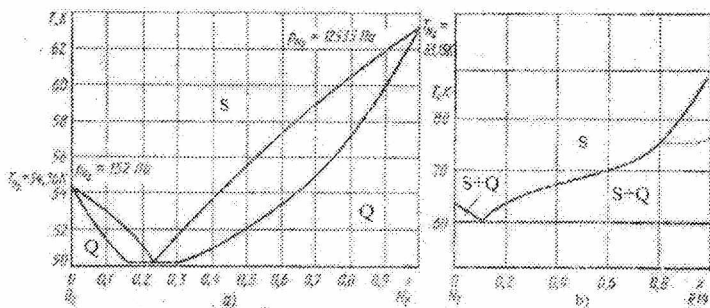


1.4-rasm. $T-x$ va $p-x$ koordinatalaridagi muvozanat egri chiziqlarining turlari

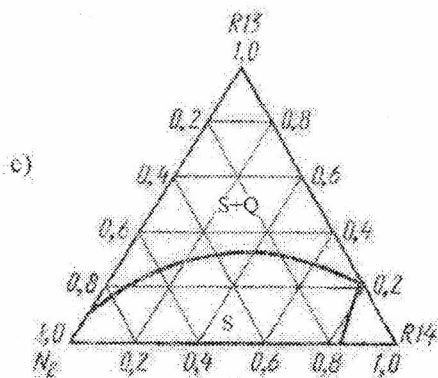
Bu doimiy bosimda aralashmani OO chizig'i (1.4, *e*-rasm) va OO hamda $O'O'$ chiziqlari (1.4, *f*-rasm) bo'yicha kondensatsiyalanish jarayonlari uchun ham xarakterli. Ammo kritik nuqta k dan o'ngda joylashgan PP chiziq

bo'yicha aralashmaning sovushi yuqorida ko'rib o'tilganidan farq qiladi (1.4, e-rasm). *A* nuqtadagi dastlabki aralashma ikki fazaga ajrala boshlaydi. Sovutish davom ettirilsa, bug' fazasining miqdori dastlab ko'payadi, so'ngra kamaya boshlaydi va *C* nuqtada barcha bug' to'liq kondensatsiyalanadi. Bunday jarayon teskari kondensatsiya deb yuritiladi. Shunday hollar bo'lishi mumkinki, ma'lum kontsentratsiyalarda binary aralashma sof modda kabi o'zgarmas haroratda kondensatsiyalanadi (1.4, e-rasm; *QQ* chizig'i). *L* nuqta azeotrop nuqta deb ataladi.

Ko'rib chiqilgan diagrammalardan tashqari *T-p-x-y*; *x-y* va *T-p-i-x-y* muvozanat diagrammalari ham keng qo'llaniladi.



1.5-rasm. Aralashmalar uchun suyuqlik – qattiq jism holat diagrammasi (κ – suyuq holat hududi, m – qattiq holat hududi):



a – komponentlar uchlama nuqta harorati yaqin bo'lganida ($O_2 - N_2$); *b* – komponentlar uchlama nuqta harorati keskin farqlanganida ($p = 0,15 \text{ MPa}$ da $N_2 - R14$); *c* – $T = 75 \text{ K}$ va $p = 0,15 \text{ MPa}$ da uch komponentli $N_2 - R13 - R14$ aralashma uchun

Agar kondensatsiyalangan binar aralashmani sovutish davom ettirilsa, qattiq faza (kristallanish) hosil bo'la boshlaydi. Kristallanishda

komponentlarning suyuqlikdagi ulushi x_i' va kristalldagi ulushi x_i^o nazariy jihatdan Shreder-van-Laar tenglamasidan aniqlanadi:

$$\ln(v_i' x_i' / x_i^o) = (r_{suyuqi} / R) (1/T_{suyuqi} - 1/T) + (r_{\beta} / R) (1/T_{\beta} - 1/T) \quad (1.4)$$

bu erda v_i – komponentni suyuqlikdagi faollik koeffitsienti; r_{suyuqi} va T_{suyuqi} – i -komponentning suyuqlanish issiqligi va harorati; r_{β} va T_{β} – kristallda fazaviy o'tish issiqligi va harorati [1].

Qaynash haroratlari keskin farqlanuvchi komponentlardan iborat aralashmalarda (masalan, azot N_2 va $R13$, $R14$ freonlari aralashmasi) sof modda kristallari paydo bo'lishi mumkin (1.5, b -rasm). Bu holda $x_i^o = 1$ va (1.4) tenglama komponentni suyuq fazada erish chegarasini belgilaydi. Uch fazali muvozanat sistema bitta erkinlik darajasiga ega va sof moddadan farqli uch fazali muvozanat holatlar hududi chiziq bilan emas, balki yuza uchastkasi bilan tasvirlanadi. Ma'lum bosimga haroratlari va component ulushlarining ma'lum qiymatlari mos keladi binary sistema uchun shunday holat bo'lishi mumkinki, bunda sistema invariant, ya'ni erkinlik darajasi soni nolga teng bo'ladi. Bu holda muvozanatda to'rtta faza bo'ladi: qattiq va suyuq aralashmalar, bug' faza va komponentlardan biri (odatda, qattiq fazada). Ushbu holat evtetikholat deb ataladi va bir komponentli sistemaning uchlama nuqtasiga o'xshaydi. Gazsimon va suyuq fazalar muvozanatiga o'xshash, qattiq va suyuq fazalar muvozanatida konsentratsiyalarining ma'lum muvozanat farqi yuzaga keladi (1.5, a , b -rasmlar). Demak, suyuq holatdan qattiq holatga o'tishda suyuq va qattiq holatga o'tishda aralashmalarning biror komponenti konsentratsiyasi doimo o'zgaradi. Bunday jarayonning T - x koordinatalardagi tasviri 1.4, d -rasmdagiga o'xshash [1].

1.3. Ideal gaz holati

Ideal gaz qonunlari deb ataluvchi barcha qonunlar (Boyl-Mariott, Gey-Lyussak, Sharl, Joul, Dalton, Avagadro, Amag qonunlari) real gazlarning past bosimlarida o'tkasilgan tajribalardan olingan natijalariga asoslanadi. Shu sababdan, ideal gaz holati tushunchasiga past bosimlarda real gaz xossalriga yaqin xossali gaz deyarli mos keladi. Molekulyar-kinetik nuqtai-nazardan ideal gaz modeli barcha yo'nalishlarda harakatlanuvchi molekulalar to'plamidan iborat. Harakatlanishning barcha yo'nalishi

ehtimoli bir xil. Molekulalar o'lichami ular orasidagi masofaga nisbatan juda ham kichik, shuning uchun molekulalar egallagan hajm e'tiborga olinmasa ham bo'ladi. Molekulalar orasida tortishish-itarishish kuchlari yo'q. Molekulalar bir-biri bilan va idish devori bilan faqat to'qnashgandagina ta'sirlashadi, bu to'qnashuvlar harakteri ideal bikrdir [1].

Holat tenglamalari. Ideal holatda gaz Boyl–Gey-Lyussak holat tenglamasiga bo'ysinadi; 1 kg va G kg gaz uchun mos ravishda

$$pv = RT \quad \text{va} \quad pV = GRT \quad (1.5)$$

bu erda p , [Pa]; v , [m^3/kg]; V , [m^3]; R – nisbiy gaz doimiysi, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$.

Turli gazlar uchun R ning qiymati 1.1-jadvalda berilgan.

1.1-jadval

Gaz	Kimyoviy formulasi	M , kg/kmol	R , $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$	Gaz	Kimyoviy formulasi	M , kg/kmol	R , $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
Azot	N_2	28,016	296,766	Metan	CH_4	16,040	518,341
Argon	Ar	39,944	208,146	Neon	Ne	20,183	411,940
Havo	–	28,966	287,033	Uglerod oksidi	CO	28,011	296,819
Vodород	H_2	2,016	4124,102	Uglekislota	CO_2	44,011	188,912
Geliy-4	${}^4\text{He}$	4,003	2076,989	Ftor	F_2	38,000	218,794
Geliy-3	${}^3\text{He}$	3,016	2780,000	Etan	CH_3CH_3	30,070	276,494
Kislorod	O_2	32,000	259,818	Etilen	C_2H_4	28,054	296,364
Krypton	Kr	83,800	99,215				
Ksenon	Xe	131,300	63,322				

Ideal gaz holat tenglamasining boshqa shakli – Mendeleev-Klapeyron tenglamasi ham ma'lum:

$$pV = N_m R_u T; \quad pV = GR_u T / M; \quad pV_m = R_u T \quad (1.6)$$

bu erda N_m – gaz kilomollar soni; M – bir kilomol massasi [massasi 12 kg li uglerod (C) nuklididagi atomlar soniga teng molekulalardan (atomlardan, zarralardan) iborat modda miqdori]; $V_m = V / N_m$ – bir kilomolning hajmi; $R_u = 8314,19 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ – universal gaz doimiysi.

Nisbiy gaz doimiysi, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$R = R_u / M \quad (1.7)$$

Bundan tashqari, ideal gaz holat tenglamasini quydagi ko'rinishda yozish mumkun

$$pV = nkT \quad (1.8)$$

bu yerda $n - V$ hajmdagi molekular soni; k – Boltsman doimiysi.

Barcha gazlar uchun

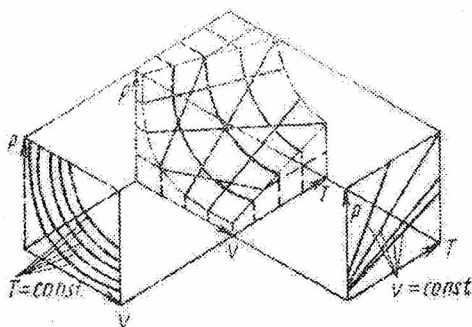
$$k = Rm = R_u / N = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad (1.9)$$

bu yerda m – bitta molekula massasi; N – bir kilomoldagi molekular soni.

Tajribalardan aniqlashicha, har qanday moddaning kilomolida kimyoviy tarkib va xosalaridan qat'iy nazar $6,024 \cdot 10^{26}$ molekula mavjud, ya'ni

$$N = R_u / k = 6,024 \cdot 10^{26} \quad (1.10)$$

Bir hil bosim va haroratlarda ideal holatdagi har qanday bir kilomol gazning hajmi bir hil, masalan, normal sharoitlarda, taxminan, $22,4 \text{ m}^3$ ga teng [1].



1.6-rasm. $p - v - T$ koordinatalarda ideal gaz holat yuzalari

Ideal gaz holat yuzalari 1.6 – rasmda ko'rsatilgan. $p - v$ tekislikda izotermalar giperboladan iborat.

Issiqlik xossalari. Holat tenglamalarini bilib va termodinamikaning fundamental munosabatlarini ishlatib, ideal gazning asosiy issiqlik xossalari aniqlash mumkin.

Ideal gazning ichki energiyasi va entalpiyasi bosim va zichlikka bog'liq emas, faqatgina haroratga bog'liq. Darhaqiqat, ideal gaz uchun $(\partial p / \partial T)_v = p/T = R/v = const$; $(\partial v / \partial T)_p = v/T = R/p = const$.

Bu ifodalarni (2.106) va (2.107) [1] tenglamalarga qo'yib quydagilarni olamiz:

$$\begin{aligned} (\partial u / \partial v)_T &= 0; & (\partial u / \partial p)_T &= 0; \\ (\partial i / \partial p)_T &= 0; & (\partial i / \partial v)_T &= 0. \end{aligned} \quad (1.11)$$

Ideal gaz issiqlik sig'implari c_p va c_v faqat haroratga bog'liq:

$$c_v = (\partial u / \partial T)_v = f(T); \quad c_p = (\partial i / \partial T)_p = f(T). \quad (1.12)$$

(2.115) [1] ifodadan Mayer tenglamasini olamiz.

$$c_p - c_v = R \quad (1.13)$$

(2.106) [1] tenglamalardan ko'rinadiki, ideal gazga tashqi bosim faqatgina issiqlik bosimi bilan muvozanatlashgan. Molekulalar ta'sirlashuv kuchlari bilan ifodalanuvchi ichki bosim mavjud emas.

Ideal gazgagi ixtiyoriy jarayon uchun ichki energiya va entalpi o'zgarishi mos ravishda

$$du = c_v dT; \quad di = c_p dT. \quad (1.14)$$

Ideal gaz uchun hajm kengayish β va bosim χ harorat koeffitsientlari:

$$\beta = \chi = 1/T \quad (1.15)$$

Ideal gazning izotermik siqilish koeffitsienti

$$\chi_T = -\frac{1}{v} \left(-RT / p^2 \right) = \frac{1}{p} \quad (1.16)$$

$T = \text{const}$ ga hajmiy bikrlilik moduli

$$\varepsilon_T = p. \quad (1.17)$$

Adiabatik siqilish koeffitsienti

$$\chi_s = 1/(kp). \quad (1.18)$$

$s = \text{const}$ ga hajmiy bikrlilik koeffitsienti

$$\varepsilon_s = kp, \quad (1.19)$$

bu yerda $k = c_p / c_v$ - Puasson adiabatasi ko'rsatgichi.

(1.8) tenglamadan ma'lum bo'ladiki, bir hil bosim va haroratlarda teng hajmlarda molekulalar soni teng hamda doimiy T , V da gaz bosimi molekulalar soni n bilan aniqlanadi, molekula turiga bog'liq emas. Shunday qilib, ideal gazlar aralashmasining umumiy bosimi komponentlarning xudi shu hajm va haroratdagi partzial bosimlari yeg'indisiga teng:

$$P_{vT} = P_1 + P_2 + \dots = (\sum P_i)_{vT}. \quad (1.20)$$

Komponentning partzial bosimi

$$P_i = \chi_i P \quad (1.21)$$

bu yerda χ_i - aralashmadagi i - komponentning molyar (yoki hajmiy) ulushi.

Boshqacha aytganda, ideal gaz aralashmasida har bir komponent o'zini berilgan hajm va aralashma haroratida yolg'iz o'zi qanday tushsa shunday

tutashadi. Ideal gazlar aralashmasining hajmi komponentlar partsiyal hajimlarining aralashma harorati va bosimidagi yeg'indisiga teng:

$$V_{pT} = (\sum V_i)_{pT} \quad (1.22)$$

i – komponentining partsiyal bosimi

$$V_i = x_i V \quad (1.23)$$

Ideal gaz aralashmasi uchun u , i , c_p va R nisbiy qiymatlari quydagi formulalardan aniqlanadi:

$$\begin{aligned} u &= \sum(u_i m_i) / m; & i &= \sum(i_i m_i) / m \\ c_p &= \sum(c_{pi} m_i) / m & R &= \sum(R_i m_i) / m \end{aligned} \quad (1.24)$$

bu yerda m – aralashma massasi; m_i – komponentlar massalari.

Ideal gaz uchun Puasson adiabatasi muvozanat tenglamasi quydagicha ko'rinishda bo'ladi:

$$(\partial v / \partial p)_s = -v / (kp) \quad (1.25)$$

yoki

$$pv^k = const \quad (1.26)$$

Izaxorik jarayon uchun

$$T / P = const; \quad (1.27)$$

Izobar jarayon uchun

$$T / v = const; \quad (1.28)$$

Izotermik jarayon uchun

$$pv = const \quad (1.29)$$

Tovushning ideal gazdagi tezligi

$$a = \sqrt{kRT} \quad (1.30)$$

Ideal gazlarning ko'rib chiqilgan xossalarini bevosita xolat tenglamasidan va termodinamikaning umumiy munosabat ifodalaridan aniqlash mumkin. Ammo ta'kidlash lozimki, bu barcha hossalari, dastlab real gazlar bilan past bosimlarda o'tkazilgan tajribalar bo'yicha aniqlangan. Darhaqiqat, (1.16) va (1.29) tenglamalar Boyl–Mariott qonuni, (1.15) tenglama – Charl, (1.20) tenglama – Dalton qonuni, (1.11) tenglama – Joul qonunini ifodalaydi. (1.22) tenglama Amaga qonuni, (1.8) va (1.10) tenglamalari – Avogadro qonunlarini aks ettiradi. Bu tadqiqotlar ideal gaz tushunchasini kiritishda va uning xossalarini tavsiflashda muhim ahamiyat kasb etgan [1].

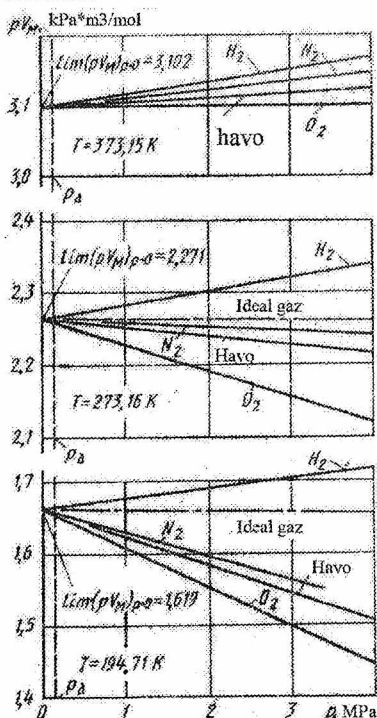
1.4. Real gazlar

Past haroratlarda yoki katta bosimlarda ideal gaz modeli yetarli emas va gazxossalarini ifodalashda molekulalarning o'zaro ta'sirlashuvini e'tiborga olish lozim [1].

Molekulalarning o'zaro ta'sirlashuvi. Real gazlar molekulalari o'rtasida ta'sirlashuv kuchlari mavjud bo'lib, ularning xarakteri va kattaligi individual xossalar, molekulalar tuzilishi va asosiy parametrlar – bosim va haroratlar qiymatlari bilan aniqlanadi. Bu kuchlar qiymatlari real gaz molekulalari ichki potentsial energiyasini belgilaydi. Katta bosim va zichliklarda gazlar hossalari molekulalar o'lchamiga bog'liq. Molekulalar ma'lum (qat'iy) o'lchamlarga ega emas; atom va molekulalar o'lchamlari bir oraliqda o'zgarishi mumkin. Bu o'zgarishlar electron qobiqni deformatsiyalovchi ommillarga bog'liq; shuning uchun turli agregat holatlarda va o'zaro ta'sirlashuvning turli xarakterlarida atom va molekulalarning “effektiv diametrik”, ya'ni ma'lum bir tajribada namoyonbo'luvchi diametr turlicha bo'lishi mumkin. Odatda atomlarning effekti gazokinetik diametrlari $0,2 \div 0,5$ chegarasida bo'ladi; atom yadrosining diametri 10^{-5} nm. Atomlar electron qobiqlari yadroga nisbatan hatto nol termodinamik haroratda ham uzluksiz tebranadi. Elektron qobiqning tebranishi elektr maydonini yuzaga keltiradi va Van-der-Vaals tortishish kuchi yuzaga kelish mexanizmini tushuntiradi. Ikki atomli gazlar (H_2 ; N_2 ; O_2 ; F_2 ; Cl_2) molekulalarida atomlar umumiy elektron qobiqlarini hosil qiluvchi umumiy elektronlarga ega; bunday bog'lar gomeo qutubli yoki kovalentli deb ataladi. Molekulalardagi valentli elektronlar atomlardagiga qaraganda ancha past energetik bosqichda bo'ladi; bosqichlar farqi energiya dissotsiatsiyasi kattaligini ko'rsatadi. Agar molekulalar (yoki atomlar) shunday masofaga yaqinlashgan bo'lishsaki, bunda ularning electron qobiqlari bir-birining ichiga kira boshlasa, u holda masofa qisqarishi bilan tez oshib boruvchi va tortishish kuchidan ortib ketuvchi itarishish kuchi yuzaga keladi [1].

Siqiluvchanlik. Bir xil bosim va haroratda asosan molekulalar aro kuchlar sababli real va ideal gazlarning birlik massa hajmlari farqqili bo'lishi mumkin. Gazlarning siqiluvchanligi bo'yicha birinchi sistematik tadqiqotlarni fransuz olimi E. Amaga 1870 yilda o'tkazgan. Ideal gaz uchun berilgan haroratda $p\nu$ ko'paytma doimiydir, ya'ni gaz hajmi uning bosimiga

teskari proportsional. Agar bir xil harorat va bosimlarda pV ko'paytma real gaz uchun ideal gaznikidan kichik bo'lsa, u holda real gaz massa birligi kamroq hajmga ega bo'ladi, ya'ni real gazning siqiluvchanligi ideal gazning siqiluvchanligidan katta (1.7-rasm). 1.7-rasmda gazlarning quyidagi fundamental xossalari yaqqol ko'rinadi: $\lim (pV_m)_{p \rightarrow 0}$ ni mos haroratga nisbati gazning turiga ham, haroratga ham bog'liq emas [universal gaz doimiysi $R_u = 8314,19 \text{ J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$]; gazlarning siqiluvchanligi harorat va bosimga bog'liq; ideal gaz izotermasidan (gorizontal chiziq) og'ishlar, umumiy holda, bosim va molekula massasi qancha katta bo'lsa, hamda harorat past bo'lsa shuncha kattadir.



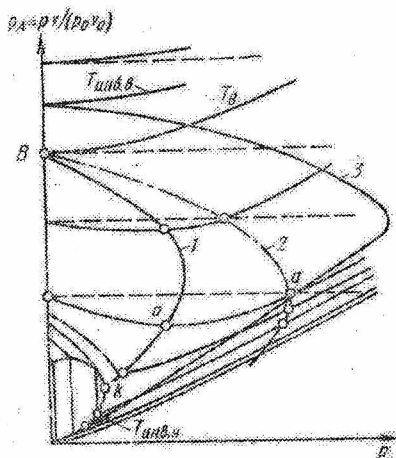
1.7-rasm. Turli gazlarning $pV_m - p$ koordinatalardagi izotermalari

Siqish darajasini xarakterlash uchun E. Amaga o'lchamsiz kattalik kiritgan

$$\rho_A = pV_M / (pV_M)_{p=p_0} = pV / (p_0 v_0), \quad (1.31)$$

bu kattalik Amaga soni yoki siqish darajasi deb ataladi. Bu ifodadagi $p_0 v_0$ ko'paytma qiymati ma'lum real gaz uchun boshlang'ich sharoitlarda olinadi [1].

Ideal gaz uchun Amaga soni berilgan haroratda ($\rho_{Aid} = T/T_0$) o'zgarmas va bosimga bog'liq emas, ya'ni $\rho_A - p$ koordinatalaridagi barcha izotermalar abtissa o'qiga parallel. Real gazlar uchun Amaga soni nafaqat haroratga, balkibosimga ham bog'liq, bunday bog'liqlik xarakteri holat turli hududlarida bir xil emas. 1.8-rasmda Amaga sonining real gazlar uchun o'zgarish tipik diagrammasi berilgan. Yuqori haroratlar va kichik bosimlar hududida $\rho_A - p$ koordinatalardagi izotermalar gorizontal chiziqlarga yaqin (ya'ni ideal gaz izotermasida) va bosim o'zgarishi bilan yuqoriga ko'tariladi, ya'ni tanlangan biror bosimda p real gaz uchun $p v$ ko'paytma ideal gazdagiga nisbatan katta. Demak, 1 kg real gaz hajmi 1 kg ideal gaz hajmidan katta, real gazning siqiluvchanligi esa kichik [1].



1.8-rasm. Real gazlarning siqilish egri chiziqlari: 1 – Boyle egri chizig'i; 2 – ideal egri chiziq; 3 – Joule–Tomson effekti inversiya egri chizig'i ($T_{HHB,B}$ va $T_{HHB,H}$ – mos ravishda inversiyaning yuqori va quyi haroratlari; shtrix chiziqlar – ideal gaz izotermalari)

Haroratni Boyle harorati T_B deb ataluvchi qiymatgacha pasayishi daizotermalar xarakteri o'zgar olmaydi, faqatgina bosim ta'siri ancha kuchayadi (izotermalar egriligi ortadi). Harorat T_B dan pasayishi (1.8-rasmda B nuqta) bilan $\rho_A - p$ koordinatalardagi izotermalar ekstremum

hosil qilib hosila ishorasini o'zgartiradilar. Quyida ayrim gazlar uchun Boyl harorati ko'rsatilgan.

Gaz	havo	Ar	O ₂	N ₂	Ne	H ₂	He
T_B, K	347	412	423	326	121	109	18,2

Gazning siqiluvchanligi holatning ma'lum hududlarida $(\partial\rho_A/\partial p)_T$ hosilaning ishorasi bilan aniqlanadi. $(\partial\rho_A/\partial p)_T < 0$ da real gaz siqiluvchanligi $(\partial\rho_A/\partial p)_T$ ideal gaz siqiluvchanligidan katta; $(\partial\rho_A/\partial p)_T > 0$ – kichik, $(\partial\rho_A/\partial p)_T = 0$ da esa real va ideal gazlar siqiluvchanliklari teng. Oxirgisi Boyl nuqtalari deb ataluvchi ekstremum nuqtalar uchun o'rinli; ularda gaz hajmi berilgan haroratda bosimga teskari proportsional. Ekstremum nuqtalarto'plami Boyl egrichizig'ini hosil qiladi. Boyl egri chizig'i va ordinatalar o'qi shunday hududni chegaralaydiki, unda $(\partial\rho_A/\partial p)_T < 0$ va real gaz siqiluvchanligi ideal gaz siqiluvchanligidan katta; boshqa hududlarda real gaz siqiluvchanligi ideal gaz siqiluvchanligidan kichik [1].

Boyl haroratlaridan past haroratlarda real va ideal gazlar izotermalari a nuqtada kesishadi; a nuqtada real gaz ideal gaz holat tenglamasi bilan ifodalanadi. Bu nuqtalarning geometrik o'rni "ideal" deb ataluvchi egrichiziqni hosil qiladi. Boyl egri chizig'i va ideal egri chiziq orasidagi oblastda (ab hudud) real gaz siqiluvchanligi ideal gaznikidan kichik, ammo real gaz hajmining absolyut qiymatlari (berilgan bosim va haroratda) ideal gaz hajmlaridan kichik. Shu tariqa, ideal egri chiziq va ordinatalar o'qi shunday oblastni chegaralaydiki, bunda bir xil T va p da real gaz hajmlari ideal gaznikidan kichik.

Siqiluvchanlik bo'yicha tadqiqotlar doimiy ravishda rivojlantrilib borilmoqda. Hozirgi vaqtgacha gaz va suyuqliklarning parametrlar turli diapazonlarida siqiluvchanligiga oid ko'p ma'lumotlar to'plangan. Bu ma'lumotlarning amaliy ahamiyati nafaqat holat parametrlari orasidagi bog'liqliklarni sodda shaklda ifodalashida, balki barcha termodinamik funktsiyalar o'zgarishini aniqlash va tushuntirish imkonini berishida hamdir. Masalan, entalpiya o'zgarishi ($i = u + pv$) va Joul-Tomson effekti inversiyasi holat parametrlari o'zgartirida gazlar siqiluvchanligi o'zgarishi bilan aniqlanadi.

Holat tenglamalari. Siqiluvchanlik tadqiqotlari natijalaridan olingan, shakl bo'yicha sodda, real gaz holat empirik tenglamasi quyidagicha [1]:

1 kg gaz uchun

$$pv = zRT$$

G kg gaz uchun

$$pV = zGRT \quad (1.32)$$

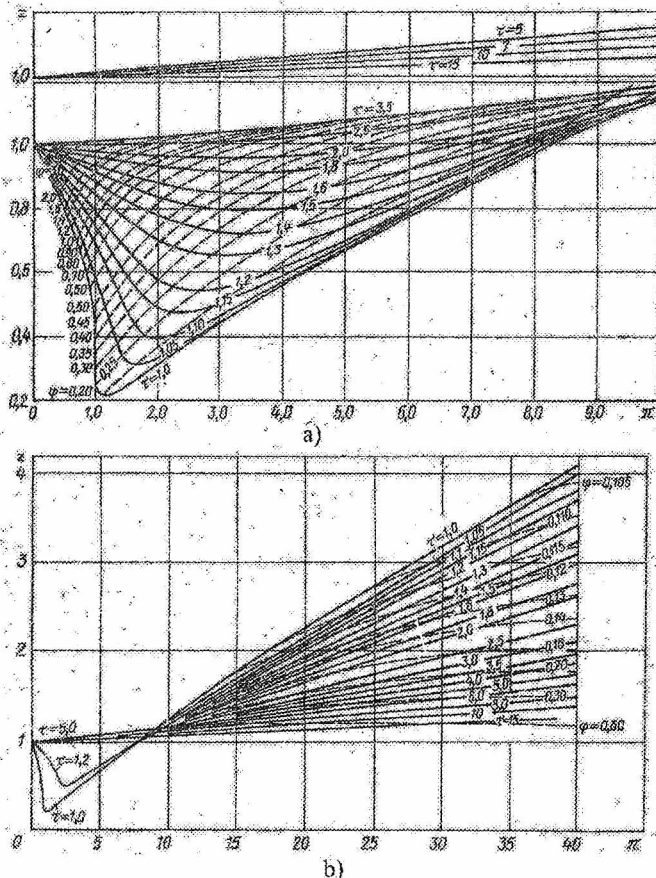
yoki Mendeleev–Klapeyron tenglamasi (1.6) shaklida

$$pV = zN_M R_u T; \quad pV_M = zR_u T; \quad pV = zGR_u T/M \quad (1.33)$$

O'lchamsiz koeffitsient

$$z = pv/(RT) \quad (1.34)$$

siqiluvchanlik koeffitsienti deb ataladi.



1.9-rasm. Siqiluvchanlik koeffitsientini holat keltirilgan (o'lchamsiz) parametrlariga bog'liqligi:

Past bosimlarda gazlar o'zlarini ideal gazlardek tutgani uchun Amaga soni maxrajini ideal gazga nisbatan olish mumkin, u holda Amaga soni va siqiluvchanlik koeffitsienti o'rtasida quyidagi bog'liqlikni olish mumkin [1]:

$$z = \frac{pv}{RT} \frac{T_0}{T} = \frac{\rho_A T_0}{T} = \frac{\rho_A}{\rho_{Aid}} \quad (1.35)$$

ρ_A kabi siqiluvchanlik koeffitsienti z ham bosim va harorat funksiyasidir. $z - p$ koordinatalaridan izotermalar $\rho_A - p$ koordinatalaridagidek xarakterga ega; farqli jihati shuki $z - p$ koordinatalarida barcha izotermalar ordinatasi birga va abstsissasi nolga teng bo'lgan bitta nuqtadan chiqadi [(1.35) tenglamalarga qarang]. 1.9-rasmda siqish koeffitsientlarini keltirilgan o'lchamsiz koordinatalarda aniqlash uchun universal grafikalar ko'rsatilgan. Real gazlar uchun bir xil keltirilgan parametrlarda termodinamik o'xshashlik sabab siqish koeffitsientlari teng. Ammo o'xshashlik juda qat'iy emas, masalan kritik nuqtada siqish koeffitsientining z_k qiymatlari birmuncha farqlanadi [1]:

Gaz	He	H ₂	Ne	N ₂	O ₂	Ar
Z _k	0,3	0,292	0,296	0,291	0,292	0,290
Gaz	Kr	Xe	CO	CH ₄	CO ₂	H ₂ O
Z _k	0,291	0,29	0,294	0,290	0,274	0,23

z ni yanada aniqroq topish uchun mahsus jadvaldan foydalaniladi.

1901-yilda Kamerling-Onnes molekularlar ta'sirlashuv mexanizmini yoritmasdan tajriba ma'lumotlarini ifodalovchi holat tenglamasining virial shaklini birinchi bo'lib taklif qilgan:

$$pv = A(1 + B/v + C/v^2 + D/v^3 + \dots), \quad (1.36)$$

bu yerda A, B, C, D, \dots – virial koeffitsientlari.

Virial (“kuchlanish”) koeffitsientlari gaz harorat va xossalaring funkstiyasidir, ya'ni har bir izoterma uchun B, C, D, \dots qiymatlari turlicha. Masalan, azot uchun:

T, K	80	100	273
B, cm ³ /mol	-250,8	-162,1	-9,5
C, cm ⁶ /mol ²	21	0,85	0,082
D, cm ⁹ /mol ³	0,2	-0,06	0,0016

Odatda, virial koeffitsientlarni ko'phad shaklida yoziladi:

$$B = B_0 + B_1/T + B_2/T^2 + \dots \quad (1.37)$$

tenglamadagi birinchi virial A koeffitsienti faqat haroratga bog'liq va gazning xossalari bog'liq emas:

$$A = \lim_{p \rightarrow 0} (pv) = RT \quad (1.38)$$

shuning uchun virial shakildagi holat tenglamasini quydagi ko'rinishlarda ifodalash mumkin:

$$pv/(RT) = z = 1 + B/v + C/v^2 + D/v^3 + \dots;$$

$$pv/(RT) = z = 1 + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots;$$

$$p = RTp + B^1 p^2 + C^1 p^3 + D^1 p^4 + \dots;$$

(1.39)

bu yerda $B^1 = RTB$; $C^1 = RTC$ va h.k.

Ba'zan siqish koeffitsientini bosim darajasi bo'yicha qatorga yoyishni ma'qul ko'radilar:

$$pv/(RT) = z = 1 + B^{11} p + C^{11} p^2 + D^{11} p^3 + \dots \quad (1.40)$$

(1.38) va (1.39) tenglamalardagi virial koeffitsientlar o'zaro sodda bog'langan:

$$B^{11} = \frac{RT}{B}; \quad C^{11} = \frac{C - B^2}{RT^2}; \quad D^{11} = \frac{D - 3BC + 2B^3}{RT^3} \quad (1.41)$$

Ko'pgina sanoat gazlar uchun (azot, kislorod, havo, vodorod, geliy va boshqalar) holat tenglamasining quyidagi ko'rinishi keng qo'llanadi:

$$z = 1 + \sum_{n=1}^{10} \sum_{j=0}^7 B_{nj} \frac{w^n}{r^j}, \quad (1.41)$$

bu yerda $w = p/p_{kr}$ - keltirilgan zichlik; $\tau = T/T_{kr}$ - keltirilgan harorat; B_{nj} - eng kichik kvadratlar usuli bilan aniqlanuvchi koeffitsientlar. Hozirgi paytda ko'pgina kriomahsulotlar uchun (1.41) tenglama asosida standart ma'lumotlar jadvallari tuzilgan [1].

Nazorat savollari.

1. Allotropik o'zgarishlar nima?
2. Kritik, uchlama nuqtalar nima?
3. Real gazlar qanday xossalari bilan ideal gazlardan farqlanadi?
4. Ideal gaz hoilat tenglamalari qanday sharoitlar uchun o'rinli?
5. Holat tenglamasining virial shakli qanday hosil qilingan?

1.5. Qattiq moddalarning issiqlik-fizik xossalari

Issiqlik sig‘imi. 1819 yil Dyulong va Pti qattiq jism issiqlik sig‘imini o‘lchash asosida qattiq holatdagi barcha kimyoviy elementlar bir xil atom (molekulyar) issiqlik sig‘imiga C_v ega ekanlik qonunini kashf etdilar, issiqlik sig‘imi taqriban quyidagiga teng

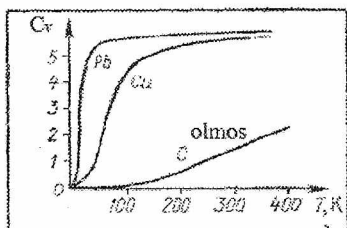
$$C_v = 6 \text{ kal}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \quad (1.42)$$

Keyinchalik bu qonun aniq emasligi va C_v temperaturaga bog‘liq holda o‘zgarishi ma’lum bo‘ldi. Olmos bunga misol bo‘la oladi. Olmosning issiqlik sig‘imi 6 kal/(mol·K) qiymatga temperatura 1000°C atrofida bo‘lganida yaqinlashadi; sovutilganida u tezda kamayadi va xona temperaturasida 1,5 kal/(mol·K) ga tenglashadi [2].

Yigirmanchi asr boshida V. Nernst xodimlari bilan ko‘plab qattiq jism issiqlik sig‘imlarini temperaturalar katta intervalida, absolyut nolga yaqin temperaturalarda ham, o‘lchashdi. Shu narsa ma’lum bo‘ldiki, barcha qattiq jismlar issiqlik sig‘imi (C_p va C_v) temperatura funksiyasidir va absolyut nolga yaqin temperaturalarda u nolga teng bo‘ladi:

$$C_p(T \rightarrow 0) = C_v(T \rightarrow 0) = 0 \quad (1.43)$$

Tajriba natijalariga ko‘ra, kimyoviy elementlarning qattiq holatida issiqlik sig‘imi C_v temperatura ko‘tarilishi bilan ortadi va Dyulong-Pti qonuni bilan aniqlanuvchi chegaraviy qiymatga intiladi. 1.10-rasmda qo‘rg‘oshin, mis va olmos uchun tajribadan olingan issiqlik sig‘imini temperaturaga bog‘liqlik egri chiziqlari ko‘rsatilgan. Agar qo‘rg‘oshinning issiqlik sig‘imi 6 kal/(mol·K) qiymatga 100 K temperaturada erishsa, u holda bu mis uchun 400 Kda, olmos uchun 1000 °C da kuzatiladi. Tajribalarning ko‘rsatishicha, Dyulong va Pti qonuni ko‘p elementlar uchun kristallarning erish nuqtasi yaqinida o‘rinlidir; bunda ko‘p moddalar uchun o‘zgarmas issiqlik sig‘imi $C_v = 6 \text{ kal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ oblasti xona temperaturasigacha cho‘ziladi [2].



1.10-rasm. Issiqlik sig‘imini temperaturaga bog‘liqligi

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \quad (1.44)$$

termodinamik ifodaga ko'ra, qattiq jismlarning C_v ni nazariy aniqlash uchun ularning ichki energiyasini temperaturaga bog'liqligini aniqlash lozim.

Kristall panjaraning qirralarida zarralar joylashganida ularning umumiy potensial energiyasini F bilan belgilaymiz. Bu kattalik manfiy ($F < 0$) bo'lib (tortishish kuchlari sababli), hajm (zarralar orasidagi o'rtacha masofa) funksiyasidir:

$$F = F(V) \quad (1.45)$$

Kristall zarralari panjara qirralari atrofida tebranma harakatlanadi. Har qanday yo'nalishdagi tebranishni uchta koordinata o'qi bo'ylab tebranishlar yig'indisi deb qarasa bo'ladi. Shunday qilib, kristall panjaradagi har bir zarraga uchta tebranish erkinlik darajasi mos keladi. Atom va metall kristall panjara zarralarining tebranish energiyasini topamiz. Bunday panjara zarralarining har bir tebranish erkinlik darajasiga ε o'rtacha energiya mos kelsin. U holda panjaradagi har bir zarraga o'rta hisobda 3ε energiya mos keladi. Modda bir molining tebranish energiyasini bir zarraning o'rtacha energiyasini Avogadro soniga ko'paytirib topamiz:

$$U_k = 3\varepsilon N_o \quad (1.46)$$

(1.45) va (1.46) ifodalar yig'indisi metall va atom kristallari ichki energiyasini aniqlaydi:

$$U = 3N_o\varepsilon + F(V) \quad (1.47)$$

$|F(V)| > 3\varepsilon N_o$ bo'lgani uchun, $U < 0$ ekanini qayd etamiz, aynan shuning uchun kristall panjara tugunlari yaqinida zarrachalar ushlanib qoladi.

Kristall zarrachalar tebranma harakat erkinlik darajasi bo'yicha energiyaning bir tekis taqsimlanish klassik qonuniga bo'ysunsin. U holda bir erkin darajasiga to'g'ri keluvchi o'rtacha energiya $\varepsilon = kT$ ga teng. Bu qiymatni (1.47) ga qo'yib va $N_o k = R$ ekanini e'tiborga olib, quyidagini yozamiz:

$$U = 3RT + F(V) \quad (1.48)$$

(1.44) ga binoan oxirgi ifodadan issiqlik sig'imini aniqlaymiz:

$$C_v = 3R. \quad (1.49)$$

$R \cong 2 \text{ kal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ deb olib, klassik nazariya natijasi Dyulong va Pti qonunini olarniz.

(1.49) ifodani beruvchi klassik nazariya qattiq jism issiqlik sig'imini temperaturaga bog'liqligini ifodalamaydi [2].

Eynshteyn kvant nazariyasini qattiq jismlar issiqlik sig'imini hisoblashga qo'llagan (1907 y.). Kvant nazariyasiga ko'ra, ossillyator energiyasi $h\nu$ kattalikka karralidir, bu erdaviy – ossillyatorning tebranish chastotasi, h – Plank doimiysi. Bunda ossillyatorning o'rtacha energiyasi nafaqat temperaturaning, balki chastotaning ham funksiyasidir:

$$\varepsilon = \frac{h\nu}{e^{h\nu/RT} - 1}. \quad (1.50)$$

(1.47) va (1.50) dan quyidagini olamiz:

$$U = 3N_o \frac{h\nu}{e^{h\nu/RT} - 1} + F(V). \quad (1.51)$$

Bu ifodani temperatura bo'yicha differensiallab, quyidagini hosil qilamiz:

$$C_v = 3R \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 e^{\frac{h\nu}{kT}} / \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)^2. \quad (1.52)$$

T ning katta qiymatida issiqlik sig'imi $3R$ ga teng bo'ladi, ya'ni Dyulong va Pti qonunini beradi, $T = 0$ da esa, tajribaga ko'ra, issiqlik sig'imi nolga teng bo'ladi.

Issiqlik sig'imining temperaturaga bog'liqlik (1.52) ifodasi tajriba natijalariga yaqin, faqatgina past temperaturalarda nazariya va tajriba kattaliklari sezilarli farqlanadi. Eynshteyn nazariyasida kristallning barcha atomlari bir xil chastota bilan tebranadi deb qabul qilingan. Bu chastota shunday olinganki, (1.52) ifoda bilan issiqlik sig'imining hisoblangan qiymatlari tajriba natijalariga yaqin bo'lsin [2].

Haqiqatda esa kristalda tebranishlar spektri sodir bo'ladi – kristall panjarada faqatgina alohida atomlar emas, balki ularning guruhlari ham tebranadi. Kristallarda tebranishlar chastotasining spektrini P. Debay e'tiborga olishi issiqlik sig'imi kvant nazariyasini tajribaga yaxshi mos kelishini ta'minladi.

Shuni aytish kerakki, tajribada C_v emas, balki C_p o'lchanadi. Ammo, kristallarning issiqlik tufayli kengayishi ozligi tufayli ular uchun C_p va C_v orasidagi farq katta emas [2].

Issiqlik o'tkazuvchanlik. Fizika nuqtaiy nazaridan issiqlik o'tkazuvchanlik hodisasi kinetik energiyaning ko'chishidir va zaryad, massa ko'chish tenglamalariga o'xshash tenglamalar bilan ifodalanadi [3].

Bir o'lchamli holda issiqlik oqimining zichligi, ya'ni 1 s davomida 1 m^2 yuzadan o'tuvchi issiqlik miqdori temperatura gradientiga to'g'ri proporsionaldir:

$$\frac{dQ}{F d\tau} = \lambda \frac{dT}{dl} \quad (1.53)$$

Proporsionallik koeffitsienti λ ichki issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti yoki ko'pincha, issiqlik o'tkazuvchanlik deb ataladi. Issiqlik o'tkazuvchanlik qattiq jismning bir nuqtasidan ikkinchisiga ular o'rtasida temperaturalar farqi bo'lganida jismning issiqlik energiyasini o'tkazish qobiliyatini xarakterlaydi.

Issiqlik o'tkazuvchanlik $Vt/(m \cdot K)$ da o'lchanadi. Texnikada temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti qo'llaniladi, u issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti bilan λ quyidagicha bog'langan:

$$a = \lambda / \rho c \quad (1.54)$$

bu yerda ρ – zichlik; c – issiqlik sig'imi.

Temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti issiqlik jarayonlarida temperaturaning o'zgarish tezligini xarakterlaydi.

Metallarda issiqlik energiyasi ikki xil tashuvchi orqali uzatiladi: elektronlar harakati va kristall panjara tebranishi (fononlar). Mos ravishda, issiqlik o'tkazuvchanlik ikki – elektronli (λ_{el}) va panjaraviy (λ_{pan}) qismdan iborat. Metall va qotishmalar issiqlik o'tkazuvchanligining asosiy mexanizmi issiqlikni elektronlar bilan tashilishidir. Sof metallarda panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik elektronliga nisbatan kichik (tahminan 30 martaga), lekin qotishmalarda ular bir-biriga ancha yaqin.

Nometall qattiq jismlarda (ion va kovalent panjaralarda) fononlar orqali amalga oshadi va ulardagi issiqlik o'tkazuvchanlik metallarnikidan 1-2 karra kichik. Yarim o'tkazgichlarda issiqlik o'tkazuvchanlikning ma'lum bir qismi elektron uyg'onishlarga – eksitonlarga to'g'ri keladi [3].

Kristall panjaraning issiqlik o'tkazuvchanligi. Panjaraning issiqlik o'tkazuvchanligi atomlar tebranishining nogarmonikligi bilan ifodalanadi. Agar atomlar garmonik tebranib, o'zaro ta'sirlashmaydigan to'lqinlar panjarada tarqalganida nogarmonik issiqlik o'tkazuvchanlik yuzaga kela olmasdi. To'lqinlar orasida o'zaro ta'sirlashuvning yo'qligi ularning panjarada so'nmasdan, ya'ni hech qanday qarshiliksiz tarqalishiga imkon bergan bo'lar edi [3].

Agar bunday kristalda temperaturalar farqini hosil qilish mumkin bo'lganida, katta amplitudada tebranuvchi issiq tomondagi atomlar o'z energiyasini qo'shni atomlarga uzatgan bo'lar edi va issiqlik to'lqini panjara bo'ylab tovush tezligida tarqalar edi. Bu to'lqin hechqanday qarshilikka uchramasligi tufayli, temperaturalar cheksiz kichik farqida ham issiqlik

oqimi juda katta qiymatga erishgan bo'lar edi; bunday kristallning issiqlik o'tkazuvchanligi cheksiz katta bo'lar edi.

Juda past bo'lmagan temperaturalarda atomlarning real kristallardagi tebranishlari nogarmonikdir. Nogarmoniklik shunga olib keladiki, panjaraning normal tebranishlari mustaqilligini yo'qotadi va bir-biri bilan o'zaro ta'sirlashadi: energiya almashinadi hamda o'zining tarqalish yo'nalishini o'zgartiradi (bir-birida so'nadi). Aynan shunday elastik to'lqinlar o'zaro ta'sirlashish jarayonlarining kechishi oqibatida bir chastotadagi to'lqin tebranishidan boshqasiga energiya uzatish va kristallda issiqlik muvozanati o'rnatilishi mumkin bo'ladi [3].

Normal tebranishlarning bir-birida so'nish jarayonini fononlar orqali, termik qo'zg'algan kristallni fonon bilan to'lgan quti misolida tushuntirish qulay. Garmonik yaqinlashuvda, qaysiki panjaraning normal tebranishlari mustaqil bo'lganida, fononlar ideal gazni tashkil etadi (o'zaro ta'sirlashmaydigan fononlar gazi). Nogarmonik tebranishlarga o'tish fononlarning o'zaro ta'sirlashuviga ekvivalentdir, buning natijasida fononni ikki va undan ortiqqa bo'linishi hamda ikkita fononni birlashish jarayonlari sodir bo'lishi mumkin. Bunday jarayonlarni fonon-fonon bo'linishlari deb atash qabul qilingan. Ularning sodir bo'lish ehtimolligi har qanday parchalanish jarayonlari ehtimolligi kabi parchalanishning samarali kesimi σ_f bilan xarakterlanadi. Agar parchalanish jarayonlariga nisbatan fononni r_f radiusli sharcha deb faraz qilinsa, u holda $\sigma_f = \pi r_f^2$. Fononni fonon parchalashi faqat shunday holda sodir bo'lishi mumkinki, agar ularning samarador kesimlari bir-birini qoplaydigan masofagacha yaqinlashsa. Atom tebranishlari nogarmonikligi natijasida parchalanish sodir bo'lgani uchun aytish mumkinki, fononning samarali kesim radiusi nogarmoniklik koeffitsientiga b proporsionaldir, $\sigma_f \sim b^2$ [3].

Parchalanishning samarali kesimini bilgan holda fononlarning erkin harakatlanish uzunligini, ya'ni ikki ketma-ket parchalanish orasida o'tilgan o'rtacha masofani hisoblash mumkin [3]:

$$l_f = \frac{1}{n_f \sigma_f} \sim \frac{1}{n_f b^2}, \quad (1.55)$$

bu yerda n_f — fononlar konsentratsiyasi. Fononlar konsentratsiyasi temperaturaga quyidagicha bog'langan:

$$n_f \sim \frac{1}{e^{hv/kT} - 1}. \quad (1.56)$$

Gazlarning kinetik nazariyasida issiqlik o'tkazuvchanlik quyidagiga teng:

$$\lambda = l c_v v / 3 \quad (1.57)$$

bu yerda l – gaz molekularining erkin harakatlanish uzunligi, v – ularning issiqlik harakati tezligi, c_v – gaz hajm birligining issiqlik sig'imi.

Bu formulani fonon gaziga qo'llaymiz, bunda c_v – kristall (fonon gazi) hajm birligining issiqlik sig'imi, $l = l_f$ – fononlar erkin yurish uzunligi, $v = v_f$ – tovush tezligi (fononlar tezligi) deb qabul qilamiz. U holda, panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti uchun ushbu ifodani hosil qilamiz:

$$\lambda_{pan} = l_f c_v v_{tov} / 3. \quad (1.58)$$

Formulaga l_f qiymatini (1.55) dan olib,

$$\lambda_{pan} \sim \frac{c_v v_{tov}}{n_f b^2} \quad (1.59)$$

ni hosil qilamiz.

1.2-jadval ayrim moddalarda issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti va fononlar harakatlanish uzunligi haqida umumiy tushuncha beradi [3].

1.2-jadval

SiO₂ va NaCl kristallarining issiqlik xossalari

Kristall	T, K	$c, 10^3$ kJ/(m ³ ·K)	$\lambda, \text{Wt}/(\text{m} \cdot \text{K})$	l_f, nm
SiO ₂	270	2,0	13	400
	80	0,5	50	5400
NaCl	270	1,9	7	210
	80	1,0	26	1500

Panjara issiqlik o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligini nazariy tahlil qilamiz.

Yuqori temperaturalar hududida ($T > \theta_D$) (1.56) ifoda mahrajini qatorlarga yoyish va yoyilgan birinchi had bilan chegaralanib, $e^x - 1 \approx x$ deb hisoblash mumkin. U holda $n_f \sim T$ va

$$\lambda_{pan} \sim \frac{c_v v_{tov}}{T b^2}. \quad (1.60)$$

Bu hududda c_v deyarli T ga bog'liq bo'lmaganligi tufayli panjaraning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti absolyut temperaturaga teskari proporsional bo'lishi $\lambda_{pan} \sim 1/T$ kerak. (1.59) ifodaga nogarmoniklik koeffitsienti b va tovush tezligi v_{tov} kiradi, bu kattaliklar qattiq jism zarralari o'rtasidagi ta'sirlashuvga bog'liq. Ta'sirlashuv kamayganida v_{tov} ham

kamayadi, b esa ortadi, chunki ta'sirlashuvning kuchsizlanishi issiqlik tebranishlarining amplitudasini (ma'lum temperaturada) va ular nogarmonikligining o'sishiga olib keladi. (1.60) ga ko'ra bu ikkala omil ham λ_{pan} ni kamaytirishi kerak. Bu tajribada tasdiqlangan [3].

Misol tariqasida 1.3-jadvalda olmos, kremniy, germaniyaning olmos panjarali valent kristallari issiqlik o'tkazuvchanligi va bog'langan energiya o'lchami bo'lgan sublimatsiya issiqligi Q_{subl} keltirilgan. Jadvaldan ko'rinadiki, bog'langan energiyani olmosdan kremniyga va germaniyga o'tishidagi kamayishi panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlikni anchaga kamayishi bilan sodir bo'ladi [3].

1.3-jadval

Olmos panjarali elementlarning sublimatsiya issiqligi va issiqlik o'tkazuvchanligi

Modda	$Q_{subl}, 10^5 \text{ J/mol}$	$\lambda, \text{ Wt/(m}\cdot\text{K)}$
Olmos	71,2	550
Kremniy	46,1	137
Germaniy	37,0	54

Batafsil tahlilning ko'rsatishicha, λ_{pan} atomlar massasiga M bog'liq bo'lib, M ning ortishi bilan kamayadi. Bundan shunday xulosaga kelish mumkin: Mendeleev jadvalining yuqori qismidagi engil elementlar (B, C, Si) uchun panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti ikki-uch xonali son qiymatlarga $\text{Vt/(m}\cdot\text{K)}$; jadvalning o'rta qismidagi elementlar uchun λ_{pan} bir xonali son $\text{Vt/(m}\cdot\text{K)}$, jadvalning quyi qismidagi og'ir elementlar uchun – o'nli ulushli qiymatlarga $\text{Vt/(m}\cdot\text{K)}$ ega.

Ta'kidlash lozimki, yengil zarrachali va qattiq bog'li kristallarda panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik katta qiymatlarga ega bo'ladi. Masalan, xona temperaturasida olmos uchun λ_{pan} issiqlikni eng yaxshi o'tkazuvchi metall – kumushnikidan ($\lambda_{pan} = 407$) $\text{Vt/(m}\cdot\text{K)}$ katta [3].

Debay temperaturasidan past temperaturalarda T kamayishi bilan fononlar konsentratsiyasi keskin kamayadi, oqibatda ularning erkin harakatlanish masofasi keskin oshadi va $T \leq \theta_D/20$ da kristall o'lchami bilan taqqoslasa bo'ladigan kattalikka erishadi. Odatda, kristall devorlari fononlarni yomon qaytargani sababli temperaturani yanada kamaytirish fononlar harakatlanish o'rtacha uzunligini l_f oshirmaydi, chunki o'rtacha

uzunlik kristall o'lchamlari bilan aniqlanadi. Shuning uchun o'tapast temperaturalarda ($T \ll \theta_D$) panjara issiqlik o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi kristall issiqlik sig'imini T ga bog'liqligi bilan aniqlanadi. Masalan, past temperaturalar hududida $c_v \sim T^3$ bo'lgani uchun panjaraviy issiqlik sig'imi ushbu qonunga bo'ysunadi [3]:

$$\lambda_{pan} \sim T^3 \quad (1.61)$$

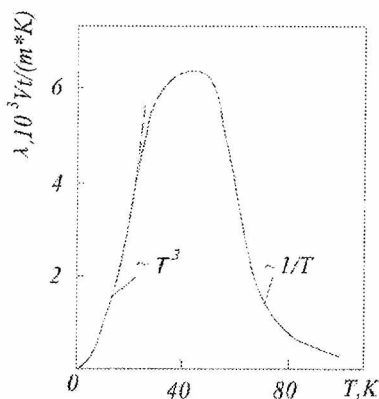
Past, ammo Debay temperaturasi bilan taqqoslash mumkin bo'lgan temperaturalar hududida ($T \leq \theta_D$) fononlar erkin harakatlanish uzunligi temperaturaga bog'liq holda o'zgaradi:

$$l_f \sim 1/n_f \approx e^{-hv/kT} \sim e^{-\theta_D/T}$$

Mos ravishda issiqlik o'tkazuvchanlik

$$\lambda_{pan} \sim c_v(T) \cdot e^{-\theta_D/T}. \quad (1.62)$$

Turli temperaturalar hududida panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlikni temperaturaga bog'liqlik tahlili shuni ko'rsatadiki, temperaturalar katta diapazonida dielektriklarning issiqlik o'tkazuvchanligi ekstremal xarakterga ega bo'lishi kerak; bu tajribalarda o'z tasdiqini topgan (1.11-rasm) [3].



1.11-rasm. Yoqut issiqlik o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi

Haqiqatdan ham, temperatura T ortib borishi bilan fononlar konsentratsiyasi oshadi, bu o'z-o'zidan issiqlik o'tkazuvchanlikni λ_{pan} ortishiga olib kelishi kerak. Ammo, fononlar konsentratsiyasini oshishi fonon-fonon parchalanishini jadallashishi va fononlar erkin harakati uzunligining l_f qisqarishi bilan sodir bo'ladi, bu esa issiqlik

o'tkazuvchanlikni kamayishiga olib keladi. n_f ning katta bo'lmagan qiymatlarida birinchi faktor yetakchi o'rinni egallaydi va T ortishi bilan λ_{pan} ko'payadi. n_f ning ma'lum qiymatidan boshlab esa ikkinchi faktor asosiy o'rinni egallaydi va λ_{pan} maksimumdan o'tib T ortishi bilan kamayadi. Yuqori temperaturalar hududida bunday kamayish T ga tahminan teskari proporsionaldir. Qayd etish lozimki, $\lambda_{pan}(T)$ egri chizig'idagi maksimumning o'rni kristallning o'lchamlariga bog'liq [3].

Shunga o'xshash qonuniyat amorf dielektrlarda kuzatilishi zarur. Fononlarning parchalanishi barcha temperaturalarda yetakchi bo'lishi kerak va shuning uchun fononlar erkin harakatining uzunligi l_f temperaturaga bog'liq bo'lmisligi lozim. Shu bilan birga dielektrlarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti past temperaturalarda T^3 ga proporsional bo'lishi va yuqori temperaturalarda T ga bog'liq bo'lmisligi lozim; bu tajribalarda tasdig'ini topgan.

Metallarning issiqlik m o'tkazuvchanligi. Dielektrlardan farqli metallarda issiqlikni o'tishi nafaqat fonon, balki erkin elektronlar vositasida amalga oshadi. Shuning uchun metallarning issiqlik o'tkazuvchanligi panjaraviy va erkin elektronlar vositasidagi issiqlik o'tkazuvchanlikdan iborat [3]:

$$\lambda = \lambda_{pan} + \lambda_{el}$$

Elektron gaz issiqlik o'tkazuvchanligini λ_{el} (1.57) formuladan foydalanib aniqlash mumkin. Unga elektron gaz issiqlik sig'imini c_{el} , elektronlar tezligini v_F va elektronlar erkin harakat uzunligini l_{el} qo'yib quyidagini hosil qilamiz:

$$\lambda_{el} = c_{el} v_F l_{el} / 3. \quad (1.63)$$

Issiqlik sig'imi uchun (3.188) formulani [3] e'tiborga olib ushbu formulani yozamiz

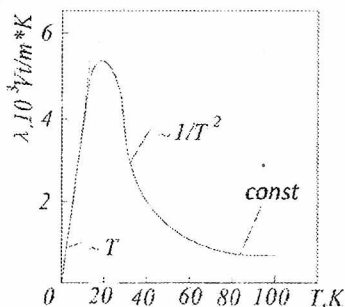
$$\lambda_{el} = \frac{\pi^3 N_0 k^2}{3 m v_F} l_{el} T. \quad (1.64)$$

Sof metallar issiqlik o'tkazuvchanligini temperaturaga bog'liqligini sifat jihatdan aniqlaymiz.

Yuqori temperaturalar hududida (1.64) formulasiga kiruvchi barcha kattaliklardan faqatgina l_{el} temperaturaga bog'liq. Sof metallar uchun juda past bo'lmagan temperaturalarda l_{el} fononlarda elektronlarning parchalanishi bilan aniqlanadi va fononlar konsentratsiyasiga teskari

proporsionaldir: $\lambda_{el} \sim 1/n_f$. Yuqori temperaturalar hududida $n_f \sim T$ bo'lgani uchun $\lambda_{el} = const$.

Shunday qilib, yuqor i temperaturalar hududida sof metallar issiqlik o'tkazuvchanligi temperaturaga bog'liq bo'lmasligi kerak; bu tajribada tasdiqlangan. 1.12-rasmda mis uchun tajribada aniqlangan $\lambda(T)$ bog'liqlik grafigi ko'rsatilgan [3].



1.12-rasm. Misning issiqlik o'tkazuvchanligini temperaturaga bog'liqligi

Grafikdan ko'rinadiki, 80÷100 K dan yuqori temperaturalarda misning issiqlik sig'imi temperaturaga bog'liq emas.

Past temperaturalar ($T \ll \theta_D$) hududida fononlar konsentratsiyasi $n_f \sim 1/T^3$, shuning uchun

$$l_{el} \sim 1/T^3.$$

Bu ifodani (1.64) formulaga qo'yib quyidagini olamiz:

$$\lambda_{el} \sim 1/T^2 \tag{1.65}$$

Demak, Debay qonuni amal qiluvchi past temperaturalar hududida metallar issiqlik o'tkazuvchanligi absolyut temperatura kvadratiga teskari proporsional bo'lishi kerak; bu ham tajribada tasdig'ini topgan [3].

O'ta past temperaturalar (0 K ga yaqin) hududida fononlarning metalldagi konsentratsiyasi juda ham kam bo'ladiki, elektronlar parchalanishi uchun metall qanchalik toza bo'lmasin ularda doim mavjud aralashma atomlari asosiy ahamiyatga ega bo'ladi. Bunday holda elektronlar erkin harakat uzunligi $l_{el} \sim 1/N_{ar}$ (N_{ar} – aralashma atomlarining konsentratsiyasi) (1.63) ga ko'ra temperaturaga bog'liq bo'lmay qoladi va metallning issiqlik o'tkazuvchanligi T ga proporsional bo'ladi:

$$\lambda_{el} \sim T \tag{1.66}$$

Metallar issiqlik o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqlik egri chizig'ini past temperaturalarda maksimumga ega (1.12-rasm). Bu shunday tushuntiriladiki (1.65) va (1.66) ga ko'ra $T \ll \theta_D$ da $1/\lambda_{el}$ quyidagi funksiya bilan ifodalanadi:

$$1/\lambda_{el} = aT^2 + b/T, \quad (1.67)$$

bu erda a va b – o'zgarimas kattaliklar. Birinchi had panjara (fononlar) tebranishida elektronlarning parchalanishi bilan bog'liq issiqlik qarshiligini, ikkinchi had – aralashma va panjara defektlaridagi parchalanishni ifodalaydi. Bu hadlarning birgalikdagi ta'siri issiqlik o'tkazuvchanlikni temperaturaga bog'liqlik grafigida egri chiziq maksimumi paydo bo'lishiga olib keladi. Metallning tozalik darajasi kamayishi bilan maksimal issiqlik o'tkazuvchanlik yuqori temperaturalar tomoniga ko'chishini va egri chiziqning balandligi kamayishini ko'rish mumkin [3].

(1.63) formuladan foydalanib, xona temperaturasida metallar issiqlik o'tkazuvchanligini baholaymiz. Metallar uchun $c_{el} \cong 0,01c_v \cong 3 \cdot 10^4 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, $v_{tov} \cong 10^4 \text{ m/s}$, $\lambda_{el} \cong 10^{-8} \text{ m}$. Bu qiymatlarni (1.63) ga qo'yib, $\lambda_{el} \cong 10^2 \text{ Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ni topamiz.

Shunday qilib, metallar issiqlik o'tkazuvchanligi yuzlab $\text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ga yetishi lozim, bu tajriba natijalariga mos keladi (1.4-jadval) [3].

1.4-jadval

Ayrim metallar va qotishmalarning xona temperaturasidagi issiqlik o'tkazuvchanligi

Metall	$\lambda, \text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$	Metall	$\lambda, \text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$
Kumush	403	Alyumin	210
Mis	384	Nikel	60
Oltin	296	Konstantan	23

Metallning panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik ulushini baholaymiz. Buning uchun (1.58) ni (1.64) ga nisbatini olamiz:

$$\frac{\lambda_{pan}}{\lambda_{el}} = \frac{c_v v_{tov} l_f}{c_{el} v_f l_{el}}$$

Toza metall uchun $c_{el}/c_v \cong 0,01$, $v_{tov} \cong 5 \cdot 10^3 \text{ m/s}$, $v_f \cong 10^6 \text{ m/s}$, $l_f \cong 10^{-9} \text{ m}$, $l_{el} \cong 10^{-8} \text{ m}$. Uholda $\lambda_{pan}/\lambda_{el} \cong 5 \cdot 10^{-2}$.

Demak, toza metallarning issiqlik o'tkazuvchanligi ular elektron gazlarining issiqlik o'tkazuvchanligi bilan aniqlanadi; panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik ulushi bor yo'g'i bir necha foizni tashkil qiladi.

Ammo, bu holat metall qotishmalariga o'tilganida keskin o'zgarishi mumkin; ularda elektronlar tarqalishining asosiy mexanizmi aralashma atomlarida tarqalishdir. Bunday tarqalishdagi elektronlar erkin harakatlanish uzunligi aralashma konsentratsiyasiga teskari proporsional $l_{el} \sim 1/N_{ar}$ va N_{ar} ning katta qiymatlarida fononlar erkin harakatlanish uzunligi l_f bilan taqqoslasa bo'ladi: $l_{el} \approx l_f$. Tabiiyki, bu holda elektronlarning issiqlik o'tkazuvchanlikdagi ulushi fononlarnikidek, ya'ni $\lambda_{el} \approx \lambda_{pan}$. Bu ham tajribalarda tasdiqlangan. 1.4-jadvalning oxirgi ustunida konstantanning (60% mis va 40% nikel qotishmasi) issiqlik o'tkazuvchanligi berilgan. U nikel va misnikidan ancha kichik. Bu shuni ang'latadiki, konstantanda elektronlarning tarqalishiga asosiy sabab aralashma atomlari panjarani qiyshaytirishidir [3].

Umumiy issiqlik o'tkazuvchanlikka panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik sezilarli ta'sirining yaqqol misoli bo'lib, qiyin eruvchan metallar karbidlari xizmat qiladi. Masalan, temperatura 310 K dan kichik bo'lganida TiC birikmasi uchun panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik elektron tashkil etuvchilikidan katta.

Metallarning issiqlik o'tkazuvchanligi xudd ielektr o'tkazuvchanligi kabi tashqi magnit maydoni ta'sirida o'zgaradi. Bunda issiqlik o'tkazuvchanlik ortishi ham kamayishi ham mumkin. Issiqlik o'tkazuvchanlikning eng katta o'zgarishlari (2÷5 barobar) ko'ndalang maydon ta'sirida kuzatiladi [3].

Sof metallar issiqlik o'tkazuvchanligini o'rganishda e'tiborni tortadigan tomoni shuki, ko'plab metallarda elektr o'tkazuvchanlik qanchalik katta bo'lsa, issiqlik o'tkazuvchanlik shuncha katta bo'ladi. Bunday bog'liqlik birinchi bor G. Videman va P. Frans tomonidan tajribada aniqlangan, L. Lorens tomonidan nazariy asoslangan. Ular shuni isbotladilarki, metallarning issiqlik o'tkazuvchanligini λ elektr o'tkazuvchanligiga σ nisbati absolyut temperaturaga T proporsionaldir:

$$\lambda/\sigma = LT \quad (1.68)$$

Bu ifoda Videman-Frans-Lorens qonunini ifodalaydi: L proporsionallik koeffitsienti Lorens soni deb ataladi.

λ_{el} uchun (1.64) va σ uchun (3.119) [3] formulalardan foydalanib Videman-Frans-Lorens qonunini olish mumkin:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 T. \quad (1.69)$$

Bundan Lorens sonining L qiymati aniqlanadi:

$$L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k}{e}\right)^2 = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{Vt} \cdot \text{Om} \cdot \text{K}^{-2}. \quad (1.70)$$

Bu nazariy qiymat ko'pgina sof metallar uchun tajribada xona temperaturasida olingan $2,1 \div 2,8 \cdot 10^{-8} \text{Vt} \cdot \text{Om} \cdot \text{K}^{-2}$ qiymat bilan mos keladi. Ferromagnit metallar, xususan, temir Lorens sonining katta qiymatiga ega:

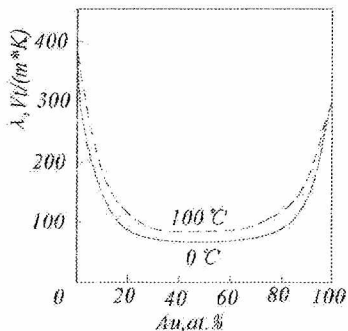
$$L = 3,0 \cdot 10^{-8} \text{Vt} \cdot \text{Om} \cdot \text{K}^{-2}.$$

Yarim o'tkazgichlarda issiqlik o'tkazuvchanlik sof elektronli emas. Uning kattagina qismini panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik tashkil etadi. Ammo, bu holda ham yarim o'tkazgichning elektron tashkil etuvchisi Videman-Frans-Lorens qonuniga bo'ysunadi, faqat Lorens soni $L = 2(k/e)^2$ ga teng.

Videman-Frans-Lorens qonuni metallar uchun nisbatan yuqori temperaturalarda – xona temperaturasi va undan yuqoriroq temperaturalarda o'rinli. Lekin yuqori temperaturalarda bu qonundan og'ish bo'lishi mumkin, chunki yuqori temperaturada metallar, ayniqsa, qotishmalarda panjaraviy issiqlik o'tkazuvchanlik sezilarli ahamiyatga ega [3].

O'zining taqribiy xarakterda ekanligiga qaramay Videman-Frans-Lorens qonuni elektr o'tkazuvchanlikka oid qonunlarni issiqlik o'tkazuvchanlikka qo'llash va materialning elektr o'tkazuvchanligi bo'yicha issiqlik o'tkazuvchanligi haqida tasavvurga ega bo'lish imkonlarini beradi. Bu imkoniyatning amaliy ahamiyati shundaki, ob'ektni (materialni) issiqlik jihatdan izolyasiyalash mushkulligi sabab issiqlik o'tkazuvchanlikni o'lchash elektr o'tkazuvchanlikka nisbatan qiyin va ishonchliligi kam.

Qotishmalarning issiqlik o'tkazuvchanligi. Elektr o'tkazuvchanlik va issiqlik o'tkazuvchanlik o'rtasidagi umumiy o'xshashlikka asosan aytish mumkinki, qotishmaning kimyoviy tarkibi hamda fazaviy holati o'zgarganida issiqlik o'tkazuvchanlik bilan elektr o'tkazuvchanlik bir xil qonuniyatlar bo'yicha o'zgaradi [3].



1.13-rasm. Ag–Au qotishmasining issiqlik o‘tkazuvchanligi

Qotishmalar tarkibi sof metallardan qanchalik farqlansa, ularning issiqlik o‘tkazuvchanligi shunchalik kamayadi, minimal qiymat konsentratsiya 50% bo‘lgan holga mos keladi (1.13-rasm). Qotishmaga aralashmani nisbatan kam miqdorda qo‘shish ham issiqlik o‘tkazuvchanlikni keskin kamaytiradi. Minimal qiymatdan so‘ng konsentratsiyani yanada oshirish issiqlik o‘tkazuvchanlikka kamroq ta‘sir etadi [3].

Geterogen aralashmalarni hosil qilishda binar sistemaning issiqlik o‘tkazuvchanligi komponentlarning hajmiy konsentratsiyasiga bog‘liq ravishda chiziq o‘zgaradi. Issiqlik o‘tkazuvchanlikning bunday bog‘liqligi elektr o‘tkazuvchanlikdagi kabi holat diagrammasining sof metallar bilan emas, balki eritmalar yoki α , β oraliq fazalar bilan chegaralangan geterogen hududida ham kuzatilishi mumkin. Bu holda geterogen hududdagi har bir qotishmaning issiqlik o‘tkazuvchanligi chegaraviy konsentratsiyali qattiq eritma va oraliq fazalarning λ_{α} hamda λ_{β} qiymatlarini tutashtiruvchi to‘g‘ri chiziq bo‘yicha aniqlash mumkin. Geterogen aralashmalarda elektr o‘tkazuvchanlikni chiziqli bog‘liqlikdan og‘ishiga oid aytilganlarni issiqlik o‘tkazuvchanlikka ham takrorlash mumkin. Geterogen hududdagi har qanday qotishma uchun elektr o‘tkazuvchanlikning ham issiqlik o‘tkazuvchanlikning ham qiymatlari fazalarning shu xossalari chegaraviy qiymatlari orasida joylashadi. Geterogen aralashmalarning mahsus holini kompozit materiallar namoyon qilib, ular metall yoki qotishmaning boshqa metall yoki qotishma matritsasida tekis joylashgan parallel tolalari yoki plastinalaridan tashkil topadi. Bunday materiallarning issiqlik o‘tkazuvchanligini hisoblashda tolalar (plastinalar) joylashish geometriyasini e‘tiborga olish kerak [3].

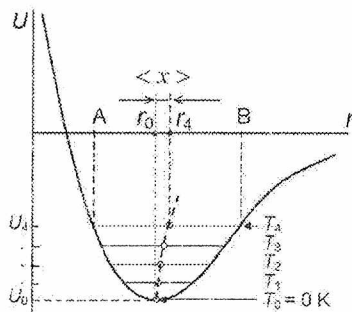
Qattiq jismlarning termik kengayishi. Temperatura oshganida atomlarning kristall panjara qirralaridagi issiqlik tebranishlari jadallashadi. Natijada, atomlar aro masofalar va kristallning chiziqli o'lchamlari kattalashadi. Qattiq jismini isitishda (sovitishda) chiziqli o'lchamlarini o'zgartirish qobiliyati chiziqli va hajmiy kengayish koeffitsientlari (mos ravishda α va β) bilan ifodalanadi [3]:

$$\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_p; \quad (1.71)$$

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{D} \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_V \quad (1.72)$$

bu erda $D = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_T$ – barcha tomonlama siqilish moduli. Izotrop qattiq jismlarda chiziqli kengayish koeffitsientlari barcha yo'nalishlar bo'yicha teng: $\beta = 3\alpha$.

Issiqlik kengayish to'lqinlarning nogarmonikligi bilan xarakterlanadi: atomlar orasidagi o'rtacha masofa nogarmonik yaqinlashuvda tebranishlar amplitudasiga, demakki, temperaturaga bog'liq emas. Darhaqiqat, qattiq jism zarralarining potensial energiyasini ular orasidagi masofaga bog'liqlik egri chizig'iga murojaat qilaylik (1.14-rasm) [3].



1.14-rasm. Atom potensial energiyasi o'zgarishining atomlar orasidagi masofaga bog'liqligi

Absolyut nol temperaturada zarralar o'zaro ta'sirlashuv energiyasi minimal qiymatiga U_0 mos r_0 masofalarda joylashadi. Absolyut nolda bu masofalar qattiq jism o'lchamini belgilaydi. Temperatura ortishi bilan zarralar muvozanat holatlari atrofida tebrana boshlaydi. Tebrana yotgan zarra muvozanat holatida uning potensial energiyasi minimal, kinetik energiyasi

maksimal bo'ldi. Chekka holatlarda tebranuvchi zarra maksimal potensial energiyaga va nolga teng kinetik energiyaga ega bo'ldi. Qattiq jism temperaturasiining ko'tarilishi maksimal potensial energiyani ortishiga olib keladi: T_4 temperaturada U_4 bo'ldi. Potensial energiyaning egri chiziqdagi har bir qiymatiga atomlararo masofaning ikki qiymati mos kelib (masalan, U_4 uchun A va V nuqtalar), ulardan birinchisi eng katta yaqinlashishni, ikkinchisi esa qo'shni zarrachalarning eng katta uzoqlashishini ifodalaydi. Potensial energiyaning berilgan maksimal qiymatida tebranayotgan zarralarning o'rta holati unga mos gorizontol kesmaning o'rtasi bilan ifodalanadi. Masalan, T_4 temperatura uchun zarralar orasidagi o'rtacha masofa $r_4 > r_0$ ga teng. Bu zarralar orasidagi o'rtacha masofani x ga ortishiga mosdir [3].

Shunday qilib, temperatura ko'tarilishi bilan tebranayotgan zarralarning maksimal potensial energiyasi, ularning panjara qirralarida tebranish amplitudasi va zarralar orasidagi o'rtacha masofa ortadi. Bularga sabab o'zaro ta'sirlashish potensial energiyasining egri chizig'i nosimmetrikligidir, ya'ni panjara qirralarida zarralar tebranishining nogarmonikligidir.

Atomlar chizikli zanjiri uchun issiqlik kengayish koeffitsientini α baholaymiz. [4] da olingan natijaga ko'ra, chizikli kengayish koeffitsienti jismning issiqlik sig'imga proporsionaldir [3]:

$$\alpha = \frac{1}{r_0} \frac{d\langle x \rangle}{dT} = \frac{b}{a^2 r_0} \cdot \frac{dE}{dT} = \frac{b}{a^2 r_0} \cdot c_v, \quad (1.73)$$

bu erda c_v – bir zarraga nisbatan olingan issiqlik sig'imi.

Yuqori temperaturalar hududida chizikli tebranuvchi zarralar energiyasi kT ga teng bo'lgani uchun bir zarraga nisbatan olingan issiqlik sig'imi c_v Bolsman doimiysiga k teng. Shuning uchun atomlar chizikli zanjirining kengayish koeffitsienti

$$\alpha = \frac{bk}{a^2 r_0}.$$

Turli qattiq jismlar uchun son qiymatlarni bu formulaga qo'yilishi α ning qiymatlari $10^{-4} \div 10^{-5}$ bo'lishini ko'rsatadi; bu tajriba natijalariga mosdir. Tajriba shuni ham ko'rsatadiki, yuqori temperaturalarda α temperaturaga bog'liq emas [3].

Past temperaturalar hududida α o'zini issiqlik sig'imi kabi tutadi: temperatura pasayishi bilan kamayib, absolyut nolga yaqinlashganda nolga intiladi.

Uch o'Ichamli izotrop qattiq jism uchun chiziqli kengayish koeffitsientini aniqlashni birinchi bo'lib Gryunayzen taklif qilgan:

$$\alpha = \frac{\gamma K}{3V} c_v, \quad (1.74)$$

bu erda $K = 1/D$ – siqish koeffitsienti; V – atom hajmi; γ – Gryunayzen doimiysi, ko'pgina metallar uchun $\gamma = 1,5 \div 2,5$.

Gryunayzen nazariyasi bo'yicha, γ doimiysi temperaturaga bog'liq bo'lmagani, K va V esa oz bog'liqligi (temperatura qancha yuqori bo'lsa, siqiluvchanlik va atom hajmi shunchalik katta) sababli, termik kengayish koeffitsientining temperaturaga bog'liqligi issiqlik sig'imining temperaturaga bog'liqligi orqali aniqlanadi [3].

Shunday qilib, past temperaturalarda ($T \ll \theta_D$) dielektriklar uchun $\alpha \sim T^3$, yuqori temperaturalarda ($T > \theta_D$) esa $\alpha = const$.

Metallar uchun panjara issiqlik sig'imidan tashqari elektron issiqlik sig'imini c_{el} ham e'tiborga olish lozim:

$$\alpha = \frac{1}{3DV} \left[\gamma c_v^{pan} + \frac{2}{3} c_v^{el} \right]. \quad (1.75)$$

γ ning qiymati bir xonali son bo'lgani uchun metallning issiqlik kengayishiga elektron tashkil etuvchining ulushi faqat o'ta past temperaturalarda (10 K darajasidagi) sezilarli bo'ladi [3].

Chiziqli kengayish koeffitsientining temperaturaga bog'liq ravishda o'zgarish mexanizmlarini tahliliga xulosa qilib, umumiy tarzda bu bog'liqlikni quyidagicha yozish mumkin:

$$\alpha = AD \left(\frac{\theta_T}{T} \right) + BT + \frac{C}{T^2} \exp \left(- \frac{E_V^f}{RT} \right), \quad (1.76)$$

bu erda A, B, C – o'zgarimas kattaliklar; $D \left(\frac{\theta_T}{T} \right)$ – Debay funksiyasi. Bu formuladagi oxirgi had erish temperaturalariga yaqin temperaturalarda sezilarlidir [3].

Kristall panjaraning shaklan o'zgarishini (ezilishini) keltirib chiqaruvchi va buning oqibatida angarmonik tebranishlarni kuchaytiruvchi metallar deformatsiyasi termik kengayish koeffitsientini birmuncha oshiradi.

Chiziqli kengayish koeffitsienti atomlararo ta'sirlashuv energiyasi bilan aniqlanishi sababli qator korrelyasion ifodalar mavjudki, ular α ni qattiq jismning boshqa xossalari bilan bog'laydi.

Qattiq jismning hajmiy kengayish chegaralari Lindeman kriteriysi bilan aniqlanadiki, unga ko'ra erish temperaturasida atomning muvozanat holatdan

o'rtacha ko'chishi atomlararo masofaning ma'lum ulushini tashkil qiladi. Bu kriteriy $\alpha T_{er} = C_o$ ni beradi, bunda C_o kub va geksagonal panjarali ko'pgina metallar uchun 0,06 dan 0,076 gacha qiymatlarni qabul qiladi.

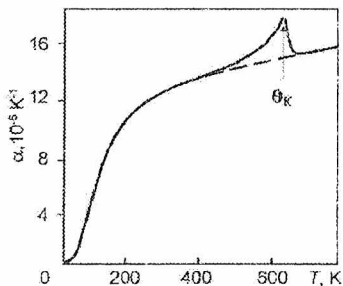
Korrelyasion boshqa formula ham mavjud:

$$\alpha \sim (2/z) \Delta H_{subl},$$

bu erda z – koordinatsiyalovchi son; ΔH_{subl} – atomlararo bog'lanish energiyasini ifodalovchi sublimatsiya energiyasi.

Magnitlovchi metall va qotishmalar (ferro-, ferri- va antiferro magnetiklar) termik kengayishiga magnit maydon katta ta'sir ko'rsatadi. Bu ta'sir anchagina sezilarli va panjara ta'siriga yaqin. Bu hodisaning tabiati magnitlanishda chiziqli o'lchamlarning o'zgarishi – magnitostriksiya hodisasini bilan bir xildir [3].

Temir 800 K dan 1000 K gacha qizdirilganida α koeffitsient $16,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ dan $14,7 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ ga kamayadi ($\theta_k = 1043 K$). Xrom xona temperaturasigacha isitilganida α deyarli nolgacha kamayadi ($\theta_N = 300K$). Nikel qizdirilganida α koeffitsient sezilarli oshadi (1.15-rasm).



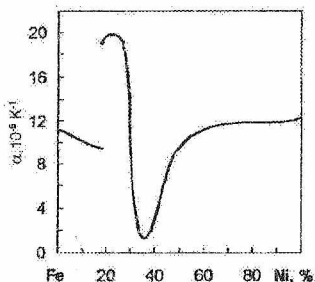
1.15-rasm. Nikelning chiziqli kengayish koeffitsientini nazariy va eksperimental qiymatlari (mos ravishda punktir va uzluksiz chiziqlar)

Ayrim qotishmalar uchun issiqlik kengayishiga magnitlanishning ta'siri katta. Masalan, Fe – (30÷40)% Ni qotishmalarida u parjaraviy tashkil etuvchiga yaqin, ishorasi qarama-qarshi. Natijada, invar deb ataluvchi bunday qotishmalar xona temperaturasida nolga teng issiqlik kengayish koeffitsientiga ega bo'ladilar (3.16-rasm) [3].

500 K temperaturadan (Kyuri nuqtasi) yuqori qiymatlarda α koeffitsient o'zining nazariy qiymatiga $18 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ yaqinlashadi. Tarkibi (34÷45)% Ni

bo'lgan qotishmalarning xarakterli jihati – 30 K dan past temperaturalarda chiziqli kengayish koeffitsientining manfiy ishoraga ega bo'lishidir.

Invar anomaliyaga boshqa qotishmalar ham ega [3].



1.16-rasm. Fe – Ni qotishmasi kimyoviy tarkibini chiziqli kengayish koeffitsientiga bog'liqligi

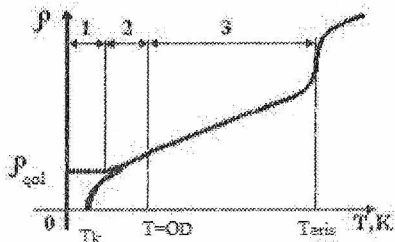
Nazorat savollari.

1. Qattiq jismlar issiqlik sig'imiga temperatura qanday ta'sir ko'satadi?
2. Temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti nima?
3. Metallarda issiqlik energiyasi qanday uzatiladi?
4. Fonon nima va uning nometall qattiq jismdagi xususiyati qanday?
5. Debay temperaturasi nima va u bilan issiqlik o'tkazuvchanlik o'rtasida qanday bog'liqlik mavjud?

1.6. Elektr o'tkazuvchanlik va o'ta o'tkazuvchanlik

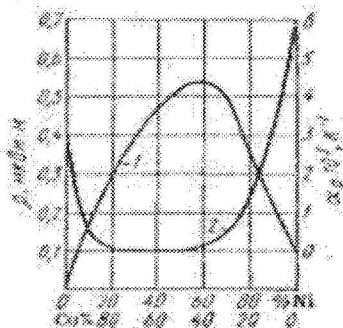
Metallning issiqlik o'tkazuvchanligi haqida uning elektr o'tkazuvchanligi bo'yicha tasavvur qilish mumkin. Videman-Frans qoidasiga ko'ra issiqlik o'tkazuvchanlikni elektr o'tkazuvchanlikka nisbati – o'zgarmas kattalikdir. Elektr o'tkazuvchanlik tok o'tkazuvchanlik zichligini elektr maydon kuchlanishiga nisbatiga teng bo'lgan nisbiy hajmiy elektr o'tkazuvchanlik bilan xarakterlanadi. Metallar elektr o'tkazuvchanligi yoki unga teskari kattalik – elektr qarshilik erkin elektronlarning elektr maydon ta'sirida harakatlanish xarakteriga bog'liq. Elektr tokining o'tishiga bo'lgan qarshilik elektronlarning kristall panjaraga musbat ionlari to'qnashuvida sochilishi, aralash atomlar va nomukammal kristall tuzilish bilan tushuntiriladi.

20 K da ko'pchilik metallarning nisbiy elektr qarshiligi 10^{-10} Om·m dan kichik va temperaturaning yanada pasayishi bilan deyarli o'zgarmaydi. SHunday qilib, 20K dan past temperaturalarda o'lgangan elektr qarshilik qoldiq qarshilik hisoblanadi. Qoldiq elektr qarshiligini aniqlash metallning aralashmalardan xoliligini, sofligini hamda uning kristall tuzilish mukammalligini baholashning oddiy va aniq usulidir [4].



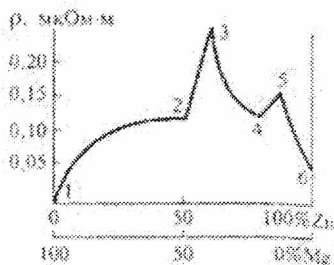
1.17-rasm. Metall nisbiy qarshiligining temperaturaga bog'liqligi

Past temperaturalarda o'ta o'tkazuvchanlikka ega bo'lmagan metallarda aralashmalar borligi sababli 1-hudud – qoldiq qarshilik hududi kuzatiladi (1.17-rasm). Metall qanchalik sof bo'lsa, qoldiq qarshilik ρ_{qol} shunchalik kichik. Debay temperaturasi gacha θ_D bo'lgan past temperaturalarda nisbiy qarshilikning tez o'sishini panjara issiqlik tebranishlari yangi chastotalari uyg'onishi bilan tushuntiriladi – 2-hudud. $T > \theta_D$ bo'lganida, ya'ni tebranishlar spektri to'liq uyg'onganida temperatura ortishi bilan tebranishlar amplitudasini ortishi qarshilikni, taxminan T_{erish} gacha, chiziqli o'sishiga olib keladi – 3-hudud [5].



1.18-rasm. Mis-nikel qotishmasi ρ_v (1) va nisbiy qarshilik temperatura koeffitsentining (2) komponentlar ulushiga bog'liqligi

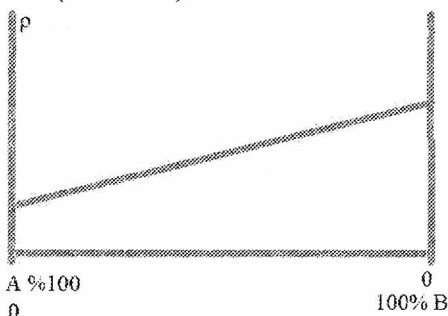
Qattiq qotishmalarning hosil bo'lishida erituvchi va eruvchi metallar valentligining hamda atomlari o'lchamlarining qiymatlaridagi farq qancha katta bo'lsa qotishmaning qarshiligi shunchalik katta bo'ladi. ρ_v ni qotishmalar tarkibiga bog'liqlik egri chizig'i maksimumga ega (1.18-rasm). Agar qotishmani hosil qiluvchi metallar Mendeleev davriy jadvalining turli gruppalariga tegishli bo'lsa, u holda ρ_v ni tarkibga bog'liqlik egri chizig'i nosimmetrik shaklda bo'lib va diagramma o'rtasidan ρ_v si katta bo'lgan metall tomonga siljigan bo'ladi [5].



1.19-rasm. Magniy-rux qotishmasi nisbiy qarshiligining komponentlar ulushiga bog'liqligi

Turg'un kimyoviy birikmalarni (intermetallidlar) hosil qilishda ρ_v bog'liqlik egri chiziqlarida siniqlar kuzatiladi (1.19-rasm) [5].

Alohida kristallanishda qotishma tarkibida har bir komponent kristallitlarining mexanik aralashmasi paydo bo'ladi va ρ_v tarkibga chiziqli bog'liqlikda o'zgaradi (1.20-rasm).



1.20-rasm. Mexanik aralashmalar ρ_v ini komponentlar ulushiga bog'liqligi

YUqori elektr o'tkazuvchan metallar. Kumush – yuqori chastotali kabellar, mis simlarni oksidlanishdan himoyalash uchun, ayrim kondensatorlar elektrodleri, elektr kontaktlar uchun ishlatiladi. Nisbiy elektr qarshiligi $\rho_v = 0,015$ mkOm·m. Kumushning mexanik xarakteristikalari yuqori emas: Brinell bo'yicha qattiqligi – 25, uzilishdagi mustahkamlik chegarasi σ_p 200 MPa dan katta emas, uzilishdagi nisbiy uzayishi ~50%.

Mis – to'liqin uzatgichlarni ishlab chiqarishda g'altak va montaj simlari hamda kabellarida (yumshoq kuydirilgan MM markali mis, $\rho_v = 0,0173$ mkOm·m); elektr mashinalar kontakt simlarida, kollektor plastinalarida (MT markali qattiq mis, $\rho_v = 0,0178$ mkOm·m) [5].

Bronzalar – mis va oz miqdordagi bir yoki bir necha kimyoviy moddalarning qotishmasi. Masalan, БРОЦ6-6-3 markali bronza – qalay-rux-qo'rg'oshinli bronza (6% Sn, 6% Zn, 3% Pb, qolgani Cu dan iborat) [5].

Latunlar – 45% maksimal miqdordagi Zn bo'lgan Cu – Zn qotishma sistemasi. Л harfi va misning ulushini ko'rsatuvchi son bilan marka belgilanadi. Masalan, ЛС59-1 latun markasi – bu qo'rg'oshinli latun bo'lib, 59% Cu, 1% Pb ni o'z ichiga oladi, qolgani Zn dan iborat. Elektr tokini o'tkazuvchi vint, gayka, shayba, shtirlarni tayyorlashga ishlatiladi.

Alyuminiy – misdan ρ ligi bo'yicha 3,3 marta engil, $\rho_v = 0,028$ mkOm·m qarshilikka ega va Al_2O_3 oksid himoya plyonkasi evaziga atmosferada zanglashga qarshiligi katta. Yumshoq alyuminiyning uzilishga mustahkamligi 80, qattiq alyuminiyniki – 160÷170 MPa. Misga nisbatan katta chiziqli kengayish temperatura koeffitsientiga ega.

Aldrey – 0,3÷0,5% Mg, 0,4÷0,7% Si va 0,2÷0,3% Fe dan iborat (qolgani – Al). Bu qotishma maxsus qayta ishlashdan so'ng, undan Mg_2Si birikma mayda dispers holatda ajraladi, qotishma yuqori mexanik mustahkamlik va qizishga bardoshlilik xossalariga ega bo'ladi.

Po'lat (0,1÷0,15% uglerodli temir) – o'tkazuvchan material sifatida tramvay relslari, elektr temir yo'llari, shina va boshqa ko'rinishlarda ishlatiladi. Po'latning nisbiy o'tkazuvchanligi misnikidan 6 – 7 marta kichik, $\sigma_p = 700 \div 750$ MPa, uzilishdan oldingi nisbiy uzayishi 5÷8%.

O'lchov asboblarning rezistorlari uchun yuqori qarshilikli qotishmalar.

Manganinlar – 85% atrofida Cu, 12% Mn, 3% Ni ni o'zida tutgan mis asosidagi qotishmalar. Namunaviy rezistor, shunt, asboblarning yasash uchun

ishlatiladi. Nisbiy qarshiligi $0,42 \div 0,48$ mkOm·m, $\sigma_p = 450 \div 600$ uzilishdan oldingi nisbiy uzayishi $15 \div 30\%$, ishchi temperaturasi 200°S dan kichik.

Konstantan – mis-nikel qotishmasi (o‘rtacha 60% Cu, 40% Ni), $\rho_v = 0,648 \div 0,52$ mkOm·m, $\sigma_p = 400 \div 500$ MPa, $\alpha_p = (5 \div 25)10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ga ega, uzilishdan oldingi nisbiy uzayishi $20 \div 40\%$. Mis bilan juftlikdagi termo-e.yu.k. $45 \div 55$ mkV/K, shuning uchun konstantan termoparalarda ishlatilishi mumkin. Konstantandan tayyorlangan reostat va isitish elementlari 450°S da uzoq vaqt ishlashi mumkin [5].

Issiqlikka bardosh qotishmalar elektr isitgich asboblari, reostat, rezistorlar uchun ishlatiladi. Fexral va xromallar Fe (asosiy qism), Al, Cr, Ti dan tashqari 0,6% Ni hamda ozroq Mn ga ega. Qotishma markalaridagi X – xromni, H – nikelni, IO – alyuminiyni, T – titanni anglatadi. Harfdan keyingi raqam shu metallning protsentdagi o‘rtacha ulushini bildiradi. Issiqlikka bardosh ayrim qotishmalarning xossalari 1.5-jadvalda ko‘rsatilgan [5].

1.5-jadval

Qotishma markasi	Qotishma turi	P, mkOm·m	$T_{kr} \cdot 10^{-5}, 1/^\circ\text{S}$	Ruhsat etilgan maksimal temperatura, $^\circ\text{C}$
X20H80	nixrom	1,04÷1,17	9	1100
X13IO4	fexral	1,2÷1,34	15	960
X23IO5T	xromal	1,3÷1,5	5	1150

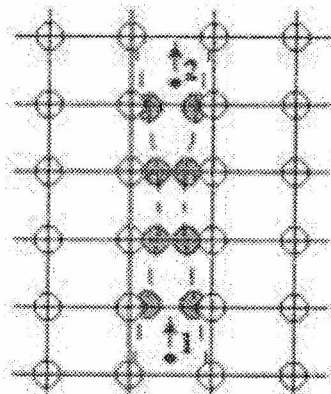
Termoparalar uchun qotishmalar. Termoparalar uchun ushbu qotishmalar ishlatiladi: kopel (Ni 44% va Cu 56%; $\rho_v = 0,465$ mkOm·m); alyumel (Ni 95%, qolgani Al, Si va Mn; $\rho_v = 0,305$ mkOm·m); xromel (Ni 90% va Cr 10%; $\rho_v = 0,66$ mkOm·m); platinorodiy (Pt 90% va Rh 10%; $\rho_v = 0,19$ mkOm·m).

Ushbu termoparalar ishlatiladi: mis-konstantan va mis-kopel (350°S gacha); temir-konstantan, temir-kopel va xrom-kopel (600°S gacha); xromel-alyumel ($900 - 1000^\circ\text{S}$ gacha); platonorodiy-platina (1600°S gacha).

Kavsharlangan materiallarning temperaturalarini farqi bir xilligida eng katta termo-EYUK ga xromel-kopel (80 mkV/K), eng kichigiga esa –

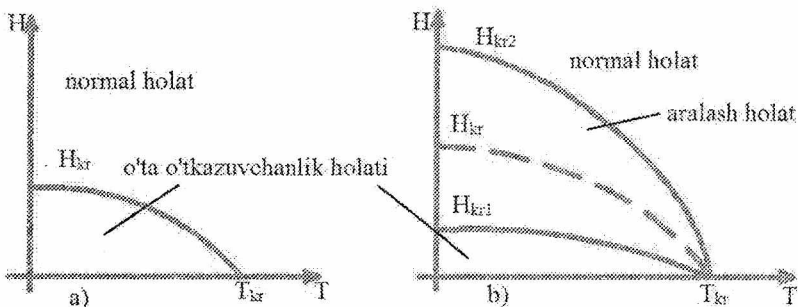
platinoradiy-platina (8 mkV/K) egadir. Sovuq holdagi termoparaning birinchi materialidan elektr toki ikkinchisiga o'tishini belgilash, issiq holda esa – aksincha belgilanishi qabul qilingan, ya'ni sovuq holda tok misdan kopelga, platinorodiydan platinaga o'tadi.

O'ta o'tkazgichlar. Kritik temperaturalardan past temperaturalarda elektron panjarani lokal o'zgartirib, boshqa elektron uchun tortish hududini yuzaga keltiradi (fononlar o'zaro ta'sirlashuvini almashish hisobiga); bunda ular orasidagi tortishish kuchlari itarishish kuchlaridan katta bo'ladi (1.21-rasm). bunday elektron juftlar (Kuper juftlari) bir xil kvant holatida bo'ladi. Bunday juftlangan elektronlar soni elektronlar umumiy sonining 10^{-4} ulushini tashkil qiladi. Elektronlar barcha Kuper juftlarining harakatini panjarada so'ngmaydigan yagona elektron to'lqin tarqalishi deb qarash mumkin [5].



1.21-rasm. O'tkazuvchan metallda elektron juftlarning hosil bo'lish sxemasi

Kritik maydonni temperaturaga bog'liqligi, mantiqan, o'ta o'tkazgichning fazalar diagrammasini anglatadi. Temperatura va magnit maydonning har qanday kombinatsiyasida metall o'ta o'tkazuvchan holatda bo'ladi. O'ta o'tkazgich materiali va temperaturaga bog'liq bo'lgan magnit induksiya ma'lum bir kritik qiymatdan oshganida o'ta o'tkazuvchanlik holati magnit maydon tomonidan barbod qilinadi (1.22-rasm) [5].

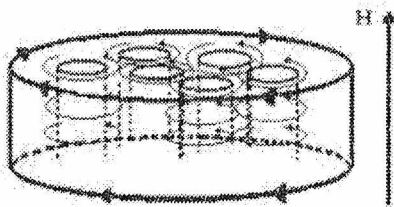


1.22-rasm. Birinchi (a) va ikkinchi (b) tur o'ta o'tkazgichlar uchun H_{kr} ni I_{kr} ga bog'liqligi

Meysner effekti o'ta o'tkazgich yoki o'tkazgich hajmidan magnit maydonni siqib chiqarilishidan iborat. O'ta o'tkazgich yuzasiga yaqin erda yuza elektr toki yupqa qatlamni egallab magnit maydonini hosil qilib, o'ta o'tkazgich ichida tashqi magnit maydonni barbod qiladi va o'ta o'tkazgich ideal diamagnetikka o'xshab qoladi [5].

Birinchi tur o'ta o'tkazgichlar – bular Meysner effekti to'liq kuzatiladigan (10^5 A/m dan kichik maydonlar) sof moddalar. O'ta o'tkazuvchan yoki normal holatda bo'ladi [5].

Ikkinchi tur o'ta o'tkazgichlar – bular Meysner effekti qisman kuzatiluvchi (10^7 ÷ 10^8 A/m dan katta maydonlar) moddalar. Ularda magnit maydoni alohida-alohida chiziqlar ko'rinishida taqsimlangan, qarshilik esa 1-tur o'ta o'tkazgichlarniki kabi nolga teng. Ikkinchi tur o'ta o'tkazgichlarga, asosan, qotishmalar kiradi (sof metallardan faqat niobiy, vanadiy va texnetskiy). O'ta o'tkazuvchi uyurmalar normal o'tkazuvchan o'zakni o'rab oladi (1.23-rasm). Vertikal chiziqlar – o'zakni aylanib o'tuvchi magnit oqimlaridir. Yuza elektr toki o'ta o'tkazgichni umumiy dimagnetikligini ta'minlaydi.



1.23-rasm. O'ta o'tkazgichdagi aralash holat

Uchinchi tur o'ta o'tkazgichlar – bular, asosan, 2-tur o'ta o'tkazgichlarning qotishma va kimyoviy birikmalari “qattiq” o'ta o'tkazgichlardir, ularda strukturaviy kamchilik bo'lib, uyurmalarni yig'ish markazi (pining markazi) bo'lib xizmat qiladi. Uyurma – bu tashqi magnit maydon kirib keluvchi o'ta o'tkazgichning hududidir. Har bir uyurma – magnit oqimining elementar kvantidir. Uyurmalar simmetrik panjarani hosil qiladi, bu panjara 3-tur o'ta o'tkazgichda katta kritik tokni olishga imkon beradi. Masalan, Nb₃Sn niobiy stannididan yasalgan simda $B = 10$ Tl kuchlanishli maydonning tok zichligi 10^9 A/m² dan ko'p bo'lishi mumkin [5].

O'ta o'tkazuvchan elektronlarning umumiy impulsi ma'lum bir qiymatdan oshmasligi kerak; har qanday o'ta o'tkazgich uchun kritik tok zichligi mavjud bo'lib, undan katta qiymatlarda o'ta o'tkazuvchanlik barbod bo'ladi. Dumaloq kesimli sim uchun kritik tok qiymatini to'liq tok qonunidan aniqlash mumkin:

$$I_{kr} = 2\pi dH_{kr}$$

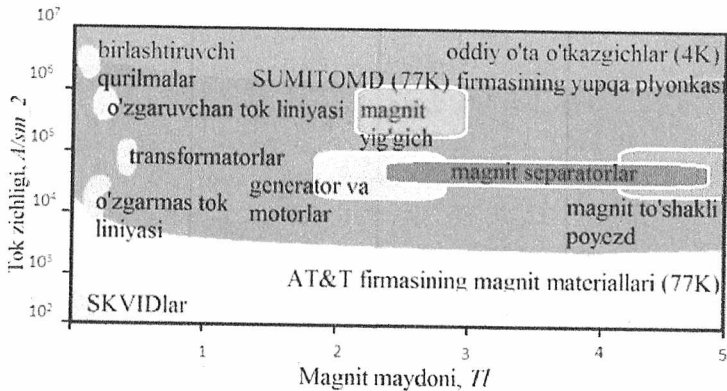
bu erda I_{kr} – kritik tok, A; d – sim diametri, mm; H_{kr} – magnit maydonning hisobiy kritik kuchlanishi, A/m.

Odatiy o'ta o'tkazgichlardan farqli, yuqori temperatura o'ta o'tkazgichlari sopol oksidlaridan iborat. Suyuq azotning qaynash temperaturasidan yuqori kritik temperaturali T_{kr} sopollar yaratilgan, ularning ayrimlari 1.6-jadvalda keltirilgan [5].

1.6-jadval

Birikma	T_{kr}	Birikma	T_{kr}
La _{0,925} Sr _{0,075} CuO ₄	34	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	111
Bi ₄ Ca ₃ Sr ₃ Cu ₄ O ₁₆	85	Ta ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀	123
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	92,4	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈	133

Hozirgi vaqtda o'ta o'tkazgichlarning qo'llanilish sohasi keng.



Nazorat savollari.

1. Birinchi va ikkinchi tur o'tkazgichlarning elektr o'tkazuvchanligi qanday?
2. Termo- e.yu.k. nima?
3. Nima uchun metallarning nisbiy qarshiligi temperatura ortishi bilan ko'payadi?
4. YUmshoq va qattiq mis xossalari qanday?
5. Alyuminiy misga nisbatan qanday avzallik va kamchiliklarga ega?
6. Qanday materiallar o'ta o'tkazgich hisoblanadi?

2-bob. Kriogen mashinalarning tsikllari

2.1. Tsikllarning tarkibi, hisoblash uchun dastlabki ma'lumotlarni tanlash

Kriogen qurilmalari sikllarini hisoblashning vazifalari. Kriogen qurilmasini hisoblash, avvalo, uning parametrlarini maqsadli funksiyalar deb ataluvchi xarakteristikalari bo'yicha optimallashtirishdir. Termodinamik optimallashtirish maqsadli funksiyalari haqida "Texnologik mashinalar termodinamik asoslari", "Sovutish asoslari" va boshqa kurslarda ma'lumotlar berilgan. Shuni e'tiborga olish lozimki, siklni optimallashtirish bu qurilmani yoki sistemani optimallashtirish degani emas. Termodinamik optimallashtirishdan kam bo'lmagan ahamiyatli texnik-iqtisodiy optimallashtirishda sistemaning vazifasi va ishlash sharoitlariga (kapital xarajatlardan tortib og'irlik-gabarit o'lchamlargacha) bog'liq turli kriteriyalar qo'llaniladi. Hatto siklni termodinamik optimallashtirish real ish rejimini hisobga olmasdan bajarilmaydi; real ish rejimi quyidagi cheklolarni qo'yadi:

- tahlil qilinuvchi sxemalar echimlari soni va turiga;
- tashqi, dastlabki sovutish bosqichlarining soni va temperatura darajasiga;
- kompressordan keyingi bosimga va h.k [6].

Hisoblashning vazifasi krioagent oqimlari va siklning barcha xarakterli nuqtalaridagi holat parametrlarini aniqlashdan iborat. Siklni hisoblash uchun dastlabki qator kattaliklar oldindan tanlanadi. Bular, avvalo, siklning o'zi, temperaturalar darajasi va dastlabki sovutish bosqichining turi, krioagent oqimlarining bosimlari, mashina FIK, nomukammal rekuperatsiya tufayli yo'qotuvlar, temperaturalar farqining taqsimoti, atrof-muhitdan keluvchi issiqlik oqimi, gidravlik yo'qotuvlar va h.k.

Turli kengayish jarayonlarining samaradorligi. Past temperatura olish jarayonlaridan kriogen qurilma va sistemalarda keng tarqalgani – krioagentlarning turli qurilmalarda (drossel ventil, detander, ejektor) kengayish jarayonlaridir. Shu sababdan kriogen qurilma va sistemalar sikllarini, ayniqsa, ularning sovutish quyi bosqichini to'g'ri tuzish uchun har bir kengayish jarayoni samaradorligini bilish muhim. Bu jarayonlarning barchasi sovutishning termomexanik usullari qo'llanilganida amalga oshadi va krioagent temperaturasi pasaytirish uchun mo'ljallangan [6]. Barcha

hollarda energetik o'zgarishlar xarakteri umumiy kuchga (jumladan bosimga) P bog'liq bo'lgan eksbergiyani e_p temperaturaga bog'liq bo'lgan eksbergiyaga e_T o'tishidan iborat. Ichki sovutish jarayonining FIK (η_e) e_T ortishining e_p kamayishiga nisbati bilan aniqlanadi:

$$\eta_e = \Delta e_T / \Delta e_p, \quad (2.1)$$

ammo, asosiy natija – temperatura pasayishi bilan birga termomexanik sovush jarayonlarida boshqa, zararli, foydali ta'sirlar (masalan, detanderda ish bajarilishi) paydo bo'lishi mumkin; ular FIKda e'tiborga olinishi lozim:

$$\eta_e = (\Delta e_T + \Delta e_{qorish}) / \Delta e_p. \quad (2.2)$$

Qaytar sovush jarayonida (masalan, adibatik detanderda)

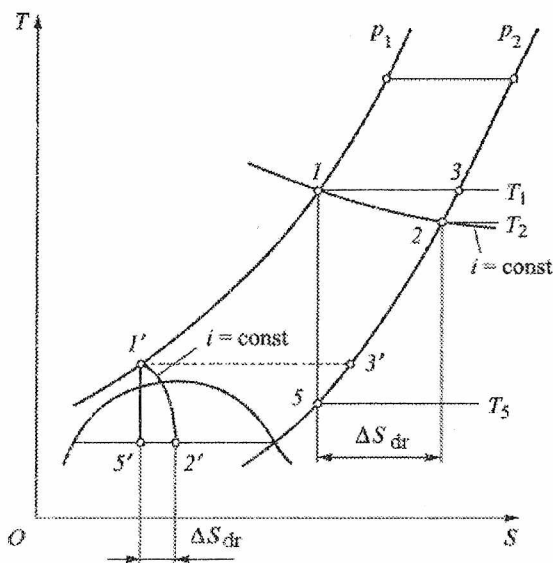
$$\Delta e_T + \Delta e_{qorish} = \Delta e_T + l_d = \Delta e_p \quad (2.3)$$

va $\eta_e = 1$. To'liq qaytmas jarayonda $\Delta T = 0$ foydali ta'sirlar yuzaga kelmaydi (masalan, ideal gazning drossellanishida) va $\eta_e = 0$ [6].

Drossellanish – past temperatura olish uchun eng keng tarqalgan jarayon. Ma'lumki, drossellanish $i = const$ bilan xarakterlanadi va sovuqlik ishlab chiqaruvchi jarayon emas. Drossellanishda temperaturaning pasayishi yoki ko'tarilishi bu jarayonning qaysi temperatura darajasida sodir bo'layotganiga va ishlatilayotgan krioagentning inversiya temperaturasiga bog'liq. Drossellanish jarayonining fizik mohiyati adabiyotlarda [7 – 10] batafsil berilgan. Biz real krioagentning drossellanish FIK temperaturaga bog'liq ravishda o'zgarishini ko'rib chiqaylik (2.1-rasm). Drossellanish termomexanik jarayon bo'lib, uning uchun $\Delta e_{qorish} = 0$, shu tufayli drossellanishning termodinamik samaradorligini baholash uchun quyidagi ifodadan foydalanamiz:

$$\eta_e = \Delta e_{23} / \Delta e_{31}. \quad (2.4)$$

Drossellanish jarayoni 2.2-rasmda $e - i$ koordinatalarda ko'rsatilgan. Δe_{31} kattalik Δe_p ga, Δe_{23} esa Δe_T ga mos keladi. Δe_{23} farq qanchalik katta bo'lsa, η_e shunchalik yuqori bo'ladi. T_1 dagi ($i_1 - i_3$) entalpiyalar farqi ma'lumki, izotermik drossellanish Δe_T effekti bo'lib, p_2 bosimda ishchi jismni T_2 dan T_1 dastlabki temperaturagacha isitish uchun berilgan issiqlik miqdoriga son jihatdan teng (yoki sovutuvchi ob'ektga berilgan sovuqlik miqdoriga q_{23}) [6].

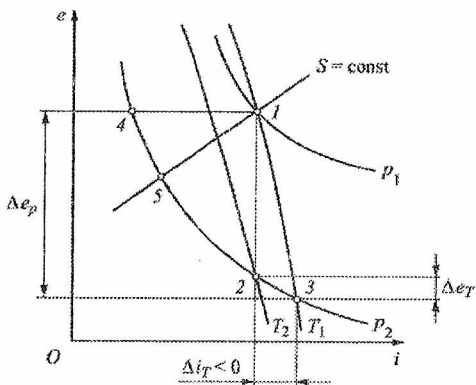


2.1-rasm. Kriogen temperaturalarda drossellanish jarayonining $T - s$ diagrammadagi tasviri

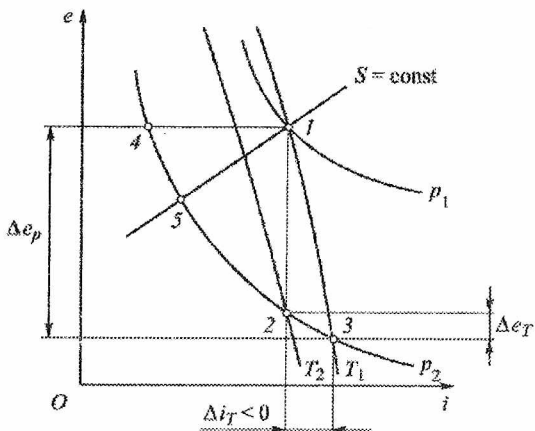
2.2-rasmda ko'rsatilgan sharoitlarda drossellanishning FIK $s = const$ da kengayish jarayonining ideal detanderda kengayish FIK dan ancha kichik. Oxirgi holda, detander ishini e'tiborga olmasa ham quyidagi ifoda o'rinli:

$$\eta_{e,s} = \Delta e_{5-3} / \Delta e_{1-3} > \eta_{e,j} \quad (2.5)$$

Ammo temperatura pasayganida, ayniqsa, "suyuqlik - bug" chap egri chizig'iga yaqin hududgacha pasayganida Δe_{2-3} kattalik Δe_{5-3} ga yaqinlashadi, FIK esa 80÷90% ga yetishi mumkin. Shunga o'xshash jarayonlar 2.3-rasmda $T < T_{kr}$ temperaturada ko'rsatilgan. Diagrammadan ko'rish mumkinki, T_1 dan T_2 gacha sovutish bilan bog'liq bo'lgan Δe_{2-3} berilgan eksbergiyadan Δe_{1-3} ozgina kichik. Bu holda drossellanish tufayli nisbiy yo'qotuv juda kam. Shunday qilib, kritik temperaturaga yaqin hududda drossellanish yo'li bilan sovutish juda samarali va sovutish uchlama nuqta temperaturasigacha kamayadi. Drossellanish boshlang'ich bosimining pasayishi ham jarayon samaradorligini oshiradi [6].



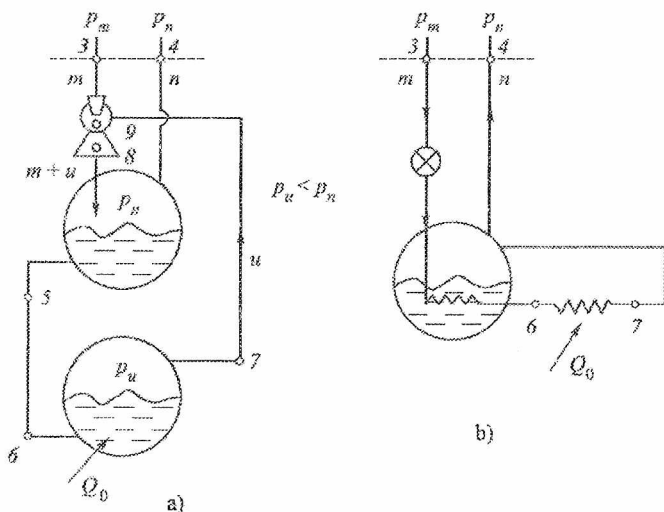
2.2-rasm. $T > T_{kr}$ da drossellanish jarayonining $e - i$ diagrammadagi tasviri



2.3-rasm. $T < T_{kr}$ da drossellanish jarayonining $e - i$ diagrammadagi tasviri

Harakatlanuvchi elementlarni qo'llamasdan, kengayish jarayonining samaradorligini oshirishning usullaridan biri drossel o'rniga drossel-ejektor kengayish bosqichlarini qo'llashdir. Drossel-ejektor bosqichining prinsipial sxemasi 2.4-rasmda drossel bosqichi yonida ko'rsatilgan. Krioagent (m oqim) 3 nuqta parametrlari holatida ejektor soplosiga kiradi, bu erda p_n bosimgacha kengayadi. m oqimning kinetik energiyasi 7 nuqtaning parametrlaridagi u miqdor bug'ni bug'latgichdan "so'rish" (injeksiyalash)

uchun ishlatiladi. Ejektorda ishchi (m) va injeksiyalanuvchi (u) oqimlar aralashadi va aralashma teskari oqimning p_n bosimigacha siqiladi. Sovutish effekti Q_o bug‘latgichda sodir bo‘ladi. Shunday qilib, oqimning kengayishi ikki bosqichda ro‘y beradi: ejektorda u p_m dan p_n gacha kengayadi va drosselda p_n dan $p_u < p_n$ gacha. Natijada, qo‘shimcha foydali ta’sirga erishiladi: kengayuvchi oqimning m kinetik energiyasidan foydalaniladi (u oqimni siqish uchun); drossellanishda bu energiya ishlatilmaydi. Q_o kattalik ikkala holda ham bir xil bo‘lsada (2.4, a,b-rasm), chunki $Q_o = G_m(i_4 - i_3)$, ejektorning qo‘llanilishi qurilmaning FIKni oshiradi; bunga sabab ejektor qo‘llanilganidagi qaynash temperaturasi pastroq ($p_u < p_n$).



2.4-rasm. Drossel-ejektorli YASB (a) va drosselli (b) sovitish bosqichi

2.4, a-rasm uchun:

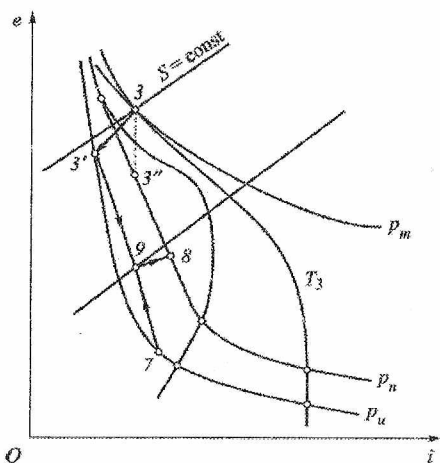
$$(e_3 - e_4)G_m = Q_o(\tau_e)^a + D^a = (E_q)^a + D^a. \quad (2.6)$$

2.4, b-rasm uchun:

$$(e_3 - e_4)G_m = Q_o(\tau_e)^b + D^b = (E_q)^b + D^b. \quad (2.7)$$

$|\tau_e)^a| > |\tau_e)^b|$ bo‘lgani uchun, eksergetik sovitish unumdorligi $(E_q)^a > (E_q)^b$, demakki $D^a < D^b$ va $(\eta_e)^a > (\eta_e)^b$.

Tasvirlangan usul temperaturani pasaytirish bilan ancha yuqori samaradorlikka erishish imkonini beradi. p_u qiymati p_n ga teng bo'lgan boshqa usul ham qo'llaniladi (2.4, b-rasm). Bunda ejektorning qo'llanilishi teskari oqim bosimini p_n ancha yuqori bosimgacha $p'_n > p_n$ ko'tarish imkonini beradi. Bu usuldagi FIKning ortishi temperatura pasayishi bilan emas, balki kompressorning so'rish bosimini ortishi, siqish darajasini va ishni kamayishi bilan bog'liq [6].



2.5-rasm. Drossel-ejektorli YASB dagi jarayonlarning $e - i$ diagrammadagi tasviri

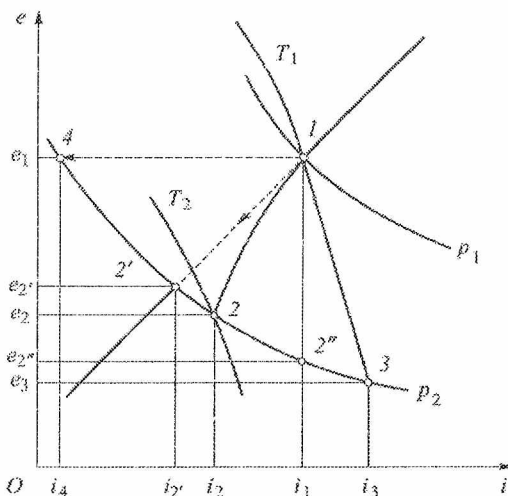
Ejektorda kengayish jarayonining termodinamik jihatlarini boshqa tomondan ham ko'rib chiqish mumkin. Oddiy drossellash bosqichida bosimning pasayish jarayoni $3 - 3''$ chiziq bo'yicha kechadi (2.5-rasm). Soploda kengayish jarayoniga $3 - 3'$ chiziq mos keladi. Bu chiziqning $s = const$ jarayon chizig'idan og'ishi soplodagi yo'qotuvlar bilan belgilanadi. Ejektorning qabul qilish kamerasida oqimlar aralashadi ($3' - 9$ va $7 - 9$), so'ngra aralashma p_n bosimgacha siqiladi (p_u) - 8 nuqta. Shunday qilib, ejektorda olinuvchi samaradorlik ($e_8 - e_a$) eksergiya ortishiga olib keluvchi m oqimni T_3 dan T_8 gacha sovutishdan va eksergiyani $u(e_8 - e_7)$ ga ortishiga olib keluvchi injeksiyanuvchi u oqimni p_u dan p_n ga siqishdan iborat. Demak, ejektorning FIK quyidagi formula bo'yicha aniqlanadi:

$$\eta_{ej} = \frac{(e_8 - e_a) + u(e_8 - e_7)}{e_3 - e_a} \quad (2.8)$$

e_8 ning qiymati, odatda, e_9 ga yaqin, shuning uchun ejektorning FIK, birinchi yaqinlashuvda, drossel FIK va ejektorda siqish jarayonining FIK ($\eta_{siq} = u(e_8 - e_7)/(e_3 - e_7)$) yig'indisiga yaqin. Natijada:

$$\eta_{ej} = \eta_{dr} + \eta_{siq} \quad (2.9)$$

Demak, ejektorning FIK doim drosselnikidan katta, ammo kengaytirish qurilmasini tanlashda drossel FIK qiymatini nazarga olish va agar u 92÷95% fozidan kam bo'lmasa, termodinamik nuqati-nazardan, ejektorni qo'llashning ma'nosi yo'q [6].



2.6-rasm. Tashqi ish bajarib kengayish jarayonining $e - i$ diagrammadagi tasviri

Tashqi kuchlarga qarshi bajarilgan ish natijasida sovush jarayoni, qoida bo'yicha, detanderlarda yoki Gifford-Mak-Magan mashinalarida amalga oshadi. Birinchisida, asosan "Simens effekti", ikkinchisida "Joul effekti" sodir bo'ladi. Har qanday turdagi detanderda tashqi ish tufayli kengayish holat diagrammasida (yoki $e - i$ diagrammada) boshlang'ich va oxirgi holat

nuqtalarini tutashtiruvchi shartli chiziq bilan ko'rsatilishim mumkin (2.6-rasm). 1 – 2' to'g'ri chiziq'i $s = const$ shart bilan ifodalanuvchi detanderdagi jarayonga mosdir. Bunda sovush effekti $\Delta e_{2'-3} = e_{2'} - e_3$, bajarilayotgan ish $l = i_1 - i_{2'}$. Ichki issiqlik almashinish, ishqalanish, tashqaridan issiqlik kelishi va boshqa qaytmas effektlar natijasida detanderdagi jarayon amalda entropiya ortishi va $s = const$ dagiga nisbatan eksergiyaning ko'proq kamayishi bilan sodir bo'ladi. Bunda sovush effekti va bajariluvchi ish miqdori kamayadi. 2 nuqta 2'' nuqta bilan ustma-ust tushsa, jarayon drossellanishga aylanadi. Real detanderning eksergetik FIK [6]:

$$\eta_e = \frac{\Delta e_{23} + \Delta i_{12} \eta_{em}}{\Delta e_{13}} \quad (2.10)$$

bu erda η_{em} – elektromexanik FIK.

Bosim eksergiyasi sovutishga va tashqi ishga sarflanadi. $s = const$ shartda η_e ni aniqlash formulasining surati va maxraji tenglashadi ($\Delta i_{12} = \Delta e_{12}$) va $\eta_e = 1$. Shunday qilib, bir xil sharoitlarda detanderning FIK drosselnikidan doim katta. Odatda, injenerlik amaliyotida detanderlar samaradorligi jarayonni $s = const$ ga yaqinlashish darajasini ko'rsatuvchi adibatik (izoentropik) FIK bilan baholanadi:

$$\eta_s = \eta_{ad} = \Delta i_{12} / \Delta i_{12'} = \Delta i_D / \Delta i_{ad}. \quad (2.11)$$

Adibatik FIK ancha qulay, ammo termodinamik tahlil talablariga doim ham javob beravermaydi, xususan, u ichki sovutishning turli usullarini taqqoslash uchun umumiylikka ega emas. Shuning uchun bu ikki FIKning har birini ularning imkoniyatlari va masalaning konkret shartlariga mos tarzda qo'llash maqsadga muvofiq.

Gazning "otilib chiqishi" deb ataluvchi, gaz massasining kamayishi bilan kengayish jarayoni mikrokriogen texnikasida ishlatiluvchi Mak-Magon kriogen gaz mashinalarida qo'llaniladi. Ancha samarador sanalgan gaz massasi o'zgarmasdan tashqi ish bajarish bilan birgalikda gaz otilib chiqish

deyarli barcha detanderlarda ishlatiladi. Umumiy holda Joule effekti deyilganida o'zgaras hajmli adibatik idishda gaz temperaturasining ortishi yoki pasayishi tushuniladi, bunda gaz massasi kirish yoki chiqishda o'zgaradi. Shunday qilib, Joule effekti nazorat qilinuvchi yuza orqali massa almashinuvchi ochiq sistemalardagina erishiladi. Bu effekt nostatsionar jarayonlar bilan bog'langan. Kirish, chiqish jarayonlari KS larining porshenli detanderlaridan boshqa qismlarida ham mavjud va ko'pincha KS sining ba'zi qismlarida temperaturaning nazoratsiz ortish (kamayish) sababidir [6].

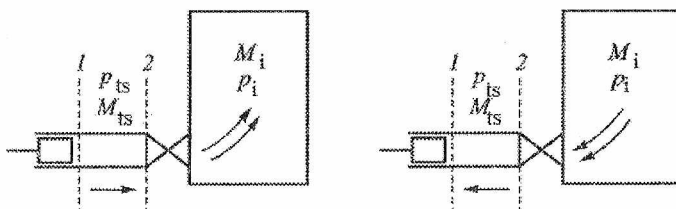
2.7-rasmda Joule effektining mohiyati tushuntirilgan. *a* sxemada kirish, *b* sxemada chiqish jarayoni ko'rsatilgan. Joule effektida temperatura o'zgarishi hajm o'zgarishidagi bosimning adibatik o'zgarishiga (Simens effekti) nisbatan ancha kichik bo'lsada, temperatura o'zgarishi sezilarli. Masalan, geliyni 0,1 MPa dan 1,0 MPa ga atrof-muhit temperaturasida qaytmas tarzda siqilsa, u 200 K ga isiydi. Gazni otilib chiqish termodinamik (eksergetik) FIK gazning qancha qismi keyinchalik foydali ishlatilishiga bog'liq [6]:

$$\eta_e = (e_b - e_{ox}) / (e_b - e_0) \quad (\text{gazning umumiy miqdori uchun}), \quad (2.12)$$

$$\eta_e = (M_b - M_{ox})(e_{oor} - e_b) / (e_b - e_0) \quad (2.13)$$

(idishdan chiqib ketgan gaz qismi uchun): $(M_b - M_{ox})$

bu erda M_b, M_{ox} – krioagentning jarayon boshi va oxiridagi massasi; e_b, e_{ox}, e_{oor} – mos ravishda jarayon boshi va oxiridagi, otilib chiqishdagi o'rtacha eksergiyalar.

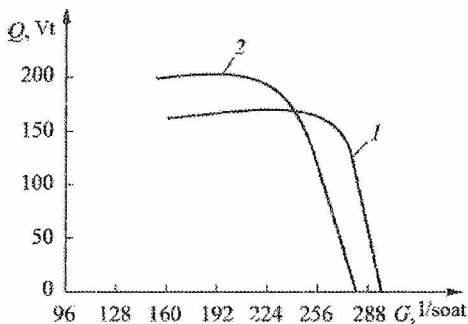


2.7-rasm. Kirish (*a*) va chiqish (*b*) qaytmas jarayonlarining sxemalari

Bu bo'limda temperatura pasayishi bilan kechadigan barcha jarayonlarni batafsil ko'rib chiqish emas, balki u yoki bu jarayon samaradorligini aniqlash vazifa qilib qo'yilgan edi.

KS lardagi yo'qotuvlarning asosiy manb'alari va ularni kamaytirish yo'llari. Energiya (eksergiya) sarflari va termodinamik (eksergetik) FIK ni ideal sikllardagi sarf, umumiy yo'qotuvlar orqali ifodalash yo'qotuvlarning tashkil etuvchilarini hamda tashkil etuvchilarni sistemaning umumiy samaradorligiga ta'sirini aniqlash imkonini beradi. KS larda yo'qotuvlarning asosiy tashkil etuvchilari: kengaytirish qurilmalarida krioagentning kengayishidagi hamda issiqlik almashinishdagi yo'qotuvlar, gidravlik yo'qotuvlar, krioagentni siqish va sirkulyasiya qilish qurilmalaridagi yo'qotuvlar, atrof-muhitdan keluvchi issiqlik oqimi tufayli yo'qotuvlar [6]. Barcha yo'qotuvlar ikki xil tabiatga ega bo'lib, krioagent xossalari bilan bog'liq ichki yo'qotuvlar deb ataluvchi va ishlatiluvchi qurilma, kechuvchi jarayon mukammalligiga bog'liq texnik yo'qotuvlarga bo'linadi. Shuning uchun yo'qotuvlarni kamaytirishning ikki xil farqli yo'li mavjud. Birinchi yo'li optimal sikl qurish va minimal yo'qotuvlarni belgilovchi krioagentning parametrlarida ishlovchi qurilmalarni qo'llashdan iborat. Ikkinchi yo'li qo'llaniladigan qurilmalarni texnik mukammallashtirishdan iborat. Birinchi yo'l "sxemachilar" (texnologlar), ikkinchisi esa mutaxassislar – issiqlik almashinish mutaxassislari, mashinistlar, issiqlik izolyasiyalovchilar, boshqaruvchilar va boshqalar tomonidan yaratiladi [6].

U yoki bu qurilmani mukammallashtirish vazifasi qo'yilishidan avval har bir qurilmadagi yo'qotuvlarning sistema umumiy samaradorligiga ta'sirini aniqlab olish maqsadga muvofiqdir. Bunda sistemaning FIK alohida tashkil etuvchilarining mustaqil termodinamik FIK mexanik ko'paytmasi emas. KS lardagi elementlarning o'zaro bog'liqligi shunchalik murakkabki, gohida sistemaning bir qismida samaradorlikning kamayishi paradoks natijaga – sistemaning umumiy samaradorligini ortishiga olib kelishi mumkin. Bunga misol qilib, refrijerator ish rejimida dastlabki sovutish bosqichi IAA samaradorligi kamayganida ortishini keltirish mumkin (2.8-rasm). Shuning uchun u yoki bu yo'qotuvning sistema samaradorligiga ta'sirini tadqiqot ob'ektini (kriogen qurilma, KS) to'g'ri xarakterlovchi matematik model asosida tahlil qilish mumkin [6].



2.8-rasm. DSB IAA issiqlik almashinish yuzasini kriogen qurilma xarakteristikalariga ta'siri

KS va qurilmalarni hisoblashning o'ziga xos tomonlari. Kriogen qurilmalar sikllarini hisoblash metodlari turli nashrlarda [10 – 12] misollar bilan yetarli bayon qilingan. Ushbu bo'limda yagona KS ga spetsifik birlashtirilgan kriogen blok va podsistemalarni hisoblashning o'ziga xos tomonlarini yoritish hamda kriogen qurilmalarni loyihalashdan iborat bo'lgan hisoblash tushunchasini kengaytirish maqsad qilingan.

Kriogen qurilmalarni yaratishning turli bosqichlarida hisoblash metodlari yordamida yechiladigan masalalar yuzaga keladi. Kriogen qurilma tsiklini termodinamik hisoblash – loyihalash bosqichidagi birinchi qadamdir. Sikl hisobining vazifasi KS mashina va apparatlarini hisoblash uchun zarur bo'lgan texnik talablarni (texnik topshiriq) shakllantirishda muhim bo'lgan krioagentning kriogen qurilma barcha nuqtalaridagi termodinamik parametrlarni aniqlashdir. Loyihaviy hisoblashning vazifasi – KS lar mashina va apparatlarining issiqlik va konstruktiv xarakteristikalarini aniqlashdir. Mashina va apparatlar xarakteristikalari aniqlanganidan, loyihalash tugallanganidan so'ng tekshiruv hisobi deb ataluvchi hisob ishi bajarilishi kerak. Tekshiruv hisob ishida KS ning ishlash barcha rejimlarida uning asosiy xarakteristikalari oydinlashtiriladi, sistema xarakteristikasi quriladi, ekspluatatsiya yo'riqnomasi tuziladi, ABS ning texnik topshirig'I shakllantiriladi. Bunda, agar tekshiruv hisobi uchun, jumladan, hisobiy bo'lmagan, statsionar deb ataluvchi rejimlar uchun va KS si xarakteristikasini qurish uchun statik yoki kvazistatik modellashtirish yetarli

bo'lsa, o'tish rejimini hisoblash uchun, ayniqsa ABS topshirig'i uchun KS ning dinamik modelini ishlatish zarur [6].

Kriogen tsikllarning turli-tumanligiga qaramay, ularning loyihaviy hisobi yagona metodologik asosga ega. Turli tsikllar hisobiga yagona yondashuv har qanday tsiklni energetik va moddiy balans tenglamalari bilan ifodalovchi sovutish bosqichlari ketma-ketligi deb qarashdan iborat. Bunda tsikl hisobi optimallashtiruvchi xarakterda bo'lib, nisbiy sovutish unumdorligi (suyuqlantirish koeffitsienti) yoki energiya nisbiy sarfi optimallashtiruvchi kattalik hisoblanadi. TSikl hisobi kriogen nisbiy sarfi bo'yicha bajariladi va real mavjud bo'lgan kriogen qurilma bilan bog'liq emas. Tsiklning termodinamik hisobidan farqli real kriogen qurilmaning loyihaviy hisobi kompressor agregatining mavjudligi (yoki yo'qligi), buyurtmachining qurilma mahalliyliigi bo'yicha talablar, yordamchi kriogen – sovutish agenti bilan bog'liq (jumladan, tashqi DSB), ishonchlilik talablari, massa, o'lcham xarakteristikalar va boshqalar bilan bog'liq qator cheklovlarni e'tiborga olib bajariladi. Gohida bu tsiklni tanlash va hisoblashni parametrlarning kichik diapazonida bajarishni taqazo etadi [6].

KS larni hisoblashda qator cheklov va o'ziga xosliklarni e'tiborga olish lozimki, buni yirik KS lar misolida ko'rish mumkin. Yirik KS qurishda namlik va moydan tozalash blokining hamda DSB bloki bilan uyqash bo'lgan geliyni kriogen tozalash blokining unumdorligini geliy kompressorlari unumdorligiga karrali qilib loyihalash maqsadga muvofiq; kriostatlash uchun mo'ljallangan kriogen bloklar unumdorligini esa ularning issiqlik yuklamasiga moslash maqsadga muvofiqdir. Bu holda kriogen bloklar (va ularning tsikli) hisobi DSB temperatura darajasidan (ko'pincha, 80 K dan) boshlanadi. KS hisobining yana bir o'ziga xostomoni kriogen qurilma bloki xarakteristikasini krioste'molchi xarakteristikasi bilan moslash zarurligidir. Umumiy holda bunday xarakteristikalar ikkita bo'lishi mumkin: issiqlik va gidravlik. Issiqlik xarakteristikalarini moslash zarurligiga CIIK-100 qurilmasi yaqqol misol bo'la oladi: issiqlik yuklamasining refrijerator qismi geliy sarfining (issiqlik yuklamasi suyuqlantirish qismining) funksiyasidir.

Loyihaviy hisobdan farqlit ekshiruv hisobida mashina va apparatlarning barcha konstruktiv xarakteristikalar ma'lum. Ammo, KS odatda ko'p funksionaldir va parametrlar kengdiapazonida uning samarador ishlashini

ta'minlashga intilishga qaramasdan nohisobiy ish rejimlarida uning xarakteristikalari optimaldan yiroq. Shuning uchun KS ning real xarakteristikasi ($Q - G$ optimal refrijerator va suyuqlantirish rejimlari nuqtalarini birlashtiruvchi to'g'ri chiziq ko'rinishida bo'lmay (tsikl hisobiga ko'ra), hisobiy ishchi nuqtadan o'tuvchi, optimal rejimlar to'g'ri chizig'idan og'uvchi egri chiziqdir [6].

Statsionar rejimni tekshiruv hisobining ikkinchi o'ziga xos tomoni barcha modellarni ikki toifaga bo'linishidir: 1) KS ning IAA kabi apparatlarini (IAA modeliga keltiriluvchi qurilma modellari, masalan, kriogen truboprovodlar) tavsiflovchi taqsimlangan parametrli modellar va 2) mashina, armatura, krioagent oqimlarini birlashtirish va ajratish qismlarini tavsiflovchi birlashtirilgan parametrli modellar. Umumiy holda, IAA modellari nostatsionardir, chunki KS larning inersion zvenolarini tavsiflaydi. Ammo statsionar rejimlarni hisoblashda dinamik tashkil etuvchi e'tiborga olinmaydi, parametrlarning taqsimlanganligi hisoblash uslubiga bog'liq holda yoki IAA ni ketma-ket joylashgan ko'p sonli issiqlik almashinish elementlariga ajratish (sonli hisoblash usulida) yoki IAA balandligi bo'yicha parametrlarni to'plash yo'li bilan e'tiborga olinadi. CHiziqli to'plash usuli eng sodda (krioagent oqimi o'rtacha temperaturasining o'rtacha arifmetik aniqlash), ammo undan olinadigan xarakteristikalar haqiqatdan ancha yiroqdir. Birlashtirilgan parametrli modellar bilan tavsiflanuvchi no inersion elementlar uchun saqlanish algebraik tenglamalari qo'llanadi [6].

Tekshiruv hisobining yana bir o'ziga xos tomoni modelni modulli tuzish prinsipidir, bunda modul modellari ularni o'zaro birlashish shartini e'tiborga olib quriladi.

KS lar o'tish rejimini hisoblash uchun issiqlik almashinish jarayonlarining dinamik modelini qo'llash zarur. Kriogen sistemalarning IAA umumiy holda uchta kichik sistemali – issiqlik almashinuvchi ikkita oqim va ajratuvchi devorli model bilan tavsiflanadi. Bir oqim uchun bir o'lchamli model massa, impuls va energiya saqlanish tenglamasi ko'rinishida yoziladi:

$$d\rho/d\tau + d(\rho w) = 0, \quad (2.14)$$

$$\rho(dw/d\tau) + \rho w(dw/dx) = -d\rho/dx + \rho g_x + F_{ish}, \quad (2.15)$$

$$\rho d(U + w^2/2)/d\tau + \rho w d(U + w^2/2)/dx = -d(\rho w)/dx + Q + F_{ish} dw/dx \quad (2.16)$$

Ajratuvchi devorning balans tenglamasi:

$$mc_{dev} dT_{dev}/d\tau = \alpha_{to'ig} P_{to'ig} (T_{to'ig} - T_{dev}) - \alpha_{tes} P_{tes} (T_{dev} - T_{tes}). \quad (2.17)$$

Nihoyat, krioagentning holat tenglamasi umumiy ko'rinishda quyidagicha yoziladi:

$$\rho = f(p, T) \quad (2.18)$$

Krioagent holat parametrlarining metall issiqlik-fizik xarakteristikalarining, issiqlik berish va krioagent sarfining temperaturaga bog'liqligining murakkabligi hamda tenglamalarda izlanayotgan kattaliklar hosilalarining mavjudligi sababli keltirilgan tenglamalar sistemasi chiziqli emas. Ammo, krioagent sistema IAA tenglamalari ularning ishlash jihatlaridan kelib chiqib soddalashtirilishi mumkin:

- oqim energiyasi tenglamalarida oqimning kinetik energiyasi hamda tortishish maydonida potensial energiya o'zgarishining xarakterlovchi xadlar tushurib qoldiriladi;
- harakat tenglamasining chap tomonida $dw/d\tau$ kattalik boshqa xadlarga nisbatan ancha kichikligi sababli uni e'tiborga olmaymiz;
- 40 K dan yuqori temperaturalarda ishlovchi apparatlardagi o'tish rejimini tavsiflashda krioagent oqimi to'playdigan sovuqlik e'tiborga olinmaydi;
- 20 K dan past temperaturalarda ishlovchi apparatlar uchun devor materialining issiqlik sig'imini krioagent issiqlik sig'imiga nisbatan e'tiborga olmaslik mumkin;
- 60 – 40 K dan yuqori temperaturalarda ishlovchi apparatlar uchun (qo'llaniluvchi krioagentga bog'liq ravishda) holat tenglamasi sifatida ideal gaz tenglamasi qo'llanilishi mumkin;
- α va k ning T ga bog'liqlik aniq bir formulasi qo'llaniladi; k ni krioagent sarfi va oqimlar bosimlariga bog'liqligi kam deb qaralib, bog'liqlik funksional emas, balki parametrik deb e'tiborga olinadi.

Ammo KS ning boshlang'ich sovutish va isitish kabi eng ko'p tarqalgan ish rejimlari sekin kechuvchi jarayonlarga, ya'ni elementga kirishdagi parametrlar o'zgarishlarining xarakterli vaqti τ^* elementning relaksatsiya vaqtidan τ_r ancha katta bo'lgan jarayonlarga kiritilishi mumkin. Bu shuni anglatadiki, ushbu turdagi o'tish rejimlarini tavsiflovchi oddiy usul kriogen sistemaning asosiy qismini kvazistatsionar deb qarashga asoslanishi mumkin.

Bunday qarash boshlang'ich sovutish rejimini tahlil qilishda, qachonki kriostatlanuvchi ob'ekt issiqlik sig'imi kriogen qurilmanikidan ancha katta bo'lganida o'rinlidir. Kriogen qurilmalarni boshlang'ich sovutish rejimi kvazidinamik yaqinlashishda tavsiflanishi mumkin; bu tavsiflashda dinamik omillar ta'siri tebranishlar nazariyasida e'tiborga olinadi, dinamik tashkil etuvchilar kichikligi sababli ular chiziqli yaqinlashish bilan hisoblanadi [6].

Qo'zg'atuvchi va rostlovchi ta'sirlar kam bo'lganida rostlanish ob'ekti sifatida IAA o'tish rejimlarini tadqiq qilish uchun dinamikaning chiziqli modeli qo'llaniladi; modelda IAA birlashtirilgan parametrlı ob'ekt sifatida qaraladi. Bunda qo'shimcha shartlar qabul qilinadi: issiqlik berish koeffitsientlari uzunlik bo'yicha o'zgarmas, lekin sarfga parametrik bog'liq deb qabul qilingan; korrdinatalar bo'yicha temperatura taqsimoti statik issiqlik almashinish formulalaridan olinadi va eksponent xarakterda; bosim chiziqli qonuniyat bo'yicha taqsimlangan deb qabul qilinadi; harakatlanish tenglamasi chegaraviy kesim orqali sarf tenglamasi bilan almashtiriladi, IAA gidravlik va issiqlik idishlari to'plamidan iborat deb qabul qilingan. Energiya, massa va harakatni saqlanish tenglamalar dastlabki sisteması G , p , T parametrlı harakat traektoriyasi yaqinida chiziqli ko'rinishga keltirilgan [6].

Avtomatik rostlash sistemalariga qo'yiladigan texnik talablarni shakllantirishda, odatda, o'tish xarakteristikalari deb ataluvchi kirish parametr io'zgarishi bilan chiqish parametrlarini vaqt o'zgarishiga bog'liqlik ifodalaridan foydalaniladi. Element (sistema) dinamikasi inersionlik va rostlanuvchanlik tushunchalari bilan ifodalanadi. Inersionlik son jihatidan pog'onasimon o'zgarishdagi o'tish rejimi egri chizig'i bilan erishilgan yangi rejimga mos to'g'ri chiziq orasidagi maydonga teng:

$$S = \int_0^{\infty} \left| \frac{f(t) - f(\infty)}{f(\infty)} \right| dt. \quad (2.19)$$

Rostlanuvchanlik sistema xususiyati bo'lib, avtomatik rostlash masalasini yengillatib, uning sifatini yaxshilaydi. Sistemaning rostlanuvchanligi deb, inersionlikni kechikish vaqtiga nisbatiga (τ) aytiladi:

$$R = S/\tau \quad (2.20)$$

Kechikish vaqti (τ) bu – ta'sir etishning boshlanish momentidan rostlanuvchi parametr o'zgarishining boshigacha bo'lgan vaqtdir.

Inersionlik va rostlanuvchanlik sistema elementlarining geometrik parametrlariga, kriogent issiqlik-fizik xossalriga va rejim parametrlariga bog'liq.

Sistemaning dinamik xossalarini baholashda vaqt doimiysi (T_i), o'tish rejimining vaqti (T_a), kuchayish koeffitsienti (K) tushunchalaridan foydalaniladi.

Vaqt doimiysi (T_a) o'tish rejimi egrichizig'iga o'tkazilgan urinma kesmasining absissa o'qiga (vaqt o'qiga) proeksiyasi sifatida aniqlanadi; urinma kesmasi urinish nuqtasi va chiqish kattaligining statik qiymat egri chizig'I bilan urinma kesishish nuqtasi uzunligidan iborat. O'tish rejimining vaqti (T_a) – ta'sirlanish boshidan statik rejim o'rnatilgan momentgacha (lahzagacha) bo'lgan vaqtdir. Kuchlanish koeffitsienti (K) – bir statik rejimdan ikkinchisiga o'tishda paramet ro'zgarishining ta'sir etuvchi omil kattaligiga nisbatidir [6].

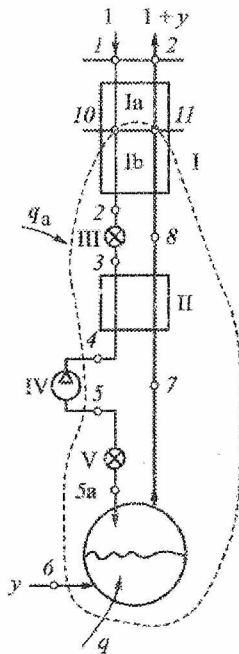
Hisob va tahlil metodikasi quyidagi bosqichlardan iborat:

- konstruksiya va rejim parametrlarining mumkin bo'lgan variantlarida o'tish xarakteristikalarini aniqlash;
- inersionlikni, kechikish va rostlanish vaqtlarini aniqlash;
- inersionlik va rostlanuvchanlikni ob'ekt parametrlariga bog'liqlik grafigini qurish;
- rostlanuvchanlikning keng imkoniyatlarini ko'zlab rostlanuvchi parametrlarni tanlash;
- o'tish jarayoni vaqtini (T_a), kuchlanish koeffitsientini (K) aniqlash, rostlash konturini hisoblash uchun dastlabki kattaliklarni tayyorlash (qabul qilish).

Sistemaning (qurilmaning) o'tish xarakteristikalarini kriogen sistemasini yaratishning ikki bosqichida aniqlash maqsadga muvofiq: tekshiruv hisobidagi nostatsionar modellar bo'yicha loyihalash bosqichida va tajriba yo'li bilan tekshirish bosqichida. Birinchi bosqich avtomatik boshqarish va rostlash sistemasini uchun texnik topshiriqni shakllantirish uchun zarur; bu sistema texnologik jihozlarga nisbatan keyinroq yaratiladi. Ammo bu bosqichda olingan o'tish xarakteristikasining aniqligi yaratilgan modellarning aniqligiga, kriogen sistemaning murakkablik darajasiga, hisobiy tahlilda qabul qilingan shartlarga va nihoyat jihozlarning joylashishiga, kommunikatsiya sxemasiga va h.k. qaram bo'lgan omillarning

oldindan e'tiborga olish imkoni yo'qligiga bog'liq. ABS uchun rostdash konturlarining ayrim xarakteristikalarini yetarli darajada tezkor qayta dasturlash imkonini beruvchi zamonaviy mikroprotsessor texnikasini (yoki shaxsiy EHM) qo'llaganda yuqorida ko'rsatilgan hol kritik emasdek ko'rinadi. Shunga qaramay, ikkinchi bosqich hattoki zarurdir, chunki sistemaning o'tish xarakteristikalarini aniqlash va ABS ga tegishli o'zgartirish hamda aniqliklar kiritish imkonini beradi. Bunday xarakteristikalarni olish imkonini kriogen sistemani loyihalashda ko'zda tutish lozim, bu kriogen sistemaning boshqarish organlari va diagnostikasi yakka ta'sir etuvchi omillar bilan ta'minlashi va o'tish jarayonida tegishli parametrlar o'zgarishini qayd etishi zarur. Agar biror-bir sabab tufayli o'tish xarakteristikalarini tajribada olib bo'lmasa, u holda rostdash qonunlari koeffitsientlarini empirik aniqlash lozimligi tufayli kriogen sistemasini ishga tushirish-sozlash bosqichi qiyinlashadi [6].

OTOR li KS hisobini alohida ko'rib chiqish talab etiladi. So'nggi o'n yilliklarda bu sistemalar keng tarqalgani uchun ular batafsil tahlil qilinib, natijalari jadval ko'rinishida olingan, bu sistemalar hisobini yengillatadi. Lekin uslubiy jihatdan OTOR li KS ni hisoblashning o'ziga xos tomonlarini ko'rsatish maqsadga muvofiqdir, chunki uning misolida boshqa KS hisoblashdagi qator usullarni ko'rib chiqish mumkin. 2.9-rasmda OTOR li tsiklning sxemasi ko'rsatilgan [6].



2.9-rasm. OTOR li KS tsiklini hisoblash sxemasi

OTOR li KSdagi energiyaning nisbiy sarfi quyidagicha aniqlanadi:

$$l_o = \frac{L_k + L_{sa} - L_d}{G_q}$$

Shunday qilib, OTOR li sistemani hisoblashning o'ziga xos jihatlardan biri shuki, krioagentni, jumladan, geliyni suyuqlantirish uchun sarf etiladigan ishni e'tiborga olish zarur; bu ish umumiy ishning 60% gacha qismini tashkil etishi mumkin. Demak, suyuqlantirish jarayonining samaradorligi butun sxemaning ish samaradorligiga hal qiluvchi ta'sirini ko'rsatadi. O'ziga xoslikning ikkinchisi shuki, energetik balansni butun tsikl uchun emas, balki $T_{\Delta T_{min}}$ temperatura zonasidan pastda joylashgan tsikl qismi uchun tuzish maqsadga muvofiqdir; tsiklning qismi quyilib kelayotgan oqim ulushi

kattaligi funksiyasi sifatida aniqlanadi $y = G_{quyul}/G$. Quyulib kelayotgan oqim ulushi birinchi yaqinlashuvda quyidagicha aniqlanadi [6]:

$$y = (c_{p10} - c_{p11})/c_{p11}.$$

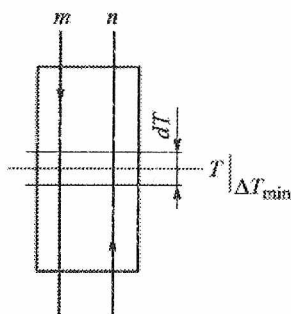
Bu ifoda o‘rinli ekanligini, $q - T$ diagramma elementini $T_{\Delta T_{min}}$ zona yaqinida ko‘rib chiqish bilan asoslash mumkin; element quyidagi formulalar bilan ifodalanadi:

$$dq = c_m dT_m = (1 + y)c_n dT_n;$$

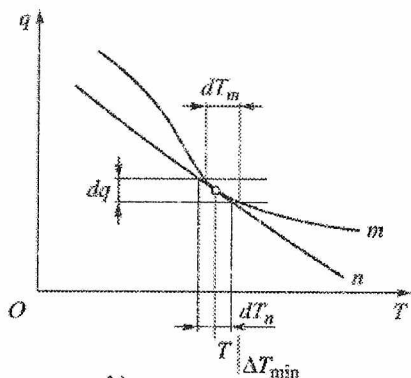
$$T_n = T_m - \Delta T_{min}; \quad dT_n = d(T_m - \Delta T_{min});$$

$$dq = c_m dT_m = (1 + y)c_n dT_m - (1 + y)c_n d\Delta T_{min};$$

$$c_m = (1 + y)c_n - (1 + y)c_n d\Delta T_{min}/dT_m.$$



a)



b)

2.10-rasm. Ortiqcha teskari oqim kattaligini yoki quyulish kattaligini y tahminiy aniqlashning talqini: $a - IAA$ elementi; $b - q - T$ diagramma; m va n – mos ravishda geliyning to‘g‘ri hamda teskari oqimlari

$\Delta T_m = (\Delta T_{mn})_{min}$ nuqtada $d\Delta T_{mn}/dT_m = 0$ shart bajarilganida

$$c_m = (1 + y)c_n$$

Demak,

$$y = (c_m - c_n)/c_n.$$

Amaliyotda, odatda, teskari yo'nalishda ish tutish qulay: $T_{\Delta T_{min}}$ massiv berilib, T_{10} ning har bir qiymatiga mos y qiymati aniqlanadi.

Energetik balans tenglamasidan siklning foydali sovutish unumdorligi aniqlanadi:

$$q_s = (i_4 - i_5) + y(i_{11} - i_6) + (i_{11} - i_{10}).$$

Krioagentlarning, ayniqsa, geliyning issiqlik sig'imi shundayki, $y = y_{min}$ da siklning samaradorligi ijobiydir ($q_s > 0$), bunda detanderning η_{ad} qanchalik katta bo'lsa, y_{min} shunchalik kichik. y ortishi bilan sovutish unumdorligining deyarli to'g'ri chiziqli o'sishi kuzatiladi, so'ngra rekuperatsiya nomukammalligi sababli yo'qotuvlar ortishi bilan bog'liq bo'lgan q_s ning o'sishi keskin sekinlashadi. Bundan tashqari, y ning yuqori chegaraviy qiymatdan ortishi $T_{\Delta T_{min}}$ dan pastdagi temperatura zonasida IAA unumini pasaytirishi mumkin. Bu holda oraliq drossellanishni qo'llab OTOR xarakteristikasini birmuncha yaxshilash mumkin [6].

2.2. Drossellanish bilan kechadigan sikllar

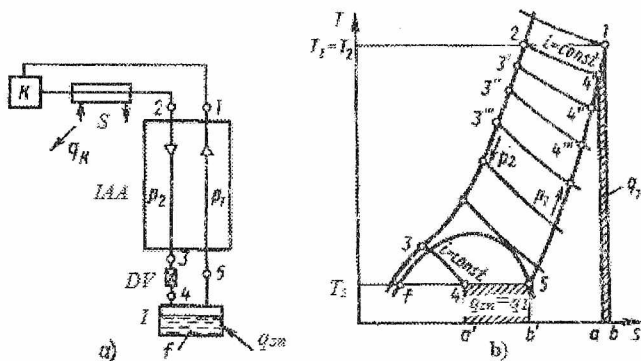
Oddiy drossellashli sikl. Drossellanish jarayoniga ($i = const$) asoslangan sikllar kriogen texnikasida eng keng tarqalgan. Bunga sabab drossellash qurilmasining soddaligi va ishlashda ishonchligidir. Bu sabablar drossellanishning yuqori darajada qaytmasligi va natijada past iqtisodiy samaradorligi kabi kamchiliklarini bir muncha qoplaydi [1].

1895 yilda Germaniyada K.Linde va Angliyada Xempson bir-birlaridan mustaqil holda drossellashli siklni amalga oshirishgan. Sikl texnikaga qo'llanilgan birinchi kriogen sikli hisoblanib, hozirda ham o'sha va modifikasiyalashgan ko'rinishda ishlatiladi.

Siqilgan atrof-muhit haroratidagi gazni drossellash uning haroratini bir oz pasaytiradi. Masalan, harorati $T_0 = 300$ K bo'lgan havoni $p_2 = 20$ MPa bosimdan $p_1 = 0,1$ MPa gacha $i = const$ jarayon bo'yicha kengaytirish uning haroratini $T \approx 35$ K ga pasaytiradi. Bundan ham past haroratlarga pasaytirish va gazlarni suyuqlantirish uchun drossellash jarayonini regenerativ issiqlik almashinish bilan olib borish kerak.

Regenerativ issiqlik almashinish hozirgi paytda deyarli barcha kriogen sikllarida qo'llaniladi, bunda biror sovutish jarayonlari regenerativ issiqlik almashinish bilan turli kombinatsiyalarda ishlatiladi. Regenerativ issiqlik almashinishning mohiyati sikl ichida ishchi jism to'g'ri (issiqlik) va teskari

(sovuq) oqimlari issiqlik almashinishidir. Natijada, ishchi jismning temperaturasi sovush effektidan (kengayish) oldin ancha past qiymatga tushadi. Ta'kidlash zarurki, bu issiqlik almashinish ichkidir; atrof-muhit bilan energiya almashinmaydi [1].



2.11-rasm. Drossellashli nazariy sikl. a) - qurilma sxemasi; b) - siklning $T-s$ diagrammadagi tasviri

Regenerativ issiqlik almashinishni oddiy drossellashli siklida qo'llanishini ko'raylik (2.11-rasm). Sxemadagi va $T-s$ diagrammadagi xarakterli nuqtalar bir xil belgilangan. Siklning prinsipial sxemasi (S) sovutgichli (K) kompressor, issiqlik almashinish apparati (LAA), (DV) drossel ventil va (I) idishdan iborat. Siklni tahlil qilib chiqamiz. Avval issiqlik almashinish apparatida yo'qotuvlar bo'lmagan nazariy siklni ko'raylik.

Refrijerator rejimi (nazariy sikl). Yopiq kontur bo'yicha 1kg ishchi jism sirkulyasiya qilinadi. Issiqlik regeneratsiya qilinmaganida sikl qanday ishlashini, keyin issiqlik regeneratsiya qilinganidagi ishga tushirish va turg'un ishlash rejimlarini ketma-ket ko'rib chiqamiz. Dastlabiga kriogen qurilmasining barcha elementlari bir xil, atrof-muhit haroratiga teng $T_1 = T_0$ haroratga ega bo'ladilar. Kompressorda (K) 1kg gaz p_1 bosimdan p_2 bosimgacha siqiladi. Bu jarayon ($1-2$ chiziq) izotermik deb qabul qilinadi ($T_1 = T_2$), siqish issiqligi q_k atrof-muhitga sovutgichda (s) olinadi. 2 nuqtaga (yoki 3) mos keluvchi siqilgan gaz (IAA yo'q) drossel ventildan o'tib p_1 bosimgacha $i = const$ holda kengayadi ($2-4'$ jarayon); natijada temperatura $T_1 = T_2$ dan T_4 gacha pasayadi. Endi gazni T_4 , dan T_1 gacha ($p = const$) isitish mumkin, bunda gaz biror-bir ob'ektdan issiqlikni T_4 , dan

T_1 gacha oluvchi sovutuvchi muhit sifatida ishlatiladi. 1 kg gazga to'g'ri keluvchi olinuvchi issiqlik (sovutish effekti)

$$q_1 = i_1 - i_{4'} = i_1 - i_2 = \Delta i_n \quad (2.21)$$

bu erda Δi_n -- izotermik drossellanish effekti (jarayon sovutish unumdorligiga mos).

$T-s$ diagrammada $ab14''$ maydon $q_1 = \Delta i_n$ issiqlikni ifodalaydi. Ko'rib chiqilgan jarayon regenerativ IAAsiz sodir bo'ladi va temperaturaning erishilgan pasayishi $\Delta T = T_1 - T_{4'}$ -- mumkin bo'lgan chegaraviydir. IAA ishlatilishi sovutish darajasini sezilarli, kondensatsiya temperaturasi gacha T_k pasaytiradi. Buning uchun drossellanishdan keyin $T_{4'}$ holatdagi gaz (birinchi porsiya) IAA orqali teskari yo'nalishda T_1 gacha isib va shubilan birga kompressordan 2 holatda kelayotgan gazning ikkinchi porsiyasini (1 kg) sovutib harakatlanadi. Bu oqimlar $q = i_1 - i_{4'} = i_2 - i_3$, miqdorda issiqlik almashinadi, natijada to'g'ri oqimning temperaturasi T_3 gacha pasayadi. So'ng to'g'ri oqim drossellanadi ($3' - 4''$ jarayon), yanada pastroq temperaturagacha $T_{4''}$ soviydi va IAA orqali gazning uchinchi porsiyasini (1 kg) sovutib K ga qaytaradi. Bunday issiqlik balansi: $q = i_1 - i_{4''} = i_2 - i_3''$. Bunda to'g'ri oqimning temperaturasi T_3'' gacha pasayadi. Uchinchi drossellanish $T_{4''}$ gacha sovush imkonini beradi va h.k.

Sovutish jarayoni temperatura minimal qiymatga T_s pasaygunicha davom etadi; bunda ishchi jism ikki fazali hududda bo'ladi, T_k faqatgina p_1 bilan aniqlanadi va f suyuqlik hosil bo'ladi. p_1 bosimni tushurish bilangina T_k ni pasaytirish mumkin.

Turg'un rejimda, eng past T_s temperaturaga erishilganidan so'ng, barcha jarayonlarni sodir bo'lish ketma-ketligi quyidagicha. Kompresorda K siqilgan gaz IAAda T_2 temperaturadan T_3 gacha soviydi, T_3 temperaturadan $T_4 = T_k$ gacha drossellanadi va qisman kondensatsiyalanadi. Suyuqlik bo'lgan I idishga T_k temperaturali sovutiluvchi ob'ektdan foydali issiqlik yuklamasi q_{sn} beriladi. q_{sn} issiqlik berilishi natijasida I idishda suyuqlik bug'lanadi, ketayotgan oqim entalpiyasi i_5 gacha ortadi. Bunday sovutish unumdorligi (1 kg ishchi jism uchun)

$$q_{sn} = i_5 - i_4. \quad (2.22)$$

$T-s$ diagrammada $a'b'54$ maydon q_{sn} ga teng. 5 nuqtaga mos holatdagi ishchi jism IAAGA kelib, $T_1 = T_2$ temperaturagacha isiydi va kompressorga qaytadi; sikl yopiladi [1].

q_{sn} ni IAAning issiqlik balansidan aniqlaymiz. To'g'ri oqim T_2 dan T_3 temperaturagacha sovub, entalpiyasi pasayadi, $q_n = i_2 - i_3$ issiqlik beradi. Teskari oqim $q_n = i_1 - i_5$ issiqlikni olib T_5 dan T_1 gacha isiydi. IAAdagi issiqlik balansi shartidan

$$q_n = i_2 - i_3 = i_1 - i_5 \quad (2.23)$$

yoki

$$i_5 - i_3 = i_1 - i_2. \quad (2.24)$$

$i_3 = i_4$ va $i_1 - i_2 = \Delta i_n$ bo'lgani uchun ([1] (6.27) ga qarang) quyidagini yozish mumkin:

$$q_{sn} = i_5 - i_4 = \Delta i_n. \quad (2.25)$$

Bu natija prinsipial ahamiyatga ega, chunki sovutish unumdorligi $q_{sn} = q_1$ ([1] (6.27) va (6.31) ga qarang) drossellanish effekti sodir bo'luvchi temperatura darajasiga bog'liq emas; sovutish unumdorligi T_1 da ham T_5 da ham bir xil va ikkala holda ham kompressorda gazning siqilishidagi drossellanish izotermik effekti bilan aniqlanadi:

$$q_{sn} = \Delta i_n = i_1 - i_2 = i_5 - i_4. \quad (2.26)$$

Siqish jarayoni 1 – 2 da gaz entalpiyasining kamayishi ($i_1 - i_2$) real gaz xossalari bilan aniqlanadi. Shu tariqa p_1 dan p_2 gacha izotermik siqish jarayonida ishchi moddani sovutish potensial imkoniyati yaratiladi, bunda u dastlabki bosimga p_1 qaytariladi. Bu effekt drossellanish jarayonida namoyon bo'ladi va drossellanish temperaturasiga bog'liq emas.

Drossel ventil sovutish unumdorligini hosil qilmaydi, faqat uni amalga oshiradi, IAA esa Δi_n effektini ancha past temperatura darajasiga ko'chirishga imkon beradi. Sovutish darajasi kondensatsiya temperaturasi T_5 bilan belgilanishi shart emas, u T_1 dan T_5 temperaturagacha oraliqda bo'lishi mumkin. Temperatura darajasidan qat'iy nazar sovutish unumdorligi q_{sn} o'zgarmas va Δi_n ga teng.

Issiqlik almashinish ideal bo'lmaganligi tufayli issiqlik to'liq rekuperatsiya qilinmaydi, ya'ni chiqayotgan teskari oqim harorati T_1 kirayotgan to'g'ri oqim $T_2 = T_1$ haroratidan ΔT kattalikka kichik ($1'$ nuqta). Natijada siqilgan gaz nazariy sikldagi T_{3n} haroratgacha soviy olmaydi va ancha yuqoriroq T_{3r} haroratga erishadi. Drossellanishdan so'nggi holat nazariy sikldagi entalpiyadan ancha yuqoriroq $4'$ nuqta entalpiyasi bilan ifodalanadi. Natijada nazariy sovutish unumdorligi $q_n = i_{4'} - i_{4n}$ va

$q_s = i_{5'} - i_{4'}$ ga kamayadi. $T-s$ diagrammada q_n $a4_nA'c$ maydon bilan ifodalanadi. $1'$ va $3'$ holatlar orasidagi bog'liqlik quyidagicha [1]:

$$q_n = i_{3'} - i_{3n} = i_1 - i_{1'} \quad (2.27)$$

q_n odatda boshqacha ifodalanadi; issiqlik sig'imini $T_{1'}$ dan T_1 gacha bo'lgan intervalda $c_p = const$ deb olib:

$$q_n = i_1 - i_{1'} = c_p \Delta T \quad (2.28)$$

bu yerda: ΔT – haroratlar farqi rekuperasiya noidealligi sababli hosil bo'ladigan yo'qotuvlarni belgilaydi.

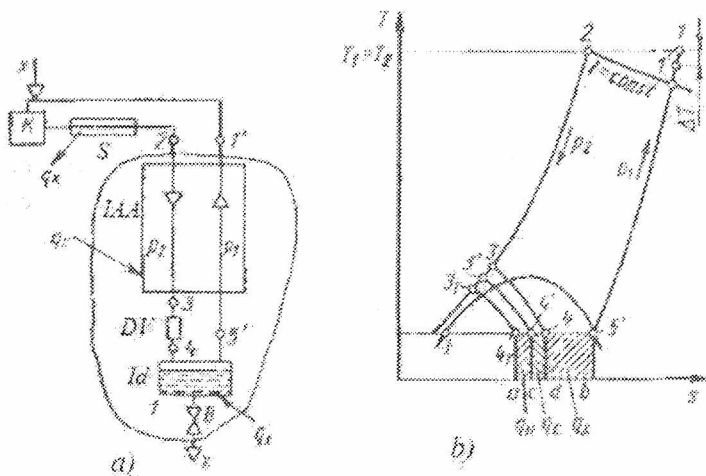
Sovutish unumdorligini kamayishining boshqa sababi issiqlik izolyasiyasining nomukammalligi tufayli atrof-muhitdan q_{at} issiqlik oqimining kirishidir. q_{at} issiqlik oqimi to'g'ri gaz oqimini p_2 bosimda T_3' haroratgacha emas, balki yuqoriroq haroratgacha (entalpiyagacha) – 2.12-rasmda 3 nuqtagacha sovushiga sabab bo'ladi:

$$i_2 - i_{3'} - q_{at} = i_2 - i_3 \quad (2.29)$$

ya'ni:

$$q_{at} = i_3 - i_{3'} = i_4 - i_{4'} \quad (2.30)$$

natijada foydali sovutish unumdorligi q_{at} ga kamayadi. $T-s$ diagrammada issiqlikning bu miqdori $c4'd$ maydonga ekvivalent.



2.12-rasm. Drossellashli nazariy sikl. a) - qurilma sxemasi; b) - siklning $T-s$ diagrammadagi tasviri

Real siklning sovutish unumdorligi, ko'rib chiqilgan yo'qotuvlarni e'tiborga olgan holda, $d45'b$ maydonga teng va:

$$q_s = q_{sn} - q_n - q_{at} = q_{sn} - \sum q \quad (2.31)$$

bu yerda $q_{sn} = \Delta i_n$; $\sum q = q_n + q_{at}$.

(2.31) tenglamani sikl uchun energetik balansni hisoblab olish ham mumkin.

Suyuqlantirish rejimi. Suyuqlantirish siklida ham siqilgan gaz drossellanadi, lekin gaz ob'ektni sovutish uchun emas, balki ishchi jismning bir qismini suyuqlantirish uchun ishlatiladi. Sikl sxemasi 2.12-rasmdagidek qoladi, lekin unga qo'shimcha ravishda V ventil o'rnatilgan. Ventildan hosil qilinadigan x miqdor i_f entalpiyasi suyuqlik olinadi. To'g'ri oqim miqdori teskari oqimnikidan katta bo'lib, teskari oqim miqdori $(1-x)$ ga teng; sikl yopiq emas. Kompresor doimiy ravishda 1kg siqilgan gaz berishi uchun teskari oqimga, diagrammada 1 nuqtadagi holat, olinayotgan suyuqlik miqdoriga teng miqdorda x ishchi jism qo'shish zarur. q_n va q_{at} yo'qotuvlarni e'tiborga olib, 2.12, a -rasmda chegaralangan zona uchun energetik balans tenglamasini yozamiz [1]:

$$i_2 + q_{at} = x i_f + (1-x) i_1, \quad (2.32)$$

(2.27) dan foydalanib suyuqlantirish koeffitsientini topamiz

$$x = (i_1 - i_2 - c_p \Delta T - q_{at}) / (i_1 - i_f - c_p \Delta T) = (\Delta i_n - \Sigma q) / (i_1 - i_f - q_n) \quad (2.33)$$

bu yerda $\Sigma q = c_p \Delta T + q_{at}$ - yo'qotuvlar yig'indisi.

(2.33) formula suratida - foydali sovutish unumdorligi, mahrajida - 1kg gazni suyuqlantirish uchun zaruriy sovuqlik miqdori. Tabiiyki, nazariy sikl uchun $\sum q = 0$ va

$$x = \Delta i_n / (i_1 - i_f) \quad (2.34)$$

Siklning xarakteristikalar. Drossellanish sikllarida energiya sarfi kompressordagi siqish ishi l_k (p_1 va p_2 bosim intervalida) bilan belgilanadi. Nisbiy sarflangan ish quyidagicha hisoblanadi: nazariy sovutish sikli uchun:

$$l_{on} = l_{iz} / q_{sn} = [RT_1 \ln(p_2/p_1)] / \Delta i_n \quad (2.35)$$

real sovutish

$$l_o = l / q_s = [RT_1 \ln(p_2/p_1)] / [\eta_{iz} (\Delta i_n - \Sigma q)] \quad (2.36)$$

real suyuqlantirish

$$l_0 = l/x = [RT_1 \ln(p_2/p_1)] / (\eta_{iz} x) \quad (2.37)$$

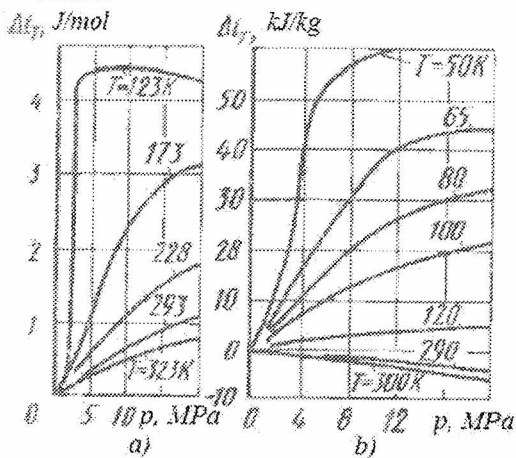
sovutish koeffitsienti nazariy sikl uchun:

$$\varepsilon_n = \Delta i_n / [RT_1 \ln(p_2/p_1)] \quad (2.38)$$

real sikl uchun:

$$\varepsilon_n = [(\Delta i_n - \Sigma q) \eta_{iz}] / [RT_1 \ln(p_2/p_1)] \quad (2.39)$$

Siklning optimal parametrlari. Nisbiy sovutish unumdorligi (2.31) va suyultirish koeffitsientining (2.33) formulalaridan shuni ta'kidlash mumkinki, q_a hamda x ning maksimal qiymatlari drossel-effekt Δi_n maksimal qiymatlariga mosdir. Bu formularga kiruvchi boshqa kattaliklar deyarli o'zgarmasdir, bunda $\Delta i_n = f(T, p)$ (2.13-rasm). Bu bog'liqlikning xarakteri [1] da batafsil ko'rib o'tilgan. Boshlang'ich temperaturaning T_2 pasayishi bilan Δi_n ning qiymati sezilarli ortadi, ammo ma'lum bir sikl uchun $T_2 = T_0 = const.$



2.13-rasm. Havo (a) va neon (b) ning turli temperaturalarda drossellanish izotermik effektini Δi_n bosimga bog'liqligi

$p_2 (p_1 = const)$ bosimning ta'siri murakkab xarakterga ega. Dastlabiga p_2 ning ortishi Δi_n ni inversiya holatigacha o'sishiga olib keladi. p_2 ning yanada ortishi Δi_n ni kamaytiradi. Δi_n ning maksimal qiymati inversiya bosimiga $p_{inv} = f(T)$ mos kelib, bosimni inversiya egri chizig'idan topiladi (60-rasm [1]). $\Delta i_n = f(p)$ bog'liqlikning botiq maksimumini e'tiborga olib, $p_2 < p_{inv}$ deb qabul qilish mumkin.

1-masala. Oddiy refrijerator siklining nisbiy sovutish unumdorligi q_s , nisbiy ish l_o , ε va η_t koeffitsientlari nazariy va haqiqiy variantlar uchun aniqlansin. Ishchi jism – havo; kompressorda siqish temperaturasi $T_1 = 300$ K; oqimlar bosimlari $p_1 = 0,098$ MPa, $p_2 = 19,6$ MPa; $T_s = 78,6$ K rekuperatsiya nomukammalligi $\Delta T = 5$ K; issiqlik oqimi $q_{at} = 6$ kJ/kg; $\eta_{iz} = 0,6$; issiqlik sig‘imi $c_p \approx 1$ kJ/(kg·K); gaz doimiysi $R = 0,287$ kJ/kg.

Havoning $T - s$ diagrammasidan xarakterli nuqtalardagi entalpiya aniqlanadi (2.12-rasm): $i_1 = 300$ kJ/kg; $i_2 = 266$ kJ/kg. Nazariy siklning sovutish unumdorligi [(2.26) ga qarang]

$$q_{s,n} = 300 - 266 = 34 \text{ kJ/kg.}$$

Rekuperatsiya nomukammalligi tufayli bo‘lgan yo‘qotuvlar

$$q_n = c_p \Delta T = 1 \cdot 5 = 5 \text{ kJ/kg;}$$

U holda haqiqiy siklning nisbiy sovutish unumdorligi [(2.31) ga qarang]

$$q_s = 34 - 5 - 6 = 23 \text{ kJ/kg.}$$

Nisbiy ish sarflari [(2.35) va (2.36) ga qarang]

$$l_{o,n} = [0,287 \cdot 300 \ln(19,6/0,098)]/34 = 13,8 \text{ kJ/kJ;}$$

$$l_o = [0,287 \cdot 300 \ln(19,6 / 0,098)] / (0,6 \cdot 23) = 33 \text{ kJ/kJ.}$$

Bu holda sovutish koeffitsienti l_o ga teskari kattalikdir, demak, $\varepsilon_n = l/13,8 = 0,072$, $\varepsilon = l/33 = 0,0303$.

Termodinamik FIK hisoblashda η_t ni Karno siklining etaloni sifatida qabul qilamiz.

$$\varepsilon_s = T_s/(T_1 - T_s) = 78,6/(300 - 78,6) = 0,356.$$

U holda (2.40) dan foydalanib, nazariy va haqiqiy sikllar uchun quyidagini olamiz

$$\eta_{tT} = 0,072/0,356 = 0,202; \eta_t = 0,0303/0,356 = 0,0852.$$

2-masala. Oddiy drossellashli suyuqlantirish haqiqiy sikli uchun suyuqlantirish koeffitsienti x , nisbiy ish l_o hamda $\varepsilon\eta_t$ koeffitsientlari aniqlansin. Ishchi jism – havo; boshlang‘ich kattaliklar 1-masaladagidek; hisoblash sxemasi 2.12-rasm bo‘yicha.

$T - s$ diagrammadan f nuqtadagi suyuqlik entalpiyasini aniqlaymiz.

Suyuqlantirish koeffitsienti [(2.33) ga qarang]

$$x = [(300 - 266) - (5 + 6)]/(300 + 128 - 5) = 0,0533.$$

Ish sarfi:

Suyultirilgan gaz massa birligiga [(2.37) ga qarang]

$$l_o = [0,287 \cdot 300 \ln(19,6/0,098)]/(0,6 \cdot 0,0533 \cdot 10^3) = 14,2 \text{ MJ/kg;}$$

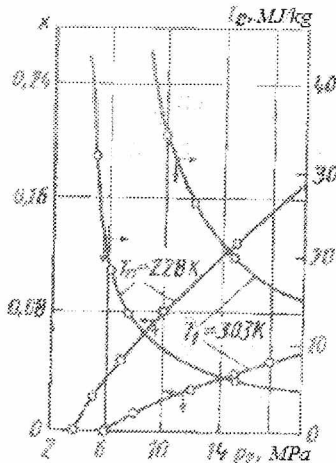
1 kg suyuq havoga

$$l_{osuyul} = 14,2 \cdot 0,873 = 12,4 \text{ MJ/l,}$$

bu yerda 0,873 kg/l – suyuq havo zichligi.

(2.39) ga ko'ra sovutish koeffitsienti refrijerator siklidagidek qiymatga ega: $\varepsilon = 0,0303$. Termodinamik FIKni ideal suyuqlantirish sikliga nisbatan aniqlaymiz; ideal sikl uchun ([1] (5.46) ga qarang, bunda $s_1 = 6,85 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ va $s_f = 2,96 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ havoning $T - s$ diagrammasidan aniqlangan) sovutish koeffitsienti quyidagiga teng:

$$\varepsilon_{id} = (300 + 128) / [300(6,85 - 2,96) - (300 + 128)] = 0,576.$$



2.14-rasm. Dastlabki sovutishli ($T_d = 228 \text{ K}$) va sovutishsiz ($T_1 = 303 \text{ K}$) drossellashli havoni suyuqlantirish sikllarining xarakteristikalarini

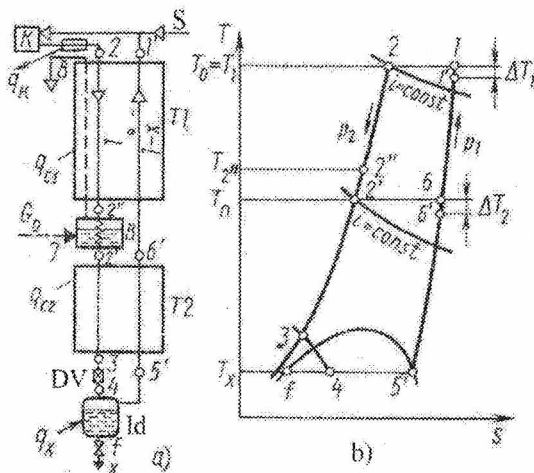
Termodinamik FIK

$$\eta_t = 0,0303 / 0,576 = 0,0527.$$

1-va 2-masalalarda hisoblar $p_1 = 19,6 \text{ MPa}$ bosim uchun bajarilgan. p_2 ning ortishi q_x , x va siklning boshqa xarakteristikalarini ko'payishiga olib keladi. 2.14-rasmda suyuqlantirish sikli uchun x va l_0 ning p_2 ga bog'liqligi berilgan.

Dastlabki sovutish va drossellashli sikl. Drossellash bosqichiga kelayotgan ishchi jism haroratini dastlabki sovutish bilan drossellashli sikl xarakteristikasini birmuncha yaxshilish mumkin.

Bu barcha real gazlar uchun Δi_i ni anchaga oshiradi. Ayniqsa, atrof-muhit harorati ($T_0 \approx 300\text{K}$) da $\Delta i_n < 0$ ga ega bo'lgan neon uchun Δi_n ni o'zgarishi xarakterli. Uning haroratini sezilarli pasaytiribgina yetarli darajada katta bo'lgan ijobiy drossel-effektini olish mumkin. Bunday hol geliy va vodorod uchun ham o'rinli.



2.15-rasm. Drossellashli va dastlabki tashqi sovutishli tsikl: a – sxema; b – T - s diagramma

Dastlabki sovutish ikki funktsiyani bajarishi mumkin: a) $T_{inv} > T_0$ o'rinli bo'lgan ishchi jismlar uchun (havo, O_2 , N_2 , CH_4 va boshqalar) drossel-effektini Δi_n oshirishi; b) $T_{inv} < T_0$ o'rinli bo'lgan ishchi jismlar (Ne , H_2 , He) uchun Δi_i ijobiy qilishi. Bundan tashqari, dastlabki sovutish $q_n + q_{am}$ yo'qotuvlarini qisman qoplaydi.

Dastlabki sovutishni har qanday tashqi sikl bilan amalga oshirish mumkin; ko'pincha buning uchun alohida qurilmada suyuqlantiriladigan sovutish agenti ishlatiladi. Bunda sikl ikki bosqichli siklga aylanadi, chunki ikkita past haroratli jarayonlar – drossellash va tashqi dastlabki sovutish qo'llaniladi. Sikl sxemasi va uning T - s diagrammadagi tasviri 2.15-rasmda berilgan. Sxema ikkita ketma-ket ulangan bosqichlardan iborat.

K kompressorda 1 kg gaz $T_1 = T_0 = const$ haroratda p_1 bosimdan p_2 bosimgacha siqiladi (1-2 jarayon); siqishdagi issiqlik q_k atrof-muhitga

uzatiladi. So'ng oqim T_1 issiqlik almashinish apparatida T_2 haroratdan T_2'' gacha soviydi, issiqlik V vannada suyuq sovutish agenti (G_0) tomonidan olib ketilib, harorat T_2'' da T_2' gacha pasayadi. Keyingi sovush T_2 issiqlik almashinish apparatida (T_2' dan T_3 gacha) ro'y beradi; oqim DV ventilida drossellanadi (3-4 jarayon) va qisman suyuqlanadi. Sovutish rejimida Id idishga q_s issiqlik keladi, suyuqlantirish rejimida – x miqdorda suyuqlik olinadi.

1 kg (suyuqlantirishda $1-x$) miqdordagi teskari oqim $IAA1$ va $IAA2$ apparatlaridan o'tib isiydi va sikldan chiqariladi. Sovutuvchi suyuqlik G_0 dastlabki sovutish harorati $T_{2'} = T_d$ ni ta'minlaydi, T_1 darajasida rekuperatsiya nomukamalligi ΔT_1 ni tashkil qiladi, $T_d = T_{2'}$ darajada esa – ΔT_2 ; atrof-muhitdan keluvchi issiqlik oqimlari mos ravishda – q_{at1} va q_{at2} .

Siklning drossellash bosqichi (T_d dan past harorat)ni o'rganish va uni oddiy drossellashli sikl sxemasi bilan taqqoslash ularning to'liq o'xshashligini ko'rsatadi. Farq faqat shundaki, oqimning bu bosqichga kirish harorati $T_{2'}$, atrof-muhit haroratidan T_o ancha past. Yuqorigi bosqich (T_d dan yuqori) ishchi jismni sovutish agenti G_0 bilan sovutishdan tashqari teskari oqim issiqligini ($T_{6'} - T_{1'}$) $IAA1$ apparatida rekuperatsiya bo'lishini ta'minlaydi.

Suyuqlantirish koeffisienti

$$x = (\Delta i_{n2'} - c_p \Delta T_2 - q_{at2}) / (i_6 - i_f - c_p \Delta T_2) \quad (2.40)$$

Bu formula tuzilishi jihatidan oddiy drossellashli sikl uchun olingan (2.33) ifodaga to'liq mos keladi, lekin bu siklda x sezilarli ko'payadi, chunki $\Delta i_{n2'} > \Delta i_{T_1}$, maxrajda esa $i_{6'} - i_f < i_1 - i_f$.

To'g'ri oqimdan V vannada sovutish agenti (G_0) olayotgan issiqlik

$$q_o = G_o (i_8 - i_7) = x (i_{1'} - i_{6'}) + [\Delta i_{n2'} - \Delta i_{n1} + c_p (\Delta T_1 - \Delta T_2) + q_{at1}] \quad (2.41)$$

Bu issiqlik T_1 haroratdan T_d gacha intervalda suyuqlantiriladigan oqim etalpiyasini pasaytirishga hamda yo'qotuvlarni qoplash va drossel effektini Δi_{T_1} dan $\Delta i_{T_2'}$ gacha oshirishga sarflanadi. Rekuperatsiyaning nomukamalligi ΔT_1 siklning asosiy ko'rsatgichlari q_x va x ga ta'sir etmasligi sababli qiymatlarini ΔT_1 kattaroq olinadi (15-20 K gacha). Bu G_0 suyuqligi sarfini oshirsa ham $IAA1$ apparatining o'lchamlarini sezilarli kamaytiradi.

Ushbu siklda sarflangan to'liq ish kompressorda gazni siqish ishi L_k dan va (G_o) suyuqlikni olish uchun qo'shimcha sarflangan energiyadan iborat:

$$L = L_k + L_{qo'sh} \quad (2.42)$$

bu yerda $L_{qo'sh} = G_o \cdot l_o$; l_o – sovutish agenti massa birligini olishga sarflangan ish.

$L_{qo'sh}$ ni quyidagicha aniqlash maqsadga muvofiq:

$$L_{qo'sh} = q_o / q_{oqo'sh} \quad (2.43)$$

bu yerda $q_{oqo'sh}$ – sovutish agenti (masalan, ammiak yoki freon) qurilmada ishlab chiqaruvchi sovutish unumdorligi.

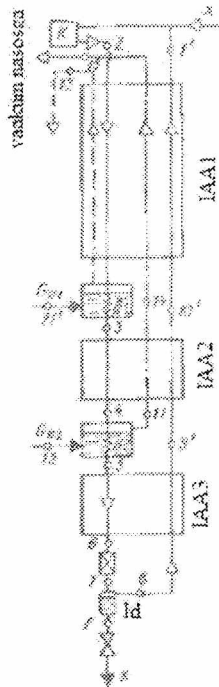
Nisbiy ish sarfi: sovutish siklida

$$l_o = \frac{L_k + L_{kyuu}}{q_x} = \frac{RT_1 \ln(p_2/p_1)}{\eta_{us}(\Delta i_{T2'} - \Sigma q_2)} + \frac{G_o I_{ok}}{\Delta i_{T2'} - \Sigma q_2} \quad (2.44)$$

suyuqlantirish siklida

$$l_o = \frac{L_k + L_{kyuu}}{x} = \frac{RT_1 \ln(p_2/p_1)}{\eta_{us}x} + \frac{G_o I_{ok}}{x} \quad (2.45).$$

Bir necha bosqichli dastlabki sovutish sikli. Dastlabki sovutishni bir necha pog'onada qo'llash kondensatsiya temperaturasi juda past kriogen moddalar, aynan vodorod va geliy uchun xosdir. Bunda sikl birmuncha murakkablashadi, lekin termodinamik xarakteristikalari yaxshilanadi, iqtisodiy tejamkorlik ko'payadi. Bir necha bosqichli dastlabki sovutish siklini ko'rib chiqaylik. 2.16-rasmda to'g'ri oqimni ikki $V1$ va $V2$ vannalarda sovutib, keyin drossellab vodorodni suyuqlantirish sxemasi ko'rsatilgan. 2.15- rasmdagi sxema bilan solishtirilsa, $V2$ vanna va IAA 2 qo'shilgan; sovutuvchi oqim, avvalgi sxemadagidek, suyuq azot $V1$ vannada G_{o1} azot oqimi atmosfera bosimida qaynaydi ($T_3 = T_{o1} \approx 80 K$). $V2$ vannada G_{o2} azot oqimi vakuumda qaynaydi ($T_5 = T_{o2} \approx 65 K$).



2.16-rasm. Vodorod va geliyni ikki bosqichda dastlabki sovutish bilan suyuqlantirish siklining sxemasi

Siklni bunday tashkil qilinishi bir vannada barcha azot vakuumda qaynovchi 2.15- rasm siklidagi sarfga qiyosan azotning umumiy sarfini kamaytirish imkonini beradi. Kichik qurilmalarda vakuum oqimining G_{o2} sovuq bug'leri IAA 2 dan keyin IAA 1 ga kiritilmasdan darhol sikldan chiqariladi; bu vakuum nasos tomonidan bug'ni so'rib chiqarishni soddalashtiradi, garchi sovuqlik yo'qotuvlari oshsada. Sikl hisobi x , G_{o1} , G_{o2} hamda l_o , ε , η_t xarakteristikalarini aniqlashni ko'zda tutadi. Suyuqlantirish koeffitsenti x va G_{o2} oqimni (2.40) hamda (2.41) formulalardan topiladi. Yuqori bosqich uchun hisoblash formulasi avval ko'rib chiqilgan variantlarnikidan farqlanadi, chunki undan qo'shimcha teskari oqim G_{o2} o'tadi. Bu bosqichning energiya balans tenglamasidan quyidagini olamiz:

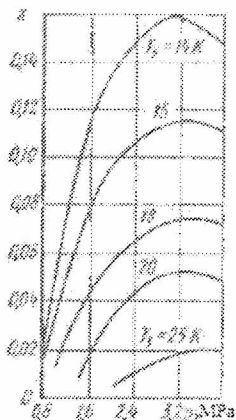
$$q_{o1} = G_{o1}(i_{12} - i_{11'}) = x(i_{1'} - i_{10'}) + [(\Delta i_{T3} - \Delta i_{T1}) + c_p(\Delta T_1 - \Delta T_3) + q_{a1}] - G_{o2}(i_{15} - i_{14}). \quad (2.46)$$

Bu usulni geliy uchun qo'llaganda uning inversiya temperaturasi juda kichik ekanligini ($T_{inv} \approx 40 \text{ K}$) e'tiborga olish lozim, demak geliyni dastlabki sovutishni faqatgina suyuq vodorod bilan amalga oshirilishi mumkin. Buning uchun ikkita vanna bilan dastlabki sovutishni qo'llash maqsadga muvofiq, bunda G_{o1} va G_{o2} sovutuvchi oqimlar farq qiladi.

V1 vannada suyuq azot qaynaydi ($T_{o1} \approx 80\text{K}$), *V2* vannada esa – suyuq vodorod ($T_{o2} = 20 \div 14 \text{ K}$). Atmosfera bosimida vodorod 20,4 K temperaturada qaynaydi, vakuumda temperaturani 14÷16 K gacha pasaytirish mumkin (uchlama nuqta 13,95K).

Bu sikldagi barcha oqimlarni uchta bosqichning energetik balans tenglamasidan topiladi: 1-bosqich uchun – T_2 dan T_3 gacha temperaturalar intervalida, 2-bosqich uchun – T_3 dan T_5 gacha intervalda, 3-bosqich uchun – T_5 dan T_j intervalida. Suyuqlantirish koeffitsienti (2.40) formula bo'yicha hisoblanadi, bunda uning qiymati vodorod vannasi T_5 temperaturasidagi drossellanish izotermik effekti Δi_T bilan aniqlanadi.

x koeffitsientni p_2 bosim va temperatura T_5 ga bog'liqligi 2.17-rasmda ko'rsatilgan. Egri chiziqlar maksimumlari inversiya bosimiga mos keladi (geliy uchun $p_{inv} \approx 3 \text{ MPa}$); amaliyotda $p_2 = 2,5 \div 2,2 \text{ MPa}$ qo'llanadi. T_5 ni 20 K dan 14 K ga pasayishi x ni taxminan 3 barobar oshiradi. 3-bosqichdagi $\Delta T_5 = T_5 - T_9$, rekuperatsiya nomukammalligi x kattalikka kuchli ta'sir qiladi; $\Delta T_5 < 1 \div 0,5\text{K}$ deb qabul qilinadi. Issiqlik oqimi $q_{a2} = (0,03 \div 0,05)\Delta i_{T5}$. Vodorod sarfi $G_{H_2} = G_{o2}$ 2.16-rasmni e'tiborga olgan holda (2.41) formuladan topiladi.



2.17-rasm. Dastlabki sovutish va drossellashli siklda geliyni suyuqlantirish koefitsientini temperatura darajasiga va bosimga bog'liqligi

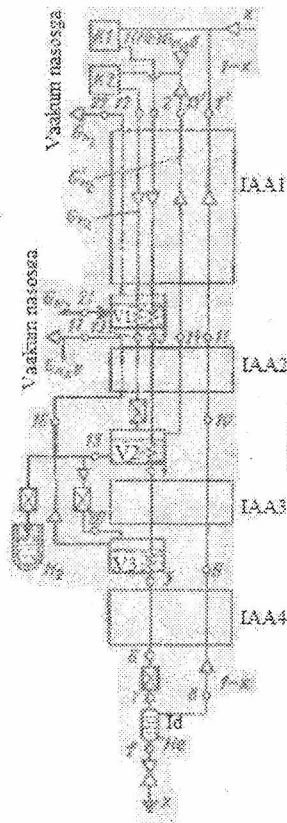
Ikkinchi bosqich uchun rekuperatsiya nomukammalligi $\Delta T_3 = T_3 - T_{10r} = 2 \div 3K$. Suyuq azot oqimini $G_{N_2} = G_{01}$ (2.46) formuladan aniqlash mumkin, chunki bu sikllardagi yuqori bosqichlar bir xil; $\Delta T_1 = T_2 - T_{1r} = 10 \div 15K$.

Siklda sarflanayotgan ish kompressor ishi va suyuq vodorod, azot olish ishlari bilan aniqlanadi:

$$l_0 = [RT_1 \ln(p_2/p_1)]/(\eta_{izx}) + G_{H_2} l_{oH_2}/x + G_{N_2} l_{oN_2}/x \quad (2.47)$$

bu erda, l_{oH_2} va l_{oN_2} – H_2 va N_2 ni suyuqlantirish nisbiy ishlari.

Geliyni suyuqlantirish siklining boshqa varianti 2.16-rasmida keltirilgan sxemani dastlabki sovutish uchinchi bosqichini kiritish bilan takomillashtirishga asoslangan. Bu holda suyuq vodorod ikkita vannada qaynaydi: atmosfera bosimida va vakuumda. Vannalar orasiga yana bir IAA o'rnatiladi. Shu prinsipdagi, ammo suyuq vodorodni olish geliy qurilmasining sikli 2.18–rasmida berilgan. Bu siklining ishlashi uchun suyuq azot, ikkita $K1$ va $K2$ kompressorlar – geliy va vodorod



2.18-rasm. Geliyni drossellab uch bosqichda dastlabki sovutish bilan suyuqlantirish siklining sxemasi (ichki vodorod sikli bilan)

kompressorlari kerak. Bu sikl universal bo'lib, geliydan tashqari V_2 vannadan suyuq vodorod olish imkonini beradi. V_3 vannada vodorod vakuum ostida qaynaydi. Suyuq geliy va vodorod miqdorini x (2.40) va (2.41) formulalardan topish mumkin. x ni p_2 bosim va T_5 temperaturaga bog'liqligi 2.17-rasmdagiga o'xshash. Vodorod sikliga kirayotgan G_{H_2} miqdorni 2-bosqich energetik balansidan T_3 dan T_4 gacha temperaturalar intervalida aniqlanadi. Siklning yuqorigi bosqichini ikkita mustaqil qismlardan (geliy va vodorod) iborat deb qarab, ularning har biri uchun (2.41) formulani qo'llab suyuq azot miqdorini oson aniqlash mumkin. Dastlabki kattaliklarni tanlash tavsiyalari 2.16-rasmdagi siklnikiga o'xshash.

p_2 ni inversiya bosimgacha ortishi bu xarakteristikalarni bir muncha yaxshilanishiga olib keladi, ammo ularning yanada ko'payish imkoni yo'q. Umuman olganda, 1- va 2-masalalar oddiy drossellanishli siklning kichik samaradorligi haqida guvohlik beradi. Hatto, nazariy jihatdan termodinamik FIK $\eta_t \approx 20\%$, suyuqlantirish variantida real FIK $\eta_t 5\%$ dan sal ko'proq. Olinayotgan suyuqlik ulushi ham juda oz ($x = 5,33\%$).

Kondensatsiya temperaturasi yuqoriroq T_s bo'lgan ishchi jismlar uchun real gaz xossalari kuchliroq ta'sir ko'rsatadi va sikl xarakteristikasi ancha yaxshiroqdir. Masalan, metan uchun ($T_s = 114,7\text{K}$) haqiqiy suyuqlantirish siklida $\eta_t \approx 20\%$. Inversiya temperaturasi siklga kirayotgan oqim temperaturasidan past bo'lgan ishchi jismlar uchun ko'rilayotgan bu sikl yaroqsizdir, chunki bunda $\Delta i_T < 0$.

Nazorat savollari.

1. Drossellashli sikllarda regenerativ issiqlik almashinishni qo'llashdan maqsad nima?
2. Drossellashli real siklning sovutish unumdorligi qanday fizik kattaliklardan iborat?
3. Oddiy drossellashli real sikl uchun suyuqlantirish koeffisienti, sarflanuvchi ish, sovutish koeffisienti qanday topiladi?

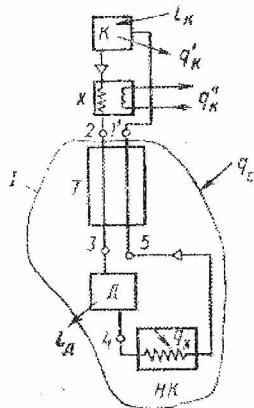
2.3. Detanderli sikllar

Gaz detanderli sikllar guruhiga sovutish qurilmalari sikllari kiradi. Detanderlar quyi harorat bosqichida o'rnatiladi. Ishchi jism sifatida turli gazlar, ko'pincha, havo, azot, neon va geliy ishlatiladi. Sikl sxemasi va undagi bosqichlar soni ishlash sharoitiga, kerakli sovutish unumdorligiga va sovutish darajasiga bog'liq. Oddiy sikllarni ko'rib chiqaylik.

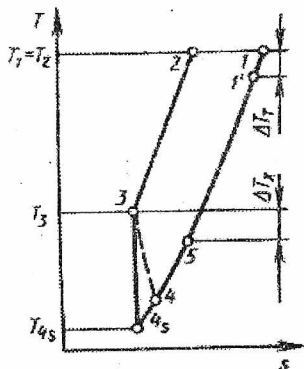
Bir bosqichli sikl. Sikl sxemasi (u Simens-Klod sikli deb ham ataladi) va T - S diagrammada jarayonlar tasviri 2.19 va 2.20-rasmlarda berilgan. Gaz K kompressorda siqilgach, S sovutgichda T_2 haroratgacha (2 nuqta) sovutiladi va AA issiqlik almashinish apparatiga kiradi. Kompressorda l_k ish sarflanadi va q_k issiqlik olinadi, sovutgichda gazdan $q_{k'}$ issiqlik olinadi. Issiqlik almashinish apparatidan so'ng (3 nuqta) gaz D detanderga beriladi. Detanderda gaz past bosimgacha kengayadi (bunda L_d ish bajariladi) va past harorat kamerasiga PK (sovutish ob'ekti) boradi. Kameraa gazga q_s issiqlik

beriladi va gaz T_4 haroratdan (4-nuqta) T_5 haroratgacha (5 nuqta) isiydi. So'ngra gazning

teskari oqimi issiqlik almashinish apparatida siqilgan gaz (to'g'ri oqim)dan issiqlik olib, $1'$ nuqta holatigacha isiydi. Issiqlik almashinish apparatining issiq tomonida gaz oqimlari haroratlarining farqi $\Delta T = T_1 - T_{1'}$. Issiqlik almashinish apparati IAA , detander D va past harorat kameralari PK atrof-muhitdan izolyasiyalangan.



2.19-rasm. Bir bosqichli detanderli sikl



2.20-rasm. Bir bosqichli detanderli siklning T - s diagrammadagi tasviri

Nisbiy foydali sovutish unumdorligini q_c bosqichning (2.19-rasmda I kontur bilan chegaralangan) energetik balans tenglamasidan aniqlaymiz. Issiqlik almashinish apparatiga kirayotgan 1 kg siqilgan gaz uchun:

$$q_s = (i_1 - i_2 + h_s \eta_s) - (q_{at} + c_p \Delta T_n) \quad (2.48)$$

bu yerda tenglamaning o'ng tomonidagi, birinchi qavs ichidagi qo'shiluvchilar sikldagi gazning izotermik siqish drossel-effekti $\Delta i_{n1} = i_1 - i_2$ va detanderda gazning kengayishi $h_s \eta_s$ ($h_s - 3$ va 4_s nuqtalardagi entalpiyalar farqi, $s = \text{const}$ jarayon) tufayli olingan sovuqlikning nisbiy miqdorini bildiradi. Ikkinchi qavsdagi hadlar yig'indisi sikldagi nisbiy sovuqlik yo'qotuvlarini ifodalaydi. Agar issiqlik almashinish apparatiga kirayotgan gaz harorati T_2 inversiya haroratidan yuqori bo'lsa, u holda $i_1 - i_2$ ayirma manfiy bo'ladi va mos holda olingan sovuqlik miqdori kamayadi.

Bunday hollar ko'rilayotgan siklda ishchi jism sifatida geliy, vodorod yoki neon gazlari ishlatilganda kuzatiladi.

Siklda bajarilgan nisbiy ish, gaz chiqib yo'qolishini hisobga olmaganda:

$$l = l_k - l_d \eta_{mex} = (RT_1 / \eta_{iz}) \ln \pi_k - h_s \eta_s \eta_{mex}, \quad (2.49)$$

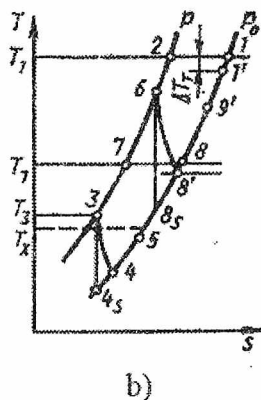
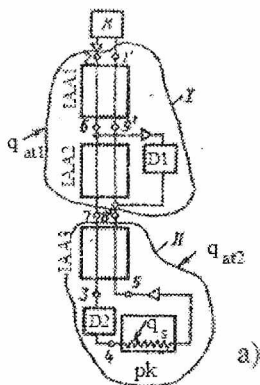
bu yerda π_k – kompressorda gazni siqish darajasi; η_{iz} – kompressorning izotermik FIK; η_{mex} – siklga qaytariluvchi gazni detanderda kengayish ishining ulushini ifodalovchi koeffitsient (detanderning mexanik FIK).

Ikki sovutish bosqichli sikl. 2.21-rasmda detanderlar parallel ulangan refrijerator siklining sxemasi va T - S diagrammada jarayonlar tasviri berilgan. Ushbu siklning ko'rilgan oddiy siklga nisbatan afzalligi – optimal kichik siqish darajasi va bir muncha katta termodinamik FIK, chunki sovuqlik yo'qotuvlari ancha samarali usul – turli haroratli sovuqlik olish bilan kompensatsiyalanadi, qoplanadi. 100 K dan yuqori haroratlarga sovutishda ikki bosqichli sikllar oddiy sikllarga nisbatan energetik samarali emas.

Sikl sxemasi sovutgichli kompressor K , $IAA1$, $IAA2$ va $IAA3$ issiqlik almashinish apparatlari, $D1$ va $D2$ detanderlar, past harorat kamerasini PK o'z ichiga oladi. Gaz $IAA1$ issiqlik almashinish apparatidan o'tgach (6 nuqta) $D1$ qismi $D1$ detanderga borib, unda kengayadi va $IAA2$ issiqlik almashinish apparatiga teskari oqim sifatida kiradi. Gazning boshqa $D2$ qismi $IAA2$ va $IAA3$ apparatlardan o'tgach $D2$ detanderda (4 nuqta) kengayadi va PK kameraga uzatiladi. Gaz kameradan so'ng (5 nuqta) teskari oqim sifatida $IAA3$ issiqlik almashinish apparatidan o'tib, $D1$ detanderning o'tadigan $D1$ gazga qo'shiladi. Nisbiy sovutish unumdorligini quyi sovutish bosqichining (rasmda II kontur bilan chegaralangan) energetik balans tenglamasidan aniqlaymiz. $IAA1$ issiqlik almashinish apparatiga kirayotgan gazning og'irlik birligi uchun: $D_2 = 1 - D_1$. Olingan sovuqlik miqdori:

$$q_s = (1 - D_1) [h_{s2} \eta_{s2} + i_8 - i_7 - q_{at2} - c_p (T_8 - T_8')] \quad (2.50)$$

bu yerda h_{s2} – entalpiyalar farqi $i_3 - i_{4s}$, $D2$ detander uchun; η_{s2} – $D2$ detanderning izoentropik FIK; q_{at2} – quyi sovutish bosqichiga atrof-muhitdan kelayotgan issiqlik oqimi.



2.21-rasm. Detanderlar parallel o'rnatilgan detanderli sikli:
a – sxema; b – T - s diagramma.

Siklning yuqori bosqichi (rasmda I kontur bilan chegaralangan) uchun tuziladigan energetik balans tenglamasidan detanderdagi oqim miqdorini aniqlaymiz. 2.21-rasmdagi belgilashlar hamda $D_1 + D_2 = I$ shartni nazarda tutib energetik balans tenglamasini yozamiz:

$$D_1 [h_{s1} \eta_{s1} + i_1 - i_2 - c_p (T_1 - T_{1'}) - q_{at1}] = (1 - D_1) \left[[i_8 - i_7 - (i_1 - i_2) + c_p (T_1 - T_{1'} - T_8 + T_{8'}) + q_{at1}] \right] \quad (2.51)$$

bu yerda $h_{s1} = i_6 - i_{8s}$; q_{at1} – yuqorigi bosqichga atrof-muhitdan beriluvchi issiqlik oqimi.

Siklning umumiy energetik balansi:

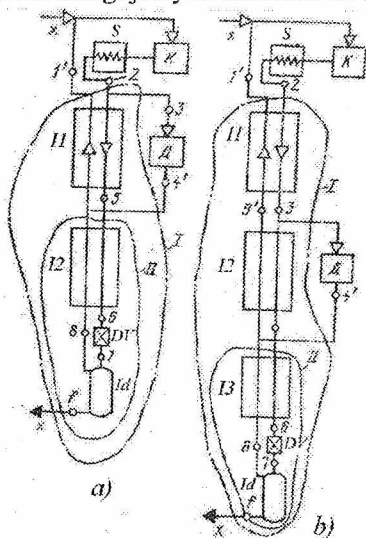
$$D_1 h_{s1} \eta_{s1} + D_2 h_{s2} \eta_{s2} + i_1 - i_2 = q_{at1} + D_2 q_{at2} + c_p \Delta T_n + q_s \quad (2.52)$$

Ishchi jismni oraliq sovutish uchun yuqorigi detander $D1$ o'rniga gaz sovutish mashinasini yoki suyuq sovutish agenti to'ldirilgan bug'latish vannasini ishlatish mumkin.

2.4. Ishchi modda drossellanish va detanderda kengayish bilan kechadigan kombinsiyalashgan tsikllar

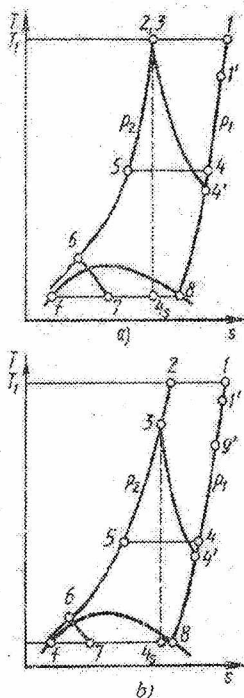
Ko'riladigan guruh sikllari samarador bo'lib, sovuqlik olish va gazlarni suyuqlantirish o'rtacha unumdorlikdagi qurilmalariga keng qo'llaniladi. Sikldagi gazning quyi harorati 80 K atrofida bo'lganida sovutishning ikki bosqichi ishlatiladi: quyi bosqich drosselli, yuqorigisi – detanderli qilib

ishlatiladi. Bunday sikllar birinchi marta XX asr boshlarida J.Klod va P.Geylyantd tomonidan o'rta va yuqori bosimli suyuq havo olish qurilmalarida qo'llanilgan. 2.22 va 2.23-rasmlarda sikllarning printsiplial sxemalari va $T-s$ diagrammadagi jarayon tasvirlari ko'rsatilgan.



2.22-rasm. Gazni dastlabki (a) va oraliq bosqichda (b) detanderda kengaytirish va drossellashli sikllar sxemalari

Suyuqlantirish rejimi. Gaz K kompressorda P_2 bosimgacha siqiladi, S sovutgichda (2 nuqta) sovutiladi va $IAA1$ apparatiga uzatiladi (gazni kompressorda siqish va sovutgichda sovutish jarayonlari $T-S$ diagrammada ko'rsatilmagan). IAA dan o'tishda gaz soviydi (6 nuqta) va drossel ventilda DV ikki fazali holatgacha (7 nuqta) kengayadi. f nuqta holatidagi x miqdor suyuqlik Id idishdan olinadi, bug' esa (8 nuqta) teskari oqim sifatida IAA dan o'tadi va isiydi ($1'$ nuqta). Siqilgan gazning D qismi 3 holatda D detanderga yo'naladi va P_1 bosimgacha kengayadi ($4'$ nuqta) va Id idishdan kelayotgan gazning teskari oqimiga qo'shiladi. Gazning adiabatik ideal detanderda kengayishi $3-4_s$ chiziq bilan ifodalanadi, gazning real detanderdan keyingi holati $4'$ nuqtaga mos keladi (detander FIK $\eta_s < 1$) bo'lganda. Id idishdan olingan suyuqlik o'rniga kompressorga x miqdor gaz kiritiladi.



2.23-rasm. Gazni dastlabki (a) va oraliq bosqichda (b) detanderda kengaytirish va drossellashli sikllarning $T-s$ diagrammadagi tasviri

Ikkala variantda ham sovuqlik olish usuli bir xil bo'lgani uchun siqilgan gaz massa birligiga nisbatan tuzilgan energetik balans tenglamasi bir xildir. 2.22-rasmda l kontur bilan chegaralangan qism uchun:

$$i_2 + Di_{4'} + q_{at} = (1 - x)i_{1'} + Di_3 + xi_f \quad (2.53)$$

Bu tenglamadan olinadigan suyuqlik miqdorini aniqlaymiz:

$$x = (i_{1'} - i_2 + Dh_s \eta_s - q_{at}) / (i_{1'} - i_f) \quad (2.54)$$

bu yerda $h_s = i_3 - i_{4s}$.

Detanderning haqiqiy sovutish unumdorligi:

$$h = h_s \eta_s = i_3 - i_{4'} \quad (2.55)$$

Gaz detanderda sovushi natijasida sovuqlik yo'qolishi qisman qoplanadi va quyi (drossel) bosqichidagi drossellanishning izotermik effekti oshadi.

Nazorat savollari.

1. Detanderli sikllarda detander qaysi joyga o'rnatiladi?

- Ikki bosqichli detanderli sikl qanday harorat olishda ishlatilishi energetik jihatdan foydali?
- Gaz harorati qancha bo'lganida sovutishning ikki bosqichli sikliga o'tiladi?

2.5. Gaz sovutish mashinalarining sikllari

Gaz sovutish mashinalarining (GSM) unumdor va ixchamligi tufayli keng ishlatiladi. Porshenli GSMlarning bir necha turlari mavjud. Stirling teskari sikli, Gifford-Mak-Magon va Vyulems-Takonis sikllari bo'yicha ishlovchi mashinalar eng ko'p tarqalgan.

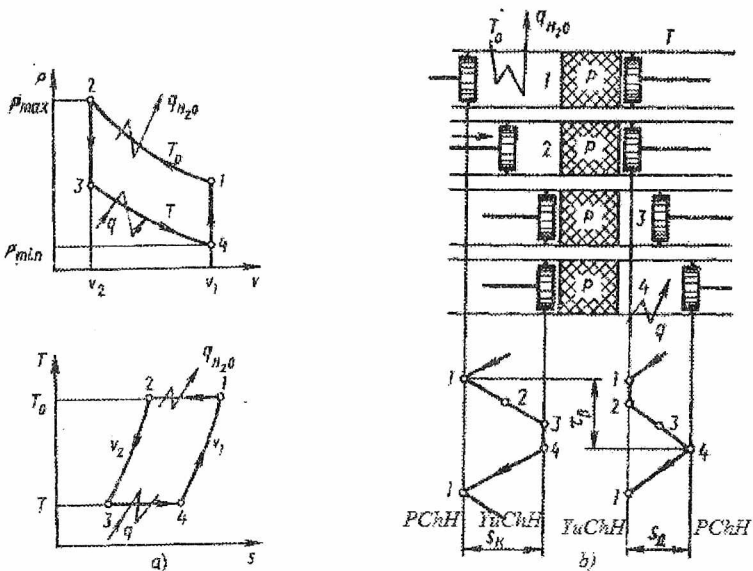
Stirling sikli. Stirling yopiq siklida ishchi jism ikkita izoxora va ikkita izotermadan iborat aylanma jarayonida qatnashadi (2.24-rasm). Siqish jarayonida issiqlik sikldan atrof-muhitga T_0 haroratda uzatiladi, kengayish jarayonida sovutiluvchi jismdan issiqlik siklga T haroratda uzatiladi. Siklda issiqlikni regeneratsiyalash nazariy jihatdan $v = const$ jarayonida amalga oshadi. Agar ishchi jism Van-der-Vaals gazi bo'lsa, u holda 1-2 siqish ishi:

$$l_{122} = l_{1-2} = RT_0 \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} - a \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) \quad (2.56)$$

3-4 kengayishi ishi

$$l_{344} = l_{3-4} = RT \ln \frac{v_1 - b}{v_2 - b} - a \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \quad (2.57)$$

bu erda a va b -- Van-der-Vaals tenglamasidagi koeffitsientlar.



2.24-rasm. Stirling teskari sikli

$a - p - v$ va $T - s$ diagrammalar; b - ikkita porshenli, regenerator, sovutgichli porshenli mashinada amalga oshirish sxemasi (q_{H_2O} - atrof-muhitga berilayotgan issiqlik; q - sovutgichda olinayotgan va kengayish bo'shlig'iga berilayotgan issiqlik)

Issiqlik miqdori:
atrof-muhitga berilgan

$$q_{H_2O} = RT_0 \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} \quad (2.58)$$

kengayish jarayonida ishchi jismga berilgan

$$q = RT \ln \frac{v_1 - b}{v_2 - b} \quad (2.59)$$

Stirling siklining sovutish koeffitsienti

$$\varepsilon_{sr} = q / \sum l = T / (T_0 - T) = \varepsilon_c \quad (2.60)$$

1-2 siqish jarayonida ichki energiyaning o'zgarishi:

$$\Delta u_{1-2} = \Delta u_c = u_1 - u_2 = a(1/v_2 - 1/v_1) \quad (2.61)$$

Real ishchi jismli Stirling ideal sovutish mashinasining sovutish unumdorligi kengayishi ishidan katta

$$q = l_{\text{ken}} + \Delta u_{T_0} \quad (2.62)$$

(2.62) formula bilan ifodalanuvchi natija $v = \text{const}$ sharoitlaridagi regenerativ issiqlik almashinish sabablaridir.

2-3 va 4-1 issiqlik regeneratsiyalanishi jarayonlarida bosim o'zgarishi:

$$\begin{aligned} p_2 - p_3 &= R(T_0 - T)/(v_2 - b) \\ p_1 - p_4 &= R(T_0 - T)/(v_1 - b) \end{aligned} \quad (2.63)$$

Issiqlik balansi tenglamasini tuzib, regeneratorga tushuvchi issiqlik nagruzkasini aniqlaymiz:

$$u_1 - u_4 = u_2 - u_3 \quad (2.64)$$

$$Q_{\text{per}} = V(p_2 - p_3)/(k-1) \quad (2.65)$$

bu erda: V – regeneratordan o'tuvchi siqilgan gaz hajmi.

Agar regeneratorni mashinaning ishchi hajmiga nisbatan tashqarida deb qaralsa, issiqlik regeneratsiyalanishi izoxorik jarayon bo'lib, (2.63) – (2.65) munosabatlar o'rinalidir. Lekin konstruktiv jihatdan regeneratordagi ishchi hajm ichida joylashadi va erkin ("o'lik") hajmga ega. Bu holda esa o'zgarish hajm bilan kechuvchi issiqlikni regeneratsiyalanishi izoxorik jarayon bo'lmaydi, regeneratordagi issiqlik nagruzkasi (dastlabki yaqinlashishda)

$$Q_{\text{per}} \approx (V + V_{\text{per}})(p_2 - p_3)/(k-1) \quad (2.66)$$

Ideal mashinalar uchun "o'lik" hajm mavjud deb hisoblanishi mumkin, faqat bunda qaytmas effektlar yuzaga kelmasa bas. Xususiyl holda Stirling ideal mashinasi uchun bu shart bajariladi, sovutish koeffitsienti ε_c ga tengligicha qoladi; shuning uchun Stirling ideal mashinasi uchun $V_{\text{per}} = 0$ va $V_{\text{per}} \neq 0$. (2.65) va (2.66) tenglamalardan ko'rinadiki, $V_{\text{per}} = 0$ da issiqlik regeneratsiyalanish jarayonini izoxorik deb hisoblash mumkin.

Stirling teskari siklining porshenli mashinaga qo'llanilish prinsiplial sxemasi 2.24-rasmda berilgan. Ikkita porshen silindrlarda uzlukli tarzda β faza ko'chish burchagi bo'yicha harakatlanadi. Ishchi hajmda porshenlar o'rtasiga regeneratordagi R o'rnatilgan bo'lib, u ishchi hajmni ikki qismga – issiq va sovuq qismlarga bo'ladi. Ba'zida ularni shartli ravishda siqish va kengayish bo'shliqlari deyiladi. Issiq bo'shliqda harorat T_0 doimiy saqlanadi, chunki sovutgich q_{H_2O} issiqlikni oladi. Sovuq bo'shliqda T harorat doimiy (sovutgichdan q issiqlik berilgani sababli) haqiqatda siklmashinalarda porshenlarning garmonik harakati tufayli amalga oshiriladi.

2.6. Havoni ajratishda qo'llaniladigan kriogen mashinalar

Havoni ajratish qurilmalarida havoni ajratish texnologik sikli o'zaro bog'langan bir nechta jarayonlardan tashkil topgan: havoni siqish; uni quritish va uglerod ikki oksidi, uglevodorodlardan tozalash; to'yinish haroratlarigacha va flegma deb ataluvchi suyuq fazaning kerakli miqdori hosil bo'lgunicha sovutish; past haroratda rektifikatsiya qilish usuli bilan havoni ajratish, mahsulot olish. Havo, odatda, sovutish siklining ishchi jismi bo'lgani uchun gaz ajratish qurilmalarida, ko'pincha, gazsimon oqimlarni detanderlarda kengaytirish va havoni tashqi sovuqlik man'balari bilan sovutish jarayonlari bir vaqtda amalga oshiriladi. Ajratish mahsulotlari gazsimon, 40 MPa gacha siqilgan holda yoki suyuqlik (o'ta sovutilgan) ko'rinishida olinishi mumkin. HAQLaridagi barcha jarayonlar konstruksion jihatdan turli xil mashina va apparatlarda amalga oshiriladi, quritish va tozalash esa turli xil usullar bilan bajariladi.

Zamonaviy HAQni o'rganishda ularning quyidagi yirik qismlarni ajratib ko'rish maqsadga muvofiq: siqish, sovutish va rektifikatsiya qilish.

Siqish qismi havoni kompressorga uzatish qurilmalarini, kompressorni, siqilgan havoni suv yoki havo bilan sovutish sistemasini, namlik va moy ajratgichlarni, filtrlarni va h.k. o'z ichiga oladi.

Sovutish qismiga, to'g'ri oqim deb ataluvchi siqilgan havo teskari oqim (mahsulot va atrofga chiqarib tashlanuvchi)lar bilan sovutiluvchi IAA (IAA) kiradi. Agar qurilmada regeneratör yoki reversiv IAA ishlatilgan bo'lsa, havoni quritish va tozalashni regeneratör nasadkalarida yoki IAA kanallari devorlarida aralashmalarni muzlatish usuli bilan amalga oshiriladi; agar almashinmaydigan IAA ishlatilgan bo'lsa, sovutish qismiga adsorbtsion quritish va tozalash mahsus kompleks bloki kiritilgan bo'lishi kerak. Sovutish qismiga yana detander agregatlari, ularning IAA, filtrlar, gaz fazali adsorberlar, dastlabki sovutish freon va ammiak qurilmalari va h.k. kiradi.

Rektifikatsiya qismi rektifikatsion kolonnalarni, kondensatorlarni, flegmani o'ta sovutgichlarni, suyuq fazali adsorberlarni, suyuqlik uzatish va suyuq mahsulotlarni siqish nasoslarini va h.k. o'z ichiga oladi.

HAQLarni loyihalashda siqish qismini doim bino ichiga joylashtiriladi, chunki kompressorlarning ancha murakkab elektr jihozlari va elektr yuritmalari xizmat ko'rsatish shuni taqazo etadi. Iqlim sharoitlariga ko'ra sovutish va rektifikatsiya qismlari bino ichiga yoki tashqariga joylashtirilishi, birlashtirilishi yoki ajratilishi mumkin. HAQning har bir qism parametrlari

boshqa qismlar va butun qurilmaning ishiga katta ta'sir etishi mumkin, shuning uchun HAQ qismlaridagi sovutish unumdorligi va energiya yo'qotuvlari o'zaro bog'liq. Buni qurilmalarni loyihalashda ham, ishlatishda ham etiborga olish zarur.

Havoni ajratish texnologiyasini o'rganish va HAQ qismlarining o'zaro bog'liqligini oydinlashtirish uchun yuqori, o'rta va past bosim qurilmalarining aniq bir texnologik sxemalari misolida texnologik qismlarining xususiyatlari va parametrlarini tahlil qilish kerak. Bunda havoning namlik saqlamlaridagi farqqa, tozalash usuliga, havoni N_2-O_2-Ar aralashma sifatida ajratishga, bir vaqtda toza azot va kislorod olish imkoniyati shartlariga, havoni kompleks ajratish va argon, kriptonksenon, neongeliy aralashmalarini olish printsiplariga e'tibor qaratish lozim. Turli qurilmalarning sovutish unumdorligi bo'yicha balansga egaligini baholash va sovutish sarfining tashkil etuvchilarini alohida baholash muhim ahamiyatga ega.

Yuqori bosim havo ajratish qurilmalari. КЖКАЖ-0,25 qurilmasi – qayta ishlanuvchi havo sarfi $1140 \text{ m}^3/\text{soat}$ yoki $1370 \text{ kg}/\text{soat}$ bo'lgan, nisbatan katta bo'lmagan HAQdir. Qurilma texnologik sxemasi dastlabki sovutishli va detanderli yuqori bosim sikliga asoslangan (2.25-rasm). Havo kompressor 2 sovutgichlari va namlik-moy ajratgichlar 3 dan so'ng sovutgich 5 ga keladi. Siqish va havoni kompressor sovutgichlarida sovutishdan so'ng uning namlik saqlami anchaga kamayadi. Masalan, atmosfera havosining nisbiy $\varphi = 0,7$ namligi va harorati $30 \text{ }^\circ\text{S}$ bo'lganida $d = 25,4 \text{ g}/\text{kg}$.

Vaqt birligi ichida kompressorga so'rilayotgan havodagi suv bug'larining massasi

$$(G_{H_2O})_{p_c} = \frac{G\varphi d_{p_c}}{1000} = \frac{1370 \cdot 0,7 \cdot 25,4}{1000} = 24,4 \text{ kg}/\text{soat}.$$

Kompressordan chiquvchi to'yingan havoda ($\varphi = 1$) 20 MPa gacha siqish va 35°S gacha sovutishdan so'ng namlik miqdori

$$(G_{H_2O})_{p_x} = G\varphi d_{p_x} = 1370 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 0,41 \text{ kg}/\text{soat}.$$

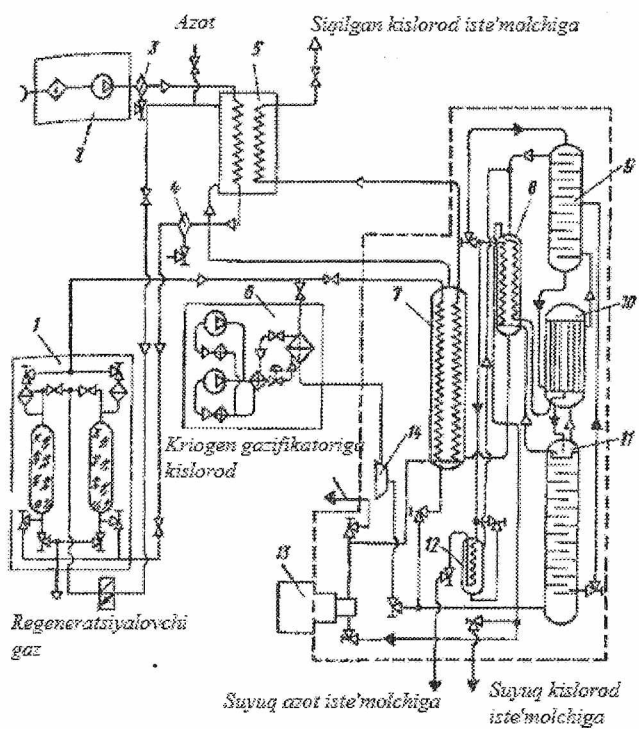
Demak, siqish qismining namlik ajratgichlarida 1 soatda taxminan 24 kg suv ajraladi. Quritish va tozalash blokining 1 adsorbentini regeneratsiya qilishda ishlatiluvchi siqilgan kislorod va atrof-muhitga chiqarib tashlanuvchi azot teskari oqimlari bilan issiqlik almashgan havo sovutgichda

5 soviydi. Sovutishda havoning namlik saqlami taxminan $6 \cdot 10^{-5}$ kg/kg gacha kamayadi, sovutgichdan so'ng namlik ajratgichda 4 namlik quyidagi miqdorda ajraladi:

$$(G_{H_2O})_{\text{cos}} = G(d_{\text{fl}} - d_{\text{cob}}) = 1370(3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-5}) = 0,33 \text{ kg/soat.}$$

Natijada, adsorbsion blokning namlik bo'yicha unumdorligi 0,08 kg/soat ni tashkil etadi, uglerod ikki oksidi bo'yicha esa

$$G_{CO_2} = G \cdot x_{CO_2} = 1370 \cdot 0,046/100 = 0,63 \text{ kg/soat}$$



2.25-rasm. KЖКАЖ-0,25 qurilmasining prinsipial texnologik sxemasi

- 1 – havoni adsorbsion quritish va tozalash bloki;
- 2 – yuqori bosim havo kompressori;
- 3 – namlik-moy ajratgich;
- 4 – namlik ajratgich;
- 5 – havo sovutgich va namlik kondensatori;
- 6 – dastlabki sovutish bosqichining sovutish mashinasi;
- 7 – asosiy issiqlik almashinish apparati;
- 8 – flegma va suyuq kislorod mahsulotining sovutgichi;
- 9 – past bosim yuqori rektifikasion kolonnasi;
- 10 – kondensator-bug'latgich;
- 11 – yuqori bosim quyi rektifikasion kolonnasi;
- 12 – suyuq azot mahsulotining o'ta sovutgichi;
- 13 – suyuq kislorod nasosi;
- 14 – yuqori bosim turbodetandari.

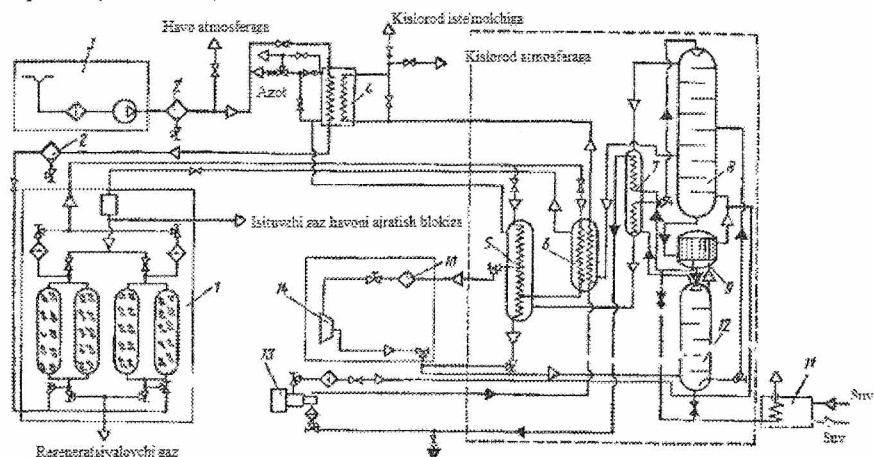
Havoni keyingi quritish va uglerod ikki oksidi, uglevodorodlardan tozalash tozalash blokida NaX turidagi seolitlar bilan amalga oshiriladi. Quritilgan va tozalangan havo seolit erroziyalangandagi mahsulotlarni ushlab qoluvchi filtrlardan o'tadi va ikkita oqimga ajraladi. Birinchi oqim ($G_{cod} \approx 800$ kg/soat) sovutish mashinasi 6 (dastlabki sovutish bosqichi) ga yo'naladi, u yerda 248 K (-25 °S) gacha soviydi va turbodetander 14 ga tushib, bosimi 0,59 MPa gacha, harorati 130 K gacha pasayadi. Boshqa oqim IAA 7 (diametri 500 mm, o'ram balandligi 400 mm) ga yo'nalib, 120 K gacha soviydi va so'ngra 0,59 bosimgacha drossellanadi. Havo oqimlari qo'shiladi va yuqori bosim quyi kolonna 11 (diametri 400 mm, tarekalar soni 38) ga boradi. Bu kolonnaning vazifasi havodan toza azot flegmasini olishdir. Quyi kolonnada havo yuqoriga ko'tarila borib asta azotga to'yinadi va issiqlik almashinish yuza maydoni 10 m² bo'lgan trubkasimon kondensator-bug'latgich 10 da toza azot 96 K da kondensatsiyalanadi.

Argon, kislorod, kripton, ksenon, azot oksidi va ozon qiyin uchuvchi komponentlar sifatida azotning kondensatsiyalanishiga qarshilik ko'rsatmaydi va kub suyuqlik sifatida yig'ilib, yuqori kolonnaga uzatiladi. Kub suyuqligi 34 % kisloroddan, 1,5 % argondan, 64,5 % azotdan iborat.

Aralashmalarning quyi kolonna balandligi bo'yicha taqsimlanishi turlicha, lekin argonning ulushi 1,5–3,5 % dan ortiq emas. Demak, argon quyi kolonnadagi rektifikatsiya jarayoniga tasir ko'rsatmaydi. Neon, geliy va vodorod suyuq azotda kondensatsiyalanmaydi va kondensatorning yuqori qismida yig'ilib boradi. Vaqti-vaqti bilan ularni chiqarib turish kerak, aks holda azotning kondensatsiyalanish jarayoni buzilishi mumkin. Shuning uchun neongeliy aralashmasi bilan puflash amalga oshiriladi. Natijada, quyi kolonnaning kondensatorida sof azot (99,99 %) flegmasi olinishi mumkin. Azot flegmasining taqriban yarmi kolonnaning past qismiga oqib tushadi va kislorod bilan to'yinadi.

O'rta bosim havo ajratish qurilmalari. Suyuq kislorod nasosiga ega AK-1,5 qurilmasi bir vaqtning o'zida 1-nav texnik kislorod va o'ta sof azot olishga mo'ljallangan. Qayta ishlanuvchi havo sarfi 2600 m³/soat (3140 kg/soat). Texnik kislorod mahsulotining bosimi 20 MPa gacha yetadi. Uchta qo'shimcha rejimlar ko'zda tutilgan: suyuq kislorod olish, suyuq va gazzimon azot. Qurilmaning texnologik sxemasi o'rta bosim sikliga asoslangan. Sxemani tahlil qilish havodan bir vaqtning o'zida texnik kislorod

va sof azot olish mohiyatini ayon qiladi. AK-1,5 qurilmasi misolida o'rtabosim qurilmalarining asosiy parametrlari va o'ziga xos tomonlarini ko'rib chiqamiz (2.26-rasm).



2.26-rasm. AK-1,5 qurilmasining printsiplial sxemasi

1 – havoni adsorbtsion quritish va tozalash bloke; 2 – namlik ajratgichlar; 3 – o'rtabosim kompressori; 4 – havo sovutgich va namlik kondensatori; 5 – azot issiqlik almashinish apparati; 6 – kislorod-fraktsoin issiqlik almashinish apparati; 7 – flegma va suyuq kislorod mahsulotini o'rtasovutish apparati; 8 – yuqori rektifikatsion kolonna; 9 – kondensator-bug'latgich; 10 – detander filtri; 11 – quyib olinayotgan suyuqlik bug'latgichi; 12 – quyi rektifikatsion kolonna; 13 – suyuq kislorod nasosi; 14 – o'rtabosim turbodetanderi

Havo 4 MPa bosimgacha (suyuq mahsulot olish rejimlarida 6 MPa gacha) siqiladi, kompressor 3 sovutgichlarida soviydi, filtr va namlik ajratgich 2 dan o'tib, sovutgich-kondensator 4 da 279 K gacha soviydi va namlik ajratgich 2 ga keladi. So'riluvchi havoning nisbiy namligi $\varphi = 0,7$ da kompressorga tushuvchi namlik:

$$(G_{H_2O})_{Pc} \approx 3140 \cdot 0,7 \cdot 25,4/1000 = 56 \text{ kg/soat.}$$

4 MPa bosimgacha siqish va 35°S gacha sovutishdan so'ng havoning to'yingan holatidagi namlik miqdori

$$(G_{H_2O})_{Pc} \approx 3140 \cdot 1,1 \cdot 10^{-3} = 3,46 \text{ kg/soat.}$$

Namlik ajratgichda ajraluvchi namlik miqdori:

$$(G_{H_2O})_{1HA} = 56 - 3,46 = 52,54 \text{ kg/soat.}$$

Sovutgich-kondensator 4 dan chiqqandan so'ng havoning namlik saqlami, taxminan $2,1 \cdot 10^{-4}$ kg/kg gacha kamayadi, shuning uchun namlik ajratgich 2 da ajraluvchi namlik miqdori:

$$(G_{H_2O})_{2HA} = 3140(1,1 \cdot 10^{-3} - 2,1 \cdot 10^{-4}) = 2,83 \text{ kg/soat.}$$

Adsorbtsion qurilish va tozalash bloki 1 ning namlik bo'yicha nagruzkasi:

$$(G_{H_2O})_{adc} = 3140 \cdot 2,1 \cdot 10^{-4} = 0,66 \text{ kg/soat;}$$

uglerod II oksidi bo'yicha

$$(G_{CO_2})_{adc} = 3140 \cdot 0,046/100 = 1,45 \text{ kg/soat.}$$

Seolitli blok 1 da qurigan va tozalangandan so'ng siqilgan havo ikki oqimga bo'linadi va ajratish blokining (diametri 500 mm, o'ram balandligi 550 mm) asosiy IAA 5,6 ga yo'naladi. IAA 5 dan havoning bir qismi (1300÷1500 kg/soat) 173 K haroratda filtr 10 orqali turbodetanderga 14 keladi, bosimi $p \approx 0,6$ MPa gacha kamayib, quyi kolonnaga 12 tushadi. IAA 5 va 6 da sovugan havo ham quyi kolonnaga drossellanadi. Quyi kolonnadagi (diametr 700 mm, tarelkalar soni 46) rektifikatsiya jarayoni kondensator-bug'latgichda 9 sof azot flegmasini (99,999 %) va kub suyuqligini (32÷37 % O₂; 1,5÷3 Ar; qolgani N₂) olishni taminlaydi. Azot flegmasi (0,345 mol/mol) o'ta sovutgich 7 orqali yuqori kolonnaning 8 yuqori qismiga, kub suyuqligi (0,655 mol/mol) esa o'rta qismiga drossellanadi. Bunda va keyingi o'rinlarda oqim ulushlari 1 mol qayta ishlanuvchi havoga to'g'ri keluvchi mol hisobida ko'rsatilgan. Yuqori kolonnaning (diametr 750 mm, tarelkalar soni 62) tarelkalaridan pastdan 23-tarelkasiga suyuqlik kislorodga to'yinib oqib tushadi va bug'latgich 9 ga (issiqlik almashinish yuzasi 21 m²) boradi, u yerda texnik kislorod qaynaydi. КЖКАЖ-0,25 qurilmasining yuqori kolonnasidagi ishchi jarayonni tahlil qilishda argon mavjudligi sababli qo'shimcha tadbirlarsiz bir vaqtning o'zida sof gazsimon azot va kislorod olib bo'lmasligi ko'rsatilgan edi. Qurilmalarning katta bo'lmagan unumdorliklarida havodan argon mahsulotini ajratish uchun ularning sxemalarini murakkablashtirish maqsadga muvofiq emas, shuning uchun bunday qurilmalarda bir vaqtning o'zida texnik kislorod va sof gazsimon azot olishda yuqorigi kolonnadan bug'simon argon fraktsiyasini chiqarish kerak. Argon fraktsiyasini chiqarish (qayta ishlanuvchi havoning 10÷20 %) sof kislorod va azot olishni taminlaydi. Argonni yuqori kolonnada

taqsimlanishi tarelkalar soniga, sektsiyalardagi flegmalar nisbatiga, oqimlarni kiritish va chiqarish soniga va ularni kolonna balandligi bo'yicha joylashuviga hamda flegmani sovutish darajasiga bog'liq. Argonni yuqori kolonnada joylashishi har bir ma'lum qurilmada o'ziga xos tomonlarga ega. Chiqarilayotgan fraktsiyaning hajmiy ulushi va undagi argon miqdori (chiqarish joyi) ham mahsulotdagi argonga ta'sir etadi. AK-1,5 qurilmasida chiqarib tashlanuvchi argon fraktsiyasi (55 % O₂, 4,5 % Ar, qolgan - N₂) qayta ishlanuvchi havoning 20 % tashkil qiladi. Fraktsiya 19-tarelkadan (hisob pastdan) olinib asosiy IAA 6 ga yo'naltiriladi va keyin kompleks quritish va tozalash blokining seolitini regeneratsiyalash uchun quruq gaz sifatida ishlatiladi. Shunga e'tibor qaratish kerakki, fraktsiyaning sovutish blokidan chiqishdagi ulushi va harorati (273÷275K) maksimal miqdordagi kislorod va rekuperatsiya nomukammalligi tufayli sovutish unumdorligining minimal yo'qotuvlari shartidan emas, balki kompleks tozalash blokida adsorbentni o'z vaqtida tozalash (regeneratsiyadan so'ng) shartidan kelib chiqib belgilanadi. Bunday yechim shuni ko'rsatadiki, real qurilmalarni mukammallashtirish qator amaliy shartlar va o'zaro raqobatlashuvchi faktorlarni e'tiborga olgan holda amalga oshiriladi.

Sof azot mahsuloti yuqori kolonna 8 dan o'tib 7 ga chiqariladi va asosiy IAA 5, sovutgich-kondensator 4 orqali iste'molchiga beriladi. Suyuq kislorod bug'latgich 9 dan o'ta sovutgich 7 orqali nasos 13 ga beriladi, nasosda bosim 20 MPa gacha ko'tariladi. Siqilgan kislorod IAA 6 da gazga aylanadi va 4 apparatdan o'tib iste'molchining ballonlariga beriladi. Nasos 13 tirqishlaridan yo'qoluvchi gazsimon kislorod yuqori kolonnaga yuboriladi. Oz miqdordagi suyuq kislorod bug'latgich 11 ga asosiy bug'latgichda oqim harakatini yuzaga keltirish uchun yuboriladi. Boshqa ish rejimlarida gazsimon va suyuq azot yoki gazsimon azot va suyuq kislorod yoki faqat sof gazsimon azot olish mumkin. Hozirgi paytda qurilma sxemasi modifikatsiyalashtirilgan. Sovutish qismi va IAA soddalashtirilgan. Qayta ishlanuvchi havoning 60 % ga yaqini IAA 5 da azot bilan, 40 % ga yaqini IAA 6 da kislorod va argon fraktsiyasi bilan sovutiladi. IAA so'ng havo oqimlari birlashadi, oqimning taxminan 3/4 qismi 143 K haroratda bug' suyuqlik rejimida ishlovchi turbodetanderga beriladi, qolgan qismi esa drossellanadi. Bunday soddalashtirishlar yangi turdagi – bug'suyuqlik turbodetanderlari yaratilganligi tufaylidir. Bug'suyuqlik rejimida ishlashda

turbodetanderdan so'ng $10 \div 18\%$ suyuqlik hosil bo'ladi va bu bug'-suyuqlik aralashmasi quyi kolonnaga kiritiladi.

Siqiluvchi havoning 1 moliga to'g'ri keluvchi sovutish unumdorligining tashkil etuvchilari:

1) T_c da drossellanishning issiqlik effekti natijasida (kompresor sovutgichida olinayotgan issiqlik va 4 MPa gacha siqish ishining farqi)

$$\Delta i_{T_c} \approx 8700 - 8447 = 253 \text{ J/mol}$$

2) turbodetanderda 1400 kg/soat miqdordagi havoning kengayishi natijasida (turbodetander FIK 0,65 bo'lganida)

$$q_{dem} \approx \frac{1400}{3140} \cdot 0,65(4200 - 2450) = 505 \text{ J/mol.}$$

Demak, sikl uchun J/mol. Havoning bir sekunddagi sarfi:

$$q_x = \frac{3140 \cdot 1000}{29 \cdot 3600} = 30,5 \text{ J/mol.}$$

Qurilmaning to'liq sovutish unumdorligi:

$$Q_{m\gamma n} = 30,5 \cdot 758 = 23100 \text{ Vt.}$$

303 kg/soat siqilgan ($p = 20 \text{ MPa}$) kislorod va 1890 kg/soat sof gazsimon azot olish rejimida qurilma sovutish unumdorligining zaruriy tashkil etuvchilari:

1) nasosning bir sekundda suyuq kislorodni uzatib beruvchi m^3/s siqish quvvatini kompensasiyalash uchun zaruriy sovutish unumdorligi:

$$V_c = 303 / (3600 \cdot 1142) = 0,74 \cdot 10^{-4} \text{ Vt;}$$

2) siqilmagan va siqilgan kislorod entalpiyalari farqini kompensasiyalash uchun zaruriy sovutish unumdorligi ($T \approx T_c$ da siqilgan kislorod oqimi drossel-effekti bilan bog'liq yo'qotuvlar):

$$Q_{\kappa_c} \approx \frac{303 \cdot 1000}{3600} (548,3 - 505,5) = 3540 \text{ Vt;}$$

3) $\Delta T_T = 5 \text{ K}$ va $c_p \approx 29,4 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ da chiqarib yuborilayotgan qizimagan azot va kislorod oqimlari bilan yo'qotilayotgan sovutish unumdorligi

$$Q_6 \approx 21 \cdot 5 \cdot 29,4 = 3040 \text{ Vt;}$$

4) $\Delta T \approx 25 \text{ K}$ da chiqarib yuborilayotgan qizimagan argon fraksiyasi (9,5 mol/s) oqimi bilan yo'qotilayotgan sovutish unumdorligi

$$Q_{\kappa, \phi p} \approx 9,5 \cdot 25 \cdot 29,4 = 7000 \text{ Vt;}$$

5) atrof-muhitdan kelayotgan issiqlik oqimlarini qoplash uchun sarflanayotgan sovutish unumdorligi (nisbiy issiqlik oqimlari $q_a \approx 8000 \text{ J/m}^3$):

$$Q_a \approx 8000 \cdot 2600/3600 = 5800 \text{ Vt};$$

6) havoni adsorberda $1 \div 1,5 \text{ K}$ ga isishini kompensasiyalash uchun sovutish unumdorligi:

$$Q_{\text{ad}} \approx 30,5 \cdot 1,0 \cdot 29,4 = 880 \text{ Vt}.$$

$$\text{Natijada } Q_H + Q_{\kappa_c} + Q_{\kappa} + Q_{\kappa_{\text{qp}}} + Q_a + Q_{\text{ad}} = 21740 \text{ Vt}.$$

Bu yerda ishqalanish, oqib o'tish, oqib chiqib ketish, kislorodni bug'latgich *IAAI* da bug'lanishi bilan bog'liq yo'qotuvlar e'tiborga olinmadi. Bundan tashqari, sovutish unumdorligining tashkil etuvchilari taxminan hisoblandi. E'tiborga olinmagan yo'qotuvlar va xatoliklarning har biri kichik, lekin ularning yig'indisi ishlab chiqariluvchi va sarflanuvchi sovutish unumdorliklari hisobiy farqini qoplaydi.

Past bosim havo ajratish qurilmalari. KAP-30 qurilmasi past bosim siklida ishlovchi havoni kompleks ajratish yirik qurilmasi hisoblanadi. Sarflanuvchi havo miqdori $B = 18 \cdot 10^4 \text{ m}^3/\text{soat}$ (217000 kg/soat). Sof argon (350 m³/soat) suyuq yoki siqilgan ($p = 22 \text{ MPa}$) holda; texnik kislorod mahsulotining bir qismi (300 m³/soat) ham siqilgan holda (22 MPa gacha) olinishi mumkin. Suyuq azot va kislorod (200 kg/soat dan) yoki faqat suyuq kislorod (670 kg/soat) olish imkoniyati ko'zda tutilgan. Qurilmada 0,2 % li kriptonksenon konsentrati 75 m³/soat miqdorda va 50÷40 % li neongeliy konsentrati (Ne; He; N₂; H₂) 4 m³/soat miqdorda olinadi. Aralashmada neon va geliy ulushi 60 % gacha, olinuvchi suyuq mahsulotlar molyar ulushi 1,2% gacha oshirilishi mumkinligi tadqiqotlarda ko'rsatilgan.

Havo filtr 1 dan o'tib, turbokompressor 2 da 0,66 MPa gacha siqiladi. Atmosfera havosining nisbiy namligi $\varphi = 0,7$ va harorati 30 °C da kompressorga havo bilan kiruvchi namlik:

$$(G_{H_2O})_{p_c} = 217000 \cdot 0,7 \cdot 25,4/1000 = 3850 \text{ kg/soat}$$

0,66 MPa gacha siqish va turbokompressor sovutgichida to'yinish holatigacha sovutishdan so'ng havodagi namlik

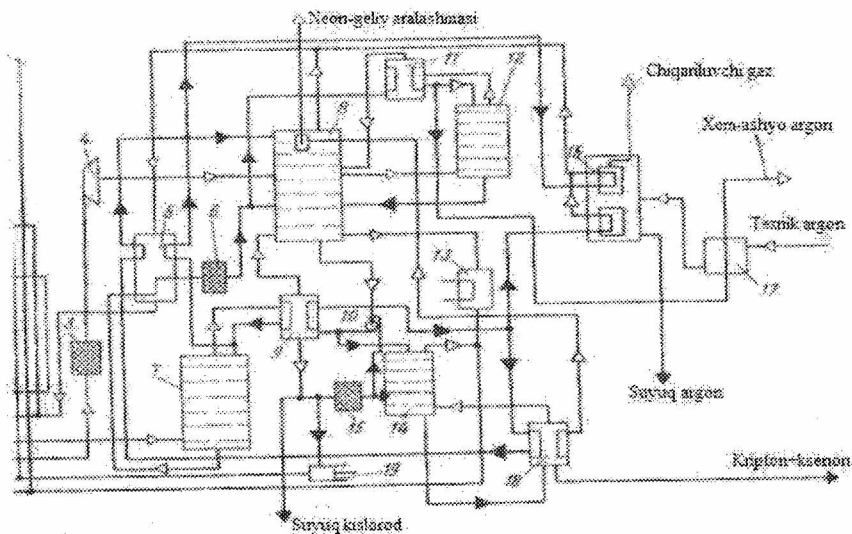
$$(G_{H_2O})_{p_x} = 217000 \cdot 6 \cdot 10^{-3} = 1300 \text{ kg/soat}$$

ya'ni, siqish qismining namlik ajratgichida 1 soatda $3850 - 1300 = 2550$ kg suv ajraladi. Suv bug'lari bilan to'yingan havo azot-suv sovutish sistemasi 3 ga va keyin regeneratrlar 5 ga beriladi, ularda to'yinish haroratlariga (101–102K) yaqin haroratgacha soviydi. Regeneratrlarda "issiq puflash davri" deb ataluvchi vaqtda havo maydalangan bazalt toshi qatlamidan o'tadi, qatlam "sovuq puflash davrida" teskari azot oqimi bilan sovutilgan bo'ladi. Havo va azot oqimlari davriy ravishda (har 9 minutda) almashinib turadi. Regeneratrlarning 20°C da namlik bo'yicha nagruzkasi

$$(G_{H_2O})_{pez} \approx 217000 \cdot 3,5 \cdot 10^{-3} \approx 760 \text{ kg/soat}$$

uglerod ikki oksidi bo'yicha nagruzka

$$(G_{C_2O})_{pez} \approx 217000 \cdot 0,046/100 \approx 100 \text{ kg/soat}$$



2.27-rasm. KAP-30 qurilmasining soddalashtirilgan texnologik sxemasi.

Past bosim qurilmalari uchun azot-suv sovutish sistemasi muhim ahamiyatga ega. Gap shundaki, oqimlar yo'nalishi almashganda regeneratrlarda bosim qisqa vaqtda 0,65 dan 0,13 MPa gacha pasayadi. Bunda, issiq puflashda havodan nasadka yuzasida kondensatsiyalangan namlikning bir qismi gaz oqimi bilan chiqib ketadi, shuning uchun sovuq puflash davrining dastlabki 30-60 s davomida namlikning asosiy qismi teskari oqim bilan chiqib ketadi va vaqtning qolgan (ko'p) qismida teskari

oqim regeneratordan quruq holda chiqadi. Namlik qurilmaga havo bilan bug' ko'rinishida kirib qurilmadan kondensat shaklida chiqqani uchun shunga mos sovutish unumdorligi ham yo'qoladi. Bu yo'qotuv son jihatdan namlikni kondensatsiyalanishga sarflangan sovutish unumdorligiga teng. Past bosim qurilmalari kichik sovutish unumdorligiga ega ekanligi sababli sovutish unumdorligining bunday qo'shimcha yo'qotuvlariga, ayniqsa janubiy kengliklardagi atmosfera havosining yuqori haroratlarida ta'sirchandır. Havo harorati ortganida regeneratorga kiruvchi suv bug'larining ulushi ortadi, chiqariluvchi kondensatsiyalangan namlik bilan yo'qoluvchi sovutish unumdorligi ham ortadi. Bir vaqtning o'zida sovuq apparatlarga issiqlik oqimi ham ortadi. Agar zaruriy choralar ko'rilmasa, bu omillar qurilma unumdorligini pasaytiradi va hatto turg'un rejimni buzishi mumkin.

Sovutish unumdorligining bu yo'qotuvlarini bir necha usul bilan qoplash mumkin. Masalan, sovuq puflash vaqtida nasadka harorati 5–7 °S bo'lgan regeneratör zonasiga ma'lum suv miqdorini kiritish mumkin, suv bug'lanib regeneratör nasadkasini sovutadi. Azot-suv sovutish sistemasi deb nomlanuvchi sistemalar amalda ko'p ishlatiladi. Sovuq puflash davrining ko'p qismida quruq holda qoluvchi teskari azot oqimi azot skrubberiga yo'naladi, suv bug'lari bilan to'yinadi, pastga oqib tushayotgan suvni sovutadi. Sovutilgan suv nasos vositasida skrubberga beriladi va pastga oqa turib qarama-qarshi yo'nalgan siqilgan havo oqimini sovutadi, havo, so'ngra, namlik ajratgich orqali regeneratörlarga boradi. Regeneratörlarning namlik bo'yicha nagruzkasi havoning skrubberdan chiqishidagi harorat va bosim bilan aniqlanadi. Past bosim qurilmalarida regeneratörlarning namlik bo'yicha nagruzkasi SO₂ bo'yicha nagruzkasidan, odatda, 10 marotaba katta bo'lishiga qaramay, namlikni teskari oqim bilan ma'lum haroratlar farqida olib ketilishi regeneratörlarni o'z-o'zini tozalashini ishonchli taminlaydi.

KAp-30 HAQda regeneratörlar uchtadan to'rtta guruhga ajratilgan (2.27-rasmda 1 ta guruh ko'rsatilgan). Regeneratörlardan so'ng havo adsorberlar 28 ga (ular 2 ta) tushib, qolgan uglevodorodlar yutiladi. So'ngra, havo ikki oqimga ajraladi: birinchi (asosiy) oqim quyi kolonna 25 ga (diametr 3700 mm, tarelkalar soni 17 ta) yo'naladi, ikkinchisi esa - "sirtmoq" zmeevigiga borib, undan 155 K haroratda (regeneratörning o'rta qismidan) oz miqdordagi sovuq havo bilan qo'shilib turbodetander 6 ga yuboriladi. Asosiy oqimning bir qismi 27 va 7 apparatlariga yuborilib sovutiladi va qisman

kondensatsiyalanadi. Turbodetanderda 1 soatda 42300 kg ga yaqin havo kengayadi, unga kirish va chiqishdagi harorat mos ravishda 138 K va 97 K. Turli ish rejimlarida harorat va detander oqimining ulushi turlicha. Detanderda gaz sarfining minimal qiymati 128 K da 30000 kg/soat. Turbodetanderdan so'ng havo oqimi "sirtmoq" oqimining qismi bilan aralashib, argon IAA 14 ga yo'naladi va yuqori kolonna 8 ga beriladi.

Rektifikatsion kolonnalar 8, 25 dagi ishchi jarayon oldingi ko'rilganlarga o'xshash. Kolonnalar bir xil balandliklarga o'rnatilgani sababli suyuq kislorodni idish 24 ga uzatish uchun unumdorligi $130 \text{ m}^3/\text{soat}$ bo'lgan ikkita markazdan qochma 26 nasos (1 tasi rezerv) o'rnatiladi. Idishdan suyuq kislorod kondensator-bug'latgich 23 ga va kripton kolonnasi 22 (diametr 1000 mm, tarelkalar soni 31 ta) ga boradi. Kondensator-bug'latgich 23 dan suyuq kislorodning bir qismi suyuq faza adsorberi 21 orqali bug'latgichga, portlovchi aralashmalar yig'ilishini bartaraf qilishi uchun boradi, so'ng kripton kolonnasi 22 ga yo'naladi. Kripton kolonnasidan texnik kislorod (99,7 % O_2) bug'latgich-o'ta sovtgichga borib suyuq kislorod nasosi 20 ga so'riladi. Suyuq kislorodni mahsulot sifatida olish ham mumkin. Nasos 20 da siqilgan texnik kislorod regeneratoz zmeeviklaridan o'tib gazga aylanadi, isiydi va iste'molchi ballonlariga uzatiladi. Past bosimli gazsimon texnik kislorodning (99,5 % O_2) asosiy oqimi yuqori kolonna 8 ning ikkinchi tarelkasidan (pastdan hisoblanganda) olinib kripton kolonnasi 22 dan kelayotgan kislorod bilan qo'shiladi, IAA 27 da havoning to'g'ri oqimi bilan isitiladi va regeneratozlarning zmeeviklariga beriladi. Quruq texnik kislorod mahsuloti regeneratozlardan 6–7 K norekuperatsiya haroratida chiqib iste'molchiga beriladi. Kripton kolonnasi 22 ning quyi qismida (bug'latgich 19 da) qiyin uchuvchan kripton va ksenonlar konsentrsiyalanadi. Bu yerdan suyuqlik kondensator-bug'latgich 16 ga borib, bug'lanish natijasida kripton va ksenonning suyuqlikdagi ulushi 0,1-0,2 % gacha ortadi. Dastlabki kripton-ksenon kontsentrati deb ataluvchi aralashma bug'latgich 15 ga quyiladi, suv bilan tezda bug'lantirilib (portlovchi aralashmalar yig'ilmasligi uchun), iste'molchiga beriladi. Kriptonni ajratish koeffitsienti tahminan 60-68%.

Yuqorida aytib o'tilganidek, neon, geliy va vodorod kondensatozlarning bug' o'tmaydigan yuqori qismida kondensatsiyalanmaydigan bug'lar sifatida to'planadi. Neongeliy aralashmasi kondensator 19 qopqog'i va kolonna 13 kondensatoridan (sxemada faqat kondensator 19 dan chiqarish ko'rsatilgan)

olinib, kolonna 8 ning yuqori qismiga joylashtirilgan deflegmatorga drossellanadi. Bu yerdan 50-40 % Ne va He, 2 % gacha H₂ (qolgani – azot) tarkibidagi kondensatsiyalanmagan bug'lar iste'molchiga boradi.

Detanderdan chiqqan havoni yuqori kolonna 8 ga kiritish komponentlarni kolonna balandligi bo'yicha va uning har bir sektsiyasida taqsimlanishini sezilarli o'zgartiradi. Argon fraktsiyasini kolonna 8 da olishda flegma turli nisbati bilan ishlovchi beshtadan kam bo'lmagan sektsiyalar mavjud. 3800 mm diametrlri 8 yuqori kolonna 57 ta tarelkaga ega. Argon fraktsiyasi 27-tarelkadan olinib, xom-ashyo argoni kolonnasi 9 (diametr 2800 mm, 53 ta tarelkalar) ga boradi. 4% gacha O₂ va 10 % gacha N₂ dan iborat xom-ashyo argoni kondensator 10 dan kondensator 11 ga beriladi, so'ng argon IAA 14 da bug'lanadi, isiydi va kisloroddan tozalanish uchun ApT qurilmasiga beriladi. Tozalanib, qurigandan so'ng texnik argon IAA da sovuydi va kondensator 12 da kub suyuqlikning bir qismini bug'lanishi natijasida kondensatsiyalanadi, sof argon kolonnasi 13 (diametr 600 mm, 30 ta tarelka) ga borib Ar-N₂ aralashmasi ajraladi. Argon kolonna quyi qismidan suyuq argon nasosi 17 ga beriladi (yoki quyiladi) va gazga aylanib regeneratrlar 5 ning argon zmeeviklarida isiydi va iste'molchi ballonlariga beriladi. Azot kolonna 13 bug'latgichidan chiqib yuqori kolonna 8 dan chiquvchi azotning asosiy oqimi bilan aralashadi va o'ta sovutgichlar 7 orqali regeneratrlar 5 ga, azotsuv sovutish sistemasi 3 ga boradi. Chiqindi azot (97-99 %) atmosferaga chiqariladi. Kondensatsiyalanmagan gazlar N₂; Ar; H₂ kolonna 13 kondensatorining yuqori qismidan oz miqdorda X liniyasidan doimiy chiqariladi.

KAp-30 qurilmasining sovutish unumdorligi bo'yicha balansiga baho berish maqsadga muvofiq. Havoni kompressorda siqishda sovutgichdan olib ketilgan issiqliklar farqi va 0,66 MPa gacha siqish ishi tufayli olingan sovutish unumdorligi

$$\Delta i_{T_a} = 35,0 \text{ J/mol}$$

Havoni turbodetanderda ($T_{xup} = 138 \text{ K}$; $\eta_{ao} = 85\%$) kengayishidagi 1 mol siqilgan havoga to'g'ri keluvchi sovutish unumdorligi

$$q_{dem} = \frac{42300}{217000} 0,85(3850 - 2500) = 224 \text{ J/mol.}$$

Shu tariqa, sikl uchun

$$q_u = 35 + 224 = 259 \text{ J/mol.}$$

Havoning sekundli sarfi

$$q_x = \frac{217000 \cdot 1000}{29 \cdot 3600} = 2080 \text{ mol/s,}$$

bu holda qurilmaning to'liq sovutish unumdorligi

$$Q_T = 2080 \cdot 259 = 540000 \text{ Vt.}$$

Asosiy rejim uchun

1) atrof-muhitdan kelayotgan issiqlik oqimlarini qoplash uchun sovutish unumdorligi ($q_a = 8200 \cdot B^{-0,25} = 8200 \cdot 180000^{-0,25} = 4000 \text{ J/m}^3$ nisbiy yo'qotuvlarda):

$$Q_a = 4000 \cdot 180000 / 3600 = 200000 \text{ Vt;}$$

2) nasadka bo'yicha $\Delta T_n = 3 \text{ K}$ li isimagan oqim (1712 mol/s) va zmeevikda $\Delta T_n = 6 \text{ K}$, $c_p \approx 29,4 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ li oqim bilan yo'qalayotgan sovutish unumdorligi:

$$Q_n = 1712 \cdot 29,4 \cdot 3 + 360 \cdot 29,4 \cdot 6 = 214000 \text{ Vt;}$$

3) suyuq argon (4 mol/s) olish uchun sarflanuvchi sovutish unumdorligi:

$$Q_{Ap} = 4(163 + (300 - 87) \cdot 0,523)39,9 = 43000 \text{ Vt,}$$

bu yerda entalpiyalar farqi argonning bug' hosil qilish issiqligi 163 J/g va 300 K dan kondensatsiyalanish boshlanish harorati 87 K gacha sovutishdagi (o'rtacha nisbiy issiqlik sig'imi 0,523 J/(g·K) dagi issiqliklar yig'indisi sifatida hisoblangan; 39,9 – argonning molekulyar massasi;

4) suyuq kislorod (1,7 mol/s) va suyuq kriptonksenon aralashmasini (0,87 mol/s) olishga sarflanuvchi sovutish unumdorligi:

$$Q_k = 2,57(212,7 + (300 - 90)0,94)32 = 33600 \text{ Vt;}$$

5) suyuq azot olishga (1,97 mol/s) sarflanuvchi sovutish unumdorligi:

$$Q_A = 1,97(199 + (300 - 77)1,035)28 = 23400 \text{ Vt;}$$

6) 22 MPa gacha siqilgan, chiqarilayotgan kislorod (3,45 mol/s) bilan yo'qalayotgan sovutish unumdorligi

$$Q_{Kc} = 3,45(548,3 - 505,5)32 = 4750 \text{ Vt}$$

bu yerda, qavs ichida siqilgan va siqilmagan kislorodning 300 K dagi entalpiyalari farqi berilgan;

7) nasosning suyuq kislorodni $0,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ miqdorda uzatib, 22 MPa gacha siqishidagi quvvatini qoplash uchun zaruriy sovutish unumdorligi:

$$Q_{nac} = 22 \cdot 10^6 \cdot 0,97 \cdot 10^{-4} = 2080 \text{ Vt.}$$

Natijada, $Q_a + Q_n + Q_{Ap} + Q_K + Q_A + Q_{Kc} + Q_{nac} = 520830 \text{ Vt}$.

Hisoblashda neongeliy aralashmasini sizib chiqishidagi, sovuq oqimlar quyilishidagi sovutish unumdorligining yo'qotuvlari, adsorbtsiya issiqligining chiqishi e'tiborga olinmadi, shuning uchun sovutish unumdorligining balansi 3,5 % ga farq qilishini e'tiborga olish kerak.

Nazorat savollari.

1. Gaz ajratish qurilmalarining asosiy qismlari qaysilar?
2. Yuqori bosim qurilmasi qanday xususiyatlarga ega?
3. КЖКАж-0,25 qurilmasining ishlash printsiptini tushuntiring.
4. Past bosim HAQ si azotsuv sovutish sistemasining vazifasi nima?
5. Past bosim HAQ sidagi almashinuvchan regeneratrlarning vazifasi nima?
6. KAp-30 qurilmasining ishlash printsiptini tushuntiring.

3-bob. Past temperaturalarda issiqlik almashinish.

3.1. Kriogen sistemalarda issiqlik almashinishning o'ziga xos tomonlari.

Issiqlik o'tkazuvchanlik.

Kriogen qurilmalari va sistemalarining ishi issiqlik o'tish jarayonlari bilan bog'liq. Avvalgi mavzularda ko'rilgan sikllar sxemalari issiqlikni regeneratsiyalash prinsipiga asoslangan va albatta bir yoki birnecha issiqlik almashinish apparatlarini o'z ichiga oladi. Kriogen issiqlik almashinish apparatlarida oqimlar temperaturalarining kichik farqini ta'minlash zarur, bu faqat jadal issiqlik almashinish bilan erishiladi. Kriogen sistemalar atrof - muhit temperaturasidan ancha past temperaturalarda ishlaydi, shuning uchun issiqlik o'tkazuvchanligi kichik bo'lgan maxsus issiqlik izolyasion materiallar qo'llash talab etiladi. Kriogen bloklar uchun vakuumdagi izolyasiya (dispers yoki ko'p qatlamli) ishlatiladi; bu muhitda issiqlikni tarqalishi – kriogen issiqlik uzatishning muammolaridan biridir [1].

Kriogen sistemalarga taalluqli issiqlik almashinishning boshqa muammolariga issiqlik «ko'prik»lari orqali issiqlik tarqalishi, kontakt issiqlik o'tkazuvchanlik, massani nostatsionar davriy isitish hamda sovutish va boshqalar kiradi.

Past temperaturalarda issiqlik almashinishning asosiy o'ziga xosligi kriogent va konstruksion materiallarning issiqlik-fizik xossalarini sezilarli o'zgarishidir.

Kriogen sistemalarda ishchi jism holati kritik holatga yaqin. Bunda fizik xossalarning o'zgarishi ayniqsa sezilarlidir – temperaturaning hatto kichik o'zgarishlari ishchi jism xossalarini bir necha marta o'zgarishiga olib keladi. Bu issiqlik almashinish jarayonlarini hisoblash usullarini birmuncha murakkablashtiradi.

Issiqlik o'tkazuvchanlik. Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni kechish vaqtiga va turli ob'ektlarni ishchi temperaturalargacha sovutishda kriogent sarfiga sezilarli ta'sir qiladi. Bu va shunga o'xshash masalalarni yechish uchun nisbiy issiqlik oqimini temperaturalar gradientiga proporsionalligi haqidagi J. Fure gipotezasiga asoslanuvchi issiqlik o'tkazuvchanlikning klassik nazariyasi qo'llanadi [1]:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad } T \quad (3.1)$$

bu yerda λ – issiqlik o'tkazuvchanlik, $\text{Vt}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\text{grad } T = \frac{\partial T}{\partial n}$ (n – izotermik yuzaga normal bo'yicha koordinata).

Fure gipotezasini qattiq jismning elementar hajmiga $dv = dx dy dz$ qo'llab va u uchun $d\tau$ vaqtidagi issiqlik balans tenglamasini tuzib, issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasini olish mumkin; bu tenglama izotrop muhit uchun quyidagi ko'rinishga ega

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_{yo} \quad (3.2)$$

bu yerda c – nisbiy issiqlik sig'imi, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; ρ – zichlik, kg/m^3 ; q_{yo} – ichki manba yutayotgan (ajratayotgan) issiqlik, kVt/m^3 .

Issiqlik o'tkazuvchanlik λ va issiqlik sig'imi c temperaturaga bog'liq, shuning uchun, umumiy holda, (3.2) tenglama noxiziqlidir. Ko'pincha, λ va c ning o'rtacha qiymatlari qabul qilinadi, shunda (3.2) tenglamani echish yengillashadi, ammo bunga temperaturalar oblastida doim ham yo'l qo'yib bo'lmaydi.

(3.2) tenglama jism temperatura maydonini vaqt bo'yicha o'zgarishini ifodalaydi. (3.1) va (3.2) tenglamalar chegaraviy shartlar bilan birgalikda qattiq jismning ko'plab issiqlik o'tkazuvchanlik masalalarini yechish imkonini beradi.

Statsionar issiqlik o'tkazuvchanlik. Bir o'lchamli issiqlik oqimi uchun statsionar issiqlik almashinish muhim amaliy ahamiyatga ega. Bunday sistemaga adiabatik yon yuzaga ega yassi devor yoki sterjen misol bo'la oladi; bunda F yuzaga normal x o'qi bo'yicha issiqlik oqimi [1]

$$Q = -\lambda F dT/dx. \quad (3.3)$$

$F = \text{const}$ va $\lambda = \text{const}$ bo'lganida δ qalinlikdagi chegaraviy T_1 va T_2 ($T_1 > T_2$) temperaturaga ega devor uchun

$$Q = (\lambda/\delta)(T_1 - T_2)F \quad (3.4)$$

(3.4) formula hisoblash ishlarida keng qo'llanadi, bunda uni keltirib chiqarishdagi shartlarga rioya qilinadi. Kriogen temperaturalarda $\lambda = \text{const}$ sharti, ko'pincha, juda qo'poldir; haqiqatda $\lambda = f(T)$ va o'n marotaba o'zgarishi mumkin. Bu holatni e'tiborga olib, (3.3) ifodani qo'llab Q quyidagicha aniqlanadi [1]:

$$Q = (F/\delta) \int_{T_1}^{T_2} \lambda dT. \quad (3.5)$$

Qoidaga ko'ra $\lambda = f(T)$ bog'liqlik grafik yoki jadval ko'rinishida beriladi; shuning uchun (3.5) integralni T_1 dan T_2 gacha intervalni n uchastkaga bo'lib, yig'indi ko'rinishiga almashtirish maqsadga muvofiq:

$$Q = (F/\delta) \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta T_i \quad (3.6)$$

bu yerda λ_i – temperaturalar intervali ΔT_i dagi o‘rtacha issiqlik o‘tkazuvchanlik.

Ba’zi hollarda o‘rtacha integral issiqlik o‘tkazuvchanlikni qo‘yib hisoblashni (3.4) formula bo‘yicha amalga oshirish qulay.

O‘rtacha integral teoremasi bo‘yicha

$$\lambda_{o'r} = \left[\int_{T_1}^{T_2} \lambda dT \right] / (T_1 - T_2) = [\sum_{i=1}^m \lambda_i \Delta T] / (T_1 - T_2). \quad (3.7)$$

O‘rtacha issiqlik sig‘imini c_{or} (3.7) formulaga o‘xshash formuladan hisoblash mumkin.

Ikki va uch o‘lchamli statsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik, ayniqsa, nostatsionar issiqlik o‘tkazuvchanlik masalalari ancha murakkab. Bunday masalalarni sonli usullar bilan yechish qulay [1].

Kriogen issiqlik izolyasiyasida issiqlikning tarqalishi. Sochma, poroshok-vakuimli va vakuum-ko‘p qatlamli issiqlik izolyasiyalarida issiqlikning tarqalishi kriogen texnikasida issiqlik o‘tkazuvchanlikning alohida holiga kiradi.

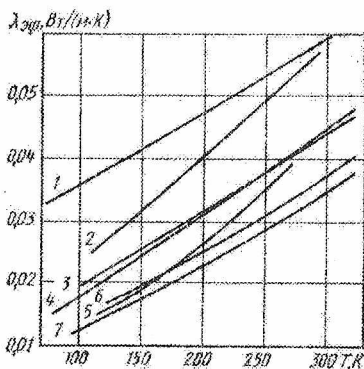
Odatiy gaz to‘ldirilgan issiqlik izolyasiyasi donador, tolali yoki yacheykali tuzilishga ega va atmosfera bosimi ostida bo‘ladi. Poroshok-vakuimli izolyasiya donador tuzilishga ega (bosim $p \approx 10$ Pa). Vakuum – ko‘p qatlamli issiqlik izolyasiyasi (eng samarador) navbatma-navbat qo‘yilgan kam issiqlik o‘tkazuvchi shisha-mato va alyumin-folga qatlamlaridan iborat; issiqlik izolyasion bo‘shliqdagi gaz bosimi $p = 0,1 \div 0,01$ Pa.

Issiqlik izolyasiyasi kabi bunday dispers muhitdan issiqlik o‘tish mexanizmi murakkab xarakterga ega va qator tashkil etuvchilardan (qattiq zarralarning issiqlik o‘tkazuvchanligidan, zarra yoki qatlamlar tutashgan yerlarda kontakt issiqlik almashinishdan, gazning konveksiyasi va issiqlik o‘tkazuvchanligidan, zarralar o‘rtasidagi nurlanishdan) iborat.

Effektiv issiqlik o‘tkazuvchanlikni taqriban quyidagicha aniqlash mumkin [1]:

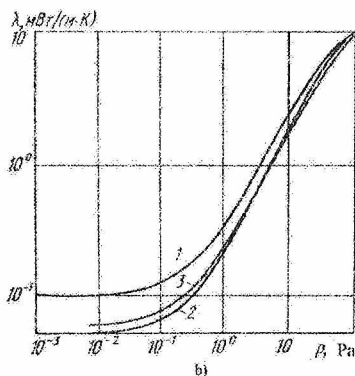
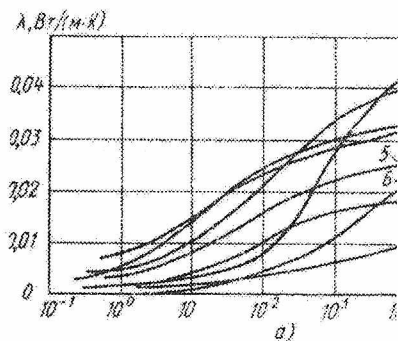
$$\lambda_{ef} = \lambda_q + \lambda_n + \lambda_g \quad (3.8)$$

bu yerda λ_q – qattiq jism va tutashgan erlardagi issiqlik o‘tkazuvchanlik; λ_n – nurlanish tufayli issiqlik o‘tkazuvchanlik; λ_g – qoldiq gaz issiqlik o‘tkazuvchanligi (vakuumda $\lambda_g \rightarrow 0$).



3.1-rasm. Tolali issiqlik izolyatsion materiallar issiqlik o'tkazuvchanligining temperaturaga bog'liqligi. 1, 5 – paxta ($1 - \rho = 81 \text{ kg/m}^3$; $5 - \rho = 42 \text{ kg/m}^3$); 2, 3, 7 – mineral tola ($2 - \rho = 400 \text{ kg/m}^3$; $3 - \rho = 200 \text{ kg/m}^3$; $7 - \rho = 95 \text{ kg/m}^3$); 4 – shisha tola ($\rho = 50 \text{ kg/m}^3$); 6 – ipak tola ($\rho = 58 \text{ kg/m}^3$)

Ayonki, shu tariqa aniqlangan λ_{ef} shartli bo'lib, issiqlik oqimlarining barcha turlarini integral ravishda e'tiborga oladi. Shu bilan birga, bunday yondashuv oddiy (3.4) formuladan foydalanish imkonini beradi.



3.2-rasm. Vakuum turidagi issiqlik izolyatsion materiallar issiqlik o'tkazuvchanligining 290–80 temperaturalar intervalida bosimga bog'liqligi: a) – poroshokli va tolali (1 – magneziiy; 2 – mineral tola; 3 – perlit; 4 – shisha tola (20 mkm); 5 – shisha tola (5–7 mkm); 6 – kremnegel; 7 – mipora; 8 – aerosol); b) – ko'pqatlamli (alyumin folga – shisha mato), turli sondagi qatamlar soni n ($1 - n = 26$; $2 - n = 40$; $3 - n = 51$) da

Izolyasiyaning issiqlik o'tkazuvchanligi temperaturaga, gazning zichligi va bosimiga, materialning qoralik darajasiga, zarra o'lchamiga bog'liq. 3.1, 3.2-rasmlarda kriogen issiqlik izolyasiyasining issiqlik o'tkazuvchanligini temperaturaga, bosimga va boshqalarga bog'liqligi ko'rsatilgan. Temperaturani $300 \div 80\text{K}$ intervalda pasayishi oddiy issiqlik izolyasiyasining λ_{ef} ini 2÷4 marotaba kamaytiradi (3.1-rasm) [1].

Vakuum turidagi izolyasiya uchun qoldiq gaz bosimi uning issiqlik o'tkazuvchanligiga kuchli ta'sir etadi. Bu bog'liqlik murakkab xarakterga ega (3.1-rasm). Vakuum-ko'p qatlamli izolyasiyaning yuqori sifatli namunalari eng kichik issiqlik o'tkazuvchanligiga ega; $300 \div 80\text{ K}$ temperatura intervalidagi o'rtacha qiymati $10^{-4}\text{ Wt/(m}\cdot\text{K)}$.

Nazorat savollari.

1. Vakuum issiqlik izolyasion materiallar qae'larda ishlatiladi?
2. Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni uchun Fure qonuni qanday ifodalanadi?
3. Sochma, poroshok-vakuumli va vakuum-ko'p qatlamli issiqlik izolyasiyalarida issiqlik qanday tarqaladi?

3.2. Konvektiv issiqlik almashinish. Qaynashdagi issiqlik almashinish.

Ikki fazali oqimning kanallarda harakatlanishidagi issiqlik almashinish

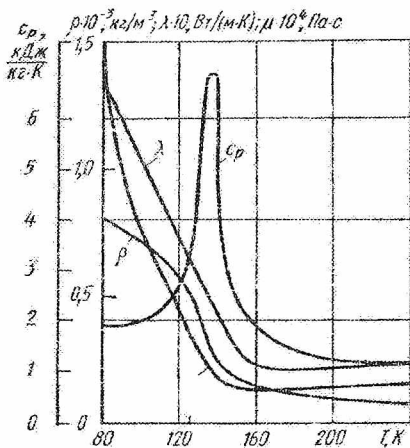
Kriogen sistemalarda issiqlik almashinishni hisoblashda o'xshashlik tenglamalaridan foydalaniladi, bunda α issiqlik tashuvchining o'rtacha temperaturasida $T_{o,r}$ aniqlanadi. Ammo bu doim ham o'rinli emas; issiqlik-fizik xossalar ba'zan keskin o'zgaradi, masalan, krioagent issiqlik almashinishda gazzimon holatdan suyuq holatga o'tishi. Bunday hollarda issiqlik tashuvchining temperatura o'zgarish intervalini n uchastkaga bo'lish va har bir uchastka uchun α ni alohida aniqlash lozim [1].

Issiqlik almashinish $p = const$ sharoitda kechuvchi kriogen issiqlik almashinish apparatlari shu tariqa, temperatura va xossalar ishchi jism oqimi bo'yicha o'zgarishini e'tiborga olgan holda hisoblanadi. Ammo, issiqlik-fizik xossalar shunchalik keskin o'zgaruvchan hollar bo'lishi murkinki, bu o'zgarishlarni kanal bo'yilabgina emas, ko'ndalang kesim – radius bo'yicha ham e'tiborga olish zarur; so'nggi holda tezlik profilini deformatsiyasiga, oqim gidrodinamikasining o'zgarishiga va demakki, α ni o'zgarishiga olib

keladi. Bunday hol natijasi bo‘lib α ni temperaturaga murakkab bog‘liqligi hisoblanadi, umumiy tenglamalar yuqoridagi omilni e‘tiborga olmaydi va yaroqsiz bo‘lib qoladi.

Avvalo, o‘zgaruvchan xossalar issiqlik almashinishga ta‘sir etishini e‘tiborga olish uchun moddaning holatlari oblastini aniqlash lozim. Kritik nuqta yaqinida xossalar sezilarli o‘zgaradi; $p > p_k$ holatlar oblasti (kritik nuqtadan yuqoridagi oblast) da issiqlik almashinishiga xossalarning ta‘siri ayniqsa sezilarli.

Azot uchun kritik nuqta (T_k) yaqinida xossalarning o‘zgarishi 3.3-rasmda ko‘rsatilgan; issiqlik sig‘imining maksimal nuqtasi va unga to‘g‘ri keluvchi temperatura T_m katta qiymatlarga ega. T_m temperatura T_k dan katta, o‘zgaruvchan bo‘lib, bosimga bog‘liq; masalan, geliy bosimi p 0,3 dan 3 MPa gacha o‘zgarganida T_m 5,56 dan 11,1 gacha ortadi [1].



3.3-rasm. Kritik nuqta yaqinida ($p = 5,0$ MPa) azot issiqlik-fizik xossalari μ , λ , ρ , c_p ning temperaturaga bog‘liqligi

Kritik nuqtadan birmuncha uzoqlikda, taxminan $0,85 > T/T_m > 1,3$ va $p/p_k > 3,0$ da, kritik nuqtadan yuqoridagi bir fazali moddalar uchun xossalarning keskin o‘zgarishlik oblasti xarakterlidir. Bu oblast chegaralari aniq emas. Xossalarning keskin o‘zgaruvchan va keskin o‘zgarmaydigan oblastlari uchun issiqlik berish koeffitsientlari alohida hisoblanadi.

Xossalar keskin o'zgaraydigan oblast. Fizik kattaliklar o'zgaruvchan bo'lganida issiqlik almashinishni hisoblashning bir necha usuli mavjud. Masalan, xossalarning o'zgarishini aniqlovchi temperaturani tanlash bilan e'tiborga olinadi. Bunday temperatura sifatida o'zgaraydigan xossalar uchun oqim yadrosining temperaturasi T_{oq} qabul qilinadi. O'zgaruvchan xossalar uchun temperaturalarining $T_f = 0,5(T_d + T_{oq})$ o'rtacha qiymati T_d dan T_{oq} gacha intervalda qabul qilinadi; bu yerda T_d – issiqlik almashinish yuzasining temperaturasi [1].

Temperaturani xossalarga ta'sirini e'tiborga olishning boshqa usuli issiqlik almashinishning o'xshashlik tenglamalariga qo'shimcha o'xshashlik sonlari kiritiladi:

$$(Pr_{oq}/Pr_d)^p; (\mu_{oq}/\mu_d)^l; (T_{oq}/T_d)^k, \quad (3.9)$$

bu yerda l, p, k daraja ko'rsatgichlari ma'lum bir ishchi jism va issiqlik almashinishi shartlari uchun tajribadan aniqlanadi.

Bu kabi bog'liqliklarning qo'llanilishi cheklangan, ammo ular aniqligi katta va keng qo'llanadi. Bu o'xshashlik sonlaridan amaliyotda ko'proq temperatura faktori $(T_{oq}/T_d)^k$ yoki unga teskari kattalik ko'proq ishlatiladi.

Xossalar keskin o'zgaraydigan oblast. Kritik nuqtadan yuqori holatga to'g'ri keluvchi bu oblast chegaralari T_{oq} oqim, T_d isituvchi yuza va psevdokritik temperatura T_m munosabatlari bilan aniqlanadi. Xossalarning eng ko'p ta'sir etish zonasi quyidagicha aniqlanadi [1]

$$T_{oq} \leq T_m < T_d. \quad (3.10)$$

Bu formuladan ko'rinadiki, kanal radiusi bo'yicha temperaturalar T_{oq} va T_d ning o'rtasidagi kichik intervalda issiqlik sig'imining cho'qqisiga erishiladi. Bunda oqim yadrosining va devor yaqinidagi qatlamning xossalari bir necha martaga farqlanishi mumkin. Bunday hollarda yuqorida keltirilgan issiqlik almashinish formulalari noo'rindir, chunki issiqlik berishga issiqlik oqimining zichligi q va massaviy tezlik gw qo'shimcha tarzda ta'sir etadi; $q/(\rho w)$ ortishi bilan issiqlik almashinishga xossalar ta'sir ertadi. Kritik nuqtadan yuqoridagi bu zona uchun issiqlik tarqalishining mexanizmi yetarli o'rganilmagan. Qayd etilganki, kanal uzunligi bo'yicha issiqlik berish rejimi turlicha – radius bo'yicha doimiy xossalarda normal issiqlik almashinishga nisbatan yaxshi yoki yomonroq bo'lishi mumkin.

Kritik bosimlarga yaqin bosimlarda, $T_{oq} < T_m$ va $T_d = T_m$ da issiqlik berish ancha jadal ro'y beradi. (3.10) shartda esa yomonlashgan rejim yuzaga keladi va issiqlik berish bir necha barobar yomonlashishi mumkin. Issiqlik berishning yomonlashishi va unga mos devor temperaturasining T_d ortishi nisbiy issiqlik oqimining q ko'payishida kuzatiladi. Ayrim hollarda issiqlik tashuvchi oqimning pulsatsiyasi kuzatiladi.

Issiqlik almashinishni bu oblastd hisoblash uchun empirik bog'liqliklar olingan, ammo issiqlik almashinish haqidagi bilimlarning kamligi bunday formulalar ahamiyatini cheklaydi. Kritik nuqtadan yuqoridagi geliyning issiqlik almashinishi kriogen sistemalar uchun ayniqsa ahamiyatlidir, chunki bu ishchi jismni o'ta o'tkazgichli qurilmalarni termostatlash uchun qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Kritik nuqtadan yuqoridagi geliyning ikki fazali geliyga nisbatan avzalligi, asosan, katta q larda kanal devorining kamroq qizishidir, bu o'ta o'tkazgichlar stabilizatsiyasini yaxshilaydi. Kritik nuqtadan yuqoridagi geliyning issiqlik berishi quyidagicha hisoblanishi mumkin

$$St = St_o(\rho_d/\bar{\rho})^{1,45}[0,6/(\rho/\rho_h)^4 + 1], \quad (3.11)$$

bu yerda $St = q/[\rho w(i_d - i_{oq})]$ – Stenton kriteriyasi (i_d va i_{oq} – devor va oqim temperaturalaridagi entalpiyalar; ρw – oqimning massaviy tezligi); $St_o = \xi/8$ (ξ – bir fazali turbulent oqim uchun odatiy formulalardan aniqlanuvchi qarshilik koeffitsienti); ρ_d – kanal devori yaqinidagi oqimning zichligi; $\bar{\rho} - T_d$ dan T_{oq} gacha temperaturalar intervalidagi oqimning o'rtacha tezligi.

Issiqlik oqimi $q = \alpha(T_d - T_{oq})$.

(3.11) formula kanal diametri $d \leq 2,13\text{mm}$ bo'lgandagi tajriba kattaliklarini umumlashtiradi [1].

3.3. Qaynashdagi issiqlik almashinish

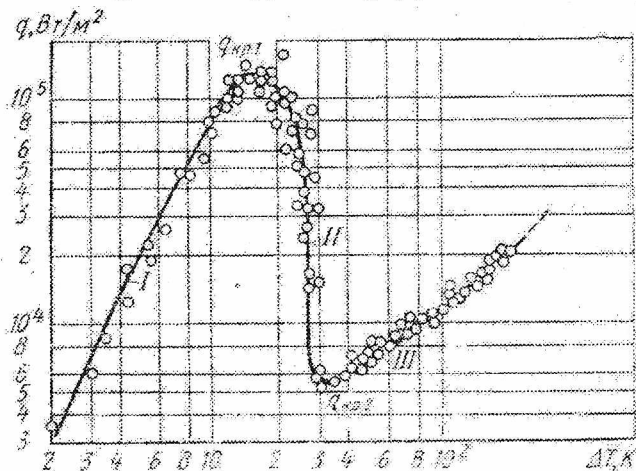
Ma'lum bir bosimda yuza temperaturasi T_d suyuqlikning to'yinish muvozanat temperaturasidan T_T oshganida qaynash jarayoni yuz beradi. Suyuqlik T_T dan biroz yuqori temperaturaga isigan bo'lsa ham issiqlik almashinish jarayonining yurituvchi kuchi $\Delta T = T_d - T_T$ ayirma bilan aniqlanishi qabul qilingan. Suyuqlik hajmida bug' fazaning hosil bo'lish xarakteri, uning o'sishi va harakatlanishi qaynashdagi issiqlik almashinishning turli rejimlarini belgilab beradi. Qaynashning uchta asosiy

rejimlari mavjud: puffakchali, o'tish va plyonkali. Qaynash sodir bo'luvchi sistemalar ham ikki turga ajratiladi: katta hajmdagi qaynash va suyuqlikning majburiy harakatidagi qaynash.

Qaynashdagi issiqlik tarqalishini ifodalash uchun issiqlik berish koeffitsienti α , issiqlik oqimining zichligi temperaturalar farqi $\Delta T = T_d - T_T$ ushbu bog'liqlikda ishlatiladi

$$q = \alpha \Delta T. \quad (3.12)$$

Qaynashga oid tajribadan olingan kattaliklar, odatda, $q = f(\Delta T)$ yoki $\alpha = \varphi(\Delta T)$ funksiya ko'rinishida beriladi. 3.4-rasmda atmosfera bosimida azotning katta hajmda qaynash egri chizig'i ko'rsatilgan. Grafikning chap chekka qismi (kichik ΔT oblasti) bir fazali suyuqlikning erkin konveksiya zonasiga taalluqli. ΔT ortishi bilan qaynash boshlanadi, issiqlik oqimining zichligi kritik (maksimal) qiymatgacha q_{kr1} (puffakchali qaynash rejimi I) oshadi, so'ngra kichik interval ΔT da minimal qiymatgacha q_{kr2} (o'tish II rejimi) kamayadi. Shundan so'ng turg'un plyonkali rejim III boshlanadi, bunda ΔT ning katta qiymatlari q ning nisbatan kichik qiymatlariga mos keladi. Bunga sabab shuki, suyuqlik va isitish yuzasi orasida termik qarshiligi katta bo'lgan uzluksiz, yaxlit bug' plyonkasi hosil bo'ladi.

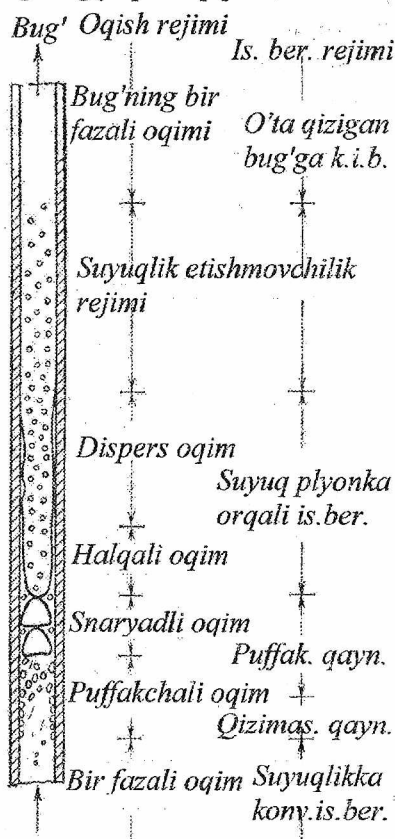


3.4-rasm. Azotni katta hajmda qaynashida nisbiy issiqlik oqimining haroratlar farqiga bog'liqligi

Puffakchali qaynash rejimi $q < q_{kr1}$ o'rnatilishi ma'qul. 3.4-rasmda ko'rsatilgan jarayonlarga o'xshash jarayonlar kanallarda majburan oqish

sharoitlarida qaynash uchun ham xarakterli, ammo bunda kanal uzunligi bo‘ylab jarayon sezilarli o‘zgaradi [1].

Ikki fazali oqimning kanalarda harakatlanishidagi issiqlik almashinish. Qaynash va majburiy harakatlanishdagi konvektiv issiqlik almashinishdan iborat bu issiqlik almashinish eng murakkab va yetarli o‘rganilmagan. Jarayon gidrodinamikasi va demak, issiqlik almashinish puffakchalar harakati bilan ham, suyuqlik va bug‘ asosiy massaning harakati bilan ham aniqlanadi, ya’ni ikki fazali oqim harakatlanadi. Jarayon xarakteri katta hajmda qaynashdagidan farq qiladi, real kriogen sistemalaridagi issiqlik almashinish sharoitlariga eng yaqindir [1].



3.5-rasm. To‘yingan qaynayotgan suyuqlikni vertical kanalda majburiy harakatida oqish va issiqlik berish rejimlarining o‘zgarish sxemasi

Suyuqlik isitiluvchi kanalda oqqanida bir fazali oqimdan puffakchaliga asta o'tiladi, so'ngra snaryadli, halqali (plyonkali), emulsion (dispers) oqimlarga o'tiladi, oxirida bir fazali bug' oqadi. Suyuqlik dastlab qizimasdan bug'lanadi, so'ngra to'yingan holda qaynaydi. Gorizontal va vertikal kanallarda oqish xarakteri turlicha, vertikal kanalda ajralish sodir bo'ladi: gaz kanalning yuqori qismda, suyuqlik quyi qismda yig'iladi.

Oqim va issiqlik almashinish rejimlarini vertikal kanalda o'zgarishini 3.5-rasmdagi sxema tushuntiradi. Dastlabiga rejim oddiy puffakchali qaynashga yaqin, halqasimon va dispers oqimlarda suyuqlikning yupqa halqasimon plyonkasi orqali issiqlik tarqalishi bilan issiqlik almashinadi [1].

Ikki fazali oqimdagi issiqlik almashinishni xarakterlash uchun bug'ning massaviy miqdori – qaralayotgan kesim uchun massaviy sarfdagi bug'ning ulushi qo'shimcha parametr sifatida ishlatiladi. Bunday oqimlar uchun boshqa muhim xarakteristika – Martinellining ikki fazalilik parametridir

$$\chi_{tt} = \left(\frac{1-x}{x}\right)^{0,9} \left(\frac{\rho_b}{\rho_s}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu_s}{\mu_b}\right)^{0,1} \quad (3.13)$$

Ikki fazali oqim uchun issiqlik almashinishni ifodalovchi ko'pgina formulalar olingan, ammo ular universal emas.

Puffakchali qaynash oblastida qaynashdagi va bir fazali muhitning oqishidagi issiqlik berish koeffitsientlarini (α_{qay} , α_{konv}) aniqlash eng oddiy hisoblash usulidir. Masalan, S. Kutateladze quyidagi formulani taklif qilgan [1]:

$$\alpha = \alpha_{konv} \left[1 + \left(\frac{\alpha_{qay}}{\alpha_{konv}}\right)^2 \right]^{0,5} \quad (3.14)$$

O'tish rejimi uchun ishonchli formulalar mavjud emas. Ikki fazali oqimdagi plyonkali qaynashning turg'un oblasti uchun bir nechta hisoblash formulalari mavjud, faqat ularni qaysi krioagent uchun olingan bo'lsa, o'sha krioagent uchun qo'llash maqsadga muvofiq. Masalan, vodorod uchun quyidagi tenglamani tavsiya qilish mumkin [1]:

$$Nu = Nu_o [1/(0,7 + 2,4\chi_{tt}) + 0,15]. \quad (3.15)$$

bu formuladagi Nu_o turbulent oqimdagi konvektiv issiqlik almashinish uchun tavsiya etilgan (7.152) formuladan hisoblanadi [1]; Re va Pr kriteriyalari bug' faza uchun kesimdagi o'rtacha temperatura $T_f = 0,5(T_d + T_{oq})$ bo'yicha, zichlik (Re dagi) esa – suyuqlik va bug' uchun o'rtacha zichlikdan aniqlanadi.

1. Konvektiv issiqlik almashinish uchun “xossalar keskin o‘zgaradigan va o‘zgarmaydigan oblastlar” nima?
2. Qaynashdagi issiqlik almashinish qanday omillarga bog‘liq?
3. Ikki fazali oqimdagi plyonkali qaynashning turg‘un oblasti uchun issiqlik berish koeffitsienti qanday hisoblanadi?

3.4. Issiqlik almashinish apparatlari. Kriogen sistemalari issiqlik almashinish apparatlarining o‘ziga xos xususiyatlari, ularning turlari va samaradorligi

Kichik unumdorlikdagi dastlabki kriogen qurilmalarining issiqlik almashinish apparatlari (IAA) bir o‘ramga kavsharlangan mis trubkali qarama-qarshi oqimli yoki “truba ichida truba” ko‘rinishiga ega bo‘lgan. Tashqi truba bo‘ylab past bosimli teskari oqim, ichki trubada – to‘g‘ri oqim harakatlangan. Ichki trubalar bittadan ko‘p bo‘lishi ham mumkin, ko‘pincha uchta bo‘lgan. Issiqlik almashinishni jadallashtirish uchun qo‘pincha ichki trubalar ezish yo‘li bilan spiralsimon qovurg‘ali qilib ishlangan. Tashqi truba yuzasidan samarali foydalanish uchun unga kichikroq diametrlil trubka kavsharlangan va undan to‘g‘ri oqimning bir qismi o‘tkazilgan [6].

Kriogen qurilmalarining unumdorligi ortishi va demakki, IAA o‘lchamlari ortishi bilan ularning konstruksiyalari o‘zgardi; bunda turli firmalar qator sabablar tufayli IAAning o‘zlariga mosroq bo‘lgan turlarini ishlatdilar. Issiqlik almashinish apparatlarining katta kriogen qurilmalarida keng ishlatiladigan turi – qarama-qarshi oqimli truba o‘ramli qobiq trubali apparatdir. Issiqlik almashinishni jadallashtirish va issiqlik almashinish yuzasini oshirish uchun, ko‘pincha, ezish yo‘li yoki simlar bilan trubalarga qovurg‘alar yasaladi.

Bu turdagi IAAGA samaradorlik va ixchamlik bo‘yicha matritsali yelimlangan apparatlar muqobil bo‘lishi mumkin edi, ammo yelimlangan birikmalar mustahkamligini ta‘minlashdagi qiyinchiliklar ularni kriogen qurilmalarda keng qo‘llashdan voz kechishga majbur qildi. Mavjud sharoitlar, yo‘lga qo‘yilgan texnologiyalarni qo‘llash va kriogen IAAni ixtisoslashgan firmalardan olish imkoniyati amerika va yaponiyalik kriogen firmalarni katta kriogen qurilmalar uchun 300÷20 K temperaturalar diapazonida plastina-qovurg‘ali IAA ularning samaradorligi nisbatan kichikligiga qaramay qo‘llashni taqazo etgan. Ancha past temperaturalar

uchun “Xempson” firmasining turli apparatlaridan tortib payvandlangan matritsali va spirall IAA ishlatiladi [6].

3.5 Issiqlik almashinish apparatlarini hisoblash.

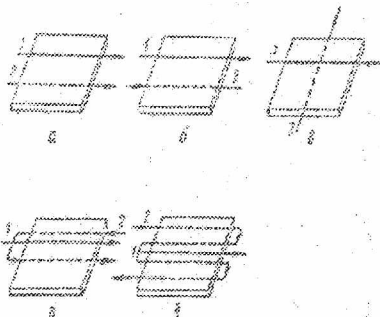
Issiqlik almashinish jarayonlarini harakatga keltiruvchi kuch. Issiqlik almashinish jarayonlarini harakatga keltiruvchi kuch – issiqlik eltkichlarning temperaturalar farqidir. Ushbu farq ta’siri ostida temperaturasi yuqori muhitdan temperaturasi past muhitga issiqlik o’tadi [13].

O‘zgarmas temperaturada issiqlik o‘tkazish jarayoni juda kam tarqalgan. Bunday jarayonlar, bir tomonida bug‘ kondensatsiyalansa, ikkinchisida esa, suyuqlik qaynashi ro‘y beradi. Lekin, kriogen texnikasida ko‘pchilik jarayonlar issiqlik eltkichlarning o‘zgaruvchi temperaturalarida sodir bo‘ladi.

Odatda temperatura issiqlik eltkichlarni ajratib turuvchi devor yuzasi F bo‘ylab o‘zgaradi. Lekin, vaqt o‘tishi bilan issiqlik eltkichning temperaturasi o‘zgarmasligi mumkin va u $T = f(F)$ funksiya bilan ifodalanadi. Bunday hol turg‘un issiqlik almashinish jarayonini xarakterlaydi.

Noturg‘un issiqlik almashinish jarayonlarida ikki holat bo‘lishi mumkin:

- devor yuzasining har bir nuqtasida temperatura faqat vaqt o‘tishi bilan o‘zgaradi, ya’ni $T = f(\tau)$;



3.6-rasm. Issiqlik almashinish jarayonida suyuqliklarning harakat yo‘nalishlari: a – parallel; b – qarama-qarshi; c – kesishib o‘tgan; d – aralash.

- issiqlik eltkichning temperaturasi vaqt o‘tishi va devor yuzasi bo‘ylab o‘zgaradi, ya’ni $T > f(\tau; F)$.

O'zgaruvchan temperaturada issiqlik o'tkazish suyuqliklarning harakat yo'nalishiga bog'liqdir.

Uzluksiz ishlaydigan qurilmalarda issiqlik almashinish jarayonida suyuqliklar harakati parallel, qarama-qarshi, kesishib o'tgan va murakkab (aralash) yo'nalishli bo'lishi mumkin (3.6-rasm).

Ajratib turuvchi devor bo'ylab bir-biriga nisbatan suyuqliklar harakatining quyidagi variantlari bo'lishi mumkin:

1) parallel harakatda (3.6a-rasm) ikkala issiqlik eltkichlar ham bir xil yo'nalishda harakat qiladi;

2) qarama-qarshi harakatda (3.6b-rasm) issiqlik eltkichlar bir-biriga qarshi yo'nalishda harakat qiladi;

3) kesishib o'tuvchi harakatda (3.6v-rasm) issiqlik eltkichlar bir-biriga nisbatan perpendikulyar yo'nalishda harakat qiladi;

4) murakkab yoki aralash harakatda (3.6g, d-rasm) birinchi issiqlik eltkich bir yo'nalishda harakat qilsa, ikkinchisi ham to'g'ri, ham teskari yo'nalishda harakat qiladi.

O'zgaruvchan temperaturali jarayonlarda issiqlik eltkichlarning o'zaro harakat yo'nalishiga qarab, issiqlik almashinish jarayonini harakatga keltiruvchi kuch o'zgaradi. Shuning uchun, issiqlik o'tkazishning asosiy tenglamasidagi o'rtacha harakatga keltiruvchi kuch suyuqliklarning bir-biriga nisbatan harakat yo'nalishiga va jarayonni tashkil etilishga bog'liq bo'ladi [13].

3.7-rasmda parallel va qarama-qarshi yo'nalishli harakatlar paytidagi issiqlik eltkichlar temperaturalarining o'zgarishi tasvirlangan. Issiqlik eltkichlardan biri G_1 sovutilganda temperaturasi t_1' dan t_1'' gacha pasaymoqda, ikkinchisi esa G_2 , isitilganda t_2' dan t_2'' gacha ko'tarilmoqda.

3.8-rasmda qobiq-trubali issiqlik almashinish qurilmalarida tez-tez uchrab turadigan aralash yo'nalishli suyuqliklar harakat sxemalari keltirilgan.

3.7-rasmdan ko'rinib turibdiki, issiqlik almashinish jarayonida ikkala issiqlik eltkichlar orasidagi harakatga keltiruvchi kuch miqdori devor yuzasi bo'ylab o'zgarimoqda. Masalan, issiqlik eltkichlarning qurilmaga kirishida, parallel yo'nalishda (3.7 a-rasm) lokal harakatga keltiruvchi kuch maksimal qiymatga ega $\Delta t_{max} = t_1' - t_2'$; qurilmadan chiqishda esa – minimal $\Delta t_{min} = t_1'' - t_2''$. Qarama-qarshi yo'nalishli harakatda ham xuddi shunday

natijaga ega bo'lamiz. Shuning uchun issiqlik almashinish jarayonlarini hisoblashda o'rtacha harakatga keltiruvchi kuchdan foydalaniladi.

Issiqlik almashinish yuzasining cheksiz kichik elementida vaqt birligida issiqlik eltkichdan sovuqlik eltkichga uzatilayotgan issiqlik miqdori (3.7a-rasm) ushbu tenglamadan aniqlanadi: $dQ = K(t_1 - t_2)dF$. Issiqlik almashinish oqibatida issiqlik eltkichning temperaturasi $dt_1 = -dQ/(G_1c_1)$ ga pasayadi, sovuqlik eltkichning temperaturasi esa $dt_2 = -dQ/(G_2c_2)$ ga ko'tariladi, bu yerda G_1 va G_2 issiqlik va sovuqlik eltkichlarning massaviy sarfi; c_1 va c_2 - issiqlik va sovuqlik eltkichlarning solishtirma issiqlik sig'imlari [13].

Agar $\Delta t_{max}/\Delta t_{min} \leq 2$ va issiqlik eltkichlarning tezligi kichik bo'lganda, temperaturalarning farqi o'rtacha arifmetik qilib hisoblanadi [13]:

$$\Delta t_{orr} = \frac{\Delta t_{max} + \Delta t_{min}}{2} \quad (3.15)$$

Bu formula bilan hisoblaganda, xatolik 5% dan oshmaydi. Agar, $\Delta t_{max}/\Delta t_{min} > 2$ bo'lsa, temperaturalar farqi ushbu formuladan hisoblanadi:

$$\Delta t_{orr} = \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max}/\Delta t_{min})} \quad (3.16)$$

Issiqlik eltkichlarning kesishib o'tgan va aralash yo'nalishli harakatida o'rtacha harakatlantiruvchi kuch ushbu formuladan aniqlanadi [13]:

$$\Delta t_{orr} = \varepsilon_{\Delta t} \frac{\Delta t_{max} - \Delta t_{min}}{\ln(\Delta t_{max}/\Delta t_{min})} \quad (3.17)$$

bu yerda $\varepsilon_{\Delta t}$ - o'lchamsiz koeffitsient bo'lib, 3.8-rasmdagi grafiklardan topiladi.

Grafiklardagi P va R kattaliklar Bouman formulasidan topiladi:

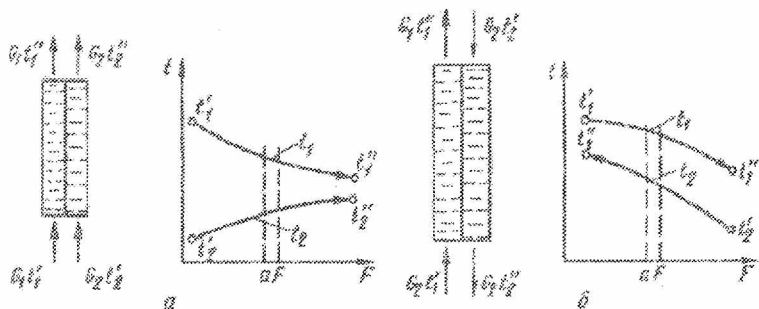
$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'}, \quad R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2 - t_2'} \quad (3.18)$$

Issiqlik o'tkazish. Issiqlik almashinish jarayonlarida ko'pincha issiqlik energiyasi bir suyuqlikdan ikkinchisiga ularni ajratib turuvchi devor orqali uzatiladi.

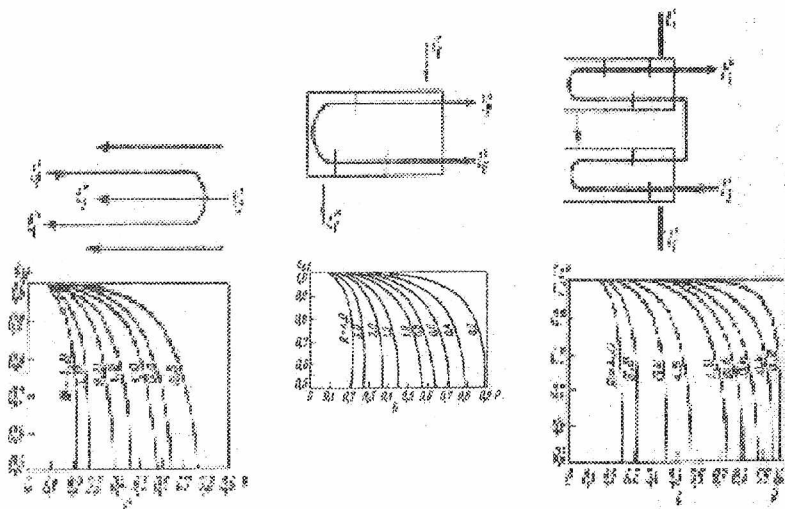
Temperaturasi yuqori bo'lgan suyuqlikka devor orqali issiqlikning uzatilishi *issiqlik o'tkazish* deyiladi. Ushbu yo'l bilan uzatilgan issiqlik miqdori issiqlik o'tkazishning asosiy tenglamasidan aniqlanadi:

$$Q = K\Delta t_{orr}F \quad (3.19)$$

bu yerda K – issiqlik o'tkazish koeffitsienti, $Vt/(m^2 \cdot K)$; Δt_{orr} – issiqlik va sovuqlik eltkichlar temperaturalarining farqi, K ; F – ajratib turuvchi devor yuzasi, m^2 .



3.7-rasm. Issiqlik elitgichlar temperaturalarining o'zgarish sxemasi:
 a – parallel yo'nalish; b – qarama-qarshi yo'nalish



3.8-pasm. Aralash yo'nalishli qobiq-trubali issiqlik almashinish apparatida issiqlik elitgichlarning harakat sxemasi va $\epsilon/\Delta t$ koeffitsienti: a – trubalararo bo'shlig'i bir va trubalar bo'shlig'i esa ikki, to'rt, olti va undan ortiq yo'lli; b – ko'ndalang to'siqli trubalararo bo'shlig'i bir va trubalar bo'shlig'i esa ikki, to'rt, olti va ortiq yo'lli; c – ko'ndalang to'siqli trubalararo bo'shlig'i ikki va trubalar bo'shlig'i to'rt yo'lli.

Tekis devorning issiqlik o'tkazishi. 3.9-rasmda qalinligi δ va materialining issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti λ bo'lgan tekis devor tasvirlangan.

Devorning bir tomonidan temperaturasi t_{f1} (oqim o'zagida) bo'lgan issiqlik eltkich, ikkinchi tomonidan esa – temperaturasi t_{f2} bo'lgan sovuqlik eltkich oqib o'tmoqda. Devor yuzalarining temperaturasi t_{w1} va t_{w2} . Issiqlik berish koeffitsientlari α_1 va α_2 . Turg'un jarayonda F yuza orqali birinchi issiqlik eltkich o'zagidan devorga uzatilayotgan issiqlik miqdori, devordan o'tgan va devordan ikkinchi issiqlik eltkich o'zagiga uzatilayotgan issiqlik miqdoriga teng bo'ladi.

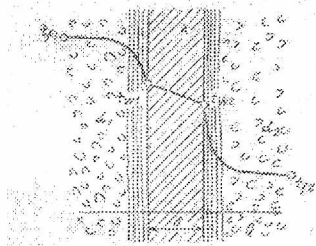
Ushbu issiqlik miqdorini quyidagi tenglamalardan topish mumkin:

Unda, issiqlik eltkichning o'zgaras temperaturalarida tekis devorning issiqlik o'tkazish tenglamasi ushbu ko'rinishni oladi:

$$Q = KF(t_{f1} - t_{f2}) \quad (3.20)$$

bu yerda

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} \quad (3.21)$$



3.9-rasm. Tekis devor orqali issiqlik o'tkazish jarayonida temperaturaning o'zgarish xarakteri

bu yerda K – issiqlik o'tkazish koeffitsienti, $Vt/(m^2 \cdot K)$.

(3.21) tenglamadan

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (3.22)$$

Shunday qilib issiqlik o'tkazish koeffitsienti K temperaturasi yuqori bo'lgan issiqlik eltkichdan temperaturasi past eltkichga vaqt birligida ajratuvchi devorning $1m^2$ yuzasidan eltkichlar temperaturasining farqi 1 K bo'lganda o'tkazilgan issiqlikning miqdorini bildiradi.

Issiqlik o'tkazish koeffitsientiga teskari bo'lgan kattalik termik qarshilik deb nomlanadi. $1/\alpha_1$ va $1/\alpha_2$ lar issiqlik berishning termik qarshiligi bo'lsa, δ/λ devorning termik qarshiligi. (3.22) tenglamadan ko'rinib turibdiki, issiqlik o'tkazishning termik qarshiligi issiqlik berish va devorning termik qarshiliklar yig'indisiga teng.

Devorning termik qarshiligini aniqlashda, unga o'tirib qolgan iflosliklarning termik qarshiligini ham hisobga olish zarur (3.1-jadval).

3.1- jadval

r_{ifl} ning tahminiy qiymatlari

t/r	Issiqlik eltkich	r_{ifl}
1.	Suv	
	- distirlangan	0,00009
	- dengiz	0,00009
	- sifatli quduq, ko'l, vodoprovod, daryosuvi	0,00018
	- $w < 0,9$ m/s	0,00035
	- $w > 0,9$ m/s	0,00018
	- ifloslangan daryo suvi	0,00053
	- $w < 0,9$ m/s	0,00035
	- $w > 0,9$ m/s	0,00009
2.	Neft mahsulotlari	
	- xom-ashyo	0,00009
	- toza (shu jumladan mineral moylar)	0,00018
3.	Organik suyuqliklar, tuzli eritmalar, sovuqlik eltkichlar (NH_3 , freonlar va hokazo.)	0,00018
4.	Suv bug'i	0,00018
5.	Bug'lar	
	- organik suyuqlikniki	0,00009
6.	- sovuq eltkichlarniki	0,00035
7.	Havo	0,00035

$$r_{ifl} = \delta_{ifl} / \lambda_{ifl} \quad (3.23)$$

Ko'p qatlamli tekis devordan issiqlik o'tish jarayonida har bir qatlamning termik qarshiligi hisobga olinishi zarur. Bunday devorlar uchun

K ni quyidagi tenglamadan aniqlash lozim:

$$K = \frac{1}{1/\alpha_1 + \sum_{i=1}^n \delta_i/\lambda_i + 1/\alpha_2} \quad (3.24)$$

bu yerda i qatlamning tartib raqami; n qatlamlar soni.

Shuni alohida ta'kidlash kerakki, har doim issiqlik o'tkazish koeffitsienti eng kichik issiqlik berish koeffitsientidan kichik bo'ladi [14].

Silindrik devorning issiqlik o'tkazishi. Ma'lumki, qobiq-trubali apparatlarda issiqlik almashinish truba orqali amalga oshadi. Trubada temperaturasi t_1 bo'lgan suyuqlik harakat qilsa, tashqarisida esa t_2 temperaturali suyuqlik oqib o'tsin, bunda $t_1 > t_2$. Temperaturasi yuqori suyuqlikdan truba ichki devoriga issiqlik berish koeffitsienti α_1 , tashqi yuzasidan sovuq suyuqlikka issiqlik berish koeffitsienti α_2 truba balandligi L , ichki radiusi r_1 va tashqi radiusi r_2 bo'lsa, silindrik yuzadan uzatilgan issiqlik miqdori quyidagicha aniqlanadi [14]:

$$Q = K_R 2\pi\tau(t_1 - t_2) \quad (3.25)$$

Issiqlik o'tkazish koeffitsienti K ni esa ushbu tenglamadan topiladi:

$$K_R = \frac{1}{1/(\alpha_1 r_1) + 1/\lambda + 2,3lg(r_2/r_1) + 1/(\alpha_2 r_2)} \quad (3.26)$$

bu yerda K_R – issiqlik o'tkazishning chiziqli koeffitsienti, $Vt/(m \cdot K)$.

K ning K_R dan farqi shundaki, K devorning yuza birligiga nisbatan olinsa, ikkinchisi K_R – truba uzunligining birligiga nisbatan olinadi [13, 14].

Kondensatsiya jarayonida issiqlik almashinishni jadallashtirish. Bir va ko'p komponentli bug'-gaz va qattiq fazali (mayda dispers) aralashmalarni kondensatsiyalash jarayonida issiqlik almashinishni jadallashtirish prof. Zokirov S.G. rahbarligidagi ilmiy guruh tomonidan o'rganilgan [15]. Issiqlik almashinishni jadallashtirish uchun 4.13 paragrafdagi [13] bayon qilingan konstruktsiyadagi trubalar o'rganilgan va tavsiya etilgan. Bu turdagi trubani qo'llash bir komponentli bug'larni kondensatsiyalash jarayonida issiqlik almashinishni tekis trubaga nisbatan issiqlik almashinishni 1,7 – 2,0 marotabaga oshiradi, chunonchi, atseton bug'lari uchun 1,4 – 1,7; ekstraktsion benzin bug'lari uchun 1,9 ni tashkil etadi. Eksperimental tadqiqotlar asosida samarador truba turbulizatorlarining joylashish qadami t/D ning kamayishi bilan issiqlik berish koeffitsiyenti ortib boradi. Xuddi shunday, d/D kattalikning kamayishi bilan issiqlik berish koeffitsiyenti α ham ortadi. Bunga sabab, mayda dispers qattiq mikrozarrahalar nisbatan sovuq devorga yopishishi, qo'shimcha

kondensatsiyalanish markazlari vazifasini bajaradi va oqibatda jarayon jadallashadi. Qattiq zarralarning konsentratsiyasi $s = 3 \div 3,5\%$ gacha kondensatsiya ortib boradi. Lekin, qattiq faza konsentratsiyasi bu ko'rsatkichdan ortganida uning ta'siri sekinlashadi va o'sishi to'xtaydi. Issiqlik almashinish yuzasining optimal o'lchamlari deb $t/D = 0,25$ qadam va $d/D = 0,88 \div 0,91$ halqasimon ariqchalar nisbiy diametri topildi [13].

Ko'p komponentli qattiq fazali bug'-gaz aralashmasining samarador trubada yupqa qatlamda kondensatsiyalanish jarayoni uchun quyidagi kriterial formula keltirib chiqarilgan:

$$Nu = 0,0216 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \left[\left(m \frac{t}{D} - n \right) \frac{d}{D} - b \right]$$

bu yerda koeffitsiyent $m = -1,895 \cdot c - 63,683$; $n = 0,434 \cdot c - 13,51$;
 $b = z \cdot (t/D) - \theta$; $z = -1,32 \cdot c - 56,324$; $\theta = 0,657 \cdot c - 9,24$.

Ushbu formula quyidagi rejimlar uchun o'rinli: Reynolds soni $Re = (1,2 \div 15) \cdot 10^3$; halqasimon ariqchalar nisbiy diametri $d/D = 0,88 \div 0,96$; ariqchalarning joylashish qadami $t/D = 0,25 \div 0,5$; bug'-gaz aralashmasida qattiq faza konsentratsiyasi $c = 0 \div 5,0\%$.

Formulaning xatoligi $\pm 12,8\%$.

IAA samaradorligini baholash. Mashina va apparatlarni energetik baholashda eksergetik foydali ish koeffitsiyentidan tashqari aralash eksergetik kriteriyalardan ham foydalanish mumkin: prof. Zokirov S.G. va dots. Karimov Q.F. tomonidan aralash eksergetik kriteriy taklif etilgan [16] va ushbu ko'rinishga ega bo'lib

$$f = \frac{F}{E''} \quad (3.27)$$

1 J/s eksergiyaga mos keluvchi issiqlik almashinish yuzasining maydonini bildiradi.

Issiqlik almashinish apparatlari uchun asosiy ko'rsatkichlardan biri – issiqlik almashinish yuzasi massa, gabarit o'lchamlar qatori termodinamik yoki iqtisodiy parametrlarga kirmaydi. Shuning uchun, aralash eksergetik kriteriyalardan foydalanish maqsadga muvofiqdir. Ammo (3.27) da keltirilgan formula amaliy hisoblashlarda qo'llash ancha noqulay. Muhandislik hisoblarida jarayon va qurilmalarni tahlil qilish va baholashda ushbu ko'rinishdagi formulani qo'llash tavsiya etiladi [16]:

$$f = \frac{F}{Q \cdot \tau_e} = \frac{1}{\alpha \cdot \tau_e (T' - T'')} \quad (3.28)$$

Aralash eksergetik kriteriy f 0 dan $+\infty$ gacha oraliqda o'zgaradi. $T \rightarrow T_{o.c}$, ya'ni $\tau_e \rightarrow 0$ da eksergetik kriteriy f nolga intiladi. Issiqlik oqimining temperaturasi atrof-muhit temperaturasiga tenglashganida, ya'ni $\tau_e = 0$ da, f kriteriyasi ma'noga ega emas. Issiqlik almashinish qurilmasining bunday termodinamik holati nol holat (inglizcha dead state) deb ataladi. Bu kriteriy eksergetik foydali ish koeffitsiyenti kabi ishonchli, chunki universal kattaliklarga taalluqlidir [16]. Energetik jihatdan maqbul issiqlik almashinish qurilma bu $-f$ kichik qiymatlarga ega bo'lganidir.

f kriteriyasidan foydalanishni sovitish mashinasi kondensatorini hisoblash misolida ko'ramiz. Kondensator gorizontal, "truba ichida truba" konstruktsiyali bo'lib, suv bilan sovutiladi [16].

Suv tekis truba ichida harakatlanadi, sovitish eltkichi trubaning tashqi yuzasida kondensatsiyalanadi. Suvning o'tish harakatlanish rejimda, chunki aynan shu rejimda issiqlik almashinishning intensivlashishi katta qiymatlarga ega.

Ma'lumki, issiqlik berish koeffitsiyentini ko'paytirish uchun devor yaqinida oqim harakatini intensivlash, ya'ni turbulizatsiyalash zarur. Buni esa trubani qovurg'alash, ariqchali turbulizatorlar qilish, burama trubalar va boshqa usullar qo'llab erishish mumkin.

Suvning apparatlarga kirishda temperaturalar $T_c' = 278, 288, 298$ K. Temperaturalarning minimal farqi $\Delta T_c = 5$ K.

Kondensatsiya jarayonida sovitish eltkichi uchun $T' - T''$ farq doim nolga teng. Formula (2) ni esa apparatda muhitlar temperaturalar vaqt bo'yicha o'zgargan holatda kondensatorlar uchun qo'llash mumkin.

Kondensatorning issiqlik yuklamasi Q_K ($Q_K = Q_c$). Bunday shartda E'' ning bir muncha katta qiymatlarini hosil qilamiz. Formula (3.28) da issiqlik berish koeffitsiyenti sovutuvchi eltkichga tegishli.

Atrof-muhit temperaturasi suvning kondensatorga kirish temperaturasiga teng. Eksergetik temperaturalar funktsiyasini hisoblashda T ni suvning o'rtacha arifmetik temperaturasiga teng qilib qabul qilamiz [16]:

$$T = \frac{T_c'' + T_c'}{2}.$$

Issqlik almashinish trubalar yuzalarining turli konstruksiyalari geometrik xarakteristikalarini va issiqlik berish koeffitsiyenti α ni hisoblash formulalari keltirilgan (3.2-jadval).

3.2 -jadval

Issiqlik almashinish trubalari

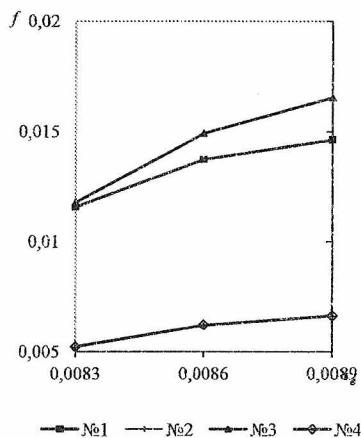
Truba №	Trubalar	Issiqlik berishni hisoblash formulasi	Geometrik parametrlari
1	tekis	$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_s}{Pr_d} \right)^{0,25}$	$d_{ichki} = 0,020m$
2	tashqarisi botiq ariqchali va ichki tomoni bo'rtiq diafragmali	$\frac{Nu}{Nu_{silliqlik}} = \left[100 \cdot \left(1 - \frac{d}{D} \right) \right]^{0,445}$	ariqchalarning nisbiy qadami $t/d = 0,5$, nisbiy diametri $d/D = 0,94$
3	plastina-spiral lentali	$\frac{Nu}{0,03 Re^{0,755}} = 2,2 + 2,33 \cdot \frac{2h}{d} - \frac{1,2 + 2,3 \cdot \frac{2h}{d}}{7,6 + 5 \cdot \frac{2h}{d}} \cdot \frac{H}{d}$	spiral-lentalar joylashish nisbiy qadami $H/d = 4$, nisbiy balandligi $2h/d = 0,4$
4	prujinali turbulizator	$\frac{Nu}{Nu_{silliqlik}} = 1,85 + 2,5 \frac{2h}{d} - \frac{0,85 + 2,5(2h/d)}{2,8 + 12,6(2h/d)} \cdot \frac{t}{d}$	prujinali turbulizator nisbiy qadami $t/d = 3,1$ va balandligi $2h/d = 0,435$

3.10-rasmda f ni τ_e ga bog'liqlik funktsiyasi orqali ko'rsatilgan. Eksperimental izlanishlar natijasidan ko'rinadiki, τ_e ni ortishi barcha issiqlik almashinish yuzalari uchun f ni ortishiga olib keladi. Demak, atrof-muhit temperaturasining pasayishi bilan birlik issiqlik almashinish yuzasidan

o'tadigan eksbergiya miqdori kamayadi, oqibatda qurilmaning unumdorligi pasayadi.

Bo'rtiq diafragmali va prujina turbulizatorli issiqlik almashinish yuzalarining nisbiy maydonlari teng va tadqiq qilingan trubalar ichida eksergetik eng unumdoridir. Termodinamik jihatdan eng past ko'rsatkichga – plastina-spiral lentali truba egadir. Ular uchun f , hatto, tekis trubalarnikiga qaraganda ham katta. Suvning kirish temperaturasi ortishi bilan plastina spiral lentali truba uchun f kriteriy qiymati kamayadi, tekis trubanikiga yaqinlashadi.

Samarador trubalarning gidravlik qarshiligi tekis yuzali trubalarnikiga qaraganda yuqoriroq. Shuni alohida ta'kidlash kerakki, gidravlik qarshiliklar tufayli eksergetik yo'qotishlar ulushi umumiy yo'qotishlarning juda kichik qismini tashkil etadi, qaytmas issiqlik almashinish tufayli eksergiya yo'qotuvlari ulushiga nisbatan oz miqdorni tashkil etadi.



3.10-rasm. Nisbiy yuzaning eksergetik harorat funksiyasiga bog'liqligi.
Chiziqlar belgilanishi 1-jadvaldagi trubalar raqamlariga mos

Ma'lumki, issiqlik almashinish apparatlarini loyihalashda issiqlik berish koeffitsiyentini hisoblash formulasini aniqlash yetarli.

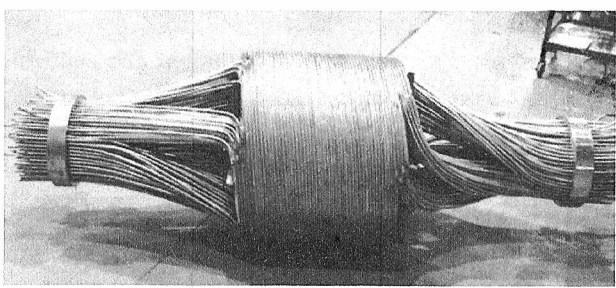
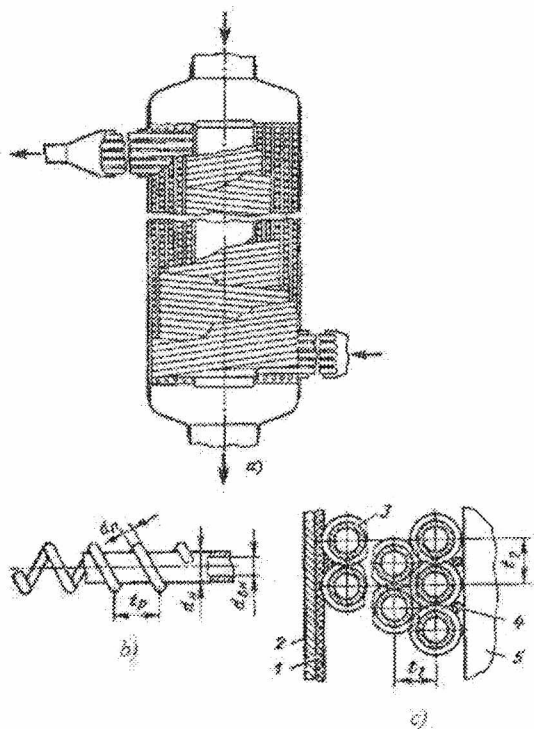
Unumdorlik kriteriyasi eksbergiya tushunchasiga asoslanadi va issiqlik almashinish apparatlarining unumdorligini aniqlash va termodinamik unumdor qurilmalarni loyihalashda qo'llash maqsadga muvofiq.

Hajm, uzunlik va boshqa parametrlarni optimallashtirishda yuqorida taklif etilganga o'xshash kriteriyalarni olish mumkin.

3.6. Trubkali issiqlik almashinish apparatlari

Truba o'ramli IAA o'rta va yuqori bosim havo ajratish qurilmalari (HAQ) da havoning to'g'ri oqimini teskari oqim bilan sovutish uchun, turli HAQ da suyuq mahsulotlar va flegmani o'ta sovutish uchun hamda boshqa kriogen qurilmalarida ishlatiladi. Truba o'ramli IAA da tashqi diametri $d_T = 5 \div 12$ mm va devor qalinligi $0,5 \div 2$ mm bo'lgan qovurg'ali mis trubkalar ishlatiladi. Kichik qurilmalarda (qayta ishlanuvchi havo sarfi soatiga atigi bir necha yuz metr kub bo'lgan) $5 \times 0,5$ mm bo'lgan (havo bosimi 7 MPa gacha) va $5 \times 1,0$ mm (havo bosimi 22 MPa gacha) bo'lgan trubkalar ishlatiladi. Kattaroq qurilmalarda o'lchamlari $8 \times 0,8$ va 10×1 bo'lgan (7 MPa gacha bosimlarda) trubkalar hamda $8 \times 1,5$ va 10×2 mm bo'lgan (22 MPa gacha bosimlarda) trubkalar ishlatiladi. Trubkalarni qovurg'alash ularga diametri $d_c = 1,6 \div 1,2$ mm bo'lgan mis simni $t_k = 5 \div 5,5$ mm qadam bilan zich o'rash bilan amalga oshiriladi. Teskari oqimni qobiq bilan oralig'idagi tirqishdan oqib chiqib ketish oldini olish uchun qobiqni bir oz konussimon qilib ishlanadi va yig'ishda trubka o'rami zich qilinib ustidan ftoroplast lenta o'raladi (3.11-rasm). Trubkalar birinchi qatori o'zakka o'ralishida yupqa plenkadan buklab yasalgan zichlovchi shnur ham o'raladi.

Shu bilan birga, o'ramni zichlashni soxta qobiq deb ataluvchi texnologik ancha ilg'or uslub ham qo'llaniladi. Yupqa ($0,25 \div 0,4$ mm) mis qobiqni spiralsimon qilib o'raladi va bir tomonini IAA tubi mahkamlanadigan chokka kavsharlanadi. IAA konstruksiyasining boshqa jihatlarida farq yo'q. Trubkalarni qator bo'yicha o'zakka qatlam qilib o'rab chiqiladi. qatorlarda trubkalar o'ramining qiyaligi navbatma-navbat o'zgartiriladi. Qovurg'alar tufayli qator orasida tirqishlar hosil bo'lgan, ulardan past bosimli teskari gaz oqimi harakatlanadi.



3.11-rasm. Truba o'ramli IAA.

a – sxematik qirqim; *b* – sim bilan qovurg'alangan trubka; *c* – o'ramning ko'ndalang kesimi (1 – fluoroplast lenta; 2 – qobiq; 3 – trubkalar; 4 – buklangan lentadan qilingan zichlovchi shnur; 5 – o'zak); *d* – o'ramning fotosurati

Trubkalar uchi kollektorlar to'riga kafsharlab mahkamlangan, trubkalar ichiga yuqori bosimli to'g'ri oqim beriladi. Agar o'ramli IAA suyuq mahsulot va flegmani o'ta sovutishga qo'llanilsa u holda trubkalar ichida, odatda, suyuqlik, trubalararo kenglikda – past bosimli gazsimon azot oqadi.

Uch oqimli o'ramli IAA da "truba ichida truba" konstruksiyasi qo'llanadi. Ichki, qovurg'alanmagan trubkada teskari oqim harakatlanadi (nasosda siqilgan kriomahsulotdan hosil bo'lgan). Siqilgan havo ichki trubka va tashqarisi qovurg'alangan tashqi trubkalar orasidagi halqasimon tirqishdan o'tadi. Past bosimli gaz teskari oqimi o'ramning trubalararo kengligiga kiradi.

3.7. Regeneratorlar

Regeneratorlar siqilgan havoni to'yinish haroratigacha sovutish va shu bilan birga uni quritish, karbonat angidrid va boshqa aralashmalardan tozalashga mo'ljallangan. Aralashmalarni muzlashi bilan birga ularni nasadkalar va qattiq cho'kmalar yuzasida adsorbtsiyalanishi yuz beradi. Natijada, regeneratorlarda portlovchan uglevodorodlarning kattagina ulushi va hatto havodagi kripton, ksenonning 10 % gacha qismi ushlanadi. Regeneratorlar o'z-o'zini to'la tozalash rejimida ishlaydi: gazning teskari oqimi "sovuq puflash" davrida aralashmalarni sublimatsiyalab, desorbtsiyalab olib chiqib ketadi. Bu aralashmalar "issiq puflash" davrida nasadka yuzasida suyuq va qattiq fazaga kondensatsiyalangan bo'ladi. O'z-o'zini tozalash rejimi oqimlar davri almashinganida (odatda, har 3÷9 minutda) siqilgan havo bosimi 1,4 MPa gacha bo'lganida yuzaga keladi. Bundan yuqori bosimlarda teskari oqim regenerator nasadkasi yuzasidan hamma aralashmalarni sublimatsiyalab olib chiqib keta olmaydi – regeneratorlarni "muzlashi" yoki "tiqilib qolishi" deb ataluvchi holat yuzaga keladi.

Regeneratorlarda alyumin gofri nasadkalar, maydalangan toshli (bazalt) nasadkalar ishlatiladi. Ikkinchi tur nasadkalar ishlatilganida apparat ichiga zmeevik ham o'rnatiladi, bu esa mahsulotlar bir qismini (qayta ishlanayotgan havoning 20÷40 % ni) quruq va sof holda olishga imkon beradi. Quruq va sof mahsulotlarning hajmiy ulushi texnik topshiriqda ko'rsatilishi lozim. Quruq mahsulotlarning ulushi maksimal bo'lsa HAQ ning barcha regeneratorlari ichki o'rnatilgan zmeeviklarga ega bo'lishi lozim. Kichik

qurilmalarda diametri 1,5 mm bo'lgan alyumin simdan tayyorlangan kalta prujinalar nasadka sifatida o'rnatilishi mumkin.

Almashinuvchan plastina-qovurg'ali IAA bilan taqqoslaganda regeneradorlar kamroq almashinish davriga ($3 \div 10$ marta) va ko'proq gidravlik qarshiliklarga ega, shuning uchun nisbiy energiya sarfi va harajatlarning energetik tashkil etuvchisi regeneradorli HAQ da plastina-qovurg'ali IAA li HAQ dagiga nisbatan $5 \div 8$ % ko'proq. Regeneradorlarning muhim amaliy ahamiyati – texnologik va konstruktiv soddaligi, ishlash muddatining ko'pligi, yuqori ishonchliligi, ayniqsa, yuqori darajada ifloslangan havo sharoitida. Regeneradorlar IAA lariga nisbatan arzon, shuning uchun regeneradorli HAQ da mahsulot birligiga to'g'ri keluvchi keltirilgan nisbiy harajatlar plastina-qovurg'ali qurilmadagidan atigi $2,5 \div 3$ % ga ko'p. Elektroenergiya narhi ortganida siqilgan havo yo'qotuvlarini va regeneradorlar gidravlik qarshiligini kamaytirish muhim masala kasb etadi. Ayrim hollarda ularni plastina-qovurg'ali IAA bilan almashtirish mumkin.

3.8. Plastina-qovurg'ali issiqlik almashinish apparatlari

Almashinuvchan (reversiv) IAA lari HAQ larida regeneradorlar funksiyasini bajarishi mumkin. Havo ularda to'yinish haroratigacha (101 K cha) sovutiladi va bir vaqtning o'zida namlik, uglerod dioksidi va qisman uglevodorodlardan tozalanadi. Havo harakatlanuvchi kanallar davriy ravishda (odatda, $20 \div 30$ min) sovuq teskari oqim bilan almashinib turadi, sovuq oqim havodan kondensatsiyalangan aralashmalarni sublimatsiyalab, bug'latib apparatdan olib chiqib ketadi. Bu kanallardagi ishchi jarayon disk nasadkali regeneradorlardagidan issiqlik havodan nasadkaga emas, balki devor orqali teskari oqimga berilishi bilan farqlanadi. Puflash (oqish) davrining kattaligi sababli jarayon kvazistatsionar holatga yaqinlashadi. Toza va quruq mahsulot olish uchun konstruksiyasi shunday, lekin kanallardagi oqimlar almashinmaydigan apparatlar ishlatiladi. Ulardagi issiqlik almashinish jadalligi bir hil, shuning uchun mahsulot oqimlaridagi issiqlik rekuperatsiyasining nomukammalligi apparatdan barcha aralashmalarni chiqarib tashlovchi azot oqimidagidan oshmaydi. Donador nasadkali zmeevikda harakatlanuvchi oqim rekuperatsiya nomukammalligi chiqindi oqim rekuperatsiya nomukammalligidan, taxminan, 2 barobar katta.

Almashinish davrining kattaligi siqilgan havoni kanallarga o'tkazishda yo'qolishlarini kamaytiradi. Almashinuvchan IAA regeneratlardan metall sarfi va termik unumdorligi jihatidan ustun; ular quruq va toza mahsulot olishni 3÷5 % ga oshirishga va qator hollarda azotsuv sovutish tizimidan voz kechishga imkon beradi. Plastina-qovurg'ali IAA bo'lgan qurilmalarni ishga tushirishda kamroq energiya sarflanadi va regeneratlarni bazalt bilan to'ldirib turishga ehtiyoj yo'q. Bunday qurilmalarni ishga tushirish davri regeneratli HAQ ga nisbatan taxminan 20 % ga kam. Bunday xislatlar ularni HAQ da ishlatishga chorlaydi.

Shu bilan birga almashinuvchan IAA ning konstruktiv tuzilishi murakkab va yasalishi qimmat, xizmat muddati kam. Ishlab chiqarish texnologiyasi murakkab va alyumin materiallarni teshikli zanglashi sababli ifloslangan havoda ishlash ishonchliligi kam. Bundan tashqari, almashinuvchan IAA li qurilmalarda oqimlarni har bir paket ichiga va parallel ulangan paketlar orasiga bir tekis taqsimlash qiyin. Paketlarga oqimlarni bir tekis taqsimlash uchun odatda, qo'shimcha armatura kerak bo'ladi. IAA issiqlik inertsiyasi kichikligi sababli harorat rejimini stabilashtirish sistemasidan yuqori sezgirlik va ishonchlilik talab etiladi, aks holda uglerod dioksidi rektifikatsiya qismiga tushishi mumkin. Almashinuvchan IAA ni HAQ da qo'llanilishini kengaytirish uchun konstruksiya va texnologiya bilan, ularni ishonchliligiga va xizmat muddati bilan bog'liq qiyinchiliklarni yengish kerak. Ayrim chet el firmalari reversiv IAA larni ishlatishdan voz kechishgan va HAQ da almashinmaydigan plastina-qovurg'ali IAA larini havoni kompleks adsorbtsion quritish va tozalash sistemalari bilan birga qo'llayaptilar. Tozalash sistemalari $T = 278 \div 290$ K da ishlagani uchun adsorberlar korpuslari oddiy uglerodli po'latlardan yasaladi.

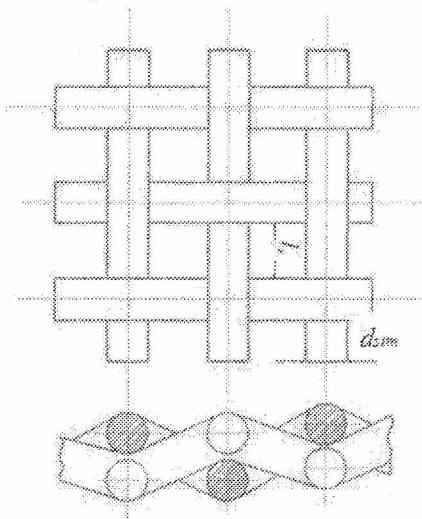
Nazorat savollari.

1. Trubka o'ramli issiqlik almashinish apparatining o'ziga xos tomonlari qaysilar?
2. Regenerativ IAA o'ziga xos tomonlari qaysilar?
3. Plastina-qovurg'ali IAA o'ziga xos tomonlari qaysilar?

3.9. Matritsali issiqlik almashinish apparatlari

Matritsali issiqlik almashinish apparatlarining asosiy konstruktiv elementi metall to'rdan iborat issiqlik almashinish yuzasidir (3.12-rasm). Ixcham

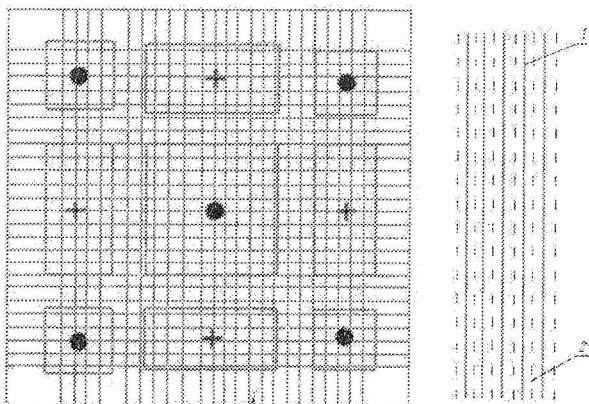
to'rsimon yuzalarni yasash oson bo'lgani uchun ularni nafaqat regeneratlarda, balki rekuperatlarda ham ishlatish mumkin.



3.12-rasm. To'rli nasadka

To'rsimon regeneratlarda nasadkasi to'rlar paketidan iborat. Paketlarni taxlashning ikki usuli mavjud: to'rlar bir-biriga tegib turuvchi zich (ideal) va zich bo'lmagan (g'ovakli) usul.

Matritsali issiqlik almashinish apparatlari zich paketlardan iborat bo'lib, paketlarning har biri galma-gal joylashtirilgan metall to'r va devorlardan yig'ilgan. Issiqlikni yomon o'tkazuvchi materiallardan tayyorlangan devorlarda oqim harakati uchun teshiklar ochilgan. Teshiklar shakli va joylashishi kanallarning kesimlari nisbatiga bog'liq. 3.13- rasmda oqimlar kesimining nisbati birga teng bo'lgan kvadrat kesimli issiqlik almashinish apparatining sxemasi ko'rsatilgan.



3.13- rasm. 1 – to‘r; 2 – oqim o‘tishi uchun teshikli to‘siq; + – to‘g‘ri oqim; • – teskari oqim.

O‘rganilgan to‘rlarning geometrik xarakteristikalarini 3.3-jadvalda keltirilgan, bunda ekvivalent diametr d_e , g‘ovaklilik ε_o va nisbiy yuza S_o ideal taxlash usuliga taalluqli.

3.3-jadval

to‘r raqami	sim diametri, d_s , mm	yacheyka o‘lchami, l_{ya} , mm	erkin hajmni paket to‘la hajmiga nisbati (g‘ovaklilik) ε_o , m^3/m^3	yuza maydonini paket to‘la hajmiga nisbati (ixchamlilik) S_o , m^2/m^3	ekvivalent diametr d_e , mm
004	0,03	0,04	0,66	44900	0,059
0071	0,055	0,071	0,665	24600	0,108
112	0,08	0,112	0,693	15400	0,18

G‘ovakli taxlash uchun d_e , ε_o , S_o lar paketning geometrik strukturasiidan kelib chiqib, quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\varepsilon = \frac{V_e}{V_T}, \quad S = \frac{4(1-\varepsilon)}{d_{sim}}, \quad d_e = \frac{4\varepsilon}{S}, \quad (3.16)$$

bu yerda V_e – erkin hajm; V_T – simli paketning to‘liq hajmi.

Regeneratorlar uchun

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_m}{\rho_n}, \quad (3.17)$$

bu yerda ρ_m – metall to‘r zichligi; $\rho_t = 4M/(\pi D^3 H)$ – nasadka zichligi; M , D , H – to‘r paketning, mos ravishda, massasi, diametr va balandligi.

To‘rsimon rekuperativ issiqlik almashinish apparatlari uchun

$$\varepsilon = 1 - \frac{\pi d_{sim}^2 \sqrt{(l_d + d_{sim})^2 + d_{sim}^2}}{2 (l_d + d_{sim})^2 (2d_{sim} + \delta)}, \quad (3.18)$$

bu yerda δ – prokladka qalinligi.

To‘rlari ideal taxlangan regeneratorlar uchun $Re = 10 \div 500$ da uzunlik bo‘yicha o‘rtacha issiqlik berish koeffitsientini aniqlash kriterial tenglamalari quyidagi ko‘rinishda:

$$H/d_e = 2 \div 200 \text{ uchun} \quad \overline{Nu} = 1,21 Re^{0,47} (H/d_e)^{-0,8/Re^{0,25}} \quad (3.19)$$

$$H/d_e \geq 200 \text{ uchun} \quad \overline{Nu} = 0,05 Re^{0,85} \quad (3.20)$$

Oqimning o‘rtacha arifmetik temperaturalar farqidan foydalanib uzatilgan issiqlik miqdori aniqlanadi.

G‘ovakli paketlar uchun issiqlik berish koeffitsienti idealnikidan birmuncha katta, shuning uchun uni (3.19) va (3.20) formulalardan aniqlash mumkin.

To‘rlari ideal taxlangan paket uchun va $H/d_e \geq 15 \div 20$ da qarshilik koeffitsienti

$$f = \frac{16,25}{Re} + \frac{2}{Re^{0,3}}. \quad (3.21)$$

G‘ovakli taxlangan paket uchun $H/d_e \geq 15 \div 20$ va $10 \leq Re \leq 40$ uchun qarshilik koeffitsienti quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$f = \frac{14,75}{Re^{0,74}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1,35}; \quad (3.22)$$

$40 < Re \leq 300$ uchun

$$f = \frac{4,75}{Re^{0,44}} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{1,35}. \quad (3.23)$$

(3.19) ÷ (3.23) formulalarda

$$Re = \frac{w_f d_{e0}}{\nu}, \quad (3.24)$$

bu yerda w_f – filtrlash tezligi (to‘r yacheykalaridagi oqimning tezligi); issiqlik-fizik xossalar oqimning o‘rtacha temperaturasi bo‘yicha aniqlanadi.

Bosimning apparatda yo'qolishi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\Delta p_y = \xi \frac{\rho w^2 L}{2 d_e} \quad (3.25)$$

yoki

$$\Delta p_y = f \frac{\rho w^2 F}{2 S} \quad (3.26)$$

bu yerda ξ , f – ishqalanish tufayli qarshilik koeffitsienti, ishqalanish va oqim inersion kuchlar nisbatini ifodalovchi koeffitsient.

To'rsimon rekuperativ issiqlik almashinish apparatlarini hisoblashda (3.19) ÷ (3.23) formulalardan foydalaniladi, d_e , ε , S kattaliklarning haqiqiy qiymatlari qo'yiladi.

3.10. Issiqlik almashinish apparatlaridagi ikkilamchi effektlar

Issiqlik almashinishning samaradorligiga ta'sir etuvchi ikkilamchi effektlar deyilganida, real issiqlik almashinish apparatlarining konstruktiv jihatlari, ekspluatatsiya sharoitlari hamda ularni yasash texnologiyalari natijasida yuzaga keluvchi omillar tushuniladi. Ikkilamchi effektlarga IAA lari devorlari uzunligi bo'yicha yo'nalgan bo'ylama issiqlik oqimi va sarfning kanallar bo'yicha notekisligi tushuniladi. IAA da uzunlik bo'yicha issiqlik oqimining mavjudligi temperatura maydonini o'zgartiradi, natijada issiqlik elituvchilarning temperaturalar farqi o'rtacha va mahalliy qiymatlari o'zgaradi. Bunda IAA samaradorligi kamayadi.

Atrof muhitdan issiqlik oqimining kelishi ham temperaturalar maydonini o'zgartiradi va shu orqali apparatda issiqlik almashinishiga salbiy ta'sir etadi. Issiqlik elituvchilar sarfining kanallar bo'yicha yoki harbir kanal kesimi bo'yicha notekisligi ham hisobiy temperaturalar maydonini o'zgarishiga, demakki, IAAda issiqlik almashinishning yomonlashuviga olib keladi [1].

Sanab o'tilgan ikkilamchi effektlarni bir-biriga bog'lanmagan deb qarab, har birining ta'sirini ko'rib chiqamiz.

Uzunlik bo'yicha yo'nalgan issiqlik oqimi. Bu issiqlik oqimi kanallar devorlarining ekvivalenti ssiqlik o'tkazuvchanligiga λ , devorlar ko'ndalang kesim maydoniga f_d , IAA issiq va sovuq uchlari temperaturalar farqiga to'g'riproporsional va kanallar uzunligiga (balandligiga) teskariproporsional. Kalta uzlukli qovurg'aga ega bo'lgan plastina-qovurg'ali apparatlar uchun bo'ylama issiqlik oqimining asosiy ulushi kanallarni ajratuvchi plastinaga to'g'rikeladi. Agar qovurg'a uzun bo'lsa, bo'ylama issiqlik oqimining bir

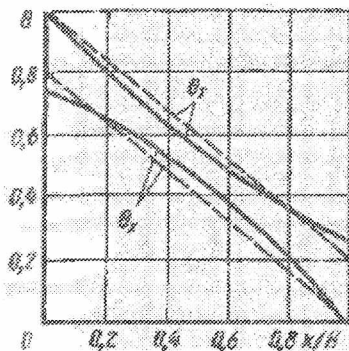
qismi ularga ham to'g'rikeladi. Matritsali IAAda bo'ylama issiqlik oqimining deyarli hammasi kanallar devorlariga to'g'rikeladi; devorlar murakkab konstruksiyaga ega bo'lib, to'rlar yoki perforatsiyalangan plastinalar qatlamidan, prokladka va kleydan iborat. Bunday qatlamli devorning ekvivalenti ssiqlik o'tkazuvchanligi quyidagi formuladan aniqlanishi mumkin [1]:

$$\lambda_e = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n (\delta_i / \lambda_i)} \quad (3.27)$$

bu yerda δ_i —qatlam qalinligi; λ_i —qatlam materialining issiqlik o'tkazuvchanligi.

Matritsali IAAda kanallar o'rtasidagi devorlar qalinligi ancha katta ($B = 3 \div 5\text{mm}$), ammo kichik λ_e tufayli devorlarga yo'nalgan issiqlik oqimining qiymati kichik, elimlangan matritsalar uchun $\lambda_e = 0,2 \div 0,8 \text{ Vt/(m}\cdot\text{K)}$. Plastina-qovurg'ali apparatlardagi ajratuvchi plastinalar uchun λ_e ning qiymati shu plastinalar materiali issiqlik o'tkazuvchanligiga teng, lekin ushbu plastinalar qalin emas ($\delta_p = 0,2 \div 0,5$). Trubka o'ramli apparatlarda misdan yasalgan rubkalar katta issiqlik o'tkazuvchanlikka ega, lekin trubkalar, odatda, ancha uzun va shuning uchun ularga yo'nalgan issiqlik oqimi katta emas. To'g'ri, qisqa trubali apparatlarda va sim qovurg'ali o'ramli apparatlarda bu omil ancha sezilarli.

Bo'ylama issiqlik oqimining ta'siri natijasida oqimlar o'rtasidagi temperaturalar farqi apparat o'rtasida kamayishi, chekkasida esa ortishi mumkin. Natijada, uzunlik bo'yicha (bo'ylama) issiqlik o'tkazuvchanlik bo'lmagan apparatga nisbatan sovuq oqim apparatdan to'liq isimay, issiq oqim esa — to'liq sovimay chiqadi (3.14-rasm). Bu holda oqimning apparatdan chiqishidagi berilgan temperaturaga, demakki, loyiha samaradorligiga erishish uchun issiqlik almashinish yuzasini oshirish lozim [1].



3.14-rasm. Qarama-qarshi oqimli IAA da issiq va sovuq oqimlar temperaturalarini bo'ylama issiqlik o'tkazuvchanlikka bog'liqligi (---
 $\lambda^* = 0$; $\lambda^* \neq 0$)

Atrof muhitdan keluvchi issiqlik oqimi. Issiqlik oqimini q_a atrof muhitdan IAAGA kelishi ham issiqlik tashuvchilar oqimlari temperaturalarining apparat balandligi bo'yicha va undan chiqishdagi taqsimlanishiga ta'sir ko'rsatadi. IAA keluvchi issiqlik oqimi uning tashqi yuza o'lchamlariga, izolyasiya sifatiga va apparat bilan atrof muhit temperaturalari o'rtacha farqiga bog'liq. Issiqlik oqimi IAAning samaradorligini kamayishiga olib keladi [1].

Notekis sarf. Bu oqimning salbiy ta'siri ko'p jihatdan IAA turiga, uning konstruksiyasiga va uzatish hamda olish kollektorlari konstruksiyalariga bog'liq. Qarama-qarshi oqimli apparat kanallaridagi sarfning hatto kichik (bir necha protsent) notekisligi uning samaradorligini sezilarli kamaytiradi. Masalan, agar qarama-qarshi oqimli ikki kanalli apparatda sarf notekisligini ΔW suv ekvivalentligi orqali $W = Gc_p$ aniqlasak, u holda

$$\Delta W = \frac{W_{max} - W_{min}}{W_{max} + W_{min}} \quad (3.28)$$

Sarf notekisligi $\Delta W = 10\%$ bo'lgan apparatning samaradorligi 64% ga kamayadi. Shu sababdan trubalar uzunligi, masalan trubkali apparatlarda, 10% dan katta qiymatga farqlanmasligi lozim, bunda turbulent rejim uchun kanallardagi sarflar notekisligi taxminan 5%, chunki $w_1/w_2 = (L_1/L_2)^{0.5}$. Bunday notekislikning apparat samaradorligiga ta'siri trubalar soniga bog'liq. Trubalarning soni ortishi bilan kanaldagi sarf notekisligining apparat samaradorligiga salbiy ta'siri kamayib boradi.

Plastina-qovurg'ali va matritsali IAAda sarfning kanallar bo'yicha notekisligi bilan birga birkanalda sarf notekisligi yuzaga keladi. Birkanalning o'zidagi sarf notekisligi unga kirishdagi oqim tezlik maydonining notekisligidan yuzaga keladi va kollektorlar, taqsimlagichlar, issiqlik almashinish yuzalari konstruksiyalariga, IAAning nisbiy o'lchamlariga: kanallar balandligi (uzunligi) H/L , taqsimlagich kengligi b/L , issiqlik almashinish yuzasi anizotropiya koeffitsienti $f = f_y/f_x$ bog'liq. Bu yerda f_y va f_x qovurg'alarni ko'ndalang va uzunasiga yuvib o'tishdagi qarshilik koeffitsientlari. Uzlukli plastina-qovurg'ali yuzalar uchun $f = 20 \div 200$ [1].

Matritsali IAA o'ziga xos jihati – kichik anizotropil koeffitsientidir. Masalan, listli to'r uchun $j = 0,16$. Mahsus tadqiqotlarning ko'rsatishicha, oqimlar to'liq frontal yoki yontomondan berilganida tezlik epyurasi tezda tekislanadi va matritsada to'rlarning tahminan 5-qatlamidan boshlab oqim tekislanadi. Tezlik maydoni ham matritsa kanallaridan chiqishda shunday tekislanadi. Agar matritsa bir nechta o'n yoki yuz qatlamdan iborat bo'lsa, matritsaning asosiy qismida oqim kanallar bo'yicha tekislanib bo'ladi.

Matritsali IAA kanallari bo'yicha issiqlik elituvchilar oqimlarining taqsimlanish tekisligi, ko'p jihatdan, ularni yasash texnologiyasiga, ya'ni kanallar shakl va o'lchamlarini nominaliga yaqin qilib saqlab qolinishiga bog'liq. Nominal o'lchamlardan eng kam farqlanuvchi matritsalar diffuzion payvandlash usuli bilan yasaladi. Yelimlangan IAA konstruksiyalarida kesim o'lchamlari sezilarli katta farqlanadi. Bunga sabab shuki, prokladkaga surtilgan elimqatlami yoki elim plyonkasining o'zi turli qalinlikka ega. Matritsani tayyorlash jarayonida u siqilganida ortiqcha elim kanal ichiga oqib kirib, uning shaklini o'zgartiradi. Mahsus tadqiqotlarning ko'rsatishicha, kengligi $A \geq 10\text{mm}$ bo'lgan kanallarda bunday o'zgarishlar sezilmaydi; $10 > A \geq 5\text{mm}$ li kanallarda – seziladi, $A < 5\text{mm}$ li kanallarda esa ortiqcha elim kanal shaklin juda katta o'zgartiradi. Shuning uchun elimlab tayyorlangan matritsali IAA da kanalkengligini $A < 5\text{mm}$ qilish tavsiya etilmaydi. Elimlash texnologiyasiga qatt'iy rioya qilinganida sarfning kanallar bo'yicha notekisligi $\pm 2,5\%$ oshmasligi mumkin. Bunda apparatning real FIK 0,98 ga teng. Kichik samaradorlikli ($\varepsilon < 0,7$) apparatlar uchun sarf notekisligining 40% gacha bo'lishi ularning samaradorligiga amalda ta'sir etmaydi [1].

Shunday qilib, ikkilamchi effektlar salbiy ta'sirini minimalga keltirish IAA konstruksiyalarini mukammallashtirish bilan bog'liq. Xususan, apparatlar o'lchamlarini (hajmini) ratsional kamaytirish lozim. Kichik o'lchamli apparatlar, boshqa teng sharoitlarda, kichik issiqlik oqimiga ega bo'ladilar. Apparatlar ko'ndalang kesimini o'lchamlarini minimallashtirish bo'ylama issiqlik oqimini kamaytiradi va sarf notekisligining ta'sirini kamaytiradi.

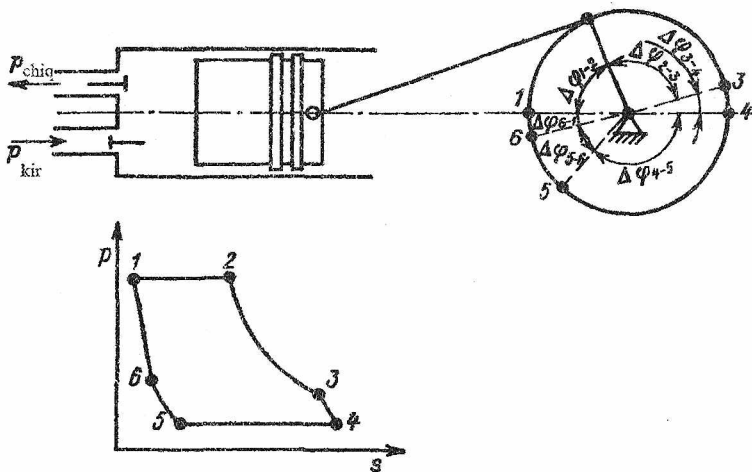
Apparat o'lchamlari, asosan, issiqlik almashinish yuzasining xarakteristikallari bilan aniqlanadi. IAAning kichik o'lchamlarini ta'minlovchi yuzalarni samarador deb hisoblanadi. Issiqlik almashinish yuzalarining samaradorligini baholash uchun nisbiy hajmiy ko'rsatgichdan $\bar{V} = V/V_b$ foydalanish mumkin. Frontal kesimdagi yuza nisbiy maydonini $\bar{F}_f = F_f/F_{fb}$ e'tiborga olib issiqlik almashinish yuzalarining samaradorligini \bar{V} ko'rsatgich bo'yicha baholash loyihalayuvchi apparat hajmini minimallashtirish imkonini beradi hamda ikkilamchi ta'sirlarni kamaytiruvchi gabarit o'lchamlar zaruriy proporsiyasini ta'minlaydi.

Agar ikkilamchi effektlar samaradorligini sezilarli kamaytirmasa, bunday ta'sirni issiqlik almashinish yuzasini, ya'ni IAA balandligini (uzunligini) oshirish bilan kompensatsiyalash mumkin. Hisob ishiga bunday tuzatish kiritishni samaradorlikni kamaytiruvchi har bir ikkilamchi effekt bo'yicha amalga oshirish kerak. Bunda biror faktor bo'yicha kiritilgan tuzatish boshqa faktor ta'sirini IAA samaradorligiga sezilarli kamaytirishi yoki hatto yo'qqa chiqarishi mumkin.

4-bob. 4.1. Porshenli detanderlar

Porshenli detanderlar – hajmiy issiqlik mashinasi bo'lib, unda porshenning harakati sababli silindrda krioagent davriy kengayadi. Siqilgan gazning energiyasi mexanik ishga aylanadi, krioagent entalpiyasi kamayadi [17].

Porshenli detander ichida harakatlanish mexanizmi silindr va porshen bo'lgan hamda ishchi jarayonni boshqaruvchi gaz taqsimlash mexanizmidan, kartyerdan iborat. Mashinaning harakati krioagentni silindrga to'ldirish, ish bajarib kengayish, chiqarish va qoldiq krioagentni siqishdan iborat. Valning har bir to'liq aylanishida ketma-ket takrorlanuvchi bu jarayonlar to'plamini porshenli detander (PD) sikli deb ataladi.



4.1-rasm. Porshenli detander sxemasi

PD siklining jarayonlarini ko'rib chiqamiz. Porshen yuqori chekka holatga yaqinlashganida kiritish klapani 6 nuqtada ochiladi (4.1-rasm), shunda p_k yuqori bosimli gaz foydasiz hajmni to'ldiradi, silindr va truboprovodda bosimlar tenglashadi (6 – 1 jarayon). Porshen yo'lining bir qismida kiritish klapani ochiq qoladi va silindr gazga to'ladadi (1 – 2 jarayon). 2 nuqtada kiritish klapani yopiladi va silindrga qamalgan gaz hajmining kengayishi natijasida porshen harakati bilan krioagentning zichligi, bosimi va temperaturasi kamayadi. 3 nuqtada chiqarish klapani ochilib, silindr va chiqarish truboprovodidagi bosimlar tenglashadi. 3 – 4 jarayon o'tilib chiqish jarayoni deb ataladi. Porshen qaytish yo'lining bir qismida chiqarish klapani ochiq qoladi va itariladi (4 – 5 jarayon). 5 nuqtada chiqarish klapani berkiladi va silindrda qolgan krioagent (gaz) 6 nuqtadagi bosimgacha siqiladi [17].

PD sikli doimiy yoki o'zgaruvchan massa bilan kechuvchi termodinamik jarayonlar ketma-ketligidan tashkil topgan.

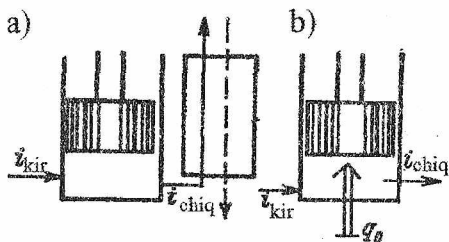
PD siklini gaz taqsimlash organlari boshqaradi, ular majburiy harakat klapanlarini va klapanlarni boshqarish mexanizmini o'z ichiga oladi. Porshenning ma'lum holatida majburiy harakat klapanlari ochiladi. Gaz bosimining farqi tufayli ochilib-yopiluvchi, o'zi harakatlanuvchi klapanlar detanderlarda qo'llanilmaydi, chunki ishchi jarayonning xususiyati shundayki, klapani ochish yoki yopish imkonini bermaydi, zero kiritish

truboprovodidagi bosim silindrdagidan, silindrdagi bosim esa chiqarish truboprovodidagidan doim katta. Ammo Leningrad sovetlash sanoati texnologik institutidagi tadqiqotlardan ma'lumki, yuqori bosim detanderida o'zi harakatlanuvchi klapanlarni qo'llash mumkin. Porshenli detander gaz taqsimlash mexanizmining vazifasi optimal rejimni ta'minlash va krioagent sarfini rostlashdan iborat.

Gaz taqsimlash usuliga ko'ra porshenli detanderlarni uch guruhga bo'lish mumkin: klapanli (kiritish va chiqarish klapaniga ega), klapansiz (kiritish va chiqarish darchasiga ega) va kommunikatsiyalashgan (majburiy yoki o'zi harakatlanuvchi kiritish klapanli va chiqaruvchi darchali yoki buning aksi).

Klapan yuritmasining konstruksiyasiga ko'ra kengaytirish mashinalari klapanlari tashqi va ichki yuritmalari detanderlarga ajratiladi. Birinchi turdagi detanderlarda klapanlar harakati aylanayotgan tirsak valdan yuritiluvchi maxsus mexanizm orqali ta'minlanadi. Ikkinchi turdagi detanderlarda klapanlar maxsus qurilma orqali porshen bilan harakatga keltiriladi. Klapan yuritmasida elektromagnit qo'llaniluvchi, yuritmani boshqarish esa mikroprotessor bilan amalga oshirilishi ham mumkin.

PD ishlash jarayonida mexanik energiya paydo bo'ladi, undan foydalanish lozim. Energiyani elektrogenerator orqali tarmoqqa uzatish keng tarqalgan. Lekin ishini krioagentni siqishga (detander-kompressor), suyuqlikni uzatishga sarflovchi mashinalar ham mavjud. So'nggi vaqtlarda detanderlardagi energiyadan elektromagnit tormozlarda foydalanilyapti [17].



4.2-rasm. "Adiabatik" va "noadiabatik" porshenli detanderlar

Detanderlarni past harorat qurilmalarida ishlatishning keng tarqalgan turi – uni tashqi adiabatik mashina sifatida qo'llanilishidir (detanderlarda kengayish jarayoni minimal issiqlik berish bilan kechadi; bu issiqlik ishqalanish va atrof-muhitdan issiqlik kelishi bilan ifodalanadi). Sovutiluvchi

ob'ektlardan issiqlik olinishi mashinadan keyingi issiqlik almashinish apparatida amalga oshiriladi (4.2, a-rasm). Bunday mashinalar shartli ravishda "adiabatik" yoki "tashqi adiabatik" deb nomlanadi. Shu bilan birga, agar sovutiluvchi ob'ekt o'zgarimas termostatlash haroratiga ega bo'lsa, ob'ekt va krioagent o'rtasidagi haroratlar farqi katta bo'ladi. Shuning uchun detanderdagi kengayishni izotermik holga yaqinlashtirish maqsadga muvofiqdir; bu ob'ektdan issiqlikni silindr devorlari orqali olish bilan amalga oshiriladi. Bunday detanderlar "adiabatik" deb ataladi.

Termodinamik tahlilning ko'rsatishicha, haroratlar darajasi $15 \div 30$ K bo'lganida "noadiabatik" detanderlarni qo'llanilishi kriostatlash qurilmalarining samaradorligini 20% ga oshiradi. Lekin shuni ta'kidlash kerakki, noadiabatik PD amaliyotga tatbiq etilmagan. Bunga sabab shuki, detander silindrining ichki yuzasi cheklangan, issiqlik berish koeffitsienti ham ma'lum qiymatga $\alpha = (0,5 \div 3,0)$ kVt/(m²·K) ega. Issiqlik berish maksimal koeffitsientining kiritish va to'lish jarayonlariga tegishli, bu oqimni turbulizatsiyalanishi va katta zichligi bilan bog'liq. Krioagentga issiqlik berish esa siqib chiqarish va qayta siqish jarayonlarida issiqlik berish kichik koeffitsientlari bilan ro'y beradi. Demak, silindr devorlari orqali katta issiqlik yuklamalarini uzatish uchun ΔT ni, ya'ni qaytmas yo'qotuvlarni oshirish kerak bo'ladi. Issiqlik almashinishni jadallatirish va silindr ichki yuzasini oshirish choralari ijobiy natijalar bermagan. Shu sababdan "noadiabatik" detanderni porshenli detanderga xos bo'lmagan juda kichik issiqlik yuklamalarida va silindrning shunga mos o'lchamlarida amalga oshirish mumkin.

Shu bilan birga, "noadiabatik" detanderlarga kengayish jarayonida kondensatsiya yoki kristallizatsiya issiqligi ajralib fazaviy o'zgarish sodir bo'ladigan mashinalarni kiritish mumkin [17].

Zamonaviy PD da ishchi jarayon gaz oblastida sodir bo'lishi mumkin, bunda krioagent o'z fazaviy holatini o'zgartirmaydi. Jarayon nam bug' oblastida sodir bo'lganida esa, kengayish jarayonida krioagent fazaviy o'zgarib, mashinadan chiqishda qisman kondensatsiyalanadi. Bunday PD kriogen qurilmalarida drossel o'rnida qo'llanadi va "nambug'", "gaz – suyuqlik" yoki "ikki fazali" detanderlar deb ataladi.

PORSHENLI DETANDERLAR	Krioagent xossasi bo'yicha	Havoli
		Geliyli
		Vodorodli
	Haydash bosimi bo'yicha	Yuqori bosimli $p > 10$ Mpa
		O'rta bosimli $1 < p < 10$ Mpa
		Past bosim $p < 1$ Mpa
	Krioagentning fazaviy holati bo'yicha	Bir fazali (gazli)
		Ikki fazali (nam bug'li)
	Gaz taqsimlashni tashkil qilish bo'yicha	Klapanlarning tashqi yuritmasi
		Klapanlarning ichki yuritmasi
		Klapansiz
		Elektromagnit klapanli
	Mexanik energiyani olish bo'yicha	Elektrogenerator
		Kompressor
		Nasos
		Magnit suyuqlik
Tsilindr o'qini joylashuvi bo'yicha	Vertikal	
	Gorizontal	

4.3-rasm. Porshenli detanderlarning turlari

PD da ko‘pincha quyidagi krioagentlar ishlatiladi: havo, geliy, vodorod va boshqalar. Qayd etish lozimki, har qanday krioagent uchun ishchi jarayon bir xil bo‘lsa ham, ishchi jism xossalari mashina konstruksiyalarida sezilarli farq bo‘lishiga sabab bo‘ladi. 4.3-rasmda PD turlari keltirilgan.

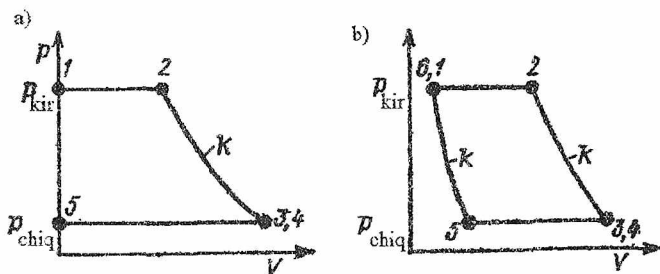
4.2. Porshenli detanderlarning ish ko‘rsatgichlari, aniqlanuvchi parametrlar

Porshenli detander silindrining ishchi hajmi porshen yuzasining maydonini F uning yo‘liga S ko‘paytmasiga teng $V_p = \frac{\pi D^2}{4} S$, bu yerda D – porshen diametri. Porshenning yuqorigi va quyi chekka holatlaridagi silindrning ishchi hajmi “foydasiz hajm” deb V_f ataladi, u porshen va silindr qopqog‘i o‘rtasidagi hajmdan hamda silindr bilan porshen, zichlovchi elementlar orasidagi kanallar hajmlaridan iborat.

$a = V_f/V_p$ o‘lchamsiz kattalik nisbiy foydasiz tenglik deb ataladi. Porshenning harakatlanishida silindr ishchi kengligining hajmi va krioagentning termodinamik parametrlari, jumladan bosimi o‘zgaradi. Krioagent bosimining porshen holatiga yoki ishchi kenglik hajmiga grafik bog‘liqligi indikator diagramma deb ataladi. Odatda, absissa o‘qi bo‘yicha porshen yo‘li, ordinata o‘qi bo‘yicha esa PD silindridagi krioagent bosimi qo‘yiladi [17].

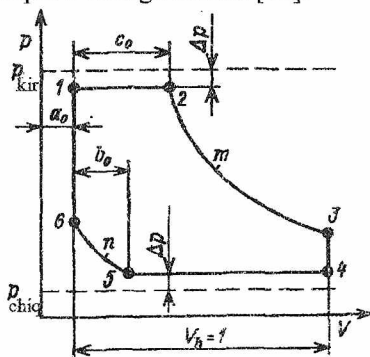
Real detander silindridagi bosimni porshen ko‘chishiga bog‘liqligi haqiqiy indikator diagramma deb ataladi. U faqatgina ishlayotgan mashinada eksperiment o‘tkazish bilan olinishi mumkin. Haqiqiy indikator diagrammani ma’lum darajadagi xatolik bilan PD dagi ishchi jarayonni matematik modellashtirish natijasida olish mumkin [17].

Ideal detander – qaytnas yo‘qotuvlar bo‘lmagan porshenli detanderning soddalashtirilgan modelidir. Ideal detander modeli klapanlarda gidravliki o‘qotuvlar va silindr devori bilan issiqlik almashinish bo‘lmagan hol uchun qabul qilingan. Foydasiz hajmlar nolga teng bo‘lishi mumkin, bu holda indikator diagramma o‘z ichiga gaz bilan to‘lish 1 – 2; izoentropik kengayish 2 – 3 va kengaygan gazni silindrdan chiqarish 4 – 5 jarayonlarini o‘z ichiga oladi. Gazni otilib chiqish, teskari siqish va foydasiz hajmni to‘ldirish jarayonlari 4.4,a-rasmda ko‘rsatilmagan.



4.4-rasm. Ideal porshenli detanderlar indikator diagrammalari: $a - a_0 = 0$; $b - a_0 \neq 0$

Foydasiz hajm mavjud bo'lsa, PD ideal indikator diagrammasida teskari siqish izoentropik jarayoni $5 - 6 - 1$ paydo bo'ladi (4.4, b-rasm). Qayd etish lozimki, ideal indikator diagramma haqiqiydan ancha farq qiladi. Shuning uchun detanderni hisoblashda oddiy termodinamik munosabatlarni qo'llash va detander uchun o'rinni bo'lgan ma'lum xatolikli natijalarni olish mumkin bo'lishi uchun barcha jarayonlarni soddalashgan tarzda qabul qilinadi. Bunday diagrammani nazariy deb atash mumkin. 4.5-rasmda nazariy indikator diagramma ko'rsatilgan. PD ning hisobiy yoki nazariy diagrammasi amaliyotda haqiqiy ishchi jarayonga yaqinlashuv sifatida qo'llaniladi. Unda foydasiz hajm, klapanlardagi gidravlik qarshilik, foydasiz hajmni to'ldirish $6 - 1$ va gazni otilib chiqish $3 - 4$ jarayonlari oniy (adiabatik) deb qaraladi, ishchi jismni tirqishlardan sizib chiqishi va issiqlik almashinishning siqish, kengayish jarayonlariga ta'siri teskari siqish hamda kengayish jarayonlarini m , n politropik parametrlar bilan approksimatsiyalash orqali e'tiborga olinadi [17].



4.5-rasm. Porshenli detanderning hisobiy-nazariy diagrammasi

Soddalashtirish uchun kriogent bilan to'ldirish va siqib chiqarish jarayonlarini shartli ravishda o'zgarmas bosimlarda kyyyyechadi deb qabul qilinadi p_1, p_4 :

$$p_1 = p_{kir} - \Delta p_{kir} \quad (4.1)$$

$$p_4 = p_{chiq} + \Delta p_{chiq} \quad (4.2)$$

bu yerda $\Delta p_{kir}, \Delta p_{chiq}$ – kriogentning klapan orqali oqish o'rtacha tezligiga bog'liq bo'lgans o'rish va haydash klapanlaridagi o'rtacha bosim yo'qotuvlari.

Kriogen qurilmasining biror joyidagi bosimlar nisbati $\sigma' = p_{kir}/p_{chiq}$ PD silindridagi bosimlar nisbatidan $\sigma = p_1/p_4$ mashina klapanlaridagi bosim yo'qotuvlari sababli katta bo'ladi.

To'ldirish 1 – 2 va teskari siqish jarayonlarini ifodalash uchun o'lchamsiz kattaliklar kiritamiz:

$$c_o = \frac{v_2 - v_f}{v_h}; \quad b_o = \frac{v_5 - v_f}{v_h}. \quad (4.3)$$

Bu parametrlar 0 ÷ 1 oraliqda o'zgarishi mumkin. Masalan, agar $c_o = 0$ bo'lsa, diagrammada to'lish jarayoni, agar $c_o = 1$ bo'lsa, u holda kengayish jarayoni 2 – 3 aks etmaydi; $b_o = 0$ da – teskari siqish jarayoni sodir bo'lmaydi. Shunday qilib, c_o, b_o variatsiyasi porshenli detanderning turli indikator diagrammalarini aks ettiradi [17].

Kengayish jarayonida (2 – 3) bosimlar nisbati quyidagicha aniqlanadi:

$$\sigma_{2-3} = \frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{1+a_o}{a_o+c_o} \right)^m \quad (4.4)$$

va teskari siqishda

$$\sigma_{5-6} = \frac{p_5}{p_6} = \left(\frac{a_o+b_o}{a_o} \right)^n \quad (4.5)$$

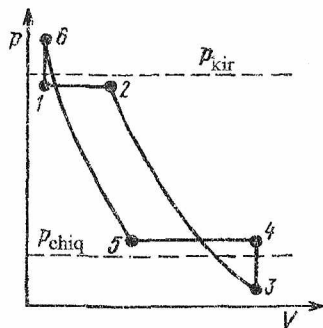
Normal indikator diagrammada $\sigma_{2-3} \leq \sigma, \sigma_{5-6} \leq \sigma$. Parametrlarning bu cheklovlari c_{omin} va b_{omax} larning chegaraviy qiymatlarini belgilaydi. $\sigma_{2-3} = \sigma$ shartdan

$$c_{omin} = (1 + a_o)/\sigma^{1/m} - a_o, \quad (4.6)$$

$\sigma_{5-6} = \sigma$ shartdan esa

$$b_{omax} = a_o(\sigma^{1/n} - 1) \quad (4.7)$$

ni olamiz.



4.6-rasm. Anomal diagramma

a_o ning berilgan qiymatida c_{omin} va b_{omax} lar “normal” indikator diagramma hududini anomal diagrammadan ajratadi. Masalan, $c_o < c_{omin}$ da $\sigma_{2-3} > \sigma$, $b_o > b_{omax}$ da esa $\sigma_{5-6} > \sigma$, indikator diagramma 4.6-rasmdagidek tasvirlanadi. Detanderga kirish va chiqishda “sirtmoqlar” ning mavjudligi sarfni kamaytirishga, krioagent entalpiyasini ortishiga, ya’ni sovutish unumdorligini kamayishiga olib keladi. Shuning uchun ekspluatatsiya davomida bunga o’xshash sirtmoqlar paydo bo’lishi oldini olish va gaz taqsimlanishini rostlash kerak [17].

PD da krioagent sarfini indikator diagramma bilan bog’liqligini ko’rib chiqamiz. 2 nuqtada to’lish jarayoni tugashi bilan mashinaning ishchi kengligida M_2 massali gaz yig’iladi, 5 nuqtada haydash klapani yopilishi bilan ishchi kenglikda M_5 massali gaz qoladi. Demak, agar massaviy yo’qotuvlar e’tiborga olinmasa, u holda bir ishchi siklda haydash truboprovodiga o’tgan gaz massasi

$$M_{ts} = M_2 - M_5$$

$$\text{bu yerda } M_2 = V_h(a_o + c_o)\rho_2; \quad M_5 = V_h(a_o + b_o)\rho_5.$$

Detander ish siklining kechish vaqti

$$\tau_o = 1/n,$$

bu yerda n – aylanishlar chastotasi, s^{-1} .

Shunday qilib, detanderdagi sarfni quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$m = V_h n [(a_o + c_o)\rho_2 - (a_o + b_o)\rho_5]. \quad (4.8)$$

PD ning konstruktorlik hisobida V_h (4.8) formuladan aniqlanadi. Porshen diametri va yo’lini aniqlash uchun S/D nisbat kiritilishi lozim. ДВД-9, ДВД-11, ДВД-13 havo ajratish qurilmalarida porshenli detanderlarning S/D

parametrlari mos ravishda 4,0; 4,6; 3,2. Diametрни kamaytirish bilan porshen yo‘lini oshirishga intilishni shunday qilinganida porshen kuchlarining kamayishi bilan tushuntiriladi; porshen kuchlari so‘rish davrida yuqori bosim sababli katta qiymatlarga etadi. ГДСД-2М; ГД-80/80; ГДСД-5; detanderlarida S/D parametr mos ravishda 1,25; 1,60; 1,27. YA’ni geliy detanderlarida S/D nisbatni kamaytirishga intilinadi. Bu mashinalardagi porshen kuchlari HAQ dagidan kichik, chunki geliy kriogen qurilmalarida bosim yuqori bosimli HAQ dagidan o‘n marta kichik. Val aylanish soni, asosan, gaz taqsimlash mexanizmi bilan ushlab turiladi. Klapani kulachok yuritmal detanderlarda $n = 3 \div 6 \text{ s}^{-1}$.

4.3. Detanderlarning energetik balansi, yo‘qotuvlar va samaradorlikni baholash

Porshenli detanderlar ish siklini ko‘rib chiqamiz. Krioagentning kengayishida $L = \oint pdV = \oint Vdp$ mexanik ish bajariladi. Ideal detanderda (yo‘qotuvlar bo‘lmaganida) krioagent tomonidan uning entropiyasi o‘zgarishini belgilovchi ish bajariladi

$$i_{kir} - i_{chiq} = \oint vdp. \quad (4.9)$$

Bunda entalpiyalar farqi maksimal va kengayish jarayoni izoentropdir. Gazning kengayishida sodir bo‘lgan ishning ko‘p qismi iste‘molchiga yoki tormozga sarflanadi; ishning boshqa qismi ishqalanish tufayli issiqlikka aylanadi.

$$L = L_{ist} + L_{ishq} = \oint Vdp.$$

Ishqalanish issiqligi $Q_{ishq} = Q'_{ishq} + Q''_{ishq}$, bunda Q'_{ishq} – krioagentga berilgan ishqalanish issiqligining bir qismi; Q''_{ishq} – atrof-muhitga berilgan ishqalanish issiqligining bir qismi. Ular detanderda ish jarayoniga turlicha ta‘sir ko‘rsatadi. Ishqalanish issiqligi silindr va porshen devorlari tomonidan akkumulyasiya qilinadi. Ishqalanish issiqligining bir qismi va atrofmuhitdan keluvchi issiqlik Q_3 krioagentga beriladi, natijada ish birmuncha oshadi, lekin bunda kengayish jarayoni yakunining entalpiyasi oshadi, ya‘ni sovutish effekti kamayadi. Shu bilan birga atrof-muhitga berilgan ishqalanish issiqligi krioagent holatiga ta‘sir etmaydi, faqatgina yuklash qurilmasiga beriluvchi mexanik ishni kamaytiradi.

Real detanderning umumiy issiqlik balansi

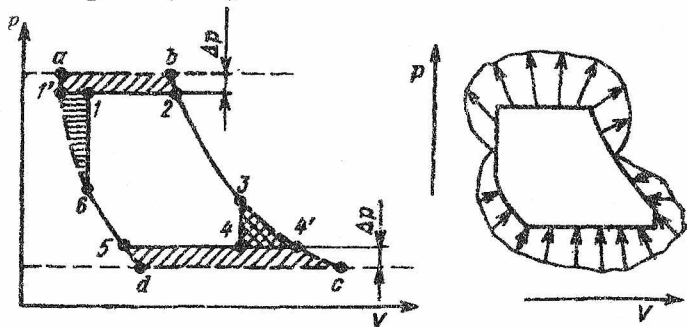
$$i_{kir} - i_{chiq} = \oint vdp - q'_{ishq} - q'_3, \quad (4.10)$$

shuni ko'rsatadiki, gaz kuchlarining ishi va entalpiyaning o'zgarishi krioagentga berilgan issiqlik miqdoricha farqlanadi.

Shunday qilib, ishqalanish sababli PD siklining haqiqiy jarayonlari qaytmasligi, kengayish-siqish, issiqlik almashinish jarayonlarining hamda aralashish jarayonlarining muvozanatlashmaganligi, gazni tirqishlardan sizib chiqishi tufayli detanderning sovutish unumdorligi yo'qotuvlari yuzaga keladi [17].

Qaytmas yo'qotuvlar chiqayotgan oqim entalpiyasini, demakki, sovutish unumdorligini ortishiga ta'sir qiladi. (4.10) formula shuni ko'rsatadiki, PD siklidagi qaytmas jarayonlar tufayli gaz kuchlari ishining kamayishi va tashqaridan issiqlik berilishi sovutish unumdorligini kamaytiradi. Tashqaridan issiqlik berilishi gaz kuchlari ishini oshirsa ham sovutish unumdorligini yo'qolishiga olib keladi.

PD ideal indikator diagrammasida $abcd$ siqish va kengayish jarayonlari izoentropikdir, shuning uchun qaytmas yo'qotuvlar yo'q (4.7, *a*-rasm). Klapanlardagi ishqalanish tufayli yo'qotuvlar $1'ab2$ va $d54'c$ maydon kattaligicha ishni kamaytiradi, bu esa klapanlardagi drossellanish sababli krioagent entalpiyasini δi_D , temperaturasini δT_D va entropiyasini δs_D ni ortishiga olib keladi. Otilib chiqish jarayonini $3 - 4$ qo'llash ham gaz bajaruvchi ishni $344'$ maydon kattaligicha kamaytiradi, bu esa krioagent entalpiyasini δi_D , temperaturasini δT_D va entropiyasini δs_D oshiradi. Muvozanatlashgan $6 - 1'$ izoentropik siqish jarayonini nomuvozanat $6 - 1$ jarayonga almashtirishishni $61'1$ maydoncha kamaytiradi va natijada, mashinadan chiqayotgan krioagent entalpiyasini δi_D , temperaturasini δT_D va entropiyasini δs_D kamayishiga olib keladi.



4.7-rasm. Jarayonning noidealligi (*a*), muvozanatlashmagan regenerativ IAA (*b*) tufayli yo'qotuvlarni indikator diagrammada aniqlashga oid

Shunday qilib, real indikator diagramma jarayonlarining nomuvozanatligi tufayli sovutish unumdorligining yo'qolishini aniqlash uchun detanderdan chiqayotgan krioagent parametrlarini hisoblab, ularni ideal detander entalpiya va temperaturasi bilan taqqoslab sovutish unumdorligi yo'qotuvi topiladi [17]:

$$\delta i_{c,D} = i_{chiq} - i_s; \quad \delta T_{c,D} = T_{chiq} - T_s$$

bu yerda i_s , $T_s - p_{kir}$ bosimdan p_{chiq} bosimigacha izoentropik kengayish jarayoni oxiridagi entalpiya va temperatura. Detander samaradorligiga issiqlik almashinishning ta'sirini e'tiborga olish lozim, chunki atrof-muhitdan issiqlikni olish va ishqalanish issiqligi doim entalpiyani δi_{q_s} , temperaturani δT_{q_s} va entropiyani $\delta s_{q_s, ishq}$ ortishiga olib keladi [17].

Shu bilan birga, tashqi issiqlik almashinish bo'lmasa ham ishchi jarayonning nostatsionar davriy xarakterliligi ichki regenerativ issiqlik almashinish tufayli sovutish unumdorligini kamaytiradi.

Detanderning ishchi kengligiga krioagent devor temperaturasidan yuqori temperaturada kiradi, masalan yuqori bosim P_{dda} $T_{kir} \approx 300K$, $T_{chiq} \approx 100K$, demak temperatura o'zgarish amplitudasi $\Delta T \approx 200K$. Ishchi kenglik devorlari temperaturasi 30÷50 marta kichik amplituda bilan o'zgaradi. Shunday qilib, ishchi siklning ma'lum uchastkalarida krioagent temperaturasi devor temperaturasidan katta va issiqlik oqimi issiqroq krioagentdan sovuqroq devorga yo'naladi. Kengayish jarayonining oxirida krioagent temperaturasi devornikidan ancha past bo'ladi va issiqlik oqimi yo'nalishini o'zgartiradi (4.7, b-rasm).

Turg'un rejim va tashqaridan issiqlik berilmaganida devordan krioagentga beriluvchi issiqlik miqdori qarama-qarshi yo'nalishda beriluvchi issiqlik miqdoriga teng. Yo'qotuvning sababi issiqlik almashinish turli temperaturalar darajasida sodir bo'lishidir. Krioagentdan issiqlik yuqori temperaturada olinib. Past darajada beriladi. Bu olinayotgan va berilayotgan issiqlik ekssergiyalari tengsizligiga, demakki, chiquvchi krioagent entalpiyasini δi_{iss} , temperaturasini δT_{iss} , entropiyasini δs_{iss} ortishiga sababchi qaytmas yo'qotuvlarga olib keladi. Shunday qilib, energiyaning umumiy tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$i_{kir} - i_{chiq,s} = i_{kir} - i_{chiq} + \delta i_{c,D} + \delta i_{iss} + \delta i_{q_s, ishq}$$

Detanderni sovuqlik generatori sifatida samaradorligini baholash uchun real detanderni ideal namunasi bilan bir xil kirish parametrlari va mashinadan chiqish bosimida taqqoslash lozim.

Kiritiluvchi aparametr izoentrop FIK deb ataladi, chunki ideal namuna sifatida izoentropik kengayish jarayoni ko‘riladi [17]:

$$\eta_s = \frac{i_{kir} - i_{chiq}}{i_{kir} + i_{chiq,s}} = 1 - \frac{\delta i_{c,D} + \delta i_{i,s} + \delta i_{q,s} ishq}{i_{kir} - i_{chiq,s}} \quad (4.11)$$

Ko‘pgina hollarda mukammallikni baholash uchun temperaturaviy izoentropik FIK kiritilishi mumkin

$$\eta_s^N = \frac{T_{kir} - T_{chiq}}{T_{kir} + T_{chiq,s}} = 1 - \frac{\delta T_{c,D} + \delta T_T + \delta T_{q,s} ishq}{T_{kir} - T_{chiq,s}} \quad (4.12)$$

Ayonki ideal gaz uchun $\eta_s = \eta_s^N$, chunki $\Delta i = c_p \Delta T$, real gazlarda bu koeffitsientlar turlicha, chunki η_s^T musbat ham manfiy ham bo‘lishi mumkin bo‘lgan Joul–Tomson son effekti ta‘sirini ham e‘tiborga oladi.

$$\eta_s^N = \eta_s + \Delta i_{naz} / (\Delta i_s + \Delta i_{naz}). \quad (4.13)$$

Agar Joul–Tomson effekti musbat bo‘lsa, u holda $\eta_s^N > \eta_s$, chunki drossellanish jarayonida ham temperatura pasayishining ta‘siri krioagentning tashqi ish bajarib kengayishida temperatura pasayishi bilan qo‘shiladi. Agar Joul–Tomson effekti manfiy bo‘lsa umumiy temperatura pasayadi va $\eta_s^N < \eta_s$. Nam bug‘ hududida kengayishdan η_s^N ni qo‘llanilishi mumkin emas, chunki kengayish jarayonining oxirida temperatura o‘zgarmas bo‘lgani uchun (η_s^N) ma‘noga ega emas.

Detanderga issiqlik sovutiluvchi ob‘ektdan beriluvchi detanderlar mukammalligini baholashda izoentropik FIKni qo‘llash mumkin emas, chunki bu turdagi mashinalarning ideal namunasi bo‘lib izotermik kengayishli detander xizmat qiladi va samaradorlikni izotermik FIK bilan baholash lozim:

$$\eta^N = \frac{q_o}{T_{kir}(s_{kir} - s_{chiq,naz})} \quad (4.14)$$

bu yerda q_o – sovutiluvchi ob‘ektdan olinayotgan nisbiy issiqlik; s_{kir} – kirayotgan krioagent oqimining entropiyasi; $s_{chiq,naz}$ – mashinadan chiqish bosimi va oqimning kirish temperaturasi dagi entropiya.

Kriogen mashinalar (detanderlar) mukammalligini baholashda eksergetik va entropik tahlil usullari ham qo‘llaniladi.

Kengayish jarayonining qaytmas yo‘qotuvlari kriogen qurilmaning termodinamik samaradorligiga ta‘sir qiladi, shuning uchun kengayish

jarayonida eksergiya yo'qotuvlarini baholash kerak. Qaytar izoentropik kengayish jarayonida eksergiya yo'qotuvlari yo'q, qaytmas yo'qotuvlar entropiyaning Δs o'sishiga va demakki, eksergiya yo'qotuvlariga olib keladi [17].

Kengayish jarayonida entropiyaning ortishi yo'qotuvlar sababli qadrsizlangan energiyani q_{yoiq} o'rtacha temperaturaga nisbati bilan aniqlanadi:

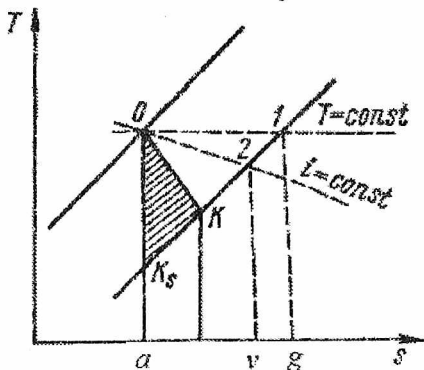
$$\Delta s = \frac{2c_p(T_{chiq} - T_{chiqs})}{T_{chiq} + T_{chiqs}}$$

Bu bog'liqlikni η_s^N orqali ifodalash mumkin

$$\Delta s = \frac{2c_p \left(\sigma^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{\sigma^{\frac{k-1}{k}} + (1 + \eta_s^H) / (1 - \eta_s^H)}$$

Kriogen qurilmaning termodinamik FIK quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_t = 1 - T_a \sum \Delta s / L. \quad (4.15)$$



4.8-rasm. Kengayish jarayoni

Eksergetik tahlilda eksergetik FIK eksergiyaning foydali o'zgarishini umumiy eksergiyaga nisbati bilan aniqlanadi:

$$\eta_e = \frac{T_a (s_g - s_v) - \Delta i_{naz}}{T_a (s_g - s_a) - \Delta i_{naz}}$$

bu yerda $s_a, s_v, s_g - a, v, g$ nuqtalardagi entropiyalar (4.8-rasm) [17]; Δi_{naz} - drossellanishning izotermik effekti.

Ideal gazda $\Delta i_{naz} = 0$ va

$$\eta_e = 1 - \Delta s / (s_2 - s_a). \quad (4.16)$$

Shunday qilib, kengayish jarayonidagi qaytmas yo'qotuvlarni baholashning entropik va eksergetik usullari bir xil natijani berishi kerak.

4.4. Real krioagent bilan silindrda kechadigan jarayonlar

PD ning haqiqiy ish sikli barcha bosqichlarida uchta omil ta'sir etadi: gaz massasi bilan birga energiyani berish yoki olish (migratsion ta'sir), issiqlik berish yoki olish, mexanik ish berish yoki olish. Taqribiy hisoblarni bajarish uchun sxemalashtirilgan ishchi sikllar kiritiladi; sxemalashtirishda yagona ishchi jarayon alohida jarayonlarga ajratilib, ulardagi eng ta'sirchan omillar qoldirilib, ikkilamchilari e'tiborga olinmaydi. PD ning tarqalgan sxemalashtirilgan ish siklini ko'rib chiqaylik (4.1-rasm), bunda jarayonlarning bir qismi e'tiborga olinadi. To'ldirish jarayoni (1-2) shu bilan xarakterliki, unda migratsion va kuch ta'siri bir vaqtda sodir bo'ladi; kengayish jarayonida (2-3) migratsion omil e'tiborga olinmaydi, otilib chiqish jarayonida (3-4) faqatgina migratsion omil ko'riladi; itarilishda (4-5) kuch omili ham ta'sir eta boshlaydi. Teskari siqish jarayonida (5-6) migratsion omil yo'q, faqatgina kuch ta'sir qiladi; kuch omili 6-1 jarayonda yo'q. Shuni ta'kidlash lozimki, alohida jarayonlarning kechish vaqti e'tiborga olinmaydi, bu esa issiqlik almashinish ta'sirini hisobga olish imkonini bermaydi. Ayrim jarayonlarning hisobida jarayonni kechish vaqtini e'tiborga olish lozim, shunda issiqlik almashinish ta'siri ko'zda tutilgan bo'ladi [17].

Foydasiz hajmni to'ldirish jarayonini 6-1 ko'raylik. $I = U + pV$ ni e'tiborga olgan holda temperatura o'zgarishini yozamiz

$$dT = dQ + i_{kir} dM + V dp \quad (4.17)$$

6-1 jarayonda gazi_{kir} entalpiya va $\Delta M = M_1 - M_6$ miqdorda kirsin. (4.17) ni integrallab, quyidagini olamiz

$$i_1 = \left(1 - \frac{\rho_6}{\rho_1}\right) i_{kir} + \frac{\rho_6}{\rho_1} i_6 + \frac{1}{\rho_6} (p_1 - p_6) + \frac{\Delta Q_{6-1}}{V_h a_o \rho_1}. \quad (4.18)$$

Ma'lumki, 6-1 jarayoni so'ngida bosim p_1 ga tenglashadi, shuning uchun 1 nuqtaning termodinamik parametrlari p_1 izobarada joylashishi kerak, demak, $p_1 = const$ datenglamalar sistemasiga $i_1 = f(\rho_1)$ shartni kiritish zarur.

Gaz bilan silindr, porshen devorlari o'rtasidagi issiqlik almashinish 6-1 jarayonning kechish vaqtida amalga oshadi:

$$\Delta\tau_{6-1} = \Delta\varphi_{6-1}/(360n),$$

bu yerda $\Delta\varphi_{6-1}$ – jarayon kechishidagi burchak (4.1-rasm); n – aylanishlar chastotasi, s^{-1} .

Muvozanatlashmagan siqish jarayonida olingan issiqlik quyidagi formuladan aniqlanadi

$$\Delta Q_{6-1} = \alpha f(\theta - (T_1 + T_6)/2)\Delta\tau_{6-1}, \quad (4.19)$$

bu yerda α – issiqlik berish koeffitsienti; f – issiqlik berish yuzasining oʻrtacha maydoni, $f = 2F_p + 4V_p a_o/D$; F_p – porshen maydoni; θ – devorning oʻrtacha temperaturasi. (4.18) – (4.19) tenglamalar ketma-ket yaqinlashish usuli bilan echilishi mumkin, bunda dastlabiga $\Delta Q_{6-1} = 0$ deb qabul qilish, i_1 ni aniqlash, $T_1 = f(i_1, p_1)$ ni topish, soʻng ΔQ_{6-1} ni (4.19) dan aniqlab berilgan oʻxshashlikka erishguncha quyidagi yaqinlashuvlarni bajarish zarur.

Adiabatik jarayonda ideal gaz uchun (4.18) tenglama $i_1 = c_p T_1$; $i_{kir} = c_p T_{kir}$, $i_6 = c_p T_6$ ni qoʻyish bilan shaklan oʻzgartirish mumkin va ideal gaz holat tenglamalari quyidagi koʻrinishga keladi:

$$T_1 = \left(1 - \frac{T_1 p_1}{T_6 p_6}\right) T_{kir} + \frac{p_6}{p_1} T_1 + \frac{k-1}{k} T_1 \left(1 - \frac{p_6}{p_1}\right).$$

Oʻxshash hadlarni qisqartirishdan soʻng muvozanatsiz siqish jarayonidagi oxirgi temperaturani aniqlash formulasini hosil qilamiz

$$T_1 = \frac{kT_{kir}T_6(p_1/p_6)}{kT_{kir}+T_6(p_1/p_6-1)}. \quad (4.20)$$

Toʻldirish jarayonida ($I-2$) silindrgai_{kir}entalpiyalı krioagent kiradi; silindrdagi gaz bilan aralashadi. Bunda $I-2$ jarayon oxirida krioagent parametrlari ρ_2 va i_2 boʻladi. Bu jarayonda bosim oʻzgarmas, ishchi hajm esa $V_h a_o$ dan $V_h(a_o + c_o)$ gacha oʻzgaradi deb qabul qilamiz. $I_1 = U_1 + p_1 V_1$ va $I_2 = U_2 + p_2 V_2$ ni eʼtiborga olgan holda quyidagini yoza olamiz

$$i_2 = \frac{a_o \rho_1}{(a_o + c_o) \rho_2} i_1 + \left(1 - \frac{a_o \rho_1}{(a_o + c_o) \rho_2}\right) i_{kir} + \frac{\Delta Q_{1-2}}{V_h(a_o + c_o) \rho_2} \quad (4.21)$$

(4.21) tenglamaga $p_2 = p_1$ da $i_2 = f(\rho_2)$ shartni hamda $I-2$ jarayondagi krioagent issiqlik berish tenglamasini

$$\Delta Q_{1-2} = \alpha_{1-2} f_{1-2}(\theta - (T_1 + T_2)/2)\Delta\tau_{1-2} \quad (4.22)$$

qoʻyish kerak, bunda α_{1-2} – krioagent va silindr devori oʻrtasidagi issiqlik berish koeffitsienti; f_{1-2} – jarayonida devor yuzasining oʻrtacha maydoni

$$f_{1-2} = 2 \left(F_p + V_h(a_o + c_o) \right) / D,$$

$\Delta\tau_{1-2} = \Delta\varphi_{1-2} / (360n)$ – to‘ldirish jarayonining davomiyligi.

Adibatik aralashish jarayonida ideal gaz uchun $p_1 = p_2$ shartda $i_1 = c_p T_1$; $i_2 = c_p T_2$, $i_{kir} = c_p T_{kir}$ ni qo‘ygandan so‘ng va ideal gaz holat tenglamasi temperaturani aniqlash hisobiy formulasiga keltirilishi mumkin [17]:

$$T_2 = \frac{T_{kir} T_1 (a_o + c_o) / a_o}{T_{kir} + T_1 c_o / a_o}. \quad (4.23)$$

2–3 kengayish jarayonini ko‘rib chiqamiz. Bu jarayonda gazning massasi o‘zgarmay qoladi (agar sizib chiqishlarni e‘tiborga olmasak); issiqlik almashinish qonuniy xarakterga ega: jarayonning boshlang‘ich bosqichida issiqlik oqimi gazdan devorga yo‘nalgan, jarayon oxirida esa yo‘nalishini o‘zgartiradi va temperaturasi yuqoriroq devordan gazga issiqlik beriladi.

Ideal detanderda bu jarayon izoentropa bilan, real detanderda esa politropa bilan approksimatsiyalanadi. Krioagent termodinamik parametrlarini aniqlashda kengayish jarayonining so‘ngida massa o‘zgarmas deb qabul qilinadi [17]:

$$\rho_3 = \frac{a_o + c_o}{a_o + 1} \rho_2. \quad (4.24)$$

Izoentropik kengayish jarayonida $s_3 = s_2$ va barcha termodinamik parametrlar ma‘lum ρ_3 va s_3 bo‘yicha aniqlanishi mumkin: $T_3 = T(\rho_3, s_3)$; $p_3 = p(\rho_3, s_3)$ va h.k.

Real kengayish jarayoni 2 va 3 nuqtalardan o‘tuvchi parametrlar politropasi bilan approksimatsiyalanishi mumkin (4.5-rasm). Politropik deb shunday jarayon tushuniladiki, unda issiqlik temperaturalar farqiga proporsional

$$\Delta q = c(T_2 - T_3). \quad (4.25)$$

(4.25) tenglamada c proporsionallik koeffitsienti politropik jarayonning issiqlik sig‘imi deb ataladi, bu jarayonda issiqlik sig‘imi o‘zgarmaydi. Politropik jarayonda krioagent entropiyasi o‘zgaradi, (4.25) ni e‘tiborga olgan holda entropiyaning elementar o‘zgarishi quyidagicha [17]:

$$ds = \frac{dq}{T} = c \frac{dT}{T}. \quad (4.26)$$

(4.26) tenglamani integrallab $s_3 - s_2 = c \ln(T_2 - T_3)$ ni olamiz, bundan

$$c = (s_3 - s_2) / \ln(T_3 - T_2). \quad (4.27)$$

(4.27) tenglamadan $dM = 0$ shart uchun quyidagini olamiz

$$i_2 - i_3 = \Delta q_{2-3} + \int_2^3 v dp.$$

Politropik FIK tushunchasidan foydalanib, 2-3 jarayon uchun quyidagi munosabatni olamiz:

$$\eta_{naz} = \frac{i_2 - i_3}{\int_2^3 v dp} = \frac{1}{1 + \frac{s_2 + s_3}{i_2 - i_3} \frac{T_2 - T_3}{\ln(T_2/T_3)}}. \quad (4.28)$$

2-3 jarayonida issiqlik almashinish qonuniy xarakterga ega, shuning uchun

$$\Delta Q_{2-3} = \int_2^3 \alpha_{2-3} f_{2-3} (\theta - T) d\tau. \quad (4.29)$$

Bu jarayonda temperatura o'zgarishi chiziqli xarakterda deb quyidagini hosil qilamiz

$$\Delta Q_{2-3} = \alpha_{2-3} f_{2-3} (\theta - (T_2 + T_3)/2) \Delta \tau_{2-3}, \quad (4.30)$$

bu yerda α_{2-3} - 2-3 jarayonidagi issiqlik berish koeffitsienti; f_{2-3} - bu jarayondagi issiqlik almashinish yuzasining o'rtacha maydoni, $f = 2(F_p + (2a_o + c_o + 1))V_h/D$; $\Delta \tau_{2-3}$ - kengayish jarayonining davomiyligi, $\Delta \tau_{2-3} = \Delta \varphi_{2-3}/(360n)$.

Shunday qilib, kengayish jarayonida parametrlarni aniqlash ketma-ketligi quyidagicha: ixtiyoriy qiymatni $\eta_{naz} = 1$ qabul qilib (izoentrop jarayonga mos keladi) 3 nuqtadagi termodinamik parametrlarni oxirgi yaqinlashuvda topamiz. (4.30) formula bo'yicha ΔQ_{2-3} issiqlik oqimini baholaymiz va FIK ni aniqlaymiz:

$$\eta_{naz} = \frac{1}{1 + \Delta Q_{2-3}/(i_2 - i_3)} \quad (4.31)$$

so'ngra politropik FIK aniqlashtirilgan qiymatida 3 nuqtadagi parametrlarni (4.28) formula bo'yicha va ρ_2 ni yana aniqlaymiz.

Politropik jarayonda ideal gaz uchun parametrlar quyidagi formuladan aniqlanishi mumkin:

$$T_3 = T_2 \left(\frac{a_o + c_o}{a_o + 1} \right)^{m-1},$$

bu yerda m - natijaviy parametrlar politropa ko'rsatgichi.

PD siklidagi 3 - 4 jarayon o'tilib chiqish jarayonidir, u ba'zida gazni erkin chiqish jarayoni deb ataladi. Bu jarayon nostatsionar va muvozanatlashmagan. Entalpiyaning kamayishi gazni itarishga sarflanuvchi ish bilan aniqlanadi. Jarayonning 4.6-rasmdagi sxemasini ko'rib chiqaylik. Silindrdai₃entalpiyasi, T₃temperaturali vap₃bosimli krioagent bor, haydash klapani berk. Haydash klapani ochilganidan so'ng krioagentningM'massasi

silindrdan chiqib ketadi, boshqa qismi esa M'' silindrda qoladi. Bunda gazning ikkala massasini xarakterlovchi entalpiya \tilde{i}_4 kamayadi

$$\tilde{i}_4 = i_3 - v_3(p_3 - p_4) + q_{3-4}. \quad (4.32)$$

Issqlik berilmaganida ideal gazni o'tilib chiqish jarayoni uchun ideal gaz tenglamasini $vai = c_p T$ bog'liqlikni (4.32) ga qo'yib, o'rtacha massaviy temperaturani aniqlovchi formulani hosil qilamiz:

$$T_4 = \frac{T_3}{k} \left(1 + (k-1) \left(\frac{p_4}{p_3} \right) \right). \quad (4.33)$$

Agar o'tilib chiqish jarayoni ikki fazali oblastda kechayotgan bo'lsa, u holda T_4 temperaturasi bosimdagi to'yinish temperaturasi sifatida aniqlanadi. Silindrda qolgan krioagent massasi adiabatik jarayonda parametrlarini izoentropik qonun bo'yicha o'zgartiradi vap_4 zichlikni entropiyasi $s_4 = s_3 + v_3 \ln(p_4/p_3)$ bosim bo'yicha aniqlash mumkin. Bu $M'' = M \rho_4''/\rho_3$ massani topish imkonini beradi, demak, truboprovodga chiqqan krioagent massasi $M' = M - M''$.

3-4 jarayonda olingan issqlik miqdori

$$Q_{3-4} = \alpha_{3-4} f_{3-4} (\theta - (T_3 + T_4)/2) \Delta\tau_{3-4}, \quad (4.34)$$

bu yerda α_{3-4} - krioagent va silindr devori o'rtasidagi issqlik berish koeffitsienti; $f_{2-3} = 2 F_p + 4V_h/D$ - issqlik almashinish yuzasining maydoni; $\Delta\tau_{3-4} = \Delta\varphi_{3-4}/(360n)$ - 3-4 jarayonining davomiyligi.

Silindrda qolgan krioagentga issqlikning $\Delta q_4'' = (Q_{3-4}/M_{3-4}) \rho_4''/\rho_3$ qismi berilgan bo'lsin, issqlikning boshqa qismi silindrdan o'tilib chiqish jarayonida krioagentga beriladi: $\Delta q_{3-4}' = q_{3-4} - \Delta q_{3-4}''$.

Shunday qilib, kengayish jarayonining oxirida silindrda qolgan krioagentning entalpiya va zichligini aniqlashtirish mumkin:

$$i_4 = i_{4s} + \Delta q_{3-4}'; \rho_4 = f(p_4, i_4). \quad (4.35)$$

Iteratsiya jarayonini tashkil qilib krioagent parametrlarini aniqlashtirish mumkin. Aralastirish balansi tenglamasidan 3-4 jarayonda silindrdan chiqqan krioagent entalpiyasini aniqlaymiz:

$$i_4' = (i_4 - (M'/M) i_4'')/(M'/M). \quad (4.36)$$

4-5 itarish jarayonida bosim o'zgarmas deb qaralsa, krioagentning termodinamik parametrlari tengligiga olib keladi (issqlik almashinish bo'lmaganida): $\rho_5 = \rho_4$, $i_5 = i_4$, $T_5 = T_4$ va h.k.

$$i_5 = i_4 + \Delta q_{4-5}; \quad p_5 = p_4; \quad \rho_5 = f(p_5, i_5). \quad (4.37)$$

Krioagent ikkita jarayonda chiqariladi: 3-4 va 4-5, shuning uchun issiqlik balans tenglamasidan silindrdan chiquvchi krioagent entalpiyasi topilishi mumkin:

$$i_{chiq} = \frac{(1-\rho_4/\rho_3)i_4' + (\rho_4(1-b_0)/(\rho_3(a_0+1)))i_4''}{1 - (\rho_4(a_0+b_0)/(\rho_3(a_0+1)))}. \quad (4.38)$$

Teskari siqish jarayonida 5-6 gaz massasi o'zgarimas deb qabul qilinishi mumkin, ya'ni sizib chiqishni e'tiborga olmasa bo'ladi, issiqlik almashinishni e'tiborga olish lozim. Ideal detanderda bu jarayonni izoentrop deb qarash kerak, real detanderda esa bu politrop jarayondir. Bu jarayonda krioagent zichligi o'zgaradi

$$\rho_6 = ((a_0 + b_0)/a_0)\rho_5. \quad (4.39)$$

Izoentropik siqish jarayonida krioagentning termodinamik parametrlari $s_6 = s_5$ shartdan aniqlanadi, demak,

$$p_6 = f_1(\rho_6, s_6); \quad T_6 = f_2(\rho_6, s_6); \quad i_6 = f_3(\rho_6, T_6) \text{ h.k.}$$

Siqish jarayonini politrop deb qarab, bu jarayonning politropik FIK kiritamiz:

$$\eta_{naz 5-6} = \frac{i_6 - i_5}{\int_5^6 v dp} = \frac{1}{1 + \frac{s_6 - s_5}{i_6 - i_5} \frac{T_6 - T_5}{\ln(T_6/T_5)}}. \quad (4.40)$$

Temperatura o'zgarishi chiziqli xarakterda desak, quyidagini hosil qilamiz

$$\Delta Q_{5-6} = \alpha_{5-6} f_{5-6} (\theta - (T_5 + T_6)/2) \Delta \tau_{5-6}, \quad (4.41)$$

bu yerda α_{5-6} – krioagent bilan devor o'rtasida 5-6 jarayonda issiqlik berish koeffitsienti; f_{5-6} – bu jarayonda issiqlik almashinish yuzasining o'rtacha maydoni, $f_{5-6} = 2(F_p + (2a_0 + b_0 + 1))V_h/D$; $\Delta \tau_{5-6}$ – teskari siqish jarayonining davomiyligi, $\Delta \tau_{5-6} = \Delta \varphi_{5-6}/(360n)$.

Porshenli detanderda atrof-muhitdan berilgan va porshen zichlagichlarida, ishqalanish qismlarida, boshqa qismlarda ishqalanish sababli ajralgan issiqlik metallga beriladi; issiqlikning bir qismi atrof-muhitga, boshqa qismi kengayuvchi sovutish agentiga beriladi. Shuning uchun, berilayotgan umumiy issiqlik miqdori alohida jarayonlar berayotgan issiqlik miqdorlari yig'indisiga teng [17]:

$$Q = \Delta Q_{1-2} + \Delta Q_{2-3} + \Delta Q_{3-4} + \Delta Q_{4-5} + \Delta Q_{5-6} + \Delta Q_{6-1}. \quad (4.42)$$

Porshenli detander silindri devorining temperaturasi θ issiqlik balans tenglamasidan aniqlanishi mumkin. Hisoblash ishi ketma-ket yaqinlashuv

usuli bilan bajarilishi mumkin, birinchi yaqinlashuvda $\theta = (T_1 + T_2)/2$ deb qabul qilish, soʻnggi yaqinlashuvda – issiqlik almashinishni eʼtiborga olmay, (4.18), (4.21), (4.28), (4.32), (4.35), (4.38), (4.39), (4.40) tenglamalar sistemasini echib, $\Delta Q_{i-f} = 0$ temperaturalarni aniqlash mumkin. Echish natijasida diagrammadagi barcha asosiy nuqtalarning termodinamik parametrlari (entalpiya, zichlik, entropiya, temperatura, bosim) olinishi mumkin. Dastlab, $i_2 = i_{kir}$ deb qabul qilib, (3.21) dan boshlab barcha asosiy nuqtalardagi ketma-ket formulalar boʻyicha entalpiya, zichlik yoki bosimni aniqlash bilan tenglamalar sistemasini iteratsion usulda echish qulay. Ikkita termodinamik parametri, ρ yoki i , p boʻyicha boshqa barcha parametrlarni aniqlash mumkin. Bir xil qiymatga erishilgunicha hisoblash takrorlanadi [17].

Hisoblarning ikkinchi bloki birinchisidan keyin bajarilib, har bir jarayonda issiqlik almashinishning taʼsirini aniqlashga taalluqli, soʻngra (4.42) dan devor temperaturasini aniqlashtirilib indikator diagrammadagi asosiy nuqtalarning termodinamik parametrlarini issiqlik almashinish taʼsirini eʼtiborga olgan holda aniqlashga qaytiladi.

Qayd etish kerakki, formulalardagi har bir jarayon issiqlik berish koeffitsientlari α_{i-j} , afsuski, taqriban baholanadi, chunki detanderlardagi bu parametrlar tajribada va nazariy tadqiq qilinmagan. Kompressor yoki IYOD ishchi hajmlaridagi issiqlik almashinishni tadqiqdan olingan tavsiyalarni bevosita qoʻllab boʻlmaydi. Har bir ishchi jarayonni baholash uchun qoʻllaniladigan kriterial ifodalar tajribada tekshirilib koʻrilishi zarur.

c_o, b_o parametrlar indikator diagramma turini belgilaydi, gaz taqsimlash mexanizimiga bogʻliq. Norma diagrammani olish uchun c_o ning qiymati $c_{o\min} - 1,0$ oraliqda, b_o esa $0 - b_{o\min}$ orasida boʻlishi kerak. c_o ortishi bilan 2 – 3 jarayondagi bosimlar nisbati kamayadi va 3 – 4 jarayondagi bosimlar nisbati katta boʻlmagan samaradorlik bilan ortadi. c_o ning kamayishi bir xil sarfda mashina oʻlchamlarini ortishiga olib keladi, shuning uchun bu parametrning maqbul qiymatlari mavjud. b_o ning ham maqbul parametrlari mavjud boʻlib, uning qiymatlarini ortishi 6 – 1 jarayondagi nomuvozanatlik tufayli yoʻqotuvlarni kamaytiradi, lekin bunda chiqayotgan krioagent entalpiyasi koʻpayadi. 4.1-jadvalda berilgan c_o, b_o qiymatlarini hisob ishida qoʻllash mumkin [17].

Shuni qayd etish lozimki, 4.1-jadvalda berilgan qiymatlar xususiy xarakterda, chunki c_o va b_o parametrlarga foydasiz hajm a_o , Pd dagi bosimlar nisbati ta'sir ko'rsatadi, shuning uchun maqbul qiymatni aniqlash maqsadida c_o va b_o ning turli qiymatlarida hisobni bajarish ma'qul [17].

4.1-jadval

Detander	c_o	b_o
Havo:		
yuqori bosim	0,2÷0,3	0,1÷0,2
past bosim	0,3÷0,4	0,1÷0,2
Geliy:		
o'rta bosim	0,2÷0,3	0,2÷0,3
bug'-	0,4÷0,8	0,05÷0,2
suyuqlik	0,35÷0,4	0,1÷0,2
Vodorod		

Tadqiqotlarning ko'rsatishicha, nam bug' oblastida ishlovchi PD da c_o ning maqbul qiymati krioagentning mashinaga kirish temperaturasi bog'liq. T_{kir} kamayishi bilan c_o ning maqbul qiymati ortadi. Masalan, T_{kir} 20 dan 6 K ga kamayganida c_o ning maqbul qiymati 2,5 – 3 marta oshadi [17].

4.5. Porshenli detanderlarni hisoblash

Umumiy ma'lumotlar. PD ni konstruktiv hisoblashdan maqsad uning geometrik o'lchamlarini: silindr diametri va porshen yo'lini hamda izoentropik FIK bilan ifodalanuvchi samaradorlikni topishdir. Qayd etish lozimki, formulalar ketma-ketligini hisoblash bilan kerakli natijani bir martada beruvchi metodikani yaratish imkoni yo'q. Chunki, bir qator parametrlar hisoblash jarayonida aniqlashtiriladi, masalan, krioagentni silindr devori bilan issiqlik almashinishini hisoblash uchun issiqlik almashinish yuzalari va koeffitsientlarini bilish lozim, bular esa, o'z navbatida, detander silindridagi krioagent holatiga bog'liq. Bunday parametrlarni ko'plab keltirish mumkin. Shu sababli detanderni konstruktiv hisoblash iterativ xarakterda, ya'ni ortga qaytib avval topilgan kattaliklar aniqlashtiriladi [17].

Mashinani loyihalash uchun texnik topshiriqda quyidagi parametrlar berilgan bo'lishi zarur: krioagent sarfi (kg/soat), boshlang'ich p_b va oxirgi p_{ox} bosimlar, krioagentning mashinaga kirish temperaturasi. Ammo hisoblash jarayonida qator parametrlarni tanlashga to'g'ri keladi, chunki

texnik topshiriqning berilgan ma'lumotlari echim variantini uzil-kesil bermaydi. Loyihachi detander gaz taqsimlash mexanizmi qismlarining turini tanlashi va shu orqali indikator diagrammaning a_o , c_o , b_o , Δp_{kir} , Δp_{chiq} parametrlarini berishi kerak. Qayd etish lozimki, valning aylanishlar chastotasi ham tanlanuvchi parametr, chunki u klapanlarni boshqarish turiga bevosita bog'liq. Tanlanuvchi parametrlar qatoriga porshen yo'li va uning diametrining nisbatini ham kiritiladi. Agar loyihalananayotgan detanderda boshqa porshenli detander bazasidan foydalanish taklif qilinsa, u holda tirsak val geometriyasi hal qiluvchi ahamiyatga ega bo'ladi va porshen diametrini topish kerak; porshen yo'li va diametri o'rtasidagi ma'lum nisbat (S/D) qabul qilinsa detanderni loyihalash mumkin. Shunday qilib, hisoblash algoritmi bloklardan tashkil topadi, bu bloklar silindr o'lchamlarini, indikator diagramma asosiy nuqtalaridagi krioagent parametrlari, krioagent va silindr devori o'rtasidagi issiqlik almashinish koeffitsientlari hamda kengayish, siqish jarayonlarining politropik FIKni aniqlash bo'yicha masalalarni yechadi.

Indikator diagrammada parametrlarni aniqlash bloki. Krioagentning indikator diagrammadagi xarakterli nuqtalardagi holati quyidagi tenglamalar sistemasini yechib topiladi [17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_2 = \frac{a_o}{a_o + c_o} \frac{\rho_1}{\rho_2} i_1 + \left(1 - \frac{a_o \rho_1}{(a_o + c_o) \rho_2} i_{kir} + \frac{\Delta Q_{1-2}}{V_h (a_o + c_o) \rho_2} \right); \\ i_2 = f(\rho_2), \quad p_2 = \text{const da}; \\ \rho_3 = \pi_2 \frac{a_o + c_o}{a_o + 1}; \\ \eta_{naz} = \frac{1}{1 + \frac{s_2 - s_3}{i_2 - i_3} \frac{T_2 - T_3}{\ln T_2/T_3}}; \\ \eta_{naz} = 1/(1 - \Delta q_{2-3}/(i_2 - i_3)); \\ i_4 = f(p_4, s_4); \quad s_4 = s_3; \\ i_5 = i_4 + \Delta q_{4-5}; \\ \rho_6 = \frac{a_o + b_o}{a_o} \rho_5; \\ \eta_{naz} = \frac{1}{1 + \frac{s_6 - s_5}{i_6 - i_5} \frac{T_6 - T_5}{\ln T_6/T_5}}; \\ \eta_{naz} = 1/(1 + \Delta q_{5-6}/(i_6 - i_5)); \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} i_4 = \left(1 - \frac{\rho_6}{\rho_1}\right) i_{kir} + \frac{\rho_6}{\rho_1} i_6 + \frac{1}{\rho_1} (p_1 - p_6) + \frac{\Delta Q_{6-1}}{V_h a_o \rho_1}; \\ i_1 = f(\rho_1), \quad p_1 = \text{const da.} \end{cases}$$

Tenglamalar sistemasini yechishda issiqlik almashinishning ta'siri birinchi yaqinlashishda e'tiborga olinmaydi $\Delta q_{i-j} = 0$, tenglamalar sistemasi yechilganidan so'ng indikator diagramma barcha nuqtalaridagi bosim, temperatura, zichliklar hamda chiqayotgan krioagent entalpiyasini

$$i_{chiq} = \frac{\left(1 + \frac{\rho_4}{\rho_3}\right) i_{h.or} + \frac{\rho_4(1-b_o)}{\rho_3(1+a_o)} i_4}{1 - \frac{(a_o+b_o)\rho_4}{(a_o+1)\rho_5}},$$

sovutish unumdorligi, izoentropik FIKni aniqlash mumkin.

Krioagent holati haqidagi ma'lumot PD siklining turli jarayonlaridagi issiqlik almashinishni aniqlashtirish imkonini beradi.

O'lchamlarni aniqlash bloki. Dastlabki ma'lumot: krioagentning indikator diagrammadagi 2 va 5 nuqtalardagi holati va a_o , v_o , s_o o'lchamsiz kattaliklar, porshen yo'li va diametrining nisbati. Hisoblash

$$V_h = m / \left(n \left((a_o + c_o) \rho_2 - (a_o + b_o) \rho_5 \right) \right)$$

formulasi bo'yicha amalga oshiriladi [17].

Bu formulada m – sarf, kg/soat; n – aylanishlar soni, s^{-1} ; ρ_2 , ρ_5 – krioagent zichligi, kg/m^3 ; V_h – silindr hajmi, m^3 .

Birinchi yaqinlashishda $\rho_2 \approx \rho_{kir}$; $\rho_5 \approx \rho_{chiq}$ deb qabul qilsa bo'ladi.

Issiqlik oqimlarini hisoblash. Dastlabki ma'lumot – krioagent temperaturasi, silindrning geometrik o'lchamlari, shuning uchun bu blokka murojaat ana shu kattaliklar aniqlanganidan so'ng amalga oshadi.

Foydasiz hajmni to'lishida krioagent va silindr devori o'rtasidagi issiqlik berish koeffitsienti gazni klapan orqali tekis to'siqqa oqib chiqish kriterial tenglamasidan aniqlanishi mumkin.

$$Nu_1 = 0,018Re^{0,87} Pr^{0,33}.$$

Reynolds kriteriysini aniqlashda xarakterli tezlik sifatida kritik tezlikka teng bo'lgan krioagentni klapandan o'tish maksimal tezligi qabul qilinadi. Xarakterli o'lcham sifatida klapan teshigining diametri d_{kl} qabul qilinadi. Bu formula $Re < 10^4$ da va porshen kirish teshigidan $(1 \div 10)d_{kl}$ masofada bo'lganida o'rinli. Porshen kirish teshigidan $(0 \div 1)d_{kl}$ masofada joylashganida hisob ishini quyidagi formula bo'yicha bajarish mumkin [17]:

$$Nu = 0,8Re^{0,5}Pr^{0,4}(L/d_{kl})^{-0,08}$$

bu yerda L – klapan kirish teshigidan porshen toresigacha bo‘lgan masofa.

To‘lish va kengayish jarayonida issiqlik berish koeffitsienti quyidagi empirik formuladan hisoblanishi mumkin:

$$Nu = 0,2Re^{0,667}$$

bu yerda aniqlovchi o‘lcham – kirish teshigining diametri; xarakterli tezlik – gaz oqimining kirishdagi tezligi.

Gaz oqishida $d_{kl}/D < 0,1$ nisbat uchun issiqlik berish koeffitsienti kriterial tenglamadan topilishi mumkin

$$Nu = 0,105Ra^{1/3}$$

bu yerda Ra – Reley kriteriysi.

$d_{kl}/D = 0,1 \div 0,5$ da quyidagi formuladan foydalanish mumkin:

$$Nu = 0,285Re^{0,8} + 500,$$

bu yerda aniqlovchi kattaliklar – silindr diametri va porshen tezligi.

Itarish va qayta siqish jarayonida quyidagi kriterial bog‘liqlik o‘rinli:

$$Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4},$$

bu yerda aniqlovchi kattaliklar – porshen diametri va tezligi.

Issiqlik berish koeffitsienti quyidagicha aniqlanadi:

$$\alpha_{i-j} = Nu_{i-j}\lambda_{i-j}/D_{i-j},$$

bu yerda λ_{i-j} – issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsienti; D_{i-j} – PD diagrammada $i-j$ jarayonning aniqlovchi o‘lchami.

Jarayonda krioagentga berilgan yoki olingan umumiy issiqlik miqdori

$$\Delta Q_{i-j} = \alpha_{i-j}f_{i-j}\Delta\tau_{i-j}\left(\frac{T_i - T_j}{2} - \theta\right),$$

bu yerda f_{i-j} – bu jarayondagi issiqlik almashinish yuzasining o‘rtacha maydoni; $\Delta\tau_{i-j} = \Delta\varphi_{i-j}/(360n)$ – jarayon davomiyligi [17].

Silindr devorining temperaturasi issiqlik balansi tenglamasidan topiladi

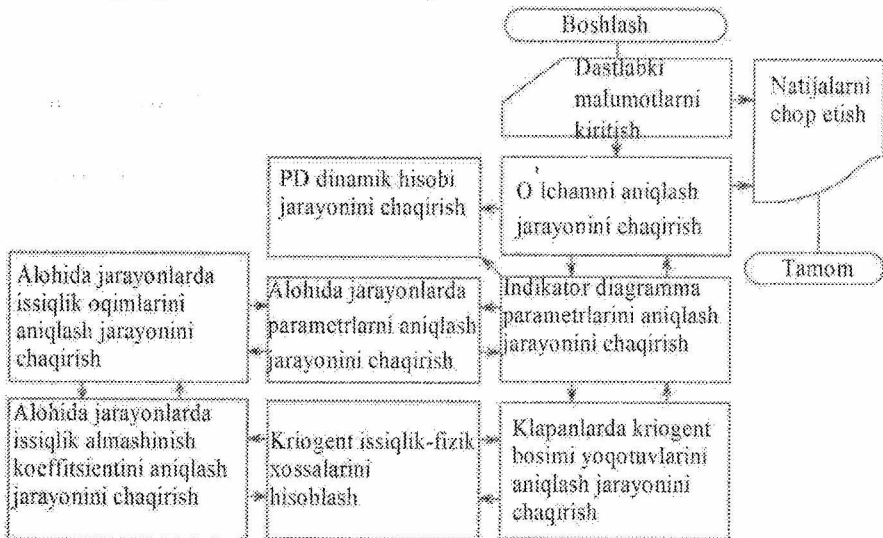
$$Q + \Sigma\Delta Q_{i-j} = 0,$$

bu yerda Q – ishqalanish va porshen bilan issiqlik almashinish natijasida detanderga atrof-muhitdan berilgan umumiy issiqlik miqdori.

Bu blokda hisoblashni yarim bosim usuli bilan amalga oshirish mumkin. Issiqlik oqimlari topilganidan so‘ng avvalgi blokka qaytish va krioagentning asosiy nuqtalardagi parametrlarini aniqlash zarur.

Hisoblash so‘nggida silindrning geometrik o‘lchamlari va izoentropik FIK topiladi. a_o, b_o, c_o qiymatlari ixtiyoriy berilgani sababli diagrammada

$p_6 > p_{kir}$ yoki $p_3 < p_{chiq}$ sirtmoqlari paydo bo'lishi mumkin. Bu holda c_0 ni oshirish, b_0 ni kamaytirish va sikl hisobini takrorlash lozim. PD hisobining algoritmi 4.9-rasmda berilgan.

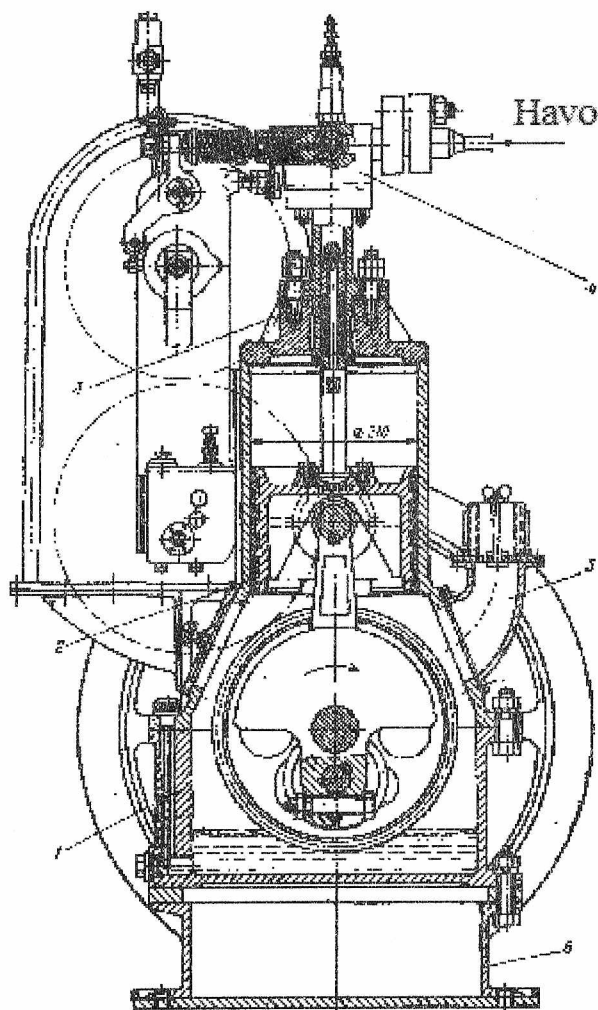


4.9-rasm. PD hisoblash algoritmi

4.6. Porshenli detanderlarning konstruksiyalari

Havo ajratish qurilmalarining porshenli detanderlari. HAQda asosan turbodetanderlar ishlatiladi. Porshenli mashinalar faqat kichik unumdorlikdagi qurilmalarda suyuq kriomahsulot olish uchun qo'llaniladi. ДВД-9 detanderining konstruksiyasini ko'rib chiqamiz (4.10-rasm). U vertikal bir silindrli mashinadir. Tirsak val o'qi bo'yicha gorizont tekislik bo'yicha ikki qismga ajraluvchi cho'yan karter quyma holda yasalgan. Karterni yuqori qismida kreyskopf yo'naltirgichlari 2 joylashgan. Silindr 3 karterga klapan qutisi 4 esa silindrga joylashgan. Detander porsheni yig'ma konstruksiya bo'lib, qator detallardan (ikkita zichlovchi, siquvchi, qo'yiluvchi halqalar) iborat. Zichlovchi halqalar porshenning past qismida joylashgan va mahsus boshcha bilan mahkamlangan, so'rish va haydash klapanlari klapan qutisida o'rnatilgan. Harakatlanish valdagi kulachoklar bilan amalga oshiriladi, val harakatni shesternali uzatma orqali tirsak valdan

oladi. Unumdorlik rostlagichi richag o'qini buradi, bunda richag urgichi va so'rish klapani orasidagi tirqish o'zgaradi [17].



4.10-rasm. ДВД-9 porshenli havo detanderi

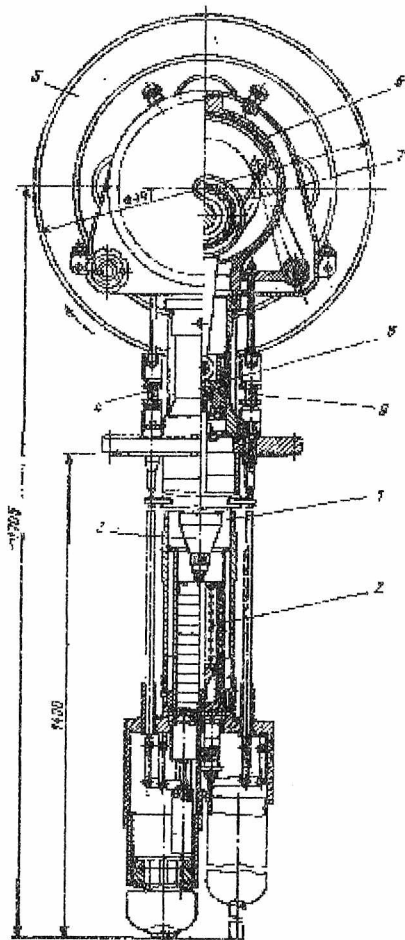
1 – karter; 2 – kreyskopf; 3 – silindr; 4 – kiritish klapani; 5 – sapuya; 6 – rama

ДВД-11 detanderi konstruksiyasi bo'yicha ДВД-9 detanderiga o'xshash. Qayd etish lozimki, ilgari HAQ uchun ko'plab detanderlar ishlab chiqarilgan: ДВД-6; ДВД-2; ДВД80/180; ДК-50. Bu mashinalar boshqalaridan deyarli prinsipial farqlanmaydi; gorizontal ДВД-6 dan boshqa barcha mashinalar vertikal bo'lib, kulachoklar tirsak valga o'rnatilgan, klapanlar esa tortgich va richaglar yordamida harakatlantirilgan. ДК-50 detanderida quvvatdan foydalanish maqsadida ichki kompressor, boshqa mashinalarda esa mexanik energiyani elektrga aylantirish uchun elektro generatorlar ishlatilgan. Detanderlarning ko'rib o'tilgan konstruksiyalari qator kamchiliklarga ega: gaz taqsimlash sistemasi aylanish chastotasini cheklab qo'yadi, natijada konstruksiyaning metall sig'imi ortadi; kompressor mashinalari bilan unifikatsiyalashmagan; klapanlar va porshen zichlagichlarining chidamliligi oz. Bularning hammasi katta va o'rta unumdorlikda porshenli detanderlar o'rniga turbodetanderlar qo'llanilishiga sabab bo'lgan.

Kriogen geliy qurilmalarining porshenli detanderlari. Geliy detanderlari konstruksiyasiga Dyu'ar konstruksiyasi ko'rinishida geliyni suyuqlantirish uchun bloklarni tayyorlash tendensiyasi ta'sir etgan. Geliyni suyuqlantirish bloki silindrik idishga solingan IAA ketma-ketligi qatoridan iborat, detander ham blokka joylashtirilgan, IAA o'rtasida o'rnatilgan. Bu konstruksiyaning o'ziga xos tomonidir. Geliy porshenli mashinalari vertikal mashinalar bo'lib, harakatlanish mexanizmi, blok qopqog'i tepada porshen guruhi va klapanlar pastda, sovuq zonada joylashgan, shuning uchun material bo'ylab issiqlik oqimini kamaytirish uchun detander konstruksiyasi uzunchoq shaklda yaratilgan [17].

Ko'pgina Rossiya detanderlarining asosi akademik P.L. Kapitsa taklif qilgan, keyinchalik I.B. Danilov rivojlantirgan takliflardan iborat. Asosiy muammo – ishonchli porshen zichlanishini yaratishdir. Tirqishli zichlagich qo'llanadi. Har qanday temperaturada tirqishni saqlab turilishini talab qilinishi konstruksiya va qo'llaniluvchi materialni tanlashni qiyinlashtiradi. Bu muammoni hal qilish uchun quyidagi variantlardan foydalanish mumkin: krioagentni sizib chiqishi hisobiga porshenni o'z-o'zini markazlashtirishidan foydalanish, antifriksion materiallarni qo'llash va manjet yoki halqalar bilan kanalni zichlovchi mashinalarni yaratish. Bu barcha konstruktiv echimlar ijobiy natijalarga olib keladi [17].

Gelini suyuqlantirish Г-45 mashinasining ГДСД-2 detanderi konstruksiyasini ko'rib chiqaylik (4.11-rasm). Detanderning krivoshipshatun mexanizmi yuqorida joylashgan. Energiya olish uchun uch fazali elektrogenerator ishlatilgan, detander shkifi bilan elektrogenerator tasmali uzatma bilan ulangan. Porshen juftligi tirqishli, tekstolit materialidan. Issiq holatda porshen va silindr o'rtasidagi tirqish $\Delta = 8 \div 12 \text{ mkm}$. Silindr IIIХ-15 po'latdan, porshen esa 20Х po'latdan yasalgan.



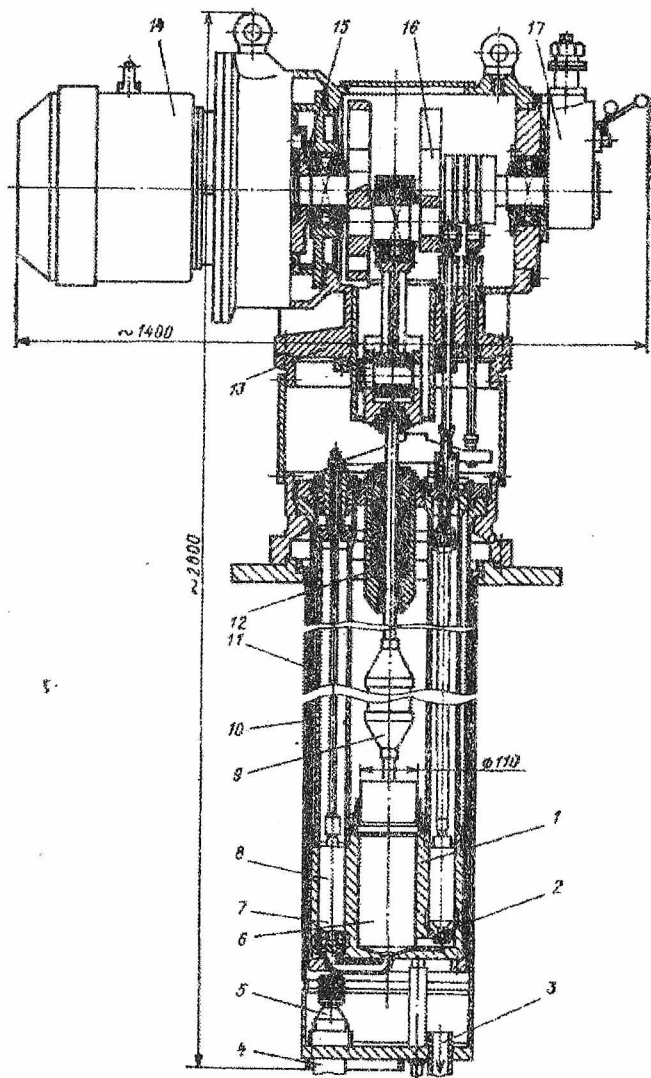
4.11-rasm. ГДСД-2 detanderining umumiy ko'rinishi: 1 – osilgan truba; 2 – porshen; 3 – shtok; 4 – kiritish klapanining yuritmasi; 5 – maxovik; 6 – detander korpusi; 7 – tirsak val; 8 – kryetskopf; 9 – chiqarish klapanining yuritmasi

Klapan tarelkasimon bo'lib, alohida korpusda o'rnatilgan. Klapanlar yuritmasi – cho'zuvchi turga mansub, bu tyaga turg'unligi yo'qolishiga yo'l qo'y maydi va ularning ko'ndalang kesimini kamaytirishga imkon beradi.

Klapanlar yuritmasi kulachokli. Kulachoklar profilining o'zgaruvchanligi c_0 va b_0 o'zgarishini ta'minlaydi va krioagent sarfini 60÷100% o'zgartirishga imkon beradi. Mashinaning silindrsimon qismi blok ichiga joylashtirilgan va yupqa devorli ko'taruvchi truba bilan tayanch plitaga birlashtirilgan. Harakatlanish mexanizmi porshenga shtok bilan birlashtirilgan, issiqlik oqimini kamaytirish uchun shtok trubkasimon konstruksiyaga ega. Porshen o'rnatilishi uchun porshen va kreyskopda joylashgan ikkita sharli sharnir ko'zda tutilgan, kreyskop Д16Г alyumin qotishmasidan porshen ko'rinishida yasalgan. Silindr kreyskopdan sovuq zonaga moyni o'tishi oldini olish uchun charm manjet qo'llanilgan.

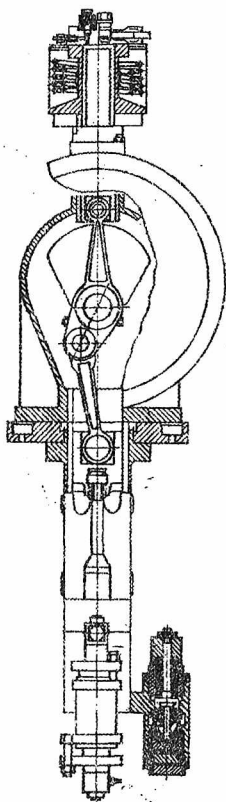
Detander korpusi – harakatlanish mexanizmi uchun tayanch, uning ichi 0,01÷0,03 MPa ortiqcha bosimli geliy bilan to'lgan. Detander tez aylanishdan markazdan qochma o'chirgich bilan himoyalangan. Qayd etish lozimki, Г-8, Г-3, КГУ-150/4,5 qurilmalari uchun ishlab chiqarilgan porshenli detanderlarning ko'pchiligi yuqorida bayon etilganidan kam farqlanadi.

Yirik geliy qurilmasi uchun mo'ljallangan ГДСД-5 detanderi ayrim farqli jihatlarga ega (4.12-rasm). Uning konstruksiyasini ko'rib chiqaylik. Elektrogenerator tirsak val bilan planetar uzatma orqali ulangan. Katta aylanish soniga ega valga maxovikni o'rnatilishi uning o'lchamlarini kamaytirish imkonini bergan. Porshen АФГМ materialidan tayyorlangan halqalar juftligi bilan zichlanadi. Klapanlarni silindr yon tomoniga joylashtirilishi foydasiz hajmni ko'payishiga olib kelgan, ammo sovuq zonada klapanlar yuritmasining richagidan voz kechish imkonini bergan. Detander o'zgarmas profilli kulachoklarga ega. Ish rejimida unumdorlik kulisa yordamida rostlanadi. Ishga tushirish kulachogi uzun cho'qqiga ega. Ishga tushish rejimidan ish rejimga o'tish mashina to'xtatmasidan amalga oshadi.



4.12-rasm. ГДСД-5 detanderi: 1 – tsilindr vtulkasi; 2 – chiqarish klapani; 3 – chiqarish trubasi; 4 – kiritish resiveri; 5 – paqillash klapani; 6 – porshen; 7 – klapanlar qutisi; 8 – kiritish klapani; 9 – kryetskopf; 10 – klapanlar qutisining trubasi; 11 – resiverlar blokining trubasi; 12 – shtok salnigi; 13 – detander korpusi; 14 – elektrogenerator; 15 – planetarli reduktor; 16 – harakatlanish mexanizmi; 17 – markazdan qochma o'chirgich

15÷20 K temperatura darajasida sovutish unumdorligini hosil qiluvchi porshenli detander KГY-150/4.2 geliy refrijerator qurilmasida ishlatiladi. Bu



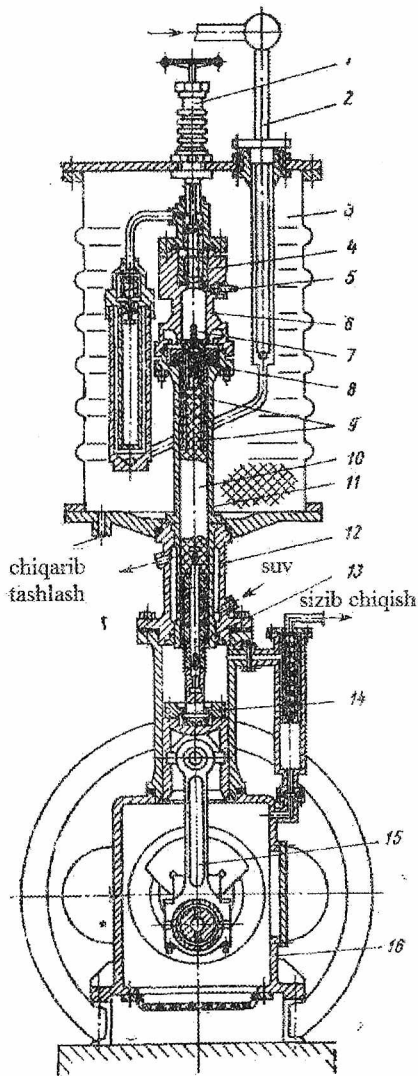
4.13-rasm. ДПГ-33-20/2,5 porshenli detander

turdagi yuqori unumdorlikdagi qurilmalarda turbodetanderlar ishlatiladi, shuning uchun soʻngi bosqich drossel qurilmalari oʻrniga porshenli detander qoʻllanadi. Masalan, ОПГ-300-1800/4.5 qurilmasida ДПГ-33-20/2.5 detandari ishlatilgan boʻlib (4.13-rasm), quyidagi parametrlarga ega: krioagent sarfi 2000 m³/soat; chiqish bosimi 0,25 MPa; kirish bosimi 2,0 MPa, kirish temperaturasi 7K; izotropik FIK 0,8; aylanish chastotasi 340 min.⁻¹.

Detander agregati detander va asosga o'rnatilgan pnevmotransport bosqichidan iborat. Detander bosqichida elektrik majburiy boshqaruvli ikkita klapan ishlatilgan. Kiritish klapani porshen siljishi bilan, chiqarish klapani esa gaz impulsi hisobiga ochiladi. Klapanlarni ochiq holatda ushlab turish elektromagnit yordamida amalga oshiriladi. Elektromagnit klapani ixtiyoriy vaqt davomida ushlab tura oladi. Pnevmtormoz silindrida o'zi harakatlanuvchi haydash klapani qo'llanilgan, so'rish jarayoni esa darchalar orqali amalga oshiriladi.

Detander silindrida tirqishli zichlagich ishlatilgan, lekin porshen ftoroplast bilan ishlangan. Vodородni suyuqlantirish qurilmalarida porshenli detanderlar ishlatiladi, ular kriogent sarfi etarlicha yuqori bo'lgan katta bosim $p_{kir} = 12 \div 15 \text{MPa}$ mashinalari hisoblanadi. Vodород porshen detanderlarini yasashida havo mashinalarining bazasi (harakatlanish mexanizmi) ishlatilgan. Shu tufayli bo'lsa kerak, detanderlari kriogen qurilmaga trubalar bilan birikkan alohida agregatdan iborat, geliy qurilmalarida esa blokka joylashgan.

Vodород porshen detanderining 4.14-rasmda tasvirlangan konstruksiyasini ko'rib chiqaylik. Detander unumdorligi 350 l/soat bo'lgan vodородni suyuqlantirish qurilmasida ishlatilgan. Harakatlanish mexanizmi odatiy – krivoship-shatun mexanizmi. Karter yaxshilab germetiklangan va vodород gazi bilan to'lgan. Porshen zichligi xona temperaturasida ta'minlanadi, ishqalanish issiqligi esa sovutuvchi suv tomonidan olinadi. Etarlicha uzun siqqich silindrning ishchi hajmini issiq zonadagi porshen zichlagichidan ajratib turadi. Silindrning pasttemperaturali qismi havosi so'rib olinuvchi qobiqda joylashgan. Issiqlik oqimini kamaytirish uchun qobiq shishapaxta bilan to'ldirilgan. Detanderning tormozlanishi suv nasosi bilan amalga oshiriladi, bu esa aylanishlar chastotasini rostdash imkonini beradi. YOg'sizlantirilgan va parafin shimdirilgan teridan tayyorlangan manjet bilan porshen zichlangan.



4.14-rasm. OJYH vodorod detanderi: 1 – to'ldirish bo'linmasini rostlash mexanizmi; 2 – truboprovod; 3- izolyatsion qobiq; 4- kiritish klapani; 5 – bosim datchigi; 6 – tsilindr; 7 – kiritish klapanining yuritmasi; 8 – chiqarish klapani; 9 – chiqarish klapanining yuritmasi; 10 – siqich; 11 – orali tsilindr; 12 – filtr; 13 – porshen zichlagichi; 14 – porshen; 15 – shatun; 16 – karter.

Detanderda klapani ichki yuritmalı gaz taqsimlash sistemasi ishlatilgan. Klapan tashqi yuritmalarini ishlatishga urinish mashinaning etarli germetikligini ta'minlab bera olmadi, chunki zichlash elementlari orqali krioagentni sizib chiqishi salnikni muzlab qolishiga, germetiklikni to'liq yo'qolishiga va vodorodni xonaga kirib qolish ehtimolini oshiradi. Bu mashina gaz oblastida ham, detander-suyuqlantirgich rejimida ham ishlaydi.

Glossariy

Boshlang'ich sovutish – ob'yektni ishchi temperaturagacha nostatsionar sovutish jarayoni.

Detander – gazning kengayish jarayoni amalga oshiriluvchi mashina.

Kompressor – gazning siqilish jarayoni amalga oshiriluvchi mashina.

Kriogen temperatura – $0 \div 120$ K intervaldagi temperatura.

Kriogen texnikasi – kriogen temperaturani olish yoki kriogen temperaturani amaliy qo'llash bilan bog'liq texnika sohasi.

Kriogenika – kriogen texnikasini rivojlantirish, qo'llash va tadqiq qilish bilan shug'ullanuvchi fan sohasi.

Kriogen tsikl – kriogen temperaturalarda qisman yoki to'liq sodir bo'luvchi termodinamik tsikl.

Krioagent – kriogen texnikasida ishchi jism sifatida gazsimon yoki konensatsiyalangan holda ishlatiluvchi va ish tsiklining loaqal bir bosqichida kriogen temperaturali modda yoki moddalar aralashmasi.

Ossillyatsiya – tebranish; parameter, ta'sirlarning ma'lum qonuniyat bo'yicha o'zgarishi.

Psevdokritik temperatura – psevdokritik nuqtaga mos keluvchi temperatura (psevdo – o'xshash, yoig'on).

Relaksatsiya – biror fizik sistemada muvozanat o'rnatilish jarayoni.

Reversiv IAA – issiqlik tashuvchilar apparatga navbatma-navbat kiruvchi, oqimlar almashinuvchi IAA.

Sovutish unumdorligi – atrof-muhit temperaturasidan past temperaturada kriogen mashina tomonidan vaqt birligi ichida olib ketilayotgan issiqlik miqdori.

Qisqartirilgan so'zlar

- ABS – avtomatik boshqaruv sistemasi
- DSB – dastlabki sovutish bloki
- GAQ – gaz ajratish qurilmalari
- HAQ – havoni ajratish qurilmalari
- IAA – issiqlik almashinish apparati
- IYOD – ichki yonuv dvigateli
- KS – kriogen sistema
- OTOR – ortiqcha teskari oqimli refrijerator
- PD – porshenli detander
- YASB – yakuniy sovutish bosqichi

Adabiyotlar

1. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы: Основы теории и расчета. М.: Машиностроение, 1988. – 464 с.
2. Яковлев В.Ф. Курс физики. Теплота и молекулярная физика. М.: Просвещение, 1976. – 320 с.
3. Физическое материаловедение. Том 1. Физика твердого тела / Под. ред. Б.А. Калина. М.: МИФИ, 2007. – 636 с.
4. https://bstudy.net/844729/tehnika/teploprovodnost_elektroprovodnost_meta%20ov_nizkih_temperaturah
5. http://ftemk.mpei.ru/ctlw/pubs/etm_expr/10.htm
6. Буткевич И.К. Криогенные установки и системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 151 с.
7. Лось В.И. Криогенная техника. Одесса: Одесская государственная академия холода, 2003. – 83 с.
8. Ануров С.А. Криогенные технологии разделения газов. М.: ООО «АР-Консалт», 2017. – 233 с.
9. Васютинский В.Ю. Теоретические основы криогенной техники. Одесса: Астропринт, 2009. – 240 с.
10. Проблемы криогенной техники и технологий: Сборник трудов./ Под общ. ред. А.В. Зайцева. – СПб.: НИУ ИТМО ИХиБТ, 2014. – 109 с.
11. Никифоров Ю.В., Казакова А.А., АLEXИНА М.Б. Процессы диффузии и адсорбции в инженерных задачах. М.: МГТУ им. Баумана Н.Э., 2019. – 64 с.
12. Леонов В.П. Расчет турбодетандера. М.: МГТУ им. Баумана Н.Э., 2019. – 32 с.
13. Yusupbekov N.R., Nurmuxamedov X.S., Zokirov S.G. Kimyoviy texnologiya asosiy jarayon va qurilmalari. T.: Fan va texnologiya. 2015. – 848 b.
14. Нурмухамедов Х.С., Темиров О.Ш., Туробжонов С.М. ва бошқалар. Газларни қайта ишлаш технологияси, жараён ва қурилмалари. Т.: Фан ва технология. 2016. – 856 б.
15. Zakirov S.G., Karimov K.F. The Choice of Heat-Exchange Devices With Tubes Having Ring Turbulizers on Base Exergy Analysis // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. website: www.ijetae.com (ISSN 2250-2459, ISO 9001:2008 certified journal, volume 6, Issue 5, May 2016).
16. Каримов К.Ф. Критерий эффективности поверхностей теплообмена // Химическая технология. 2009. №7. С. 425–429.
17. Новотельнов В.Н., Суслов А.Д., Полтараус В.Б. Криогенные машины. СПб.: Политехника, 1991. – 335 с.

MUNDARIJA

«Kriogen texnikasi» faniga kirish	3
1-bob. Kriogen sistemalari ishchi jismlarining xususiyatlari.	6
1.1 Muvozanat holatlari va sof moddalarning fazaviy o'tishlari.	6
1.2 Binar sistemalarning muvozanat holatlari va fazaviy o'tishlari.	9
1.3 Ideal gaz holati.	14
1.4 Real gazlar.	19
1.5 Qattiq moddalarning issiqlik-fizik xossalari.	26
1.6 Elektr o'tkazuvchanlik va o'ta o'tkazuvchanlik.	44
2-bob. Kriogen mashinalarning tsikllari.	53
2.1 Tsikllarning tarkibi, hisoblash uchun dastlabki ma'lumotlarni tanlash...	53
2.2 Drossellanish bilan kechadigan tsikllar.	72
2.3 Detanderli tsikllar.	88
2.4 Ishchi modda drossellanish va detanderda kengayish bilan kechadigan kombinatsiyalashgan tsikllar.	91
2.5 Gaz sovutish mashinalarining tsikllari.	94
2.6 Havoni ajratishda qo'llaniladigan kriogen mashinalar.	97
3-bob. Past temperaturalarda issiqlik almashinish.	112
3.1 Kriogen sistemalarda issiqlik almashinishning o'ziga xos tomonlari. Issiqlik o'tkazuvchanlik.	112
3.2 Konvektiv issiqlik almashinish.	116
3.3 Qaynashdagi issiqlik almashinish. Ikki fazali oqimning kanallarda harakatidagi issiqlik almashinishi.	119
3.4 Issiqlik almashinish apparatlari. Kriogen sistemalari issiqlik almashinish apparatlarining o'ziga xos xususiyatlari, ularning turlari vasamaradorligi.	123
3.5 Issiqlik almashinish apparatlarini hisoblash.	124
3.6 Trubkali issiqlik almashinish apparatlari.	135
3.7 Regeneratorlar.	137
3.8 Plastina-qovurg'ali issiqlik almashinish apparatlari.	138
3.9 Matritsali issiqlik almashinish apparatlari.	139
3.10 Issiqlik almashinish apparatlaridagi ikkilamchi effektlar.	143
4-bob. 4.1 Porshenli detanderlar.	147
4.2 Porshenli detanderlarning ish ko'rsatgichlari, aniqlanuvchi parametrlar. ...	147
4.3 Detanderlarning energetik balansi, yo'qotuvlar va samaradorlikni baholash.	156
4.4 Real kriogent bilan silindrda kechadigan jarayonlar.	161
4.5 Porshenli detanderlarni hisoblash.	168
4.6 Porshenli detanderlarning konstruksiyalari	172
Glossariy.	182
Qisqartirilgan so'zlar.	183
Adabiyotlar.	184

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение в курс «Криогенная техника»	3
Глава 1. Свойства рабочих веществ криогенных систем	6
1.1 Равновесные состояния и фазовые переходы чистых веществ.	6
1.2 Равновесные состояния бинарных систем и фазовые переходы	9
1.3 Идеальное газовое состояние.	14
1.4 Реальные газы.	19
1.5 Теплофизические свойства твердых тел.	26
1.6 Электрическая проводимость и сверхпроводимость.	44
Глава 2. Циклы криогенных машин	53
2.1 Состав циклов, выбор исходных данных для расчета.	53
2.2 Циклы с дросселированием.	72
2.3 Детандерные циклы.	88
2.4 Комбинированные циклы с дросселированием и расширением рабочего вещества в детандерах.	91
2.5 Циклы газовых холодильных машин.	94
2.6 Криогенные машины, применяемые в разделении воздуха.	97
Глава 3. Теплообмен при низких температурах	112
3.1 Особенности теплообмена в криогенных системах. Теплопроводность.	112
3.2 Конвективный теплообмен.	116
3.3 Теплообмен при кипении. Теплообмен при движении двухфазного потoka в каналах.	119
3.4 Теплообменные аппараты. Особенности криогенных теплообменников, их классификация и эффективность.	123
3.5 Расчет теплообменных аппаратов.	124
3.6 Трубчатые теплообменные аппараты.	135
3.7 Регенераторы.	137
3.8 Пластиночато-ребристые теплообменные аппараты.	138
3.9 Матричные теплообменные аппараты.	139
3.10 Вторичные эффекты в теплообменных аппаратах.	143
Глава 4. 4.1 Поршневые детандеры	147
4.2 Характеристические показатели, определяемые показатели поршневых детандеров.	147
4.3 Энергетический баланс детандеров, потери и оценка эффективности.	156
4.4 Процессы, происходящие в цилиндрах с реальными криоагентами.	161
4.5 Расчет поршневых детандеров.	168
4.6 Конструкции поршневых детандеров.	172
Глоссарий	182
Сокращенные слова	183
Литература	184

CONTENT

Introduction to the course "Cryogenic Engineering"	3
Chapter 1. Properties of working substances of cryogenic systems.	6
1.1 Equilibrium states and phase transitions of pure substances.	6
1.2 Equilibrium states of binary systems and phase transitions.	9
1.3 Ideal gas state.	14
1.4 Real gases.	19
1.5 Thermophysical properties of solids.	26
1.6 Electrical conductivity and superconductivity.	44
Chapter 2. Cycles of cryogenic machines.	53
2.1 The composition of the cycles, the choice of initial data for the calculation.	53
2.2 Cycles with throttling.	72
2.3 Expander cycles.	88
2.4 Combined cycles with throttling and expansion of the working substance in expanders.	91
2.5 Cycles of gas refrigeration machines.	94
2.6 Cryogenic machines used in air separation.	97
Chapter 3. Heat transfer at low temperatures.	112
3.1 Features of heat transfer in cryogenic systems. Thermal conductivity.	112
3.2 Convective heat transfer.	116
3.3 Heat transfer during boiling. Heat transfer during the movement of a two-phase flow in the channels.	119
3.4 Heat exchangers. Features of cryogenic heat exchangers, their classification and efficiency.	123
3.5 Calculation of heat exchangers.	124
3.6 Tubular heat exchangers.	135
3.7 Regenerators.	137
3.8 Plated-finned heat exchangers.	138
3.9 Matrix heat exchangers.	139
3.10 Secondary effects in heat exchangers.	143
Chapter 4. 4.1 Piston expanders	147
4.2 Characteristic indicators determined by indicators of piston expanders.	147
4.3 Energy balance of expanders, losses and efficiency assessment.	156
4.4 Processes in cylinders with real cryoagents.	161
4.5 Calculation of piston expanders.	168
4.6 Piston expander designs.	172
Glossary.	182
Abbreviated words.	183
Literature.	184

QUDRATILLA FUADOVICH KARIMOV

KRIOGEN TEXNIKASI

DARSLIK

Muharrir Z.N.Buranov

Bosishga ruxsat etildi 27.12.2021y. Bichimi 60X84 $\frac{1}{16}$. Bosma tabog'i 11,75. Shartli bosma tabog'i 11,75. Adadi 50 nusxa.

Buyurtma № 53. Bahosi kelishilgan narxda.

“Universitet” nashriyoti. Toshkent, Talabalar shaharchasi,
O'zMU ma'muriy binosi.

O'zbekiston Milliy universiteti bosmaxonasida bosildi.
Toshkent, Talabalar shaharchasi, O'zMU.