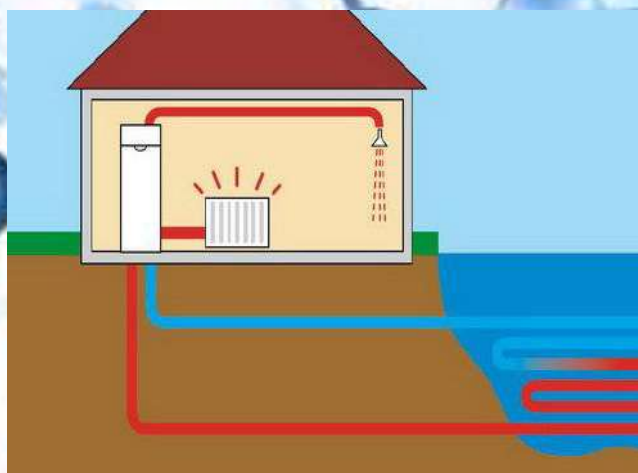


ULUKMURADOV A.N. TURAYEV B.E.
YADGAROV I.D. XAQQULOV J.M

ISSIQLIK TEXNIKASI



O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI OLIY VA O'RTA
MAXSUS TA'LIM VAZIRLIGI
TOSHKENT TO'QIMACHILIK VA YENGIL SANOAT
INSTITUTI

ULUKMURADOV A.N. TURAYEV B.E. YADGAROV I.D. XAQQULOV J.M

ISSIQLIK TEXNIKASI

(darslik)

5320300-Texnologik mashinalarvajihozlar

5610600-Xizmat ko'rsatishtexnikasivatexnologiyasi

Toshkent-2019



ASOSIY SHARTLI BELGILAR

T – absolyut temperatura, K;

t – muzning erish nuqtasidan hisoblanadigan temperatura, °S.

Δt – temperaturalar farqi, °S;

ρ – zichlik, kg/m³;

v – solishtirma hajm, m³/kg;

V – hajm, m³;

m – massa, kg;

p – bosim, Pa (N/M²), kPa, MPa;

Δp – bosimlar farqi, Pa (N/m²), kPa, MPa;

R – gaz doimiysi, J/(kg·K);

μ – molekulyar massa;

c – solishtirma issiqlik sig'imi, kJ/(kg·K);

c^1 – solishtirma hajmiy issiqlik sig'imi, kJ/(m³·K);

μc – molyar issiqlik sig'imi, kJ/(kmol·K);

q – solishtirma issiqlik miqdori, J/kg;

Q – issiqlik miqdori, J;

ℓ – ish, J/kg;

u – ichki energiya, J/ kg

Δu – ichki energiyaning o'zgarishi, J/kg;

h – solishtirma entalpiya, J/kg;

Δh – entalpiyaning o'zgarishi, J/kg;

s – entropiya, J/(kg·K);

Δs – entropiyaning o'zgarishi, J/(kg·K);

r – bug' hosil qilish issiqligi, kJ/kg;

d – namlik miqdori, g/kg quruq havo;

φ – nisbiy namlik, %;

B – yoqilg'i sarfi, kg/s;

b – yoqilg'ining solishtirma sarfi, kg/(kVt·s);

D – bug' unumdorligi, kg/s;

Q_q, Q_{yu} – yoqilg'ining quyi va yuqori yonish issiqligi, kJ/kg;

ε – sovitish koefitsienti, siqilish darajasi;

η_t – termik F.I.K;

χ – issiqlik o'tkazuvchanlik koefitsienti, Vt/(m·K);

α – issiqlik berish koefitsienti, Vt/(m²·K);

k – issiqlik uzatish koefitsienti, Vt/(m²·K);

N – quvvat, kVt.

BIRINCHI BOB

ISSIQLIK TEXNIKASINING TERMODINAMIK ASOSLARI

1.1. TERMODINAMIKA VA UNING USLUBI

Termodinamika - energiyaning aylanish (o'zgarish) qonuniyatlari haqidagi fandir. Termodinamikaga XIX asrda asos solingan edi. Bu davrda issiqlik dvigatellarining taraqqiyoti tufayli issiqlikning ishga aylanish qonuniyatlarini o'rganish zaruriyati tug'ildi. Lekin shundan keyin termodinamika metodi issiqlik texnikasi chegarasidan o'tib, fizika, kimyo va boshqa fanlarning ko'pchilik sohalarida keng ko'lamda qo'llanila boshladi.

Termodinamika turli fizikaviy va kimyoviy jarayonlarning u yoki bu sistemalarda qaysi yo'nalishda sodir bo'lishini aniqlashga imkon beradi. Termodinamika moddaning turli xossalari orasidagi chuqur bog'lanishlarni ochib beradiki, biz buni keyinchalik ko'ramiz; aslini olganda bu narsa moddaning bironta xossasi, masalan, issiqlik sig'imi haqidagi ma'lumotlarga ega bo'lingan holda uning issiqlik sig'imini hisoblab topishga imkon beradi.

Termodinamika fizika va kimyoning ko'pchilik sohalaridan farqli o'laroq, moddalar tuzilishining biror modellari bilan ish ko'rmaydi va, umuman olganda, moddaning mikrostrukturasi to'g'risidagi tasavvur bilan bevosita bog'lanmagan¹. Termodinamikaning kuchi ham, zaifligi ham ana shundadir. Termodinamika o'zi modda xossalari haqida bironta malumot bera olmaydi. Lekin moddalar sistemalar xossalari haqidagi ba zi bir malumotlar ma lum bo'lsa, u holda termodinamikaviy metodlar qiziqarli va juda muhim xulosalar chiqarishga imkon beradi.

Termodinamikaning tuzilish printsiipi juda sodda. Termodinamika asosiga tajriba yo'li bilan aniqlangan ikkita asosiy qonun (yoki ayrim hollarda boshlanishi ham deyiladi) qo'yilgan. Termodinamikaning birinchi qonuni energiya aylanish jarayonlarining miqdoriy tomonini xarakterlaydi, ikkinchi qonun esa fizikaviy sistemalarda sodir bo'ladigan jarayonlarning sifatiiy tomonini (yo'nalganligini) belgilaydi. Faqat shu ikkita qonundan foydalanib, qat iiy deduktsiya metodi yordamida termodinamikaning barcha asosiy xulosalarini chiqarish mumkin.

Termodinamikaning asosidagi qonunlarni tadbiq qilish mumkin bo'lgan barcha sistemalar uchun termodinamikani qo'llash mumkin. Termodinamikaning birinchi qonuni energiyaning saqlanish va aylanish qonunining miqdoriy ifodasidan iboratligi va umumiy xarakterga ega ekanligini quyida ko'ramiz. Ikkinchi qonunga kelsak, u bizning bevosita kuzatishimiz mumkin bo'lgan chegarada mikrosistemalarni kuzatishda to'plangan tajribaga asoslanadi.

1.2. Holat parametrlari

Moddalar, odatda, quyidagi uchta asosiy holatning bittasida bo'ladi: gaz, suyuqlik va qattiq jism ko'rinishida. Plazma deb ataluvchi ionlangan gazni ba'zan moddaning to'rtinchi holatidan iborat deb hisoblaydilar.

Bitta jismni o'zi turli sharoitlarda turli holatlarda bo'lishi mumkinligi muqarrardir. Tekshirilayotgan jism berilgan o'zgarmas sharoitlarda har doim bitta holatdagina bo'ladi, masalan, suv atmosfera bosimi va 200°S temperaturada faqat bug' ko'rinishida bo'ladi.

Tekshirilayotgan modda holatini aniqlash uchun modda holatining holat parametrlari deb yuritiladigan qulay tavsifnomalari kiritiladi. Moddaning xossasi intensiv va ekstensiv bo'lishi mumkin. Tizimdagi modda miqdoriga bog'liq bo'lmagan xossalar intensiv xossalar deb aytiladi (bosim, temperatura va boshqalar).

Modda miqdoriga bog'liq bo'lgan xossalar ekstensiv xossalar deb aytiladi. Solishtirma, ya'ni modda miqdori birligiga nisbatan olingan ekstensiv xossalar intensiv xossalar ma'nosiga ega bo'lib qoladi. Masalan, solishtirma hajm, solishtirma issiqlik sig'imi va shunga o'xshashlar intensiv xossalar sifatida tekshiriladi.

Termodinamikaviy tizimlarning holatini belgilovchi intensiv xossalar tizim holatining termodinamikaviy parametrlari deb aytiladi. Holat parametrlaridan eng ko'p tarqalgani jismning absolyut temperaturasi, absolyut bosimi va solishtirma hajmidir.

1.3. Temperatura va termometrlar

Kundalik hayotimizda temperatura issiq yoki sovuqni o'lchovi hisoblanadi. Issiq pech juda yuqori va ko'ldagi muzlagan suv past temperaturaga ega. Modda xususiyati temperatura o'zgarishi bilan o'zgaradi. Masalan: ko'pgina materiallarning temperaturasi ortishi bilan ular kengayadi. Temir balka sovuq holatidan ko'ra, issiq holatida uzunroq bo'ladi. Beton yullar va yo'laklar ham ma'lum intervalda joylarga ma'lum temperaturaga muvofiq ravishda tortiladi va siqiladi (1.1-rasm).



1.1-rasm. Ko'priknig ulangan qismining kengayishi. Eslatma: yo'ldagi oq chiziq bu shossening markazi.

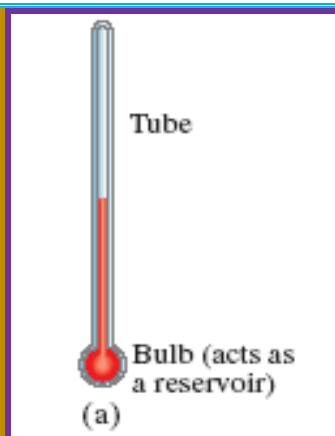
Moddaning elektr xususiyatlari temperatura o'zgarishi bilan o'zgaradi. Yuqori temperaturada nurlanayotgan moddaning rangi o'zgaradi: gaz plitasidagi olovning temperaturasi yuqori bo'lganda qizil rang bo'ladi. Temirga o'xshash qattiq jismlar ham yuqori temperaturalarda zarg'aldoq yoki oq rangda nurlanadi. Cho'g'lanma lampadagi volfram simning juda ham qizishidan oq yorug'lik tarqaladi. Quyosh va yulduzlarning nurlanish rangidan (aniqrog'i to'lqin uzunligidan) ularning temperaturasini o'lchash mumkin.

Temperaturani o'lchaydigan asboblarni termometrlar deb ataladi. Termometrlar moddaning harorati o'zgarishi bilan uning xossalari o'zgarishiga qarab turlicha bo'ladi. Ko'pgina termometrlar moddaning harorati ortishi bilan uning kengayishiga asoslangan. Birinchi bo'lib, gazning kengayishiga asoslangan termometrni Galileo kashf etgan. Hozirda ham qadimda ishlatilganidek, odatdagi termometrlar qizil bo'yoqli simob yoki spirt bilan to'ldirilgan shisha idishdan tashkil topgan (1.2 rasm).

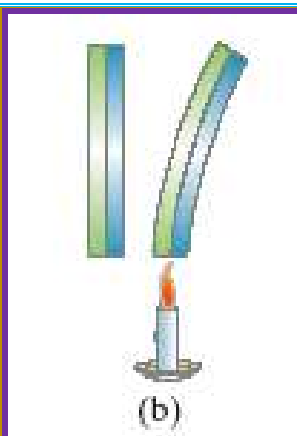


1.2-rasm. Italiya, Florensiyaning del Simento akademiyasida yasalgan eng birinchi va mashhur bo'lgan termometrlar.

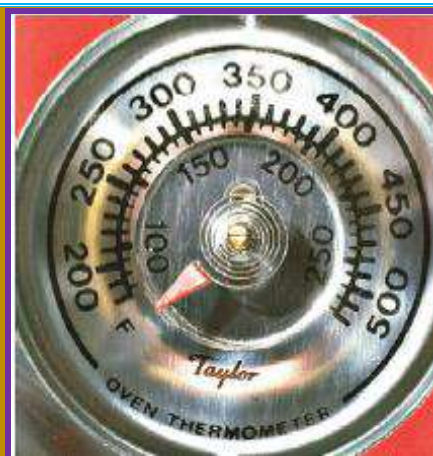
Termometrda suyuqlik shisha idishga qaraganda tezroq kengayadi va sathi ortadi (1.3a-rasm). Metallar ham harorat ortishi bilan kengayadi, lekin bu haroratni juda kichik o'zgarishlarini o'lchab berolmaydi. Shunga qaramay, ikta turli xil kengayadigan metallarni birlashtirib ham foydali termometr yasash mumkin (1.3b-rasm). Harorat ortishi bilan turli xajmdagi bimetal polosalar egiladi. Ko'pincha, g'altak ko'rinishidagi bimetall polosalarning bir uchi mahkamlanib, bir uchi esa ko'rsatgichga ulanadi (1.4 rasm). Bunday termometrlar odatda, pechlarda, avtomat ravishda o'chadigan elektr choynaklarda, xona termostatlarida konditsionerlarini yoqish yoki o'chirish uchun ishlatiladi. Juda katta aniqlikda ishlovchi termometrlar elektr xususiyatiga ega, bunday termometrlarga, qarshilik termometrlari, termoparalar va termistorlar kiradi¹.



1.3a-rasm. Simob yoki spitr bilan to'ldirilgan termometr
Eslatma: tube-probirk



1.3b-rasm.
Bimetall polasa



1.4-rasm. Bimetall polosa ishlatiladigan g'altakli termometr

¹ Giancoli, Douglas C. General Physics. New York : Pearson Prentice Hall, 2014

Termometr shkalasi. Temperaturani qiymat jihatdan o'lchash uchun, qandaydir o'lchov shkalasini aniqlash kerak. Bugungi kunda eng ko'p tarqalgan shkala bu Selsiy shkalasidir. AQShda esa Farengeyt shkalasi keng tarqalgan. Ilmiy ishlarda absolyut va muhim shkala Kelvin shkalasi bo'lib, u haqida bu bobda muhokama qilinadi.

Temperatura shkalasini aniqlash usuli bu, ihtiyoriy ikki temperaturaga qiymat berishdir. Bu ikki Selsiy va Farengeyt shkalalari uchun normal atmosfera bosimidagi muzlash va qaynash nuqtasining muallaq qiymati qabul qilingan. Selsiy shkalasida bu qiymatlar muzlash nuqtasi 0°C ("Selsiy shkalasi bo'yicha nol gradus") va qaynash nuqtasi 100°C deb tanlangan. Farengeyt shkalasida esa, muzlash nuqtasi 32°F va qaynash nuqtasi 212°F ga teng. Amalda termometr, bu ikki haroratni kerakli muhitda juda diqqat bilan suyuqlik satxini yoki ko'rsatkichini tekshirib tayyorlangan va kalibrovkalangan. Selsiy shkalasi uchun bu ikki harorat oralig'i 100 ta teng intervalga 0° dan 100° gacha bo'lingan ("yuz gradusli Selsiy" atamasi yuzta qadam ma'nosini bildiradi). Farengeyt shkalasidagi 32°F dan 212°F gacha bo'lgan qiymat oralig'i esa 180 ta teng intervalga bo'lingan. Suvni muzlash va qaynash haroratidan katta bo'lgan nuqtalarida shkalada ishlatilgan intervalda shkalani kengaytirish mumkin. Lekin shunga qaramay, termometrlar o'z imkoniyatlaridan kelib chiqqan holda ishlatiladi, masalan, spirtli termometr spirtning parlanish haroratidan katta haroratlarda foydalanib bo'lmaydi. Juda yuqori va past haroratlarda maxsus termometrlar foydalaniladi, bu haqida keyinroq eslatamiz.

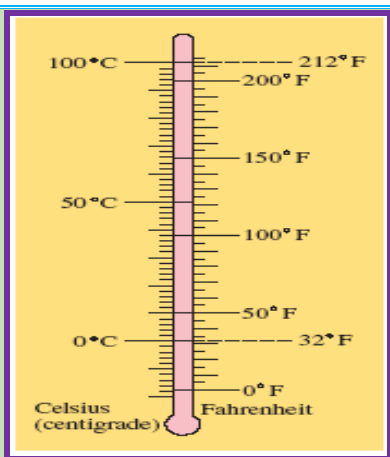
Selsiy temperaturasidagi har bir shkala, Farengeyt shkalasidagi ma'lum shkalaga mos keladi 9-5 rasm. U shkaladan bu shkalaga o'tishda, 0°S 32°F ga tengligini, Selsiy shkalasidagi 100° li diapazon Farengeyt shkalasida 180° ekanligini unutmaslik lozim. Shunday qilib, bir gradus Farengeyt (1°F), $100/180=5/9$ Selsiy gradusi (1°S)ga teng. Ya'ni, $1^{\circ}\text{F}=5/9^{\circ}\text{S}$. (aniq bir harorat haqida Selsiy gradusi bo'yicha " 20°C " deb aytilganiga ahamiyat bering. Lekin harorat qandaydur intervalga o'zgarganda faqat gradus Selsiy " 2°S " deb aytiladi). Haroratni ikki temperatura shkalasiga o'tkazish uchun quyidagi amallarni bajaramiz:

$$T(^{\circ}\text{S})=5/9[T(^{\circ}\text{F})-32] \quad (1.1)$$

Yoki

$$T(^{\circ}F) = 5/9 T(^{\circ}S) + 32 \quad (1.2)$$

Bu amallarni eslab qolish o'rniga osongina, $0^{\circ} S$ $32^{\circ} F$ ga tengligini va $5^{\circ} C$ $9^{\circ} F$ ga tengligini eslab qolish qulayroq. Muzlash nuqtasi suyuqlik harorati o'zgarishi bilan, hech qanday boshqa bir suyuqliksiz qattiq va suyuq holatga o'tuvchi suyuqlik bilan aniqlanadi. Eksperimental ravishda bu faqatgina berilgan bosimda, aniq bir haroratda sodir bo'ladi. Qaynash nuqtasi ham shu tariqa aniqlanadi, faqat bu nuqtalar bosim o'zgarishi bilan o'zgaradi. Shuning uchun bosim albatta ko'rsatilishi lozim (odatda bu 1 atmosfera bosimida bo'ladi).



1.5 - rasm.. Selsiy va Farangeyt shkalasini taqqoslash.

Celsius – Selsiy, Fahrenheit
– Farangeyt, Centigrade - shkala

Temperatura – makroskopik sistemalarning muvozanat holatini xarakterlovchi fizik kattalik.

Hozirgi vaqtda ikkita temperaturaviy – termodinamik temperatura (T) shkalasidagi temperatura kelvinlarda (K) va xalqaro amaliy temperatura shkalasida (t) temperatura selsiy graduslarida ($^{\circ}S$) darajalangan shkalani ishlatish mumkin.

Xalqaro amaliy temperatura shkalasida suvning $1,013 \cdot 10^5$ Pa bosimda muzlashi va qaynashi mos ravishda 0 va $100^{\circ}S$ (Selsiy shkalasida ikki belgilar orasi 100 ga teng intervallarga bo'lingan, shuning uchun “ Yuz gradusli shkala” nomi “ yuz qadam” ni bildiradi)[1].

Termodinamik shkala bo'yicha bu nuqtada temperatura 273,16 K teng.

Suvning muzlash temperaturasi termodinamik shkalasi bo'yicha $273,15 K$ teng (shu bosimda xalqaro amaliy shkaladagi kabi), shuning uchun termodinamik temperatura va xalqaro amaliy temperatura shkalalari quyidagi munosabat yordamida bog'langan:

$$T=273,15+t \quad (1.3)$$

Shkalaning boshlang'ich nuqtasi sifatida nol gradus Kelvin $0\text{ K} = 273,15^{\circ}\text{S}$ qabul qilingan. Bu temperaturada ideal gazning bosimi nolga teng bo'ladi, ya'ni molekulalarning xarakati to'xtaydi. 0 K dan pastki temperatura bo'lishi mumkin emas va shu bilan birga bu temperaturaga etishib bo'lmaydi. Hozir turli temperatura shkalalari – Selsiy, Farangeyt, Reomyur va Renkin shkalalaridan foydalaniladi. Bu shkalalar orasidagi nisbat 1.1- jadvalda keltirilgan.

Termodinamikaviy tadqiqotlarda 1848 yilda buyuk ingliz olimi Kelvin taklif etgan shkaladan foydalaniladi. Kelvin shkalasining noli sifatida ideal gaz molekularining tartibsiz harakati to'xtaydigan temperatura qabul qilingan: bu temperatura absolyut nol deyiladi. Absolyut nol Selsiy shkalasi bo'yicha – $273,15\text{ K}$ temperaturaga muvofiq keladi. Kelvin shkalasi bo'yicha hisoblanadigan temperatura doimo musbat bo'ladi. U absolyut temperatura yoki Kelvin bo'yicha temperatura deyiladi va K bilan belgilanadi.

Turli temperatura shkalalari orasidagi nisbat

1.1 jadval.

Shkalalarning nomi	Selsiy shkalasi, $t,^{\circ}\text{S}$	Renkin shkalasi, $T,^{\circ}\text{Ra}$	Farangeyt shkalasi, $t,^{\circ}\varphi$	Reomyur shkalasi, $t,^{\circ}\text{R}$
Selsiy shkalasi, $^{\circ}\text{S}$	-	$\frac{3}{9}T^{\circ}\text{Ra} - 273,15$	$\frac{t^{\circ}\varphi - 32}{1,8}$	$1,25t^{\circ}\text{R}$
Renkin shkalasi, $^{\circ}\text{Ra}$	$1,8(t^{\circ}\text{S} + 273,15)$	-	$t^{\circ}\varphi + 459,67$	$1,8(1,25t^{\circ}\text{R} + 273,15)$
Farangeyt shkalasi $^{\circ}\varphi$	$1,8t^{\circ}\text{S} + 32$	$t^{\circ}\text{Ra} - 459,67$	-	$\frac{9}{4}t^{\circ}\text{R}$
Reomyur shkalasi, $^{\circ}\text{R}$	$0,8t^{\circ}\text{S}$	$0,8(\frac{5}{9}T^{\circ}\text{Ra} - 273,15)$	$\frac{4}{9}(t^{\circ}\varphi - 32)$	-

Absolyut bosim. U jism sirtiga normal bo'yicha ta'sir etuvchi va bu sirtning yuza birligiga nisbatan olingan kuchdan iborat. Bosimni o'lchash uchun turli

birliklar: Paskal (Pa), bar, atmosfera (1 kg/sm^2), suv yoki simob ustuni millimetri ishlatiladi.

Hajm. Moddaning solishtirma hajmi moddaning zichlik birligi egallagan hajmdan iborat. Solishtirma hajm ν jism massasi m va uning hajmi V bilan quyidagi nisbat bilan bog'langan.

$$\nu = \frac{V}{m} \quad (1.4)$$

Moddaning solishtirma hajmi, odatda, m^3/kg yoki sm^3/gr hisobida o'lchanadi.

Zichlik

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{\nu} \quad (1.5)$$

odatda, kg/m^3 yoki g/sm^3 hisobida o'lchanadi.

Sof moddaning har qanday uchta holat parametri (P , ν va T) o'zaro bir qiymat bilan bog'langan. Bu moddalarni o'zaro bog'laydigan tenglama ayni moddaning holat tenglamasi deb aytiladi va uni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin.

$$F(P, \nu, T) = 0 \quad (1.6)$$

Holat parametrlari orasidagi bog'lanishni P, ν va T koordinatalar tizimida termodinamikaviy yuza ko'rinishida tasvirlash mumkin.

Koordinatalarning bunday turi, odatda moddalarning holat diagrammasi deb aytiladi.

1.4. Termodinamikaviy jarayon

Ham o'zaro, ham atrofdagi muhit bilan ta'sirlashib turuvchi material jismlar to'plamini termodinamikaviy tizim deb ataymiz, ko'rib chiqilayotgan tizim chegarasidan tashqarida bo'lgan boshqa barcha material jismlarni tashqi muhit deb atash qabul qilingan.

Agar holat parametrlaridan loqal bittasi o'zgarsa, u holda tizimning holati o'zgaradi, ya'ni tizimda termodinamikaviy, jarayon sodir bo'ladi.

Termodinamikaviy tizimda sodir bo'ladigan barcha jarayonlarni muvozanatdagi va muvozanatdagimas, qaytar va qaytmas jarayonlarga bo'lish

mumkin. Muvozanatdagi jarayon tizimning barcha qismlari bir xil temperaturaga va bir xil bosimga ega ekanligi bilan tavsiflanadi.

Jarayonning o'tish jarayonida tizimning turli qismlari har xil temperatura, bosim, zichlik va hokazolarga ega bo'lsa, bunday jarayon muvozanatdagimas jarayon deb aytiladi.

Har qanday real jarayon ma'lum darajada muvozanatdagimas holatda bo'ladi. Bundan keyin «jarayon» deganda biz muvozanatdagi jarayonni tushunamiz.

Termodinamikaning eng muhim tushunchalaridan biri qaytar va qaytmas jarayonlar haqidagi tushunchadir. Termodinamikaviy jarayon termodinamikaviy tizimning uzluksiz o'zgarib turadigan holatlari to'plamidan iboratdir.

Tizimning har qanday ikkita holati: 1 va 2 oralig'ida bitta yo'lning o'zidan o'tadigan ikkita jarayonni tasavvur etishi mumkin: holat 1 dan holat 2 ga va aksincha holat 2 dan holat 1 ga; bunday jarayonlar to'g'ri va teskari yo'nalishdagi jarayonlar deb aytiladi.

To'g'ri va teskari yo'nalishdagi jarayon natijasida termodinamikaviy tizim dastlabki holatiga qaytadigan jarayonlar qaytar jarayonlar deb aytiladi. To'g'ri va teskari yo'nalishlarda o'tkazilganda tizim dastlabki holatiga qaytmaydigan jarayonlar qaytmas jarayonlar deb aytiladi.

Tajribadan ma'lumki, o'z-o'zidan sodir bo'ladigan barcha tabiiy jarayonlar qaytmas bo'ladi; tabiatda qaytar jarayonlar bo'lmaydi. Tizimda o'z-o'zidan sodir bo'ladigan har qanday jarayon va binobarin, qaytmas jarayon tizimda muvozanat qaror topmaguncha davom etadi.

Tajriba shuni ko'rsatadiki, muvozanatga erishgan tizim keyinchalik shunday holatda qolaveradi, ya'ni holatini o'zicha o'zgartira olmaydi. Yuqorida aytib o'tilganlar asosida quyidagi natijaga kelish qiyin emas: tizim faqat muvozanat holatiga kelmaganiga qadargina ish bajara oladi.

1.5. Ideal gaz. Ideal gaz qonunlari

XVII – XIX asrlarda atmosfera bosimiga yaqin bosimlarda gazlar o'zini qanday tutishini tekshirgan tadqiqotchilar emperik yo'l bilan bir qancha muhim qonuniyatlarni ochdilar.

Boyl–Mariott qonuni: o'zgarmas temperaturada gazning berilgan massasi uchun absolyut bosimning hajmga ko'paytmasi o'zgarmas kattalikdir.

$$P \nu = \text{const} \quad (1.7).$$

Sharl qonuni: hajm va massa o'zgarmas bo'lganda gaz bosimi absolyut temperaturalarning o'zgarishiga to'g'ri proportsional ravishda o'zgaradi.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.8)$$

Bu bog'lanishni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin:

$$P = P_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (1.9)$$

Bu yerda P_0 - gazning 0°S temperaturadagi bosimi, α - gazning hajmiy kengayishining temperaturaviy koeffitsienti. Bosim yetarlicha kichik bo'lganda, turli gazlar bir xil hajmiy kengayish temperaturaviy koeffitsientiga ega bo'ladi. Bu koeffitsient taxminan $\alpha = 1/273 = 0,003661^\circ\text{S}^{-1}$ ga teng.

Gey -Lyussak qonuni: bosim va massa o'zgarmas bo'lganda gaz xajmi absolyut temperaturalarning o'zgarishiga to'g'ri proportsional ravishda o'zgaradi:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.10)$$

$$\text{yoki } V = V_0(1 + \alpha \cdot t) \quad (1.11)$$

bu yerda V_0 va V – gazning tegishli 0 va $t^\circ\text{S}$ temperaturalardagi xajmi.

Bu qonunlardan foydalanib, ideal gazning holat tenglamasini chiqarish mumkin: Massasi 1 kg ga teng bo'lgan biror gaz P_1, ν_1 va T_1 bilan tavsiflanadigan holatdan P_2, ν_2 va T_2 bilan tavsiflanadigan boshqa holatga o'tadi deb faraz qilaylik. Bu o'zgarish dastlab oraliq hajm ν^1 gacha o'zgarmas temperatura T_1 da, so'ngra esa oxirgi hajm ν_2 gacha o'zgarmas bosim P_2 sodir bo'lsin.

Boyl – Mariott qonuniga ko'ra $T = \text{const}$ bo'lganda:

$$p_1 v_1 = p_2 v^1 \quad \text{ёки} \quad v^1 = \frac{v_1 \cdot p_1}{p_2}$$

Gey –Lyussak qonuniga ko'ra $P=\text{const}$ bo'lganda

$$\frac{v^1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{ёки} \quad v^1 = \frac{v_2 T_1}{T_2}$$

Topilgan ifodalarni v^1 uchun taqqoslasak, quyidagini olamiz:

$$\frac{p_1 v_1}{p_2} = \frac{v_2 T_1}{T_2}$$

Bu tenglamani o'zgartirib shunday yozish mumkin:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2} = \text{const} \quad \text{yoki} \quad \frac{p v}{T} = \text{const} \quad (1.12)$$

ya'ni gazning absolyut bosimi bilan hajmi ko'paytmasining absolyut temperaturaga nisbati o'zgarmaydi. 1 kg gaz uchun bu o'zgarmas kattalik gaz doimiysi deyiladi va R harfi bilan belgilanadi.

$$\frac{p v}{T} = R \quad \text{yoki} \quad p v = R T \quad (1.13)$$

Bu tenglama ideal gazning holat tenglamasi deyiladi. Bu tenglama ko'pincha uni taklif etgan olimning nomi bilan Klapeyron tenglamasi deyiladi.

Gaz doimiysining o'lchamligi quyidagicha bo'ladi.

$$[R] = \left[\frac{p v}{T} \right] = \left[\frac{\text{Ж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right]$$

Binobarin, gaz doimiysi R , 1 kg gazning 1° ga isitilganda bajargan kengayish solishtirma ishidir. m kg gaz uchun holat tenglamasi quyidagicha:

$$P v = m R T \quad (1.14)$$

1 mol gaz uchun holat tenglamasi. Gaz holati tenglamasining uchinchi shakli bir mol uchun yoziladi. Shuni eslatib o'tamizki, gazning molekulyar og'irligiga son jixatdan teng bo'lgan kilogrammlar miqdori mol, boshqacha aytganda kilogramm-molekula deyiladi yoki kilomol deb aytiladi. Masalan kislorod (O_2) kilomoli 32 kg ga, karbonat angidrid (CO_2) kilomoli 44 kg ga teng va hokazo. Avagadro qonuniga ko'ra bir xil temperatura va bosimdagi turli gazlarning teng hajmlarida molekulalar soni bir xil bo'ladi.

Bu ta'rifga asoslanib, bir xil temperatura va bosimlarda olingan turli gaz mollarining hajmi o'zaro teng deb xulosa chiqarish mumkin. Agar ν –gazning solishtirma hajmi, μ –gazning molekulyar massasi bo'lsa, u holda molyar hajmi $\mu \cdot \nu$ ga teng. Ideal gazlar uchun:

$$\mu \cdot \nu = \text{const} \quad (1.15)$$

Avagadro soni (N_μ) eksperimental yo'l bilan aniqlangan $N_\mu = 6,022119 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$.

Normal sharoitlarda ($P=760 \text{ mm sim. ust. va } t=0^\circ\text{S}$)

$$\mu \cdot \nu = 22,4 \text{ m}^3 / \text{kmol} \quad (1.16)$$

$$R = \frac{p \cdot \nu}{T} = \frac{101325}{273,15} \cdot \nu = 371 \cdot \nu \quad (1.17)$$

Solishtirma hajm qiymatini (1.16) tenglamadan olib (1.17) tenglamaga qo'yganimizdan so'ng quyidagiga ega bo'lamiz:

$$R = \frac{8314}{\mu} \quad (1.18)$$

$$p \nu = \frac{8314}{\mu} T \quad (1.19)$$

$$\begin{aligned} p \mu \nu &= 8314 \cdot T \\ \mu \nu &= V \mu \end{aligned} \quad (1.20)$$

$$p V \mu = R_0 T \quad (1.21)$$

$$R_0 = \mu R \quad (1.21)$$

tenglama bitta kilomol uchun ideal gazning holat tenglamasi deb aytiladi.

$\mu R = R_0 = 8314 \frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ – universal gaz konstantasi deb aytiladi. (1.21) tenglama

Klapeyron – Mendeleev tenglamasi deyiladi.

1.6. Gazlar aralashmasi

Ish jismi ko'pincha bir necha gazlarning aralashmasidan iborat bo'ladi. Masalan, ichki yonuv dvigatellarida tarkibiga vodorod, kislorod, uglerod (II) – oksid,

azot, karbonat anhidrid va suv bug'leri kiradigan yonish maxsulotlari ish jismi hisoblanadi.

Gazlar aralashmasining barcha tarkibiy qismlari bir xil temperatura va bir xil hajmga ega, deb faraz qilaylik. Agar gazlar aralashmasi tarkibiga kiruvchi har qaysi komponent, barcha aralashma kabi, ideal gazning holat tenglamasiga bo'ysunadi deb hisoblasak, aralashmadagi ayrim-ayrim komponentlarning bosimlari Dalton qonuniga bo'ysunadi: bu qonunga ko'ra gazlar aralashmasining bosimi ayrim komponentlar partsial bosimlarining yig'indisiga teng.

$$p_{aral} = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

$$ya'ni \quad p_{aral} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1.22)$$

Bunda $p_1, p_2, \dots, p_n$ – aralashma komponentlarining partsial bosimlari.

Gazlar aralashmasidagi biror komponent aralashma temperaturasida bo'lib, bir o'zi shu aralashma egallagan hajmni to'ldirganda ko'rsatayotgan bosim ayni komponentning partsial bosimi deyiladi. Dalton qonuni ideal gazlar uchungina to'g'ri keladi.

Aralashma tarkibini ifodalash usullari. Gazlar ish aralashmasining tarkibi shu aralashma tarkibiga kiruvchi har qaysi komponentning miqdori bilan aniqlanadi. Aralashmaning tarkibi odatda massaviy, hajmiy va molyar ulushlar bilan ifodalanadi.

Agar massasi m bo'lgan aralashma n komponentdan tarkib topgan bo'lsa, u holda aralashmadagi ayrim komponentlarning massaviy ulushlari quyidagiga teng bo'ladi:

$$q_1 = \frac{m_1}{m}; \quad q_2 = \frac{m_2}{m}; \dots q_n = \frac{m_n}{m} \quad (1.23)$$

bu yerda $m_1, m_2, \dots, m_n$ - aralashmani hosil qiluvchi ayrim komponentlarning massalari.

Ma'lumki, gazlar aralashmasidagi ayrim komponentlar massalarining yig'indisi barcha aralashmaning massasiga teng bo'ladi:

$$m_1 + m_2 + \dots + m_n = m \quad (1.24)$$

Bu tenglik gazlar aralashmasi massaviy tarkibining tenglamasi deyiladi. (1.23) va (1.24) tenglamalardan ko'rinib turibdiki, gazlar aralashmasidagi ayrim komponentlar massaviy ulushlarining yig'indisi 1 ga teng.

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 1 \quad (1.25)$$

Agar n komponentdan tarkib topgan aralashmaning hajmi V bo'lsa, u holda aralashmadagi komponentlarning hajmiy ulushlari quyidagi tenglamalar bilan aniqlanadi:

$$r_1 = \frac{V_1}{V}; \quad r_2 = \frac{V_2}{V}; \quad r_n = \frac{V_n}{V} \quad (1.26)$$

bu yerda: $V_1, V_2, \dots, V_n$ – aralashma tarkibiga kiruvchi komponentlarning partsial hajmlari. Aralashma tarkibiga kiruvchi komponentning shu aralashmaning temperaturasidagi va bosimidagi hajmi uning partsial hajmi deyiladi. Aralashma hajmiy tarkibining tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi.

$$V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V \quad (1.27)$$

Gazlar aralashmasidagi komponentlar hajmiy ulushlarining yig'indisi birga teng:

$$r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_n = 1 \quad (1.28)$$

Bazi hollarda aralashma tarkibini mol ulushlari vositasida aniqlash qulay bo'ladi. Komponentning aralashmadagi mol ulushi deb, ko'rib chiqilayotgan komponentning mollari miqdorining aralashma mollarining miqdoriga bo'lgan nisbatiga aytiladi. Aralashma birinchi komponentning n_1 mollaridan, ikkinchi komponentning n_2 mollaridan va hokazolardan tarkib topgan bo'lsin.

Aralashma mollarining soni

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_n \quad (1.29)$$

va komponentlarning mol ulushlari quyidagi ifoda bilan aniqlanadi:

$$x_1 = n_1/n; \quad x_2 = n_2/n; \quad \dots \quad x_n = n_n/n, \quad (1.30)$$

bundan $x_1 + x_2 + \dots + x_n = 1$ yoki

$$\sum_{x=1}^n x_1 = 1. \quad (1.31)$$

Massaviy va hajmiy ulushlar orasidagi quyidagidek bog'lanishlar mavjud.

$$g_i = \frac{m_i}{m} = \frac{\rho_i V_i}{\rho V} = \frac{r_i \rho_i}{\rho} = \frac{r_i \nu}{\nu_i} \quad (1.32)$$

Avagadro qonuniga asosan va $mR = m_i R_i = 8314 \frac{J}{kmol \cdot K}$

$$q_i = r_i m_i / m = r_i R / R_i \quad (1.33)$$

$$r_i = q_i m / m_i = q_i \cdot R_i / R \quad (1.34)$$

Aralashmaning zichligi:

$$\rho = \sum r_i \rho_i \quad (1.35)$$

Aralashmaning solishtirma hajmi:

$$\nu = 1 / \sum (r_i / \rho_i) \quad (1.36)$$

Gaz doimiysi:

$$R = 1 / \sum (r_i / R_i) \quad (1.37)$$

Tuyulma molekulyar massa:

$$R = 8314 / \sum r_i M_i \quad (1.38)$$

1.7. Issiqlik sig'imi

Jismni bir gradusga isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori jismning issiqlik sig'imi deb aytiladi. Turli xil moddalarni bir xil temperaturagacha isitish uchun ularning har biriga turlicha miqdordagi issiqlik energiyasini uzatish zarur bo'ladi. Bu hol moddaning agregat holatiga va tuzilishiga bog'liq.

Bu ta'rifdan moddaning issiqlik sig'imi jismning ekstensiv xossasi ekanligi kelib chiqadi. Haqiqatan ham, ayni jism tarkibidagi moddalar qanchalik ko'p bo'lsa, shu jism issiqlik sig'imining kattaligi ham shunchalik katta bo'ladi.

Modda miqdori birligining issiqlik sig'imi solishtirma issiqlik sig'imi deb aytiladi. Solishtirma issiqlik sig'imi moddaning intensiv xossasidir, ya'ni uning kattaligi moddaning tizimdagi miqdoriga bog'liq bo'lmaydi. Biz bundan buyon faqat solishtirma issiqlik sig'imi bilan ish olib borishimiz tufayli solishtirma issiqlik sig'imini soddagina qilib issiqlik sig'imi deb ataymiz.

O'rtacha va haqiqiy issiqlik sig'imi. Issiqlik sig'imini c simvoli bilan belgilaymiz. Issiqlik sig'imining keltirilgan ta'rifidan

$$c = \frac{q_{1-2}}{t_2 - t_1} \quad (1.39)$$

ekanligi kelib chiqadi.

Bu yerda t_1 – boshlang'ich temperatura; t_2 – oxirgi temperatura; $q_{1-2} - t_1$ temperaturadan t_2 temperaturagacha isitish jarayonida modda miqdori birligiga keltirilgan issiqlik.

Issiqlik sig'imi o'zgarmas kattalik emas. Temperatura o'zgarishi bilan u o'zgaradi, shuning uchun ham (1.39) nisbat yordamida aniqlanadigan issiqlik sig'imi haqiqiy issiqlik sig'imi deb aytiladigan issiqlik sig'imidan farqli o'laroq t_1-t_2 temperaturalar intervalidagi o'rtacha issiqlik sig'imi deb aytiladi.

Haqiqiy issiqlik sig'imi, jismga uni isitish jarayonida keltiriladigan issiqlik miqdoridan shu jismning temperaturasi bo'yicha hosila olib aniqlanadi:

$$c = \frac{dq}{dt} \quad (1.40)$$

bundan

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c dt \quad (1.41)$$

Massaviy, molyar va hajmiy issiqlik sig'imi. Termodinamikada issiqlik sig'imi massaviy, molyar va hajmiy issiqlik sig'imlariga ajratiladi. Moddaning massasi birligining temperaturasini 1°S ga o'zgartirish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori massaviy issiqlik sig'imi deb aytiladi:

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta T} \cdot \left[\frac{J}{\text{kg} \cdot \text{grad}} \right] \quad (1.42)$$

Moddaning hajm birligiga keltirilgan issiqlik sig'imi hajmiy issiqlik sig'imi deb aytiladi:

$$c^1 = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta T} \cdot \left[\frac{J}{\text{m}^3 \cdot \text{grad}} \right] \quad (1.43)$$

Moddaning bitta moli (yoki kilomoli) ga keltirilgan issiqlik sig'imi molyar issiqlik sig'imi deb aytiladi:

$$\mu c = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{\Delta q}{\Delta T} \left[\frac{J}{\text{kmol} \cdot \text{grad}} \right] \quad (1.44)$$

Yuqoridagi kattaliklar o'rtasida quyidagidek bog'liqlik mavjud:

$$c = \mu c / \mu; \quad (1.45)$$

$$c^1 = \mu c / 22,4 \quad (1.46)$$

va

$$c^1 = c \rho \quad (1.47)$$

Issiqlik sig'iminin jarayonga bog'liqligi. Issiqlik keltirish jarayonning tavsifiga qarab jismning temperaturasi 1°S ga ko'tarish uchun shu jismga keltirish zarur bo'lgan issiqlik miqdori turlicha bo'ladi. Shuning uchun ham biz issiqlik sig'imi to'g'risida gapirar ekanmiz, ayni moddaga issiqlik qanday jarayon vositasida keltirish haqida aytib o'tishimiz lozim.

Boshqacha qilib aytganda, (1.37) nisbatdagi q kattalik faqat temperaturalar intervaliga emas, balki issiqlik keltirish jarayonining turiga ham bog'liq. Amalda izobarik ($p = \text{const}$) va izoxorik ($v = \text{const}$) jarayonlarning issiqlik sig'imlaridan eng ko'p foydalaniladi. Bu issiqlik sig'implari izobarik va izoxorik issiqlik sig'implari deb atalib, tegishli c_p va c_v orqali belgilanadi.

Shu bilan birgalikda c_v – massaviy izoxorik issiqlik sig'imi; c_v^1 – hajmiy izoxorik issiqlik sig'imi; μc_v – molyar izoxorik issiqlik sig'imi; c_p – massaviy izobarik issiqlik sig'imi; c_p^1 – hajmiy izobarik issiqlik sig'imi va μc_p – molyar izobarik issiqlik sig'implari bir-biridan farqlanadi.

Gaz o'zgarmas bosim yoki o'zgarmas hajmda turishiga qarab, uning temperaturasi 1° ga isitish uchun turli miqdordagi issiqlik zarur.

Izobarik issiqlik sig'imi izoxorik issiqlik sig'imidan har doim katta bo'ladi, chunki 1 kg gazni 1° ga $p = \text{const}$ sharoitida isitilganda, energiyani bir qismi kengayish uchun sarflanadi.

R. Mayer c_p va c_v orasidagi bog'liqlikni o'rganib, qo'yidagi tenglamani keltirib chiqardi:

$$c_p - c_v = R \quad (1.48)$$

Yuqoridagi tenglamani ikkala qismini molekulyar massa (μ) ga ko'paytirsak quyidagi natijani olamiz:

$$\mu c_p - \mu c_v = R\mu = 8314 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)} \quad (1.49)$$

yoki

$$\mu c_p - \mu c_v = 8314 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)} \quad (1.50)$$

Demak, barcha gazlar uchun molyar izobar va izoxor issiqlik sig'implari orasidagi ayirma o'zgarmas kattalik bo'lib, uning qiymati $8314 \text{ J/(kmol}\cdot\text{K)}$ yoki $2 \text{ kkal/(kmol}\cdot\text{K)}$ ga teng.

Real gazlar uchun $c_p - c_v = R$, chunki $p = \text{const}$ bo'lgan izobarik jarayonda tizim faqat tashqi kuchlarga qarshi ish bajaribgina qolmasdan, molekulalararo mavjud bo'lgan o'zaro tortishish kuchlariga qarshi ham ish bajaradi. Demak, $p = \text{const}$ va $v = \text{const}$ bo'lgan termodinamik jarayonlarda real gaz ish bajarishi va uning ichki energiyasini orttirish uchun ideal gazga nisbatan unga ko'proq issiqlik miqdori sarflanar ekan. Statistik fizika usullaridan foydalanib, ko'pchilik moddalarning issiqlik sig'implarini nazariy usul bilan hisoblash mumkin. Buning uchun molekulaning bitta erkinlik darjasiga to'g'ri keladigan $\frac{1}{2} k T$ energiyasidan foydalaniladi va bir, ikki va ko'p atomli gazning bir mol miqdoriga mos keluvchi issiqlik sig'implari topiladi.

1.2-jadvalda ideal gazlarning issiqlik sig'implari keltirilgan.

Termodinamikada o'zgarmas bosim va hajmdagi issiqlik sig'implari o'rtasidagi nisbatdan keng foydalaniladi. Bu nisbat k harfi bilan belgilanadi.

$$\kappa = c_p / c_v = c_p^1 / c_v^1 = \mu c_p / \mu c_v \quad (1.51)$$

Mayer tenglamasidan:

$$c_v = R/(k-1); c_p = kR/(k-1) \quad (1.52)$$

Agar $c = \text{const}$ deb hisoblasak 1.2-jadvaldan bir atomli gazlar uchun $k=1,67$; ikki atomli gazlar uchun $k=1,4$; uch va ko'p atomli gazlar uchun $k=1,29$ ga teng bo'ladi. 1 kg ideal gazni t_1 temperaturadan t_2 temperaturagacha isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$q = (c_m)_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = c_{m_2} \cdot t_2 - c_{m_1} \cdot t_1 \quad (1.53)$$

Ideal gazlarning issiqlik sig'implari

1.2 jadval

Gazlar	μC_v	μC_p	μC_v	μC_p
	kJ/(kmol·grad)		kkal/(kmol·grad)	
Bir atomli	12,56	20,93	3	5
Ikki atomli	20,93	29,31	5	7
Uch va ko'p atomli	29,31	37,68	7	9

1.53–formuladan c_p va c_v jarayonlar uchun quyidagi ifodani keltirib chiqarish mumkin:

$$q_v = C_{vm2} \cdot t_2 - C_{vm1} \cdot t_1 \quad (1.54)$$

va

$$q_p = C_{pm2} \cdot t_2 - C_{pm1} \cdot t_1 \quad (1.55)$$

Gazlar aralashmasining issiqlik sig'imi quyidagi formulalar asosida aniqlanadi:

Aralashmaning massaviy issiqlik sig'imi:

$$c_{ap} = \sum_1^n m_i \cdot c_i \quad (1.56)$$

Aralashmaning hajmiy issiqlik sig'imi:

$$c_{ap}^1 = \sum_1^n r_i \cdot c_i^1 \quad (1.57)$$

Aralashmaning molyar issiqlik sig'imi:

$$\mu c_{ap} = \sum_1^n r_i \cdot \mu c \quad (1.58)$$

1.8. Real gazlar

Oldin Klapeyron tenglamasiga bo'ysunadigan ideal gazlar ko'rib chiqilgan edi. Real moddalarning gazsimon va suyuq fazalardagi holat diagrammalari ideal gazning holat diagrammalaridan keskin farq qiladi.

Bunga sabab shuki, real va ideal gazlarning fizikaviy tabiatlari turlicha bo'ladi. Ideal gazlarda molekulalar o'zaro ta'sirlashmaydi va o'z hajmiga ega bo'lmaydi deb hisoblansa, real moddalarda esa, molekulalar o'z hajmiga ega

bo'lib o'zaro ta'sirlashadi va buning natijasida real gazning xolat tenglamasi Klapeyron tenglamasidan farq qiladi.

Bu sohada ma'lum bo'lgan birinchi harakatlardan biri Gollandiya fizigi Ya. Van-der-Vaals tomonidan 1873 yilda real gazning holat tenglamasini ishlab chiqish bo'lgan. Asosan muloxaza yuritib hosil qilingan xulosalar asosida chiqarilgan Van-der-Vaals tenglamasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$(p + \frac{a}{v^2})(v - b) = RT \quad (1.59)$$

bu yerda a va b –gaz konstantasi bo'lish bilan bir qatorda moddaning individual xossalari tavsiflovchi konstantalar.

Van-der-Vaals tenglamasi Klapeyron tenglamasidan, birinchidan, p kattalik o'rniga p larning yig'indisi va a/v^2 kattalik bo'lish bilan; ikkinchidan bu tenglamada solishtirma hajm o'rniga $(v-b)$ ayirma bilan farq qiladi.

Klapeyron tenglamasiga muvofiq $p \rightarrow \infty$ da ideal gazning solishtirma hajmi nolga intiladi. Van-der-Vaals tenglamasidan $p \rightarrow \infty$ da $v \rightarrow b$ ekanligi kelib chiqadi. Binobarin, b kattalikni molekulalarning o'zi egallagan hajm kabi izohlash mumkin. Bu kattalik tashqi bosimga bog'liq bo'lmagan konstantadan iborat, solishtirma hajmning o'zgaruvchi qismi esa $(v-b)$ ga teng.

Kattalik, a/v^2 ga kelsak, Van-der-Vaals mulohazalar asosida molekulalar orasida ta'sir etadigan tortish kuchlari solishtirma hajm v kattaligi kvadratiga teskari proportsional ekanligini ko'rsatdi; binobarin a/v^2 had gaz molekulalarining o'zaro ta'sir etishini hisobga oladi. Shunday qilib, Van-Der-Vaals tenglamasi gazning real xossalari –gazlarda molekulalarning o'zaro ta'sir etish va molekulalarning o'z hajmi borligini hisobga oladi. Real gaz holatining yetarlicha keng sohasi uchun to'g'ri bo'lgan, nazariy jihatdan asoslangan holat tenglamasini chiqarish bo'yicha qilingan juda ko'p harakatlar ma'lum. Bu yo'nalishda 1937-1946 yillarda amerikalik fizik J. Mayer va rus matematigi N.I. Bogolyubov o'z ishlarida juda olg'a ketdilar.

Mayer va Bogolyubov statistikaviy fizika uslublari yordamida real gaz tenglamasi eng umumiy ko'rinishda quyidagicha bo'lishini ko'rsatdilar:

$$p\nu = \kappa T \left(I - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{k}{k+1} \frac{\beta_k}{\nu^k} \right) \quad (1.60)$$

bu yerda β_k – faqat temperatura funktsiyasi bo’lgan koeffitsientlar (virial koeffitsientlar).

Mayer-Bogolyubov - tenglamasining o’ng qismidagi qavs ichidagi ifoda $1/\nu$ darajalari bo’yicha qatordan iborat. Gazning solishtirma hajmi ν ning kattaligi qanchalik katta bo’lsa, yetarli darajada aniq natija olish uchun qator hadlaridan shunchalik kam sonni hisobga olish kerakligi ko’rinib turibdi. (1.60) tenglamadan $\nu \rightarrow \infty$ da darajali qatorning barcha hadlari nolga aylanadi va bunda tenglama quyidagi ko’rinishga ega bo’lishi kelib chiqadi:

$$p\nu = RT$$

yapni, xuddi kutilganidek, zichligi kam soha uchun Mayer-Bogolyubov tenglamasi Klayperon tenglamasiga aylanadi.

Nazorat uchun savollar:

Fanning maqsadi va vazifasi nimadan iborat?

Ishchi jismning parametrlarini aytib bering.

Termodinamik muvozanat nima?

Ideal gaz qonunlarini ta’riflab bering.

Mendeleev – Klayperon tenglamasi.

Universal gaz doimiysining mohiyati nimadan iborat?

Dalton qonunini ta’riflang.

Partsial bosim nima?

Aralashmaning gaz doimiysi qanday aniqlanadi?

Real gazlarning ideal gazlardan farqi nimada?

Issiqlik sig’imi temperaturaga qanday bog’langan?

Mayer tenglamasi.

IKKINCHI BOB

TERMODINAMIKANING BIRINCHI QONUNI

2.1. Energiyaning saqlanish va aylanish qonuni.

Energiyaning saqlanish va aylanish qonuni tabiatning umumiy tavsifga ega bo'lgan fundamental qonunidir. Bu qonun quyidagicha ta'riflanadi: energiya yo'q bo'lmaydi va qaytadan paydo bo'lmaydi, u faqat turli fizikaviy hamda kimyoviy jarayonlarda bir turdan boshqa turga o'tadi. Boshqacha qilib aytganda, izolyatsiyalangan har qanday tizimda shu tizim ichida energiya o'zgarmasdan saqlanib turadi.

Energiyaning saqlanish qonuni mexanikada ko'pdan beri mexanikaviy (kinetik va potentsial) energiyaga tatbiqan ma'lum bo'lgan. M.V. Lomonosov (1745-1748, Rossiya), D. Joul (1842-1850, Angliya), R Mayer (1842-1845, Germaniya), G. Gess (1840, Rossiya), E. Lents (1844, Rossiya), G. Gelmgolts (1847, Germaniya) va boshqa olimlarning ishlari bilan issiqlik va ishning ekvivalentlik printsiplari aniqlangandan keyin saqlanish qonuni energiya boshqa turlariga ham tatbiq qilina boshlandi va uning mazmuniga muvofiq energiya saqlanish va aylanish qonuni deb atala boshlandi.

Energiyaning saqlanish va aylanish qonuni termodinamikaning birinchi qonuni deb ham aytiladi.

2.2. Ichki energiya.

Moddani tashkil qilgan barcha molekulalar va atomlar harakatining kinetik energiyasi hamda ularning o'zaro ta'sir potentsial energiyasining yig'indisi jismning ichki energiyasi deyiladi.

Ichki energiya, issiqlik va harorat orasidagi farq. Endi ichki energiya tushunchasini ko'rib chiqamiz, bu issiqlik haqidagi tasavurlarni tushintirishga yordam beradi. Issiqlik yoki ichki energiya deb jismga taluqli bo'lgan barcha molekulalarning butun turdagi energiyalarining yig'indisidir. Bazida ichki energiyani jism "issiqlik saqllovchi" deyiladi, bunday atalish urinli emas, uni xususiy issiqlik bilan chalkashtirish mumkin. Issiqlik biz yuqorida tushintirganimizdek-bu jisimning xulosaviy energiyasi emas, bu issiq jismdan sovuq jismga beriladigan energiya miqdoridir.

Temperatura, issiqlik va ichki energiya orasidagi farqni molekulyar kinetik nazariya orqali tushinish mumkin. Temperatura bu jismning aloxida gaz molekularining o'rtacha kinetik energiyasidir. Issiqlik yoki ichki energiya bu jism barcha molekulalarining to'liq energiyasidir. (shunday qilib bir xil massali ikkita issiq jismlarning harorati bir xil bo'lishi mumkin, lekin ikki bruskning issiqlik energiya ularning bittasining issiqlik energiyasidan ikki marta katta bo'ladi. Issiqlik energiya uzatishni xarakterlaydi (asosan issiqlik energiyasi) ya'ni bir jismdan ikkinchi jismga ularning haroratlari farqi hisobiga.

E'tibor beramizki, ikki jism orasida yo'nalgan issiqlik oqimi ularning haroratiga bog'liq bo'lib, ularning har biri qancha ichki energiyaga ega ekanligiga bog'liq emas. Shunday qilib agar harorati 30°S bo'lgan va massasi 50 gramm suvni, massasi 200 gramm va harorati 25°S bo'lgan suv bilan aralashtirsak, issiqlik harorati yuqori bo'lgan suvdan harorati past bo'lgan suvga o'tadi. Agarda 25°S haroratdagi suvning ichki energiyasi ko'p, chunki bu haroratdagi suv miqdori katta.

n -mol bir atomli ideal gazning (har bir molekulaga bitta atom to'g'ri keladi) ichki energiyasini hisoblaymiz. Ichki energiya U -barcha atomlarning ilgarilanma harakati yig'indisi hisoblanadi. Bu yig'indi bitta molekulaning o'rtacha kinetik energiyasining to'liq molekulalar soni N -ga ko'paytmasiga teng bo'ladi.

$$U = N\left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2\right) \quad (2.1)$$

$\bar{W} = \frac{1}{2}m\bar{v}^2 = \frac{3}{2}kT$ (ideal gaz) munosabatni inobatga olsak biz quyidagiga ega bo'lamiz.

$$\bar{W} = N\left(\frac{1}{2}m\bar{v}^2\right) = \frac{3}{2}kT \quad \text{u holda} \quad U = \frac{3}{2}NkT \quad (2.2)$$

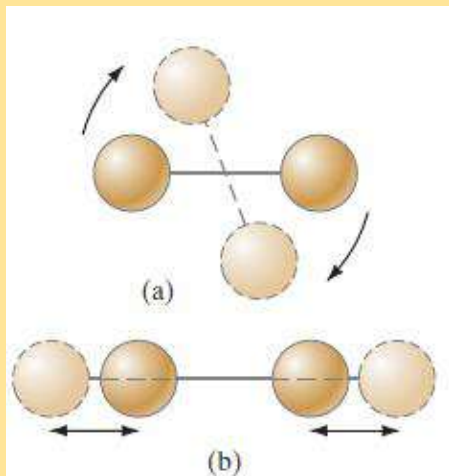
yoki

$$U = \frac{3}{2}nRT \quad (2.3)$$

(ko'p atomli ideal gaz uchun) bu erda n -gazning mollar soni. Shunday qilib, ideal gazning ichki energiyasi faqat harorat va gazning mollar (molekulalar) soni bilan aniqlanadi.

Agar gaz molekulalari bitta atomdan ko'p bo'lsa, u holda molekulalarning aylanma va ilgarilanma harakat energiyasini inobatga olish kerak (2.1- rasm).

Berilgan haroratda ko'p atomli gazning ichki energiyasi bir atomlidan katta, shuning uchun bu energiya haroratning funksiyasi hisoblanadi.



2.1–rasm. Molekulalarning: a) aylanma harakati b) ilgarilanma harakati. Real gazlarning ichki energiyasi ham haroratga bog'liq bo'ladi, lekin bu sohada ularning o'zini tutishi ideal gazdan farq qilsa, ichki energiya qandaydir darajada hajm va bosimga bog'liq bo'ladi. Suyuqlik va qattiq jismlar ichki energiyasi juda murakkab ko'rinishda bo'ladi, ya'ni unga atom va moleklalar orasida ta'sir qiluvchi kuchlar bilan bog'langan elektr o'zaro potentsial energiyasi kiradi.

Texnikaviy termodinamikaning vazifalaridan kelib chiqib, modda mikrostrukturasi nuqtai nazaridan moddaning ichki energiyasi nimalardan iborat degan masalani ko'rib chiqishning zaruriyati yo'q. Hozirgi zamon fizikaviy dunyoqarashlarga ko'ra moddaning ichki energiyasini shu modda molekulalarining (atomlar, ionlar, elektronlarning) kinetik va potentsial energiyalari yig'indisidan iborat deb tasavvur etishimiz mumkin. Ichki energiya tushunchasini fanga 1850 yili V. Tomson kiritgan.

Moddaning ichki energiyasi quyidagiga teng:

$$U = U_{\text{kin}} + U_{\text{pot}} + U_0, \quad (2.4)$$

bu yerda U_{kin} – molekulalarning ichki kinetik energiyasi; U_{pot} – molekulalarning ichki potentsial energiyasi; U_0 – nolp energiya yoki absolyut nolp temperaturadagi ichki energiya.

Ma'lumki $T=0$ da atom va molekulalarning issiqlik harakati to'xtaydi, lekin atomlar ichidagi zarralarning harakati davom etadi. Ichki energiyaning absolyut

qiymati kimyoviy termodinamikada, kimyoviy reaksiyalarni hisoblashda muhim rol o'ynaydi. Termodinamikaning ko'pchilik texnikaviy tadbirlarida ichki energiya U ning absolyut qiymati emas, balki bu kattalikning turli termodinamikaviy jarayonlarda o'zgarishi muhimdir. Bundan shu narsa kelib chiqadiki, ichki energiya hisobini yuritishni ixtiyoriy tanlash mumkin. Masalan, ideal gazlar uchun $t_0=0^\circ\text{S}$ temperaturada ichki energiya nolga teng deb qabul qilingan.

Aytib o'tilganlardan shu narsa kelib chiqadiki, jism ichki energiyasining biror jarayonda o'zgarishi jarayonning tavsifiga bog'liq emas va oxirgi holati bilan bir qiymatda aniqlanadi.

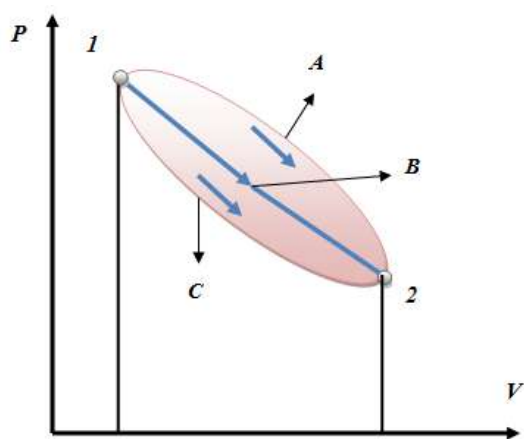
$$\Delta U_{1-2} = U_2 - U_1 \quad (2.5)$$

$$\Delta U = \int_1^2 dU = U_2 - U_1 \quad (2.6)$$

Ichki energiya ekstensiv xossa, yani U kattalik tizimdagi massa miqdori m ga proporsionaldir. Solishtirma ichki energiya deb aytiladigan

$$u = \frac{U}{m} \quad (2.7)$$

kattalik modda massasi birligining ichki energiyasidan iborat.



2.2-rasm

Qisqa bo'lish uchun, bundan keyin u kattalikni –solishtirma ichki energiyani –oddiygina ichki energiya deb, U kattalikni esa butun tizimning to'la ichki energiyasi deb ataymiz. Yuqorida keltirilgan fikrlardan moddaning ichki energiyasini quyidagicha ta'riflash mumkin:

ichki energiya bevosita modda holatining funksiyasidir:

$$u = f(p, v); u = f(p, T); u = f(u, T) \quad (2.8)$$

2.2-rasmdagi barcha jarayonlarda

$$(3) \int_1^2 du = (4) \int_1^2 du - (5) \int_2^1 du = -(6) \int_2^1 du$$

ichki enegiya o'zgarishi bir xil bo'ladi. Tizimda kechayotgan termodinamik jarayon aylanma bo'lsa, uning to'la ichki energiyasining o'zgarishi nolga teng, ya'ni

$$u_2 - u_1 = \oint du = 0 \quad (2.9)$$

Tizim ichki energiyasini o'zgarishini soltishtirma hajm va temperatura funktsiyasi ko'rinishida yozish mumkin:

$$\left. \begin{aligned} du &= (\partial u / \partial T)_v dT + (\partial u / \partial v)_T dv, \\ du &= (\partial u / \partial T)_p dT + (\partial u / \partial p)_T dp, \\ du &= (\partial u / \partial p)_v dp + (\partial u / \partial v)_p dv \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Ideal gaz molekullari orasida o'zaro ta'sirlashish kuchlari mavjud emasligi hisobga olinsa, unda gazning ichki energiyasi ideal gaz hajmiga va bosimiga bog'liq bo'lmaydi, ya'ni

$$(\partial u / \partial v)_T = 0 \text{ va } (\partial u / \partial p)_T = 0 \quad (2.11)$$

Demak, ideal gazning ichki energiyasi faqat absolyut temperaturaga bog'liq bo'lar ekan. U holda, ideal gazning ichki energiyasi temperatura bo'yicha olingan to'la hosilaga teng bo'ladi.

$$(\partial u / \partial T)_p = (\partial u / \partial T)_v = du / dT \quad (2.12)$$

Joul qonuni deb ataluvchi bu xulosa juda muhim. U ideal gazning yangi, uning oldin aniqlangan xossalardan kelib chiqmaydigan xossasini ochib beradi. Ideal gaz uchun (2.11) ni hisobga olib (2.10) tenglamadan quyidagini hosil qilamiz.

$$du = c_v dt \quad (2.13)$$

Ya'ni ideal gazning ichki energiyasi faqat temperaturagina bog'liq.

Agar real gazga kelsak, uning ichki energiyasi ham temperaturaga hamda hajmga bog'liq bo'ladi, binobarin, real gaz uchun

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \neq 0 \quad (2.14)$$

2.3. Gazning kengayishida bajarilgan ish

Issiqlik –termodinamikaning eng muhim tushunchalaridan biridir. Issiqlik tushunchasi mohiyatan ish tushunchasiga yaqin. Issiqlik ham, ish ham energiya uzatish formalaridandir. Shuning uchun ham jismning biror issiqlik yoki ish zahirasi bor deb atashning hech qanday ma'nosi yo'q.

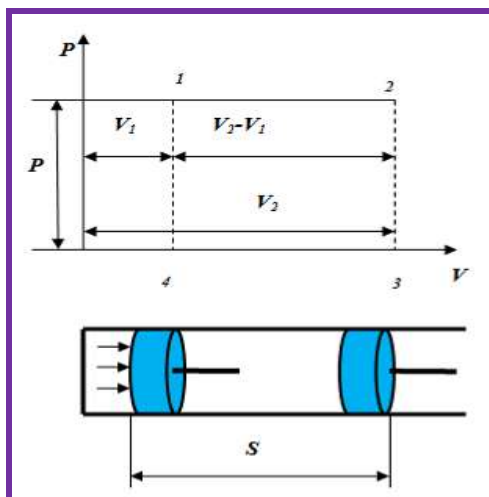
Faqat jismga ma'lum miqdorda issiqlik yoki ish berilgan (yoxud jismdan olingan) deb ta'kidlash mumkin. Gazning kengayishida bajargan ishi uning holat parametrlari p , v va T larga bog'liqdir. Gazning kengayishida bajargan ishini tenglamasini keltirib chiqarish uchun, termodinamik jarayon muvozanatda hamda bosim o'zgarmas deb qabul qilamiz. Aytaylik, silindr porsheni ostida 1 kg gaz tursin. Uning bosimi p atrof muhit bosimi p_m ga teng, solishtirma hajmi v_1 va porshen yuzasi F bo'lsin (2.3 rasm). Gazga elementar dq issiqlik miqdori uzatilsa, gaz o'zgarmas bosimda kengayib porshenni biror dS masofaga siljitadi hamda tashqi kuchlarga qarshi elementar ish bajaradi:

$$d\ell = pFdS = pdv \quad (2.15)$$

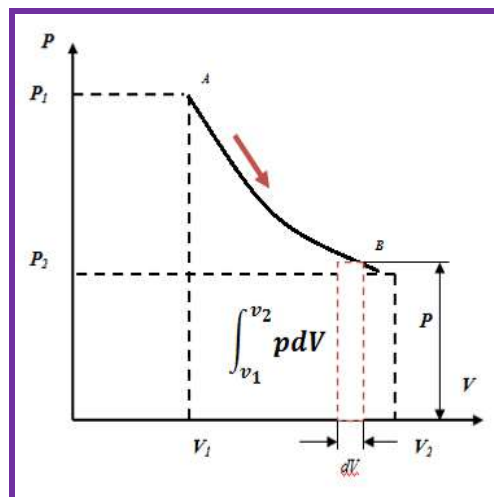
Gazning v_1 hajmdan v_2 gacha kengayishida bajarilgan to'la ishni (2.4 -rasm) quyidagicha ifodalash mumkin.

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1) \quad (2.16)$$

Yuqoridagi ifodadan ko'rinib turibdiki, yopiq termodinamik tizimda gazning kengayishi hisobiga bajarilgan ish bosim bilan hajm o'zgarishining ko'paytmasiga teng. Termodinamik tizimning bajargan ishi musbat yoki manfiy ishorali bo'lishi mumkin. Masalan, gaz tashqi kuchlar ta'siridan siqilsa, ya'ni porshen chap tomonga qarab harakatlansa, unda bajarilgan ish manfiy ($d\ell < 0$), aksincha kengaygan gaz porshenni o'ng tomonga qarab harakatlantirsa, unda tizim (gaz) ning bajargan ishi musbat ($d\ell > 0$) ishorali bo'ladi.



2.3-rasm.



2.4-rasm

Tashqi bosim kuchlariga qarshi bajariladigan, tizim hajmining o'zgarishiga bog'liq bo'lgan ish ℓ_1 kengayish ishi deb yuritiladi. Kengayish ishini tizim atrofdagi muhit ustida bajaradi.

Shuni qayd qilib o'tish lozimki, tashqi bosim kuchlariga qarshi kengayish ishi jism hajmi ν o'zgargandagina (va tashqi bosim nolga teng bo'lmaganida) bajariladi.

Bundan keyin biz asosan muvozanatdagi jarayonlarni ko'rib chiqamiz, ular uchun $p=p_m$ tenglik to'g'ridir. Tizim kengayish ishining (2.16) tenglama bilan aniqlanadigan kattaligini $p\nu$ –diagramma yordamida hisoblash qulay. Tizim hajmi o'zgarish jarayonining shu diagrammada tasvirlanishini ko'rib chiqamiz (2.4-rasm).

Tizim hajmi ν_1 dan ν_2 gacha o'zgaradi. Hajm o'zgaradigan jarayonda tizim o'tadigan holatlar nuqta A va B lar orasidagi jarayon egri chizig'ida joylashadi. Tizimning kengayish ishi $p\nu$ – diagrammada jarayon egri chizig'i ostidagi yuza bilan tasvirlanishi (2.16) tenglamadan ko'rinib turibdi.

Tizim ν_1 hajmga ega bo'lgan holatdan ν_2 holatgacha kengayganda tizim bajaradigan ishning kattaligi bu holatlarning parametrlarigagina emas, balki, kengayish jarayonining qanday yo'l bilan amalga oshirilayotganligiga ham bog'liq. Haqiqatan ham (2.5)-rasmda tasvirlangan $p\nu$ – diagrammadan ko'rinib turibdiki, kengayish jarayoni qaysi yo'ldan (A, B, yoki C dan) borishiga qarab integralning kattaligi turlicha bo'ladi.

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

Shunday qilib kengayish ishi jarayonning funksiyasidir.

2.4. Termodinamika birinchi qonunining tenglamasi

Termodinamikaning 1-qonuni massa va energiya saqlanish va aylanish qonunining issiqlik hodisalariga qo'llanishining xususiy holidir. Chunki, energiya bordan yo'q bo'lmaydi, yo'qdan bor bo'lmaydi, faqat bir turdan ikkinchi turga aylanadi.

Har qanday termodinamik tizimning parametrlari shu tizimga tashqaridan ma'lum miqdordagi Δq issiqlik miqdori kiritilganda (yoki chiqarilganda) o'zgaradi. Tizim muvozanat holatidan chiqadi yoki muvozanat holatiga qaytadi.

Demak, energiyaning saqlanish qonuni asosida termodinamikaning 1-qonunini quyidagicha ta'riflash mumkin: tizimga uzatilgan issiqlik miqdori shu tizim ichki energiyasining o'zgarishiga va tashqi kuchlarga qarshi bajarilgan foydali ishga sarflanadi. Aytib o'tilganlarni quyidagi tenglama yordamida ifodalash mumkin:

$$Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + \ell_{1-2} \quad (2.17)$$

Differentsial formada yozilgan shu munosabatning o'zi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$dQ = dU + d\ell \quad (2.18)$$

yoki

$$dq = du + p dv. \quad (2.19)$$

Bundan keyin tizimga beriladigan issiqlikni musbat (+), tizimdan olib ketiladigan issiqlikni (-) manfiy deb hisoblashni shartlashib olamiz. Tegishlicha tizim bajaradigan ishni musbat, tizim ustida bajariladigan ishni manfiy deb shartlashib olamiz. Belgilar tizimini tanlash mutloq ixtiyoriydir: albatta, xuddi shu yo'sinda belgilarning teskari tizimini tanlash ham mumkin. Bunda faqat keyingi barcha termodinamikaviy hisoblashlarda bir xillikka rioya qilishgina muhimdir. (2.10), (2.12) termodinamika birinchi qonunining tenglamalarini va (2.15), (2.16) tenglamalarni e'tiborga olib quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$dQ = [c_v dT + p dv] \cdot m \quad (2.20)$$

$$dq = c_v dT + p dv \quad (2.21)$$

2.5. Entalpiya

Entalpiya (yunoncha – enthalria – isitaman) tizimning holat funktsiyasi bo'lib, u H yoki h harfi bilan belgilanadi. Tizim ichki energiyasining yig'indisi U bilan, tizimning bosimi p ning tizim hajmining kattaligi V ga ko'paytmasi yig'indisining kattaligi turli-tuman termodinamikaviy hisoblashlarda muhim rol o'ynaydi; bu kattalik entalpiya deb aytiladi.

$$H = U + pV. \quad (2.22)$$

Entalpiya ham ichki energiyaga o'xshab ekstentiv xossa ekanligi tushunarlidir:

$$h = \frac{H}{m}, \quad (2.23)$$

$$h = u + p v. \quad (2.24)$$

Entalpiya ham issiqlik, ish va ichki energiya o'lchanadigan birliklarda o'lchanadi.

Entalpiya holat funktsiyalari (p, T, v) kattaliklarining kombinatsiyalaridan iborat bo'lganligidan, binobarin entalpiya ham holat funktsiyasi bo'ladi.

Termodinamikaning birinchi qonuni tenglamasi (2.19) ni e'tiborga olib (2.24) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$dq = du + p dv = du + d(pv) - v dp = d(u + pv) - v dp$$

U holda

$$dq = dh - v dp \quad (2.25)$$

yoki

$$q_{1-2} = h_2 - h_1 - \int_{p_1}^{p_2} v dp \quad (2.26)$$

Bu tenglamadan shu narsa kelib chiqadiki, agar tizimning bosimi o'zgarmasdan saqlansa, ya'ni izobarik jarayon ($dp=0$) amalga oshirilayotgan bo'lsa, u holda

$$dq_p = dh, \quad (2.27)$$

ya'ni tizimga izobarik jarayonda keltirilgan issiqlik faqat tizim entalpiyasining o'zgarishigagina sarflanadi.

Bundan izobarik issiqlik sig'imi quyidagiga teng:

$$c_p = \frac{dq_p}{dT} \quad (2.28)$$

Bu munosabatlardan shu narsa kelib chiqadiki, ideal gazning entalpiyasi ideal gazning ichki energiyasiga o'xshash, faqat temperaturagagina bog'liq.

$$dh = c_p dt \quad (2.29)$$

Termodinamikada ichki energiya, entalpiya, issiqlik sig'imi moddaning kalorik xossalari deb, solishtirma hajm, bosim va temperatura esa, moddaning termik xossalari deb aytiladi.

Turli xil bug'lar, gazlar va gazlar aralashmasining entalpiyalari texnik adabiyotlarda berilgan. Bu ma'lumotlardan foydalanib o'zgarmas bosimli jarayonda ishtirok etayotgan issiqlik miqdorini aniqlash mumkin. Ayniqsa, issiqlik va sovitish mashinalarining issiqlik hisobida entalpiyani qo'llash, bu hisoblashlarni sodalashtirib, grafik usullarni qo'llash imkoniyatini yaratadi.

2.6. Qaytar va qaytmas jarayonlar

Termodinamikaning eng muhim tushunchalaridan biri qaytar va qaytmas jarayonlar haqidagi tushunchadir. Termodinamikaviy jarayon termodinamikaviy tizimning uzluksiz o'zgarib turadigan holatlari to'plamidan iborat. Tizimning har qanday ikkita holati 1 va 2 oraliq'ida bitta yo'lning o'zidan o'tadigan ikkita jarayonni tasavvur etish mumkin: holat 1 dan holat 2 ga va aksincha, holat 2 dan holat 1 ga; bunday jarayonlar to'g'ri va teskari jarayonlar deb aytiladi.

To'g'ri va teskari yo'nalishlardagi jarayon natijasida termodinamikaviy tizim dastlabki holatiga qaytadigan jarayonlar qaytar jarayonlar deb aytiladi; buning natijasida atrof muhitda hech qanday o'zgarish bo'lmaydi. To'g'ri va teskari yo'nalishlarda jarayon o'tkazilganda tizim dastlabki holatiga qaytmaydigan jarayonlar qaytmas jarayon deb aytiladi.

Amaliyotdan ma'lumki, birinchidan o'z-o'zidan sodir bo'ladigan barcha tabiiy jarayonlar qaytmas bo'ladi; tabiatda qaytar jarayonlar bo'lmaydi; ikkinchidan,

muvozanatga erishgan tizim keyinchalik shunday holatda qolaveradi, ya'ni holatini o'zicha o'zgartira olmaydi, bu esa o'z-o'zidan sodir bo'ladigan har qanday jarayon qaytmasligi to'g'risidagi bundan oldin ta'riflangan da'voga mos keladi.

Yuqorida aytib o'tilganlar asosida quyidagi natijaga kelish qiyin emas: tizim faqat muvozanat holatiga kelmaganiga qadargina ish bajara oladi. Haqiqatan ham, har qanday issiqlik dvigatelida kamida ikkita issiqlik manbai – issiq va sovuq manbalar bo'lgandagina ish olish mumkin. Agar issiq va sovuq manbalar temperaturalari tenglashsa, ya'ni issiq manba, ish jismi va sovuq manbadan iborat tizim issiqlik muvozanatiga kelsa, u holda issiqlik ko'chishi to'xtaydi va ish bajarilmaydi.

2.7. Muvozanatli va muvozanatsiz jarayonlar.

Termodinamik tizimga kirgan jismlarning holati uzoq vaqt o'zgarmasa, u holda tizim termodinamik muvozanatda bo'ladi. Agar termodinamik tizimda jismlar bir xil holatda bo'lmasa va ular bir-biri bilan issiqlik izolyatsion va absolyut qattiq to'siqlar bilan ajratilgan bo'lmasa, bu tizimda biror muddat vaqt o'tishi bilan (ertami-kechmi) turg'un termodinamik muvozanat hosil bo'ladi. Termodinamik muvozanatda tizim tarkibidagi jismlar o'zaro issiqlik almashmaydi va bir-biriga nisbatan harakatda bo'lmaydi, ya'ni issiqlik va mexanik muvozanat sodir bo'ladi.

Termodinamik muvozanatda tizimni tashkil qilgan barcha jismlar bosimi va temperaturasi atrof-muhit bosimi va temperaturasiga teng bo'ladi. Tashqi muhit o'zgarishi bilan termodinamik tizimning holati o'zgarada ya'ni u muvozanatli holatdan muvozanatsiz holatga o'tadi. Bu o'zgarish atrof-muhit va tizimning bosimi va temperaturasi tenglashguncha, ya'ni turg'un muvozanat qaror topguncha davom etadi. Amaliyot shuni ko'rsatadiki, muvozanatga erishgan tizim keyinchalik shunday holatda qolaveradi, ya'ni holatini o'zicha o'zgartira olmaydi.

Yuqorida aytib o'tilganlar asosida quyidagi natijaga kelish qiyin emas: tizim faqat muvozanat holatiga kelmaguniga qadargina ish bajara oladi.

Xaqiqatan ham, har qanday issiqlik dvigatelida kamida ikkita issiqlik manbai - issiq va sovuq manbalar bo'lgandagina ish olish mumkinligini bundan oldin qayd qilib o'tilgan edi. Agar issiq va sovuq manbalar temperaturalari

tenglashsa, ya'ni issiq manba, ish jismi va sovuq manbadan iborat tizim issiqlik muvozanatiga kelsa, u holda issiqlik ko'chishi to'xtaydi va ish bajarilmaydi.

Ko'rib chiqilgan barcha misollardan ko'rinib turibdiki, tizimda muvozanatning bo'lmasligi tizimda ba'zi bir o'ziga xos kattaliklar ayirmasining mavjudligi bilan tavsiflanadi. Agar jarayonni amalga oshirish tezligi nolga intilsa, har qanday muvozanatdagimas jarayon muvozanatdagi jarayon bo'lib qoladi. Shu bilan bir vaqtda har qanday muvozanatdagimas jarayon qaytmas va har qanday muvozanatdagi jarayon qaytar bo'ladi.

Nazorat uchun savollar:

Energiyaning saqlanish va aylanish qonunining mohiyati.

Ichki energiyaning ta'rifi.

Gazning kengayishida bajargan ish qanday aniqlanadi?

Termodinamika birinchi qonuniga taprif bering.

Entalpiya.

Qaytar jarayonlar nima?.

Qaytmas jarayonlar nima?.

Termodinamika birinchi qonunining differentsial tenglamasi.

Ichki energiya qanday holat parametrlariga bog'liq?

Amalda qaytar jarayonni amalga oshirib bo'ladimi?

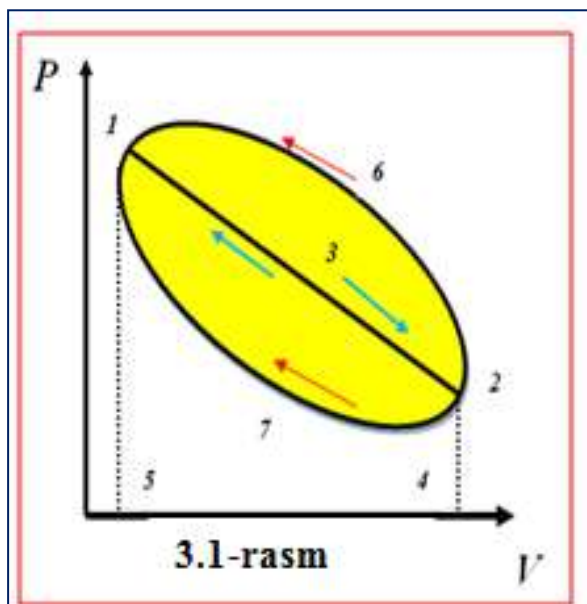
UCHINCHI BOB

TERMODINAMIKANING IKKINCHI QONUNI

3.1. Aylanma sikl

Termodinamik jarayondagi tizim ish bajarishi uchun unga davriy ravishda ma'lum miqdordagi issiqlik energiyasi yoki ish jismi uzatib turilishi va ishga to'la aylanmasdan qolgan issiqlik miqdorini tizimdan tashqariga (sovitkichga) uzatish kerak. Shunda sikl davriy ravishda takrorlanadi. Ish jism sifatida faqat bitta modda qo'llanilsa, u holda modda avval kengayadi va ma'lum miqdordagi ishni bajaradi, so'ngra yana siqiladi, keyin boshlang'ich muvozanat holatiga qaytadi.

Sikl qaytadan takrorlanadi. 3.1-rasmdan ko'rinib turibdiki, agar ishchi jism 1-3-2 egri chiziq bo'ylab kengaysa, u 132451 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng ish bajaradi.



Ishchi jism 2-nuqtaga yetgandan so'ng, yana ish bajarishi uchun avvalgi holatiga (3.1-rasmga) qaytishi lozim. Ishchi jismni boshlang'ich holatiga qaytishi uch xil bo'lishi mumkin.

1. Siqish chizig'i 2-3-1 kengayish chizig'i 1-3-2 bilan ustma-ust tushadi. Bunday jarayonda kengayishda bajarilgan ish (132451 yuza) siqish ishiga (231542 yuza) teng bo'ladi va foydali ish nolga teng.
2. Siqish chizig'i 2-6-1 kengayish chizig'i 1-3-2 dan yuqorida joylashgan. Bunday jarayonda siqishga (261542 yuza) kenga-yishda olingan ishga (132451 yuza) qaraganda ko'proq ish sarflanadi.
3. Siqish chizig'i 2-7-1 kengayish chizig'i 1-3-2 dan pastda joylashgan. Bunday aylanma jarayonda kengayish ishi (132451 yuza) siqish ishidan (271542 yuza) katta bo'ladi. Demak, foydali ishning qiymati 13271 nuqtalar hosil qilgan maydon yuzasiga son qiymati jihatidan teng bo'ladi. Foydali ish olinadigan siklni to'g'ri sikl

yoki issiqlik mashinasi sikli deyiladi, bu holda kengayish ishi siqish ishidan katta bo'ladi. Siqish ishi kengayish ishidan katta, ya'ni, ish sarflanadigan siklga teskari sikl deyiladi. Bunday sikl bilan sovitish mashinalari ishlaydi. Sikllar qaytar va qaytmas bo'lishi mumkin. Muvozanatli jarayonlardan tashkil topgan siklga qaytar sikl deyiladi. Sikl tarkibidagi hech bo'lmaganda bitta jarayon qaytmas bo'lsa, u holda butun sikl ham qaytmas bo'ladi. 3.1-rasmda tasvirlangan siklni qaytar sikl deb hisoblab, uni taxlil etaylik.

Ishchi jism isitgichdan olingan q_1 issiqlik hisobiga 1-3-2 yo'l bo'yicha kengayib, ℓ_1 kengayish ishini bajaradi. 2-7-1 yo'lda siqish uchun ℓ_2 ish sarflanib, sovitkichga q_2 issiqlik beriladi va ma'lum bir qism ish ichki energiyani boshlang'ich holigacha ortishiga sarflanadi.

To'g'ri sikl natijasida $l=l_1-l_2$ foydali ish bajariladi. Issiqlik miqdori q_1 va q_2 hamda foydali ish orasidagi nisbat termodinamikaning birinchi qonuni orqali aniqlanadi:

$$q=q_1-q_2=u_2-u_1+\ell.$$

Siklda tizimning boshlang'ich va oxirgi holatlari bir xil bo'lgani uchun $u_1=u_2$, shuning uchun

$$q_1-q_2=\ell$$

Bir sikl davomida foydali ishga aylangan issiqlik miqdorini jismga keltirilgan umumiy issiqlik miqdoriga nisbati to'g'ri siklning termik foydali ish koeffitsienti deb aytiladi.

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - q_2 / q_1 = \ell / q_1 \quad (3.1)$$

3.2. Karno sikli. Karno teoremasi

Mashhur farang siyosatchisi va matematik olimi Lazara Nikola Margerit Sadi Karnoning o'g'li bo'lmish Nikolo Leonar Sadi Karno (1796 – 1832) politexnika maktabida ta'lim olgan. 1814 yildan e'tiboran u Napaleon armiyasi safida xizmatda harbiy muhandis bo'lib ish boshlaydi. 1819 yil Napaleon hukumatdan ag'darilgandan so'ng u general shtabda leytenant harbiy unvoni bilan xizmat olib boradi. Uning otasi sobiq respublikachi amaldorlardan bo'lib, siyosiy qochqinda bo'lgani uchun (u vazir lavozimida ishlagan), Karnoning ham harbiy faoliyatida

muammolar kelib chiqa boshlaydi va u 1828 yili iste'foga chiqishga majbur bo'ladi. Nikolo Sadi Karno 1832 yilda, birdaniga xolera va qizilcha kasalliklariga duchor bo'lib, juda erta – 36 yoshida vafot Uning 1824 yilda nashrdan chiqqan «Alangani harakatlantiruvchi kuch va bu kuchni rivojlantira oladigan mashinalar haqida mulohaza» (fransuzcha: «Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance») asari, hayotligida ulgurgan yagona ilmiy ish bo'ldi.



Karno shunday yozadi:

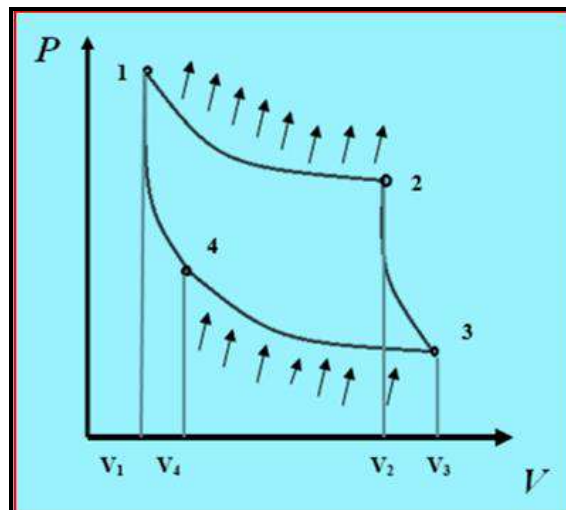
“Issiqlik – harakatlantiruvchi kuch, aniqrog‘i, o‘z ko‘rinishini o‘zgartirgan harakatdan boshqa narsa emas; harakatlantiruvchi kuchni so‘ndirish yuz berayotgan har qanday joyda, yo‘qotilayotgan harakatlantiruvchi kuchga aniq proporsional miqdordagi issiqlik paydo bo‘ladi. Shu tarzda, shunday umumiy qoidani keltirib chiqarish mumkin: harakatlantiruvchi kuch tabiatda o‘zgarmas miqdorda doimo mavjud; u hech qachon paydo bo‘lmaydi, hech qachon yo‘qolib qolmaydi; amalda u faqat shaklini o‘zgartiradi, ya‘ni ba‘zan unday, ba‘zan bunday turdagi harakatni yuzaga keltiradi, lekin o‘zi hech qachon yo‘qqa aylanmaydi. Menda issiqlik nazariyasi yuzasidan paydo bo‘lgan ba‘zi tushunchalarimga ko‘ra, bir birlik kuch hosil qilish uchun, 2.7 birlik issiqlik sarflash zarur”. Karnoning bu satrlariga qoyil qolgan mashhur farang olimi Anri Puankare 1892 yilda shunday xitob qilgan edi: “Energiyaning saqlanish qonunini bundan mukammalroq tushuntirish mumkinmi ”

Fransuz injeneri Karno Nikola Leonar Sadi 1824 yilda «Olovning harakatlantiruvchi kuchi haqida mulohazalar» asarida issiqlik dvigatellari nazariyasiga asos soldi. Karno o‘zining bu ishida issiqlik dvigatelining termodinamikasi uchun alohida ahamiyatga ega bo‘lgan siklini (keyinchalik uning nomi bilan atalgan siklni) ko‘rib chiqdi. Karno taklif qilgan sikl ikki adiabata va ikki izotermadan iborat

bo'lib, shu sikl bo'yicha ishlagan issiqlik dvigatelining F.I.K. eng yuqori bo'ladi. Jarayondagi barcha sikllar qaytar deb qabul qilinadi (3.2-rasm).

Ushbu siklni amalga oshishini chuqurroq tushunish uchun, quyidagidek issiqlik mashinasini ko'z oldimizga keltiramiz, ya'ni, uning silindri jarayonga qarab issiqlikni absolyut o'tkazadi va issiqlikni absolyut o'tkazmaydi.

Porshenning birinchi holatida ishchi jismning parametrlari p_1 , v_1 va temperaturasi isitkich temperaturasi T_1 ga teng bo'lsin. Agar shu vaqtda silindr issiqlikni absolyut o'tkazadigan bo'lsa va uni isitkichga tutashtirsak, u holda ishchi jism q_1 issiqlikni olib izoterma 1-2 bo'yicha kengayib ish bajaradi.



3.2-rasm

2-nuqtaning parametrlari p_2 , v_2 , T_1 . Shu nuqtadan boshlab silindr issiqlikni absolyut o'tkazmaydigan bo'lish kerak. Temperaturasi T_1 bo'lgan ishchi jism adiabat 2-3 bo'ylab temperaturasi sovitkich temperaturasi T_2 ga teng bo'lguncha kengayib ish bajaradi.

3-nuqtaning parametrlari p_3 , v_3 , T_2 . Shu nuqtadan boshlab silindrni absolyut issiqlik o'tkazuvchan qilamiz. Ishchi jismni 3-4 izoterma bo'yicha siqib, shu vaqtning o'zida q_2 issiqlikni sovitkichga beramiz. Izotermik siqishning oxirida ishchi jismning parametrlari p_4 , v_4 , T_2 ga teng bo'ladi.

Siklning termik F.I.K. bironta siklning takomillashganlik darajasini tavsiflaydi: termik F.I.K. qanchalik katta bo'lsa, sikl shunchalik takomillashgan bo'ladi: siklda ish jismiga aynan bir xilda issiqlik miqdori q_1 berilganda η_t si katta bo'lgan siklda ko'p ish bajariladi. Siklning termik F.I.K har doim birdan kichik bo'ladi, birga teng bo'lish uchun $q_1 \rightarrow \infty$ yoki $q_2 = 0$ bo'lish kerak. Tushunarlikki, buni amalga oshirib bo'lmaydi. Yuqoridagi tenglamadan ko'rinib turibdiki, ishchi jismga keltirilgan barcha issiqlikni (q_1) foydali ishga aylantirib bo'lmaydi, albatta, uning bir qismi (q_2) sovitkichga berilishi lozim. Agar siklni siqish chizig'i kenga-

yish chizig'idan yuqorida joylashadigan qilib amalga oshirilsa (2-6-1 yo'l bo'yicha), bu holda siqish ishi kattaligi jihatidan kengayish ishidan katta bo'lganligidan bunday siklni amalga oshirish uchun birorta tashqi manbadan ish keltirish kerak (bu ishning kattaligi p_v - diagrammadagi siqish va kengayish chiziqlari oralig'idagi yuzaga teng).

Teskari siklning amalga oshirilishi natijasida issiqlik sovuq manbadan olinib, issiq manbaga beriladi; agar to'g'ri sikldagiga o'xshab sovuq manbadan olingan issiqlikni q_2 orqali, issiq manbaga beriladigan issiqlikni esa q_1 orqali belgilasak, u holda $q_1 = q_2 + l$ bo'lishi muqarrardir. Teskari siklda issiq manbaga sovuq manbadan olinadigan issiqlik q_2 bilan siklda keltirilgan ish l ga ekvivalent bo'lgan issiqlikning yig'indisiga teng bo'lgan q_1 issiqlik beriladi. Shunday qilib, teskari siklni amalga oshirish natijasida sovuq manbaning sovishi sodir bo'ladi. Teskari sikl sovuqlik mashinasining siklidan iboratdir.

Teskari siklning takomillashganlik darajasi siklning sovitish koeffitsienti orqali aniqlanadi.

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} \quad (3.2)$$

To'rtinchi nuqtadan issiqlikni absolyut o'tkazmaydigan silindrda adiabat siqishni amalga oshirib, ishchi jismni 4-1 yo'l bo'yicha boshlang'ich holatiga olib kelamiz. Shunday qilib, butun sikl bo'yicha isitkichdan ishchi jismga q_1 issiqlik uzatildi va sovitkichga q_2 issiqlik olib ketildi.

Siklning termik F.I.K.:

$$\eta_t = q_1 - q_2 / q_1 = 1 - q_2 / q_1 \quad (3.3)$$

Izoterma 1-2 bo'yicha keltirilgan issiqlik:

$$q_1 = RT_1 \ln v_2 / v_1 \quad (3.4)$$

Izoterma 3-4 bo'yicha olib ketilgan issiqlik:

$$q_2 = RT_2 \ln v_3 / v_4 \quad (3.5)$$

Olingan natijalarni (3.3) formulaga qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{RT_2 \ln v_3 / v_4}{RT_1 \ln v_2 / v_1} = 1 - \frac{T_2 \ln v_3 / v_4}{T_1 \ln v_2 / v_1} \quad (3.6)$$

Adiabatik kengayish va siqish jarayonlari uchun:

$$(T_2 / T_1)^{1/(k-1)} = \nu_2 / \nu_3 \quad \text{va} \quad (T_2 / T_1)^{1/(k-1)} = \nu_1 / \nu_4$$

u holda

$$\nu_2 / \nu_3 = \nu_1 / \nu_4 \quad \text{yoki} \quad \nu_2 / \nu_1 = \nu_3 / \nu_4$$

Demak, qisqartirishlardan so'ng Karno siklining termik F.I.K. quyidagiga teng bo'ladi:

$$\eta_t = 1 - T_2 / T_1 \quad (3.7)$$

(3.7) formuladan quyidagidek xulosalar qilish mumkin:

- 1) Karno siklining termik F.I.K. ishlatilayotgan jismning xossasiga bog'liq bo'lmasdan, faqat issiqlik manbalari absolyut temperaturalarining quyi va yuqori qiymatlariga bog'liq bo'lar ekan. (Karno teoremasi).
- 2) Karno siklining termik F.I.K. isitkich temperaturasi o'sishi va sovitkich temperaturasi kamayishi bilan ortadi.
- 3) Karno siklining termik F.I.K. har doim birdan kichik bo'lib, birga teng bo'lishi mumkin emas.

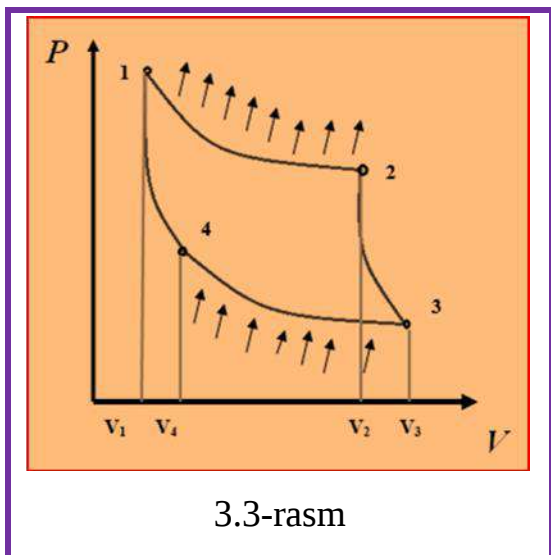
Termik F.I.K. birga teng bo'lishi uchun $T_2/T_1=0$, ya'ni $T_1=\infty$ yoki $T_2=0$ bo'lishi kerak. Tushunarliki, ikkala shartni ham amalga oshirib bo'lmaydi.

- 4). Karno siklining termik F.I.K. $T_1=T_2$ bo'lganda nolga teng, ya'ni tizimdagi barcha jismlar temperaturasi teng bo'lsa, issiqlikni ishga aylantirib bo'lmaydi.

Shuni esda tutish lozimki, Karno-siklini termik F.I.K. ni aniqlash formulasi (3.7) faqat qaytar aylanma jarayonlar uchun to'g'ridir.

Ma'lumki, barcha real jarayonlar ishqalanish, issiqlik almashinish va h.k. lar tufayli qaytmasdir. Shuning uchun qaytmas Karno siklinining termik F.I.K. $1 - \frac{T_2}{T_1}$ dan kichik bo'ladi².

² R.K. Rajput, Engineering Thermodynamics 2007.



3.3-rasm

Karno siklini faqat to'g'ri yo'nalishdagina emas, balki, teskari yo'nalishda ham amalga oshirish mumkin. 3.3-rasmda Karno teskari sikli tasvirlangan. Sikl qaytar jarayonlardan iboratligi uchun, siklni o'zi ham qaytardir.

Ishchi jism 1-holatdan adiabata 1-4 bo'yicha kengayib, temperaturasi T_1 dan T_2 gacha kamayadi. Shundan so'ng ishchi jism

izoterma 4-3 bo'yicha kengayishni davom ettirib, temperaturasi T_2 bo'lgan sovitgichdan q_2 issiqlikni oladi. Ishchi jism, keyin 3-2 adiabata bo'yicha siqilib, temperaturasi T_2 dan T_1 gacha ko'tariladi. Oxirgi jarayonda ishchi jism 2-1 bo'yicha izotermik siqiladi va isitkichga q_1 issiqlik uzatiladi. Shunday qilib, teskari siklni amalga oshirish uchun l ish sarflab, isitkichga $q_1 = q_2 + l$ issiqlik uzatiladi.

Teskari sikl bo'yicha ishlaydigan mashinalar sovitish mashinalari deb aytiladi. Sovitish mashinalarining sovitish koeffitsienti:

$$\varepsilon = q_2 / (q_1 - q_2) = q_2 / l \quad (3.8)$$

yoki teskari Karno sikli uchun

$$\varepsilon = T_2 / (T_1 - T_2) \quad (3.9)$$

Xullas, Karno teoremasiga muvofiq ikkita issiq manba orasida amalga oshiriladigan har qanday qaytar sikl termik F.I.K. ning kattaligi bu siklda ishlatiladigan ish jism xossalariga bog'liq bo'lmaydi.

3.3. Entropiya

Entropiya (yunoncha, entroria – aylanish, o'zgarish) termodinamik tizimning holat funksiyasidir.

Entropiya termodinamik tizim bilan tashqi muhitning o'zaro issiqlik almashinuvi jarayonning kechish yo'nalishini ifodalaydi.

Ideal gaz misolida entropiyani holat funktsiyasi ekanligini isbotlaylik.

$$dq = c_p dt - \nu dp \quad (3.10)$$

tenglamani $1/T$ ga ko'paytiramiz

$$\frac{dq}{T} = c_p \frac{dT}{T} - \nu \frac{dp}{T} \quad (3.11)$$

$\nu/T=R/p$ ekanligidan:

$$\frac{dq}{T} = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (3.12)$$

Tenglamani o'ng tomoni integrallanadi, ya'ni u qandaydir funktsiyaning to'liq differentsialidir. Shu funktsiyani s harfi bilan belgilaymiz. Shunday qilib quyidagicha yozish mumkin:

$$ds = dq/T = c_p \frac{dT}{T} - R \frac{dp}{p} \quad (3.13)$$

$$ds = dq/T; \quad ds = dQ/T \quad (3.14)$$

$$s = c_p \ln T - R \ln p + S_o \quad (3.15)$$

$$s = c_v \ln T + R \ln \nu + S_o \quad (3.16)$$

Shunday qilib, $ds=dq/T$ formula bilan aniqlanadigan holat parametri aniqlandi. S funktsiya ichki energiya va entalpiyaga o'xshab holat funktsiyasidan iborat ekan – uning qiymati holat parametrlari bilan bir qiymatda aniqlanadi. Klauzius kiritgan funktsiya S entropiya deb aytiladi. Entropiya ekstensiv xossa bo'lib, u ham boshqa ekstensiv kattaliklarga o'xshab additivlik xossasiga ega. Solishtirma entropiya deb aytiladigan quyidagi

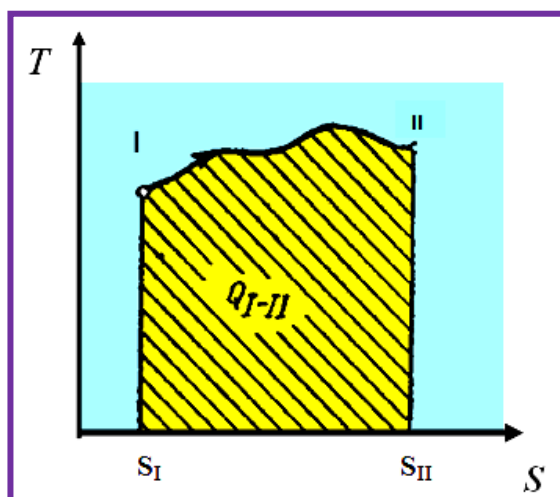
$$s = \frac{S}{m} \quad (3.17)$$

kattalik modda massa birligining entropiyasidan iborat bo'ladi[2].

Holatning istalgan boshqa funktsiyasi kabi tizimning solishtirma entropiyasi ham holatning istalgan ikkita parametric x, y ning funktsiyasi ko'rinishida tasavvur etish mumkin.

$$S=f(x, y). \quad (3.18)$$

Bu yerda x va y sifatida p va ν , va T va hokazolar bo'lishi mumkin. Tizimning entropiyasi turli qaytar jarayonlarda ortishi va kamayishi mumkinligi (3.11) munosabatdan ko'rinib turibdi: temperatura kattaligi T har doim musbat bo'lganligidan tizimga issiqlik berilganda ($dq>0$) uning entropiyasining ortishi ($ds>0$), issiqlik olinganda esa ($dq<0$) uning entropiyasining kamayishi ($ds<0$). (3.11) munosabatdan kelib chiqadi.



3.4-rasm

Qaytar jarayonda jism holati boshlang'ich holat 1 dan oxirgi holat 2 gacha o'zgarganda jism entropiyasining quyidagi

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (3.19)$$

kattalikka o'zgarishi (3.11) dan kelib chiqadi. Entropiya tushunchasi issiqlik dvigatellarining sikllarini analiz qilish uchun juda qulay bo'lgan holat diagrammasini kiritishga imkon beradi. Holat diagrammasida abtsissa bo'yicha entropiya, ordinata bo'yicha esa absolyut temperatura qo'yiladi (3.4-rasm).

Ixtiyoriy jarayon I-II ning egri chizig'ini Ts –diagrammada tasvirlaymiz. (3.11) tenglamadan qaytar jarayonda

$$dq = T \cdot ds \quad (3.20)$$

ekanligi kelib chiqadi.

Demak, qaytar jarayonda tizim olgan (yoki bergan) issiqlik miqdori T·s – diagrammada jarayon egri chizig'i ostidagi yuza bilan tasvirlanadi.

T·s – diagrammaning qulayligi shundaki, siklda keltirilgan va olingan issiqlik miqdori ham siklni amalga oshirish natijasida olingan ish (yoki agar sikl teskari bo'lsa, sarflangan ish) unda yaqqol tasvirlanadi.

3.4. Termodinamika ikkinchi qonunining talqini

Termodinamikaning birinchi qonuni energiyaning saqlanish va aylanish jarayonini miqdoriy tomondan tavsiflaydi. Termodinamikaning ikkinchi qonuni bu jarayonlarning sifat tomonini tavsiflaydi. Termodinamikaning birinchi qonuni

bironta jarayonning energetik balansini tuzish uchun zarur bo'lgan barcha ma'lumotlarni beradi, lekin u, bironta jarayonning sodir bo'lishi yoki bo'lmasligi haqida hech qanday ma'lumot bermaydi.

Termodinamikaning ikkinchi qonuni ham, birinchi qonun kabi tajriba asosida ta'riflanganligini ta'kidlab o'tish lozim. Termodinamikaning ikkinchi qonuni ni umumiy ko'rinishda quyidagicha ta'riflash mumkin:

O'z-o'zidan sodir bo'ladigan har qanday jarayon qaytmas jarayondir. Ikkinchi qonunning barcha boshqa ta'riflari bu umumiy ta'rifning xususiy hollaridan iborat.

Har-xil olimlar termodinamikaning ikkinchi qonuniga turlicha ta'rif berganlar.

Shu ta'riflar haqida qisqacha ma'lumot beraylik.

1. **Sadi Karno** (1824 yilda) quyidagi ta'rifni berdi: "Termodinamik tizim ish bajarish uchun kamida turli temperaturali ikki manba zarur. Issiqlik dvigatellari F.I.K. $\eta > 1$ bo'la olmaydi".
2. **R. Klauzius** (1850 yilda) quyidagi ta'rifni taklif etdi: "Issiqlik ancha sovuq jismdan ancha issiq jismga o'z-o'zidan o'ta olmaydi".
3. **V. Tomson** (Lord Kelvin) 1851 yilda quyidagi ta'rifni taklif etdi: "Jonsiz material agent yoramida moddaning qandaydir massasidan uni atrofdagi predmetlardan eng sovuq'ining temperaturasidan past temperaturagacha sovitish yo'li bilan mexanikaviy ish olib bo'lmaydi".
4. **M. Plank** quyidagi ta'rifni taklif etdi: "Barcha ishi bironta yukni ko'tarish va issiqlik manbaini sovitishdan iborat bo'lgan davriy ishlaydigan mashina qurib bo'lmaydi".
5. **V.F. Osvold** quyidagi ta'rifni taklif etdi: "Ikkinchi tur abadiy Dvigatelni, (faqatgina bitta issiqlik manbai hisobiga ishlaydigan) qurib bo'lmaydi".

Shuni aytib o'tish lozimki, ikkinchi tur abadiy dvigatelining mavjud bo'lishi termodinamikaning birinchi qonuniga qarshi bo'lmaydi. Haqiqatan ham bu Dvigatelda ish hech narsadan emas, balki issiqlik manbaining ichki energiyasi hisobiga bajarilgan bo'lur edi. Issiqlik jarayonlarining o'ziga xos muhim

xususiyatini ta'kidlab o'tish zarur. Mexanik ishni, elektrik ishni, magnit kuchlarining ishini va hokazolarini qoldiqsiz, batamom to'la issiqlikka aylantirish mumkin. Issiqlikka kelsak, davriy takrorlanadigan jarayonda uning bir qismigina mexanik va boshqa turlardagi ishga aylanishi mumkin: uning boshqa qismi muqarrar ravishda sovuq manbaga berilishi kerak.

3.5. Ekssergiya

Tizim muvozanatda bo'lmagan holatdan muvozanatdagi holatga o'tayotganda bajarishi mumkin bo'lgan eng katta ishni olish uchun tizimda bo'layotgan barcha jarayonlar to'la qaytar bo'lishi kerak. Shuning uchun tizim bajara oladigan maksimal foydali ishning qiymatini aniqlash (ayrim hollarda tizimning ish bajara olishini aniqlash ham deydilar) juda muhim vazifadir. Ma'lumki, izolyatsiyalangan tizim faqat muvozanatda bo'lmagan holatda bo'lgandagina ish bajara oladi. Muvozanatdagi holatga erishgandan so'ng u ish bajara olmaydi. Kar-no siklida maksimal ishni faqat ishchi jism temperaturasi issiq manba temperaturasiga teng bo'lganda va ishchi jismning eng past temperaturasi sovuq manba temperaturasiga teng bo'lganda, ya'ni qaytar jarayonlar sodir bo'lganda olish mumkin. Bundan ko'rinib turibdiki, tizim muvozanat bo'lmagan holatdan muvozanat holatiga o'tishida, maksimal ishni faqat qaytar adiabat va izotermik jarayonlar amalga oshgandagina olish mumkin³.

Endi, ko'rib chiqilayotgan tizim bajarishi mumkin bo'lgan maksimal ish tushunchasini birmuncha yaxshiroq aniqlab olamiz.

Aytaylik ishchi jism va muhit izolyatsiyalangan adiabatik tizim bo'lsin. Demak unga issiqlik keltirilmaydi va olib ketilmaydi ya'ni $Q=0$. Tizimni boshlang'ich ichki energiyasini U^1 va oxirgisini U^{11} bilan belgilaymiz.

U holda termodinamikaning birinchi qonuniga asosan:

$$U^{11}-U^1+L=Q=0. \quad (3.21)$$

Ko'rib chiqilayotgan tizim ta'rifiga ko'ra berk tizim bo'lganligidan tizim ishni faqat o'z ichki energiyasining kamayishi hisobiga bajarishi mumkin:

³ Yunus Cengel, Michel Boies, Thermodynamics: an Engineering approach.2015

$$L=U^1 - U^{11} \quad (3.23)$$

Tizimning ichki energiyasi additiv kattalikdir, shuning uchun u muhit va ish manbaisining ichki energiyalaridan tashkil topgan bo'ladi. Muxitning boshlang'ich va oxirgi holatdagi ichki energiyasini U_{01} va U_{02} bilan, ish manbaini boshlang'ich va oxirgi holatdagi ichki energiyasini mos ravishda U_1 va U_2 bilan belgilaylik, u holda.

$$U^1=U^1+U_{01} \text{ va } U^{11}=U_2+U_{02}$$

va

$$L=U_1+U_{01}-U_2-U_{02} \text{ yoki } L=(U_1-U_2) + (U_{01}-U_{02}) \quad (3.24)$$

Ishchi jism muhit bilan issiqlik almashinishi va muhit bosimiga qarshi ish bajarishi mumkin. Q_0 bilan ishchi jismdan muhitga berilgan issiqlikni, L_0 bilan muhit ustida bajarilgan ishni belgilaylik.

U holda

$$U_{02}-U_{01}=Q_0+L_0 \quad (3.25)$$

Muhit bosimi o'zgarish bo'lgani uchun

$$L_0=p_0(V_2-V_1)$$

Bu yerda V_1 va V_2 – ishchi jismni boshlang'ich va oxirgi xajmlari.

U holda:

$$U_{01}-U_{02}= -Q_0 - p_0 (v_2-v_1) \quad (3.26)$$

Muhitning ichki energiyasining o'zgarishini (3.26) tenglamadan (3.25) tenglamaga qo'yib, quyidagini aniqlaymiz:

$$L=(U_1 - U_2) -Q_0 - p_0 (V_2 - V_1) \quad (3.27)$$

Muhitga uzatilgan issiqlik miqdori Q_0 muhit temperaturasi T_0 bilan, muhit entropiyasining o'zgarishi ko'paytmasiga teng:

$$Q_0=T_0 (S_{02} - S_{01}) \quad (3.28)$$

(3.28) tenglamani (3.27) tenglamaga qo'yamiz.

$$L=(U_1 - U_2) - T_0 (S_{02} - S_{01}) - p_0 (v_2 - v_1) \quad (3.29)$$

(3.29) tenglama muvozanatda bo'lmagan holatdan muvozanat holatga o'tishda izolyatsiyalangan sistema bajargan foydali ishning qiymatini beradi, chunki ba-

jarilgan barcha ishdan bu ishning muhitni siqishga ketgan va binobarin, bizning ixtiyorimizga ko'ra foydalanib bo'lmaydigan qismi $p_0 (v_2 - v_1)$ ayriladi.

Izolyatsiyalangan tizimning maksimal foydali ishi (ish bajara olishi) kattaligini topish uchun qaytar jarayonlarning o'tishi natijasida izolyatsiyalangan tizim entropiyasi o'zgarmaydi degan holdan foydalanish zarur.

$$S_{02} - S_{01} = S_1 - S_2 \quad (3.30)$$

Bu yerda S_1 va S_2 – ishchi jismning boshlang'ich va oxirgi holatdagi entropiyasi.

(3.29) va (3.30) tenglamalarni hisobga olib, izolyatsiyalangan tizimning maksimal foydali ishi uchun quyidagi ifodani yozish mumkin:

$$L_{\phi o \ddot{u} \partial}^{M \acute{A} K C} = (U_1 - U_2) - T_o(S_1 - S_2) + P_o(V_1 - V_2) \quad (3.31)$$

Bu munosabatdan ko'rinib turibdiki, tizimning maksimal foydali ishining kattaligi ish manbaining boshlang'ich parametrlari va muhit parametrlari bilan bir qiymatda aniqlanadi. Tizimdan maksimal foydali ishdan kattaroq ish olish mumkin emas. Ish manbaini ish bajara olish qobiliyatidan to'liq foydalanish uchun $p_0 = p_2$ va $T_0 = T_2$ bo'lishi kerak. Bunday holda ish jismining qolgan barcha parametrlari muhit parametrlari bilan aniqlanadi; ya'ni

$$U_2 = U_0 \text{ va } V_2 = V_0.$$

U holda (3.23) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$L_{\phi o \ddot{u} \partial}^{M \acute{A} K C} = (U_1 - U_0) - T_o(S_1 - S_0) + P_o(V_1 - V_0)$$

yoki

$$L_{\phi o \ddot{u} \partial}^{M \acute{A} K C} = (H_1 - H_0) - T_o(S_1 - S_0) \quad (3.32)$$

Bu yerda N_0 va S_0 – tashqi muhit bilan muvozanatda turgan ishchi jismning entalpiyasi va entropiyasi. (3.24) tenglamada $(N_1 - N_0)$ ishchi jismni qaytar adibatik jarayonda bajargan tashqi foydali ishi, $T_o (S_1 - S_0)$ esa, ishchi jismni qaytar izotermik jarayonda bajargan tashqi foydali ishi. Demak yuqorida aytib o'tilganidek, ishchi jism holati boshlang'ich holatdan atrof-muhit holatigacha o'zgarganda, maksimal foydali ish qaytar adibatik va izotermik jarayonlarni amalga oshirilganda olinadi.

(3.32) formuladan aniqlangan maksimal foydali ishni ish jismini ish bajara olishi yoki eksergiyasi deb aytiladi. Keyingi paytlarda termodinamik jarayonlarni tadqiqot etishda eksergiya tushunchasidan keng foydalanilmoqda.

Eksergiya yordamida tadqiqot uslubiga eksergetik tadqiqot uslubi deb aytiladi.

Umuman olganda solishtirma eksergiya L deb, qaytar termodinamik jarayonda tizim boshlang'ich holatdan atrof-muhit holatigacha o'zgarganda issiqlikni yoki ishchi jismni solishtirma ish bajara olishiga aytiladi.

Bunday qaytar jarayonni ikki qaytar: adiabatik (ishchi jism temperaturasi T_0 dan muhit temperaturasi T_0 gacha o'zgaradi) va izotermik (adiabatik jarayon oxiridagi bosim muhit bosimi p_0 gacha o'zgaradi) jarayonlar orqali amalga oshirish mumkin. Shuning uchun ishchi jism eksergiyasini (3.32) formuladan 1 kg ishchi jism uchun quyidagicha aniqlash mumkin:

$$L = (h_1 - h_0) - T_0 (s_1 - s_0)$$

Agar birorta jarayonda ishchi jismning oxirgi parametrlari muhit parametrlaridan farq qilsa, u holda bu jarayonda olingan xaqiqiy ish jarayonni boshi va oxiridagi eksergiyalar farqi bilan aniqlanadi, ya'ni:

$$L_{\text{xaq}} = L_1 - L_2.$$

Ma'lumki, maksimal foydali ishni qaytar Karno siklini boshlang'ich temperaturadan muhit temperaturasigacha amalga oshirilganda olish mumkin. u holda:

$$d \ell q = dq \eta_t^{\text{Karno}} = dq (1 - T_0/T)$$

yoki jami jarayon uchun

$$\ell q = \int_1^2 (1 - T_0/T) dq = (1 - T_0/T_y) q_{1-2}$$

bu yerda ℓq – issiqlik eksergiyasi;

T_y – jarayonning o'rtacha temperaturasi.

Izolyatsiyalangan tizimda sodir bo'ladigan jarayonlarning qaytmas jarayon bo'lishi natijasida issiqlikning ish bajara oluvchanligining yo'qotishlari kuzatiladi.

Demak, jarayonlarni qaytuvchanlik darajasini tavsiflaydigan e k s y e r g y e t i k F. I. K. tushunchasini kiritish

mumkin.

Eksergetik f.i.k. quyidagiga teng:

$$\eta_e = 1 - \Delta \ell / \ell_1$$

Bu yerda $\Delta \ell$ - keltirilgan va olib ketilgan eksergiyalar farqi; ℓ_1 - keltirilgan eksergiya. Bu kattalik orqali har qanday issiqlik apparatini termodinamik mukammaligini aniqlash mumkin.

Nazorat uchun savollar:

Aylanma sikl deb qanday siklga aytiladi?

To'g'ri sikl nima?

Teskari sikl nima?

Karno sikli nima?

Karno teoremasi nima?

Karno siklining F.I.K. nimaga bog'liq?

Entropiyaning mohiyatini tushuntiring.

Entropiya qanday parametrlarga bog'liq?

Ixtiyoriy siklda entropiyani aniqlash formulasi.

Termodinamika ikkinchi qonunining mohiyati nimadan iborat?

Karno ta'rifi.

Plank ta'rifi.

Ikkinchi tur abadiy dvigatelni nima uchun yaratib bo'lmaydi?

Karno sikli Pv - va Ts – diagrammada qanday tasvirlanadi?

Eksergiya.

TO'RTINCHI BOB

IDEAL GAZLARNING TERMODINAMIK JARAYONLARI

4.1. Termodinamik jarayonlarni o'rganish yo'llari

Termodinamikaning birinchi qonuni issiqlik miqdori, ichki energiyaning o'zgarishi va tashqi kuchlarga qarshi bajarilgan foydali ish o'rtasidagi munosabatni belgilaydi. Jismga uzatilayotgan yoki undan olib ketilayotgan issiqlik miqdori jarayonning turiga bog'liq bo'ladi.

Asosiy termodinamik jarayonlar quyidagilardan iborat:

1. O'zgarmas hajmda kechadigan izoxorik jarayon.
2. O'zgarmas bosimda kechadigan izobarik jarayon.
3. O'zgarmas temperaturada kechadigan izotermik jarayon.
4. Tashqi muhit bilan issiqlik almashmagan holda kechadigan adiabatik jarayon.
5. Yuqoridagi termodinamik jarayonlarni umumlashtirgan politrop jarayon.

Politrop jarayonda tizimning issiqlik sig'imi o'zgarmas bo'ladi.

Barcha jarayonlarni o'rganishda umumiy uslub qo'llanilib, uning mohiyati quyidagidan iborat:

1. Jarayonning $p\nu$ va Ts diagrammadagi egri chiziq tenglamasi keltirib chiqariladi;
2. Ishchi jismning holat parametrlari orasidagi bog'lanish aniqlanadi.
3. Quyidagi formulalar orqali ichki energiyaning o'zgarishi aniqlanadi:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt = c_{vm} \left(\frac{t_2}{0} - \frac{t_1}{0} \right) \Delta$$

yoki sig'im o'zgarmas bo'lganda:

$$u_2 - u_1 = c_v(t_2 - t_1)$$

4. Tizimning kengayish ishi quyidagi tarzda aniqlanadi:

$$\ell = \int_{\nu_1}^{\nu_2} p d\nu$$

5. Termodinamik jarayonning issiqlik miqdori quyidagi formula orqali hisoblanadi:

$$q_{1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c_x dt = c_{xm} / t_2 - c_{xm} / t_1;$$

6. Jarayonda entalpiyaning o'zgarishi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$h_2 - h_1 = c_{pm} / t_2 - c_{pm} / t_1,$$

yoki o'zgarmas sig'im uchun

$$h_2 - h_1 = c_p(t_2 - t_1);$$

7. Ideal gazning entropiyasini o'zgarishini quyidagi formulalar yordamida aniqlaymiz:

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2 / T_1 + R \ln v_2 / v_1$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2 / T_1 - R \ln p_2 / p_1$$

Tekshirilayotgan barcha jarayonlar, qaytar jarayonlar ekanligini ta'kidlab o'tamiz.

4.2. Izoxorik jarayon

Izoxorik jarayonga yopiq idishda gazning isishi yoki sovishi misol bo'la oladi.

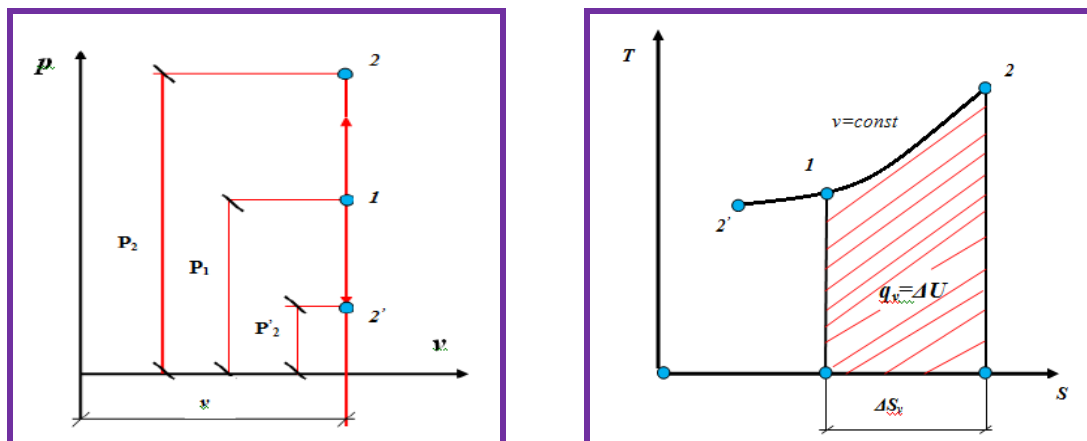
O'zgarmas hajmda kechadigan jarayonga izoxorik jarayon ($dv=0$, yoki $v=const$) deb aytiladi. Jarayon egri chizig'i izoxora deb aytiladi. 4.1-rasmda jarayonning $p-v$ - va Ts - diagrammalari tasvirlangan.

Ideal gazning holat tenglamasi: $p v = RT$ dan $v=const$ uchun

$$p/T = R/v = f(v)=const$$

Izoxorik jarayonda bosimlar nisbati absolyut temperaturalar nisbatlariga teng bo'ladi, ya'ni bosim o'zgarishi bu jarayondagi absolyut temperatura o'zgarishiga to'g'ri proportsionaldir.

$$p_1/p_2 = T_1/T_2 \quad (4.1)$$



**4.1-rasm. Gaz holatini izoxorik jarayonda o'zgarishining
Pv – va Ts-diagrammalari**

Izoxorik jarayonda gaz hajmining o'zgarishi $dv = v_2 - v_1 = 0$, bo'lganligidan

$$\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0 \quad (4.2)$$

Ya'ni, izoxorik jarayonda gaz ish bajarmaydi. Termodinamikaning birinchi qonunini $d\ell = 0$ hol uchun yozamiz:

$$dq_v = du_v = c_v dt \quad (4.3)$$

Sig'im o'zgarmas bo'lganda:

$$q_{v,1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c_v dt = c_v (t_2 - t_1) = u_2 - u_1 \quad (4.4)$$

Demak, tizimga berilgan dq issiqlik miqdori shu tizim ichki energiyasining o'zgarishiga sarflanar ekan.

Sig'im o'zgaruvchan bo'lganda:

$$q_{v,1-2} = u_2 - u_1 = c_{vm} \int_0^{t_2} dt - c_{vm} \int_0^{t_1} dt \quad (4.5)$$

4.1-rasmdan ko'rinib turibdiki, izoxorik jarayon bosim ortishi bilan kechsa, demak tizimga issiqlik keltiriladi va ishchi jismning ichki energiyasi va temperaturasi ortadi.

Agar izoxorik jarayonda bosim kamaysa, u holda issiqlik olib ketiladi va ichki energiya hamda temperatura kamayadi. Izoxorik jarayon uchun entropiyaning o'zgarishini quyidagi tenglamadan aniqlaymiz.

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2 / T_1 + R \ln v_2 / v_1$$

lekin $v = \text{const}$ uchun $\ln v_2 / v_1 = 0$.

Shuning uchun

$$s_2 - s_1 = c_v \ln T_2 / T_1 = c_v \ln p_2 / p_1 \quad (4.6)$$

Demak, izoxorik jarayonda gaz ish bajarmaydi. Unga uzatilgan dq issiqlik miqdori termodinamik tizim ichki energiyasining o'zgarishiga sarflanadi.

Izobarik jarayon

O'zgarmas bosim ostida kechadigan termodinamik jarayonlarga izobarik jarayon ($p = \text{const}$) deyiladi. Jarayonning grafigi 4.2-rasmda tasvirlangan.

Jarayon egri chizig'i izobara deb aytiladi. Har ikkala holat uchun jarayonning holat tenglamalarini yozamiz:

$$\begin{aligned} p_1 v_1 &= RT_1; \quad p_2 v_2 = RT_2 \quad p = \text{const} \text{ uchun} \\ v_1 / v_2 &= T_1 / T_2 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Bundan shu narsa kelib chiqadiki, gaz temperaturasi qanchalik yuqori bo'lsa, uning solishtirma hajmi shunchalik katta bo'ladi (ya'ni zichligi shunchalik kichik bo'ladi).

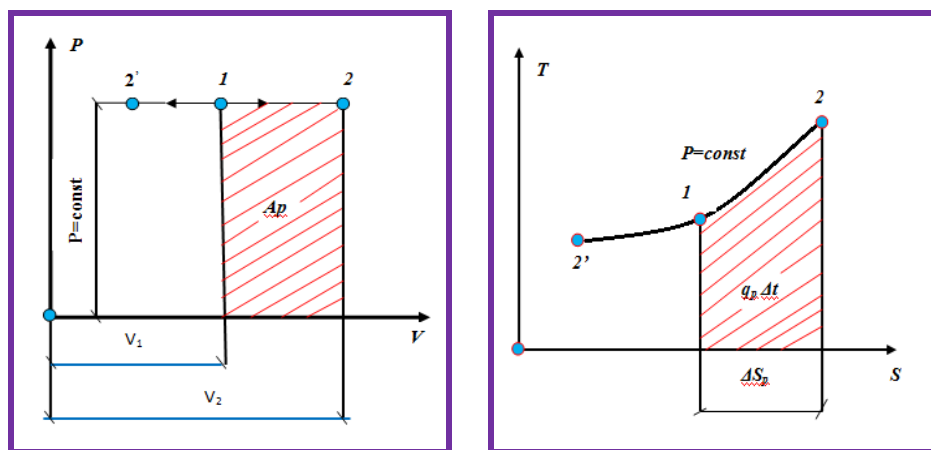
Izobarik jarayonda tizimning kengayish ishi quyidagi tarzda aniqlanadi:

$$\ell_p = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p \int_{v_1}^{v_2} dv = p(v_2 - v_1) \quad (4.8)$$

yoki

$$\ell_p = R(T_2 - T_1) = R\Delta T \quad (4.9)$$

Oxirgi tenglamadan ko'rinib turibdiki, agar $\Delta T = 1^\circ$ bo'lsa, $\ell_p = R$ bo'ladi.



**4.2-rasm. Gaz holatini izobarik jarayonda o'zgarishining
Pv - va Ts - diagrammalari**

Shundan ko'rinib turibdiki, agar temperaturalar farqi 1° bo'lsa, universal gaz doimiysi izobarik jarayonda tizimning bajargan ishini tavsiflar ekan.

Izobarik jarayon uchun termodinamikaning birinchi qonunini ($p=\text{const}$, yoki $dp=0$) yozamiz:

$$dq_p = c_p dt = dh \quad (4.10)$$

Demak, izobarik jarayonda tizimga keltirilgan issiqlik miqdori ($p=\text{const}$) quyidagiga teng:

$$q_{P,1-2} = \int_{t_1}^{t_2} c_p dt = c_p (t_2 - t_1) = h_2 - h_1, \quad (4.11)$$

Sig'im o'zgaruvchan bo'lsa:

$$q_{P,1-2} = c_{pm} \left(\frac{t_2}{0} - \frac{t_1}{0} \right) = h_2 - h_1 \quad (4.12)$$

Izobarik jarayonda tizimga uzatilgan issiqlik miqdori entalpiyaning o'zgarishiga teng ekan. Demak, izobarik jarayonda termodinamik tizimga uzatilgan issiqlik miqdori asosan shu tizim ichki energiyasining ortishiga va oz qismi tashqi mexanik ish bajarishga sarf bo'lar ekan.

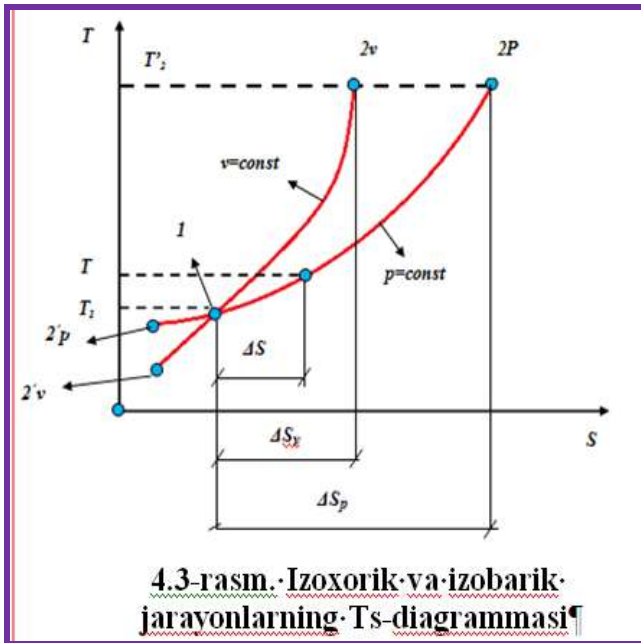
Izobarik jarayon uchun sig'im o'zgarmas bo'lganda entropiyaning o'zgarishi quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$s_2 - s_1 = c_p \ln T_2 / T_1 - R \ln p_2 / p_1$$

lekin, $p=\text{const}$ uchun $\ln p_2 / p_1 = 0$.

Shuning uchun

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} (c_p / T) dT = c_p \ln T_2 / T_1 = c_p \ln v_2 / v_1 \quad (4.13)$$



(4.6) va (4.13) tenglamalarni taqqoslashdan ko'rinib turibdiki, agar temperaturalar T_1 dan T_2 gacha o'zgarganda $\Delta s_p > \Delta s_v$ bo'ladi, chunki $s_p > s_v$.

Shu sababli izoxora grafigi izobaraga nisbatan tikroq bo'ladi (4.3-rasm).

Demak, termodinamik tizimlarga bir xil miqdorda issiqlik energiyasi berilsa ham, entropiyaning o'zgarishi izoxorik jarayonda izobarik jarayonga nisbatan tezroq o'zgaradi.

4.4. Izotermik jarayon

O'zgarmas ($T = \text{const}$) temperaturada sodir bo'ladigan termodinamik jarayon izotermik jarayon deyiladi. Boyle-Mariott qonuniga asosan $T = \text{const}$. Izotermik jarayonning Pv koordinatalari diagrammasi giperboladan, Ts –koordinatadagi diagrammasi obtsissa o'qiga parallel chiziqdan iborat (4.4-rasm).

Tizim xolatlarining tenglamalarini quyidagicha yozish mumkin.

$$p_1 v_1 = RT_1; \quad p_2 v_2 = RT_2.$$

$T = \text{const}$ bo'lganligi uchun $T_1 = T_2$.

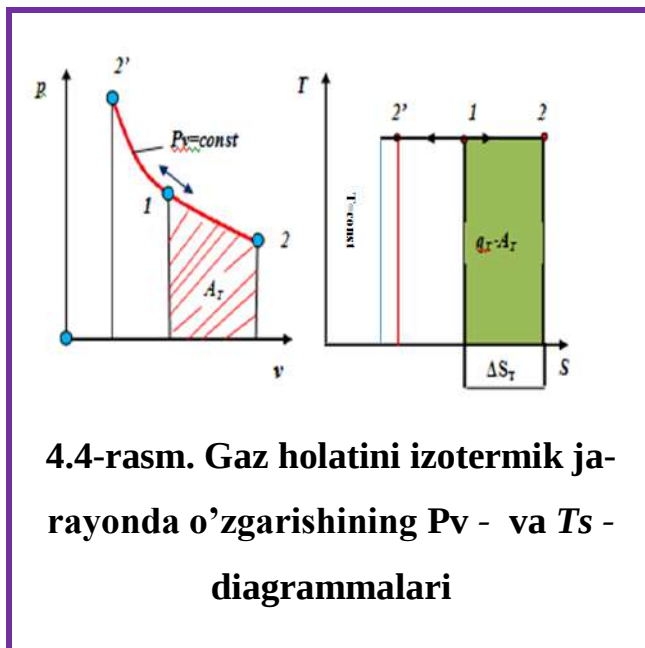
Boyle-Mariott qonunining ifodasi tizim holat tenglamalarining nisbatidan topiladi.

$$p_1 / p_2 = v_2 / v_1 \text{ yoki } p_1 v_1 = p_2 v_2 \dots p_n v_n = \text{const} \quad (4.14)$$

Demak, o'zgarmas temperaturadagi berilgan gaz massasi bosimining hajmiga ko'paytmasi o'zgarmas kattalikdir.

Jarayonning ishini gazning kengayish ishi $\ell = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ orqali aniqlash mumkin. Gazning holat tenglamasidan $p=RT/v$.

U holda



4.4-rasm. Gaz holatini izotermik jarayonda o'zgarishining Pv - va Ts - diagrammalari

$$\ell_T = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.15)$$

Termodinamik tizimga uzatilgan issiqlik miqdorini termodinamikaning birinchi qonunini yozib, uning tahlilidan aniqlaymiz.

$$dq_T = c_v dt + p dv$$

Izotermik jarayonda $T = \text{const}$ bo'lganligi uchun $dT=0$. Shu sababli $du = c_v dt$ ekanligidan, izotermik jarayonda ichki energiyaning o'zgarishi nolga teng, ya'ni

$$du=0 \quad (4.16)$$

Demak, tizimga uzatilgan issiqlik miqdori tashqi ta'sir kuchiga qarshi mexanik ish bajarishga sarflanadi.

$$dq_T = d\ell \quad (4.17)$$

Issiqlik miqdori Ts-diagrammada balandligi T va asosi Δs_t ga teng to'rtburchak yuziga teng, ya'ni $q_T = T \cdot \Delta s$. Izotermik jarayonda entropiyaning o'zgarishini quyidagi formuladan aniqlanadi.

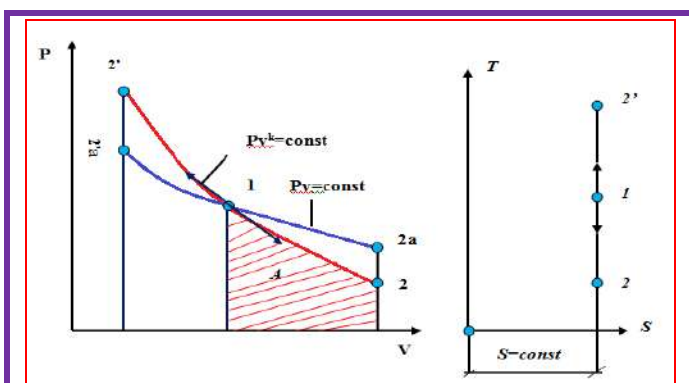
$$\Delta s_T = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.18)$$

U holda

$$q_T = T \cdot \Delta s_T = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4.19)$$

4.5. Adiabatik jarayon

Ish moddasi tashqi muhit bilan issiqlik almashmagan holda kechadigan termodinamik jarayon adiabatik jarayon deyiladi. Jarayonning egri chizig'i adiabata deyiladi (4.5-rasm).



4.5-rasm. Gaz holatini adiabatik jarayonda o'zgarishining Pv - va Ts - diagrammalari

Tashqaridan tizimga issiqlik uzatilmaydi va undan chiqarilmaydi, ya'ni $dq=0$. Real sharoitda real jarayonlar muvozanatda bo'la olmaydi, shuning uchun adiabatik jarayon bo'lishi mumkin emas. Ammo tez kechadigan jarayonlarni adiabatik jarayon deb qarash mumkin.

Tashqaridan tizimga kiritilgan issiqlik miqdori $dq_A=0$ bo'lganligi uchun, shu tizim entropiyasining o'zgarishi $ds=dq_A/T=0$ bo'ladi. Demak, tizimda kechadigan jarayon adiabatik bo'lsa, bunday termodinamik tizimning entropiyasi o'zgarmasdir, ya'ni $s=const$. Adiabata tenglamasini keltirib chiqaraylik. Termodinamikaning birinchi qonuni tenglamasidan $dq=0$ bo'lganda:

$$c_p dT - v dp = 0 \text{ va } c_v dT + p dv = 0.$$

Birinchi tenglamani ikkinchisiga bo'lib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{c_p dT}{c_v dT} = - \frac{v dp}{p dv} \text{ yoki } k \frac{dv}{v} = - \frac{dp}{p}$$

Oxirgi tenglamani $k=const$ ($c_p=const$ va $c_v=const$) deb hisoblab integrallaymiz:

$$k \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = - \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} \text{ va } k \ln v_2 / v_1 = \ln p_1 / p_2$$

yuqoridagi tenglamani potentsirlasak:

$$(v_2/v_1)^K = p_1/p_2 \text{ yoki } p_1 v_1^K = p_2 v_2^K$$

hosil bo'ladi[4].

U holda adiabata tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$pv^k = \text{const.} \quad (4.20)$$

Bunda $k = c_p/c_v$ – izobarik solishtirma issiqlik sig'imini izoxorik solishtirma issiqlik sig'imidan necha marta kattaligini ko'rsatuvchi koeffitsient bo'lib, u adiabata ko'rsatkichi deyiladi. (4.20) munosabat Puassonning adiabata tenglamasi deb aytiladi.

Adiabata tenglamasi (4.20) dan gaz holatining parametrlari orasidagi bog'lanishni ifodalovchi adiabatik jarayon tenglamalarini keltirib chiqarish mumkin:

p va v o'rtasida

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^K, \quad (4.21)$$

T va v o'rtasida:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{K-1}, \quad (4.22)$$

p va T o'rtasida

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad (4.23)$$

Adiabatik jarayonda gazning bajargan ishi ichki energiyaning o'zgarishiga teng, ya'ni

$$du + pdv = 0 \text{ yoki } du = -pdv \quad (4.24)$$

Gaz hajmining ortishi natijasida uning bosimi va temperaturasi kamayadi, siqilganda esa aksincha. Bunday jarayon faqat gaz ichki energiyasining ortishi yoki kamayishi hisobiga sodir bo'la oladi. Adiabatik jarayonda bajarilgan ishni termodinamikaning birinchi qonunidan keltirib chiqarish mumkin.

$$q = \Delta u + \ell = 0.$$

$$c_v = \text{const da } \ell = -\Delta u = c_v (T_1 - T_2)$$

$$\text{yoki } \ell = \frac{c_v}{R} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (4.25)$$

$$c_v / R = c_p - c_v = 1/(k-1) \text{ ekanligidan}$$

$$\ell = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (4.26)$$

hosil qilamiz.

Ushbu tenglamada $p_1 v_1 = RT_1$ va $p_2 v_2 = RT_2$ ekanligidan

$$\ell = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left(1 - \frac{p_2 v_2}{p_1 v_1}\right) \quad (4.27)$$

lekin
$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}$$

u holda
$$\ell = \frac{p_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \quad (4.28)$$

Endi Pv - va Ts - diagrammalarda izoterma va adiabataning joylashuviga e'tibor beraylik (4.5-rasm). Izotermik jarayon bo'yicha gaz kengaysa, uning bosimi adiabataga nisbatan sekinroq, gaz siqilganda esa, adiabatik jarayondagiga nisbatan yana ham sekinroq o'zgaradi. Adiabatik jarayon grafigining tikligiga asosiy sabab, o'rganilayotgan gaz kengayganda uning ichki energiyasi va temperaturasi kamayadi, agar gaz siqilsa, uning hajmini kamayishi natijasida ichki energiyasi va temperaturasi ortadi.

4.6. Politrop jarayon

Tizim (ideal gaz) ning solishtirma issiqlik sig'imi ($c = \text{const}$) o'zgarmas bo'lgan termodinamik jarayon politrop jarayon deyiladi. Jarayon egri chizig'i politropa deyiladi (4.6-rasm). Termodinamik jarayon ta'rifidan ko'rinib turibdiki, asosiy termodinamik jarayonlar: izotermik, izoxorik, izotermik va adiabatik jarayonlar o'zgarmas sig'imda kechsa, ular politrop jarayonning xususiy holi bo'ladi.

Politrop jarayonning issiqlik miqdori jarayon issiqlik sig'imi c va boshlang'ich hamda oxirgi holat temperaturalari farqi $t_1 - t_2$ ko'paytmasi orqali ifodalanishi mumkin.

$$q = c(t_2 - t_1) \text{ va } dq = c dt \quad (4.29)$$

Politrop jarayonning tenglamasini termodinamikaning birinchi qonuni tenglamasidan keltirib chiqarish mumkin:

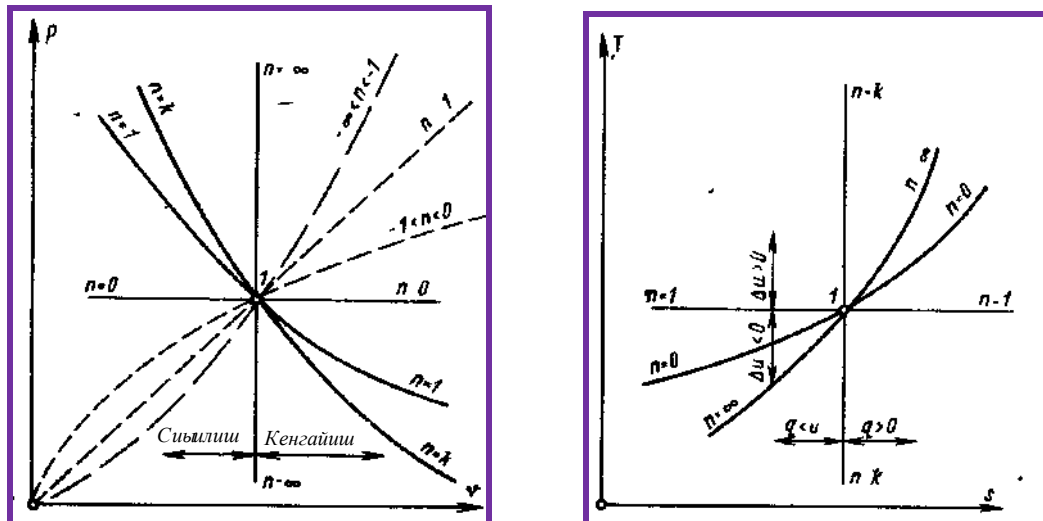
$$dq = c dt = c_p dT - v dp \text{ va } dq = c dT = c_v dt + p dv$$

shu tenglamalardan:

$$(c-c_p) / (c-c_v) = -vdp/pdv$$

Tenglamani chap tomonini n deb belgilasak, quyidagini hosil qilamiz:

$$(c-c_p) / (c-c_v) = n \text{ va } ndv/v = -dp/p$$



4.6-rasm. Gazlar holati o'zgarish jarayonlarining Pv - va Ts - diagrammalardagi birlashgan grafigi

hosil bo'lgan tenglamani integrallab quyidagi ko'rinishga keltiramiz:

$$n \lg v_2/v_1 = \lg p_1/p_2$$

yoki

$$pv^n = \text{const} \quad (4.30)$$

Hosil bo'lgan (4.30) tenglama politrop jarayon tenglamasi deyiladi.

$n = \frac{c-c_p}{c-c_v}$ politrop ko'rsatkichi. Demak, politrop jarayondagi tizimning holat parametrlari o'zgarsa ham uning politrop ko'rsatkichi o'zgarmasdan qolar ekan.

Politrop jarayonni yuqorida qarab chiqilgan jarayonlarning umumlashgan holi deb qarash mumkin. Chunki, politrop ko'rsatkichi qiymatini $-\infty$ dan $+\infty$ gacha oraliqda o'zgartirib, izoxorik ($n=+\infty$), izobarik ($n=0$), izotermik ($n=1$) va adiabatik ($n=k$) jarayonlar tenglamalarini hosil qilish mumkin.

Politrop jarayon tenglamasi adiabatik jarayon tenglamasidan faqatgina n ning qiymati bilan farqlanishi tufayli, parametrlar orasidagi bog'lanish adiabat jarayon kabi bo'ladi:

$$p_2 / p_1 = (v_1 / v_2)^n; T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{n-1}; T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{\frac{n-1}{n}} \quad (4.31)$$

Politrop jarayonning issiqlik sig'imini (4.31) formuladan aniqlaymiz:

$$c = c_v [(n - k) / (n - 1)] \quad (4.32)$$

(4.32) tenglama n ning har qanday qiymati uchun jarayon isiqlik sig'imini aniqlash imkonini beradi. (4.32) tenglamaga yuqorida ko'rib chiqilgan jarayonlar uchun n ning qiymatini qo'ysak, u holda shu jarayonlarning issiqlik sig'imlarini aniqlash mumkin:

izoxorik jarayonda $n = +\infty$, $c = c_v$;

izobarik jarayonda $n = 0$, $c = kc_v = c_p$;

izotermik jarayonda $n = 1$, $c = +\infty$;

adiabatik jarayonda $n = k$, $c = 0$;

Politrop jarayonda kengayish ishi tenglamasi adiabatik jarayondagiga o'xshash bo'ladi:

$$\ell = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (4.33)$$

$$\ell = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) \quad (4.34)$$

$$\text{va } \ell = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \quad (4.35)$$

Politrop jarayonda ichki energiyaning o'zgarishi va issiqlik quyidagi formulalardan aniqlanadi.

$$\Delta u = c_v (t_2 - t_1)$$

$$q = c (t_2 - t_1) = c_v [(n - k) / (n - 1)] (t_2 - t_1) \quad (4.36)$$

Entropiyaning o'zgarishi ds esa quyidagicha aniqlanadi:

$$ds = \frac{dq}{T} = \frac{cdT}{T} = c_v \frac{n - k}{n - 1} \frac{dT}{T}$$

$$ds = s_2 - s_1 = \int_1^2 ds = c_v \frac{n - k}{n - 1} \int_1^2 \frac{dT}{T}$$

$$ds = c_v \frac{n - k}{n - 1} \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (4.37)$$

Politrop jarayonda entalpiyaning o'zgarishi:

$$h_2 - h_1 = c_p(t_2 - t_1) \quad (4.38)$$

Ts – diagrammada (4.6-rasm) politrop jarayon n ning qiymatiga bog'liq ravishda turli xil egri chiziqlar bilan tasvirlanadi.

Politrop jarayonda ichki energiya qanday o'zgarishini ko'rib chiqaylik.

Izotermik jarayonda ($n=1$) ichki energiya o'zgarmaydi, ya'ni $u_2=u_1$. Izobarik kengayishda ($n=0$) ichki energiya ortadi. Izoxorik jarayonda ($n=-\infty$) issiqlik keltirilganda ichki energiya ortadi. Demak, izotermadan yuqorida joylashgan barcha kengayish jarayonlari, $n<1$ va $n>1$ bo'lgan siqish jarayonlari ichki energiyaning ortishi bilan kechadi. Izotermadan pastda joylashgan politrop jarayonlar, $n>1$ da va $n<1$ bo'lgan siqish jarayonlari ichki energiyaning kamayishi bilan kechadi.

Politrop jarayonlarda issiqlik ishorasi qanday o'zgarishini ko'rib chiqaylik.

n ko'rsatkichiga q , Δu va c ishoralarining bog'liqligi.

4.3-jadval.

Guruh	n	Gazlarning kengayishi		Gazlarning siqilishi		c
		Δu	q	Δu^1	q^1	
Birinchi	$0 \leq n \leq 1$	$\Delta u > 0$	$q > 0$	$\Delta u^1 < 0$	$q^1 < 0$	$c > 0$
Ikkinchi	$1 < n \leq k$	$\Delta u < 0$	$q > 0$	$\Delta u^1 > 0$	$q^1 < 0$	$c < 0$
Uchinchi	$k < n \leq \infty$	$\Delta u < 0$	$q < 0$	$\Delta u^1 > 0$	$q^1 > 0$	$c > 0$

Adiabatik jarayonda issiqlik keltirilmaydi va olib ketilmaydi. Izotermik ($n=1$), izobarik ($n=0$) kengayish jarayonlarida va izoxorik jarayonda ($n=-\infty$) issiqlik keltiriladi. Demak, adiabatadan yuqorida joylashgan kengayish jarayonlarida ($k > n > -\infty$) va $\infty > n > k$ bo'lgan siqish jarayonlarida ishchi jismga issiqlik keltiriladi.

$\infty > n > k$ bo'lgan kengayish jarayonlarida va $-\infty < n < k$ bo'lgan siqish jarayonlarida ishchi jismdan issiqlik olib ketiladi.

Adiabata va izoterma orasida joylashgan jarayonlarda issiqlik sig'imi manfiy bo'ladi, chunki shu jarayonlarda dq va du lar ishorasi har xil. Chunki $du = c_v dT$ dan, du ning ishorasi dT ga bog'liq ($du > 0; dT > 0$ va $du < 0, dT < 0$).

U holda issiqlik sig'imi ifodasidan ($s = dq/T$) ko'rinib turibdiki, haqiqatan ham uning ishorasi manfiy. Buning mohiyati shundan iboratki, bunday jarayonlarda ishchi jismga issiqlik keltirilganda uning temperaturasi pasayadi va issiqlik olib ketilganda esa temperatura ortadi. Yuqoridagi tekshirish natijalarini jadval holiga keltirish mumkin (4.3-jadval).

Nazorat uchun savollar:

Izoxorik jarayoning diagrammalari.

Izoxorik jarayonda issiqlik miqdori qanday o'zgaradi?

Izoxorik jarayonda ichki energiya qanday o'zgaradi?

Izoxorik jarayonda ish qanday aniqlanadi?

Izotermik jarayonda entalpiya nimaga teng?

Izotermik jarayon Pv - va Ts - diagrammada qanday tasvirlanadi?

Izobarik jarayon tenglamasi

Izobarik jarayonda entalpiya qanday aniqlanadi?

Adiabatik jarayon tenglamasi.

Adiabata ko'rsatkichi.

Politrop jarayonning diagrammalari.

Politrop jarayonda ichki energiya qachon ortadi?

BESHINCHI BOB

SUV BUG'I

Asosiy tushunchalar

Suv bug'i zamonaviy issiqlik energetikasining asosiy ish jismidir. Undan ko'pchilik texnologik jarayonlarda ham foydalaniladi. Shuning uchun ham suv va suv bug'ining termodinamikaviy xossalarini tekshirish katta ahamiyatga ega.

Jismni suyuq holatidan gaz holatiga o'tish jarayoni bug' hosil bo'lish deb aytiladi. Suyuqlikning faqat erkin sirtidan va har qanday temperaturada bug' hosil bo'lish jarayoniga bug'lanish deyiladi. Bug'lanishning mohiyati shundan iboratki, suyuqlik sirtidagi tezligi yuqori, ya'ni kinetik energiyasi katta bo'lgan molekulalar qo'shni molekulalarning tortishish kuchlarini yengib suyuqlikdan atrof muhitga uchib chiqadilar. Bug'lanish suyuqlikning tabiatiga va temperaturasiga bog'liqdir. Temperatura ko'tarilishi bilan bug'lanish tezligi ortadi. Bug'lanish jarayonida suyuqlikning temperaturasi kamayadi, chunki suyuqlikdan tezligi yuqori bo'lgan molekulalarning uchib chiqishi tufayli qolgan molekulalarning o'rtacha energiyasi pasayadi.

Suyuqlikka issiqlik uzatilganda uning temperaturasi ko'tarilib bug'lanish jadallashadi. Suyuqlikning tabiatiga va bosimiga mos temperaturada bug'lanish suyuqlikning butun hajmi bo'yicha ro'y beradi. Natijada jadal ravishda bug' pufakchalari idish devorlariga hamda suyuqlik hajmida paydo bo'ladi va kattalashib suyuqlik sirtiga qalqib chiqib yoriladi. Bunday hodisa qaynash deyiladi. Qaynash suyuqlik sirtidagi bosimga bog'liq, ya'ni bosim ortsa, qaynash temperaturasi ham ortadi va aksincha. Jismni gaz holatidan suyuq holatiga o'tishi kondensatsiya deb aytiladi. Kondensatsiya jarayoni bug' hosil bo'lishi kabi o'zgarmas temperaturada ro'y beradi. Bug'ning kondensatsiyalanishi natijasida hosil bo'lgan suyuqlikka kondensat deyiladi. Qattiq jismni birdaniga bug' holatiga o'tishi sublimatsiya deyiladi. Bug'ning qattiq holatga o'tishi esa desublimatsiya deyiladi.

Suyuqlik sirtidan qancha molekula uchib chiqib gaz holatiga o'tsa va xuddi shuncha molekula kondensatsiyalanib suyuqlik holatiga qaytsa, bunday hodisa to'yinish holati deb qabul qilingan, ya'ni bug' suv bilan muvozanatda bo'ladi.

Suyuqlik bilan dinamik muvozanatdagi bug' to'yingan bug' deyiladi. Suyuqlikning erkin sirti ustidagi bo'shliqni to'yintiradigan bug'ga nam bug' deyiladi. To'yingan nam bug'da mayda suv tomchilari bo'ladi. Hosil qilingan nam bug'ga yana qo'shimcha issiqlik miqdori uzatilsa, uning tarkibidagi juda mayda suv tomchilari bug' holatiga o'tadi va to'yingan quruq bug' hosil bo'ladi.

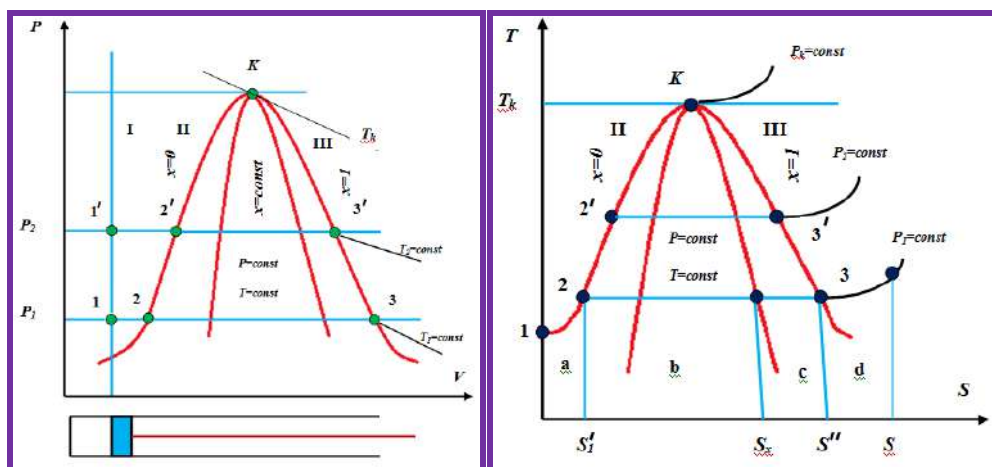
Nam bug'dagi quruq to'yingan bug'ning massaviy ulushiga bug'ning quruqlik darajasi deyiladi va x harfi bilan belgilanadi. Nam bug'dagi suyuqlikning massaviy ulushiga namlik darajasi deyiladi va y harfi bilan belgilanadi va $y=1-x$ bo'lishi tabiiy. To'yinish temperaturasi qaynayotgan suyuqlik uchun $x=0$, quruq to'yingan bug' uchun esa $x=1$.

Demak, quruqlik darajasi 0 dan 1 gacha o'zgarishi mumkin. To'yingan quruq bug'ga o'zgarmas bosimda yana qo'shimcha issiqlik miqdori uzatilsa, u holda uning temperaturasi ko'tariladi va u o'ta qizdirilgan bug' holatiga o'tadi.

O'ta qizdirilgan bug'ning temperaturasi va solishtirma hajmi shu bosimdagi quruq to'yingan bug'nikidan yuqori bo'ladi. O'ta qizdirilgan bug'ni suyuqlik sir-tida olib bo'lmaydi. O'ta qizdirilgan bug' va quruq to'yingan bug'ning shu bosimdagi temperaturalar farqiga qizdirish darajasi deb aytiladi. O'ta qizdirilgan bug' to'yinmagan bo'ladi, chunki uning shu bosimdagi solishtirma hajmi quruq to'yingan bug'nikidan yuqori, zichligi esa kam bo'ladi.

5.2. Suv bug'ining Pv – diagrammasi

Suv bug'ining Pv – diagrammasini ko'rib chiqamiz (5.1-rasm).



5.1-rasm. Bug' hosil bo'lishining Pv – va Ts-diagrammalari

Silindrda temperaturasi 0°S va bosimi p_1 bo'lgan 1 kg suv turgan bo'lsin (P_v – diagrammada 1-nuqta). Suvga issiqlik uzatish natijasida u isiydi va kengayadi. Jarayon bosimi p_1 ga mos bo'lgan qaynash temperaturasi $t=t_1$ da suv qaynaydi va bug' hosil bo'lish boshlanadi (2-nuqta).

Suv va bug'ning holatlarining o'zgarishini P_v - va T_s – diagrammalarda belgilab boramiz. O'ta qizigan bug'ni $p=\text{const}$ da hosil bo'lish jarayoni ketma-ket keladigan uchta fizik jarayondan iborat:

- 1) Suyuqlikni to'yinish temperaturasi t_T gacha (t_T) isitish;
- 2) $t_T = \text{const}$ da bug' hosil bo'lishi;
- 3) bug'ni o'ta qizdirish va buning natijasida uning temperaturasi ko'tarilishi.

2-nuqtada porshen ostida 1-fazali tizim, ya'ni suv bo'ladi. Tashqaridan beriladigan issiqlik miqdori ortib borgan sayin temperatura o'zgarmaydi, bug'ning miqdori ortib, suvni kamayadi (3-nuqtaga). 2-3 jarayonda quruq bug' va suyuqlikdan iborat nam to'yingan bug' hosil bo'ladi. Shu jarayonda porshen ostida ikki fazali tizim (suv + bug') bo'ladi. Hajmdagi hamma suv miqdori 3-nuqtada to'la gaz holatiga o'tadi, ya'ni to'yingan quruq bug' hosil bo'ladi. Jadval bug'lanish o'zgarmas bosim ($p_1=\text{const}$) ostida sodir bo'lganda yuqoridagi jarayon ham izobarik, ham izotermik bo'ladi. Ma'lumki, nam to'yingan bug'ning asosiy tavsifi uning quruqlik darajasidir (x). Ko'rinib turibdiki, 2-nuqtada $x=0$, 3-nuqtada $x=1$ ga teng.

Agar quruq to'yingan bug'ga (3-nuqta) issiqlik keltirish davom ettirilsa, u holda uning solishtirma hajmi va temperaturasi ortadi. Bug' 3-nuqtadan o'ng tomonda o'ta qizdirilgan bug' holatiga o'tadi.

Agar bug' hosil bo'lish jarayoni yuqoriroq bosimda ($p_2 > p_1$) olib borilsa, u holda suv hajmi deyarli o'zgarmaydi, qaynayotgan suv hajmi ortadi, quruq to'yingan bug'ning hajmi esa kamayadi. Demak bosim ortgan sari P_v – diagrammadagi 1-2 qism ortib boradi, 2-3 qism esa kamayib boradi. Quruq bug'-bu real gazdir. p_2 bosimda uning solishtirma hajmi kam bo'lib, 3-nuqta 3-nuqtadan chaproqda joylashadi. Quruq bug'ning hajmini o'zgarishi temperatura o'zgarishiga qaraganda bosim o'zgarganda ko'proq o'zgaradi.

Masalan, bosim 0,1 MPa bo'lganda bug'nng temperaturasi $T_t=372,79$ K; bosim 4 MPa bo'lganda esa $T_t=523,48$ K bo'ladi. Ya'ni temperatura ortishi hajmni 1,4 marta orttirsa, bosim ortishi esa hajmni 40 marta kamaytiradi. Kritik bosimda 2 va 3 nuqtalar ustma-ust tushadi. Shu nuqta kritik nuqta deb aytiladi va K harfi bilan belgilanadi. Shu nuqta moddaning kritik holatiga mos kelib, unda suyuqlik va gaz o'rtasidagi farq yo'qoladi. Shu nuqtadagi modda parametrlari kritik parametrlar deb aytiladi.

Masalan, suv uchun $p_k=22,1145$ MPa, $T_k=647,266$ K va $v_k=0,003147$ m³/kg; simob uchun $p_k=100$ MPa, $T_k=1673$ K; ammiak uchun $p_k=10,99$ MPa va $T_k=406$ K; CO₂ uchun $p_k=7,32$ MPa, $T_k=304,5$ K.

Kritik temperatura bug'ning maksimal to'yinish temperaturasi bo'ladi. Kritik temperaturadan yuqorida faqat o'ta qizigan bug'lar va gazlar bo'lishi mumkin. Kritik temperatura haqidagi tushunchani 1860 yili D.I. Mendeleev berdi. Bu temperatura shunday temperaturaki, undan yuqori temperaturada (bosim qanday bo'lishidan qat'iy nazar) gazni suyuqlikka aylantirib bo'lmaydi.

Pv – diagrammadagi 1,2 va 3 – nuqtalarni birlashtirib, uchta chiziqli olamiz: I – 0°S dagi suv uchun;

II – to'yinish temperaturasidagi suv uchun (pastki chegara chizig'i). III – quruq to'yingan bug' uchun (yuqori chegara chizig'i). Bu egri chiziqlar diagrammani quyidagi sohalarga bo'ladi: I va II chiziqlar orasida suyuqlik bo'ladi; II va III chiziqlar orasida nam to'yingan bug' bo'ladi va III chiziqdan o'ngroqda o'ta qizigan bug' bo'ladi. Suv va quruq to'yingan bug'ning to'yinish chizig'idagi parametrlari bosim yoki temperaturaga bog'liq ravishda jadvallardan aniqlansa, o'ta qizigan bug'ning parametrlari esa bosim va temperaturaga bog'liq ravishda jadvallardan aniqlanadi.

Ts – diagrammada suyuqlik, nam to'yingan bug' va o'ta qizigan bug' sohalari va tegishli jarayonlar tasvirlangan. Diagrammadagi yuzalar suvning qaynash temperaturasidagi entalpiyasini $h^1(a$ yuza), nam to'yingan bug' entalpiyasini $h_x(a+v$ yuza), quruq to'yingan bug' entalpiyasini $h^{II}(a+v+s$ yuza), o'ta qizigan bug' entalpiyasini $h(a+v+s+d$ yuza) ifodalaydi. $(v+s)$ –yuza bug' hosil qi-

lish issiqligiga r , ya'ni, qaynash temperaturasiidagi 1 kg suyuqlikni bug'ga aylantirish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdoriga teng.

Suyuqlik va quruq to'yingan bug'ning asosiy parametrlari.

Bug' hosil qilish issiqligi

Suvning 0°S temperatura va turli bosimlardagi solishtirma hajmi $v_0 \approx 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ ga teng. Qaynayotgan suvning solishtirma hajmi v bosim va temperatura ko'tarilishi bilan ortadi, ayniqsa yuqori bosimlarda 0°S temperaturadagi solishtirma hajmidan ancha farq qiladi. Masalan, $p=50 \text{ bar}$ da $v^1=0,0012859 \text{ m}^3/\text{kg}$; $p=220 \text{ bar}$ da $v^1=0,00269 \text{ m}^3/\text{kg}$. 1 kg suvni 0°S temperaturadan qaynash temperaturasigacha isitish uchun (mos bosimda) zarur bo'lgan issiqlik miqdori quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$q=h^1-h^1_0 \quad (5.1)$$

bu yerda h^1 – qaynayotgan suv entalpiyasi; h^1_0 – suvning 0°S dagi entalpiyasi; Qaynayotgan suyuqlik entalpiyasi bosim yoki temperatura bo'yicha aniqlanib, to'yingan suv bug'lari jadvallaridan olinadi.

Qaynayotgan suyuqlikning ichki energiyasi u^1 entalpiya formulasidan aniqlanadi:

$$h=u+Pv \text{ yoki } u^1=h^1-Pv^1 \quad (5.2)$$

Qaynash temperaturasigacha isitilgan suvga issiqlik berish davom ettirilsa, u bug'ga aylana boshlaydi. Bug' hosil bo'lish jarayonida suvning oxirgi tomchisi bug'ga aylanmaguncha temperatura o'zgarmasdan turadi. Shu oxirgi holatda quruq to'yingan bug' hosil bo'ladi. Yuqorida aytilganidek, 1 kg qaynayotgan suvni quruq to'yingan bug'ga aylantirish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdoriga bug' hosil qilish issiqligi deyiladi va r harfi bilan belgilanadi. Bug' hosil qilish issiqligi bosim yoki temperatura bilan aniqlanadi. Ularni ortishi bilan p kamayadi va kritik nuqtada nolga teng bo'ladi. Bug' hosil qilish issiqligi ichki potentsial energiyani o'zgarishiga yoki ajratish (disregatsiya) ishi ρ va tashqi kengayish ishiga $\rho(v^{\text{II}}-v^{\text{I}})=\psi$ sarflanadi. ρ kattalik ichki, ψ – kattalik esa tashqi bug' hosil qilish issiqligi deb aytiladi.

Bug' hosil qilish issiqligi quyidagiga teng:

$$r = \rho + \rho(v^{\text{II}} - v^{\text{I}}) = \rho + \psi \quad (5.3)$$

Quruq to'yingan bug'ning entalpiyasi h'' quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$h'' = h' + r \quad (5.4)$$

Quruq to'yingan bug'ning ichki energiyasi:

$$u'' = h'' - pv'' \quad (5.5)$$

Quruq to'yingan bug' faqat bir parametrlar: bosim yoki temperatura bilan aniqlanadi.

Yuqoridagi kattaliklar: h'' , h' , r , v'' , v' suv bug'i jadvallaridan olinadi.

5.4. Nam to'yingan suv bug'ining asosiy parametrlari

Nam bug' bosim p yoki temperatura t_T va quruqlik darajasi x bilan aniqlanadi. Nam bug'ning temperaturasi mazkur bosimdagi suyuqlikning qaynash temperaturasiga teng. Nam bug'ning solishtirma hajmi v_x quruq bug' va suvdan iborat aralashmaning hajmi kabi aniqlanadi:

$$v_x = v''x + (1-x)v' \quad (5.6)$$

Qozon agregatlarida bug'ning quruqlik darajasi 0,90-0,96 ga teng bo'ladi. Shu sababli suv hajmini aniqlovchi had $(1-x)v' \approx 0$ ga teng bo'ladi. U holda

$$v_x \approx v''x \quad (5.7)$$

Nam bug'ning entalpiyasi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$h_x = h' + rx \quad (5.8)$$

bu yerda h' – suyuqlik entalpiyasi;

rx – suvni bug'latish uchun sarflangan issiqlik miqdori.

Nam bug'ning ichki energiyasi:

$$u_x = h_x - Pv_x \quad (5.9)$$

5.5. O'ta qizigan bug'ning asosiy parametrlari.

Mazkur bosimda quruq to'yingan bug'ga qaraganda temperaturasi yuqori bo'lgan bug'ga o'ta qizigan bug' deyiladi. O'ta qizdirilgan bug' maxsus qurilma – bug' qizdirgichlarda nam bug'dan unga ma'lum bir issiqlik miqdori uzatish yo'li bilan olinadi. 1 kg quruq bug'ni o'zgarmas bosimda kerakli temperaturagacha qizdirish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdoriga o'ta qizdirish issiqligi deb aytiladi.

Bug' qizdirgichda nam bug' avvalo quruq, keyin o'ta qizigan bug' holatiga o'tadi. Bug' qizdirgichdagi bosim o'zgarmas va qozondagi bosimga teng qilib oli-

nadi. O'ta qizigan bug'larning xossalari gazlar xossalariga yaqinlashadi. Qizdirish jarayonida uzatilgan issiqlik miqdorini quyidagi tenglamadan aniqlash mumkin:

$$q_q = \int_{t_T}^t c_p dt \quad \text{yoki} \quad q_k = c_{pm} / (t - t_T) \quad (5.10)$$

bu yerda c_p – o'ta qizdirilgan bug'ning $p=\text{const}$ dagi haqiqiy issiqlik sig'imi;
 c_{pm} – o'ta qizigan bug'ning t_T dan t gacha oraliqdagi o'rtacha issiqlik sig'imi.
 Bug'ga o'zgarish bosimda uzatilayotgan qizdirish issiqligi q_q faqat entalpiyaning o'zgarishiga sarflangani uchun, o'ta qizdirilgan bug'ning entalpiyasi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$h = h^1 + r + c_{pm} \int_{t_T}^t dT \quad (5.11)$$

O'ta qizdirilgan bug'ning ichki energiyasi:

$$u = h - Pv \quad (5.12)$$

Bu yerda v – o'ta qizigan bug'ning solishtirma hajmi. O'ta qizigan bug'ning entalpiya, entropiya va solishtirma hajmi suv bug'i jadvallaridan olinadi.

5.6. Suv va suv bug'ining entropiyasi

Qaytar jarayonlar uchun entropiyaning o'zgarishi tenglamasi:

$$ds = dq/T \quad (5.13)$$

Suv uchun $dq = c_{pc} dT$ va $ds = c_{pc} dT/T$

Suv uchun massaviy izobar issiqlik sig'imini $c_{pc} = 4,19 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = \text{const}$ deb hisoblaymiz. Shuning uchun oxirgi tenglamani $273,16^\circ\text{K}$ dan suvning qaynash temperaturasi T_t gacha integrallab, hamda suvni $273,16^\circ\text{K}$ dagi entropiyasini nolga yaqin deb, suv uchun qaynash temperaturasidagi entropiyani aniqlaymiz:

$$\Delta s = s^1 - s_0^1 = s \int_{273,16}^{T_t} \frac{dq}{T} = \int_{273,16}^{T_t} c_{pc} \frac{dT}{T} \approx 4,19 \ln \frac{T_H}{273,16} \quad (5.14)$$

Quruq to'yingan bug' uchun entropiyaning o'zgarishi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \Delta s &= s'' - s^1 = r / T_T \quad \text{yoki} \\ s'' &= s^1 + r / T_T \end{aligned} \quad (5.15)$$

Nam to'yingan bug' uchun:

$$\Delta s_x = s_x - s^1 = rx / T_T \quad \text{yoki}$$

$$s_x = s^1 + rx / T_T = 4,19 \ln T_T / 273 + rx / T_T \quad (5.16)$$

Qizdirish jarayonida entropiyani T_T dan T gacha o'zgarishi quyidagicha aniqlanadi:

$$\Delta s = s - s^{II} = \int_{T_T}^T \frac{dq_{qizd}}{T} = \int_{T_T}^T \frac{c_{pm} dT}{T} = c_{pm} \ln \frac{T}{T_T}$$

u holda

$$s = 4,19 \ln \frac{T_T}{273} + \frac{r}{T_T} + c_{pm} \ln \frac{T}{T_T} \quad (5.17)$$

Suv, quruq va o'ta qizigan bug'ning entropiyasini suv bug'i jadvallaridan olinadi.

5.7. Suv bug'ining jadvali

O'ta qizigan bug' va ayniqsa to'yingan bug' o'zining xossalari bo'yicha ideal gazlardan keskin farq qiladi. Bug'larning holat tenglamalari nihoyatda murakkab va deyarli amaliyotda qo'llanilmaydi.

Ilgari aytib o'tilganidek, jismga berilgan yoki undan olingan issiqlik miqdori entropiya aniqlanadigan Ts–diagrammada jarayon egri chizig'ining ostidagi yuza bilan tasvirlanadi. Shu sababli keltirilgan yoki olib ketilgan issiqlik miqdorini aniqlash uchun har gal bu kattaliklarni tegishli yuzalarini hisoblab chiqib topishga to'g'ri keladi, bu esa amalda tez va aniq hisoblashni qiyinlashtiradi. Agar entropiya diagrammasining ordinatalari o'qiga temperatura o'rniga h qiymatlari qo'yilsa, u holda $s=\text{const}$ bo'lgandagi ish va $p=\text{const}$ bo'lgandagi issiqlik miqdori shu diagrammada yuzalar bilan emas, balki chiziq kesmalari bilan tasvirlanadi. 20 at gacha bosimda suv bug'i uchun birinchi h_s –diagrammani 1904 yilda Mole taklif etgan edi. h_s –diagrammaning paydo bo'lishi bug' jarayonlari va sikllarini termodinamikaviy tekshirish va hisoblash uslublarini ancha soddalashtirdi.

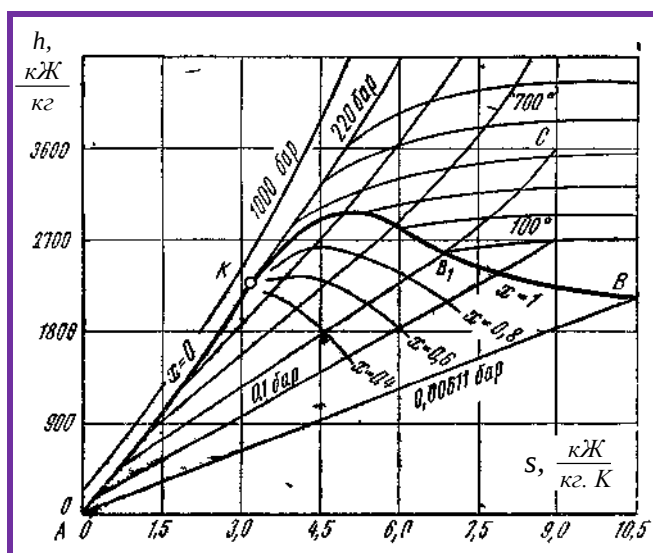
Hozirgi vaqtda Moskva Energetika instituti tomonidan professor M.P. Vukalovich rahbarligida ishlab chiqilgan suv bug'i jadvallari va diagrammalaridan foy-

dalaniladi. Bu jadvallar o'ta qizigan va to'yingan bug'lar uchun 1000°S temperatragacha va 980 bar bosimgacha yuqori aniqlikda tuzilgan.

To'yingan bug' jadvallarida to'yinish temperaturasi, bosim, solishtirma hajm, suyuqlik va quruq bug'ning entalpiya va entropiyasi, bug' hosil bo'lish is-siqligi keltirilgan. O'ta qizigan bug' jadvallarida turli bosim va temperatura uchun asosiy parametrlar: solishtirma hajm, entalpiya, va entropiyaning qiymatlari keltirilgan.

5.8. Suv bug'ining hs -diagrammasi

5.2-rasmda suv bug'ining hs -diagrammasi tasvirlangan. Yuqorida aytib o'tilgan ediki, 273°K (0°S) temperaturadagi entropiya va entalpiya shartli ravishda nolga teng deb hisoblanadi. Bu holat hs -diagrammada koordinatalar boshi bilan tas-virlanadi.



5.2-rasm. Suv bug'ining hs - diagrammasi

Diagrammada ikkita chegara egri chiziq chizilgan, ular kritik nuqta K da bir-biriga qo'shilib ketadi. Pastki chegara egri chiziq ($x=0$) da suvning qaynash temperaturasi-dagi turli holatlar uchun entalpiya h^I va entropiya s^I ning qiymatlari qo'yilgan. Yuqorigi egri chiziq ($x=1$) da qaynash temperaturasi-dagi to'yingan quruq bug'ning turli holatlari uchun h^{II} va s^{II} ning qiymatlari qo'yilgan.

Chegara egri chiziqlar hs -diagrammani ikki sohaga bo'ladi. Bu egri chiziqlardan yuqorida o'ta qizigan bug' sohasi, pastda esa to'yingan nam bug' sohasi joylashadi. To'yinish sohasidagi izobarlar to'plami nolp nuqtadan boshlanadi-

gan va tarmoqlanib ketadigan to'g'ri chiziqlar to'plamidan iborat. Bosim qanchalik katta bo'lsa, izobaralar ham shunchalik yuqorida joylashadi.

Bug' hosil bo'lish jarayoni o'zgarmas temperaturada borganligi sababli to'yinish sohasida izobaralar bir vaqtning o'zida izotermalar bo'lib hisoblanadi. O'ta qizigan bug' sohasida, yuqoridagi chegara egri chiziqda izobara va izotermalar bir-biridan ajraladi. Izobaralar chap tomonga izotermalar esa o'ng tomonga og'adi. Nam to'yingan bug' sohasida bug'ning quruqlik darajasi chiziqlari ($x=\text{const}$) chiziladi va ular kritik nuqta K da kesishadi. h_s -diagrammaga izoxoralar – o'zgarmas solishtirma hajm ($v=\text{const}$) chiziqlari ham chiziladi. Bu chiziqlar (5.2-rasmda ko'rsatilmagan) izobaralarga nisbatan tikroq ketadi. Qaytar adiabat jarayonlar h_s -diagrammada vertikal chiziqlar bilan tasvirlangan. Shuning uchun barcha vertikal chiziqlar h_s -diagrammada adiabatadan iboratdir. Hozirgi vaqtda bug'larning issiqlik jarayonlarini hisoblashda h_s -diagramma va suv bug'i jadvallaridan foydalaniladi.

5.9. Suv bug'i holatining o'zgarishidagi asosiy termodinamik jarayonlar

Suv bug'i holatining o'zgarishidagi termodinamik jarayonlarni hisoblashda suv va suv bug'i jadvallaridan yoki h_s -diagrammadan foydalaniladi.

Bu masalalarni yechishda bug'ning boshlang'ich va oxirgi parametrlari, ichki energiyaning o'zgarishi, entalpiya va entropiya, quruqlik darajasi, ish va issiqlik miqdori aniqlanadi. h_s -diagramma bo'yicha hisoblashni umumiy usuli quyidagicha: keltirilgan parametrlar bo'yicha bug'ning boshlang'ich holati aniqlanadi. Jarayon chizig'i chizilib, bug'ning oxirgi holatdagi parametrlari aniqlanadi.

Ichki energiyaning o'zgarishi quyidagi tenglama bo'yicha hisoblanadi:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) \quad (5.18)$$

Issiqlik miqdori aniqlanadi:

Izoxorik jarayonda

$$q_v = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1); \quad (5.19)$$

Izobarik jarayonda:

$$q_p = h_2 - h_1 \quad (5.20)$$

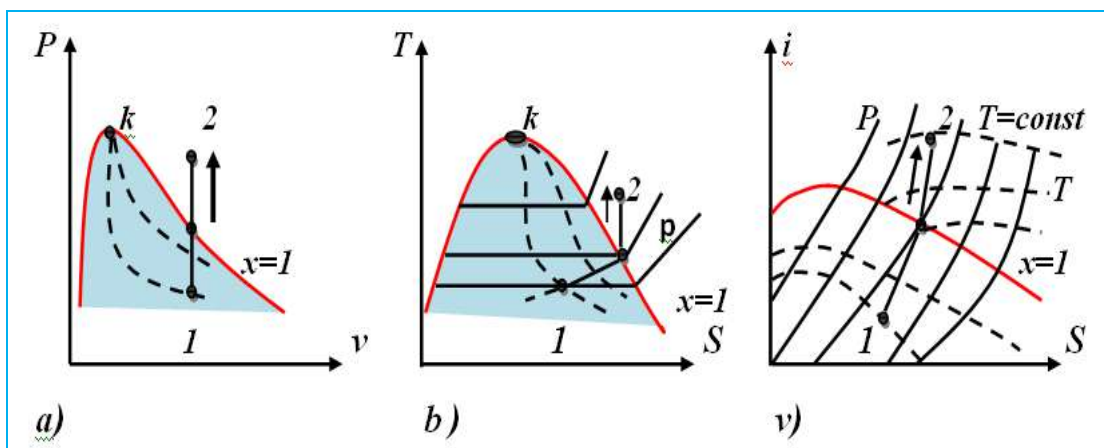
Izotermik jarayonda:

$$q_T = T(s_2 - s_1) \quad (5.21)$$

Bajarilgan ish barcha jarayonlar uchun umumiy bo'lgan quyidagi tenglamadan hisoblanadi:

$$\ell = q - \Delta u \quad (5.22)$$

Izoxorik jarayon (5.3-rasm)



5.3-rasm.

Izoxorik jarayonda nam to'yingan bug'ga issiqlik keltirilishi natijasida uning bosimi va temperaturasi ko'tariladi. $v = \text{const}$ da bug'ning quruqlik darajasi ortishi ham, kamayishi ham mumkin. Agar bug'ning boshlang'ich holati $x=0$ egri chiziqqa yaqin bo'lsa, temperatura kamayishi bilan $v = \text{const}$ da uning quruqlik darajasi ortadi. Agar bug'ning boshlang'ich holati $x=1$ egri chiziqqa yaqin bo'lsa, temperatura kamayishi bilan $v = \text{const}$ da quruqlik darajasi kamayadi.

Izoxorik jarayonda tashqi ish nolga teng. Keltirilgan issiqlik bug'ning ichki energiyasini o'zgarishiga sarflanadi:

$$u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1) \quad (5.23)$$

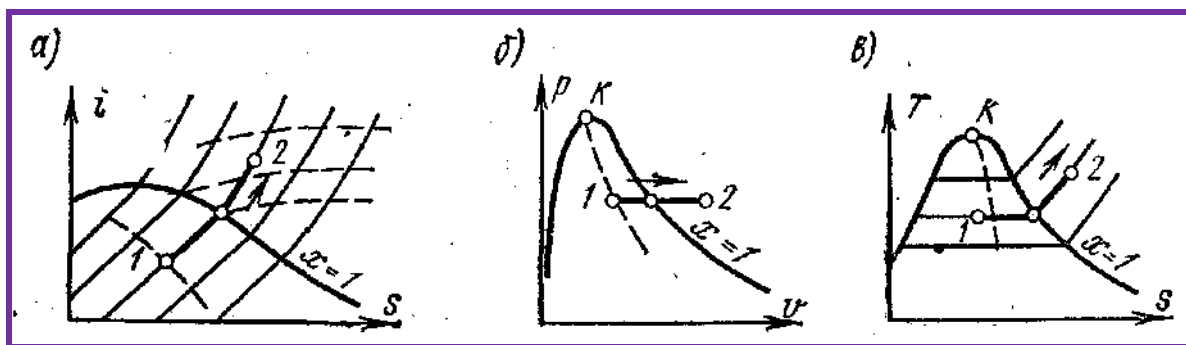
Agar jarayonning solishtirma hajmi v quruq to'yingan bug'ning v^{II} oxirgi holatdagi solishtirma hajmidan kichik bo'lsa $v < v^{\text{II}}$, u holda jarayon oxirida bug' nam to'yingan bug' bo'ladi, agar $v > v^{\text{II}}$ bo'lsa, u holda o'ta qizigan bug' holatida bo'ladi.

Nam to'yingan bug'ning quruqlik darajasini quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$v_x = (1-x)v' + v''x \quad \text{dan} \quad x = (v_x - v')/(v'' - v') \quad (5.24)$$

Pv-diagrammada izoxorik jarayon ordinata o'qiga parallel chiziqdan iborat, Ts-diagrammada esa egri chiziqdan iborat. Nam to'yingan bug' sohasida izoxoraning egriligi yuqoriga, o'ta qizigan bug' sohasida esa, egriligi pastga yo'nalgan. hs-diagrammada izoxoraning egriligi pastga yo'nalgan bo'ladi (5.3-rasm).

Izobarik jarayon (5.4-rasm)



5.4-rasm.

hs-diagrammada izobara to'yingan bug' sohasida suyuqlik va bug'ning chegara chiziqlarini kesib o'tadigan to'g'ri chiziqdan iborat. Nam bug'ga issiqlik keltirilganda uning quruqlik darajasi ortib quruq, yana issiqlik keltirilsa ($T=\text{const}$) o'ta qizigan bug'ga aylanadi. Izobara o'ta qizigan bug' sohasida (5.4-rasm, a) egriligi pastga qaragan egri chiziqdan iborat.

Pv-diagrammada izobarik jarayon gorizontaal chiziqdan iborat bo'lib, nam bug' sohasida izotermik jarayonni ham tasvirlaydi (5.4-rasm, b).

Ts-diagrammada (5.4-rasm, c) nam bug' sohasida izobara gorizontaal chiziqdan iborat, o'ta qizigan bug' sohasida esa, egriligi pastga qaragan egri chiziqdan iborat.

Kerak bo'ladigan barcha kattaliklar qiymati to'yingan va o'ta qizigan bug' jadvallaridan olinadi.

Ichki energiyaning o'zgarishi:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1); \quad (5.25)$$

bajarilgan ish:

$$\ell = p(v_2 - v_1) = q - \Delta u \quad (5.26)$$

keltirilgan issiqlik miqdori:

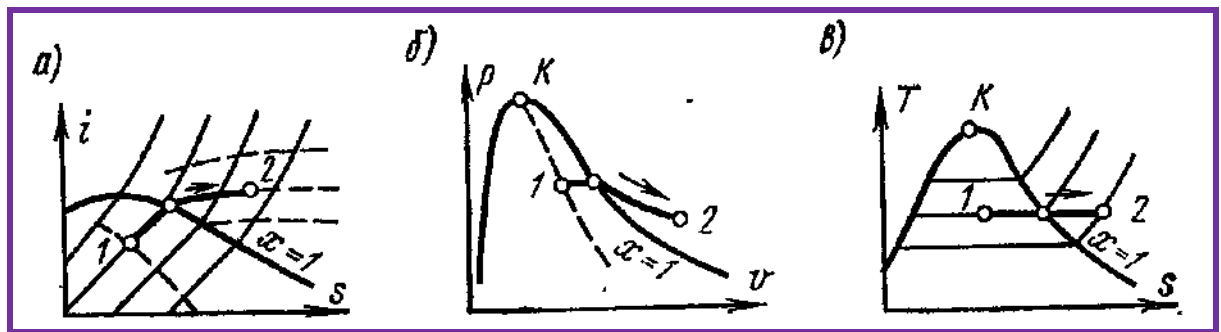
$$q = h_2 - h_1 \quad (5.27)$$

Agarda q kattalik berilgan bo'lib, ikkinchi nuqtaning parametrlari aniqlanishi lozim bo'lsa, nam bug'ning entalpiyasini hisoblash formulasidan foydalaniladi:

$$h_2 = h_2^1 + r_2 x_2 \quad (5.28)$$

Shu formuladan quruqlik darajasi x_2 aniqlanib, u orqali qolgan parametrlar aniqlanadi.

Izotermik jarayon (5.5-rasm).



5.5-rasm.

hs-diagrammada nam bug' sohasida izoterma izobara bilan bir xil bo'lib, u to'g'ri chiziqdan iborat. O'ta qizigan bug' sohasida izoterma egriligi yuqoriga yo'nalgan egri chiziqdan iborat. (5.5-rasm, a) Pv-diagrammada nam bug' sohasida izotermik jarayon gorizontall chiziq bilan tasvirlanadi (5.5-rasm,b). To'yingan bug' uchun bu jarayon izobarik jarayon bilan bir xil bo'ladi. O'ta qizdirilgan bug' sohasida bug'ning bosimi kamayadi va jarayon egriligi abtsissa o'qiga yo'nalgan egri chiziq bilan tasvirlanadi.

Ts-diagrammada (5.5-rasm, v) izotermik jarayon gorizontaldan iborat. Bug'ning ichki energiyasining o'zgarishi ideal gazning ichki energiyasi o'zgarishidan farq qilib $T=\text{const}$ da quyidagicha bo'ladi:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) \quad (5.29)$$

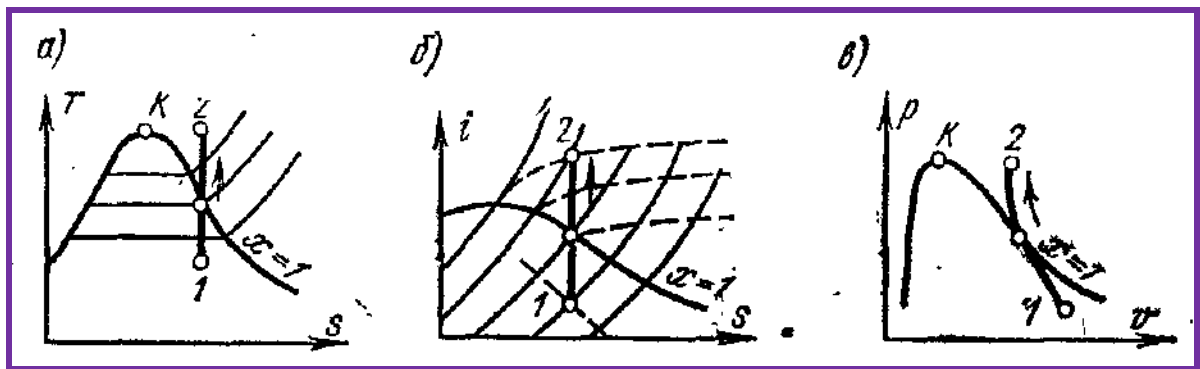
Issiqlik miqdori:

$$q = T(s_2 - s_1) \quad (5.30)$$

bajarilgan ish:

$$\ell = q - \Delta u \quad (5.31)$$

Adiabatik jarayon (5.6-rasm).



5.6-rasm.

Adiabatik jarayonda $s = \text{const}$ bo'lganligi sababli, h_s va T_s diagrammalarda adiabatada ordinatalar o'qiga parallel to'g'ri chiziq bilan tasvirlanadi (5.6-rasm a, b).

Adiabatik kengayishda bug'ning bosimi va temperaturasi kamayadi; o'ta qizigan bug' quruq to'yingan bug'ga va keyin nam to'yingan bug'ga aylanadi.

$s = \text{const}$ bo'lgani uchun, bug'ning oxirgi parametrlarini aniqlash uchun bug'ning boshlang'ich va hech bo'lmaganda oxirgi holatining bitta parametrini bilish zarur. Pv -diagrammada adiabatik jarayon (5.6-rasm, v) egri chiziq bilan tasvirlanadi.

Adiabatik jarayonda bajarilgan ish quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$\ell = u_1 - u_2 = (h_1 - p_1 v_1) - (h_2 - p_2 v_2) \quad (5.32)$$

Ichki energiyaning o'zgarishi:

$$\Delta u = (h_2 - p_2 v_2) - (h_1 - p_1 v_1) \quad (5.33)$$

Nazorat uchun savollar:

Fazaviy o'tish nima?

Bug'lanish deb nimaga aytiladi?

Qaynash deb nimaga aytiladi?

Qanday bug'ga to'yingan bug' deb aytiladi?

Quruqlik darajasi nimani bildiradi?

Bug' hosil bo'lishining Pv – diagrammasini tushuntiring.

Kritik nuktaning mohiyati nimadan iborat?

Bug' hosil qilish issiqligining ahamiyati nimadan iborat?

OLTINCHI BOB

NAM HAVO

6.1. Asosiy tushunchalar

Kislorod, azot, karbonat anhidrid va oz miqdordagi inert gazlardan (argon, neon, geliy, ksenon, kripton) iborat bo'lgan atmosfera havosi tarkibida qandaydir miqdorda suv bug'lari bo'ladi. Quruq havo bilan suv bug'i aralashmasi nam havo deb aytiladi. Nam havo texnikada, avvalo quritish jarayonlarida keng qo'llaniladi. Nam havo gazlar aralashmasining xususiy xollaridan biridir.

Dalton qonuniga muvofiq, gazlar aralashmasidagi har bir gaz o'zini shu aralashma temperaturasida aralashmaning butun hajmini egallagandek tutadi, boshqacha qilib aytganda, gazlar aralashmasidagi gazlarning partsial bosimlari yig'indisi shu aralashmaning umumiy bosimiga teng. Quruq havoning partsial bosimini p_{havo} bilan, suv bug'ining partsial bosimini p_b va aralashmaning ya'ni nam bug'ning bosimini p bilan belgilab, Dalton qonuniga muvofiq quyidagini olamiz:

$$p = p_{\text{havo}} + p_b \quad (6.1)$$

Odatda nam bug' bosimi atmosfera bosimi (B) ga teng bo'lgani uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$B = p_{\text{havo}} + p_b \quad (6.2)$$

Bug' – havo aralashmasida suv bug'i qanchalik ko'p bo'lsa, aralashmada suv bug'ining partsial bosimi shunchalik yuqori bo'ladi⁴.

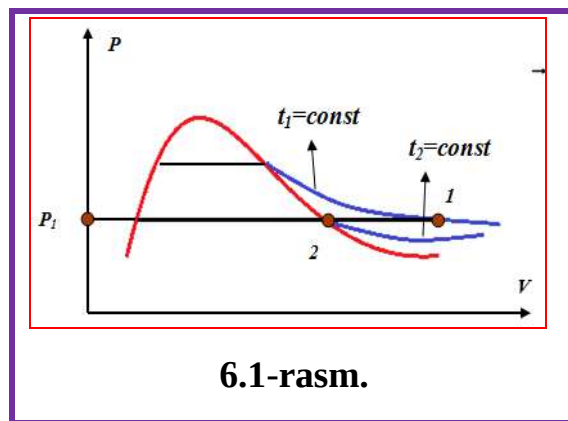
Nam havodagi suv bug'ining partsial bosimi p_b , nam havoning mazkur temperaturadagi to'yinish bosimidan (p_s) yuqori bo'la olmaydi, ya'ni

$$p_b \leq p_s \quad (6.3)$$

⁴ R.A.Zoxidov, M.M.Alimova, Sh.S.Mavjudova «Issiqlik texnikasi»

Nam havodagi suv bug'ining maksimal partsial bosimi p_s aralashma bosimi p ga bog'liq bo'lmay, faqat aralashma temperaturasi ga bog'liq.

$p_b < p_s$ bo'lgan nam havoni to'yinmagan, $p_b = p_s$ bo'lgan nam havoni esa to'yingan nam havo deb ataymiz.



6.1-rasm.

To'yinmagan nam havodagi suv bug'i o'ta qizigan holatda turadi.

Agar to'yinmagan nam havo temperaturasi bosimni o'zgartirmay pasaytirilsak, to'yinish holatiga erishish mumkin (6.1-rasm). Bunda boshlang'ich temperaturasi t_1 bo'lgan (6.1-rasmda 1-nuqta) o'ta qizigan suv bug'i t_2 temperaturagacha sovutiladi;

Bu temperaturaga to'yinish holati (2-nuqta) mos keladi, temperatura yanada pasaytirilsa, havodan nam tushadi hamda bug'ning partsial bosimi kamayadi. Bunday hodisaga kundalik turmushda ko'p duch kelamiz: atmosfera havosida har doim suv bug'ining ma'lum miqdori bo'lgani uchun temperatura pasayganda havo, ko'pincha to'yingan bo'ladi, tuman va shudring tushishi shu haqda guvohlik beradi.

Shuning uchun p_b bosim p_s bosimga teng bo'ladigan temperatura shudring nuqtasi deb aytiladi (t_{sh}). Nam havodagi namning massaviy miqdori m_b ning quruq havoning massaviy miqdori m_h ga nisbatini havoning nam saqlami d deb ataymiz:

$$d = m_b/m_x; \text{ yoki } d = \rho_b/\rho_x \quad (6.4)$$

Binobarin, d 1kg quruq havoga yoki $(1+d)$ kg nam havoga to'g'ri keladigan nam massasidan (kilogramm hisobida) iborat.

Nam saqlami d ni quyidagicha aniqlash mumkin. 1kg quruq havo va nam havo hajmi V dagi suv bug'i uchun holat tenglamasi quyidagicha bo'ladi:

$$p_x V = m_x R_x T \text{ va } p_b V = m_b R_b T$$

Hadma – had bo'lamiz:

$$p_x/p_b = m_x R_x / m_b R_b = (m_x \cdot 287,04) / (m_b \cdot 461,6) = 0,622/d \quad (6.5)$$

(6.5) tenglamaga (6.1) –tenglamadan p_x qiymatni qo'ysak, nam saqlamini aniqlaymiz:

$$d=0,622 p_b/(p-p_b) \quad (6.6)$$

(6.6) tenglamadan ko'rinib turibdiki, bug'ning partsial bosimi p_b ortishi bilan nam saqlami d ko'payadi. Nam havoning berilgan temperaturasida uning bo'lishi mumkin bo'lgan maksimal nam saqlamini yuqoridagi tenglamalardan aniqlash mumkin, lekin bunda partsial bosim p_b o'rniga, uning maksimal qiymati, ya'ni shu temperaturadagi to'yinish bosimi p_s ni qo'yish kerak. U vaqtda

$$d_s=0,642 p_s/(p-p_s) \quad (6.7)$$

Bu munosabatlardan ko'rinib turibdiki, maksimal nam saqlami, birinchidan, nam havo bosimi (barometrik bosim B) ning qiymatiga, ikkinchidan nam havo temperaturasiga bog'liq, chunki p_s kattalik temperaturaning qiymatiga bog'liq.

Suv bug'ining to'yinish bosimi barometrik bosimga teng bo'lganda d_s cheksizlikka aylanadi, bu holda nam havo quruq to'yingan yoki o'ta qizigan suv bug'idan iborat bo'ladi. Nam havoni tasvirlashda qulay bo'ladigan yana bir tushuncha – nisbiy namlik tushunchasini kiritamiz. Nisbiy namlik deb, nam havodagi suv bug'i partsial bosimining suv bug'ining mazkur temperaturadagi to'yinish bosimiga (ya'ni suv bug'ining shu temperaturada bo'lishi mumkin bo'lgan maksimal partsial bosimiga) nisbati nisbiy namlik deb aytiladi;

$$\phi=p_b/p_s \quad (6.8)$$

Nisbiy namlik, odatda foiz hisobida ifodalanadi. $p \leq p_b < p_s$ bo'lgani uchun $0 \leq \phi \leq 100 \%$ bo'ladi. Quruq havo uchun $\phi=0$, to'yingan havo uchun $\phi=100 \%$ bo'ladi. Atmosfera bosimida to'yingan havodagi suv bug'ining partsial bosimi past bo'lganligi tufayli, suv bug'ini ideal gaz deb hisoblab, Boyl – Mariott qonuniga asosan p_b/p_s nisbatni ρ_b/ρ_s nisbat bilan almashtiramiz:

$$\phi=\rho_b/\rho_s \quad (6.9)$$

Bu holda hisoblashdagi xato 2% dan oshmaydi. Aniq hisoblar uchun (6.8) formuladan foydalanish kerak. Nisbiy namlik tushunchasidan tashqari ba'zan absolyut namlik tushunchasidan ham foydalaniladi. Absolyut namlik deganda nam havodagi suv bug'ining, odatda simob ustunining millimetri bilan o'lchanadigan

balandligi hisobida ifodalanadigan partial bosimi p_s kattaligi tushuniladi. Ba'zan bir kub metr nam havodagi gramm bilan ifodalanadigan suv bug'i massasi absolyut namlik deb aytiladi.

(6.7) va (6.8) tenglamadan nam saqlami bilan nisbiy namlik o'rtasidagi bog'lanishni ifodalovchi formulani keltirib chiqarish mumkin:

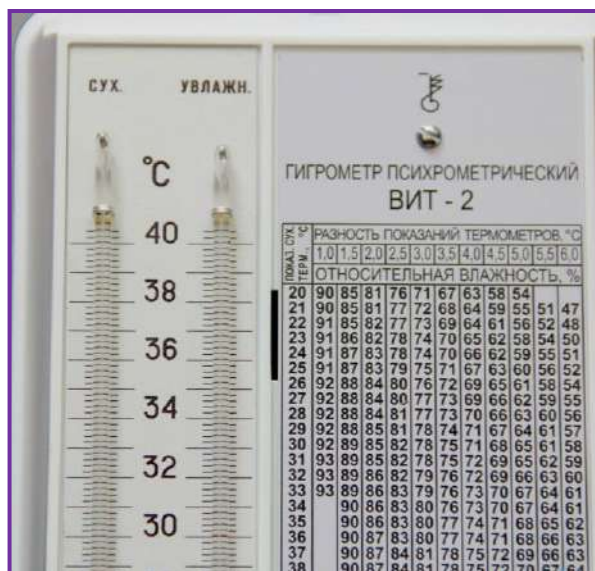
$$\phi = [d / (0,622 + d)] (p_{\bar{o}} / p_s) \quad (6.10)$$

Demak, $p_b = p_s$ bo'lganda ϕ faqat d ga bog'liq bo'lib, $d = \text{const}$ da u o'zgarmaydi.

Havodagi bug'ning holatini aniqlash uchun uning temperaturasini va partial bosimini bilish lozim. Havodagi bug'ning temperaturasi nam havo temperaturasi bilan bir xil bo'lganligi tufayli uni termometr bilan aniqlash mumkin. Bug'ning partial bosimini aniqlash uchun gigrometrlardan foydalaniladi. Shu ikki asbob yordamida shudring nuqtasi temperaturasi t_{sh} aniqlanadi.

Shudring nuqtasini bilgan holda, suv bug'i jadvallaridan t_{sh} ga mos partial bosim aniqlanadi. Gigrometrlarning ko'p turlari mavjud. Hozir asosan Allyuora va Grove gigrometri qo'llaniladi. Bu asbobda silliqlangan idishda joylashgan havo efir bug'lanishi hisobiga soviydi. Shu sirtida shudring paydo bo'lishi t_{sh} ga erishilganini ko'rsatadi. Yuqoridagi usul bilan partial bosimni aniqlash taxminiy bo'ladi, chunki shudringni paydo bo'lishini aniq belgilash qiyindir. Shuning uchun havoning nisbiy namligini va demak bug'ning partial bosimini aniq hisoblash uchun psixrometrdan foydalaniladi.

Psixrometr ikkita simobli termometrdan – quruq va xo'l deb atiladigan termometrdan iborat. Ho'l termometrning quruq termometrdan farqi shuki, uning simobli sharchasi suv bilan ho'llangan matoga o'rab qo'yiladi. Nam havo oqimi bu termometrlarning simobli sharchalarini yuvib o'tganda quruq termometr nam havo temperaturasini ko'rsatadi. Ho'l termometr esa o'zining simobli sharchasi o'ralgan



nam matodagi suv temperaturasini bildiradi. Nam termometrni havo yuvib o'tganda ho'l mato sirtidagi suv bug'lanadi (agar nam havo to'yingan bo'lmasa). Bunda matoni yuvib o'tadigan havo qanchalik quruq bo'lsa, ya'ni havodagi bug'ning partial bosimi qanchalik kichik bo'lsa, suv shunchalik jadalroq bug'lanadi va nam mato temperaturasi pasaya boshlaydi.

Nam mato temperaturasi pasayganda nam matoga havoning eng yaqin qatlamlaridan issiqlik keladi. Shu tufayli muvozanat (nam mato temperaturasining o'zgarmasligi) shudring nuqtasi temperaturasida emas, balki biroz yuqori temperaturada qaror topadi. Bu temperatura xo'l termometr temperaturasi deb aytiladi. Quruq termometr temperaturasi t_q bilan, ho'l termometr temperaturasi t_h orasidagi ayirma havo namligiga proportsional bo'ladi. t_q va t_h ni bilgan holda maxsus psixrometrik diagrammalar (6.2-rasm) yoki jadvallar hamda h_d – diagrammalardan foydalanib, havoning nisbiy namligi aniqlanadi.

6.2. Nam havoning zichligi, gaz doimiysi va entalpiyasi

Nam havoning zichligi aralashma temperaturasidagi va o'zining partial bosimida olingan bug' va quruq havo zichliklari yig'indisiga teng.

$$\rho = \rho_b + \rho_h, \quad (6.11)$$

ya'ni

$$\rho = p/RT; \quad (6.12)$$

Nam havoning gaz doimiysini quyidagi tenglamalardan aniqlash mumkin:

$$R = 8314,2 / \mu_{ap} = 8314,2 / (\mu_x \cdot r_x + \mu_o \cdot r_o) \quad (6.13)$$

Nam havo entalpiyasi quruq havo va suv bug'i entalpiyalari yig'indisiga teng. Nam havo entalpiyasini 1 kg quruq havoga yoki (1+d) kg nam havoga nisbatan olish mumkin. (1+d) kg nam havo entalpiyasi quyidagiga teng:

$$h = h_x + dh_b \quad (6.14)$$

1 kg quruq havo entalpiyasi (kJ/kg) miqdori uning temperaturasi $t^\circ\text{S}$ qiymatiga teng, chunki $p = \text{const}$ da quruq havo solishtirma issiqlik sig'imi $\sim 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{grad})$ ga teng. 1 kg quruq to'yingan bug'ning past bosimlardagi entalpiyasi quyidagi empirik formuladan aniqlanishi mumkin:

$$h_b = 2490 + 1,97 t_T,$$

u holda nam havo entalpiyasi:

$$h = t + (2490 + 1.97 t_T) d$$

bo'ladi.

Nazorat uchun savollar:

Nam havoga ta'rif bering.

Tuyinish temperaturasi qanday parametrlarga bog'liq?

Nisbiy namlik nima?

Absolyut namlik qanday aniqlanadi?

Psixrometr qanday ishlaydi?

Psixrometrik jadvaldan qanday foydalaniladi?

Shudring nuqtasi qanday aniqlanadi?

Maksimal nam saqlash nima?

Gigrometr qanday ishlaydi?

Nam havoning zichligi qanday aniqlanadi?

YETTINCHI BOB

OQIM TERMODINAMIKASI

7.1. Oqim uchun termodinamikaning birinchi qonuni

Bug' va gaz turbinalari, turbokompressorlar, reaktiv dvigatellar va boshqa ko'pchilik hozirgi zamon mashinalaridagi ish jarayonlari ish jismi-gaz yoki bug' oqimining kinetik energiyasidan foydalanishga asoslangan.

Gaz oqimining kinetik energiyasi uning oqish tezligining kvadratiga proporsional bo'ladi, binobarin oqish tezligi qanchalik yuqori bo'lsa, uning ish bajarish xususiyati shunchalik katta bo'ladi. Gazning ichki energiyasini harakatning kinetik energiyasiga aylantiradigan kanallar coplolar deyiladi. Gaz soplo bo'ylab harakatlanganda uning bosimi pasayadi, tezligi esa ortadi. Agar kanalda ishchi jismning siqilishi natijasida uning bosimi ortib, tezligi kamaysa, bunday kanalni diffuzor deb aytiladi. Gaz oqimini tekshirishda, odatda, barqaror oqim issiqlik almashinuvisiz (adiabatik) amalga oshiriladi, deb faraz qilinadi. Kanalning istalgan kesimida gazning barcha parametrlari (v , ω , p , T) vaqt o'tishi bilan o'zgarmaydigan oqib chiqish jarayoni barqaror oqib chiqish jarayoni deyiladi.

Gaz oqimi uchun termodinamikaning birinchi qonuni quyidagi tenglama bilan aniqlanadi:

$$dq = du + d(u + pv) + dw^2 / 2 \quad (7.1)$$

bunda dq —1kg gazga tashqi issiqlik manбайдan berilgan issiqlik:

du – gaz ichki energiyasining o'zgarishi;

$d(Pv)$ – 1kg gazni kanal bo'yicha siljitishga sarflangan ish (siljitish ishi);

$dw^2/2$ – gaz siljiganda kinetik energiyaning o'zgarishi.

$(u+Pv)$ kattalik entalpiya bo'lgani sababli,

$$dq = dh + dw^2 / 2 \quad (7.2)$$

yoki

$$q = h_1 - h_2 + (w_2^2 - w_1^2) / 2 \quad (7.3)$$

(7.2) tenglamadan ko'rinib turibdiki, gazning oqish jarayonida keltirilgan issiqlik ichki energiyaning o'zgarishiga, siljitish ishiga va ishchi jismni kinetik ener-

giyasining o'zgarishiga sarflanadi yoki gaz oqimida keltirilgan issiqlik entalpiyaning hamda kinetik energiyaning o'zgarishiga sarflanadi. Adiabatik jarayonda $dq=0$, shuning uchun:

$$dh = dw^2 / 2 = 0$$

yoki

$$h_1 - h_2 = (w_2^2 - w_1^2) / 2 \quad (7.4)$$

Demak, gaz tashqi muhit bilan issiqlik almashinmay kanal bo'ylab harakatlanganda uning entalpiyasi kamayishi natijasida kinetik energiyasi ortadi.

Agarda ishchi jismni boshlang'ich tezligi nolga teng bo'lsa, u holda oqim tezligi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$w = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$$

Agar entalpiya kJ/kg da o'lchansa, u holda oxirgi tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$w = 44,72\sqrt{h_1 - h_2} \quad (7.5)$$

h_1 va h_2 kattaliklar h_s – diagrammadan yoki shu moddani jadvallaridan aniqlanadi.

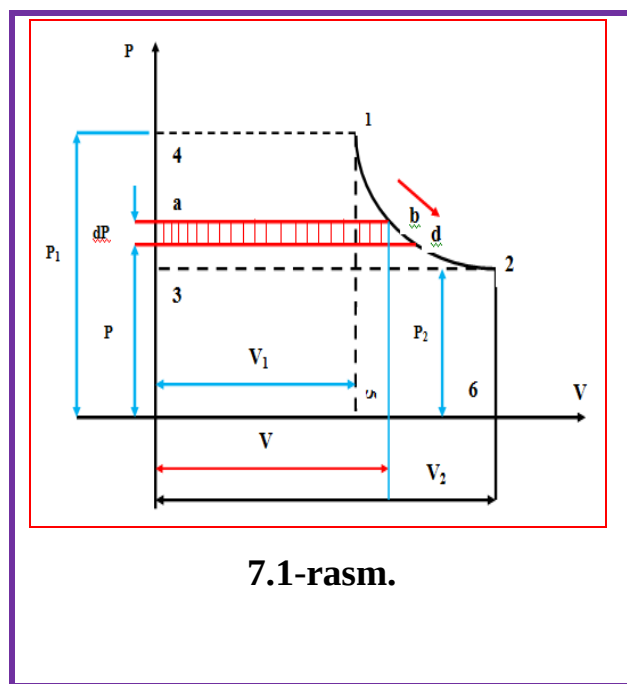
7.2. Oqim bajaradigan ish

Ma'lumki, $dw^2/2$ kattalik, ishchi jism kinetik energiyasining cheksiz kichik ortishidir. Gazning kanal bo'ylab harakatlanishida shu energiyadan foydali ish olish uchun foydalanish mumkin.

Gazning oqishida qaytar jarayonlar uchun (7.3) tenglamadan:

$$dw^2 / 2 = -vdp \quad \text{ёки} \quad wdw = -vdp \quad (7.6)$$

(7.6) tenglamadan ko'rinib turibdiki, gazning kanal bo'ylab harakatida dw va dp ishoralari qarama-qarshi bo'ladi. Agar $dp > 0$, gaz siqiladi va uning tezligi kamayadi: $dw < 0$.⁵



7.1-rasm.

⁵Кириллин В.А., Сичев В.В., Шейндлин А.Е. Технический термодинамика

Agar $dp < 0$ bo'lsa, gaz kengayadi va uning tezligi ortadi $dw > 0$.

Gazning oqishidagi to'liq ishni Pv –diagrammada tasvirlash mumkin (7.1-rasm.)

7.1-rasmda qaytar kengayish jarayoni 1-2 tasvirlangan. Cheksiz kichik bajari-ladigan ish – to'liq ish son jihatidan avds yuzaga teng. U holda 1-2 jarayondagi to'liq ish.

$$\ell_{to1} = \int_{P_1}^{P_2} -v dp = \int_{P_2}^{P_1} v dp \quad (7.7)$$

Gaz oqimining kinetik energiyasining ortishi (to'liq ish) (7.3) va (7.6) tenglamadan ko'rinib turibdiki, gaz oqimining kengayish ishi $\int_{U_1}^{U_2} p dv$ va siljitish ishi $(p_2 v_2 - p_1 v_1)$ lar ayirmasiga teng.

ℓ_{to1} son jihatidan 12341 yuzaga teng. Agar 1-2 jarayon politrop jarayon bo'lsa, u holda to'liq ishni quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$\ell_{to1} = \int_{P_2}^{P_1} v dp = \int_{P_2}^{P_1} v_1 (p_1 / p_2)^{1/n} dp = [n/(n-1)](p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (7.8)$$

Ideal gazning adiabatik kengayishida:

$$\ell_{to1} = \int_{P_2}^{P_1} v_1 (p_1 / p_2)^{1/k} dp = [k/(k-1)](p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (7.9)$$

Gazning oqib chiqishidagi to'liq ishni (12341-yuza) gazning kengayish ishi (12651 yuza) bilan taqqoslasak,

$$\ell_{to1} = n \ell_{keng}$$

ya'ni, to'liq ish kengayish ishidan n marta katta bo'ladi.

(7.3) tenglamadan ko'rinib turibdiki:

$$d\ell_{to1} = dw^2 / 2 = dq - dh$$

yoki

$$\ell_{to1} = q + h_1 - h_2$$

Demak, gazning oqishidagi to'liq ish tashqi issiqlik manbai hisobidan va gaz entalpiyasining kamayish hisobiga olinishi mumkin.

Adiabatik oqim uchun (7.4) tenglamadan.

$$d\ell_{to1} = dw^2 / 2 = -dh$$

u holda

$$\ell_{to1} = (w_2^2 - w_1^2) / 2 = h_1 - h_2 \quad (7.10)$$

Agar jarayon qaytmas bo'lsa, u holda gazning oqimidagi to'liq ish (bosimni bir xil o'zgarishida) kam bo'ladi, chunki gazning oxirgi holatdagi entalpiyasi ishqalanish issiqligi hisobiga katta bo'ladi. Kanal devorlari bilan gaz o'rtasidagi issiqlik almashinuvini deyarli yo'q deb hisoblasak, u holda gazning oqimini adiabatik deb olsak bo'ladi. Adiabatik jarayonda gazning oqib chiqish tezligini quyidagi tenglamadan keltirib chiqarish mumkin:

$$d\ell_{to1} = dw^2 / 2$$

yoki

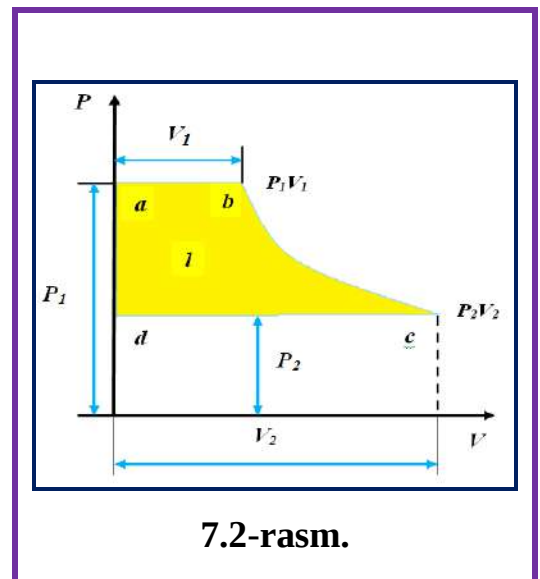
$$\ell_{to1} = \int_1^2 dw^2 / 2 = (w_2^2 - w_1^2) / 2$$

U holda

$$w_2 = \sqrt{2\ell_{to1} + w_1^2}$$

bu yerda w_1 —gazning boshlang'ich tezligi;
 w_2 —gazning kanaldan oqib chiqish tezligi.

Ko'pchilik hollarda $w_2 \gg w_1$ bo'lgani tufayli
 $w_1 \approx 0$ deb olish mumkin, u holda



$$w = \sqrt{2\ell_{to1}} = \sqrt{2(h_1 - h_2)} \quad (7.11)$$

Pv – diagrammada (7.2-rasm) gazning oqib chiqishini to'liq ishi *absdq* yuza bilan tasvirlanadi.

7.3. Gazning oqib chiqish tezligi va sarfi

Ideal gazning adiabatik oqib chiqishidagi to'liq ishni (7.9) tenglamadan, adiabatik oqib chiqish tezligini esa (7.11) formuladan aniqlanadi:

$$w = \sqrt{2\ell_{to1}} = \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] (p_1 v_1 - p_2 v_2)} \quad (7.11)$$

yoki

$$w = \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] p_1 v_1 [1 - (p_2 / p_1)]^{(k-1)/k}} \quad (7.12)$$

Gazning oqib chiqish tezligi gazning soploga kirishdagi holatiga va chiqishdagi p_2 bosimiga bog'liq bo'ladi. Gazning soplodan oqib chiqish tezligini bilgan holda soploning chiqish tezligidan chiqayotgan gazning bir sekunddagi massaviy sarfi m ni ushbu formuladan aniqlash mumkin:

$$m = fw / v_2 \quad (7.13)$$

bu yerda f – soplning chiqish kesimi yuzasi;

w – oqib chiqish tezligi;

v_2 – chiqish kesimidagi gazning solishtirma hajmi.

Adiabatik jarayon uchun:

$$v_2 = v_1 (p_1 / p_2)^{1/k}$$

U holda ideal gazning bir sekunddagi massaviy sarfi:

$$m = \frac{f \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] (p_1 / v_1) [1 - (p_2 / p_1)]^{(k-1)/k}}}{v_1 (p_1 / p_2)^{1/k}}$$

yoki

$$m = f \sqrt{2 \left[\frac{k}{k-1} \right] (p_1 / v_1) [(p_2 / p_1)^{2/k} - (p_2 / p_1)^{(k+1)/k}]} \quad (7.14)$$

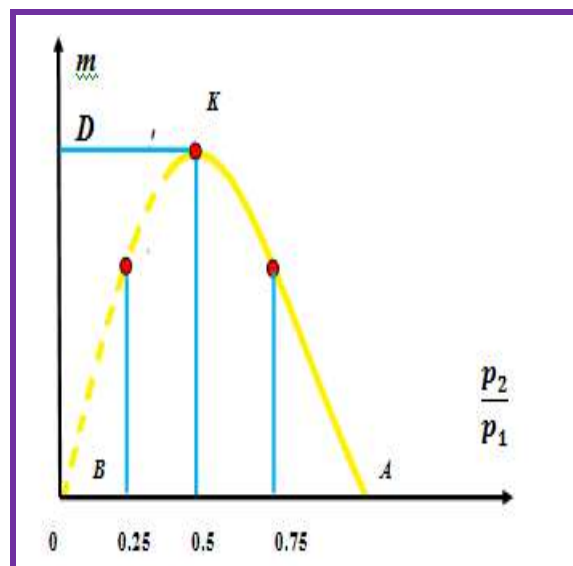
Ideal gazning bir sekunddagi massaviy sarfi chiqish kesimining yuzasiga, gazning boshlang'ich holatiga va kengayish darajasiga bog'liqdir.

(7.14) – formuladan ko'rinib turibdiki, gazning sarfi m p_2/p_1 nisbatga bog'liqdir.

Agar $p_1=p_2$, ya'ni $p_2/p_1=1$ deb qabul qilsak, u holda (7.14) formulaga ko'ra gaz sarfi nolga teng bo'ladi. Haqiqatan ham $p_1=p_2$ da bosimlar farqi bo'lmaydi va oqib chiqish jarayonining bo'lishi mumkin

emas. Agar (7.14) formulaga p_2/p_1 ning qiyimatini 0 dan 1 ga qadar ketma-ket qo'yib borsak, gaz sarfining o'zgarishi 7.3-rasmda ko'rsatilgan egri chiziq bilan tasvirlanadi.

AK egri chiziqdan ko'rinib turibdiki, p_2/p_1 nisbatni kamayishi bilan gaz sarfi ortadi va $p_2/p_1=\beta_q$ bo'lganda m maksimumga erishadi. ($p_2 \approx 0,5p_1$). p_2/p_1 nisbat yanada kamayganda (7.14) formu-



7.3-rasm.

laga ko'ra gaz sarfi KD egri chiziq bo'yicha kamayishi, $p_2/p_1=0$ da (to'la vakuum), $p_2=0$ da esa gaz sarfi nolga teng bo'lishi kerak. (B nuqta). Xaqiqatda esa p_2/p_1 nisbat kamayganida gaz sarfi ortib maksimumga yetadi va gaz chiqib ketayotgan muhitda bosimning kamayishidan qat'i nazar, o'zgarmas bo'lib qoladi (KD chiziq).

Demak, $\beta_k < p_2/p_1 < 1$ uchun tajriba natijalari (7.14) tenglamaga mos keladi, $0 < p_2/p_1 < \beta_k$ holda ular farq qiladi. Buni oqib chiqish jarayonining fizikaviy tabiatini tekshirish yo'li bilan tushuntirish mumkin. $\beta_k < p_2/p_1 < 1$ da soplo og'zidagi bosim tashqi muhitdagi bosimning o'zgarishiga muvofiq tarzda o'zgaradi. Bu hodisa gazning soplo kanalidagi oqish tezligi tovush tezligiga yetgunga qadar davom etishi mumkin. $0 < p_2/p_1 < \beta_k$ da oqib chiqish tezligi tovush tezligiga teng bo'lib qoladi, bunda qo'zg'alish tevarak muhitdan soplo ichkarisiga uzatilmaydi va muhitda bosimning keyingi kamayishi soploning chiqish kesimida bosimning pasayishiga olib kelmaydi. Bu bosim gazning soplo orqali maksimal sarf bo'lishiga muvofiq keladi. Bunday bosim kritik bosim deyiladi va p_{kr} bilan belgilanadi. U

ko'rsatilgan kesimdagi mumkin bo'lgan eng past bosim bo'lib, taxminan $0,5 p_1$ ga teng. Bunda $p_2/p_1 = p_{kr}/p_1$ nisbat ham o'zgarmasligicha qoladi. Bu nisbat oqib chiqishdagi bosimlarning kritik nisbati deyiladi va β_{kr} bilan belgilanadi.

Shunday qilib,

$$p_{kr}/p_1 = \beta_{kr}$$

Bosimlar kritik nisbatlarining aniq qiymatini quyidagicha topish mumkin. Yuqorida aytib o'tilganidek, $p/p_1 = \beta_k$ da gaz sarfi m maksimum bo'ladi. (7.14) tenglamada o'zgaruvchan kattalik quyidagidir:

$$\left[(p_2 / p_1)^{2/k} - (p_2 / p_1)^{(k+1)/k} \right]$$

Shuning uchun maksimumni topish uchun shu kattalikni birinchi hosilasini olib nolga tenglashtiramiz, p_2/p_1 kattalikni hosilani nolga aylantiradigan qiymati esa β_k bo'ladi.

$$\frac{\partial}{\partial \beta} (\beta^{2/k} - \beta^{(k+1)/k}) = \frac{2}{k} \beta^{(2/k)-1} - \frac{k+1}{k} \beta^{[(k+1)/k]-1} = 0$$

bundan

$$\beta_k = p_k / p_1 = [2/(k+1)]^{k/(k-1)} \quad (7.15)$$

Bosimlarning kritik nuqtasi faqat adiabata ko'rsatkichi k ga, ya'ni gazning tabiatiga bog'liq.

Bir atomli galar uchun $k=1,66$ va $\beta_{kr}=0,49$;

Ikki atomli gazlar uchun $k=1,40$ va $\beta_{kr}=0,528$;

Uch atomli gazlar uchun $k=1,30$ va $\beta_{kr}=0,546$

To'yingan quruq bug' uchun $k=1,135$ va $\beta_{kr}=0,577$.

Shunday qilib, boshlang'ich bosim p_1 ning qiymati qanchalik katta bo'lmasin yoki gaz oqib chiqayotgan muhitdagi oxirgi bosim p_2 qanchalik kam bo'lmasin, gazning soplo og'zidagi kritik bosim uning boshlang'ich bosimining yarmidan kam bo'lishi mumkin emas. Bosimlarning kritik nisbatida gazning oqib

chiqish tezligi kritik tezlik deyiladi va w_{kr} bilan belgilanadi. Kritik tezlikni (7.12) tenglamadan, p_2/p_1 o'rniga $\beta_k = [2/(k+1)]^{k/(k-1)}$ ni qo'yib aniqlash mumkin.

$$w_{kp} = \sqrt{2[k/(k-1)]p_1v_1[1-(p_2/p_1)^{(k-1)/k}]} = \sqrt{2\left[\frac{k}{(k-1)}\right]p_1v_1\left[1-\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}\cdot\frac{k-1}{k}}\right]}$$

$$\text{U holda} \quad w_{kp} = \sqrt{2[k/(k+1)]p_1v_1} \quad (7.16)$$

(7.16) formuladan ko'rinib turibdiki, w_{kr} kattaligi gazning tabiatiga, ya'ni adiabatada ko'rsatkichi k ga va gazning boshlang'ich parametrlari p_1 va v_1 ga bog'liq. Kritik tezlikni gaz oqib chiqayotgan muhitda tovushning tarqalish tezligiga tengligini isbotlash mumkin.

Adiabatik jarayon tenglamasidan

$$v_1 = v_k(p_k/p_1)^{1/k}$$

(7.15) tenglamadan p_1 ni topamiz:

$$p_1 = p_k[(k+1)/2]^{k/(k-1)}$$

yoki

$$v_1 = v_k \left(\frac{p_k}{p_k[(k+1)/2]^{k/(k-1)}} \right)^{1/k} = [2/(k+1)]^{1/(k-1)} v_k$$

va

$$v_1p_1 = p_k[(k+1)/2]^{k/(k-1)} \cdot v_k[2/(k+1)]^{1/(k-1)}$$

bundan

$$p_1v_1 = v_k p_k (k+1)/2$$

p_1v_1 kattalikni (7.16) formulaga qo'yib w_{kr} ni topamiz:

$$w_{kp} = \sqrt{2k/(k+1) \cdot v_k p_k (k+1)/2}$$

Yuqoridagini o'zgartirib quyidagiga ega bo'lamiz:

$$w_{kp} = \sqrt{k p_k v_k} \quad (7.17)$$

Ma'lumki, tovushning tarqalish tezligi Laplas formulasidan aniqlanadi:

$$Q = \sqrt{k(p/\rho)} = \sqrt{kpv},$$

bu yerda p – muhit bosimi, H/m^2 ;

ρ – muhit zichligi, kg/m^3 .

Ideal gaz uchun

$$Q = \sqrt{kRT}$$

Tovush tezligi gazning holatiga va tabiatiga bog'liqdir hamda temperaturaning funksiyasidir. Bundan quyidagidek xulosa qilish mumkin: kanalning har qanday kesimiga shu kesimdagi p va v kattaliklar bilan aniqlanadigan mahalliy tovush tezligi mos kelishi kerak. $Q = \sqrt{k v_k P_k}$ kattalik kritik oqib chiqish paytida tovushning gazda tarqalish tezligini belgilaydi. Demak, gazning oqib chiqishidagi kritik tezlik shu kesimdagi mahalliy tovush tezligiga teng, ya'ni

$$w_{kp} = Q$$

Bosimlarning kritik nisbatida maksimal sarf m_{maks} ni hisoblab topish uchun (7.14) formulada p_2/p_1 nisbatni (7.15) formuladan uning kritik kattaligi p_k/p_1 bilan almashtirish kerak. Shundan keyin ba'zi o'zgartirishlar kiritib, gazning maksimal sarfini aniqlash formulasini olamiz:

$$m_{\text{maks}} = f_2 \sqrt{2[k/(k+1)](p_1/v_1)[2/(k+1)]^{2/(k-1)}} \quad (7.18)$$

Demak, gazning maksimal sarfi gazning boshlang'ich holatiga, chiqish kesimining yuzasiga va gazning tabiatiga, ya'ni adiabat ko'rsatkichiga bog'liq ekan.

Tajribalar shuni ko'rsatadiki, soplarning kengayib boradigan qismining konuslik burchagi $\Omega=8-12^\circ$ bo'lishi kerak. Konuslik burchagi bundan kattalashib ketsa, oqim soplo devoridan uzilib qolishi mumkin, bu esa qaytmas isroflarni keskin ko'paytirib yuboradi. Gaz soplodan oqib chiqayotganida adiabatik kengayadi. Bunda uning bosimi va temperaturasi pasayadi, oqib chiqish tezligi esa ortadi. Soploning eng kichik kesimida kritik bosim p_k va tovushning muhitdagi tezligiga teng kritik tezlik w_k qaror topadi. Soploning kengayib boradigan qismidan

o'tishida gaz yana kengayadi, bosim p_k dan p_g gacha pasayadi va tezligi tovushning muhitdagi tezligidan katta bo'lib qoladi.

Og'iz tomoni kengayib boradigan soplo ishlatish, oqib chiqish tezligini bosimlar farqidan to'la foydalanish hisobiga oshirish imkonini beradi. Gazning maksimal sarfi m_{maks} (7.14) formuladan aniqlanadi. Soplo kengayib boradigan qismining uzunligi ℓ quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\ell = (D-d)/2 \operatorname{tg} \Omega/2$$

bu yerda Ω - soplonek konuslilik burchagi; D – chiqish kesimi diametri; d – soplonek minimal kesimidagi diametri.

Gazning oqib chiqishini ko'rib chiqishda, shu vaqtga qadar gaz soplo devorlariga ishqalanmay adiabatik kengayadi, deb faraz qilingan edi. Amaliy sharoitlarda esa, oqib chiqish jarayonida doimo gaz energiyasining bir qismi sodir bo'ladigan ishqalanish ishiga sarflanadi, ya'ni isrof bo'ladi. Shu sababli oqib chiqishning haqiqiy tezligi w_x nazariy tezlik w dan doimo kichik bo'ladi.

Gazning haqiqiy tezligi w_x ni nazariy tezlik w ga nisbatiga tezlik koeffitsienti deyiladi.

$$\varphi = w_x/w \text{ va } w_x = \varphi \cdot w \quad (7.19)$$

Kinetik energiyaning isrofi quyidagiga teng:

$$(w^2 - w_x^2)/2 = (w^2 - \varphi^2 w^2)/2 = (1 - \varphi^2)(w^2/2) = \xi (w^2/2). \quad \varepsilon = (1 - \varphi^2)$$

kattalik energiyaning isrof koeffitsienti deyiladi.

Ishchi jismni haqiqiy kinetik energiyasi $w_x^2/2$ ni nazariysi $w^2/2$ ga nisbati soplonek foydali ish koeffitsienti deb aytiladi va η_c bilan belgilanadi

$$\eta_c = (w_x^2) : (w^2 / 2) = (w_x^2 / w^2) = \varphi^2 w^2 / w^2 = \varphi \quad (7.20)$$

Soplonek F.I.K. tezlik koeffitsientining kvadratiga teng ekan.

7.4. Gaz oqimini drossellash.

Quvur yoki biror boshqa kanalda oqayotgan gaz oqimi yo'lida keskin torayuvchi to'siq uchrasa u holda oqayotgan gaz bosimi to'siqdan keyin to'siqdan

oldingi bosimga qaraganda har doim kam bo'ladi. Bunday to'siq mahalliy qarshilik deb aytiladi. Kanaldagi toraygan joy orqali oqish jarayonida gazning bosimini pasayish effekti gazning drossellanishi (g'ijimlanishi, ezilishi) deb aytiladi. Kanalning ko'ndalang kesimini toraytiruvchi, har qanday kran, ventily, zadviyka, klapan va boshqa mahalliy qarshiliklar gazning drossellanishini yuzaga keltiradi va demak bosim tushishi ro'y beradi. Ko'pchilik hollarda drossellash natijasida ish jismining ish bajarish qobiliyati kamayadi, ya'ni u albatta zarar keltiradi. Lekin u ba'zi xollarda zarur bo'lib, drossellash sun'iy ravishda xosil qilinadi, masalan, bug'dvigatellarini boshqarishda, sovitish mashinalarida past temperaturalar olishda u asos bo'lib xizmat qiladi. Gazlarni suyuq holga o'tkazishda esa, xal qiluvchi rol o'ynaydi va xokazo. Bosimning mahalliy qarshiligidan keyin pasayishiga sabab bu maxalliy qarshilikni yengishga sarflanadigan oqim energiyasining dissipatsiyalanishidir.

Ideal gaz uchun Joul- Tompson effekti nolga teng, chunki drossellashda ideal gazning temperaturasi o'zgarmaydi. Joul-Tompson effekti bosim va temperaturaning kamayishiga qarab differentsial temperatura-effektiga va integral temperatura-effektiga ajratiladi. Differentsial effektida bosim va temperatura o'zgarishi cheksiz kichik, integral effektida bosim va temperatura o'zgarishi ancha katta bo'ladi. $(\partial T / \partial p)_h$ kattalik differentsial temperatura effekti deyiladi va α bilan belgilanadi:

$$\alpha = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (7.21)$$

α ning qiymatini quyidagicha aniqlash mumkin:

$$dh = c_p dT - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp \text{ dan}$$

$$\partial h = 0 \text{ uchun } dT = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} dp \quad (7.22)$$

$$\text{va} \quad \alpha = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (7.23)$$

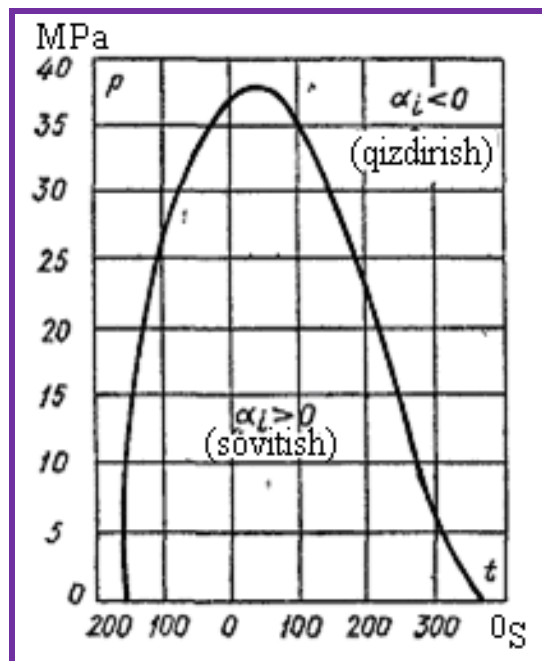
Ideal gaz uchun $dT=0$ va (7.21) tenglikdan $\alpha = 0$.

Integral temperaturaga effekti ΔT quyidagi munosabat bo'yicha hisoblab topiladi:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp \quad (7.24)$$

Real gazlar uchun $\Delta T \neq 0$ va ham musbat, ham manfiy ishorali bo'lishi mumkin.

Tajribaning ko'rsatishicha, bitta moddaning o'zida α_h ning ishorasi turli xolat sohalarida turlicha bo'ladi. Gazning $\alpha_h=0$ teng bo'ladigan holati Joule-Tompson effektining *inversiya nuqtasi* deyiladi, shu nuqtaga mos kelgan temperaturaga esa *inversiya temperaturasi* deyiladi. Berilgan modda holat diagrammasidagi inversiya nuqtalarining geometrik o'rniga inversiya egri chizig'i deyiladi. Agar real gazning drosseldan oldingi temperaturasi inversiya temperaturasidan kam bo'lsa, u xolda gaz



7.4-rasm.

drossellanganda soviydi, agarda gazning boshlang'ich temperaturasi katta bo'lsa, u xolda gaz drossellanganda isiydi.

7.4-rasmda azotning **pt** – diagrammasidagi inversiya egri chizig'i misol tariqasida keltirilgan.

Inversiya egri chizig'i bilan chegaralangan soha ichida $\alpha_h > 0$, ya'ni drossellanganda gaz temperaturasi pasayadi.

Bu sohadan tashqarida $\alpha_h < 0$ ya'ni drossellanganda gaz temperaturasi ortadi. Boshqa moddalarning inversiya egri chiziqlari ham shunga o'xshash tavsifga ega bo'ladi. Drossellash jarayonida gazning temperaturasini o'zgarishini molekulyar-kinetik nazariya nuqtai nazaridan quyidagicha tushuntirish mumkin. Drossellashda $h_1=h_2$, $h=u+pv$, u holda $p_2v_2 - p_1v_1 = u_1 - u_2$.

$p_2v_2 - p_1v_1$ ayirma 1 kg gazni siljitish ishiga teng. $u_1 - u_2$ esa, 1 kg gazni ichki energiyasini kamayishiga teng. Ideal gazlar uchun $p_2v_2 = p_1v_1$ (chunki $T_1 = T_2$) va $u_1 - u_2 = 0$. Real gazlarda esa $p_2v_2 - p_1v_1$ ayirma ishorasi musbat ham, manfiy ham va nolga teng bo'lishi mumkin. Drossellashda $p_2 < p_1$, $v_2 > v_1$ bo'lgani uchun real gazlarning potentsial energiyasi hajm ortishi bilan (molekulalar orasidagi masofa ortadi) xar doim ortadi.

Quyidagidek faraz qilsak, agarda:

- a) siljitish ishi $p_2v_2 - p_1v_1 = 0$, unda $u_1 = u_2$ ya'ni umumiy ichki energiya o'zgarmaydi, lekin uning kinetik energiya qismi potentsial energiya ortishi tufayli kamayadi va mos ravishda gazning temperaturasi pasayadi, demak gaz drossellash natijasida soviydi.
- b) siljitish ishi $p_2v_2 - p_1v_1 > 0$ unda $u_1 - u_2 > 0$ va $u_2 < u_1$. Bu holda T_2 temperaturaning pasayishi yanada jadalroq bo'ladi, chunki bu holda ichki energiyaning potentsial qismi ortadi va siljitish ishi ichki energiyaning kamayishi hisobiga bajariladi.
- v) siljitish ishi $p_2v_2 - p_1v_1 < 0$ u holda $u_1 - u_2 < 0$, $u_2 > u_1$. Bu holda drossellashda gazni drosselga uzatish va gazning ichki energiyasini orttirish uchun tashqaridan ish sarflanadi.

Tashqi ish absolyut qiymati bo'yicha ichki energiyaning potentsial qismidan katta bo'lsa, u holda uning kinetik qismi ortadi va isiydi. ($T_2 > T_1$)

Xususiyl holda, agar siljitish ishining absolyut qiymati potentsial qismining ortishiga teng bo'lsa, u holda $T_1 = T_2$. Bu hol inversiya temperaturasi T_{in} da ro'y beradi. Demak inversiya temperaturasida real gazni drossellash, ideal gazni drossellash kabi bo'ladi. Inversiya temperaturasi T_{in} va Van-der-Vaals tenglamasi $(p + a/v^2)(v - b) = RT$ orasida quyidagi bog'lanish mavjud:

$$T_{in} = 2a/Rb \quad (7.25)$$

Inversiya temperaturasi kritik temperatura bilan quyidagi tenglik bilan bog'langan:

$$T_{in} = 6,75 T_k \quad (7.26)$$

Demak, Van-der-Vaals tenglamasiga bo'ysunadigan real gazlarning inversiya temperaturasi $p=0$ da 6,75 marta kritik temperaturadan yuqori ekan.

Adiabatik drossellashdan gazlarni sovitishda samarali usul tariqasida foydalanish mumkin. Ma'lumki, gazlarni effektiv sovitish usullaridan biri qaytar adiabatik, ya'ni izoentropik kengayish jarayoni (tashqi ishni berib) ekanligi 4-bobda eslatib o'tilgan edi. Shuning uchun gazlar sovitiladigan bu ikkala usulni taqqoslab ko'rish albatta qiziqarlidir. Bu ikkala usuldan qaysi biri temperaturaning ko'proq pasayishini ta'minlashini aniqlaymiz. Boshqacha qilib aytganda α_{ad} va α_{dros} larni taqqoslab ko'rish kerak.

$$\text{Ma'lumki, } dq = c_p dt - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

Qaytar adiabatik (izoentropik) jarayon uchun:

$$dq = 0 \quad c_p dt = T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

U holda

$$\alpha_{ad} = \frac{\partial T}{\partial p} = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (7.27)$$

Adiabatik drossellash (ya'ni qaytmas adiabatik kengayish) koeffitsenti (7.23) tenglamaga asosan

$$\alpha_{dros} = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (7.28)$$

(7.27) va (7.28) tenglamalardan:

$$\alpha_{ad} - \alpha_{dros} = \frac{v}{c_p} \quad (7.29)$$

ni olamiz.

v va c_p lar xar doim musbat bo'lganligidan

$$\alpha_{ad} > \alpha_{dros} \quad (7.30)$$

Shunday qilib, qaytar adiabatik kengayish jarayoni, termodinamikaviy nuqtai nazardan, gaz yoki suyuqlikni adiabatik drossellash, ya'ni qaytmas adiabatik kengayish jarayoniga qaraganda ancha effektiv sovishni ta'minlaydi. Shuning uchun past temperaturalar olishda, masalan, gazlarni suyultirishda drossellash usulini emas, balki, adiabatik kengayish usulini qo'llash maqsadga muvofiqdir.

Nazorat uchun savollar:

Soplo nima?

Diffuzor nima?

Oqim uchun termodinamikaning birinchi qonunini yozing.

Oqim tezligi qanday aniqlanadi?

Gaz oqimining kinetik energiyasi

Gaz oqimining kinetik energiyasi qanday parametrlarga bog'liq?

Gazning sarfi qanday aniqlanadi?

Gaz oqimining kritik bosimi.

Kritik tezlik qanday kattaliklarga bog'liq?

Gazning maksimal sarfi tenglamasini yozing.

Drossellanishning ahamiyati nimadan iborat?

Drossellash effektiga ta'rif bering.

Integral temperatura effekti.

Inversiya temperaturasi qanday aniqlanadi?

SAKKIZINCHI BOB

ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK

8.1. Asosiy tushunchalar

Issiqlik o'tkazuvchanlik – bu temperaturalar farqi borligi tufayli tutash muhitda issiqlikning molekulyar uzatilishidir.

Issiqlik almashinuvining bunday usuli, asosan qattiq jismning ichida ham, shuningdek bir-biriga tegib turgan ikkita qattiq jism orasida ham sodir bo'ladi. Issiqlik o'tkazuvchanlik suyuqlik yoki gaz qatlami orqali ham amalga oshishi mumkin, lekin umuman olganda suyuqlik va gazlar (suyuqlangan metallar bundan mustasno) issiqlikni juda yomon o'tkazuvchan hisoblanadi.

Bir jinsli izotrop jismni isishini ko'raylik. Barcha yo'nalishlar bo'yicha bir xil fizik xossalarga ega bo'lgan jismlarga izotrop jismlar deb aytiladi. Bunday jismni isitish vaqtida uning turli nuqtalaridagi temperatura vaqt bo'yicha o'zgaradi va issiqlik yuqori temperatura sohasidan past temperatura sohasiga tarqaydi.

Vaqtning ayni paytida ko'rib chiqilayotgan fazoning barcha nuqtalaridagi temperatura qiymatlarining yig'indisi temperatura maydoni deyiladi. Temperatura maydoni quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$t=f(x,u,z,\tau) \quad (8.1)$$

bu yerda x,u,z – nuqta koordinatalari; τ - vaqt.

Agar jismning temperaturasi koordinata va vaqtning funktsiyasi bo'lsa, u holda temperatura maydoni nostatsionar bo'ladi:

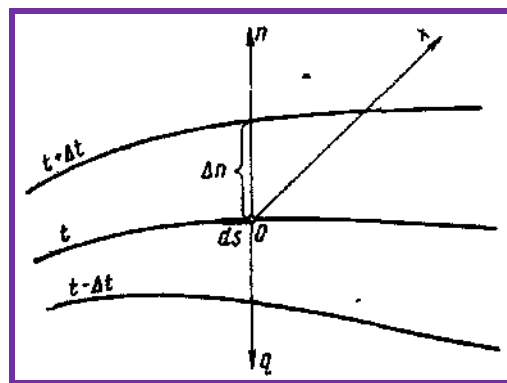
$$t=f(x,u,z,\tau); \partial t/\partial \tau \neq 0 \quad (8.2)$$

Agar jismning temperaturasi faqat koordinataning funktsiyasi bo'lib, vaqt davomida o'zgarmasa, u holda temperatura maydoni statsionar bo'ladi.

$$t=f(x,u,z); \partial t/\partial \tau = 0 \quad (8.3)$$

Temperatura maydoni uchta, ikkita va bitta koordinataning funktsiyasi bo'lishi mumkin va mos ravishda, u uch, ikki va bir o'lchamli deyiladi. Hamma nuqtalarida temperatura bir xil bo'ladigan sirt izotermik sirt deyiladi.

Fazoning ayni nuqtasining o'zida bir vaqtda ikki xil temperatura bo'lishi mumkin emasligi uchun, turli izotermik sirtlar xech vaqt bir-biri bilan kesishmaydi. Ularning barchasi jism sirtida tugaydi yoki butunlay uning ichida joylashadi. Jismning temperaturasi izotermik sirtlarni kesib o'tadigan yo'nalishlardagina o'zgaradi (8.1-rasm).



8.1-rasm. Izotermalar. Temperatura gradienti haqidagi tushunchaga doir

Bunda uzunlik birligida temperaturaning eng katta o'zgarishi izotermik sirtga normal n yo'nalishida bo'ladi.

Temperatura o'zgarishi Δt ning izotermadagi normal bo'yicha masofa Δn ga nisbati temperatura gradienti deyiladi:

$$\lim \left[\frac{\Delta t}{\Delta n} \right]_{\Delta n \rightarrow 0} = \frac{\partial t}{\partial n} = \text{grad} t \quad (8.4)$$

Temperatura gradienti – izotermik sirtga tushirilgan normal bo'yicha yo'nalgan vektordir. Uning temperaturaning ortishi tomoniga yo'nalishi musbat yo'nalish hisoblanadi. Issiqlik almashinuvining boshqa turlari kabi, issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni ham jismning turli nuqtalarida temperatura bir xil bo'lmagandagina amalga oshadi, ya'ni $\text{grad} t \neq 0$. Ixtiyoriy sirtdan vaqt birligi ichida o'tadigan issiqlik miqdori Q issiqlik oqimi deyiladi. Issiqlik oqimining vektori doimo temperaturaning pasayish tomoniga yo'nalgan bo'ladi.

Frantsuz olimi Fure qattiq jismlardagi issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarini o'rganib, yuza birligi dF dan vaqt birligi $d\tau$ ichida o'tayotgan dQ issiqlik miqdori va temperatura gradienti o'rtasidagi bog'lanishni aniqladi.

$$dQ = -\chi dF \text{ grad} t d\tau = -\chi dF d\tau (\partial t / \partial n) \quad (8.5)$$

(8.5) tenglama issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonunini ifodalaydi va Fure qonuni deyiladi. Shu tenglamadagi minus ishora issiqlik oqimi bilan temperatura gradientining vektorlari qarama-qarshi tomonga yo'nalganligini bildiradi.

(8.5) ifodadagi proportsionallik koeffitsienti χ issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti deyiladi. Izotermik sirt birligidan vaqt birligi ichida o'tadigan issiqlik miqdori issiqlik oqimining zichligi deyiladi.

$$q = -dQ/(dF d\tau) \text{ yoki } q = -\chi (\partial t / \partial n) \quad (8.6)$$

Issiqlik oqimi zichligi q ning vektori doimo temperaturaning pasayishi tomoniga yo'nalgan bo'ladi. Ixtiyoriy sirt F dan vaqt birligi ichida o'tayotgan issiqlik miqdori quyidagicha aniqlanadi:

$$Q = \int_0^\tau \int_F \chi dF d\tau (\partial t / \partial n) . \quad (8.7)$$

Yuqorida o'rganilgan kattaliklarni birliklari quyidagicha:

temperatura gradienti – grad/m; issiqlik oqimi – Vt ;

issiqlik oqimining zichligi – Vt/m^2

Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientining birligi (8.7) ifodadan aniqlanadi:

$$\chi = -\frac{Q}{F(\partial t / \partial n)} = \frac{Vt}{m \cdot grad} \quad (8.8)$$

Demak, issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientining qiymati, son jihatdan, temperaturalar farqi $1^\circ S$ bo'lganda devorning birlik qatlamidan o'tadigan solishtirma issiqlik oqimiga teng. Turli xil moddalar uchun χ ma'lum bir qiymatga ega bo'lib, u moddaning tuzilishiga, zichligiga, bosimiga va temperaturasiga bog'liq.

Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti χ ning qiymati har qaysi jism uchun tajribadan topiladi. Ko'pchilik materiallar uchun χ ning temperaturaga bog'liqligini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\chi = \chi_0 [1 + b(t - t_0)],$$

bu yerda χ_0 – $t_0^\circ S$ temperaturadagi issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti; t – temperatura, $^\circ S$; b – tajriba orqali aniqlanadigan temperatura koeffitsienti.

Metallar issiqlikni eng yaxshi o'tkazadilar, ularda χ 3dan 458 $Vt/(m \cdot grad)$ gacha o'zgaradi. Toza metallarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti (al-yuminiydan tashqari) temperatura ortishi bilan pasayadi. Yengil g'ovak materiallar issiqlikni yomon o'tkazadi, chunki ularning g'ovaklari havo bilan to'lgan bo'ladi.

Agar $\chi < 0,2 \text{ Vt/(m}\cdot\text{grad)}$ bo'lsa, bunday materiallar issiqlik izolyatsiya materiallari deyiladi. Bunday materiallarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti temperatura ko'tarilishi bilan ortadi. Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientiga namlikni ta'siri katta. Suvning issiqlik o'tkazuvchanligi yomon, lekin ho'l materialning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti uning quruq holatidagi issiqlik o'tkazuvchanligiga nisbatan ancha katta bo'ladi. Bunga sabab shuki, suv issiqlikni havoga qaraganda deyarli 20 marta yaxshi o'tkazadi, shu sababli jism g'ovaklarining suv bilan to'lishi uning issiqlik izolyatsiya xossalarini keskin kamaytirib yuboradi.

Temperatura ko'tarilishi bilan tomchi suyuqliklarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti kamayadi, gazlarniki esa ortadi. Suvning χ si temperatura 0°S dan 127°S gacha ko'tarilganda ortadi, bundan keyin ham temperatura ko'tarilsa χ kamayadi.

8.3-jadvalda ayrim materiallarning issiqlik va temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsientlari keltirilgan⁶.

Ayrim materiallarning issiqlik va temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsientlari

8.3-jadval

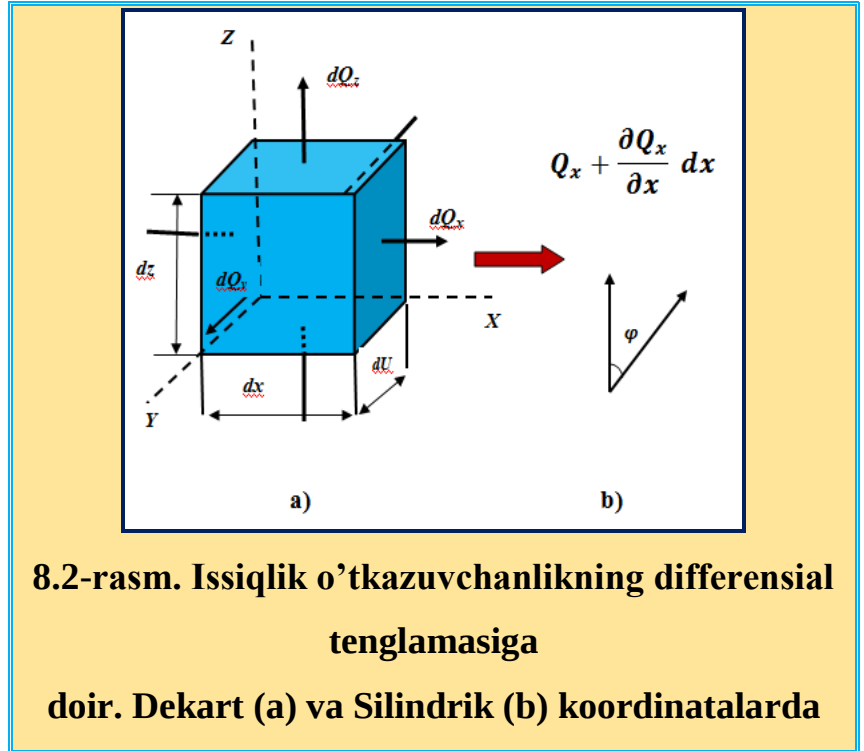
Materiallar nomi	ρ , kg/m^3	t , $^{\circ}\text{S}$	χ , $\text{Vt/(m}\cdot\text{grad)}$	c , $\text{kJ/(m}\cdot\text{grad)}$	$Q \cdot 10^6$ $\text{m}^2/\text{sek.}$
Azbest	770	30	0,11163	0,816	0,186
Beton	2300	20	0,279	1,13	0,622
Nam tuproq	1700	17	0,657	2,01	0,192
Pishiq g'isht	1800	0	0,768	0,879	-
Muz	920	0	2,25	2,26	1,08
Quruq qum	1500	20	0,326	0,795	2,74
Shisha	2500	20	0,744	0,67	0,444

⁶ Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика

8.2. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasi. Chegara shartlari

Izotermik sirt dF dan $d\tau$ vaqt ichida o'tayotgan issiqlik miqdorini aniqlash uchun (8.5) tenglamani F va τ bo'yicha integrallash lozim, ya'ni jism ichidagi temperatura maydonini bilish kerak. Bu masalani yechish uchun issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasi keltirib chiqariladi.

Tenglamani keltirib chiqarishda quyidagi shartlar qabul qilinadi: jism bir jinsli va izotrop; uning fizik parametrlari o'zgarmas. Energiyaning saqlanish qonuniga asosan,



8.2-rasm. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasiga

doir. Dekart (a) va Silindrik (b) koordinatalarda

jismning elementar hajmiga τ vaqt ichida tashqaridan issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan keltirilgan dQ_1 issiqlik miqdori va ichki issiqlik manbai tomonidan ajralib chiqayotgan issiqlik miqdori dQ_2 yig'indisi jismning ichki energiyasining o'zgarishiga teng bo'lishi kerak $dQ=dU$:

$$dQ_1 + dQ_2 = dQ \quad (8.9)$$

Bu tenglama hadlarini Dekart koordinata tizimida aniqlash uchun jismda tomonlari dx , dy , va dz bo'lgan parallelepiped ajratib olamiz (8.2-rasm)⁷.

Bu yerda dQ_x , dQ_y , dQ_z – olib keltirilayotgan issiqlik. dQ_{x+dx} , dQ_{y+dy} , dQ_{z+dz} – olib ketilayotgan issiqlik. U holda $dy \cdot dz$ qirra uchun Fure qonuniga (8.5) asosan:

$$\begin{aligned} dQ_x &= -\chi \frac{\partial t}{\partial x} dydzd\tau; & dQ_x &= -\chi \left[\left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right) dx \right) dydzd\tau = \right. \\ & & &= \left. -\chi \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right) dydzd\tau. \right. \end{aligned}$$

1. ⁷ Modern engineering thermodynamics / Robert T. Balmer, British Library Cataloguing-in-Publication Data /2011 Elsevier Inc.

Bu kattaliklar farqi parallelepipedda qolayotgan issiqlik miqdorini beradi:

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx} = \chi \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx dy dz d\tau$$

Xuddi shunday bog'lanishni qolgan ikki qirra uchun keltirib chiqarish mumkin. U holda jismga keltirilgan va unda qolgan umumiy issiqlik miqdori quyidagiga teng bo'ladi:

$$dQ_1 = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) dx dy dz d\tau$$

Agar ichki issiqlik manbaining solishtirma issiqlik unumdorligini $q_v (J/m^3)$ orqali belgilasak:

$$dQ_2 = q_v dx \cdot dy \cdot dz \cdot d\tau$$

bo'ladi.

$d\tau$ vaqt ichida jismning ichki energiyasining o'zgarishi

$$dQ = c_\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz d\tau$$

dQ_1 , dQ_2 va dQ larni (8.9) tenglamaga qo'yib, ba'zi o'zgartirishlardan so'ng quyidagini hosil qilamiz:

$$c_\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v$$

yoki

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\chi}{c_\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_\rho} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_\rho} \quad (8.10)$$

bu yerda $a = \frac{\chi}{c_\rho}$ - temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti;

$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right)$ - Laplas operatori.

U holda, issiqlik o'tkazuvchanlik differentsial tenglamasini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{q_v}{c_\rho} \quad (8.11)$$

Silindrik koordinatalar tizimida (8.2-rasm, b) (8.11) tenglama quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho} \quad (8.12)$$

bu yerda r – radius vektor; φ - burchak.

Statsionar holat uchun $\partial t / \partial \tau = 0$, u holda (8.11) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$Q \nabla^2 + q_v / (c\rho) = 0; \quad \text{yoki} \quad \nabla^2 t + q_v / x = 0 \quad (8.13)$$

Ichki issiqlik manbai bo'lmasa:

$$\text{Statsionar holatda} \quad \nabla^2 t = 0 \quad (8.14)$$

$$\text{Nostatsionar holatda} \quad \partial t / \partial \tau = a \nabla^2 t \quad (8.15)$$

(8.11) va (8.12) tenglamalar, issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni ro'y berayotgan jismning istalgan nuqtasidagi temperaturaning vaqt va fazoviy o'zgarishlari orasidagi bog'lanishni belgilaydi. Issiqlik o'tkazuvchanlikni differentsial tenglamasi (Fure tenglamasi) issiqlik o'tkazuvchanlik usuli bilan issiqlik uzatilishini eng umumiy holda yoritadi.

Bu tenglamani aniq bir hollar uchun qo'llashda, vaqtning boshlang'ich paytida jismda temperaturaning taqsimlanishini va boshlang'ich shartlarni bilish zarur. Bundan tashqari quyidagilar ma'lum bo'lishi kerak: jismning geometrik shakli va o'lchami, muhit va jismning fizik parametrlari, jism sirtida temperaturaning taqsimlanishini belgilovchi chegara shartlari. Yuqoridagi barcha xususiyatlar differentsial tenglama bilan birgalikda aniq bir issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarini to'liq yoritadi va bir xillilik shartlari yoki chegara shartlari deb aytiladi. Odatda, temperaturaning boshlang'ich taqsimoti $\tau=0$ vaqt uchun beriladi.

Chegara shartlari uch xil usulda berilishi mumkin. Chegara shartlarining birinchi turida temperaturaning jism sirtida taqsimoti vaqtning istalgan har qanday payti uchun beriladi. Chegara shartlarining ikkinchi turida vaqtning har qanday istalgan payti uchun jism sirtidagi har qaysi nuqtada issiqlik oqimining zichligi beriladi.

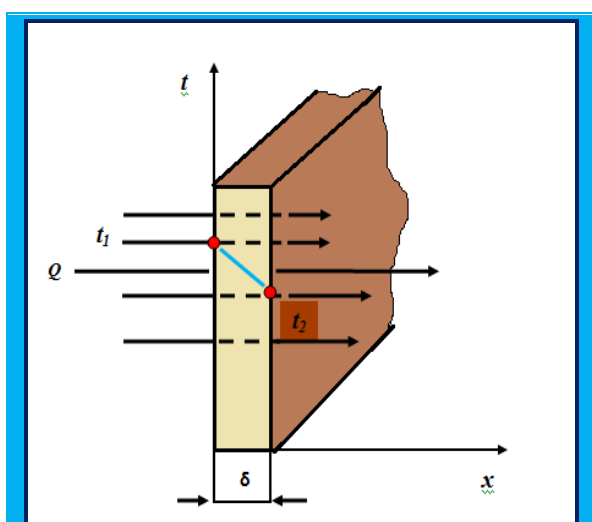
Chegara shartlarining uchinchi turida jismni o'rab turgan muhit temperaturasi va jism sirti bilan atrof muhit o'rtasidagi issiqlik berish qonuniyatlari beriladi.

Issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasini bir xillilik shartlari asosida yechish, jismni butun hajmi bo'yicha vaqtning istalgan paytida temperatura maydonini aniqlash imkonini beradi.

8.3. Chegara shartlarining birinchi turida statsionar issiqlik o'tkazuvchanlik.

Yassi bir qatlamli devorning issiqlik o'tkazuvchanligi 8.3-rasmda bir jinsli materialdan (g'isht, metall, yog'och va hokazo) ishlangan qalinligi δ bo'lgan yassi bir qatlamli devor ko'rsatilgan.

Materialning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti χ temperaturaga bog'liq emas, deb qabul qilamiz. Devorning tashqi sirtlarida temperaturalar o'zgarmas $t_1 > t_2$ holda saqlab turiladi; temperatura faqat devor sirtiga perpendikulyar bo'lgan o'q x yo'nalishdagina o'zgaradi, ya'ni temperatura maydoni bir o'lchamli, temperatura gradienti dt/dx ga teng. Devor orqali o'tadigan issiqlik oqimining zichligini topamiz va temperaturaning devor qalinligi bo'yicha o'zgarish tavsifini aniqlaymiz. Devor ichida ikkita izotermik sirt bilan chegaralangan, qalinligi dx bo'lgan elementar qatlamni ajratamiz. Bu qatlam uchun Fure tenglamasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:



8.3-rasm. Yassi bir qatlamli devor.

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (8.16)$$

$$\text{yoki } dt = -\frac{q}{\lambda} dx \text{ va } t = -\frac{q}{\lambda} dx + c$$

Integrallash doimiysi c chegara shartlaridan aniqlanadi: $x=0$ bo'lganda $t=t_1$. Bundan $c=t_1$, binobarin tenglama quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$t = -\frac{q}{\lambda} x + t_1$$

Bu tenglamadan ko'rib chiqilayotgan devor orqali o'tuvchi issiqlik oqimining

zichligini aniqlash mumkin. Ushbu tenglamaga $x=\delta$ qiymatni qo'ysak $t=t_2$ bo'ladi, bundan

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad (8.17)$$

Yassi devorda issiqlik oqimining zichligi issiqlik o'tkazuvchanlik koefitsienti χ ga, temperaturalar farqi $(t_1 - t_2)$ ga to'g'ri proportsional va devor qalinligi δ ga teskari proportsional bo'ladi. Shuni nazarda tutish kerakki, issiqlik oqimi temperaturaning absolyut qiymati bilan emas, balki ularning farqi –issiqlik bosimi $t_1 - t_2 = \Delta t$ bilan aniqlanadi.

χ/δ nisbat devorning issiqlik o'tkazuvchanligi deyiladi; uning o'lchamligi $[Wt/(m^2 \cdot \text{grad})]$. (8.17) tenglikni boshqacha ko'rinishda yozish mumkin:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\delta / \chi} \quad (8.18)$$

Devor qalinligining issiqlik o'tkazuvchanlik koefitsientiga nisbati δ/χ devorning termik qarshiligi deyiladi.

(8.17) formuladan devorning yassi sirti F orqali τ vaqt ichida uzatilgan umumiy issiqlik miqdori Q ning qiymatini topish mumkin.

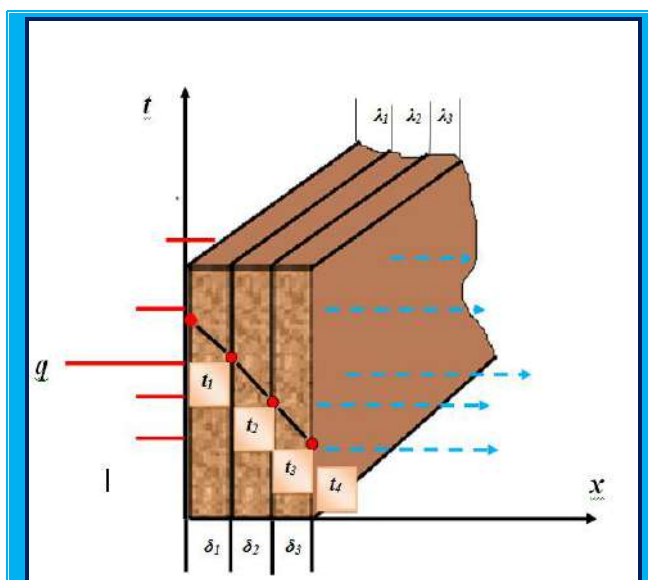
$$Q = qF \cdot \tau = \frac{\chi}{\delta} \Delta t F \tau \quad (8.19)$$

Agar (8.16) formulaga (8.17) formuladan q ning qiymatini keltirib qo'ysak, temperatura egri chizig'ining tenglamasini olish mumkin.

$$t = t_1 - \frac{\Delta t}{\delta} x \quad (8.20)$$

Bu tenglama to'g'ri chiziq tenglamasi deyiladi. Shunday qilib χ ning qiymati o'zgarmas bo'lganda temperatura bir jinsli devor qalinligi bo'ylab chiziqli o'zgaradi. Agar χ temperaturaga bog'liq bo'lsa, hisoblash formulalari birmuncha murakab bo'ladi.

8.4. Yassi ko'p qatlamli devorning issiqlik o'tkazuvchanligi



8.4-rasm. Yassi uch qatlamli devor

Amalda issiqlik o'tkazuvchanligi turlicha bo'lgan materiallardan yasalgan bir necha qatlamli yassi devor orqali issiqlik uzatish jarayonining ahamiyati ancha muhim. Masalan, bug' qozonining tashqi tomonidan shlaklar bilan, ichki tomonidan esa quyqa bilan qoplangan metall devori uch qatlamli bo'ladi.

Yassi uch qatlamli devor (8.4-rasm) orqali issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan issiqlik uzatish jarayonini

ko'rib chiqamiz.

Bunday devorning barcha qatlamlari bir-biriga zich yopishib turadi. Qatlamlarning qalinligi δ_1 , δ_2 va δ_3 bilan, har qaysi materialning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti esa tegishlicha χ_1 , χ_2 va χ_3 bilan belgilangan. Tashqi sirtlarning temperaturalar t_1 va t_4 ham ma'lum. t_1 va t_3 temperaturalar noma'lum bo'lsin.

Biz statsionar holni ko'rib chiqayotganligimiz tufayli issiqlik oqimining zichligi q kattaligi jihatdan o'zgarmas va barcha qatlamlar uchun bir xil bo'ladi. Shu sababli har qaysi devor qatlami uchun (8.17) formula asosida quyidagicha yozish mumkin:

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_1 - t_2); \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_2 - t_3); \quad q = \frac{\lambda_3}{\delta_3} (t_3 - t_4)$$

Bu tenglamadan har qaysi qatlamda temperaturaning o'zgarishini aniqlasa bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_2 &= q\delta_1 / \lambda_1 \\ t_2 - t_3 &= q\delta_2 / \lambda_2 \\ t_3 - t_4 &= q\delta_3 / \lambda_3 \end{aligned} \right\} \quad (8.21)$$

Bundan

$$t_1 - t_4 = \Delta t = q \left[\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right]$$

Bu nisbatdan ko'p qatlamli devor orqali o'tadigan solishtirma issiqlik oqimi q ning kattaligini aniqlash mumkin:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3} \quad (8.22)$$

n qatlamli devor uchun (8.22) formula quyidagi ko'rinishda yoziladi.

$$q = \frac{t_1 - t_{n+1}}{\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i}$$

(8.22) tenglamadan ko'p qatlamli yassi devorning umumiy termik qarshiligi har qaysi qatlam termik qarshiliklarining yig'indisiga teng, degan xulosa kelib chiqadi:

$$R = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3 + \dots + \delta_n / \lambda_n.$$

(8.21) va (8.22) formulalar asosida noma'lum temperaturalar t_2 va t_3 ning qiymatlarini topish mumkin:

$$t_2 = t_1 - q \delta_1 / \lambda_1 \quad t_3 = t_2 - q \delta_2 / \lambda_2 = t_1 - q \left[\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right]$$

yoki

$$t_3 = t_4 + q \delta_3 / \lambda_3.$$

$\chi = \text{const}$ bo'lganda devorning har qaysi qatlamida temperaturaning taqsimlanishi to'g'ri chiziq qonuniga bo'ysunadi, ko'p qatlamli devor uchun esa siniq chiziq ko'rinishida bo'ladi.

8.5. Bir qatlamli Silindrik devorning issiqlik o'tkazuvchanligi

Issiqlik mashinalari va issiqlik almashinuv apparatlari devorining sirtlari ko'pincha konsentrik joylashgan ikkita Silindrik sirt (quvurlar, apparatlarning korpuslari, dvigatelning silindrlari va shunga o'xshash) bilan chegaralangan bo'ladi.

8.5-rasmda uzunligi ℓ bo'lgan quvur bo'lagi ko'rsatilgan. Uning ichki diametri d_1 va tashqi diametri d_2 . Materialning issiqlik o'tkazuvchanligi o'zgarmas va χ ga teng. Quvurning ichki va tashqi sirtlari temperaturallari t_1 va t_2 ga teng va $t_1 > t_2$.

Temperatura faqat radial yo'nalishda o'zgaradi. Tekshirilayotgan devor ichidan radiusi r va qalinligi dr bo'lgan elementar Silindrik qatlam ajratamiz. U holda Fure qonuniga asosan shu qatlamdan vaqt birligi ichida o'tadigan issiqlik miqdori quyidagiga teng.

$$Q = -\chi S \frac{dt}{dr} = -\chi 2\pi r l \frac{dt}{dr} \quad (8.23)$$

bundan

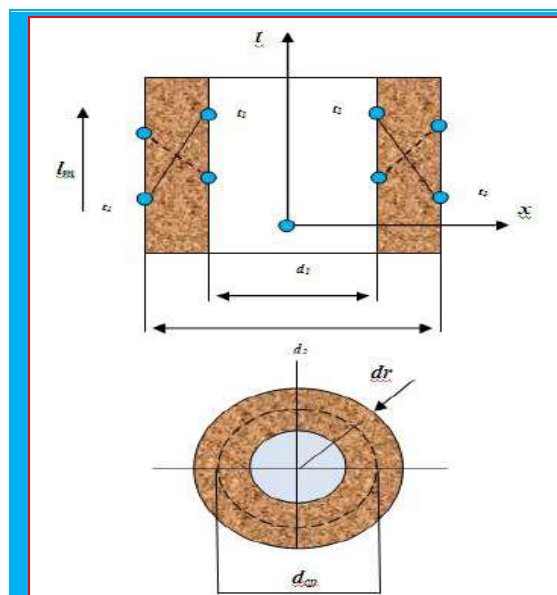
$$dt = -\frac{Q}{2\pi\chi l} \frac{dr}{r} \text{ va } t = -\frac{Q}{2\pi\chi l} \ln r + c \quad (8.24)$$

Chegara shartlariga asosan: $r=r_1$; $t=t_1$ va $r=r_2$ da $t=t_2$

U holda

$$t_1 = -\frac{Q}{2\pi\chi l} \ln r_1 + c \quad (8.25)$$

$$t_2 = -\frac{Q}{2\pi\chi l} \ln r_2 + c \quad (8.26)$$



8.5-rasm. Bir qatlamli Silindrik devor.

bu tenglikdan

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{2\pi\chi l} (\ln r_2 - \ln r_1) = \frac{Q}{2\pi\chi l} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

yoki

$$t_1 - t_2 = \frac{Q}{2\pi\chi l} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

bundan

$$Q = \frac{2\pi\chi l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \Delta t \quad (8.27)$$

Olingan tenglama Silindrik devorning issiqlik o'tkazuvchanligini hisoblash formulasi bo'lib, u $t_1 < t_2$ hol uchun ham to'g'ridir.

Silindrik devor qalinligi bo'yicha temperaturaning o'zgarishini aniqlash uchun (8.24) tenglikka (8.25) tenglikdan S ning qiymatini va (8.27) formuladan Q ning qiymatini qo'yamiz:

$$t_x = -\frac{2\pi\chi\ell\Delta t}{\ln \frac{d_2}{d_1} 2\pi\chi\ell} \ln r_x + t_1 + \frac{2\pi\chi\ell\Delta t}{\ln \frac{d_2}{d_1} 2\pi\chi\ell} \ln r_1$$

yoki

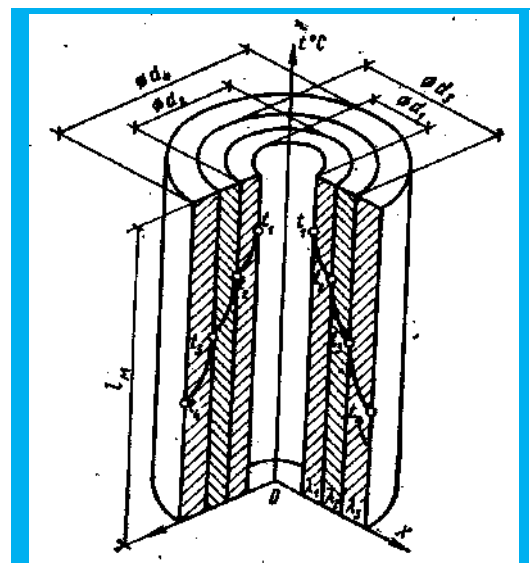
$$t_x = t_1 - \frac{\Delta t}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \ln \frac{d_x}{d_1} \quad (8.28)$$

Bu tenglik logarifmik egri chiziqning tenglamasi bo'lib, $t_1 < t_2$ da egri chiziqning egriligi yuqoriga yo'nalgan bo'ladi.

Silindrik devor uchun issiqlik oqimin-
ing zichligi ichki yu zaning birligiga q_1 yoki
tashqi yuzaning birligiga q_2 , ko'pincha
quvurning uzunlik birligiga q_l nisbatan oli-
nadi.

Oxirgi hol uchun

$$q_e = \frac{Q}{\ell} = \frac{2\pi\chi}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \Delta t \quad (8.29)$$



**8.6-rasm. Ko'p qatlamli
Silindrik devor.**

q_1 , q_2 va q_l kattaliklar orasidagi nisbat quyidagi tenglikdan aniqlanadi:

$$Q = q_1 \pi d_1 \ell = q_2 \pi d_2 \ell = q_l \ell.$$

yoki

$$q_l = \pi d_1 q_1 = \pi d_2 q_2,$$

bundan

$$q_1 = \frac{q_l}{\pi d_1} \quad \text{va} \quad q_2 = \frac{q_l}{\pi d_2}$$

Quvurning uzunlik birligiga nisbatan olingan issiqlik oqimi q_l issiqlik oqimining chiziqli zichligi deyiladi va Wt/m da o'lchanadi.

8.6. Ko'p qatlamli Silindrik devorning issiqlik o'tkazuvchanligi

Amalda bir qatlamli Silindrik devorlar kam uchraydi. Odatda quvur sirti qo'yqa, shlak, yog' yoki issiqlik izolyatsiya qatlami bilan qoplangan bo'ladi. Yuqoridagi barcha hollarda ko'p qatlamli Silindrik devor bilan ish qilishga to'g'ri keladi.

8.6–rasmda uch qatlamli Silindrik devor tasvirlangan.

Uning geometrik o'lchamlari, har bir qatlamning issiqlik o'tkazuvchanligi, ichki va tashqi sirt temperaturalari t_1 va t_4 ma'lum, qatlamlar tegib turgan joylardagi temperatura t_2 va t_3 noma'lum. Statsionar tartibda devorning har qaysi qatlami orqali o'tadigan issiqlik oqimi kattaligi jihatdan o'zgarmas va barcha qatlamlar uchun bir xil bo'ladi.

U holda (8.29) formulaga asosan quyidagilarni yozish mumkin:

Birinchi qatlam uchun:

$$q_l = \frac{2\pi\chi_1}{\ln \frac{d_2}{d_1}} (t_1 - t_2)$$

ikkinchi qatlam uchun;

$$q_l = \frac{2\pi\chi_2}{\ln \frac{d_3}{d_4}} (t_2 - t_3)$$

uchinchi qatlam uchun

$$q_l = \frac{2\pi\chi_3}{\ln \frac{d_4}{d_3}} (t_3 - t_4)$$

Yuqoridagi tenglamalardan har bir qatlamdagi temperatura o'zgarishini aniqlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_2 &= \frac{q_e}{2\pi\chi_1} \ln \frac{d_2}{d_1} \\ t_2 - t_3 &= \frac{q_e}{2\pi\chi_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \\ t_3 - t_4 &= \frac{q_e}{2\pi\chi_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \end{aligned} \right\} \quad (8-30)$$

bundan

$$t_1 - t_4 = \Delta t = q_l \left[\frac{1}{2\pi\chi_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\chi_2} \ln \frac{1}{2\pi\chi_3} \ln \frac{d_4}{d_3} \right]$$

U holda

$$q_l = \frac{\Delta t}{\frac{1}{2\pi\chi_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\chi_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\pi\chi_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} \quad (8.31)$$

n qatlamli devor uchun:

$$q_e = \frac{\Delta t}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\pi\chi_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}} \quad (8.32)$$

Noma'lum bo'lgan t_2 va t_3 temperaturalarni aniqlash uchun (8.31) tenglamadan q_l ni (8.30) tenglikka qo'yish kerak.

8.7. Sharsimon devorning issiqlik o'tkazuvchanligi

Issiqlik oqimi sharsimon devordan o'tadi va issiqlik manbai sharning ichida joylashgan deb hisoblaymiz. Temperatura faqat radius bo'ylab o'zgaradi. Ichki sirt temperaturasi t'_{cm} , tashqi sirt temperaturasi t''_{cm} , devorning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti $\chi = const$ ga teng.

Fure qonuniga asosan radiusi r va qalinligi dr bo'lgan shardan o'tayotgan issiqlik oqimi quyidagiga teng bo'ladi:

$$Q = -\chi F (dt/dr) = -\chi 4\pi r^2 (dt/dr)$$

yoki

$$dt = -(Q/4\pi\chi) \cdot (dr/r^2)$$

Oxirgi tenglamani t va r bo'yicha integrallaymiz va chegara shartlaridan $r=r_1$ da $t=t'_{cm}$, $r=r_2$ da $t=t''_{cm}$, ni aniqlaymiz. U holda:

$$Q = \frac{4\pi\chi(t'_{cm} - t''_{cm})}{(1/r_1 - 1/r_2)} = \frac{2\pi\chi(t'_{cm} - t''_{cm})}{(1/d_1 - 1/d_2)} \quad (8.33)$$

8.8. Ixtiyoriy shakldagi jismning issiqlik o'tkazuvchanligi

Yuqorida ko'rib chiqilgan mavzulardan ko'rinib turibdiki, turli shakldagi jismlar uchun ma'lum bir issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamalari mavjud.

Ixtiyoriy shakldagi jismdan o'tayotgan issiqlik miqdorini quyidagi tenglama yordamida aniqlash mumkin:

$$Q = \frac{\chi}{\delta} F_{o'rt} (t'_{cm} - t''_{cm}) \quad (8.34)$$

bu yerda $F_{o'rt}$ – ixtiyoriy shakldagi jism yuzasi. Yassi va Silindrik devorlar uchun $F_2/F_1 < 2$ (F_1 – jismning ichki yuzasi; F_2 – jismning tashqi yuzasi) bo'lganda

$$F_{o'rt} = (F_1 + F_2)/2 \quad (8.35)$$

Silindrik sirtlar uchun $F_2/F_1 > 2$ bo'lganda

$$F_{o'rt} = (F_2 - F_1)/2,3 \lg F_2/F_1 \quad (8.36)$$

Sharsimon davr uchun

$$F_{o'rt} = \sqrt{F_1 \cdot F_2} \quad (8.37)$$

Yuqorida keltirilgan barcha formulalar taxminiy hisoblar uchun qo'llaniladi. Murakkab shaklga ega bo'lgan jismlarni issiqlik o'tkazuvchanligini hisoblashda, odatda, alohida elementlar bo'yicha hisoblash olib boriladi. Lekin, bunday usul ham taxminiy xarakterga ega. Shuning uchun, murakkab ob'ektlarning issiqlik o'tkazuvchanligi haqidagi aniq ma'lumotlar tajriba yo'li bilan olinadi. Agar devor temperaturasi har xil joylarda turlicha bo'lsa, u holda devorning hisoblangan o'rtacha temperaturasini aniqlash lozim:

$$t_{\text{oit}} = \frac{F_1 \cdot t_1 + F_2 \cdot t_2 + \dots + F_n \cdot t_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n} \quad (8.38)$$

bu yerda $F_1, F_2 \dots F_n$ – temperaturasi o'zgarmas bo'lgan devor qismlari; $t_1, t_2, \dots, t_n$ – alohida qismlar temperaturasi.

8.9. Chegara shartlarining uchinchi turida statsionar issiqlik o'tkazuvchanlik.

Issiqlik uzatish koeffitsienti.

Yassi bir qatlamli va ko'p qatlamli devor orqali issiqlik uzatish

Issiqlikni issiq muhitdan sovuq muhitga ular orasidagi ajratuvchi qattiq devor orqali uzatishga issiqlik uzatish deyiladi. Sanoatning istalgan sohasida qo'llaniladigan turli issiqlik almashinuv qurilmalarida issiqlik tashuvchilar o'rtasidagi issiqlik almashinuvi issiqlik uzatish yo'li bilan amalga oshadi. Ajratuvchi devor issiqlikni yaxshi o'tkazishi lozim bo'lsa, u issiqlik o'tkazuvchanligi yuqori bo'lgan materialdan tayyorlanadi. Boshqa hollarda, masalan, issiqlik isroflarini kamaytirish lozim bo'lsa, devor issiqlik izolyatsiya xossalari yaxshi bo'lgan materialdan tayyorlanadi.

Issiqlik uzatish jarayonining asosiy masalasi, bu vaqt birligi ichida issiqlik tashuvchilar o'rtasidagi ajratuvchi devor orqali uzatiladigan issiqlik miqdorini aniqlashdir.

Bundan tashqari issiqlik uzatish jarayonini o'rganishda quyidagi masalalar ham ko'rib chiqiladi:

berilgan issiqlik miqdoriga qarab, issiqlik tashuvchilar o'rtasidagi devorning zarur bo'lgan yuzasini aniqlash;

materialni ichki temperaturasi maksimal yo'l qo'yilgan qiymatidan ortmasligi uchun har bir qatlam sirtidagi temperaturani hisoblash.

Issiqlik uzatish nixoyatda murakkab jarayon bo'lib, unda issiqlik barcha usullar; issiqlik o'tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish bilan uzatiladi. Haqiqatdan ham, devor bo'lishi

munosabati bilan issiqlik uzatish uch jarayon-dan tashkil topadi. Birinchi jarayon– issiqlikni konveksiya usuli bilan issiq muhitdan devorga uzatilishi. Konveksiya xar doim is-

siqlik o'tkazuvchanlik bilan birga, ba'zida esa nurlanish bilan birga ro'y beradi.

Ikinchi jarayon - issiqlikni devordan issiqlik o'tkazuvchanlik usuli bilan uzatilishi.

Uchinchi jarayon-issiqlikni konveksiya yo'li bilan devorning ikkinchi sirtidan sovuq muhitga uzatilishi.

Qaynoq issiqlik tashuvchidan (issiqlik muhit) devorga berilgan issiqlik miqdori Nyuton-Rixman formulasidan aniqlanadi:

$$Q = \alpha_1 F (t_1 - t_{dev1}) \quad (8.38)$$

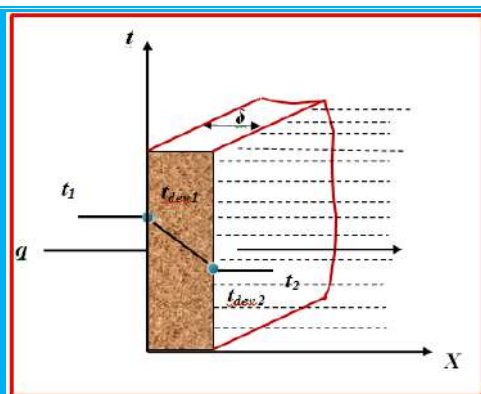
bu yerda: α_1 -temperaturasi t_1 bo'lgan qaynoq issiqlik tashuvchidan devor sirtiga issiqlik berish koeffitsenti; F - yassi devorning yuzasi.

Issiqlik o'tkazuvchanlik usuli bilan devor orqali uzatilgan issiqlik oqimi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$Q = \frac{\chi}{\delta} F (t_{dev1} - t_{dev2}) \quad (8.39)$$

Devorning ikkinchi sirtidan sovuq muhitga uzatilgan issiqlik miqdori:

$$Q = \alpha_2 F (t_{dev1} - t_{dev2}) \quad (8.40)$$



8.7-rasm. Isituvchi muhitdan isitiladigan muhitga yassi devor orqali issiqlikning uzatilishi

bu yerda: α_2 - devorning ikkinchi sirtidan sovuq muhitga issiqlik berish koefitsienti.

Ko'rib chiqilayotgan issiqlik uzatish jarayoni statsionar tartibda borganligi sababli, devor qancha issiqlik olsa, shuncha uzatadi. Yuqoridagi tenglamalarni temperaturalar farqiga nisbatan yechamiz:

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_{dev_1} &= \frac{Q}{\alpha_1 \cdot F} \\ t_{dev_1} - t_{dev_2} &= \frac{\delta}{\chi} \frac{Q}{F} \\ t_{dev_2} - t_2 &= \frac{Q}{\alpha_2 F} \end{aligned} \right\}$$

Tengliklarni xadma-xad qo'shib issiqlik oqimini

$$Q = F(t_1 - t_2) / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (8.41)$$

yoki issiqlik oqimining zichligini aniqlaymiz:

$$q = (t_1 - t_2) / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (8.42)$$

(8.42) tenglamadagi $1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\alpha_2} \right)$ kattalik k xarfi bilan belgilanadi va issiqlik uzatish koefitsienti deb aytiladi:

$$k = 1 / \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\alpha_2} \right) \quad (8.43)$$

u holda

$$Q = kF(t_1 - t_2)$$

$$\text{yoki} \quad q = k(t_1 - t_2) \quad (8.44)$$

Issiqlik uzatish koefitsienti devorning yuza birligidan vaqt birligi ichida qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga, ularning temperaturalari farqi 1° bo'lgandagi uzatilgan issiqlik miqdoriga teng. (8.44) tenglama issiqlik uzatish tenglamasi deyiladi. k ni aniqlash uchun, avvalo α_1 va α_2 larni aniqlash lozim. k ning qiymati har doim eng kichik α qiymatidan ham kichikroq bo'ladi. Is-

siqlik uzatish koeffitsientiga teskari kattalik issiqlik uzatilishining termik qarshiligi deyiladi:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\chi} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (8.45)$$

Agar issiqlik ko'p qatlamli devor orqali uzatilgan bo'lsa, u holda (8.42) formulaning maxrajiga barcha qiymatlarning termik qarshiliklarining yig'indisini qo'yish lozim:

$$Q = \frac{F(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\chi_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.46)$$

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{F(t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\chi_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Ko'p qatlamli davrning issiqlik uzatish koeffitsienti:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\chi_i} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.47)$$

va umumiy termik qarshiligi:

$$R = \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\chi_i} + \frac{1}{\alpha_2} \quad (8.48)$$

Yassi devor sirtlaridagi temperaturalarni aniqlaymiz:

$$\left. \begin{aligned} t_{dev_1} &= t_1 = \frac{Q}{\alpha_1 F} \\ t_{dev_2} &= t_2 + \frac{Q}{\alpha_2 F} \end{aligned} \right\}$$

Agarda α va k ma'lum va bo'lsa, t_{dev} , va t_{dev2} larni quyidagi formulalardan aniqlash mumkin:

$$\alpha_1(t_1 - t_{dev1}) = k(t_1 - t_2), \quad (8.49)$$

$$\alpha_2(t_{dev2} - t_2) = k(t_1 - t_2),$$

$$t_{dev1} = t_1 - \frac{k}{\alpha_1} (t_1 - t_2),$$

$$t_{dev2} = t_2 + \frac{k}{\alpha_2} (t_1 - t_2).$$

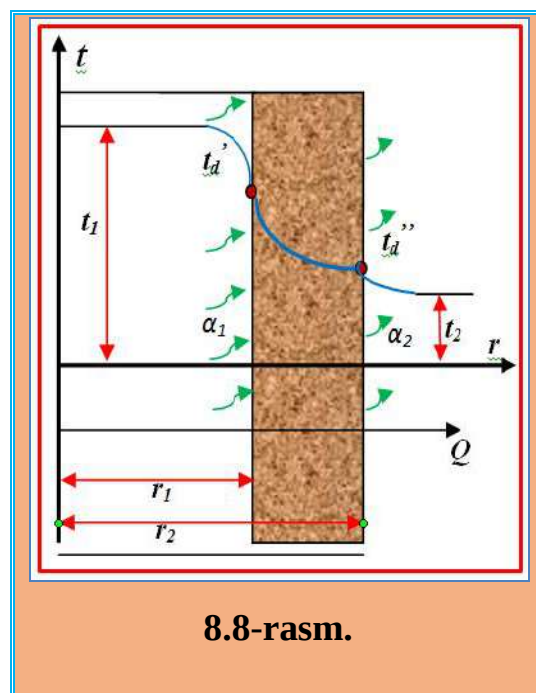
8.10. Bir qatlamli va ko'p qatlamli Silindrik devor orqali issiqlik uzatish

Bir jinsli Silindrik devor orqali temperaturasi t_1 va issiqlik berish koeffitsienti α_1 bo'lgan qaynoq issiqlik tashuvchidan, temperaturasi t_2 va issiqlik berish koeffitsienti α_2 bo'lgan sovuq issiqlik tashuvchiga issiqlik uzatilayotgan bo'lsin (8.8-rasm). U holda issiqlik oqimi uchun quyidagi uchta tenglamani yozish mumkin:

$$Q = \alpha_1 \pi d_{ich} l (t_1 - t'_d)$$

$$Q = \frac{\pi l}{\frac{1}{2\chi} \ln \frac{d_{tash}}{d_{ich}}} (t'_d - t''_d)$$

$$Q = \alpha_2 \pi d_{tash} l (t''_d - t_2)$$



Bu uch tenglamani temperaturalar farqiga nisbatan yechib, keyin xadma-xad qo'shib quyidagini hosil qilamiz:

$$Q = \frac{\pi l (t_1 - t_2)}{\alpha_1 d_{ich} + \frac{1}{2\chi} \ln \frac{d_{tash}}{d_{ich}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{tash}}} \quad (8.50)$$

bu yerda

$$k_y = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_{ich}} + \frac{1}{2\chi} \ln \frac{d_{tash}}{d_{ich}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{tash}}} \quad (8.51)$$

issiqlik uzatishning chiziqli koeffitsienti deb aytiladi, uningi birligi $Vt/(m \cdot grad)$. Silindrik devordan o'tayotgan issiqlik oqimining zichligi quyidagiga teng.

$$q_u = \frac{Q}{l} = k_y \pi (t_1 - t_2)$$

Issiqlik uzatilishining chiziqli koeffitsienti, uzunligi 1 m bo'lgan quvurdan vaqt birligi ichida qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga, ularning temperaturalari farqi 1° bo'lganda uzatilayotgan issiqlik miqdoriga teng. Shuning uchun (8-32) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$Q = k_{ts} \pi l (t_1 - t_2) \quad (8.52)$$

Ko'p qatlamli silindrik devordan o'tayotgan issiqlik oqimi quyidagiga teng:

$$Q = \frac{\pi l (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 d_{ich}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\chi_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{tash}}} \quad (8.53)$$

Ichki yoki tashqi sirlarga nisbatan olingan issiqlik oqimining zichligi quyidagi tenglamalardan aniqlanadi:

$$q_{y1} = \frac{Q}{\pi d_1 l} = \frac{k_y}{d_1} (t_1 - t_2)$$

$$q_{y2} = \frac{Q}{\pi d_2 l} = \frac{k_y}{d_2} (t_1 - t_2)$$

Issiqlik uzatishning chiziqli koeffitsientiga teskari bo'lgan kattalikka issiqlik uzatishning chiziqli termik qarshiligi deb aytiladi:

$$R_y = \frac{1}{Q_y} = \frac{1}{\alpha_1 d_{ich}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\chi_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_{tash}} \quad (8.54)$$

bu yerda $\frac{1}{\alpha_1 d_{ich}}$ va $\frac{1}{\alpha_2 d_{tash}}$ - tashqi termik qarshiliklar; $\sum_{i=1}^{i=n} \frac{1}{2\chi_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$ - ko'p qatlamli

Silindrik devorning termik qarshiligi; R_{ts} ning o'lchov birligi $m \cdot \text{grad}/Vt$.

Ichki sirtning temperaturasi quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$t_o^I = t_1 - \frac{Q}{\alpha_1 d_{uq} \pi l} \quad (8.55)$$

tashqi sirtniki esa:

$$t_o^{II} = t_2 + \frac{Q}{\alpha_2 d_{tash} \pi l} \quad (8.56)$$

8.11. Silindrik devorning kritik diametri

Ma'lumki, issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti $0,2 \text{ Vt/(m}\cdot\text{grad)}$ dan kichik bo'lgan materiallar issiqlik izolyatsiya materiallari deyiladi. Bunday materiallarga asbest, po'kak, kigiz, yog'och qipig'i, shisha tolasi, torf va shunga o'xshash materiallar kiradi. Quvurni izolyatsiyalash uchun ishlatilayotgan materiallarni issiqlik isroflarini kamaytirish shart-sharoitlarini ko'rib chiqaylik. Silindrik quvur bir qatlamli izolyatsiya bilan qoplangan bo'lsin. α_1 , α_2 , d_1 , d_2 , χ_1 , χ_2 , t_1 va t_2 lar o'zgarmas bo'lgan holda, termik qarshilik izolyatsiya qalinligi o'zgarishi bilan qanday o'zgarishini ko'rib chiqaylik.

Ikki qatlamli Silindrik devorning termik qarshiligi tenglamasidan

$$R_y = \frac{1}{k_y} = \frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\chi_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\chi_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}$$

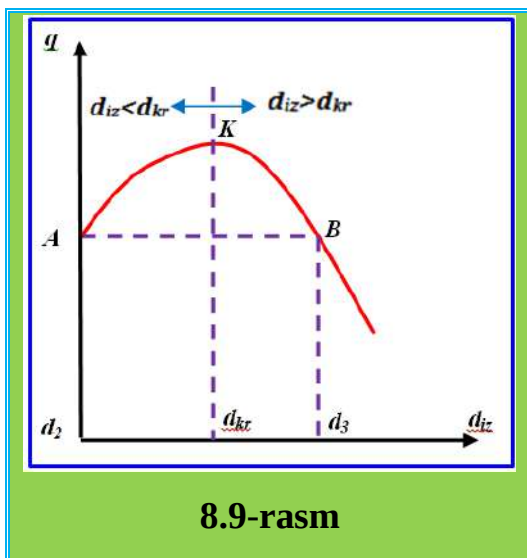
izolyatsiyaning diametri d_3 ortishi bilan izolyatsiya qatlamining qarshiligi $(\frac{1}{2\chi_1} \ln \frac{d_3}{d_2})$

ham ortadi, lekin shu bilan bir vaqtda devordan tashqi muhitga issiqlik berishning termik qarshiligi kamayadi $(\frac{1}{\alpha_2 d_3})$. Yuqoridagi tenglamani o'ng qismidan d_3

bo'yicha birinchi hosilani olib, uni nolga tenglaymiz:

$$\frac{d(R_y)}{d(d_3)} = \frac{1}{2\chi_2 d_3} - \frac{1}{\alpha_2 d_3^2} = 0$$

U holda $q=f(d_3)$ egri chiziqning ekstremal nuqtasiga mos keluvchi kritik diametr quyidagi formuladan aniqlanadi:



$$d_{kr} = d_{iz} = \frac{2\chi_{2iz}}{\alpha_2} \quad (8.57)$$

Bu tenglamadan ko'rinib turibdiki, izolyatsiyaning kritik diametri quvurning o'lchamlariga bog'liq emas ekan. U izolyatsiyaning issiqligi o'tkazuvchanlik koeffitsienti qanchalik kam bo'lsa, shunchalik kamayadi va α_2 kamayishi bilan ortadi. Yuqoridagi tenglamani R_{ts} bo'yicha ikkinchi

hosilasi noldan katta, demak, kritik diametr termik qarshilikning minimumiga va issiqlik oqimining maksimumiga muvofiq keladi (8.9-rasm). (8.57) tenglama taxlili shuni ko'rsatadiki, d_{iz} ortsa, lekin d_{kr} dan kichik bo'lib qolsa, u holda issiqlik isroflari ortadi va izolyatsiyasiz quvurning issiqlik isroflaridan ham yuqori bo'ladi (AK egri chiziq).

$d_{iz}=d_{kr}$ bo'lganda (K nuqta) isroflar maksimal bo'ladi. Izolyatsiya diametrini bundan keyingi ortishi bilan $d_{iz}>d_{kr}$, issiqlik isroflari $d_{iz}=d_{kr}$ holga qaraganda kamayadi (BK egri chiziq). Faqat $d_{iz}=d_3$ bo'lgandagina, issiqlik isroflari yana izolyatsiyalangan quvurning issiqlik isroflari kabi bo'ladi. Demak, izolyatsiya samarali ishlashi uchun, kritik diametr izolyatsiyasiz quvurning diametridan kichik bo'lishi $d_{kr} \leq d_2$ kerak (8.9-rasm).

Shunday qilib izolyatsiya devorning issiqlik isroflarini kamaytirishi uchun

$$\chi_{iz} \leq \frac{\alpha_2 d_2}{2}$$

bo'lishi lozim.

(8.39) tenglamadan ko'rinib turibdiki, agar po'lat quvur uchun $\chi=46$ Vt/(m·K) va $\alpha_2=14$ Vt/(m²·K) bo'lsa, u holda $d_{kr}=2 \cdot 46 : 14=6,6$ m bo'ladi.

Shunday qilib, metall quvurlar uchun kritik diametrning chegara qiymati nihoyatda katta bo'lib, u metrlarda o'lchanadi. Diametrning bundan keyingi ortishi esa, quvurdan uzatilayotgan issiqlikni kamayishiga olib keladi. Shu diametr chegarasida esa, metall quvurning qalinligi ortgan sari undan issiqlik ko'proq issiq

muhitdan sovuq muhitga uzatiladi. Agar quvur issiqlik izolyatsiya materialidan, masalan asbestdan ($\chi=0,167 \text{ Vt/(m}\cdot\text{K)}$) tayyorlangan bo'lsa, u holda α_2 ning oldingi qiymatida

$$(\alpha_2=14 \text{ Vt/(m}^2\cdot\text{K)})$$

$$d_{kr}=2\cdot 0,167:14=0,024\text{m}=24 \text{ mm bo'ladi.}$$

Ya'ni, tashqi diametri 24 mm dan ortiq bo'lgan bunday quvurlar uchun, izolyatsiya qalinligi ortishi bilan issiqlik uzatish kamayadi.

Beton quvurlar uchun $\chi= 1,17 \text{ Vt/(m}\cdot\text{k)}$ va $\alpha_2=14 \text{ Vt/(m}^2\cdot\text{k)}$ da $d_{kr}\approx 160 \text{ mm}$ bo'ladi.

Nazorat uchun savollar:

1. Issiqlik uzatish deb nimaga aytiladi?
2. Issiqlik uzatishda qanday masalalar ko'riladi?
3. Issiqlik o'tkazuvchanlikka ta'rif bering.
4. Konvektsiya nima?
5. Temperatura maydoni
6. Fure qonuni.
7. Issiqlik oqimi deb nimaga aytiladi?
8. Issiqlik izolyatsion materiallar.
9. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasi.
10. Yassi devorlar orqali issiqlik uzatish.

TO'QQIZINCHI BOB

KONVEKTIV ISSIQLIK ALMASHINUVI

9.1. Asosiy tushunchalar

Gaz yoki suyuqlik makrozarralarining bir joydan ikkinchi joyga siljishida issiqlikning uzatilish jarayoni konveksiya deyiladi. Konveksiya (lotincha *canvectia* – keltirish) sochiluvchan, suyuq va gazsimon moddalar qatlamlari zarralarining tartibsiz harakatida namoyon bo'ladi. Shuning uchun zarralari oson siljiydigan muhitdagina konveksiya sodir bo'lishi mumkin. Issiqlikning konvektiv va molekulyar uzatilishining birgalikda ta'sir etishi tufayli bo'ladigan issiqlik almashinish konvektiv issiqlik almashinish deyiladi. Boshqacha aytganda, konvektiv issiqlik almashinuvi bir vaqtning o'zida ikki usul: konveksiya va issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan amalga oshiriladi. Harakatlanuvchi muhit va uning boshqa (qattiq jism, suyuqlik yoki gaz) bilan chegara sirti orasidagi konvektiv issiqlik almashinuviga issiqlik berish deyiladi.

Konvektiv issiqlik berish nazariyasining asosiy vazifasi oqim yuvib o'tadigan qattiq jism orqali o'tadigan issiqlik miqdorini aniqlashdir. Issiqlikning yakuniy oqimi doimo temperaturaning pasayish tomoniga yo'nalgan bo'ladi. Issiqlik berishni amalda hisoblashda Nyuton qonunidan foydalaniladi.

$$Q = \alpha F(t_c - t_{deg}) \cdot \tau \quad (9.1)$$

Bu tenglik 1701 yili I.Nyuton tomonidan olingan bo'lib, Nyutonning konvektiv issiqlik berish qonuni deb aytiladi. Bu qonunga asosan suyuqlikdan devorga yoki devordan suyuqlikka o'tadigan issiqlik miqdori Q issiqlik almashinuvida ishtirok etayotgan sirt F ga, temperatura tushishi $t_c - t_{dev}$ ga va issiqlik almashinuv vaqti τ ga proporsional bo'ladi. Bu yerda t_{dev} – devor sirtining temperaturasi; t_c – devor sirtini yuvib o'tadigan muhitning temperaturasi. Suyuqlik bilan qattiq jism orasidagi issiqlik almashinuvining konkret shart-sharoitlarini hisobga oluvchi proporsionallik koeffitsienti α issiqlik berish koeffitsienti deyiladi.

(9.1) formulada $F = 1\text{m}^2$ va $\tau = 1$ sek deb qabul qilsak, bir kvadrat metr yuzadan o'tadigan issiqlik oqimining Vatt hisobidagi zichligini olamiz:

$$q = \alpha(t_c - t_{dev})$$

yoki

$$q = \frac{t_c - t_{dev}}{1 / \alpha} \quad (9.2), (9.3)$$

Issiqlik berish koeffitsientiga teskari bo'lgan $1/\alpha$ kattalik issiqlik berishning termik qarshiligi deyiladi. (9.3) tenglamani α ga nisbatan yechsak quyidagini olamiz:

$$\alpha = \frac{q}{t_c - t_{dev}} \quad (9.4)$$

(9.4) tenglikka ko'ra, issiqlik berish koeffitsienti α issiqlik oqimining zichligi q ning jism sirtining temperaturasi va tevarak muhit temperaturasi orasidagi farqqa nisbatidan iborat. Temperatura bosimi 1°S ga teng bo'lganda issiqlik berish koeffitsienti α son jihatidan issiqlik oqimining zichligiga teng bo'ladi.

Konvektiv issiqlik almashinuvi ancha murakkab jarayon. Bu jarayonni hisoblashda asosiy masala issiqlik berish koeffitsienti α ni aniqlashdir. Issiqlik berish koeffitsienti α juda ko'p faktorlarga bog'liq bo'lib, ulardan asosiylari quyidagilar:

9.2. Suyuqlik oqimining vujudga kelish sabablari.

Vujudga kelish sabablariga qarab, suyuqlikning harakati erkin va majburiy harakatlanishga bo'linadi. Erkin harakatlanish yoki tabiiy konvektsiya notekis isitilgan suyuqlikda (gazda) vujudga keladi. Bunda vujudga keladigan temperaturalar zichliklarning farq qilishiga va suyuqlikdagi zichligi kamroq makrozarralarning suyuqlik yuzasiga qalqib chiqishiga olib keladi, bu esa harakatlanishni keltirib chiqaradi. Erkin harakatning jadalligi suyuqlik turiga, makrozarralarining temperaturalar farqiga va jarayon bo'layotgan hajmga bog'liq. Suyuqlikning majburiy harakatlanishi yoki majburiy konvektsiya tashqi qo'zg'atuvchilar: ventilyatorlar, nasoslar va shunga o'xshashlarning ta'sir etishi bilan bog'liq. Bular yordamida suyuqlikni harakatlanish tezligini keng ko'lamda o'zgartirish va shu bilan issiqlik almashinuv tezligini boshqarish mumkin.

9.3. Suyuqlikning oqish tartibi.

1884 yilda O. Reynolds o'zining tajribalari asosida, suyuqlikning harakati laminar yoki turbulent bo'lishi mumkinligini ko'rsatib berdi.

Laminar oqishda suyuqlikning zarralari aralashmasdan harakatlanadi. Bunda oqish yo'nalishiga normal bo'yicha issiqlikning uzatilishi asosan issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan amalga oshadi. Suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligi ancha kichik (suv uchun $\chi=0,60 \text{ Wt/(m.K)}$) bo'lganligi sababli laminar oqishda issiqlik almashinish tezligi katta bo'lmaydi.

Oqim tezligi muayyan qiymatidan ortishi bilan oqish tavsifi keskin o'zgaradi. Bunda oqimning to'g'ri ipga o'xshash shakli o'zgarib, to'lqinsimon shaklga kiradi va nihoyat butunlay aralashib ketadi. Suyuqlikning harakati tartibsiz bo'la borib, oqim doimo aralashib turadi. Bunday oqish turbulent oqish deyiladi. Turbulent oqishda issiqlik oqim ichida issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan, shuningdek suyuqlikning deyarli barcha massasining aralashishi yo'li bilan tarqaladi. Shuning uchun turbulent oqishda issiqlik almashinish laminar oqimdagiga qaraganda ancha katta bo'ladi. Reynolds suyuqlikning quvurdagi oqish tartibi $w d/\nu$ – o'lchamsiz kompleksning qiymati bilan aniqlanishini ko'rsatdi. Bu kompleks Reynolds soni deb aytiladi:

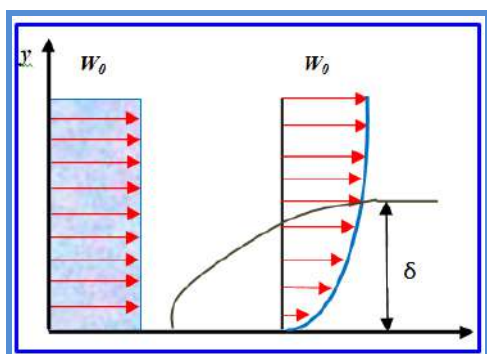
$$Re = wd/\nu, \quad (9.5)$$

bu yerda w – suyuqlikning o'rtacha tezligi, m/sek; d – quvur diametri, m; ν – kinematik qovushqoqlik koeffitsienti, m^2/sek .

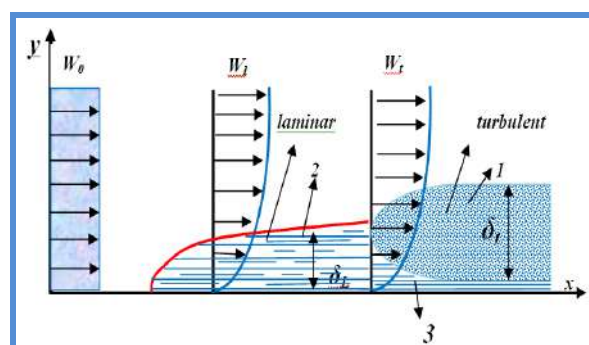
(9.5) formula yordamida istalgan kesimdagi oqim uchun Reynolds sonini hisoblab chiqarish mumkin. Reynolds sonini kritik qiymati $Re_{kr}=2300$ ekanligi tajribadan aniqlangan. $Re \leq 2300$ bo'lganda oqim laminar, $Re \geq 10000$ da esa – turbulent bo'ladi. Tezligi $w=\text{const}$ bo'lgan suyuqlikni quvur bo'ylab harakatini ko'rib chiqaylik. (9.1-rasm). Suyuqlik quvur bo'ylab oqa boshlashi bilan ishqalanish natijasida devorlar yaqinidagi suyuqlik zarralari devorlarga yopishadi, natijada devorlar yaqinida tezlik nolgacha pasayadi. Suyuqlik sarfi o'zgarmaganligi sababli, tezlik quvur kesimining o'rtasida tegishlicha ko'payadi. Bunda quvur devorlarida gidrodinamik chegara qatlam – suyuqlik tezligi w dan nolgacha kamaya-

digan qatlam hosil bo'ladi. Bu qatlamning qalinligi δ oqim bo'ylab ortadi (9.1-rasm). Oqimning tezligi ortishi bilan chegara qatlamning qalinligi kamayadi, suyuqlikning qovushoqligi ortishi bilan esa, qatlam qalinligi ortadi. Gidrodinamik chegara qatlamida oqim laminar 1 va turbulent 2 bo'lishi mumkin. (9.2-rasm). Oqim turi Reynolds soni bilan aniqlanadi.

Chegara qatlamida oqim turbulent bo'lsa, u holda devor yaqinida oqish laminar bo'lgan juda yupqa suyuqlik qatlami hosil bo'ladi. Bu qatlamni qovushoq yoki laminar qatlamcha 3 deyiladi. Suyuqlik quvurga kirgan paytdan to barqaror oqim qaror topgunga qadar, chegara qatlam qalinligi barcha kesimni to'ldirguncha quvur uzunligi bo'ylab asta-sekin ortib boradi. Shu paytdan boshlab tezlikning o'zgarmas profili yuzaga keladi va oqim barqarorlashadi.

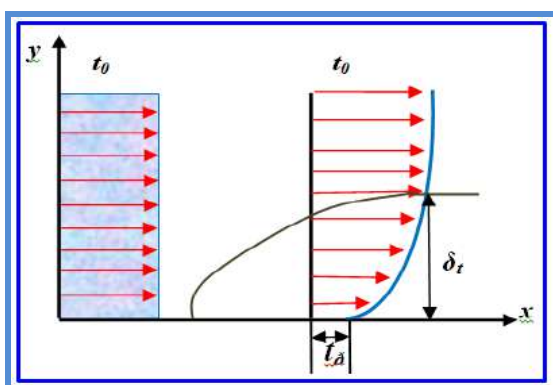


9.1-rasm

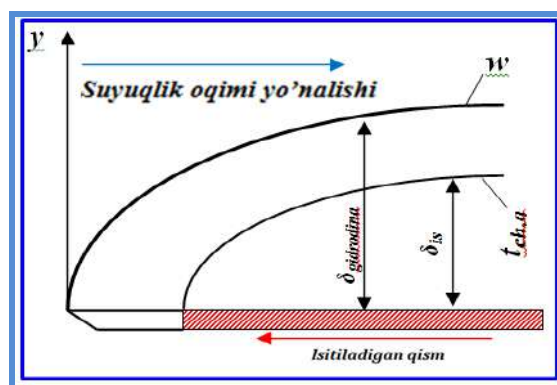


9.2-rasm

Agar devor va suyuqlik temperaturalari bir xil bo'lmasa, u holda devor yaqinida issiqlik chegara qatlami hosil bo'ladi va bu qatlamda suyuqlikning barcha temperatura o'zgarishlari ro'y beradi (9.3-rasm)[5].



9.3-rasm



9.4-rasm

Bu chegara qatlamidan tashqarida suyuqlik temperaturasi t_0 o'zgarmas bo'ladi. Umumiy holda issiqlik va gidrodinamik qatlamlar qalinligi bir-biriga mos

kelmasligi mumkin (9.4-rasm). Bu qatlamlar qalinliklari nisbati o'lchamsiz son $Pr = \nu / a$ bilan aniqlanadi. Issiqlik o'tkazuvchanligi past (masalan, yog'lar) qovushoq suyuqliklar uchun $Pr \approx 1$ va gidrodinamik qatlam qalinligi issiqlik chegara qatlam qalinligidan katta bo'ladi. Gazlar uchun $Pr \approx 1$ bo'lib, ularda bu qatlamlar qalinliklari deyarli bir xil bo'ladi. Issiqlik uzatishning mexanizmi va tezligi suyuqlikning chegara qatlamidagi harakatining tavsifiga bog'liq. Agar issiqlikning chegara qatlam ichidagi harakati laminar bo'lsa, u holda devorga perpendikulyar yo'nalishda issiqlik, issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan uzatiladi. Lekin, qatlamning tashqi chegarasida issiqlik asosan konvektsiya bilan uzatiladi.

Issiqlik chegara qatlamida oqim turbulent bo'lsa, issiqlik devor tomon yo'nalishi bo'yicha asosan suyuqlikning turbulent aralashishi natijasida uzatiladi. Issiqlikni bunday uzatilishi, issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan issiqlikni uzatishga qaraganda ancha jadalroqdir. Lekin bevosita devor oldidagi laminar qatlamchada issiqlik devorga issiqlik o'tkazuvchanlik bilan uzatiladi.

9.4. Suyuqlikning fizik xossalari

Issiqlik berish jarayoniga suyuqlikning quyidagi fizik xossalari ta'sir etadi: issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti χ , solishtirma issiqlik sig'imi c , zichligi ρ , temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti a va qovushoqlik koeffitsienti μ . Har qaysi modda uchun bu parametrlarning muayyan qiymatlari bor va odatda, ular temperaturaning, ba'zilar esa bosimning ham funktsiyalari hisoblanadi.

Suyuqlik yuvib o'tayotgan sirtning shakli, o'lchami va holati. Issiqlik beruvchi sirtning shakli va o'lchamlari issiqlik berilishiga katta ta'sir ko'rsatadi. Jismning har qanday oddiy shakllaridan (quvurlar, plitalar va shunga o'xashashlardan) xar hil issiqlik beruvchi sirtlar hosil qilish mumkin. Issiqlik berish koeffitsientining taxminiy qiymatlari.

9.4-jadval

Konvektiv issiqlik almashinuv jarayoni	$\alpha, \text{Vt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Gazlardagi tabiiy konvektsiya	6 – 100
Gazlar quvurda yoki quvur oralig'ida majburiy harakatlanganda	12 – 120
Suv bug'ining quvurdagi harakati	110 – 2200
Suvning tabiiy konveksiyasi	110 – 1100
Suvning quvurdagi harakati	500 – 11000
Qaynayotgan suv	2200 – 11000
Kondensatsiyalanayotgan suv bug'i	4500 – 22000

Bu sirtlar issiqlik tashuvchining harakatlanish va issiqlik berishning o'ziga xos sharoitlarini vujudga keltiradi. Shunday qilib issiqlik berish koeffitsienti α juda ko'p faktorlarga bog'liq ekanligini ko'rdik. Shuning uchun α ning qiymati bir xil sharoitda ham keng oraliqda o'zgarib turadi (9.4 - jadval).

9.5. Konvektiv issiqlik almashinuvining differentsial tenglamalari

Konvektiv issiqlik berish nazariyasining asosiy vazifasi yuqim yuvib o'tadigan qattiq jism sirti orqali o'tuvchi issiqlik miqdorini aniqlashdir.

Umumiy holda statsionar konvektiv issiqlik almashinuv jarayonini quyidagi differentsial tenglamalar tizimi bilan yoritish mumkin.

Issiqlik almashinuv tenglamasi. Issiqlik almashinuv sirtining elementar yuzasi ds orqali suyuqlikning laminar chegara qatlami orqali uzatilayotgan issiqlik oqimi issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan uzatiladi va Fure qonuniga asosan quyidagi tenglama bilan ifodalanadi:

$$dQ = -\chi \frac{dt}{dn} ds$$

Nyuton qonuniga asosan esa $dQ = \alpha \Delta t ds$. Bu tenglamalarni o'ng tomonini tenglasak, quyidagini hosil qilamiz:

$$-\chi \frac{dt}{dn} = -\alpha \Delta t \quad \text{yoki} \quad \alpha = -\frac{\chi}{\Delta t} \frac{dt}{dn} \quad (9.6)$$

(9.6) tenglama konvektiv issiqlik almashinuvining differentsial tenglamasi deyiladi. Bu tenglama qattiq jism va suyuqlik chegarasidagi issiqlik berish jarayonini tasvirlaydi va issiqlik berish koeffitsientini topish uchun temperatura gradientini va demak, suyuqlikda temperatura taqsimotini bilish zarurligini ko'rsatadi. Temperatura taqsimoti esa energiyani differentsial tenglamasidan aniqlanadi.

Energiyani o'tkazish tenglamasi. Bu tenglama issiqlik o'tkazuvchanlikning differentsial tenglamasi (Fure qonuni) va energiyani saqlanish qonuni asosida keltirib chiqariladi.

$$\partial t / \partial \tau + w_x \partial t / \partial x + w_y \partial t / \partial y + w_z \partial t / \partial z = a (\partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2) \quad (9.7)$$

(9.7) tenglama energiya o'tkazilishini differentsial tenglamasi yoki Fure – Kirxgof tenglamasi deyiladi. Bu tenglama harakatlanayotgan suyuqlikning har qanday nuqtasidagi temperaturaning vaqt va fazoviy o'zgarishlari orasidagi bog'liqlikni belgilaydi. Bu tenglamaning chap qismi temperaturaning $t=f(\tau, x, y, z)$ vaqt bo'yicha to'liq hosilasidir. Bunday hosila harakatlanayotgan materiya yoki substantsiya bilan bog'liqligi uchun, uni substantzialp hosila deyiladi va D harfi bilan belgilanadi:

$$Dt / \partial \tau = \partial t / \partial \tau + w_x \partial t / \partial x + w_y \partial t / \partial y + w_z \partial t / \partial z \quad \text{va} \quad \nabla^2 t = \partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2$$

U holda (9.7) tenglama quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Dt / \partial \tau = a \nabla^2 t \quad (9.8)$$

(9.7) tenglamadagi yangi o'zgaruvchan kattaliklar w_x , w_y va w_z ni borligi harakatlanayotgan suyuqlikda temperatura maydoni tezliklar taqsimotiga bog'liq ekanligini bildiradi. Bu bog'lanish suyuqlik harakatining differentsial tenglamasidan aniqlanadi.

Suyuqlik harakatining differentsial tenglamasi. Suyuqlik harakatining differentsial tenglamasi (Nave – Stoks tenglamasi) siqilmaydigan qovushoq suyuqlik uchun quyidagi ko'rinishga ega:

$$\rho D w / d \tau = \partial g - \nabla p + \mu \nabla^2 w \quad (9.9)$$

Bu yerda g – tezlanish; p – bosim; μ – dinamik qovushoqlik koeffitsienti;

Siqiladigan suyuqliklar (gazlar) uchun, zichlikni temperaturaga bog'liqligini $\rho=f(t)$ e'tiborga olib, yuqoridagi tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

$$Dw/d\tau = g\beta_p \Delta t - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 w \quad (9.10)$$

τ - bu yerda β_r – hajmiy kengayishning temperatura koeffitsienti; ν – kinematik qovushoqlik koeffitsienti.

Bu tenglamaga w_x , w_y va w_z lardan tashqari yana bir o'zgaruvchan kattalik $\rho=1/\nu$ kirishi munosabati bilan, tenglamalar tizimiga yana bir tenglamani kiritish lozim bo'ladi. Oqim uzluksizligining (yaxlitligining) differentsial tenglamasi – shunday tenglama hisoblanadi.

Oqim uzluksizligining differentsial tenglamasi. Bu tenglama siqiladigan suyuqliklar (gazlar) uchun quyidagi ko'rinishga ega:

$$\partial \rho / \partial \tau + \partial (\rho w_x) / \partial x + \partial (\rho w_y) / \partial y + \partial (\rho w_z) / \partial z = 0 \quad (9.11)$$

Siqilmaydigan suyuqliklar (statsionar holatda) uchun esa:

$$\partial w_x / \partial x + \partial w_y / \partial y + \partial w_z / \partial z = 0, \text{ yoki } \operatorname{div} w = 0 \quad (9.12)$$

Shunday qilib, biz konvektiv issiqlik almashinuvini yoritib beradigan to'rtta differentsial tenglamani ko'rib chiqdik.

Bu differentsial tenglamalar issiqlik berish jarayonini umumiy holda yoritib beradi. Konvektiv issiqlik almashinuvini konkret masalalarini yechishda differentsial tenglamalar tizimiga chegara shartlarini (bixillilik shartlarini) qo'shish lozim. Bu shartlar quyidagilardan iborat:

1. Jismning shakli va o'lchamlarini aniqlovchi geometrik shartlar;
2. Jismning fizik xossalarini tavsiflovchi fizik shartlar;
3. Tizim va tashqi muhit chegaralaridagi jarayonning o'ziga xos tomonlarini yorituvchi chegara shartlari;
4. Tekshirilayotgan jarayonning vaqt bo'yicha o'ziga xos kechishini ko'rsatuvchi vaqt shartlari. Statsionar jarayonlar uchun vaqt shartlari kerak emas.

Yuqoridagi shartlar, son qiymatlari, funktsionalp bog'liqlik jadval shaklida va hokazolar ko'rinishida beriladi. Bugungi kunda konvektiv issiqlik almashinuvining ko'pgina masalalari hali o'zini yechimini topgani yo'q. Shuning uchun jarayonning matematik ifodasini to'g'riligini tajriba orqali tekshirish lozim.

9.6. O'xshashlik nazariyasi asoslari

O'xshashlik nazariyasi konkret qurilmada olingan tajriba natijalarini shunga o'xshash hodisalarga qachon tadbiq etish mumkinligini, ya'ni jarayonlarning o'xshashligini aniqlashga imkon beradi.

O'xshashlik nazariyasi fizik va matematik tajriba natijalarini umumlashtiruvchi vosita sifatida qo'llaniladi va texnik qurilmalarni modellashtirishning nazariy asosi hisoblanadi. Bundan tashqari, o'xshashlik nazariyasidan issiqlik almashinish jarayonlarini nazariy jihatdan tahlil qilishda ham foydalanish mumkin. O'xshashlik uslubi jarayonning matematik bayoni, ya'ni jarayonning differentsial tenglamalari va ularning chegara shartlari ma'lum bo'lgan hollardagina qo'llaniladi. Barcha erkin va bog'liq o'zgaruvchilarni ularning ba'zi o'ziga xos qiymatlariga (masshtablariga) bo'lish yo'li bilan o'lchamsiz kattaliklarga o'tiladi. Natijada jarayonning matematik bayoni o'lchamsiz holga keladi. Bunda masshtablar, shuningdek, masalaga kiruvchi fizik konstantalar o'xshashlik sonlari yoki kriteriylari deyiladigan o'lchamsiz komplekslar holida birlashtiriladi. Ikki hodisani bir –biriga o'xshash bo'lishi uchun, birinchi hodisani tavsiflovchi kattaliklar, ikkinchi hodisani shunday kattaliklarini qandaydir bir o'zgarmas sonlarga (o'xshashlik sonlariga) ko'paytirish yo'li bilan olinishi lozim. Tajriba o'tkazish uchun haqiqiy qurilmaga har tomondan o'xshash bo'lgan modelni yaratish kerak. Shunday modelni yaratishda esa, geometrik, issiqlik va kinematik o'xshashliklarga rioya qilish lozim.

Geometrik o'xshashlik. Konvektiv issiqlik almashinuv jarayoni uchun jiddiy ahamiyatga ega bo'lgan ob'ekt va uning modeli o'lchamlari (ℓ va ℓ^1) quyidagi tenglik bilan bog'langan bo'lishi kerak:

$$\ell^1 = m_l \ell$$

ya'ni model aslidan m_l marta kichik (katta).

Issiqlik o'xshashligi. Bu o'xshashlik temperatura maydonlari va issiqlik oqimlarining o'xshashligini bildiradi. O'xshash hodisalar ta'rifiga asosan, konvektiv issiqlik berish differentsial tenglamasidagi fizik va geometrik kattaliklar (namuna va model uchun) quyidagi nisbat bilan bog'liq bo'lishi kerak:

$$\alpha^1 = m_\alpha \alpha; \chi^1 = m_\chi \chi; \Delta t^1 = m_t \Delta t; \partial t^1 = m_t \partial t; \partial \delta^1 = m_e \partial \delta,$$

bu yerda m_α , m_χ , m_t , m_e – o'xshashlik sonlari. Issiqlik berilishining differentsial tenglamasiga asosan (9.6) model uchun:

$$m_\alpha \alpha = - \frac{m_\chi}{m_\ell} \cdot \frac{\chi}{\Delta t} \cdot \frac{\partial t}{\partial \delta} \quad (9.14)$$

(9.6) va (9.14) tenglamalar bilan yoritilgan issiqlik almashinuv jarayonlari uyidagi shart bajarilganda o'xshash bo'ladi:

$$m_\alpha = \frac{m_\chi}{m_\ell} \text{ yoki } \frac{m_\alpha m_e}{m_\chi} = 1 \quad (9.15)$$

Yuqoridagi tenglamaga (9.15) masshtabni tanlash yoki o'xshash sonlarni tanlash tenglamasi deyiladi. Bu tenglamadan ko'rinib turibdiki, ikkita har qanday o'xshash sonlarni har qancha o'zgartirish mumkin, lekin, uchinchi o'xshash son, shunday tanlanishi lozimki, natijada (9.15) shart bajarilishi lozim.

Namuna va model uchun bir xil bo'lgan o'lchamsiz komplekslarga o'xshash sonlar deyiladi. Ularga issiqlik uzatish fanining rivojlanishiga katta hissa qo'shgan olimlar nomi berilgan. O'xshash sonlar (m_α , m_t va m_χ) qiymatlarini (9.15) tenglamaga qo'yib va tenglamani chap tomonidagi namunaga tegishli kattaliklarni va o'ng tomoniga model uchun kattaliklarni jamlasak quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{\alpha l}{\chi} = \frac{\alpha^1 l^1}{\chi^1} \quad (9.16)$$

Oxirgi ifodaga uning tarkibiga kirgan kattaliklarni birliklarini qo'ysak, $\alpha l / \chi$ o'lchamsiz kattalik ekanligi kelib chiqadi. Hosil bo'lgan songa Nusselt soni deyiladi.

Nusselt soni, qattiq jism bilan suyuqlik chegarasidagi issiqlik almashinuvini tavsiflaydi:

$$Nu = \frac{\alpha l_o}{\chi} \quad (9.17)$$

bu yerda χ – issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti, $\text{Wt}/(\text{m}\cdot\text{K})$; α – issiqlik berish koeffitsienti, $\text{Wt} / (\text{m}^2\cdot\text{K})$; l_o – jismning o'ziga xos chiziqli o'lchami, m.

Kinetik o'xshashlik. Konvektiv issiqlik almashinuvi suyuqlikning harakat tartibiga bog'liq. Suyuqlikning gidrodinamik harakat tartibi Reynolds soni bilan tavsiflanadi. Reynolds soni inertsia kuchlari bilan qovushoqlik kuchlari orasidagi nisbatni tavsiflaydi:

$$Re = \frac{wl_o}{\nu} \quad (9.18)$$

bu yerda ν – suyuqlikning kinematik qovushoqligi, m^2/s ; w – suyuqlik oqimi tezligi, m/s. Namuna va model uchun Reynolds sonlari bir xil bo'lsa, u holda ularda suyuqlikning oqimi o'xshash bo'ladi.

$$\frac{wl_o}{\nu} = \frac{w^1 l^1}{\nu^1} = Re \quad (9.19)$$

Ushbu ko'rib chiqilgan o'xshash sonlarni tanlash usulini konvektiv issiqlik almashinuvi differentsial tenglamalariga tadbiq etsak, quyidagi asosiy o'xshash sonlarni olish mumkin.

Pekle soni, issiqlikning konvektsiya va issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan tarqalish tezliklari nisbatini tavsiflaydi:

$$Pe = \frac{w_o l_o}{a} \quad (9.20)$$

bu yerda a – suyuqlikning temperatura o'tkazuvchanlik koeffitsienti, m^2/s .

Eyler soni, bosim kuchlari bilan inertsia kuchlarining nisbatini tavsiflaydi:

$$Eu = \frac{p}{\rho w^2} \quad (9.21)$$

bu yerda p – bosim, Pa.

Grasgof soni, zichliklarning farqi tufayli suyuqlikda paydo bo'ladigan ko'tarish kuchlarining qovushoqlik kuchlariga nisbatini tavsiflaydi:

$$Gr = \frac{g\beta(t_{dev} - t_c)l_o^3}{\nu^2} \quad (9.22)$$

bu yerda β - suyuqlik hajmiy kengayishining temperatura koeffitsienti, 1/K; t_{dev} – devor sirtining temperaturasi, °S; t_c – suyuqlik temperaturasi, °S; g – og'irlik kuchi tezlanishi, m/s².

Arximed soni, muhitning erkin harakatlanish shartini aniqlaydi:

$$Ar = \frac{\partial l_0^3}{v} \cdot \frac{\rho_0 - \rho}{\rho} \quad (9.23)$$

bu yerda ρ_0 va ρ – turli fazalarning zichliklari, kg/m³.

Prandtl soni, suyuqlikning fizik xossalarini tavsiflaydi:

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (9.24)$$

Suyuqliklarning Prandtl soni temperaturaga juda bog'liq bo'ladi. Masalan, temperatura 0 dan 180°S gacha ko'tarilganda (to'yinish chizig'ida) suv uchun Prandtl soni 13,7 dan 1 gacha o'zgaradi. Issiqlikni juda yaxshi o'tkazadigan suyuq metallar uchun $Pr \approx 0,005 - 0,05$ bo'ladi. Gazlar uchun $Pr \approx 1$ bo'ladi. Ma'lumki,

$$Re = Pe \cdot Pr$$

Nave soni, suyuqlik harakat tezligini vaqt bo'yicha o'zgarishini tavsiflaydi:

$$Ho = \frac{w\tau}{l_0} \quad (9.25)$$

bu yerda τ – vaqt, s.

Frud soni, inertsia kuchlari bilan og'irlik kuchlarining nisbatini tavsiflaydi:

$$Fr = \frac{g \cdot l_0}{w^2} \quad (9.26)$$

Fure soni temperatura maydonining o'zgarish tezligi, jismning fizik parametrlari va o'lchamlari orasidagi bog'liqlikni tavsiflaydi:

$$F_0 = \frac{a \cdot \tau}{l_0^2} \quad (9.27)$$

Galiley soni, og'irlik kuchi va molekulyar ishqalanish kuchlari orasidagi nisbatni tavsiflaydi:

$$Ga = \frac{g \cdot l_0^3}{v^2} \quad (9.28)$$

Agar o'lchamsiz sonlarga masalaning faqat bog'liq o'zgaruvchilari kiradigan bo'lsa, ular aniqlanadigan o'lchamsiz sonlar deyiladi. Agar o'lchamsiz sonlar ushbu masalaning faqat o'zgarmas kattaliklari va erkin o'zgaruvchilaridan iborat bo'lsa, u holda ular aniqlovchi sonlar deyiladi.

Quyidagi shartlar bajarilgandagina fizik kattaliklar o'xshash bo'ladi:

1. Jarayonlarning fizik tabiati bir xil bo'lishi va yozilish shakli jihatdan bir xil bo'lgan differentsial tenglamalar bilan tavsiflanishi kerak.
2. Muhitning shakli va o'lchamlarini, uning fizik xossalarini tavsiflovchi shartlar, shuningdek chegara va boshlang'ich shartlar (ulardagi o'zgarmas kattaliklarning son qiymatlaridan tashqari) hammasida bir xil bo'lishi kerak.
3. Ikkita jarayonning o'lchamsiz bir xil sonlarining son qiymatlari bir xil bo'lishi lozim.

Aniqlanadigan o'xshash son va aniqlovchi sonlar o'rtasidagi bog'lanishga kriterial tenglamalar deyiladi. Issiqlik apparatlarini hisoblashda issiqlik berish koeffitsienti α va gidravlik qarshilik Δr aniqlanadigan kattalik hisoblanadi.

Konvektiv issiqlik almashinuvi quyidagi beshta o'xshash sonlar bilan tavsiflanadi: Nu, Eu, Pr, Gr va Pe. Nusselt soni tarkibida noma'lum bo'lgan issiqlik berish koeffitsienti α turadi. Eyler sonida esa, gidravlik qarshilikni tavsiflovchi Δp qatnashadi. Shuning uchun Nu va Eu sonlari aniqlanadigan o'xshash sonlar va Pr, Gr va Re sonlari aniqlovchi o'xshash sonlar deyiladi.

Konvektiv issiqlik almashinuvi uchun kriterial tenglamani quyidagicha ifodalash mumkin.

$$Nu = f_1(Re, Gr, Pr) \quad (9.29)$$

$$Eu = f_2(Re, Gr, Pr) \quad (9.30)$$

O'xshash sonlar o'rtasidagi bog'liqlik asosan tajriba orqali aniqlanadi.

Suyuqlikning majburiy harakatida va jadal turbulent oqimda yuqoridagi kriterial tenglama soddalashadi:

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (9.31)$$

Masalan, havoning quvurda turbulent barqaror harakatidagi issiqlik almashinuvini tajribada o'rganish asosida quyidagi kriterial bog'liqlik aniqlangan.

$$Nu=0,018 Re^{0,8} \quad (9.32)$$

Bu tenglamadan texnik hisoblashlarda keng ko'lamda foydalaniladi.

Suyuqlikning erkin harakatida (majburiy konveksiya bo'lmasa) Reynolds soni o'rniga Grashof soni kiritiladi:

$$Nu=f(Gr, Pr) \quad (9.33)$$

Kriterial tenglamalarni hisoblashda suyuqlikning fizik parametrlari ma'lumot jadvallaridan aniqlovchi temperatura bo'yicha olinadi. Odatda bu temperatura sifatida suyuqlikning o'rtacha temperaturasi olinadi. Doirasimon quvurlar uchun aniqlovchi o'lcham sifatida uning diametri, murakkab kesimli kanallar uchun ekvivalent diametr va plitani oqim yuvib o'tayotganda uning uzunligi olinadi.

9.7. Modellash

Turli xil fizik hodisalarni tadqiqot qilish bevosita ob'ektning o'zida yoki uning modelida amalga oshirish mumkin. Model va unda kechayotgan jarayon qanoatlantirishi kerak bo'lgan shartlarni o'xshashlik teoremasi beradi. O'xshashlik nazariyasini tajribalarga qo'llash imkoniyatlari nihoyatda kattadir.

Fizik hodisalarning o'xshashlik nazariyasi asosi uchta o'xshashlik teoremasidan iborat. Birinchi va ikkinchi teoremlarda o'xshashliklari oldindan ma'lum bo'lgan hodisalar haqida gapirilib, shu o'xshash hodisalarning asosiy xossalari ta'rif beriladi. Uchinchi teorema esa, hodisalarni bir-biriga o'xshashligini aniqlashga imkon beruvchi xususiyatlarni belgilaydi. Ikki suyuqlikning o'xshash oqimi uchun birinchi o'xshashlik teoremasi I. Nyuton tomonidan 1686 yili aytilgan bo'lsada, ushbu teorema faqat 1848 yili J. Bertran tomonidan isbotlangan.

Birinchi teoreмага quyidagicha ta'rif berish mumkin: o'xshash hodisalarning o'xshash sonlarining qiymati bir xil. Ikkinchi o'xshashlik teoremasi 1911 yili rus olimi A. Federman va 1914 yili amerikalik olim Ye. Bokingem tomonidan isbotlangan. Ikkinchi teoreмага quyidagicha ta'rif berish mumkin: agar fizik hodisa differentsial tenglamalar tizimi bilan tavsiflansa, u holda ularning o'xshashlik (kriterial) tenglamalari bilan ifodalash imkoniyati har doim mavjuddir.

Uchinchi o'xshashlik teoremasiga ta'rif M.V. Kirpichev va A.A. Guxman tomonidan berilgan va 1933 yili M.V. Kirpichev tomonidan isbotlangan.

Uchinchi o'xshashlik teoremasini quyidagicha ta'riflash mumkin: bir xillilik shartlari o'xshash bo'lgan hodisalar o'xshashdir va bir xillilik shartlari asosida tuzilgan o'xshash sonlar qiymatlari bir xildir.

Ma'lumki, birorta tizimdagi o'xshash hodisalar aynan bir hodisaning turli masshtabdagi ko'rinishidan iboratdir. Shuning uchun, tizimdagi har qanday hodisani o'rganish natijasida olingan xulosalarni tizimdagi barcha hodisalarga qo'llash mumkin. Demak, tizimdagi konkret hodisani o'rganish, shu tizimdagi har kanday boshqa hodisani o'rganish bilan barobardir. Shuning uchun, konkret hodisani bevosita ob'ektda tadqiqot qilish texnik yoki iqtisodiy sabablarga ko'ra qiyin bo'lsa, u holda modeldagi o'xshash hodisa o'rganiladi.

Modellashtirish deb, biron-bir fizik hodisani kichiklashtirilgan modelda o'rganish ilmiy tadqiqot uslubiga aytiladi. Model namunaga o'xshash bo'lishi uchun quyidagi shartlar bajarilishi zarur: fizik tabiati bir xil va bir xil differentsial tenglamalar bilan tavsiflangan jarayonlarni modellashtirish mumkin;

Bir xillilik shartlari, ulardagi kattaliklarning son qiymatlaridan tashqari, hammasida bir xil bo'lishi kerak. Ushbu shartga asosan ob'ekt va model geometrik o'xshash bo'lishi, ob'ekt va modelning kirish kesimidagi suyuqlik harakati o'xshash bo'lishi, ob'ekt va model mos nuqtalarda fizik parametrlar o'xshash bo'lishi kerak.

Ob'ekt va model uchun sanab o'tilgan o'xshashlik shartlari zaruriy va yetarlidir. Tushunarliki, amalda barcha modellashtirish shartlarini bajarib bo'lmaydi. Shuning uchun taqribiy modellashtirish usuli ishlab chiqilgan.

Bugungi kunda modellashtirish ilmiy tekshirishning asosiy uslublaridan biri bo'lib, fan va texnikaning barcha sohalarida keng qo'llanilmoqda.

9.8. Tabiiy konvektsiyada issiqlik berilishi

Issiqlik oqimini aniqlovchi barcha formulalarda suyuqlik temperaturasi qiymati kiradi. Bu temperatura esa, ko'pincha, kanalning kesimi va uzunligi bo'ylab notekis taqsimlangan. Shu sababli texnik hisoblashlarda suyuqlik temperaturasi sifatida oqimning o'rtacha temperaturasi olinadi.

Bu temperaturaga aniqlovchi temperatura deyiladi. Devorning o'rtacha temperaturasi t_d , suyuqlikning kanalga kirishdagi o'rtacha temperaturasi t^I , chiqishdagi esa t^{II} bilan belgilasak, u holda oqimning kanal uzunligi bo'yicha o'rtacha temperaturasi t_s quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$t_c = t_o \pm (t^I - t^{II}) / \ln \frac{t^I - t_o}{t^{II} - t_o} \quad (9.34)$$

(9.34) formulada musbat ishora suyuqlik sovitilayotganda, manfiy ishora esa isitilayotganda olinadi. Agar oqim temperaturasi o'zgarishi unchalik katta bo'lmasa, o'rtacha temperaturani quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$t_c = 0,5(t^I + t^{II}) \quad (9.35)$$

Ma'lumki, tomchi suyuqliklar va gazlarning fizik parametrlari temperatura o'zgarishi bilan o'zgarib turadi. Shuning uchun fizik kattaliklar olinadigan aniqlovchi temperatura sifatida oqimning o'rtacha temperaturasi, yoki devorning o'rtacha temperaturasi, yoki chegara qatlamining o'rtacha temperaturasi olinadi:

$$t_{ch,q} = 0,5(t_d + t_s) \quad (9.36)$$

Issiqlik berish koeffitsientini aniqlash tenglamalarida har doim suyuqlikning o'rtacha tezligi olinadi:

$$w_{oit} = \frac{1}{F_F} \int w dF = \frac{V}{F} \quad (9.37)$$

Bazi o'xshash sonlarga chiziqli o'lcham kiradi. Yumaloq quvurlar uchun chiziqli o'lcham sifatida quvurning ichki diametri olinadi. Kesimi yumaloq bo'lmagan kanallar uchun ekvivalent diametr $d_{ekv}=4F/S$ olinadi, bu yerda F – kanalning ko'ndalang kesim yuzasi; S – kanalning to'liq (ho'llangan) perimetri.

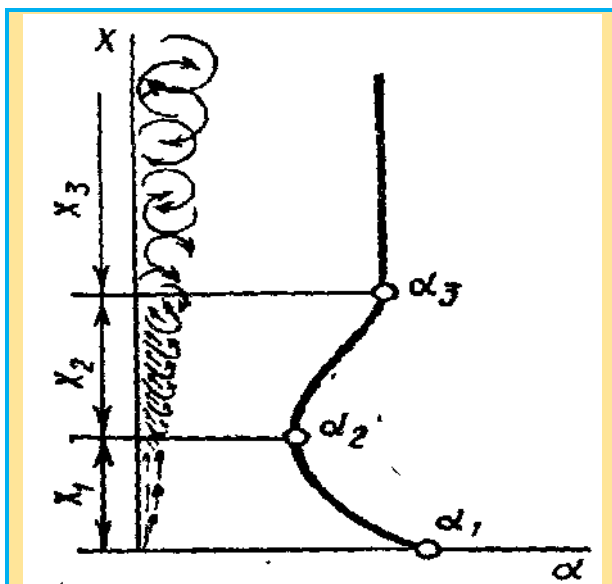
Oqim quvurni yoki quvurlar to'plamini ko'ndalangiga yuvib o'tayotganda aniqlovchi o'lcham sifatida quvurning tashqi diametri olinadi; oqim plitani yuvib o'tayotganda, oqim yo'nalishi bo'yicha uning uzunligi olinadi.

Yuqorida aytib o'tilganidek,

suyuqlikning erkin harakatlanishiga temperaturalar farqi sabab bo'ladi. Bu erkin harakatlanish faqat issiqlik almashinuv bo'lgandagina vujudga kelishi va davom etishi mumkin, degan so'zdir. Bunda issiqlik almashinuvi qanchalik kuchli bo'lsa, muhit ham shunchalik, tez harakat qiladi. Shunday qilib, tabiiy konveksiya faqat suyuq (gaz) muhitdagina amalga oshishi mumkin.

Tabiiy konveksiya yo'li bilan issiqlik almashinuvida qizigan zarralar yuqoridan tushayotgan sovuq zarralarga qarshi, ya'ni pastdan yuqoriga tomon harakat qiladi. Bunda murakkab harakat vujudga kelib, ko'tariluvchi va tushuvchi oqimlar to'qnashadi. Tabiiy konveksiyada issiqlik almashinuv jarayoni ko'pchilik issiqlik qurilmalaridek uzatiladi. 9.5-rasmda havoning qizigan vertikal quvur atrofida harakatlanish sxemasi ko'rsatilgan.

Quvurning pastki qismida havoning yupqa qatlami kichikroq tezlik bilan yuqoriga ko'tarilib, laminar oqim hosil qiladi. Shundan keyin harakatlanish davomida qatlam qalinligi asta-sekin ortib boradi. Bunda tezlik ortadi, laminar



9.5-rasm. Havoning vertikal issiq sirt bo'ylab harakatlanishi:

x_1 – laminar harakatlanish sohasi;

x_2 - oraliq harakatlanish sohasi;

x_3 – uyurmaviy turbulent harakatlanish sohasi;

oqim tartibi buziladi, harakat o'ziga xos «gajaksimon» ko'rinishga ega bo'ladi. Bu oraliq oqim barqaror bo'lmaydi, u turbulent oqim bilan almashinadi va quvurning yuqori qismining hammasida oqish tartibi turbulent bo'ladi. Harakat tartibi o'zgarishiga qarab issiqlik berish koeffitsienti α ning qiymati ham o'zgaradi. Quvurning pastki qismida α quvurning balandligi bo'ylab kamayadi, x_2 qismida (oraliq oqim) α qisman ortib, turbulent oqim qismida o'zgarmasligicha qoladi.

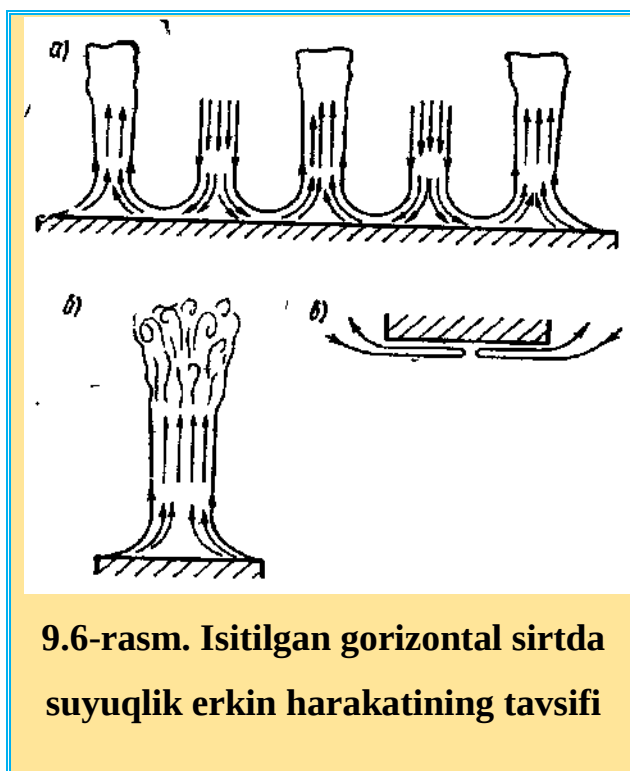
Qizdirilgan tomoni yuqoriga qaragan gorizontaal yassi devor yoki plita atrofida suyuqlikning o'ziga xos harakati kuzatiladi (9.6-rasm).

Qizdirilayotgan yuza katta bo'lsa mahalliy ko'tariluvchi va tushuvchi oqimlar hosil bo'ladi (9.6-rasm,a), yuza kichik bo'lsa, birgina ko'tariluvchi oqim hosil bo'ladi (9.6-rasm,b).

Xuddi shu plitalarning qizdirilgan sirti pastga qaragan bo'lsa, suyuqlikning harakati sirt ostida, yupqa qismida ro'y beradi (9.6-rasm, v).

Diametri kichik bo'lgan (1 mm gacha) tayoqchalarda isitish yu-

zasi kichik bo'lgani tufayli, laminar oqim temperatura bosimi Δt katta bo'lganda ham saqlanib qoladi. Δt ning unchalik katta bo'lmagan qiymatlarida esa, tayoqcha atrofida deyarli harakatlanmaydigan isitilgan suyuqlik qatlami hosil bo'ladi. Tajriba natijalari shuni ko'rsatadiki, chegaralanmagan fazodagi tabiiy konveksiya asosan muhitning fizik xossalariga va temperatura bosimiga bog'liq bo'lar ekan. M.A. Mixeev tabiiy konveksiyada issiqlik almashinuviga doir ko'p tajriba natijalarini tahlil qildi va issiqlik almashinuvining turli hollarida issiqlik berilishini topishga imkon beradigan bir qator tenglamalarni taklif etdi.



9.6-rasm. Isitilgan gorizontaal sirtida suyuqlik erkin harakatining tavsifi

Umumiy holda, α_k ni aniqlash uchun M.A. Mixeevning quyidagi kriterial tenglamasidan foydalanish mumkin:

$$Nu=C(Gr \cdot Pr)^m, \quad \alpha_k=C_{\chi}(Gr \cdot Pr)^m/l \quad (9.38)$$

(9.38) tenglamani har qanday shaklli jismlarni ($Pr \geq 0,7$ bo'lganda) suyuqlik yoki gaz yuvib o'tayotganda qo'llash mumkin. Aniqlovchi temperatura sifatida chegara qatlamining o'rtacha temperaturasi $t=0,5(t_j+t_c)$ olinadi.

Aniqlovchi geometrik o'lcham sifatida quvur va shar diametri, yassi devor uchun uning balandligi olinadi. C va m konstantalar argument (Gr , Pr) ning o'zgarish oralig'iga bog'liq. Ularning qiymatlari 9.5 - jadvalda berilgan.

C va m konstantalar qiymatlarining $Gr \cdot Pr$ ga bog'liqligi 9.5-jadval.

Konstanta	$10^{-3}-5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^2-2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^7-10^{13}$
C	1,18	0,54	0,135
m	0,125	0,250	0,333

Yuqoridagi tenglamani quyidagi konkret hollar uchun quyidagicha yozish mumkin:

1). Gorizontalar quvurlar uchun ($10^3 < Gr \cdot Pr < 10^8$)

$$Nu=0,5(Gr \cdot Pr)^{0,25}(Pr/Pr_g)^{0,25} \quad (9.39)$$

2). Vertikal sirtlar (quvurlar, yassi qattiq jismlar) uchun:

a) laminar oqishda ($10^3 < Gr \cdot Pr < 10^9$)

$$Nu=0,76(Gr \cdot Pr)^{0,25}(Pr/Pr_g)^{0,25} \quad (9.40)$$

b) turbulent oqishda ($Gr \cdot Pr > 10^9$)

$$Nu=0,15(Gr \cdot Pr)^{0,33}(Pr/Pr_g)^{0,25} \quad (9.41)$$

Yuqoridagi tenglamadan issiqlik berish koeffitsientini o'rtacha qiymatini hisoblashda quyidagilarga alohida e'tibor berish zarur:

1. Tenglamalar, $Pr \geq 0,7$ bo'lgan suyuqliklar uchun to'g'ridir.
2. Kriteriyalar tarkibiga kirgan barcha fizik konstantalar suyuqlikning o'rtacha temperaturasida olinadi.

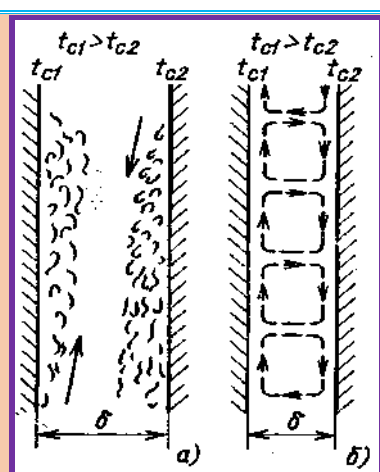
3. Pr soni suyuqlikning o'rtacha temperaturasi bo'yicha olinadi. Gazlar uchun $Pr = \text{const}$, $Pr/Pr_g = 1$ bo'ladi.

4. $Gr \cdot Pr < 10^{-3}$ bo'lsa, Nusselt soni deyarli o'zgarmaydi va 0,5 ga teng bo'ladi, ya'ni $\alpha = 0,5 \lambda / l$.

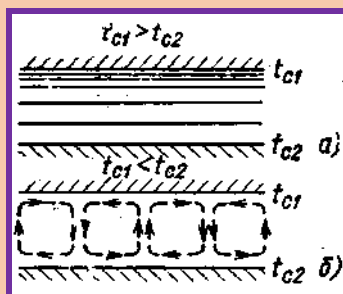
Demak, bunday sharoitda issiqlik almashinuvi faqat issiqlik o'tkazuvchanlikka bog'liq bo'ladi. Ba'zi hollarda tabiiy konveksiya chegaralangan fazoda (deraza oynalari oralig'i, devor qatlami va shunga o'xshash) ro'y beradi.

9.9. Cheklangan fazoda issiqlik berish.

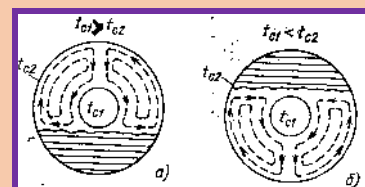
Cheklangan fazoda issiqlik berish suyuqlikning tabiatiga, uning temperaturasiga, bosimiga, cheklangan fazoning shakli va o'lchamlariga hamda sovuq va issiq sirtlarning o'zaro joylashishiga bog'liqdir. Cheklangan fazoda suyuqlikning o'ziga xos erkin xarakati 9.7-9.9-rasmlarda tasvirlangan.



9.7-rasm Suyuqlikning vertikal tirqishlardagi tabiiy tsirkulyatsiyasi a -keng tirqish; b-tor tirqish;



9.8-rasm Suyuqlikning gorizonttal tirqishlardagi tabiiy harakati



9.9-rasm. Suyuqlikning Silindrik tirqishlardagi tabiiy harakati

Vertikal tirqishlarda suyuqlikning harakat tavsifi devorlar orasidagi masofa δ ga bog'liq bo'ladi: δ katta bo'lsa tushayotgan va ko'tarilayotgan oqimlar bir-biriga xalaqit bermasdan harakatlanadi (9.7-rasm, a); δ kichik bo'lsa, oqimlar bir-biriga xalaqit berib ichki tsirkulyatsiya konturlari hosil bo'ladi (9.7-rasm, b).

Gorizontal tirqishlarda suyuqlikning erkin harakati qizigan va sovuq sirtlarning o'zaro joylashishiga va o'rtalaridagi masofaga bog'liq bo'ladi. Agar yuqori devor temperaturasi pastki devor temperaturasidan katta bo'lsa, suyuqlikning erkin harakati kuzatilmaydi. Yuqori devordan pastki devorga issiqlik o'tkazuvchanlik yoki nurlanish orqali uzatiladi (9.8-rasm, a). Agar pastki devor temperaturasi yuqori bo'lsa, suyuqlikning pastdagi temperaturasi yuqori va zichligi kam bo'lgan qismlari yuqoriga ko'tariladi, sovuq qismlari esa pastga harakatlanadi va tirqishda suyuqlikning ko'tarilayotgan va tushayotgan oqimlari paydo bo'ladi (9.8-rasm, b).

Gorizontal Silindrik tirqishlarda (9.9-rasm) suyuqlik tsirkulyatsiyasi tirqishlar diametri nisbatiga bog'liq bo'ladi. Isitilgan sirt pastda joylashgan bo'lsa, suyuqlik tsirkulyatsiyasi sirtning yuqori qismida (9.9-rasm, a) kuzatiladi, pastki qismida tsirkulyatsiya kuzatilmaydi. Tashqi Silindrik sirt qizdirilganda (9.9-rasm, b) suyuqlik tsirkulyatsiyasi yuqoridagi sovuq sirtning ostida ro'y beradi.

Tirqishlar orqali murakkab issiqlik uzatish jarayonini hisoblashda uni ekvivalent issiqlik o'tkazuvchanlik bilan almashtiriladi. Jism bilan uni yuvib o'tayotgan suyuqlik o'rtasidagi issiqlik oqimining o'rtacha zichligi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$q = \frac{\chi_{ekv}}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) = \frac{\chi_{\varepsilon k}}{\delta} (t_{c1} - t_{c2})$$

bunda χ_{ekv} – issiqlik o'tkazuvchanlikning ekvivalent koeffitsienti; bu kattalik issiqlikni tirqish orqali issiqlik o'tkazuvchanlik va konvektsiya orqali uzatilishini tavsiflaydi;

χ – suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti;

$\varepsilon_k = \chi_{ekv} / \chi$ - konvektsiya koeffitsienti.

Tushuvchi va ko'tariluvchi oqimlar tufayli gazlarning harakati murakkab bo'ladi. Bunday issiqlik almashinuvini hisoblash juda qiyin. Hisoblashni soddalashtirish maqsadida murakkab issiqlik almashinuv jarayonini issiqlik o'tkazuvchanlik bilan almashtiriladi va ekvivalent issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti degan tushuncha kiritiladi.

$$\chi_{\text{ekv}} = Q \delta / (\Delta t \cdot F) \quad (9.42)$$

Bu yerda δ – cheklangan fazoning qalinligi (kengligi). Ekvivalent issiqlik o'tkazuvchanlikni χ_{ekv} , muhitning o'rtacha temperaturasidagi issiqlik o'tkazuvchanligiga χ nisbati – konvektsiya koeffitsienti deb aytiladi.

$$e_k = \chi_{\text{ek}} / \chi = f(\text{Gr} \cdot \text{Pr}) \quad (9.43)$$

Taqribiy hisoblashlarda, $(\text{Gr}_c \cdot \text{Pr}_c) > 0$ holda

$$e_k = 0,18 (\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{0,25} \quad (9.44)$$

bo'ladi. Bundan keyin $\chi_{\text{ek}} = e_k \chi$ va $q = \chi_{\text{ek}} \cdot \Delta t$ aniqlanadi.

9.10. Majburiy konvektsiyada issiqlik berilishi

Majburiy harakatlanishda issiqlik berilish jadalligi, asosan muhitning (suyuqlik yoki gazning) harakatlanish tavsifi bilan aniqlanadi.

Amalda ko'pincha turbulent harakat uchraydi, bunda issiqlik berish koeffitsienti laminar harakatdagiga qaraganda ancha katta bo'ladi. Re soni kattalashganda ya'ni turbulentlik jadalligi ortganda suyuqlik bilan devor orasida issiqlik almashinuvi kuchayadi. Issiqlik almashinuvi muhit yuvib o'tayotgan sirtning shakliga ham ko'p jihatdan bog'liq bo'ladi. Oqim hech qaerda yuvib o'tilayotgan sirtan ajralmasa, bunday oqim uzilmas oqim deyiladi. Agar tizimda keskin o'zgaradigan egri-bugriliklar yoki kattalashib boradigan kanallar, keskin burilishlar va shunga o'xshashlar bo'lsa, u holda ba'zi joylarda oqim sirtan ajraladi, ya'ni uzilib oqish paydo bo'ladi. Bugungi kunda uzilmas oqish jarayoni deyarli to'liq o'rganilgan bo'lib, turli sirtlar uchun har xil hisoblash formulalari mavjud. Uzilib oqish jarayoni esa, sodda hollar (silindr, shar va quvurlar to'plamini yuvib o'tishda) uchun o'rganilgan. Majburiy konvektsiyada laminar oqim ikki xil bo'lishi mumkin – qovushoqli va qovushoq – gravitatsion. Qovushoqli oqishda, qovushoqlik kuchlari ko'tarish kuchlaridan ustun turadi. Bu oqishda tabiiy konvektsiya bo'lmaydi va kanal devorlariga issiqlik faqat issiqlik o'tkazuvchanlik usuli bilan uzatiladi.

Qovushoq–gravitatsion oqishda ko'tarish kuchlari hisobga olinadi va bu holda suyuqlikning majburiy harakati tabiiy konvektsiya bilan birgalikda ro'y beradi.

Buning natijasida oqimning laminarligi buziladi. Bunday oqishda issiqlik ham issiqlik o'tkazuvchanlik, ham konvektsiya yo'li bilan uzatiladi.

$Re=2 \cdot 10^3 \div 10^4$ bo'lganda oraliq oqish kuzatiladi va $Re > 10^4$ da oqish turbulent bo'ladi. Bu ikki harakat bir-biridan, $Gr \cdot Pr$ ko'paytmaning qiymatiga qarab farqlanadi.

$Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ bo'lsa, oqish tartibi qovushoq – gravitatsion bo'lib, bu hol uchun quyidagi formula o'rinli bo'ladi:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} \cdot Pr^{0,43} (Gr \cdot Pr)^{0,1} \cdot (Pr/Pr_g)^{0,25} \quad (9.45)$$

Bu tenglamada aniqlovchi o'lcham sifatida ekvivalent diametr, aniqlovchi temperatura sifatida suyuqlikning o'rtacha temperaturasi olingan.

Tomchi suyuqliklar uchun, ularni devordan isishidagi issiqlik berish koefitsienti α_{is} , har doim sovishidagi issiqlik berish koefitsienti α_{sov} dan katta bo'lishi tajribalardan aniqlangan. $\alpha_{is} - \alpha_{sov}$ ayirma, temperatura bosimi $t_g - t_s$ ko'payishi bilan ortadi. Bu holat, kriterial tenglamaga $(Pr/Pr_g)^{0,25}$ ko'paytmani kiritish bilan e'tiborga olinadi. Yuqorida aytib o'tilganidek, R_{rg} devorning o'rtacha temperaturasida hisoblanadi. Bu kattalik suyuqliklar uchun 0,5 – 2 ga, gazlar uchun esa 1 ga teng. (9.45) formulani, agar quvurning issiqlik barqarorlashgan qismi uzunligi $l \geq 50d$ bo'lsa, barcha suyuqliklar uchun qo'llash mumkin. Uzunligi $50 \cdot d$ dan kichik bo'lgan kalta quvurlar uchun (9.45) formuladan aniqlangan α , tuzatish koefitsienti ε_l ga ko'paytiriladi. ε_l koefitsientning son qiymati l/d ga quyidagicha bog'liq.

l/d	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,03	1.

Issiqlik tashuvchining quvur va kanaldagi oraliq oqimi tartibi ($2300 < Re < 10000$) uchun, turli xil tajribalarni umumlashtiruvchi formulalar bugungi kunda yo'q. $Re \geq 10^4$ bo'lgandagina rivojlangan turbulent harakat hosil bo'ladi. Bunda suyuqlik zarralarining aralashish jarayoni shunchalik jadal kechadiki, natijada turbulent oqim yadrosining kesimi bo'yicha temperatura deyarli

o'zgarmas bo'lib turadi. M. A. Mixeev turbulent oqim usulida quvurlardagi issiqlik berilishini hisoblash uchun quyidagi formulani taklif etdi:

$$Nu=0,021 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot (Pr/Pr_g)^{0,25} \quad (9.46)$$

Bu formulada aniqlovchi o'lcham sifatida ekvivalent diametr, aniqlovchi temperatura sifatida suyuqlikning o'rtacha temperaturasi qabul qilingan. Havo uchun, agar $Pr=0,7$ deb hisoblasak, (9.46) tenglama quyidagi ko'rinishga keladi:

$$Nu=0,018 Re^{0,8} \quad (9.46)$$

(9.47) formula turli xil issiqlik tashuvchilar: suyuqliklar, gazlar, o'ta qizigan bug'lar uchun $l/d \geq 50$, $Re=10^4 \div 5 \cdot 10^6$ va $Pr=0,6 \div 250$ bo'lgan hollarda qo'llaniladi. Agar kanalning uzunligi $l < 50d_{ekv}$ bo'lsa, (9.46) formuladan hisoblangan α tuzatish koeffitsienti ε_l ga ko'paytiriladi. ε_l koeffitsientning qiymati 9.6-jadvaldan olinadi.

Tuzatish koeffitsienti ε_l ning l/d ga bog'liqligi.

9.6 -jadval.

Re	ε_l ning l/d quyidagicha bo'lgandagi qiymati								
	1	2	5	10	15	20	30	40	50
10^4	1,65	1,5	1,34	1,23	1,17	1,13	1,07	1,03	1
$2 \cdot 10^4$	1,51	1,4	1,27	1,18	1,13	1,10	1,05	1,02	1
$5 \cdot 10^4$	1,34	1,27	1,18	1,13	1,10	1,08	1,04	1,02	1
10^5	1,28	1,22	1,15	1,1	1,08	1,06	1,03	1,02	1
10^6	1,14	1,11	1,08	1,05	1,04	1,03	1,02	1,01	1

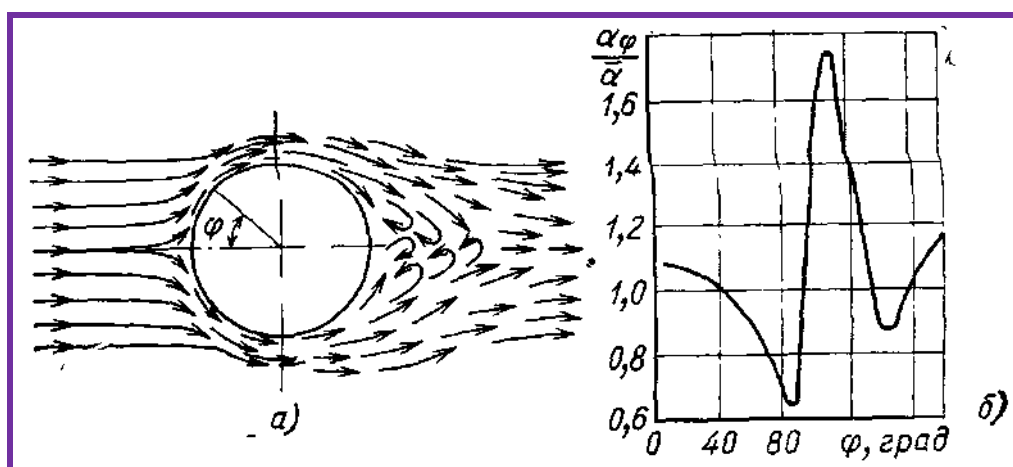
Issiqlik tashuvchining bukilgan quvurlarda oqishida, issiqlik berish jarayoni markazdan qochirma kuchlarning oqimga ta'siri tufayli murakkablashib ketadi.

Uning ta'siri (9.46) formulaga tuzatish koeffitsienti ε_R ni kiritish bilan hisobga olinadi. Ilonizisimon quvurlar uchun ε_R quyidagi nisbatdan aniqlanadi:

$$\varepsilon_R = 1 + 1,77 d/R,$$

Bu yerda R –bukilish radiusi; d – quvur diametri.

Ma'lumki, ko'pgina issiqlik almashinuv apparatlarida (havo isitkich, suv ekonomayzeri va hokazo) quvurlar oqimga nisbatan ko'ndalang joylashgan bo'ladi. 9.10-rasmda suyuqlik quvurni ko'ndalangiga qamrab olayotgan manzarasi tasvirlangan.



9.10-rasm. Silindr aylanasi bo'ylab yuvib o'tishning tavsifi (a) va issiqlik berishning o'zgarishi (b)

Quvurning ro'para qismi sirtida chegara qatlami hosil bo'lib, uning qalinligi oqim yo'nalishi bo'ylab ortib boradi. Ba'zi nuqtalarda chegara qatlamini sirtan uzilishi kuzatiladi va quvur orqasida ikkita simmetrik uyurma paydo bo'ladi.

Chegara qatlamining uzilish nuqtasi o'rni Re soniga bog'liq bo'ladi. Re soni unchalik katta bo'lmasa va quvurga kelayotgan oqimning turbulentlik darajasi kichik bo'lsa, chegara qatlami $82-84^\circ$ da uzilishi kuzatiladi. Re soni ortgan sari, chegara qatlamidagi harakat turbulent shaklga o'tadi. Buning natijasida, kinetik energiyaning ortishi hisobiga chegara qatlamining uzilish o'rni oqim bo'ylab pastga siljiydi ($\varphi \approx 120-140^\circ$), bu esa, quvur orqasida uyurma zonasini kamayishiga va qamrashni yaxshilashga olib keladi.

Quvurni bunday o'ziga xos ravishda qamrab olinishi, suyuqlik va quvur sirti o'rtasidagi issiqlik almashinuviga ta'sir etadi.

9.10-rasmda (b) mahalliy issiqlik berish koeffitsienti α_φ ning o'rtacha issiqlik berish koeffitsienti α ga nisbatining φ burchakka bog'liqligi tasvirlangan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, issiqlik berish quvurning to'g'risida ($\varphi=0^\circ$) jadal ro'y beradi, $\varphi=90^\circ-100^\circ$ da eng kam, $\varphi=120^\circ$ da eng eqori bo'ladi va keyin $\varphi=140^\circ$ da yana pasayadi. Quvurning $\varphi=0-100^\circ$ li qismida issiqlik berishning kamayishi laminar chegara qatlamining qalinligini ortishi hisobiga bo'ladi.

$\alpha_\varphi / \bar{\alpha} = f(\varphi)$ egri chiziqdagi birinchi eng past nuqta chegara qatlamida laminar oqishni turbulent oqishga ($Re_{kr} = 1 \cdot 10^5 - 4 \cdot 10^5$) o'tishiga mos keladi.

Bundan keyin issiqlik berish keskin ravishda ortib ketadi. Ikkinchi eng past nuqta turbulent chegara qatlamini uzilishiga mos keladi. Suyuqlik yoki gaz, silindrni ko'ndalangiga yuvib o'tayotgan hol uchun o'rtacha issiqlik berishni hisoblash quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$\bar{Nu} = (0,43 + C Re^m Pr^{0,38}) \varepsilon \quad (9.48)$$

Aniqlovchi temperatura sifatida quvurga kelayotgan oqim temperaturasi, aniqlovchi o'lcham esa, silindr diametri bo'ladi. Tuzatish koeffitsienti ε kelayotgan oqimning turbulentlik darajasini hisobga oladi ($\varepsilon = 1,0-1,6$).

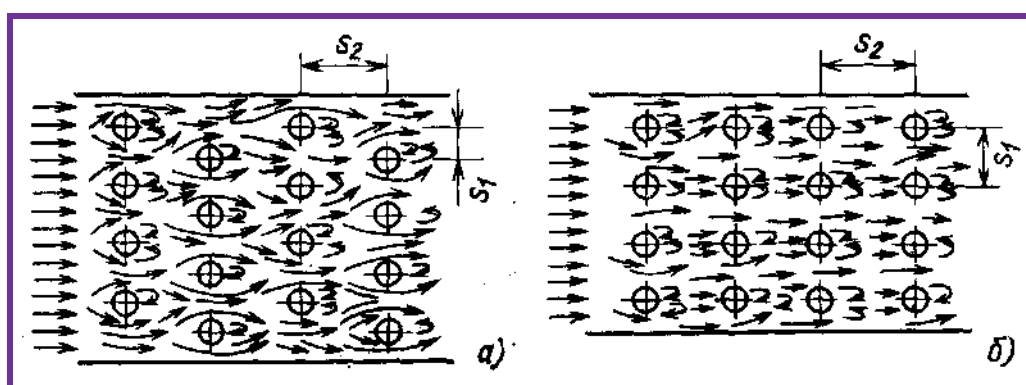
C koeffitsient va m ko'rsatkich Re soniga bog'liq ravishda quyidagi qiymatlarni oladi:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= 1 \div 4 \cdot 10^3, C=0,35, m=0,5; \\ \text{Re} &= 4 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^4, C=0,20, m=0,62; \\ \text{Re} &= 4 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5, C=0,027, m=0,80. \end{aligned}$$

Agar oqim silindrni $\psi < 90^\circ$ burchak ostida qamrab o'tsa, (9.48) tenglama bo'yicha hisoblangan α , $\varepsilon_\varphi \approx 1 - 0,54 \cos^2 \psi$ ga ko'paytirilishi kerak. Agar ko'ndalang oqimda bir emas, balki butun quvurlar to'plami bo'lsa, issiqlik almashinuv jarayoni yanada murakkablashadi. Bu holda issiqlik berish quvurlarning to'plamda joylashishiga va quvur joylashgan qator raqamiga bog'liq. 9.11-rasmda quvurlar yo'laksimon va shaxmatsimon joylashganda suyuqlik harakati tavsifi ko'rsatilgan.

To'plamdagi quvurlarning birinchi qatori qo'zg'almagan suyuqlik oqimi bilan yuviladi va shuning uchun shu qatorda α eng kichik bo'ladi. Keyingi qatorlarda issiqlik berish ancha jadal kechadi va uchinchi hamda keyingi qatorlar uchun α deyarli bir xil bo'ladi. Quvurlar to'plami uchun $10^3 < \text{Re} < 10^5$ va $0,7 < \text{Pr} < 500$ bo'lganda issiqlik berish quyidagi tenglamadan aniqlanadi.

$$\overline{Nu} = C \text{Re}^m P_r^{1/3} \left(\frac{\text{Pr}_c}{\text{Pr}_g} \right)^{1/3} \varepsilon_s \cdot \varepsilon_i \quad (9.49)$$



9.11-rasm. Suyuqlikning quvurlar to'plamida harakati tavsifi.

a – shaxmatsimon joylanish; b – yo'lakli joylanish

Quvurlar shaxmatsimon joylashganda $c=0,41$, $m=0,65$; yo'laksimon joylashganda $c=0,26$, $m=0,65$ bo'ladi. Aniqlovchi chiziqli o'lcham sifatida quvurning tashqi diametri olinadi. Re soni suyuqlik yoki gazning to'plamning eng toraygan

kesimidagi o'rtacha tezligi orqali hisoblanadi. Tuzatish koeffitsienti ε_s , to'plamning ko'ndalang S_1 va bo'ylama qadamini hisobga oladi:
Shaxmatsimon to'plam uchun

$$\varepsilon_s = (S_1/S_2)^{1/6}, S_1/S_2 < 2 \text{ da.}$$

Yo'lakli to'plam uchun

$$\varepsilon_s = 1,12, S_1/S_2 \geq 2 \text{ da.}$$

ε_i tuzatish koeffitsienti, quvurlarning birinchi va ikkinchi qatoridagi issiqlik berishning kamayishini hisobga oladi. Quvurlarining birinchi qatori uchun $\varepsilon_i = 0,7$ (shaxmatsimon to'plam) va $\varepsilon_i = 0,9$ (yo'lakli to'plam); uchinchi va keyingi qatorlar uchun $\varepsilon_i = 1$.

Barcha quvurlar to'plami uchun issiqlik berish koeffitsientining o'rtacha qiymati quyidagi tenglikdan aniqlanadi:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^Z \bar{\alpha}_i F_i}{\sum_{i=1}^Z F_i} \quad (9.50)$$

bu yerda $\bar{\alpha}_i$ – i – inchi qatorning o'rtacha issiqlik berish koeffitsienti; F_i – i – inchi qator yuzasi; Z – to'plamdagi quvurlar soni.

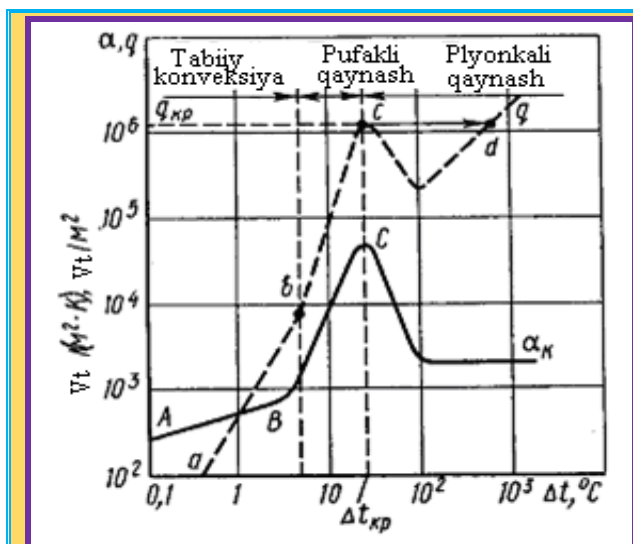
9.11. Jismning agregat holati o'zgarishida issiqlik berilishi

Jismning fazoviy o'zgarishlari – bug'lanish, qaynash, kondensatsiya, sublimatsiya – issiqlik almashinuv jarayoniga katta ta'sir etadi.

Qaynash jarayonining boshlanishida, issiqlik devordan unga bevosita tutashgan suyuqlik qatlamiga, suyuqlikdan esa, hosil bo'layotgan bug' pufakchalariga uzatiladi. Bug' hosil bo'lishining mexanizmi va issiqlik almashinuv jadalligi, devor va suyuqlik temperaturalarari farqi $\Delta t = t_d - t_s$ bilan belgilanadi.

9.12-rasmda issiqlik berish koeffitsienti α va issiqlik oqimining zichligini temperatura bosimiga bog'liqligi tasvirlangan.

$\Delta t < 5^\circ\text{S}$ bo'lganda, isitilayotgan sirtan ajralib chiqayotgan pufakchalar ko'p bo'lmaydi va ular suyuqlikni aralashishiga sezilarli ta'sir ko'rsata olmaydi.



13.12-rasm. Issiqlik berish koeffitsienti va solishtirma issiqlik oqi-mining qaynash jarayoni temperatura bosimiga bog'liqligi ($p=0.1$ MPa)

Bunday sharoitda issiqlik almashinuvin-ing jadalligi suyuqlikning erkin harakati bilan belgilanadi va issiqlik berish koeffitsienti Δt ortishi bilan sekin ko'payadi. Qaynashning bunday usuliga konvektiv qaynash deyiladi.

Temperatura bosimi Δt ning keyingi ortishi natijasida bug' pufakchalari soni ham orta boradi va buning natijasida suyuqlik jadal aralashadi.

Qaynashning bunday usuliga pufakchali qaynash deyiladi. Temperatura bosimi Δt ning qandaydir bir kritik qiymatida pufakchalar birlashib yaxlit bug' plyon-

kasi hosil bo'ladi. Bunday qaynashga plyonkali qaynash tartibi deyiladi.

Mos ravishda, α_k ham, avvalo bir tekis (AB qism) ortadi, keyin pufakchalarning jadal harakati natijasida konveksiya kuchayishi sababli birdaniga ortadi (BC qism). Keyinchalik bug' plyonkasi hosil bo'lishi tufayli termik qarshiliklar ortadi, va natijada α_k kamayadi.

Plyonka isitish yuzasini to'liq qoplab olganda, issiqlik almashinuvi barqarorlashadi va Δt ning keyinchalik ortishida ham α_k deyarli o'zgarmaydi.

Pufakchali qaynashni plyonkali qaynashga o'tish sohasida, $q=f(\Delta t)$ bog'lanish eng katta qiymatga ega bo'ladi. Shu paytga mos kelgan Δt , q va α_k ning qiymatlariga kritik qiymatlar deyiladi. Suv uchun kritik parametrlar quyidagicha: $\Delta t_{kr}=25^\circ\text{S}$; $\alpha_{kr}=46500 \text{ Vt}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $q_{kr}=1,16 \cdot 10^6 \text{ Vt}/(\text{m}^2 \cdot \text{soat})$. Plyonkali

qaynash usuli issiqlik almashinuv apparatlarining unumdorligini pasaytiradi, ba'zi hollarda esa, issiqlikni olib ketilishi yomonlashgani tufayli, devorning kuyib qolishiga sabab bo'ladi.

Suyuqliklarning kritik parametrlarini bilish, pufakchali qaynash uchun sharoitni ta'minlash imkonini beradi, ya'ni $\Delta t < \Delta t_{kr}$.

Δt_{kr} oshishi bilan, uzatilayotgan issiqlik ham ortadi. Suv uchun pufakchali qaynashda va $P=1\div 200$ bar da:

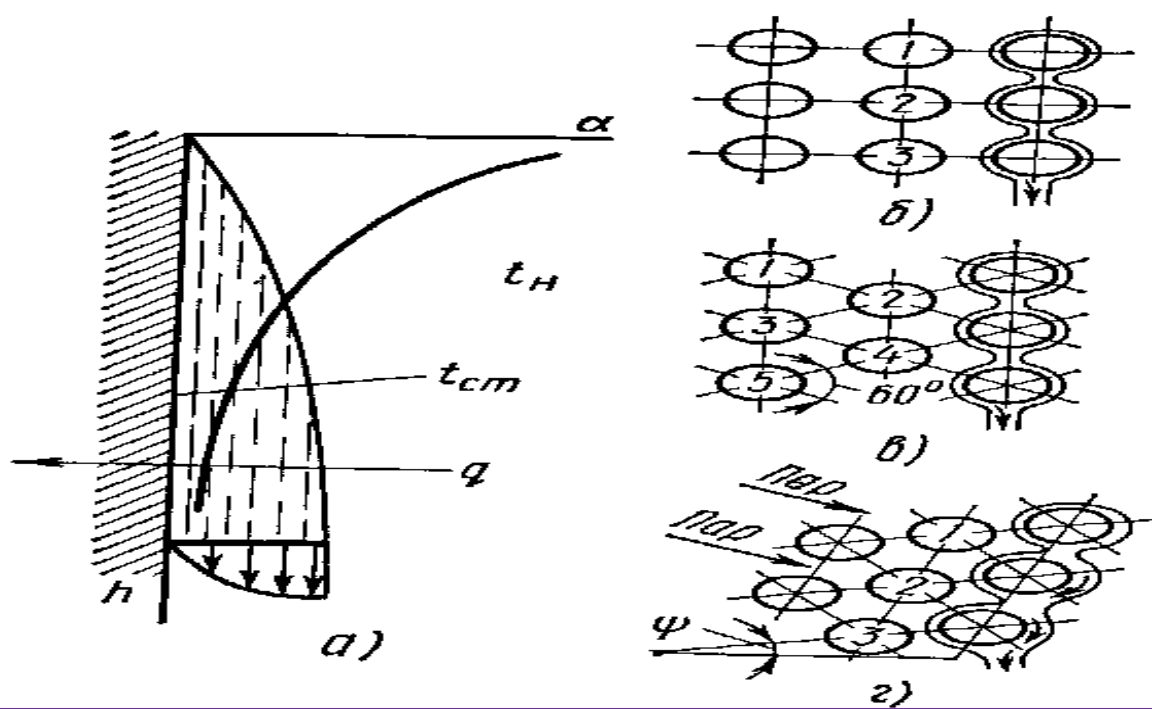
$$\alpha_k = 3,4 \cdot q^{0,7} p_s^{0,18} = 33,4 \Delta t^{2,33} p_s^{0,5} \quad (9.51)$$

bu yerda p_s – suv bug'ining to'yinish bosimi.

Kondensantga aylanayotgan bug', temperaturasi bug'ning to'yinish temperaturasidan past bo'lgan devorga tegib suyuqlikka aylanadi, hamda devorga yashirin kondensatsiya issiqligini beradi.

Kondensat qattiq jism sirtiga yaxlit plyonka va suyuqlikning alohida tomchilari ko'rinishida tushadi, ya'ni kondensatsiya plyonkali yoki tomchili bo'lishi mumkin. Ba'zida aralash kondensatsiya ham bo'ladi, bunda sirtning har xil qismlarida ham plyonkali, ham tomchili kondensatsiya kuzatiladi. Tomchili kondensatsiyada α_k katta bo'ladi, lekin u o'zgaruvchan bo'lishi tufayli kam kuzatiladi. Ko'p qatorli quvurlar to'plamida kondensat yuqori qatorlardan pastki qatorlarga oqib tushadi va natijada, plyonka qalinroq, α_k esa kichikroq bo'lib boradi (9.13-rasm).

Bu hodisani oldini olish uchun to'plamda quvurlarni joylashtirishning turli usullari ishlab chiqilgan. To'plamning o'zi φ burchakka burilgan, quvurlar esa, 60° burchak ostida rombsimon joylashganda α_k ning qiymati eng katta bo'ladi. Quvurlarning bunday joylashtirish sxemasiga Jinaba sxemasi deyiladi (9.13-rasm, g).



9.13-rasm. Bug'ning plenkali kondensatsiyasida issiqlik berish ko'effitsientining plastina balandligi bo'yicha o'zgarishi (a) va kondensatorda quvurlar joylanishining sxemalari:

b – yo'lakli, v – rombik, g – Jinaba sxemasi bo'yicha joylanishi.

Kondensatga aylanayotgan bug'ning issiqlik berishiga, uning tarkibidagi gaz katta ta'sir qiladi. Gazlar issiqlik almashinuv yuzalarida to'planib, issiqlik berish ko'effitsientini keskin kamaytirib (ularning issiqlik o'tkazuvchanligi kichikligi tufayli) yuboradi. Masalan, bug'ning tarkibida 1% havo bo'lsa, α_k taxminan 60% ga kamayadi. Shuning uchun issiqlik almashinuv apparatlarida, ikki fazali muhitdan gazlarni so'rib olish ko'zda tutilgan.

Turli xil suyuqliklar bilan olib borilgan tajriba natijalarini umumlashtirib, M.A. Mixeev, kondensatga aylanayotgan bug'ning issiqlik berishini hisoblash uchun quyidagi kriterial tenglamalarni taklif qildi:

$$Nu = 0,42 K_0^{0,28} (Pr_T / Pr_d)^{0,25}; \quad (9.52)$$

Gorizontal quvurlar uchun

$$Nu = 0,72 K_0^{0,25} (Pr_T / Pr_d)^{0,25}; \quad (9.53)$$

Bu yerda $K_0 = Ga \cdot Pr \cdot K$ – kondensatsiya kriteriyasi. Galiley (Ga) va Kutateladze (K) kriteriyalari mos ravishda quyidagiga teng:

$$Ga = gl^3 / \nu_T^2; \quad K = r / (c\Delta t),$$

bu yerda l – aniqlovchi o'lcham, vertikal sirtlar uchun balandlik h ga, gorizontal quvurlar uchun uning diametri d ga teng; c – suyuqlikning issiqlik sig'imi; r – bug' hosil qilish issiqligi; Δt – temperatura bosimi. $\Delta t = t_T - t_D$, t_T – to'yinish temperaturasi; ν – suyuqlikning kinematik qovushoqlik koeffitsienti. Aniqlovchi temperatura sifatida t_T – to'yingan bug' temperaturasi olinadi.

9.12. Alohida hollarda issiqlik berilishi

Gazlarning katta tezlik bilan harakatlanishida issiqlik berilishi, gaz turbinalari, raketalar va maxsus issiqlik almashinuv apparatlarini qurishda muhim ahamiyatga ega. Gazning tezligi ortishi bilan, chegara qatlamning qalinligi kamayadi, oqimning tezlik gradienti oshadi va ishqalanish ortadi. Ishqalanishda ajralib chiqqan issiqlik, gazning temperaturasini ko'tarishga sarflanadi va natijada gaz kengayadi. Buning natijasida gazning bosimi, zichligi, ancha o'zgaradi, bu esa, gazning siqilishini e'tiborga olish zarurligini bildiradi.

Ma'lumki, gazning siqiluvchanligi Max soni bilan aniqlanadi:

$$M = w/a, \quad (9.54)$$

Bu yerda w – gazning mahalliy tezligi; a – tovushning mahalliy tezligi.

Bu holni hisoblash uchun adiabatik oqim uchun energiya tenglamasidan foydalaniladi

$$(w_2^2 / 2) - (w_1^2 / 2) + w = h_2 - h_1 + q$$

Issiqlik balansi tenglamasi esa, quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Q = mc_p(T_{01} - T_{02}) \quad (9.55)$$

bu yerda T_{01} va T_{02} – oqimning 1 va 2 kesimlardagi tormozlanish temperaturasi.

Quyidagi formulalardan foydalanib:

$$h_1 + (w_1^2 / 2) = h_2 = h_0 \quad (9.56)$$

va

$$T_0 = T + \frac{k-1}{kR} \cdot \frac{w^2}{2} \quad \text{yoki} \quad T_0 = T + \frac{w^2}{2c_p} \quad (9.57)$$

tormozlanish temperaturasi T_0 va termodinamik temperature T orasidagi nisbatni aniqlaymiz:

$$T_0/T = 1 + w^2/(2cr T) = 1 + (k-1)/2M^2 \quad (9.58)$$

Bundan ko'rinib turibdiki, $M=1$ da $T_0=1,2T$; $M=3$ da $T_0=2,8T$; $M=5$ da $T_0=6T$ bo'ladi.

Gazning adiabatik oqishida uning kinetik energiyasining ortishi, faqat entalpiyaning kamayishi hisobiga bo'lishi sababli, gazning tezligi oshishi bilan, uning temperaturasi kamayadi. Lekin, bosim tushishi temperatura pasayishidan tezroq bo'ladi, shu sababli gazning zichligi tezlik ortishi bilan kamayadi. Buning natijasida gaz kengayadi va tezlik yanada ortadi. Ichki qarshilik kuchlari ta'sirida oqim tormozlanadi va uning sirdagi tezligi nolga teng bo'lib qoladi. Bunda mexanik energiya issiqlik energiyasiga aylanadi. Bu jarayonda gazning qo'shni qatlamlari o'rtasida issiqlik va mexanik energiya almashinib turiladi. Bu hol, qattiq jism izolyatsiyalangan bo'lib va jism bilan gaz o'rtasida issiqlik berish bo'lmasa ham ro'y beradi. Shuning uchun gazning bevosita sirtga yopishib turgan zarralari temperaturasi, sirtdan uzoqroqda joylashgan zarralar temperaturasidan yuqori bo'ladi. Lekin bu temperatura tormozlanish temperaturasiga teng bo'lmaydi. Issiqlik izolyatsiyalangan jismning temperaturasi ham xuddi shunday bo'ladi. Bu temperaturaga xususiy adiabatik yoki muvozanat temperaturasi deb aytiladi.

$$T_{xus} = T + r w^2/(2c_p) = T[1 + r(k-1)M^2/2]. \quad (9.59)$$

Issiqlik oqimining zichligi $M.V.$ Shirokov formulasidan aniqlanadi:

$$q = \alpha_k [T + r w^2/(2c_p) - T_d] = \alpha_k (t_{xus} - t_d) \quad (9.60)$$

bu yerda r – yuvilayotgan sirt shakliga, oqish usuliga, suyuqlikning fizik xossalari bog'liq bo'lgan tiklanish koeffitsienti.

(9.60) tenglamadan α_k ni aniqlash uchun, agar oqimning tezligi tovush tezligidan past bo'lsa, siqilmaydigan suyuqliklar uchun kriterial tenglamalardan foy-

dalanish mumkin. $M > 1$ bo'ladigan tezliklarda, oqimning parametrlari ham kanalning uzunligi bo'yicha, ham eni bo'yicha sezilarli o'zgaradi.

Shuning uchun α_k ning mahalliy qiymatlarini aniqlash zarur. Shu hol uchun kriterial tenglamaning umumiy ko'rinishi quyidagicha bo'ladi:

$$N_u = c Re^m Pr^n (T/T_0)^a \varepsilon_l \quad (9.61)$$

bu yerda T/T_0 gazning siqilishini hisobga oladi,

ε – quvur uzunligi bo'yicha issiqlik berishni hisobga oladigan tuzatish koeffitsienti,

a – tajribaga bog'liq koeffitsient.

9.13. Erigan metallarning issiqlik berishi

Erigan metallar o'zida gaz va suyuq issiqlik tashuvchilarning afzallik tomonlarini o'zida birlashtiradi. Ular past bosimlarda yuqori qaynash temperaturasiga ega bo'ladilar (gazlarga o'xshab) va issiqlik berish koeffitsientlari ham katta bo'ladi (suvga o'xshab). Metall issiqlik tashuvchilar orasida eng muvofiqlari natriy va kaliy hisoblanadi. Litiy, vismut va qalay kamroq qo'llaniladi. Suyuq metallarning zichligi va issiqlik o'tkazuvchanligi odatdagi issiqlik tashuvchilar-nikiga nisbatan ancha katta, c_p esa ancha kichik bo'lgani tufayli, issiqlik berishni hisoblashda oqish usulining deyarli ahamiyati qolmaydi. Suyuq metallarning quvurlarda oqishi eng katta amaliy ahamiyatga ega. Og'ir va ishqor hosil qiladigan metallar va ularning qotishmalari majburiy turbulent harakatida α_k ning o'rtacha qiymati quyidagi tenglamadan aniqlanadi.

$$\bar{N}_u = 4,5 + 0,014 (Re_m Pr_m)^{0,8} \varepsilon_l \quad (9.62)$$

Aniqlovchi parametrlar – erigan metalning o'rtacha temperaturasi t_m va quvur diametric d . Bu tenglama $Re_m = 10^4 \div 10^6$; $Pr_m = 4 \cdot 10^{-3} \div 3,2 \cdot 10^{-2}$ bo'lganda qo'llaniladi.

Tuzatish koeffitsienti ε_l ning qiymati $l/d > 0$ bo'lganda $\varepsilon_l = 1$ va $l/d < 30$ bo'lganda $\varepsilon_e = 1,72(d/l)^{0,16}$. Issiqlik oqimining yo'nalishini deyarli ahamiyati yo'q, shuning uchun $Pr_m/Pr_g = 1$. $Nu = f(Re, Pr)$ grafigining tahlili shuni ko'rsatadiki, laminar oqimdan turbulent oqimga o'tishda grafikda keskin o'zgarishlar bo'lmaydi.

Bunga sabab shuki, metallarning termik qarshiligi kichik (ya'ni issiqlik o'tkazuvchanlik yuqori), buning natijasida turbulentlik α_k ni biroz oshiradi xolos. Og'ir va ishqor hosil qiladigan metallar va ularning qotishmalari erkin harakatlenganda hisoblash ishlari uchun quyidagi kriterial tenglamadan foydalaniladi:

$$Nu_M = c G_M^m Pr_M^n \quad (9.63)$$

bu yerda $n=0,3+0,02/Pr_M^{0,33}$.

$Gr_m=10^2 \div 10^9$ bo'lganda (laminar oqish) $c=0,52$ va $m=0,25$; $Gr_m>10^9$ bo'lganda (turbulent oqish) $c=0,105$ va $m=0,33$.

Aniqlovchi parametr – chegara qatlamining o'rtacha temperaturasi $t_r=0,5(t_m+t_d)$; vertikal yassi devorlar uchun aniqlovchi o'lcham – balandlik, gorizontal quvurlar uchun – diametr.

Nazorat uchun savollar:

1. Nyuton - Rixman qonuni.
2. Issiqlik berish koeffitsenti.
3. Issiqlik berish koeffitsienti qanday kattaliklarga bog'liq?
4. Laminar oqimga ta'rif bering.
5. Turbulent oqim qachon paydo bo'ladi?
6. Reynolds soni nimani aniqlaydi?
7. Suyuqlikning qanday fizik xossalarini bilasiz?.
8. Konvektiv issiqlik almashinuvining differentsial tenglamasi.
9. O'xshashliklar nazariyasining mohiyati nimadan iborat?
10. Nusselt soni nimani aniqlaydi?
11. Pekle soni nimani tavsiflaydi?
12. O'xshashlik shartlarini keltiring.
13. O'xshash son va aniqlovchi sonning farqi nimadan iborat?
14. Modellastirishning ahamiyati nimadan iborat?

O'NINCHI BOB

NURLI ISSIQLIK ALMASHISH

10.1. Asosiy tushunchalar

Issiqlik texnikasining yuqori temperaturalar sohasida, nurli issiqlik almashish o'zining jadalligi bilan boshqa issiqlik almashinuv usullaridan ustun turadi. Shuning uchun yuqori temperaturalarda ishlaydigan agregatlarni yaratishda, nurli issiqlik almashishidan yuqori darajada foydalanishni e'tiborga olish lozim. Bu avvalo, qozon qurilmalariga, sanoat pechlariga taalluqlidir. Qurilish materiallari korxonalarida, tsement, ohak, shamot va boshqa materiallarni ishlab chiqarishda bunday pechlar keng qo'llanilmoqda. Issiqlik bir jismdan ikkinchisiga nur orqali uzatilish jarayoni nurli issiqlik almashinuvi deyiladi. Issiqlik nurlarining tarqalishi bu jism ichki energiyasining elektromagnit to'lqin energiyasiga aylanishidir. Temperaturasi absolyut noldan farqli bo'lgan hamma jismlar nur tarqatadi.

Nurlanish energiyasi asosan nur tarqatayotgan jismning fizik xossalari va temperaturasiga bog'liqdir. Elektromagnit to'lqinlar bir-biridan to'lqin uzunligi yoki tebranish chastotasi bilan farqlanadi. Agar to'lqin uzunligi λ , tebranish chastotasini N bilan belgilasak, u holda barcha nurlar uchun vakuumdagi tezlik $w = \lambda N = 3 \cdot 10^8$ m/s bo'ladi. Nur energiyasini tashuvchi zarra sifatida foton qabul qilingan. Foton (yunon $\rho\theta\sigma$ (rhotos) – yorug'lik) harakatlanayotgan vaqtda ma'lum massaga ega, tinch holatda uning massasi nolga teng bo'ladi. Nurlar orasida ko'zga ko'rinadigan ($\lambda = 0,4 \div 0,8$ mkm) va infraqizil ($\lambda = 0,8 \div 800$ mkm) nurlar ko'p miqdorda issiqlik energiyasini eltganligi sababli ular issiqlik nurlari deyiladi.

Ko'pchilik qattiq va suyuq jismlar 0 dan ∞ gacha oraliqda bo'lgan barcha to'lqin uzunligidagi energiyani chiqaradi, ya'ni bu jismlarning nurlanish spektrlari yaxlit (tutash) bo'ladi. Ba'zi jismlar uzlukli spektrli, ya'ni faqat muayyan to'lqin uzunliklar oralig'ida energiya nurlantiradi. Ularga qizdirilgan gazlar va bug'lar kiradi. Nur chiqarayotgan jismning faqat temperaturasi va optik xossalari bilan aniqlanadigan nurlanish issiqlik nurlanishi deyiladi. Jismga yutilgan issiqlik nurlari atom va molekulalarning tartibsiz issiqlik harakat energiyasiga aylanadi va jismning temperaturasini oshiradi. Issiqlik nurlanishini tavsiflaydigan asosiy kattal-

iklarga quyidagilar kiradi: nuriy oqim Q , nurlanish zichligi Y_e va nurlanish jadalligi (oqimning Spektral zichligi) J .

Vaqt birligi ichida, to'liq uzunligi λ dan $\lambda+d\lambda$ bo'lgan oraliqda mos bo'lgan nurlanish energiyasiga oqimning monoxromatik nurlanishi Q_λ deyiladi. Spektrning 0 dan ∞ gacha oraliqdagi to'liq uzunliklariga mos bo'lgan barcha nurlanishga integral yoki nuriy oqim Q deyiladi. Jismning yuza birligidan barcha yo'nalishlar bo'yicha nurlanayotgan nurli oqimga jismning integral nurlanish zichligi deyiladi.

$$E=dQ/dF \quad (10.1)$$

Nurlanayotgan jismning barcha yuzasi bo'yicha tarqalayotgan nurli oqim:

$$Q = \int_F E dF$$

To'liq uzunligining cheksiz kichik orlag'ida tarqalayotgan oqim zichligini, shu oraliq kattaligiga nisbati oqimning spektral zichligi (jadalligi) deyiladi:

$$J_\lambda = dE/d\lambda \quad (10.2)$$

Jism sirtiga tushgan barcha nuriy energiya Q ning bir qismi Q_A jismga yutiladi, bir qismi Q_R undan qaytadi, qolgan qismi Q_D esa, jism orqali o'tib ketadi, ya'ni

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D \quad (10.3)$$

Nurlanish energiyasini tarqatish, yutish, qaytarish va o'tkazish jarayonlarining yig'indisiga nurli issiqlik almashish deyiladi.

(10.3) tenglikning ikkala qismini nuriy energiyaning umumiy miqdori Q ga bo'lsak, quyidagini olamiz:

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = A + R + D = 1, \quad (10.4)$$

bu yerda $A = \frac{Q_A}{Q}, R = \frac{Q_R}{Q}, D = \frac{Q_D}{Q}$ - mos ravishda yutilish, qaytarish va o'tkazish xususiyatini tavsiflaydi (10.1-rasm).

(10.4) tenglik nurlanish energiyasi issiqlik balansining tenglamasi deyiladi.

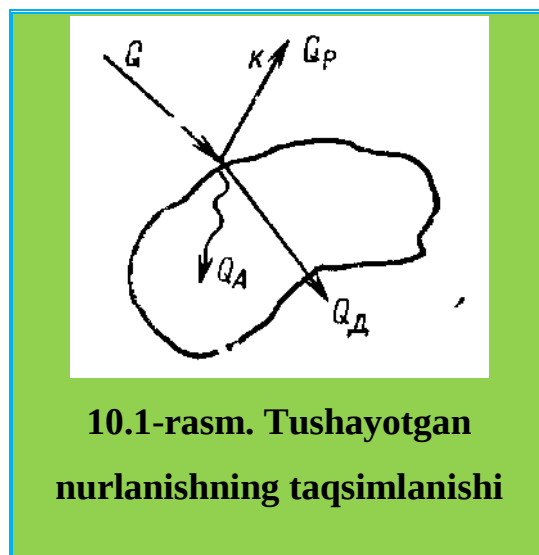
Agar $A=1$ bo'lsa, (ya'ni $R=D=0$), u holda jism o'ziga tushadigan barcha nurlanishni yutadi. Bunday jism absolyut qora jism deyiladi.

Agar $R=1$ bo'lsa, (ya'ni $A=D=0$), jism o'ziga tushgan barcha nuriy energiyani qaytaradi. Agar qaytarish geometrik optika

qonunlariga bo'ysunsa, u holda jismning sirti ko'zgu sirt deyiladi. Agar jismdan nur diffuzion qaytsa, (lot.diffusio–tarqalish, oqish), bunday jismga absolyut oq jism deyiladi.

Agar $D=1$ bo'lsa, (ya'ni $A=R=0$), u holda jism o'ziga tushayotgan nurlarning hammasini o'tkazib yuboradi va absolyut tiniq (shaffof), ya'ni diatermik jism deyiladi.

Tabiatda absolyut qora, oq va tiniq jismlar bo'lmaydi. Neft qurumi, qor va muz o'zining xossalari jihatidan absolyut qora jismga yaqin turadi. Ularning yutish koeffitsienti $A=0,9\div 0,96$. Metallarning silliqlangan sirti uchun $R=0,97$ ga teng. Bir va ikki atomli gazlarning hammasini diatermik ($D\approx 1$) jismlar deb hisoblash mumkin. Uch atomli va ko'p atomli gazlar, ularning aksincha issiqlik energiyasini yutadi va chiqaradi. Havo ham deyarli shaffof muhit hisoblanadi, lekin uning tarkibida suv bug'lari bo'lsa, uning shaffofligi keskin kamayadi. Real jismlar oz yoki ko'p darajada qora, ko'zgusimon va tiniq bo'ladi. Spektral yutish xususiyati tushayotgan nurlanishning to'lqin uzunligiga bog'liq bo'lmagan jismlar kul rang jismlar deyiladi. Barcha real jismlar uchun A , R va D koeffitsientlar doimo birdan kichik bo'ladi. Amalda, real jismlarni kul rang jismlar deb qabul qilish mumkin. Shuni nazarda tutish lozimki, issiqlik nurlarini qaytarish va yutishda sirtning rangi emas, balki sirtning holati katta ahamiyatga ega. Masalan, oq sirt faqat yorug'lik nurlarini yaxshi qaytaradi, ko'rinmas issiqlik nurlarini esa, qora sirtga o'xshab yaxshi yutadi.



10.2. Issiqlik nurlanishning asosiy qonunlari

Plank qonuni. Absolyut qora jismlar absolyut noldan yuqori temperaturada o'zidan fazoga barcha to'lqin uzunlikdagi nurlarni tarqatib turadi. Bir xil temperaturada absolyut qora jismlarning nurlanish jadalligi boshqa real jismlarnikiga qaraganda yuqori bo'ladi. Nurlanish jadalligi $J_{\lambda,0}$ ni to'lqin uzunligi λ va temperatura T ga bog'liqligi Plank qonuni bilan belgilanadi:

$$J_{\lambda,0} = \frac{C_1}{\lambda^5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (10.5)$$

bu yerda $C_1=0,374 \cdot 10^{-15} \text{ Vt} \cdot \text{m}^2$; $C_2=1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ – Plank doimiylari;
 e – natural logarifm asosi.

Nurlanish jadalligini to'lqin uzunligi va temperatura bo'yicha Plank qonuniga asosan taqsimlanishi 10.2-rasmda tasvirlangan.

Vin qonuni. 10.2-rasmdan ko'rinib turibdiki, jismning temperaturasi o'rtirilsa, uning nur tarqatish jadalligining maksimumi qisqa to'lqin tomonga siljiydi. Bu qonuniyatni V. Vin 1893 yili taklif etgan va uning matematik ifodasini bergan:

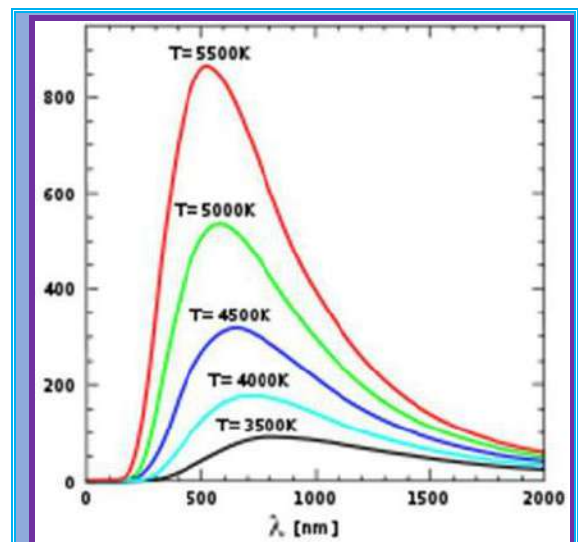
$$\lambda_{\max} = 0,0028989/T$$

yoki

$$T\lambda_{\max} = \nu = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \quad (10.6)$$

Bu V.Vinning siljish qonuni deyiladi.

Siljish qonuniga muvofiq jismlar nur ko'rinishida tarqatadigan elektromagnit to'lqinlarning jadalligi har xil temperaturada turlicha bo'ladi. Masalan, elektr isitkichning temperaturasi $T=1100 \text{ K}$ bo'lganda, u $\lambda_{\max}=3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ bo'lgan to'lqin uzunlikdagi nurni tarqatadi, uning spektri asosan infraqizil nurdan iborat bo'ladi. Quyosh ($T=5500 \text{ K}$) nuri to'lqin spektrini olsak, undagi to'lqin uzunlik $\lambda_{\max}=5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$



10.2-rasm. Absolyut qora jismning nurlanish jadalligini to'lqin uzunligi va temperaturaga bog'liqligi

⁷m ga to'g'ri keladi. Bu to'lqin uzunlik spektrning ko'zga ko'rinadigan qismiga to'g'ri keladi.

Stefan-Boltsman qonuni. Tajriba natijalari asosida I. Stefan (1879 yili) quyidagi qonuniyatni aniqladi: absolyut qora jismning nurlanish xususiyati uning absolyut temperaturasining to'rtinchi darajasiga to'g'ri proporsional bo'ladi. Bu qonuniyatni 1884 yili A. Boltsman nazariy jihatdan isbotlab bergan.

$$E_0 = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} J_{\lambda_0} d\lambda = C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4, \quad (10.7)$$

bunda C_0 – absolyut qora jismning nurlanish koeffitsienti. [$C_0=5,67\text{Vt}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$]; T – jism sirtining temperaturasi, K.

Bu qonunni yana quyidagi ko'rinishlarda ham yozish mumkin:

$$E_0=G_0T^4, \quad (10.8)$$

Kul rang jismlar uchun:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4 = C \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (10.9)$$

bu yerda $G_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{Vt}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ – Stefan doimiysi; C – kul rang jismning nurlanishi; $\varepsilon=E/E_0$ – kul rang jismning qoralik darajasi.

Kirxgof qonuni. Absolyut qora va kulrang jismlarning issiqlik nurlarini yutish va tarqatish hossalari orasidagi bog'lanishni G. Kirxgof 1882 yili o'rganib, quyidagi qonuniyatni ochgan:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots \frac{E_0}{A_0} = E_0(T), \quad (10.10)$$

bu yerda $E_0(T)$ – absolyut qora jismning nurlanish xususiyati.

Jismning nur chiqarish (nurlanish) xususiyatining yutish xususiyatiga nisbati jismning tabiatiga bog'liq emas va bir xil temperaturadagi barcha jismlar uchun bir xil bo'lib, shu temperaturadagi absolyut qora jismning nurlanish xususiyatiga teng. (10.10) tenglamadan ko'rinib turibdiki, kul rang jismning yutilish koeffitsienti qanchalik katta bo'lsa, u shunchalik ko'p nurlanadi. Yutilish koeffitsienti birdan

kichik ($0 < A < 1$) bo'lgani sababli, bir xil temperaturada kul rang jismning nurlanish xususiyati E , absolyut qora jismning nurlanish xususiyatidan kichik bo'ladi.

Kirxgof qonunidan, (10.10) va (10.9) tenglamalardan ko'rinib turibdiki, kul rang jismning qoralik darajasi son jihatdan uning yutish xususiyatiga teng:

$$A = \varepsilon \quad (10.11)$$

ε kattalik o'zgarmas bo'lgani uchun, kul rang jismning yutish xususiyati to'lqin uzunligiga va temperaturaga bog'liq emas.

10.6-jadvalda ba'zi kul rang jismlarning qoralik darajasi keltirilgan.

Lambert qonuni Jism sochayotgan nurlanish energiyasi fazoda har xil jadallik bilan tarqaladi. Nurlanish jadalligini yo'nalishga bog'liqligini belgilaydigan qonunga Lambert qonuni deb aytiladi.

Lambert qonuniga asosan, absolyut qora jism sirtidan turli yo'nalishlar bo'yicha nurlanayotgan energiya miqdori, berilgan yo'nalish va jism sirtiga tushirilgan normal o'rtasidagi burchakning kosinusiga proporsionaldir.

$$E_{\varphi} = E_n \cos \varphi, \quad (10.12)$$

Bu yerda E_n – normal bo'yicha nurlanish energiyasi.

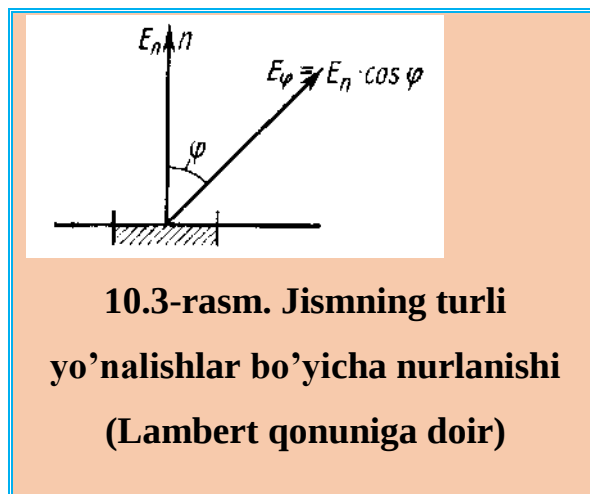
Turli materiallarning qoralik darajasi.

10.6-jadval

Material	t, °S	ε	Material	t, °S	ε
Alyuminiy (silliqlangan)	50-500	0,04-0,06	Yog'och	20-70	0,8-0,9
Bronza	50	0,1	Qog'oz	20-100	0,9
Oltin (silliqlangan)	200-600	0,02-0,03	Shisha	20-100	0,9-0,92
Qizil g'isht	25-300	0,9	Moyli bo'yoq	20-100	0,86-0,92
Gips	20	0,9	Lak	20-100	0,8-0,95
Asbest	20-300	0,9-0,95	Oq emal	20	0,9

Demak, nurlanish sirtiga perpendikulyar bo'lgan yo'nalishda energiya eng ko'p nurlanadi, ya'ni $\varphi=0$ da. φ burchak o'rtishi bilan nurlanish energiyasi kamayadi va $\varphi=90^\circ$ da nolga teng bo'ladi (10.3-rasm).

Lambert qonuni absolyut qora jism uchun to'g'ri bo'lib, g'adir-budur kul rang jismlar uchun bu qonun faqat $\varphi=0\div 60^\circ$ da to'g'ridir.



10.3. Qattiq jismlar orasida nurli issiqlik amashinuvi.

Parallel sirtlar. Ma'lumki, barcha jismlar absolyut noldan yuqori temperaturada o'zidan fazoga elektromagnit to'lqinlarni tarqatib turadi. Shuning uchun jismning to'liq nurlanish energiyasini hisoblashda jismning o'zini nurlanish energiyasini (E_1) ham hisobga olish kerak.

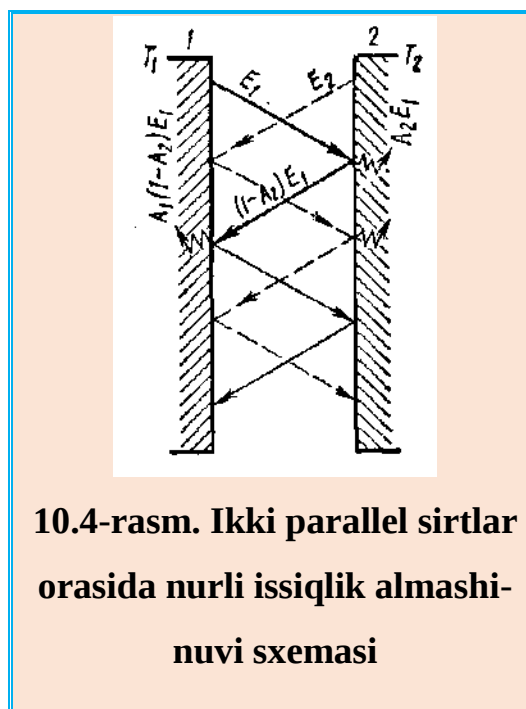
Agar boshqa jismlar tomonidan shu jismga energiyasi E_2 bo'lgan nurlanish tushsa, shundan $A_1 E_2$ energiya yutiladi, $(1-A_1) \cdot E_2$ energiya qaytadi, u holda ($D=0$)

$$E_{\text{efl}} = E_1 - A_1 E_2 = E_1 + (1-A_1) E_2 - E_1 + R_1 E_2 \quad (10.13)$$

E_{efl} kattalikni jismning effektiv nurlanishi deyiladi. Ikki parallel sirtlar misolida qattiq jismlar orasidagi issiqlik almashinuvini ko'rib chiqaylik (10.4-rasm).

Bu sirtlarning temperaturalarini mos ravishda T_1 va T_2 ($T_1 > T_2$) va yutilish koeffitsientlari A_1 va A_2 bo'lsin.

Sirtlar orasidagi masofani shunday tanlaymizki, natijada har bir sirtning nurlanishi narigisiga yetib borsin. Bu sirtlar orasidagi nurli issiqlik almashinuvi kattaligi



quyidagiga teng:

$$E = E_{ef1} - E_{ef2},$$

Bunda
$$E_{ef1} = E_1 + (1 - A_1)E_{ef2},$$

$$E_{ef2} = E_2 + (1 - A_2)E_{ef1}.$$

Bu tenglamalar tizimini E_{ef1} va E_{ef2} ga nisbatan yechib, E_1 va E_2 o'rniga Stefan – Boltsman qonunidan ularning ifodasini va A_1 hamda A_2 o'rniga mos ravishda ε_1 va ε_2 larni (chunki $A = \varepsilon$) qo'yamiz. O'zgartirishlardan so'ng quyidagi tenglikni hosil qilamiz:

$$Q = EF = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1} Co \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F \quad (10.14)$$

bu yerda $\theta = \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4$ - temperatura ko'paytiruvchisi deyiladi;

$E_k = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1}$ - jismlar tizimining keltirilgan qoralik darajasi deyiladi;

$$C_k = C_o C_k = \frac{1}{1/C_o \varepsilon_1 + 1/C_o \varepsilon_2 - 1/C_o} = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2 + C_o} = \frac{Q}{\theta F \tau}$$

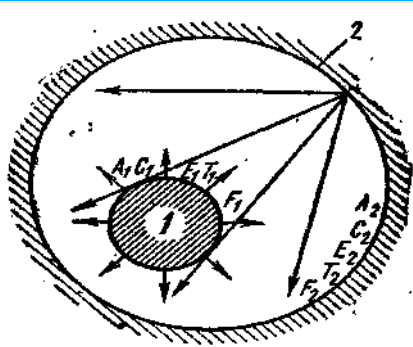
keltirilgan nurlanish koeffitsienti deyiladi.

Keltirilgan nurlanish koeffitsienti, agar temperatura ko'paytiruvchisi 1 K va har bir sirtning yuzasi $1m^2$ bo'lsa, 1-sirtidan 2-sirtga 1 s da uzatilayotgan nurlanish energiyasini bildiradi. Demak, (10.14) formulani quyidagicha yozish mumkin:

$$Q = \varepsilon_k C_o \theta F = C_k \theta F [Vt] \quad (10.15)$$

Shunday qilib, nurli issiqlik almashinuvini jadalligini orttirish uchun ε_k va θ ni ya'ni issiqlik almashinuvida ishtirok etayotgan sirtlarning qoralik darajasini va temperaturalar farqini orttirish lozim.

Jism va uning qobig'i orasidagi nurli issiqlik almashinuvi. Texnikada, bir jism ikkinchi jism ichida joylashgan holdagi nurli issiqlik almashishini hisoblash kabi masalalar ko'p uchraydi (10.5-rasm).



10.5-rasm. Yopiq joyda jismlar orasidagi nurli issiqlik almashish sxemasi

Ichki jism kattaliklarini $A_1, C_1, \varepsilon_1, T_1, F_1$ va tashqi jism kattaliklarini $A_2, C_2, \varepsilon_2, T_2, F_2$ orqali belgilaymiz. Parallel sirtlar o'rtasidagi issiqlik almashinuvidan farqli ravishda ichki jismga tashqi jism nurlanishidan faqat ϕ qismi tushadi xolos, energiyaning qolgan qismi $(1-\phi)$ tashqi jismning sirtiga tushadi.

Ichki jismning effektiv nurlanishi o'zining nurlanishidan va tashqi jismdan tushgan nurlanishdan

(buni ichki jism qaytaradi) tashkil topadi.

$$E_{1ef} = E_1 F_1 + (1 - A_1) \phi E_{2ef}, \quad (10.16)$$

Tashqi jismning effektiv nurlanishi o'zining nurlanishidan, ichki jismdan qaytgan va o'zining nurlanishidan qaytgan energiyalardan tashkil topadi.

$$E_{2ef} = E_2 F_2 + (1 - A_2) E_{1ef} + (1 - A_2)(1 - \phi) E_{2ef} \quad (10.17)$$

Jismlar o'rtasidagi issiqlik almashinuvi kattaligi quyidagiga teng:

$$\phi = E_{1ef} - E_{2ef} \quad (10.18)$$

(10.16) va (10.17) tenglamalarni birgalikda yechib va E_{1ef} va E_{2ef} ni oxirgi tenglamaga qo'yib, quyidagini hosil qilamiz:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1 \quad (10.19)$$

$$C_k = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C_0} \right)} \text{ deb belgilaymiz.}$$

U holda jism va uning qobig'i o'rtasidagi nurli issiqlik almashishi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$Q = C_k F_1 \left[\left(T_1 / 100 \right)^4 - \left(T_2 / 100 \right)^4 \right] \quad (10.20)$$

Agar C_k o'rniga jismlar tizimining keltirilgan qoralik darajasini qo'ysak, u holda (10.20) tenglamani quyidagicha yozish mumkin:

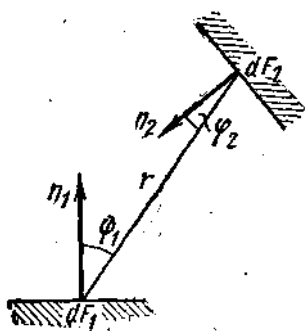
$$Q = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (10.21)$$

Agar $F_1 \ll F_2$ bo'lsa, u holda $F_1/F_2 \approx 0$ bo'ladi va $C_k = C_1$ bo'lib, issiqlik almashinuv tenglamasi quyidagi ko'rinishga keladi:

$$Q = C_1 F_1 \left[\left(T_1 / 100 \right)^4 - \left(T_2 / 100 \right)^4 \right] \quad (10.22)$$

Ixtiyoriy joylashgan jismlar Ixtiyoriy joylashgan jismlar uchun nurli issiqlik almashinuv tenglamasini keltirib chiqarish juda qiyin bo'lib, bu masala faqat ba'zi sodda hollar uchun o'z yechimini topgan (10.6-rasm). Ikkita ixtiyoriy joylashgan jismlar uchun nurli issiqlik almashishni quyidagi formuladan hisoblash mumkin:

$$Q = \frac{C_1 C_2}{C_0} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi^2} dF_2,$$



10.6-rasm.

bunda $\frac{C_1 C_2}{C_0}$ – shu jismlar tizimining keltirilgan nurlanish

koeffitsienti; $\int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2}{\pi^2} dF_2$ – nurlanishning burchak koeffitsienti.

Bu kattalik nurlanayotgan jismlarning o'lchamiga, shakliga va o'zaro joylashishiga bog'liqdir. Burchak koeffitsientni matematik hisoblash sodda hollar uchun ham qiyin bo'lib, uni asosan grafik usulda aniqlanadi. Texnik masalalarni yechishda, burchak koeffitsienti odatda jadvaldan olinadi.

10.4. Ekranlar

Texnikaning turli sohalarida nurli issiqlik almashinuv jadalligini kamaytirish lozim bo'ladi. Masalan, temperaturasi yuqori bo'lgan tsexlarda ishchilarni issiqlik nurlaridan himoya qilish kerak bo'ladi. Shuning uchun nur energiyasini ka-

maytirish maqsadida turli xil geometrik shakldagi to'siqlar (ekranlar) qo'yiladi. Bu bilan issiqlik texnikasi asbob-uskunolari himoyalanaadi va ularning yaxshi holda uzoq muddat ishlashi ta'minlanadi. Odatda, ekranlar qaytarish xususiyati yuqori bo'lgan yupqa metall tunukadan tayyorlanadi. Ikki parallel sirtlar o'rtasida joylashgan ekranni issiqlik uzatishga ta'sirini ko'rib chiqaylik. Sirtlar va ekran yuzalarini bir xil deb hisoblaymiz, sirtlar temperaturasi T_1 va T_2 o'zgarmas bo'lib, $T_1 > T_2$ bo'lsin. Sirtlar va ekranning nurlanish koeffitsientlarini ham bir-biriga teng deb olaylik.

U holda, ekransiz sirtlar orasidagi, birinchi sirt va va ekran orasidagi hamda ekran va ikkinchi sirt orasidagi keltirilgan nurlanish koeffitsientlari bir xil bo'ladi. Birinchi sirt dan ikkinchi sirtga uzatilayotgan issiqlik oqimini (ekransiz) quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$q_0 = C_k [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4]$$

Birinchi sirt dan ekranga uzatilayotgan issiqlik oqimini quyidagi formuladan topamiz:

$$q_1 = C_k [(T_1 / 100)^4 - (T_{ek} / 100)^4]$$

Ekrandan ikkinchi sirtga uzatilayotgan issiqlik oqimini esa, quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$q_2 = C_k [(T_{\text{эк}} / 100)^4 - (T_2 / 100)^4]$$

Issiqlik almashinuvi turg'un, ya'ni sirtlar temperaturalarini o'zgarmas bo'lganda $q_1 = q_2$ bo'ladi. Shuning uchun:

$$C_k [(T_1 / 100)^4 - (T_{ek} / 100)^4] = C_k [(T_{ek} / 100)^4 - (T_2 / 100)^4],$$

Bundan

$$(T_{\text{эк}} / 100)^4 = \frac{1}{2} [(T_1 / 100)^4 + (T_2 / 100)^4]$$

Ekran temperaturasi ifodasini yuqoridagi tenglamalarga qo'yib, birinchi sirt dan ikkinchi sirtga ekran orqali o'tgan issiqlik oqimini aniqlaymiz:

$$q_{1-2} = \frac{1}{2} C_k [(T_1 / 100)^4 - (T_2 / 100)^4]$$

Birinchi va oxirgi tenglamalarni taqqoslab, sirtlar o'rtasida ekran bo'lganda issiqlik almashinuvi ikki marta kamroq bo'lishini aniqlaymiz:

$$q_{1-2} = \frac{1}{2} q_0 \quad (10.23)$$

Ekranlar sonini orttirish usuli bilan nur issiqligi almashinuvini bir necha o'n martalab kamaytirish mumkin. Nur issiqlik almashinuvi ekran materialiga va uning sirtining holatiga bog'liq. Masalan, oksidlangan temir tunukasi ekran sifatida qo'llanilsa, bu ekran nur issiqligi miqdorini 13 marta, shunday tunukadan uchasi qo'yilsa, 39 marta kamaytiradi.

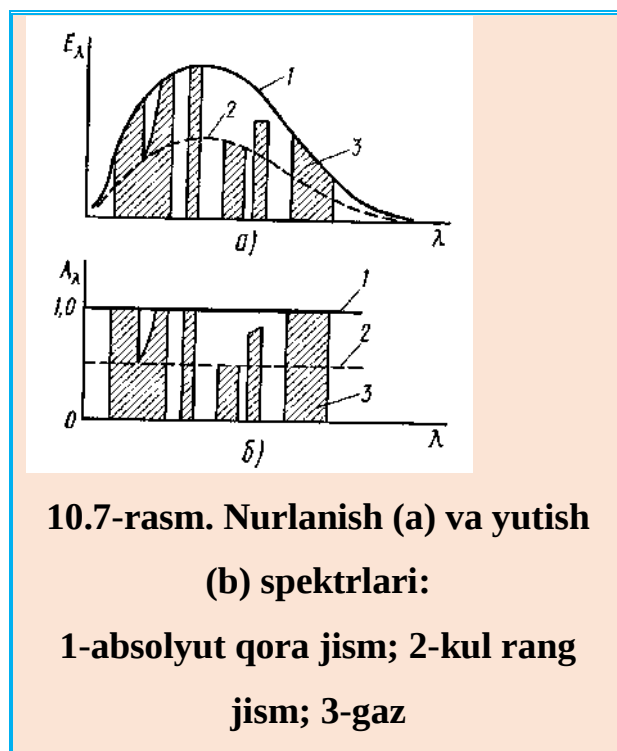
10.5. Gazlarning nurlanishi

Gazlarning nurlanishi qattiq jismlarning nurlanishidan keskin farq qiladi. Bir va ikki atomli gazlarning (vodorod, kislorod, azot, geliy va boshqalar) nur chiqarish va yutish xususiyatlari nihoyatda kichik. Ular issiqlik nurlari uchun shaffof hisoblanadilar. Uch va ko'p atomli gazlarning (CO_2 , H_2O va boshqalar) nurlanish va nur yutish xususiyatlari yuqori bo'lib, bundan amalda foydalaniladi.

Gazlarning aksariyati ma'lum to'lqin uzunlikdagi nurlarni chiqaradi va yutadi, ya'ni ular nur chiqarish-yutishda tanlash xususiyatiga egadirlar (10.7-rasm).

Bunga asosiy sabab shuki, gazlarda nur chiqarish va yutish erkin molekular tomonidan amalga oshiriladi. Qattiq jismlarda esa, bu jarayon nihoyatda ko'p bog'langan molekular tomonidan amalga oshiriladi.

Erkin molekulalardagi elektronlarning energiya sathi har bir modda uchun ma'lum bir qiymatga ega bo'ladi. Shuning uchun elektronlar bir sathdan boshqasiga o'tganda, ma'lum bir energiyali fotonni yutadi yoki tarqatadi. Qattiq jismlarda esa elektronlar qo'shni atomlarning ta'sir kuchlari ostida



bo'ladi. Shu sababli, nur chiqarish va yutishda ma'lum bir energiyali elektronlar emas, balki barcha imkoniyati borlari ishtirok etadi.

Gazlarda nurli issiqlik almashinuvining boshqa xususiyatlaridan biri shundan iboratki, nur chiqarish va yutish jarayonida gazning barcha mikrozarralari ishtirok etadi. Ma'lumki, qattiq jismlarda esa, aniq bir sirt ishtirok etadi. Bu xususiyat esa, gazlardagi issiqlik almashinuvini hisoblashni murakkablashtirib yuboradi. Gaz tarqatayotgan yoki yutayotgan energiya miqdori gazning temperaturasiga, gaz qatlami qalinligiga va molekulalarning kontsentratsiyasiga bog'liq. Molekulalarning kontsentratsiyasi gazning partsial bosimi P bilan, gaz qatlamining qalinligi esa nurning o'rtacha uzunligi l bilan belgilanadi. Gaz nurlanishining integral yutish xususiyati A_λ va spektral jadalligi E_λ gaz temperaturasining T va pl ko'paytmaning funktsiyasi sifatida aniqlanadi.

$$\left. \begin{aligned} A_\lambda &= f(T, pl); \\ E_\lambda &= \varphi(T, pl). \end{aligned} \right\} \quad (10.24)$$

Tajribadan, gazlarning nurlanish xususiyati absolyut temperaturaning n -darajasiga proporsional ekanligi aniqlangan. Karbonat angidrid uchun $n=3,5$, suv bug'i uchun $n=3$ ga teng. Taxminiy hisoblashda gazlarning nurlanishi temperaturaning to'rtinchi darajasiga proporsional deb hisoblanadi.

Temperaturasi T_Γ bo'lgan gaz bilan, uni o'rab turgan T_m temperaturali muhit o'rtasidagi issiqlik almashinuvi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$Q = C_0 \varepsilon_{\phi} \left[\varepsilon_\Gamma \left(\frac{T_\Gamma}{100} \right)^4 - A_\Gamma \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] F_M, \quad (10.25)$$

bunda ε_{ef} – muhitning effektiv qoralik darajasi; ε_Γ va A_Γ – mos ravishda gazning T_Γ temperaturadagi qoralik darajasi va uning T_m temperaturadagi yutish xususiyati; F_m – issiqlik almashinuv yuzasi.

ε_{ef} ni taxminan quyidagi formula bo'yicha hisoblash mumkin:

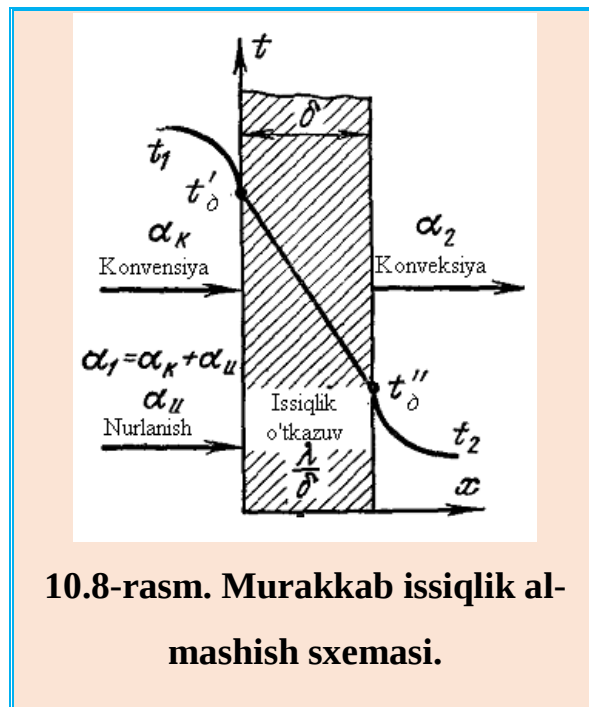
$$\varepsilon_{ef} = \frac{\varepsilon_g + 1}{2},$$

bunda ε_Γ – devorning qoralik darajasi ($\varepsilon_\Gamma = 0,7 \div 0,9$). ε_Γ va A_Γ ning qiymatlari maxsus adabiyotlardagi nomogrammalardan aniqlanadi.

10.6. Murakkab issiqlik almashish jarayonlari

Issiqlikning temperaturasi yuqori bo'lgan jismdan temperaturasi past bo'lgan jisimga qattiq devor orqali uzatilishi texnikada eng muhim va ko'p foydalalniladigan jarayonlardan biridir.

Bunday issiqlik uzatishda barcha issiqlik almashinuv usullari – issiqlik o'tkazuvchanlik, konveksiya va nurlanish baravar ishtirok etadilar. Barcha issiqlik almashinuv usullarini hisobga oladigan issiqlik almashinuvga murakkab issiqlik almashish deyiladi (10.8-rasm).



Murakkab issiqlik almashishda uzatilgan issiqlik miqdori q_1 konvektiv issiqlik almashinuvda uzatilgan issiqlik miqdori q_k va nurli issiqlik almashinuvda uzatilgan issiqlik miqdori q_n larning yig'indisiga teng.

$$q = q_k + q_n = \alpha_k(T - T_g) + \alpha_n(T - T_g) = \alpha(T - T_g), \quad (10.26)$$

bu yerda $\alpha = \alpha_k + \alpha_n$; α_n – nurli issiqlik almashinuv koeffitsienti; α – effektiv issiqlik berish koeffitsienti;

α_n koeffitsient quyidagi tenglikdan aniqlanadi:

$$\alpha_n = \frac{q_n}{T - T_g} = \frac{C_k[(T/100)^4 - (T_g/100)^4]}{T - T_g}, \quad (10.27)$$

bu yerda T – suyuqlik yoki gaz temperaturasi; T_g – devor temperaturasi; C_k – keltirilgan nurlanish koeffitsienti.

Tekshirilayotgan hol uchun (10.8-rasm), issiqlik uzatish koeffitsienti quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{k1} + \alpha_{n1}} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_{k2} + \alpha_{n2}}} \quad (10.28)$$

Yuqorida aytib o'tilganlardan ko'rinib turibdiki, α nihoyatda murakkab kattalik bo'lib, u turli omillarga bog'liq bo'ladi. Ayniqsa, α ga temperaturaning ta'siri katta bo'ladi. Masalan, jism bilan havoning tabiiy konveksiyasida: $t_g=0^\circ\text{S}$; $\text{Gr}\cdot\text{Pr}=10^8\div 10^{12}$; $C_k=4,7 \text{ Vt}/(\text{m}^2\cdot\text{K}^4)$; bo'lganda, agar $t=150^\circ\text{S}$ bo'lsa. $\alpha_n=\alpha_k=8,3 \text{ Vt}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$; $t=500^\circ\text{S}$ bo'lsa $\alpha_n\approx 4\alpha_k$; $t=1000^\circ\text{S}$ bo'lsa $\alpha_n\approx 20\cdot\alpha_k$ bo'ladi.

Ba'zi hollarda qattiq jism bilan atrof muhit o'rtasida issiqlik almashinuvi faqat bir usulda amalga oshadi. Masalan, qattiq jism bilan tomchi suyuqlik issiqlik almashishsa nurlanish bo'lmaydi, chunki tomchi suyuqliklar nurni deyarli o'tkazmaydi va bu hol uchun $\alpha\approx\alpha_k$. Agar jismlar o'rtasida issiqlik almashinuvi chuqur vakuum sharoitida ro'y bersa, u holda konveksiya issiqlik almashishga deyarli ta'sir etmaydi va $\alpha\approx\alpha_n$ bo'ladi. Sof holda nurli issiqlik almashish to'liq vakuumda ro'y beradi.

Nazorat uchun savollar:

1. Nurlanishga ta'rif bering.
2. Nurlanish energiyasi qanday aniqlanadi?
3. Absolyut qora jism deb nimaga aytiladi?
4. Absolyut oq jism.
5. Plank qonunini ta'riflang.
6. Vin qonuni.
7. Stefan – Boltsman qonuni.
8. Nurlanish koeffitsienti.
9. Kirxgof qonuni.
10. Lambert qonuni.
11. Kul rang jism deb qanday jismga aytiladi?
12. Parallel sirtlar orasida nurli issiqlik almashinuvi qanday kattaliklarga bog'liq?
13. Effektiv nurlanish.
14. Ekranlar qachon qo'llaniladi?
15. Gazlarning nurlanishi.

16. Murakkab issiqlik almashinuvi deb nimaga aytiladi?

17. Issiqlik uzatish koeffitsienti.



O'N BIRINCHI BOB

ISSIQLIK ALMASHINUV APPARATLARI

11.1. Issiqlik almashinuv apparatlari xaqida umumiy ma'lumotlar.

Issiqlik tashuvchini qizdirish yoki sovitish uchun mo'ljalangan qurilma is-siqlik almashinuv apparati (IAA) deyiladi. Issiqlik tashuvchi sifatida suyuqlik yoki gaz ishlatiladi. Issiqlik tashuvchilar isituvchi va isitiladigan tashuvchilarga bo'linadi. Masalan, qozon ichida qizigan gaz isituvchi issiqlik tashuvchi, qozondagi suv esa isitiladigan issiqlik tashuvchi hisoblanadi. Isitish radiatoridagi suv isituvchi issiqlik tashuvi, xonaga issiqlikni tarkatadigan havo esa, isitiladigan issiqlik tashuvchi hisoblanadi.

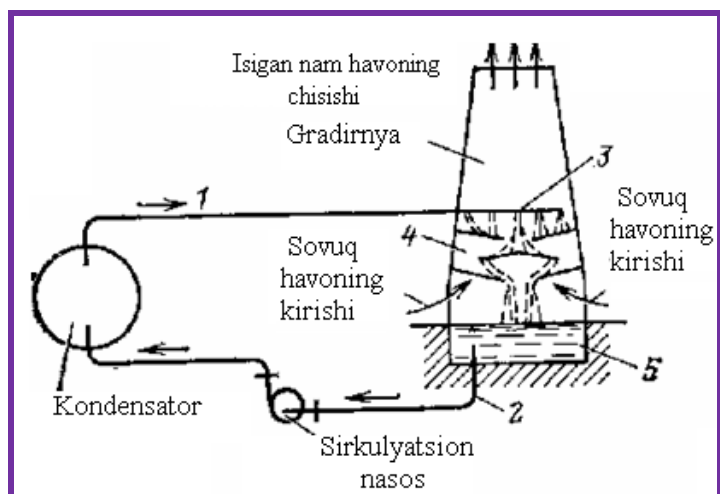
IAA lariga bug' qozonlari, kondensatorlar, bug' qizdirgichlar, havo isitkichlar, markaziy isitish asboblari, radiatorlar va shu kabilar misol bo'la oladi.

IAA lari o'zining shakli va o'lchamlari bilan hamda ishlatilayotgan ishchi jismi bilan bir – biridan katta farq kiladi. IAA lari xilma xil bo'lsada, issiqlik hisobining asosiy qoidalari ular uchun umumiy bo'lib qoladi. IAA lari texnikada nixoyatda keng tarqalgan, hozirgi vaqtda ularning aniq bir tasnifi yo'q. Quyida keltirilgan tasnif eng ko'p qo'llanilayotgan IAA lariga ta'luqlidir. IAA larini quyidagi belgilariga qarab tasniflash mumkin.

11.2. Issiqlik almashinuv usullari

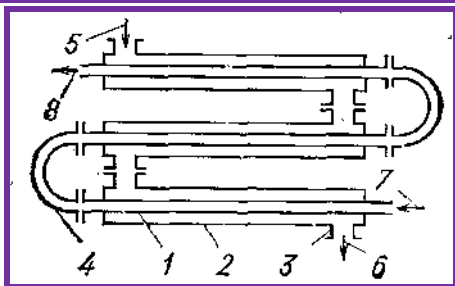
Aralashtirgichli bunday IAA larida issiq va sovuq issiqlik tashuvchi bir – biriga bevosita tegadi va keyin aralashib ketadilar. Masalan, qozon agregatidan chiqadigan yuqori temperaturali bug' yo suv sovuq yoki iliq suv bilan aralashtiri-ladi, so'ngra iste'molchilarga uzatiladi. Bunday IAA lariga gradirnyalar, deaerator-lar, skrubberlar va boshqa qurilmalar kiradi.

Gradirnyada (11.1-rasm) minoradan yomg'irdek tushayotgan suv havo bilan aralashadi va natijada suv soviydi, havo esa isib yuqoriga ko'tariladi.



11.1- rasm.

1- suvni keltirilishi; 2-suvni olib ketilishi; 3- taqsimlash tarnovi; 4- sug'orish qurilmasi; 5- basseyn.



11.2- rasm

1- ichki quvur; 2- tashqi quvur; 3- ulash patrulkasi; 4- egilgan joy; 5-6 - birinchi issiqlik tashuvchining kirishi va chiqishi; 7- 8 ikkinchi issiqlik tashuvchini kirishi va chiqishi

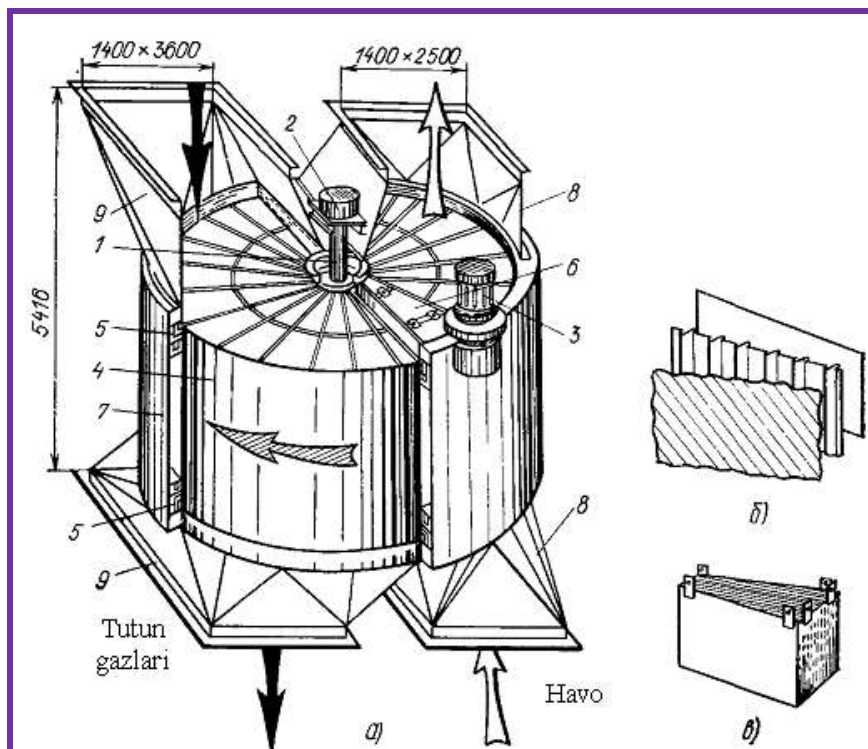
Rekuperativli . Bunday IAA larida issiqlik ajratuvchi devor (odatda metall) orqali uzatiladi. Bunday apparatlarga bug' generatorlari, bug' qizdirgichlari suv isitkichlari, havo isitkichlari va turli xil bug'latgich apparatlari kiradi.

Hozirgi paytda rekuperativ apparatlar eng ko'p tarqalgan. Ular tuzilishi juda sodda, ixcham va issiqlik tashuvchilarning tem-

peraturasini har doim o'zgarmasligini ta'minlaydi.

Rekuperativ apparatlar asosan metaldan ishlangan. Temperaturasi 400-450⁰S bo'ladigan issiqlik tashuvchilar uchun esa quvurlar uglerodli po'latdan, temperaturasi 500-700⁰S bo'ladigan issiqlik tashuvchilar uchun esa legirlangan po'latdan tayyorlanadi.

Regenerativli. Bunday IAA larida isitish (yoki sovutish) sirtining uzi vaqt – vaqti bilan goh issiq, goh sovuq issiqlik tashuvchi bilan yuvilib turiladi.



11.3 – rasm

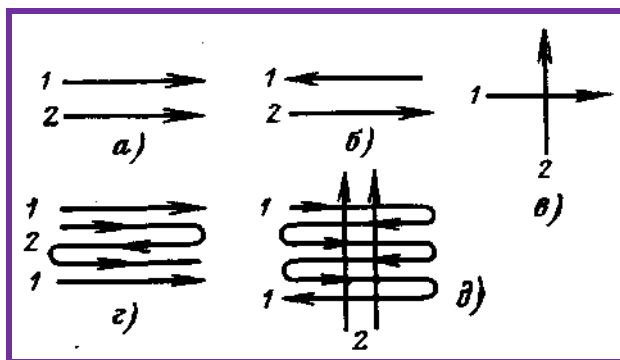
1- rotor vali; 2- pastki va yukoridagi podshipniklar; 3- elektroDvigatel; 4- tiqilgan narsa; 5- tashqi qo'zg'almas g'ilof; 6-7- zichlagichlar; 8- havoning chiqib ketishi; 9 - gaz patrubkalari.

Dastlab regenerator panellaridan qizigan issiqlik tashuvchi – domno va mar-ten pechlari, vagrankalar va boshqalardagi yonish mahsulotlari yuboriladi.

Regeneratorning isitish sirti qizigan gazlardan issiqlik olib isiydi, so'ngra bu issiqlikni sovuq issiqlik tashuvchiga beradi. Bunday IAA lariga zamonaviy qozon agregatlarining havo isitkichlari misol bo'la oladi(11.3-rasm).

Texnologik vazifasiga qarab: Havo isitkichlar (11.3- rasm); deaeratorlar; bug' qizdirgichlar; bug' generatorlari va sh.k.

Issiqlik tashuvchilar harakat yunalishiga qarab. to'g'ri oqimli (11.4-rasm, a); qarshi oqimli (11.4- rasm , b); ko'ndalang oqimli (11.4- rasm, v); aralash oqimli (11.4- rasm, g) ko'plab ko'ndalang oqimli (11.4-rasm, d)



11.4-rasm. IAA larida issiqlik tashuvchilarning harakatlanish sxemasi.

Issiqlik tashuvchilar turiga qarab: Suv – suvli (11.2- rasm); bug’ – suvli; suv – havoli (11.1- rasm) gaz – havoli (11.3- rasm); yog’ - havoli.

Materialning turiga qarab: po’latli IAA lari; cho’yanli IAA lari, bular korroziyaga chidamli va nisbatan arzon, lekin mustaxkamligi po’latdan past; grafitli IAA lari – bular kimyoviy agressiv muhitda ishlatiladi; shishali, sopolli, qo’rg’oshinli, plastmassali IAA lari ham kimyoviy muhitlarda qo’llaniladi.

Issiqlik almashinuv sirtiga qarab: Silliqlik (tekis) quvurli, bunday IAA lari eng ko’p tarqalgan. O’z navbatida tekis quvurlar to’g’ri (11.2- rasm), U – simon, spiralsimon, buramasimon (11.4-rasm) va boshqa shakllarda bo’lishi mumkin.

Qovurg’ali IAA lari, plastinkasimon IAA lari – bular isitish yuzasining ikkala tomonida issiqlik berish koeffitsienti bir xil bo’lganda qo’llaniladi.

Issiqlik tashuvchilarning yurish soniga qarab: bir yo’lli va ko’p yo’lli IAA lari.

Isitish sirtlarini joylashishiga qarab: Quvur ichida quvur (11.2-rasm), g’ilof quvurli.

Ishlash davriyligiga qarab: Muntazam ishlaydigan va vaqti vaqti bilan ishlaydigan IAA lari.

Asosiy texnologik jarayonlarni amalga oshirish qulayligi tufayli muntazam ishlaydigan IAA lari keng qo’llaniladi.

11.3. Issiqlik almashinuv apparatlarini hisoblash

IAA larini hisoblashdan asosiy maqsad issiqlik almashinuv yuzasini, issiqlik tashuvchilarning parametrlarini, issiqlik tashuvchilarning eng muvofiq sarfini va ularning tezligini, hamda apparatning eng muvofiq o’lchamlarini aniqlashdan

iboratdir. IAA larini hisoblashda issiqlik balansi tenglamasi va issiqlik uzatish tenglamasi asosiy hisoblanadi. Issiqlik uzatish tenglamasi:

$$Q = kF(t_1 - t_2) \quad (11.1)$$

Bunda Q – issiqlik oqimi, Vt ; k - issiqlik uzatish koeffitsenti, $Vt/(m^2 \cdot K)$; F – issiqlik almashinuv yuzasi m^2 ; t_1 va t_2 – mos ravishda issiq va sovuq issiqlik tashuvchilar temperaturasi

Issiqlik balansi tenglamasi

$$Q = m_1 \Delta h_1 = m_2 \Delta h_2$$

yoki

$$Q = V_1 \rho_1 c_{p1} (t_1^I - t_1^{II}) = V_2 \rho_2 c_{p2} (t_2^I - t_2^{II}), \quad (11.2)$$

bu yerda $V_1 \rho_1$ va $V_2 \rho_2$ - issiqlik tashuvchilarning massaviy sarfi kg/s ; c_{p1} va c_{p2} - suyuqlikning t^I dan t^{II} gacha temperatura oralig'idagi o'rtacha issiqlik sig'imi; t_1^I va t_2^I suyuqlikning apparatga kirishdagi temperaturasi; t_1^{II} va t_2^{II} suyuqlikning apparatdan chiqishdagi temperaturasi. $V \rho c_p = W$ kattalikni suv ekvivalenti deb aytiladi.

Oxirgi tenglamani e'tiborga olib (11.2) tenglamani quyidagicha yozish mumkin.

$$(t_1^I - t_1^{II}) / (t_2^I - t_2^{II}) = W_2 / W_1 \quad (11.3)$$

bunda W_1 va W_2 issiq va sovuq suyuqliklarning suv ekvivalentlari.

Demak, IAAda issiq va sovuq issiqlik tashuvchilar temperaturalarining o'zgarishi suv ekvivalentlariga teskari proportsional bo'lar ekan.

$$dt_1 / dt_2 = W_2 / W_1$$

Issiqlik uzatish tenglamasini (11.1) keltirib chiqarishda issiqlik tashuvchilarning temperaturasi apparatda o'zgarmaydi deb hisoblangan.

Δt va k kattaliklarni faqat elementar yuzi chegarasida o'zgarmas deb hisoblash mumkin. Shuning uchun elementar dF yuza uchun issiqlik uzatish tenglamasi faqat differentsial shaklda to'g'ri bo'ladi:

$$dQ = k dF \cdot \Delta t \quad (11.4)$$

Butun F yuza bo'ylab uzatilgan issiqlik oqimi (11.4) tenglamani integrallashdan aniqlanadi:

$$Q = \int_0^F k dF \Delta t = k F \Delta t_{o'rt} \quad (11.5)$$

Bunda $\Delta t_{o'rt}$ - butun isitish yuzasi bo'ylab temperaturaning o'rtacha logarifmik bosimi. Agar issiqlik uzatish koeffitsienti issiqlik almashinuv yuzasi buylab ancha o'zgarsa, u holda uning o'rtacha qiymati olinadi:

$$k_{o'rt} = \frac{F_1 k_1 + F_2 k_2 + \dots + F_n k_n}{F_1 + F_2 + \dots + F_n}$$

U holda $k_{o'rt} = \text{const}$ bo'lganda (11.5) tenglama quyidagi ko'rinishga keladi:

$$Q = k_{o'rt} \int_0^F \Delta t dF \quad \text{yoki} \quad Q = k_{o'rt} \Delta t_{o'rt} F$$

11.4. O'rtacha temperatura bosimini hisoblash

Agar issiqlik tashuvchilar temperaturalari to'g'ri chiziq bo'yicha o'zgarsa u holda o'rtacha temperatura bosimi temperaturalarning o'rta arifmetik qiymatlarining ayirmasiga teng bo'ladi:

$$\Delta t_{o'rt} = (t_1^I + t_1^{II}) / 2 - (t_2^I + t_2^{II}) / 2 \quad (11.6)$$

Biroq ishchi suyuqliklar temperaturasi o'zgarishi to'g'ri chiziqli bo'lmaydi. Shuning uchun (11.6) tenglamani temperaturalar uncha katta o'zgarmagan hollarda qo'llash mumkin. $\Delta t_{o'rt}$ kattalikni to'g'ri oqim uchun, chiziqli bo'lmagan o'zgarishi uchun aniqlaymiz. Ihtiyoriy olingan A kesimda qaynoq issiqlik tashuvchining temperaturasi t^I , sovuq issiqlik tashuvchining temperaturasi t^{II} bo'lsin. Ularning farqi quyidagicha bo'ladi:

$$t^I - t^{II} = \tau \quad (11.7)$$

dF elementar yuzadan uzatilayotgan issiqlik miqdorini quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$dQ = k dF \tau \quad (11.8)$$

dQ issiqlik uzatilganda qaynoq issiqlik tashuvchining temperaturasi dt' ga pasayadi, sovuq issiqlik tashuvchining temperaturasi esa dt'' ga ko'payadi, u holda:

$$dQ = -m_1 c_{p1} dt' = m_2 c_{p2} dt''$$

yoki

$$dt' = -\frac{dQ}{m_1 c_{p1}} \text{ va } dt'' = \frac{dQ}{m_2 c_{p2}}$$

(11.7) tenglamani differentsiallab unga dt' va dt'' larni qiymatini qo'yamiz va quyidagini hosil qilamiz:

$$d\tau = -\frac{dQ}{m_1 c_{p1}} - \frac{dQ}{m_2 c_{p2}}$$

yoki

$$dQ = \frac{d\tau}{\frac{1}{m_1 c_{p1}} + \frac{1}{m_2 c_{p2}}}$$

$\left(\frac{1}{m_1 c_{p1}} + \frac{1}{m_2 c_{p2}} \right) = n$ deb belgilaymiz, u holda

$$dQ = -d\tau/n \quad (11.9)$$

dQ ning ifodasini (11.8) tenglamaga qo'yamiz:

$$-d\tau/n = k dF \tau$$

yoki

$$-d\tau/\tau = k dF n \quad (11.10)$$

Agar n va k kattaliklar o'zgarmas bo'lsa, u holda (11.10) tenglamani $(t_1^I - t_2^I) = \tau_1$ dan $(t_1^{II} - t_2^{II}) = \tau_2$ gacha va 0 dan F gacha integrallab quyidagini topamiz.

$$-\int_{\tau_1}^{\tau_2} d\tau / \tau = nk \int_0^F dF$$

yoki

$$\ln \tau_1 / \tau_2 = nkF$$

bundan

$$n = (\ln \tau_1 / \tau_2) / kF \quad (11.11)$$

(11.9) tenglamani integrallaymiz:

$$Q=(\tau_1-\tau_2)/n \quad (11.12)$$

va unga (11.11) tenglamadan n ning qiymatini qo'yamiz.

$$Q=(\tau_1-\tau_2)/(\ln\tau_1/\tau_2) \quad (11.13)$$

(11.13) tenglamadagi Δt_{urt} kattalikni temperaturaning o'rtacha logarifmik bosimi deb aytiladi.

To'g'ri oqimli IAA lar uchun

$$\Delta t_{urt} = (t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2) / 2.3 \lg[(t'_1 - t'_2) - (t''_1 - t''_2)] \quad (11.14)$$

Xuddi shunday yo'l bilan qarshi oqimli IAA lari uchun Δt_{urt} aniqlanadi.

$$\Delta t_{urt} = (t'_1 - t''_2) - (t'_2 - t''_1) / 2.3 \lg[(t'_1 - t''_2) - (t'_2 - t''_1)] \quad (11.15)$$

Qarshi oqimli IAA larining Δt_{urt} kiymati to'g'ri oqimli IAA larining Δt_{urt} kiymatidan xar doim katta bo'ladi. Shuning uchun qarshi oqimli IAA lari o'lchami kichik bo'ladi. IAA larning tejamliligi uning foydali ish koeffitsenti (F.I.K.) orqali aniqlanadi. F.I.K. sovuq issiqlik tashuvchini isitish uchun sarflangan kaynoq is-siqlik tashuvchining issiqlik ulushini ko'rsatadi.

IAA larining issiqlik balansi odatda quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 = Q_{XIS} \text{ yoki } q_1 + q_2 + q_3 = 100\%$$

Bu yerda Q_{xis} —qaynoq issiqlik tashuvchi atrof muhit temperaturasigacha sovutil-ganda u berishi mumkin bo'lgan issiqlik mikdori; Q_1 – sovuq suyuqlikni isitish uchun sarflangan issiqlik mikdori; Q_2 –IAA dan chikayotgan qaynoq suyuqlik bi-lan issiqlik isrofi; Q_3 – atrof muhitga issiqlikni isrof bulishi. Quyidagi

$$\frac{Q_1}{Q_{xuc}} \cdot 100\% = q_1 = \eta, \%$$

nisbatni IAA ni F.I.K. deyiladi.

Nazorat uchun savollar:

1. IAA ga ta'rif bering.
2. IAA lari qanday turlarga bo'linadi?
3. Rekuperativ IAA qanday ishlaydi?
4. Regenerativ IAA qanday ishlaydi?
5. IAA hisobi qanday bajariladi?

6. Suv ekvivalentlari qanday aniqlanadi?
7. To'g'ri oqimli harakatda temperatura qanday o'zgaradi?
8. Teskari oqimli harakatda temperatura qanday o'zgaradi?
9. O'rtacha logarifmik temperatura qanday aniqlanadi?
10. IAA larning issiqlik balansi qanday tuziladi?



O'N IKKINCHI BOB

YOQILG'I

12.1. Yoqilg'i va uning xossalari

Yonganda ko'p miqdorda issiqlik chiqadigan, tevarak atrofdagilarga zararli ta'sir qilmaydigan, issiqlik olish uchun ishlatilishi maqsadga muvofiq hamda iqtisodiy jixatdan foydali bo'lgan barcha moddalardan yoqilg'i sifatida foydalanish mumkin. Elektr, mexanik va issiqlik energiyasini olishni asosiy manbai organik yoqilg'i hisoblanadi. Hozirgi vaqtda yer yuzida ishlab chiqarilayotgan va iste'mol qilinayotgan energiyaning 70% ni organik yoqilg'ining kimyoviy energiyasi hisobidan va faqat 30% gina suv, shamol, quyosh va atom energiyasidan foydalanish hisobidan olinadi. Mamlakatimiz yoqilg'i sanoati qariyb bir asrlik tarixga ega. Bu sanoat yer qa'rida topilgan va qazib olinayotgan ko'mir, Neft, tabiiy gaz konlari negizida shakllandi va rivojlanib bormoqda. Respublikamizda 159 (zaxirasi sanoat darajasida hisoblangan) neft-gaz koni ochilgan, ularning 115 tasi Buxoro - Xiva geologik provintsiyasida, 27 tasi Farg'ona vodiysi, 10 tasi Surxondaryo, 7 tasi Ustyurtda joylashgan. Konlarning gaz, gaz-kondensatli, gaz-neft', neft, gaz-neft kondensatli turlari mavjud.

Yoqilg'i sanoati respublika yoqilg'i-energetika kompleksining asosiy turlarini tashkil etadi va barcha turdagi yoqilg'ini qazib olish, tabiiy gazni tozalash va yetkazib berish, Neft maxsulotlari ishlab chiqarish korxonalaridan iborat.

Mustaqillik yillarida ko'rilgan keskin tadbirlar natijasida neft qazib olish xajmi yuqori sur'atlarda o'sdi. Respublikaning neft mustaqilligi ta'minlandi. Agregat holiga ko'ra yoqilg'i qattiq, suyuq va gaz yoqilg'isiga, kelib chiqishiga yoki olinish usuliga ko'ra tabiiy va sun'iy yoqilg'iga bo'linadi. (12.1-jadval). Organik yoqilg'ilarning tasnifi.

12.1-jadval

Yoqilg'i	Agregat xolati		
	Qattiq	Suyuq	Gaz
Tabiiy	Yog'och, torf, qo'ng'ir va toshko'mirlar, antratsit, slanetslar	Neft'	Tabiiy gaz
Sun'iy	Koks, briketlar, yog'och ko'miri,	Mazut, kerosin, benzin, solyar moyi, gazoil	Koks gazi, domna gazi, generator gazi, Neft gazi, propan, atsetilen

Organik yoqilg'i energiya manbai bo'lishi bilan bir qatorda, u kimyo sanoati uchun muhim xom-ashyo hisoblanadi. Organik yoqilg'ilarni qayta ishlash natijasida ko'plab muhim kimyoviy maxsulotlar olinadi. Qazib olingan joyi va ishlatilishiga ko'ra maxalliy yoqilg'i (torf va slanets) va tashib keltiriladigan yoqilg'ilar bo'ladi.

Yoqilg'i tarkibi organik va mineral moddalardan iborat bo'ladi. Organik moddalarga uglerod (C), vodorod (H₂), kislorod (O₂), azot (N₂) va oltingugurt (S) kiradi. Bu kimyoviy elementlar va ular birikmalarining miqdori turli xil yoqilg'ida turlicha bo'ladi. Masalan, neft' va uning maxsulotlari tarkibi asosan uglerod va vodoroddan tashkil topgan. Yoqilg'i tarkibiga yonuvchan elementlar, namlik va yoqilganda kulga o'tadigan minerallar kiradi. Yoqilg'ining tarkibi kimyoviy elementlarning massaviy foiz miqdori, namligi va kul miqdori bilan tavsiflanadi.

Qattiq va suyuq yoqilg'ining elementar tarkibini quyidagicha yozish mumkin:

$$C+H+S+O+N+A+W=100\% \quad (12.1)$$

Yoqilg'ining yonuvchan qismiga uglerod, vodorod va oltingugurt kiradi. Yoqilg'ining yonmaydigan qismiga eca, azot, kislorod, namlik W va yoqilg'i yonganda kulga aylanadigan mineral moddalar A kiradi. Yoqilg'ining tarkibi ish-

chi, quruq, yonuvchan va organik massalarga ajratiladi. Xar bir massa tarkibiga mos ravishda quyidagidek indekslar beriladi: ishchi – i; quruq – q; yonuvchan – yo; va organik – o;

Yoqilg'i iste'molchiga qaysi holda berilsa va yondirilsa, shu holdagi yoqilg'iga ishchi yoqilg'i, massasi va elementar tarkibi esa, mos ravishda ishchi massa va ish tarkibi deyiladi. Ishchi massaning elementar tarkibini quyidagicha yozish mumkin.

$$C^i + H^i + S^i + O^i + N^i + A^i + W^i = 100\% \quad (12.2)$$

Yoqilg'ini yonmaydigan elementlari uning ballastini tashkil etadi. Kislorod va azot yoqilg'ining ichki ballasti, kul va namlik esa tashqi ballasti hisoblanadi. Yoqilg'ining quruq massasi tarkibida namlik bo'lmaydi:

$$C^{\kappa} + H^{\kappa} + S^{\kappa} + O^{\kappa} + N^{\kappa} + A^{\kappa} = 100\% \quad (12.3)$$

Ishchi massadan quruq massani qayta hisoblash formulasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$C^{\kappa} = C^i \frac{100}{100 - W^i}; \quad H^{\kappa} = H^i \frac{100}{100 - W^i}; \quad \text{va sh.k.} \quad (12.4)$$

Yoqilg'ining yonuvchan massasi tarkibida tashqi ballast, ya'ni namlik va kul bo'lmaydi:

$$C^{yo} + H^{yo} + S^{yo} + O^{yo} + N^{yo} + A^{yo} = 100\% \quad (12.5)$$

Bunday tarkibni “yonuvchan massa” deb aytishimiz shartli albatta, chunki uning tarkibidagi faqat C, H va S largina yonuvchan elementlar hisoblanadi.

Yoqilg'ining yonuvchan massasining tarkibi uning o'zgarmas tavsifi bo'lib, xajmi va kul miqdori o'zgarganda ham bu tavsifi o'zgarmaydi. Qattiq yoqilg'idagi uglerod miqdori uning geologik yoshi ortishi bilan ko'payadi. Masalan, torfdagi uglerod miqdori $C^{yo}=50\div60\%$, qo'ng'ir ko'mirda $C^{yo}=60\div75\%$, toshko'mirda $C^{yo}=75\div90\%$ ni tashkil etadi. Quruq va ishchi massadan yonuvchan massani qayta hisoblash quyidagi formula bo'yicha amalga oshiriladi.

$$C^{yo} = C^{\kappa} \frac{100}{100 - A^{\kappa}} = C^i \frac{100}{100 - A^i W^i}; \text{ va sh.k.} \quad (12.6)$$

Yoqilg'ining organik massasi tarkibini quyidagicha yozish mumkin:

$$C^{\circ} + H^{\circ} + S^{\circ} + N^{\circ} = 100\% \quad (12.7)$$

Barcha issiqlik texnikasi hisoblarida yoqilg'ining tarkibi uning ishchi massasi bo'yicha olinadi. Gaz yoqilg'isi tarkibini quyidagi formula orqali ifodalash mumkin:

$$CH_4 + C_m H_n + CO + H_2 + H_2S + CO_2 + O_2 + N_2 = 100\% \quad (12.8)$$

Qattiq va suyuq yoqilg'ining va yonuvchan gazning asosiy tavsiflari 12.2 va 12.3-jadvalda keltirilgan.

Qattiq va suyuq yoqilg'ining asosiy xossalari

12.2-jadval

Yoqilg'i turi	Yoqilg'ining yonuvchan massasi %				
	C^{yo}	H^{yo}	O^{yo}	S^{yo}	$Q_{\kappa}^u \cdot 10^{-4}, \text{ kJ/kg}$
Yog'och	50	6	43	0	1,05-1,47
Torf	53-62	52,62	32,37	0,1-03	0,84-1,05
Qo'ng'ir ko'mir	62-72	4,4-6,2	18-27	0,5-6,0	0,62-1,09
Toshko'mir	75-90	4,5-5,5	4-15	0,6,-6,0	2,10—3,00
Antratsit	90,96	1,02,0	1-2	0,5-7,0	2,70-3,10
Neft	83-86	11-13	1-3	0,2-4,0	4,30-4,60
Slanets	72-76	8-10	10-12	-	0,73-1,50
Mazut	84-87	9-11	1	3-3,5	4,00-4,55

Tabiiy gazlarning xossalari

12.3-jadval

Gaz magistrali	Gazning tarkibi, xajmga nisbatan, %							
	CH_4	C_2H_2	C_3H_8	C_4H_1 0	C_5H_1 2	N_2	CO_2	$Q_{\kappa}^k \cdot 10^{-4} \text{ kJ/kg}$
Gazli – Kogon	95,4	2,6	0,3	0,2	0,2	1,1	0,2	3,66
Jarkax-Toshkent	95,5	2,7	0,4	0,2	0,1	1,0	1,0	3,67

Buxoro-Ural	94,9	3,2	0,4	0,1	0,1	0,9	0,4	3,67
Saratov-Moskva	91,9	2,1	1,3	0,4	0,1	3,0	1,2	3,61

Uglerod yoqilg'ining asosiy tarkibiy qismidir. 1 kg sof uglerod to'la yonganda 33900 kJ issiqlik chiqadi. 1 kg vodorod yonganda 125600 kJ issiqlik chiqadi. Yoqilg'i tarkibiga kiruvchi vodorodning bir qismi yoqilg'idagi kislorod bilan birikkan bo'ladi va yonishda ishtirok etmaydi. Yoqilg'i yonganda oltingugurt sulfid angidrid SO_2 ga aylanadi va suv bug'lari bilan birikib sulfid kislota H_2SO_3 hosil qiladi. Oltingugurtning yonishidan hosil bo'lgan suyuq va gaz maxsulotlar ichki yonuv dvigatellari hamda qozon agregatlari metall qismlarining zanglashiga sabab bo'ladi, havoni va o'simliklarni zaharlaydi va ularni nobud qiladi, qurilish inshootlarini yemirilishini tezlashtiradi. Oltingugurtning zararli xossalari eptiborga olib, uni ballast qatoriga kiritish mumkin. Kislorod va azot shartli ravishda yonuvchan massa tarkibiga kiritilgan. Ular ichki ballast hisoblanadi, chunki yonuvchan massaning foiz miqdorini kamaytiradi va yonish sohasini sovitadi. Bundan tashqari yoqilg'ida kislorod miqdori ko'p bo'lsa, u yonish sohasida vodorod bilan birikib, suv hosil qiladi.

Yoqilg'i namligi. Yoqilg'ini qazib olish, tashish, saqlash va shu kabilarga bog'liq ravishda yoqilg'i namligi o'zgarib turadi. Masalan, torf uchun 50%, slanetslar uchun 13-17%, tosh-ko'mir uchun 5-14%, va antratsit uchun 5-8%. Yoqilg'idagi namlik yoqilg'i foydali qismini xajmini kamaytirishi jihatidagina emas, balki yonish sohasida bug'ga aylanishi jihatidan ham zararlidir. Issiqlikning anchagina miqdori bug' hosil bo'lishiga sarflanmagani holda, chiqib ketayotgan gazlar bilan birga chiqadi. Namlik qattiq yoqilg'i saqlanganda uning o'z-o'zidan yonib va uvalanib ketishiga sabab bo'ladi.

Yoqilg'i kuli. Yoqilg'i tarkibida kulning bo'lishi yonish vaqtida ajralib chiqayotgan issiqlik miqdorini kamaytiradi, uskunalarning metall qismlarini yemiradi, o'txonalarning ishlashini qiyinlashtiradi. Kul tarkibiga asosan ishqoriy metallar tuzlari, temir va alyuminiy oksidlari hamda oltingugurt sulfati kiradi. Bundan tashqari kulda CaCO_3 , MgCO_3 bo'lishi mumkin. Yoqilg'ilar tarkibida

kulning miqdori xar-xil bo'ladi. Masalan quruq yoqilg'ilar uchun A^q ning qiymati quyidagicha bo'ladi, %: yog'och uchun ≈ 1 , torf uchun ≈ 10 , toshko'mir uchun 10-20, qo'ng'ir ko'mir uchun 30, slanetslar uchun 60. Suyuq yoqilg'i (mazut) tarkibida ham oz miqdorda (0,2-1%) mineral aralashma bo'ldi.

Uchuvchan moddalar va koks. Qattiq yoqilg'i havosiz fazoda 870-1070 K temperaturagacha qizdirilganda undan uchuvchan moddalar ajralib chiqadi. Uchuvchan moddalar tarkibiga azot N_2 , vodorod H_2 , kislorod O_2 , uglerod oksidi CO, uglevodorod gazlari CH_4 , C_2H_4 va shu kabilar hamda namlikdan hosil bo'lgan suv bug'lari kiradi. Uchuvchan moddalar tarkibi yoqilg'ini qizdirish jarayoniga bog'liq bo'ladi. Uchuvchan moddalar yig'indisi V^U xarfi bilan belgilanadi va faqat yonuvchan massaga taaluqli bo'ladi. Uchuvchan moddalar slanetsda ($V^U=90\%$) va torfda ($V^U=75\%$) eng ko'p bo'ladi. Qo'ng'ir ko'mirda 40-50%, antratsitda esa 4-6% bo'ladi.

Chala kokslash jarayoni maxsus pechlarda (havosiz muhitda) amalga oshiriladi, bunda qayta ishlanadigan yoqilg'i 770-830 K temperaturaga qodir bir me'yorda qizdiriladi. Yuqori temperatura ta'sirida yoqilg'ining organik qismi parchalanadi, parchalanish mahsulotlari esa, o'zaro yana kimyoviy reaksiyaga kirishadi. 770-830 K temperaturada yoqilg'ining parchalanishi to'xtaydi va pechda uglerodga aylangan qattiq qoldiq – chala kokslanishning asosiy maxsuloti bo'lgan chala koks qoladi. Chala koksda ko'pgina uchuvchan moddalar qoladi. Undan turmushda va energetika maqsadlarida ishlatiladigan yoqilg'i sifatida foydalaniladi.

Chala kokslanishda hosil bo'ladigan gazlar – qimmatli yoqilg'i va keyingi kimyoviy qayta ishlash uchun xom-ashyodir. Masalan, yog'och va torfni quruq xaydashda olingan suv yana kimyoviy qayta ishlansa, atseton, sirka kislota, metil spirti, formalin va boshqa kimmatli maxsulotlar hosil bo'ladi. Yoqilg'ini havosiz muhitda 1275-1375 K temperaturada qizdirib, qayta ishlash jarayoni kokslash deyiladi. Kokslash natijasida 70-80% metallurgiya koksi olinadi, qolgani esa koks gazi, smola va suv bo'ladi. Koks gazi qayta ishlanib, undan ammiak va boshqa kimyoviy maxsulotlar olinadi. Kokslashda hosil bo'lgan smola va suv yana qayta kimyoviy ishlanadi.

Yoqilg'ining yonish issiqligi. 1 kg yoki 1 m³ yoqilg'i to'liq yonganda chiqadigan issiqlik miqdori yoqilg'ining issiqlik ajratishi (yonish issiqligi) deyiladi (Q^i , kJ/kg yoki Q^i kJ/m³).

Yoqilg'ining issiqlik ajratishi ikki xil: yuqori yonish issiqligi Q_{yu}^i va quyi yonish issiqligi Q_k^i bo'ladi. Yoqilg'ining massa birligi to'liq yonganda chiqqan issiqlik miqdori yoqilg'ining yuqori yonish issiqligi deyiladi, bunda namlikning bug'lanishiga sarflangan issiqlik hisobga olinmaydi. Yoqilgining birlik massasi yonganda uning tarkibidagi namlik hamda vodorodning kislorod bilan reaksiyaga kirishish jarayonida hosil bo'lgan namlik hisobga olingan xolatda ajralgan issiqlik miqdori quyi yonish issiqligi deyiladi. 1 kg suv bug'ining atmosfera bosimida kondensatsiylanish issiqligi taxminan 2500 kJ/kg ga teng. Ishchi yoqilg'i tarkibidagi suv bug'lari miqdori $W^i/100$ ga teng. 1 kg vodorod yonganda 9 kg suv bug'i hosil bo'ladi ($H_2 + 0,5O_2 = H_2O$).

Demak, suv bug'ining kondensatsiylanish issiqligini quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$2500\left(\frac{W^i}{100} + 9\frac{H^i}{100}\right) = 25W^i + 225H^i, \quad (12.9)$$

u holda

$$Q_k^i = Q_{yu}^i - 225H^i - 25W^i = Q_{yu}^i - 25(9H^i + W^i) \quad (12.10)$$

ya'ni yoqilg'ining quyi yonish issiqligi uning yuqori yonish issiqligidan bug' hosil bo'lish issiqligini ayirib tashlanganiga teng. Yoqilg'ining yonish issiqligi laboratoriya sharoitida kalorimetrik bomba yordamida aniqlanadi (12.1-rasm). Kalorimetrli bomba, bosimi 3 MPa bo'lgan kislorod bilan to'ldirilgan germetik idish 1 dan iboratdir. Idishda massasi 1 g bo'lgan yoqilg'i yondiriladi. Bombani suvli idish 2 ga joylashtiriladi va suv temperaturasini ortishi orqali yoqilg'ining yonish issiqligi aniqlanadi. Qattiq va suyuq yoqilg'ining yonish issiqligini D.I.Mendeleev empirik formulasidan yetarli aniqlik bilan topiladi:

$$Q_{yu}^i = 340C^i + 1260H^i - 109(O^i - S^i) \text{ kJ/kg} \quad (12.11)$$

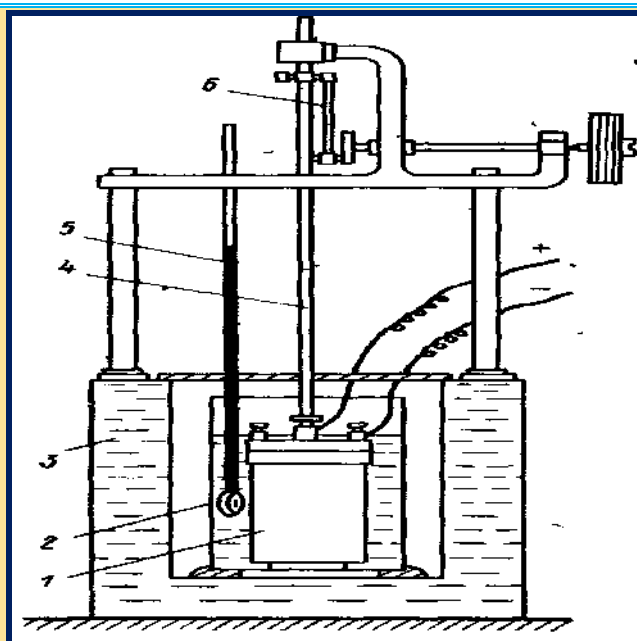
$$Q_k^i = 340C^i + 1035H^i - 109(O^i - S^i) - 25W^i \text{ kJ/kg} \quad (12.12)$$

Quruq gazning qo'yi yonish issiqligi quyidagiga teng:

$$Q_k^k = 358CH_4 + 640C_2H_6 + 915C_3H_8 + 1190C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + \\ + 126,5 CO + 107,5H_2 + 234H_2S \quad kJ/m^3 \quad (12.13)$$

Yuqori yonish issiqligi:

$$Q_{yu}^k = 398CH_4 + 700C_2H_6 + 995C_3H_8 + 1285C_4H_{10} + 1575C_5H_{12} + \\ + 126,5 CO + 127,5H_2 + 257H_2S \quad kJ/m^3 \quad (12.14)$$



12.1-rasm. Kalorimetrik qurilma.

**1-kalorimetrik bomba; 2- suvli idish; 3-termostat; 4-aralashtirgich;
5-termometr; 6-aralashtirgichning uzatma mexanizmi.**

Shartli yoqilg'i. Issiqlik ajratish xususiyati turlicha bo'lgan yoqilg'ilarni taqqoslash uchun «shartli yoqilg'i» tushunchasidan foydalaniladi. Yonish issiqligi 29300 kJ/kg yoki ~30000 kJ/kg bo'lgan yoqilg'i shartli yoqilg'i deyiladi. Berilgan yoqilg'ini shartli yoqilg'iga aylantirib hisoblashda va aksincha shartli yoqilg'ini berilgan yoqilg'iga aylantirib hisoblashda yoqilg'i ekvivalenti deyiladigan kattalikdan foydalaniladi.

$$\vartheta = \frac{Q_{\kappa}''}{29300} \quad (12.15)$$

Qattiq yoqilg'i. Qattiq yoqilg'ilar jumlasiga yog'och, torf, yonuvchan slanetslar va qazib olinadigan ko'mirlar kiradi. Har qanday qattiq yoqilg'ining boshlang'ich materiali yog'ochdir. Qazib olinadigan qattiq yoqilg'i yonuvchan massasining tarkibi uning paydo bo'lish sharoitlariga va geologik yoshiga bog'liq. Geologik yoshining ortib borishi tartibida qattiq yoqilg'ini shunday joylashtirish mumkin: yog'och, torf, yonuvchan slanetslar, qo'ng'ir ko'mir, toshko'mir, antratsit.

Torf suv ostida havosiz sharoitda botqoqlik o'simliklaridan hosil bo'ladi. U yer sirtidan unchalik chuqur bo'lmagan joyda qalinligi 10 m gacha qatlamlar hosil qiladi.

Yonuvchan slanetslar oson o't oladi va uzun tutaydigan alanga hosil qilib yonadi. Ular quruq haydalganda koks, smola va qo'shimcha mahsulotlarga parchalanadi. Yonuvchan slanetslar qimmatli mahalliy yoqilg'i va kimyoviy hom ashyo hisoblanadi. Tabiiy qattiq yoqilg'ining asosiy turi qazib olinadigan ko'mirlardir. Ular uzoq toshko'mir davrida daraxt va o'simliklardan hosil bo'ladi. Qazib olinadigan ko'mirlar geologik yoshiga ko'ra qo'ng'ir ko'mir, toshko'mir va antratsementga bo'linadi. O'zbekistonda ko'mirni sanoat usulida qazib olish 1930 yillar oxiridan boshlangan. Toshkent viloyatida (Angren) qo'ng'ir ko'mir, Surxondaryo viloyatida SHarg'un, Boysuntog' toshko'mir konlari bor. Mamlakatimiz xalq xo'jaligida har yili 8 – 9 mln t ko'mir iste'mol qilinadi.

Suyuq yoqilg'i. Tabiiy suyuq yoqilg'i neftdir. Lekin, u odatda tabiiy holda yoqilg'i sifatida ishlatilmaydi. Suyuq yoqilg'i asosan neftni 300 – 370 °S temperaturaga qizdirishdan hosil bo'lgan bug'ni har xil fraktsiyalarga ajratish va ularni kondensatsiyalash yo'li bilan olinadi. Karbyuratorli dvigatellar uchun benzin, ligroin, kerosin; dizel dvigatellari uchun gaz va solyar moyi; reaktiv dvigatellar uchun kerosin – gazoilli fraktsiyalar olinadi. Qozon agregati va sanoat pechlari o'txonalarida asosan mazut ishlatiladi. Mazutning asosiy tavsiflaridan biri uning qovushoqligidir. O'txonalarda asosan M40, M100 va M200 markali mazut ishlati-

ladi. Mazut markasi uning 353 K temperaturadagi qovushoqligi orqali aniqlanadi. Mazut tarkibidagi oltingugurt miqdoriga qarab: kam oltingugurtli (0,5 % gacha), oltingugurtli (2 % gacha) va ko'p oltingugurtli (3,5 – 4,3 %) mazutlarga ajratiladi.

O'zbekistonda dastlabki Neft koni 1904 yilda ochilgan (Farg'ona vodiysidagi Chimyon Neft konida 278 m chuqurlikdan kuniga 130 t Neft olingan). O'sha yili Vannovskda (hozirgi Oltiariq) neftni qayta ishlash zavodi ishga tushirildi.

O'zbekiston Neft sanoatining paydo bo'lishi shu sanadan boshlanadi. Bugungi kunda Respublika Neft sanoati xalq xo'jaligining neftga bo'lgan talabini to'liq qondirish imkoniyatlariga ega.

Gaz yoqilg'isi. Tabiiy gaz yer kurrasining juda ko'p joylarida uchraydi. U faqat maxsus gaz quduqlaridagina emas, balki Neft qazib chiqarishda qo'shimcha mahsulot sifatida ham olinadi. Neft bilan birga chiqadigan tabiiy gaz yo'lakay gaz deyiladi. Tabiiy gazning asosiy tarkibiy qismini metan CH_4 (98% gacha) tashkil etadi.

Bundan tashqari uning tarkibida etan C_2H_6 , propan C_3H_8 , butan C_4H_{10} , etilen C_2H_4 va propilen C_3H_6 bo'ladi. O_2 va N_2 lar odatda oz miqdorni tashkil etadi. Gaz sanoati – yoqilg'i – energetika majmuasining eng rivojlangan tarmog'i. Uning Respublikada qazib olinayotgan yoqilg'i balansidagi hissasi 87,2 % ni tashkil etadi. 1955 yilda Jarqoq, 1956 yilda Gazli Neft konlarining ochilishi natijasida gaz sanoatining moddiy bazasi yaratildi. 1995 yili Respublika gaz sanoatida 48,6 mlrd m^3 tabiiy gaz, 7600,6 ming tonna Neft va gaz kondensati olishga erishildi, 3053, 7 ming tonna ko'mir qazib olindi.

12.2. Yoqilg'ining yonish jarayonlari

Qattiq yoqilg'ining yonishi. Qattiq yoqilg'ini yonish jarayoni ketma – ket keladigan quyidagi bosqichlardan tashkil topgan: qizdirish, namlikni bug'lanishi, uchuvchan moddalarni ajralishi va koksning hosil bo'lishi, uchuvchan moddalar va koksni yonishi. Bu bosqichlardan asosiysi, koksni, ya'ni uglerodni yonishi hisoblanadi. Bundan tashqari koksni yonishi qolgan bosqichlarga qaraganda ko'proq davom etadi (yonish vaqtining 90% gacha) va xuddi shu bosqich qol-

ganlari uchun issiqlik sharoitini yaratadi. Yonish bosqichigacha bo'lgan bosqichlar uchun issiqlik sarflanadi. Bu sarflar yonish issiqligining 20 – 25 % gacha bo'lishi mumkin. Yonish to'liq va to'liqmas (chala) bo'ladi. Yoqilg'ining yonuvchan elementlari kislorod bilan quyidagicha reaksiyaga kirishib yonsa, bunday yonish to'liq yonish deyiladi:

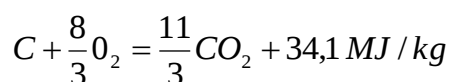


bunda Q - yonish vaqtida ajralib chiqqan issiqlik miqdori.

Bu reaksiya kilomollarda quyidagicha yoziladi.



yoki



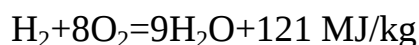
(12.17) tenglamadan ko'rinib turibdiki, 1 kg uglerodni to'liq yonishi uchun $\frac{8}{3}$ kg

kislorod zarur bo'ladi. Reaksiya natijasida $\frac{11}{3}$ kg CO₂ hosil bo'ladi va 34,1 MJ issiqlik ajralib chiqadi.

Vodorodning yonishi:

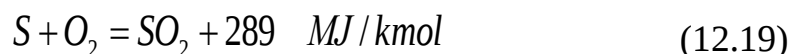


yoki

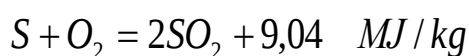


Bu reaksiyada 1 kg H₂ yonishi uchun 8 kg kislorod zarur bo'ladi, reaksiya natijasida 9 kg suv bug'i hosil bo'ladi va 121 MJ issiqlik ajralib chiqadi.

Oltinugurtning yonishi:



yoki



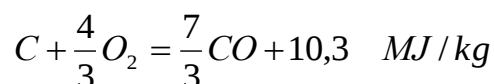
1 kg oltinugurt yonganda 1 kg kislorod sarflanadi. Reaksiya natijasida esa 2 kg SO₂ hosil bo'ladi va 9,04 MJ issiqlik ajraladi.

Yonish mahsulotlari ichida yonuvchan elementlar va yonmagan yoqilg'i zarralari qolgan bo'lsa, bunday yonish to'liqmas (chala) yonish deyiladi.

Uglerodning chala yonishi:



yoki

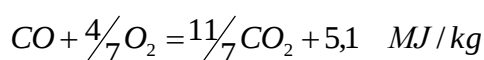


ya'ni 1kg uglerod chala yonganda $\frac{4}{3}$ kg kislorod sarflanadi, reaksiya natijasida esa $\frac{7}{3}$ kg CO hosil bo'ladi va 10,3 MJ issiqlik ajralib chiqadi.

Hosil bo'lgan uglerod oksidi yonadi:



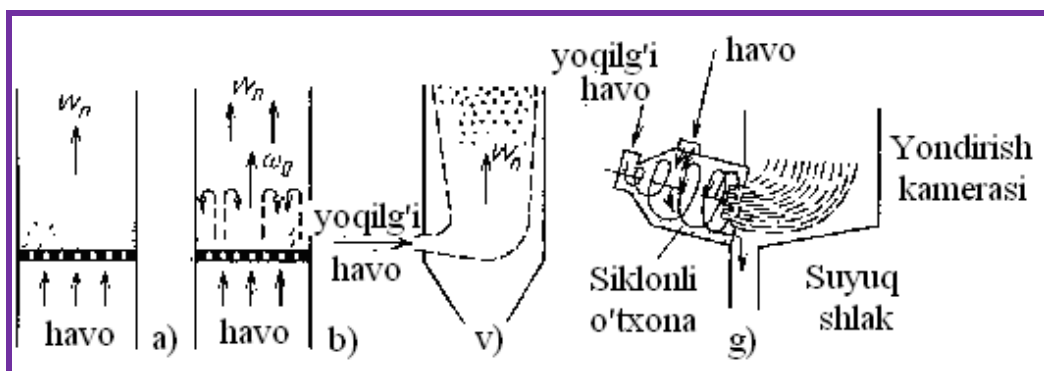
yoki



ya'ni 1 kg CO yonishi uchun $\frac{4}{7}$ kg kislorod sarflanadi, reaksiya natijasida esa $\frac{11}{7}$ kg CO₂ hosil bo'ladi va 5,1 MJ issiqlik ajraladi.

Yoqilg'i to'liq yonganda uglerod, vodorod va oltingugurtning yonishida olinishi mumkin bo'lgan barcha issiqlik chiqadi. Yonish mahsulotlarida yona olmaydigan moddalargina: karbonat angidrid CO₂, suv bug'lari H₂O va oltingugurt angidrid SO₂ qoladi. Yonuvchi elementlar chala oksidlanganda yonish mahsulotlari bilan birga ko'p miqdorda uglerod (II)–oksid CO, vodorod H₂, metan CH₄ va yona oladigan boshqa uglevodorodli birikmalar ham chiqib ketadi.

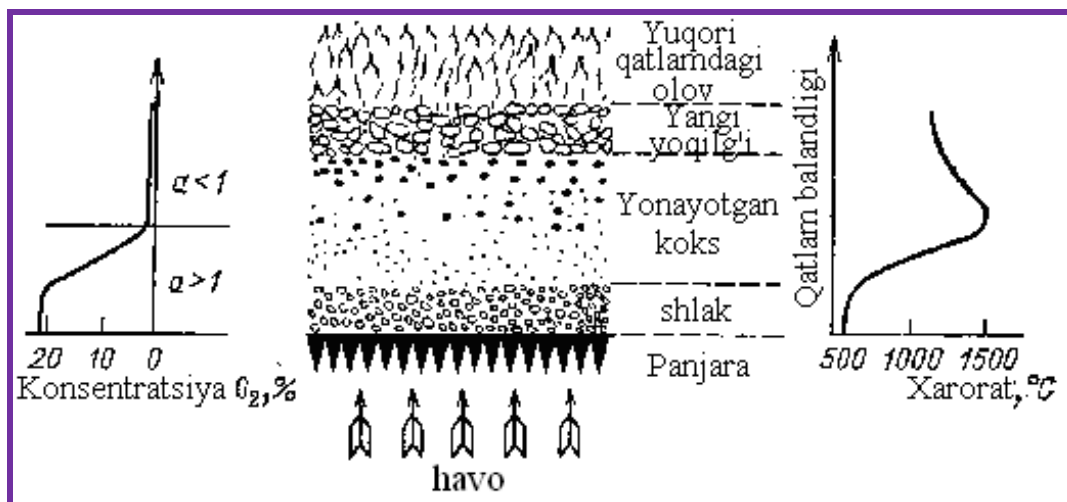
Hozirgi zamon o'txona texnikasida qattiq yoqilg'ini yoqishning asosan to'rt xil usuli – qatlamli, qaynayotgan qatlamli, mash'alali va uyurmali yonish usullaridan foydalaniladi (12.2 - rasm).



12.2 – rasm. Qattiq yoqilg'i o'txonalari tasnifi

a) qatlamlı usul; b) qaynayotgan qatlamlı usul; v) mash'alali usul; g) uyurmali usul.

Yonayotgan qatlam tuzilishini ko'rib chiqish yonish jarayonini chuqurroq o'rganish imkonini beradi (12.2 - rasm). Qatlamlı yoqish – bu yoqilg'ini panjarali cho'g'donda qatlamlab yoqish usulidir. Yoqilg'i yonish natijasida bevosita cho'g'donda kul va shlakdan iborat g'ovak yostiq hosil bo'ladi. Uning ustida yonayotgan koks qatlami bo'ladi. Koks ustiga yangi yoqilg'i qatlami beriladi. Bu yerda Q issiqlik hisobiga isiydi. So'ngra yoqilg'i quriydi, ya'ni undagi namlik bug'lanib ketadi, shundan keyin uchuvchan moddalarning chiqishi va koks hosil bo'lishi boshlanadi.



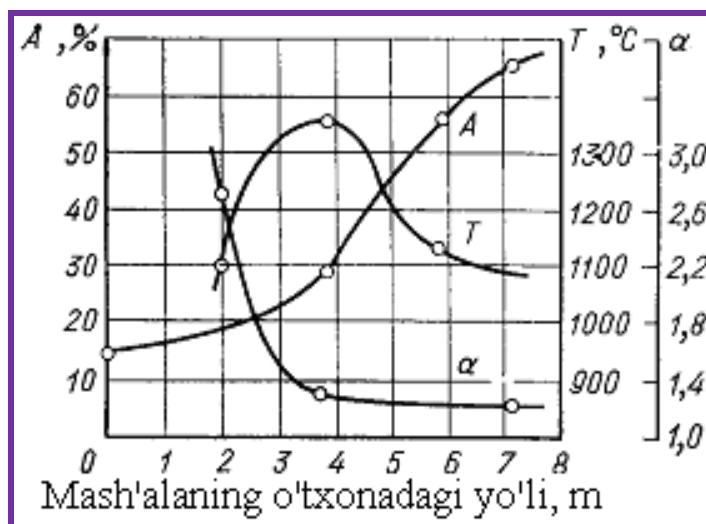
12.3–rasm. Yoqilg'ining yonayotgan qatlamining tuzilishi.

Uchuvchan moddalar va koksning yonishi natijasida issiqlik chiqadi va o'txona ichining temperaturasi ko'tariladi. Yonish uchun zaruriy havo kolosnik cho'g'don tagidan kiradi. Havo cho'g'don teshigi va g'ovak shlakli yostiq orqali o'tib isiydi. Havo keyingi harakati davomida o'z yo'lida koks va yoqilg'i qatlami-

ga duch keladi. Ular bilan o'zaro ta'sir etishib, yoqilg'i qatlami yonadigan o'txona gazlari oqimiga aylanadi va qatlam ustki alangasini hosil qiladi. Qattiq yoqilg'ini qatlamli yoqish quvvati past bo'lgan (bug' unumdorligi 35 m/soat gacha) qozonlarda keng tarqalgan.

Biroq bu usulni quvvati yuqori bo'lgan qozonlarda qo'llab bo'lmaydi, chunki bunda yonish yuzasi yetarli bo'lmaydi. Shuning uchun quvvati katta bo'lgan qozonlarda qattiq yoqilg'i chang holatiga keltirilib yoqiladi. Buning uchun yoqilg'i, avvalo maxsus tegirmonlarda chang holiga keltiriladi va kamerali o'txonaga gorelka orqali uzatiladi.

Kamerali o'txonalarda yoqilg'i mash'ala va uyurmali usullarda yondiriladi (12.2 – rasm, v va g). Mash'ala qilib yoqish usulida yoqilg'i va yonish uchun zaruriy havo o'txonaga maxsus moslamalar yordamida beriladi. Yonishning mash'ala usuli yoqilg'i zarralarining havo oqimi va yonish mahsulotlari bilan birgalikda to'xtovsiz harakatlanib turishi bilan qatlamli yoqish usulidan farq qiladi. Shuning uchun qattiq yoqilg'i chang (kukun) holatga keltirilishi lozim. Kukun zarralarining o'lchami mikronlar bilan o'lchanadi. Buning natijasida yoqilg'ining havo kislorodlariga tegishi va reaksiyaga kirishish sirti kattalashadi. Ko'mir changi kamerali o'txonaga havo bilan (birlamchi havo) birgalikda gorelka orqali uzatiladi. Havoning qolgan qismi (ikkilamchi havo) yoqilg'isiz o'txona uzatiladi. Mash'ala uzunligi bo'ylab yoqilg'i yonishini uch bosqichga ajratish mumkin: tayyorgarlik bosqichi, yoqilg'ini jadal yonish bosqichi va qoldiq koksni yonib tugash bosqichi (12.4 - rasm).



12.4 – rasm. Mash’ala uzunligi bo’ylab temperaturani, ortiqcha havoni va kul miqdorini o’zgarishi

Birinchi bosqichda temperatura T yuqori bo’lmaydi, ortiqcha havo koeffitsienti α katta, kul miqdori A^q esa oz bo’ladi. Ikkinchi bosqichda temperatura keskin ko’tariladi, ortiqcha havo koeffitsienti jadal kamayadi va kul miqdori tez ortadi. Demak bu bosqichda yoqilg’i jadal yonadi. Uchinchi bosqich eng ko’p davom etadi. Bunda α deyarli o’zgarmaydi, A^q tez ortib boradi va keyin ma’lum bir chegara qiymatiga yaqinlashadi. Demak, bu bosqichda qoldiq koks yonib bo’ladi. Ekran quvurlariga issiqlik berish jadalligi, yonish tufayli ajralib chiqayotgan issiqlik jadalligidan katta bo’lishi natijasida temperatura ancha pasayadi. Keyinchalik nuriy issiqlik berish, temperatura pasayishi bilan keskin kamayishi natijasida (Stefan–Boltsman qonuni), temperaturaning pasayishi sekinlashadi.

O’txona bo’shlig’ida kuchli, uyurmali oqim hosil qilish usuli bilan yoqilganda yoqilg’i zarralari uzoq vaqt o’txonada bo’ladi va to’liq yonadi. Havo oqimi yoqilg’i zarralarini uyurma traektoriyasi bo’ylab olib yuradi va yaxshi yonishini ta’minlaydi. Uyurmaviy usulda qattiq yoqilg’ini chang holida emas, balki yaxshi maydalangan bo’laklar holida yoqish mumkin. Changsimon holatga keltirilgan qattiq yoqilg’ilarni yoqishning o’ziga xos afzalliklari bor:

a) past navli ko’mirni, ko’mir qizib olishda va uni boyitishdagi qoldiq chiqindilarni katta quvvatli qozon qurilmalari o’txonalarida yoqish mumkin;

b) ortiqcha havo koeffitsienti $\alpha=1,2-1,25$ bo'lganda chala yonish hisobiga bo'ladigan isroflar juda kam va o'txona samaradorligi iqtisodiy jihatdan yuqori bo'ladi;

v) yonish jarayonini to'la mexanizatsiyalashtirish va avtomatlashtirish mumkin;

g) katta quvvatli o'txonalar qurish mumkin.

Bunday afzalliklari bilan birga qurilmalarning narxi qimmat, yoqilg'ini maydalashga qo'shimcha elektr energiyasi sarf bo'ladi, tutun gazlar bilan birgalikda ko'p miqdorda kul ham (yoqilg'idagi umumiy kul miqdorining 80% ga yaqini) atmosferaga uchib chiqadi va atrof muhitni ifloslantiradi. Yuqorida ko'rsatilgan kamchiliklarga qaramay, yirik elektr stantsiyalarning asosiy qismi changsimon yoqilg'ida ishlaydi. Havoning nazariy jihatdan zaruriy miqdorini hisoblashda havo yoqilg'i bilan ideal aralashtiriladi va kislorodning har qaysi zarrasi yonuvchan element bilan birikishiga ulguradi, deb faraz qilinadi. Lekin, amalda havoning hisoblangan miqdori yoqilg'ining to'liq yonishi uchun yetarli bo'lmaydi. Yonish jarayonini kislorodning hammasi yonuvchan elementlar bilan kirishadigan qilib yetkazib bo'lmaydi. Uning bir qismi yonish reaksiyasiga kirishmaydi va tutun gazlar bilan birga erkin holda chiqib ketadi. Yoqilg'ining to'liq yonishi uchun havoni hisoblab topilganidan ko'proq miqdorda berish zarur. Haqiqiy beriladigan havo miqdori nazariy hisoblab topilganidan necha marta ko'pligini ko'rsatuvchi son ortiqcha havo koeffitsienti deyiladi va α bilan belgilanadi:

$$\alpha = V/V_0,$$

α ning kattaligi yoqilg'ining turiga, jarayon sodir bo'ladigan sharoitlarga, yoqish usuliga, o'txonaning tuzilishiga bog'liq. Hisoblashlarda α ning qiymati tegishli tajriba ma'lumotlari asosida tanlanadi. α qanchalik kichik bo'lsa, yonish jarayoni shunchalik tejimli bo'ladi. Lekin α juda ham kichik bo'lsa, yoqilg'i chala yonadi va qozon agregatining F.I.K. pasayadi.

Qattiq yoqilg'i qatlamli usulda yoqilsa, odatda $\alpha=1,3-1,5$ ga teng bo'ladi, gaz va suyuq yoqilg'i kamerali o'txonalarda yoqilganda $\alpha=1,1-1,15$ ga teng bo'ladi.

Gaz va suyuq yoqilg'ining yonishi. Gaz va suyuq yoqilg'ining yonishi bir – biridan kam farq qiladi, chunki suyuq yoqilg'i yonishidan oldin bug'lanadi. Yoqilg'i yonganda uning tarkibidagi yonuvchan elementlarning kimyoviy oksidlash jarayoni ro'y beradi va natijada jadal issiqlik ajralib, yonish mahsulotlari temperaturasi keskin ko'tariladi.

Yonish gomogen (ya'ni, yoqilg'i va oksidlovchi modda bir xil agregat holatida bo'ladi) yoki geterogen (ya'ni, yoqilg'i va oksidlovchi modda turli agregat holatida bo'ladi) bo'lishi mumkin. Suyuq yoqilg'ida ballast deyarli bo'lmaydi, shuning uchun u faqat mash'ala qilib yoqiladi. Yoqish paytida yoqilg'ini butunlay to'zitib yuborish kerak. Yoqilg'i yaxshi to'zitmasa, yonish mahsulotlari ichida ko'p miqdorda yonmagan sof uglerod C, uglerod (II) – oksid CO va uglevodorodlar C_mH_n qolishi mumkin. Gaz yoqilg'isini suyuq va qattiq yoqilg'iga qaraganda mash'ala usulida oson va samarali yoqish mumkin. Lekin barcha yoqilg'ini yoqishdagi singari uni ham havo bilan yaxshi aralashtirish lozim. Gaz yoqilg'isining yonish jarayoni gomogen bo'ladi. Yonish jarayoni boshlanishi uchun gaz va oksidlovchi modda bir – biriga tegib (tutashib) turishi va yetarli shart – sharoitlar bo'lishi lozim. Yonuvchan elementlar nisbatan past temperaturalarda ham oksidlanishi mumkin. Bunday sharoitda kimyoviy reaksiyalar tezligi kichik bo'ladi, temperatura ortishi bilan reaksiya tezligi oshadi. Ma'lum bir temperaturaga yetganda esa, gaz – havo aralashmasi alangalanadi (o't oladi), reaksiyalar tezligi ortadi va ajralib chiqayotgan issiqlik miqdori yoqilg'ini o'z – o'zidan yonishini ta'minlash uchun yetarli bo'ladi. Aralashma alangalanadigan (o't oladigan) eng past temperaturaga alangalanish (o't olish) temperaturasi deyiladi. Bu kattalik yoqilg'ining fizik xossalriga, yondirish usuliga, aralashmadagi yoqilg'i miqdoriga va shu kabilarga bog'liq bo'ladi. Masalan, vodorodning o't olish temperaturasi 820–870K, uglerod oksidi va metanniki mos ravishda 1020–930 va 120-1070K. Ba'zi yoqilg'ilarning o't olish temperaturalari 12.4–jadvalda keltirilgan.

Yoqilg'i o't olish temperaturasi α koeffitsientga bog'liqligi.

12.4 – jadval.

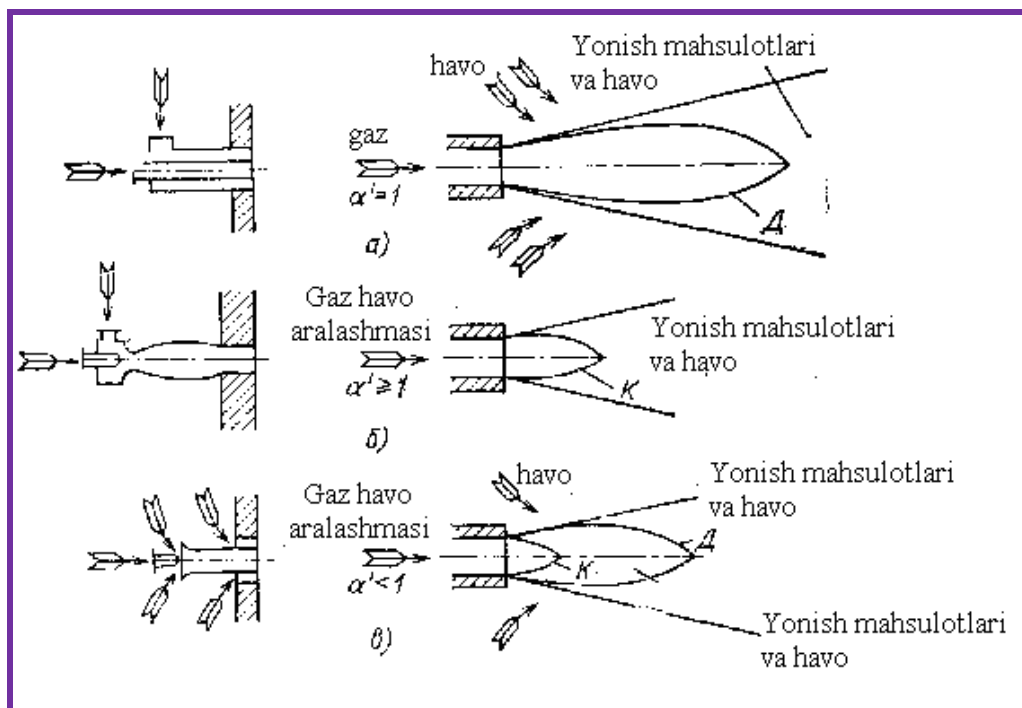
Yoqilg'i nomi	O't olish temperaturasi, °S			
	$\alpha = 1,0$	$\alpha = 1,3$	$\alpha = 1,5$	$\alpha = 2,0$
Antratsit	2270	1845	1665	1300
Torf	1700	1510	1370	1110
Mazut	1125	1740	1580	1265
O'tin	1855	1575	1435	1165
Gaz (Saratov)	2000	1149	1778	1167

Ma'lumki, gaz mash'ala bo'lib yonadi. Mash'ala bu yonish jarayoni kechayotgan, harakatlanayotgan gazlarning ma'lum bir hajmidir. Yonish nazariyasi umumiy qoidalariga asosan, gazning mash'ala qilib yoqish usuli kinetik va diffuzion usullarga ajratiladi. Kinetik yondirishda gaz va havo yonishidan oldin aralashtiriladi.

Gaz va havo, avvalo gorelkaning aralashtirish qurilmasiga uzatiladi. Aralashmaning yonishi aralashtirgichdan tashqarida ro'y beradi. Bu holda jarayon tezligi kimyoviy reaksiyalar tezligi bilan chegaralanadi ya'ni $\tau_{yon} \approx \tau_{kim}$ bo'ladi. Diffuzion yonish gaz bilan havoning aralashish jarayonida ro'y beradi. Gaz havodan alohida holda ishchi hajmga yuboriladi. Bu holda jarayon tezligi gazning havo bilan aralashish tezligi bilan chegaralanadi, ya'ni $\tau_{yon} \approx \tau_{fiz}$. Diffuzion yonishning yana bir ko'rinishi aralash yonish (diffuzion-kinetik) bo'lib, bunda gaz dastlab ma'lum bir miqdordagi havo bilan (to'liq yonish uchun yetarli bo'lmagan) aralashadi. Shu yerga havoning qolgan qismi (ikkilamchi havo) alohida yuboriladi.

Qozon agregatlari o'txonalarida asosan kinetik va aralash yondirish usullari qo'llaniladi. Diffuzion usul ko'proq sanoat pechlarida qo'llaniladi. Gaz oqimining mash'alasida harakat usuliga qarab, mash'ala laminar va turbulent bo'lishi mum-

kin. Texnikada asosan turbulent yonish ishlatiladi. Gaz yoqilg'isining yondirish tartiblari 12.5-rasm tasvirlangan.



12.5-rasm. Gaz yoqilg'isining yondirish tartiblari.

a-gaz va havoning tashqarida aralashishi; b-to'liq ichki aralashish; v-qisman ichki aralashish;

k-kinetik yonish sohasi; d- diffuzion yonish soxasi.

Sanoat issiqlik energetikasida foydalanilayotgan asosiy suyuq yoqilg'i mazut hisoblanadi. Suyuq yoqilg'ining yonishi asosan bug'-gaz fazada ro'y beradi, bunga sabab shuki, uning qaynash temperaturasi o't olish temperaturasidan ancha past bo'lgani tufayli, u o't olishdan oldin bug'lanadi. Suyuq yoqilg'ini yondirish jarayonini quyidagi bosqichlarga ajratish mumkin:

- 1) yoqilg'ini isishi va bug'lanishi;
- 2) yonuvchan aralashmani hosil bo'lishi (yoqilg'i bug'larini havo bilan aralashishi);
- 3) yonuvchan aralashmaning o't olishi;
- 4) aralashmaning yonishi.

Yonishni jadallashtirish uchun yonuvchi elementlarni havo bilan tez va puxta aralashtirish lozim. Yonish uchun zarur bo'lgan havoni mash'alani asosiga

yuborilsa oksidlash reaksiyalari kuchayadi. Bug'-havo aralashmasining gomogen yonishi-kimyoviy jarayon, bug'lanish esa, o'zining tabiatiga ko'ra fizik jarayon. Shuning uchun yonishning pirovard tezligi va vaqti fizik yoki kimyoviy jarayonlarning jadalligi bilan belgilanadi. Agar hosil bo'layotgan bug'larning yonib bo'lish tezligi yoqilg'ining bug'lanish tezligidan ancha katta bo'lsa, u holda yonish tezligi sifatida bug'lanish tezligi olinadi va bunda $\tau_{yon} = \tau_{bug} = \tau_{fiz}$ bo'ladi. Teskari xolatda esa, yondirish jarayoni jadalligi butunlay kimyoviy reaksiyalar tezligiga bog'liq bo'ladi, ya'ni $\tau_{yon} = \tau_{kim}$. Suyuqlikning bug'lanishi, suyuq yoqilg'i yonish bosqichlari ichida eng uzoq davom etadigani hisoblanadi. Shuning uchun uni butunlay to'zitib yuborish kerak.

12.3. Yonish jarayonlarini hisoblash.

Yonishning kimyoviy formulalari asosida 1 kg yoqilg'i to'liq yonishi uchun zarur bo'lgan havoning nazariy miqdorini (V_0) aniqlaymiz.

1 kg qattiq yoki suyuq yoqilg'ida uglerod $C^i/100\text{kg}$, vodorod $H^i/100\text{kg}$, oltingugurt $S^i/100\text{kg}$, kislorod $O^i/100\text{kg}$ bo'ladi. 1 kg yoqilg'i to'liq yonishi uchun quyidagicha kislorod zarur :

$$M = \frac{8}{3} \cdot \frac{C^i}{100} + 8 \frac{H^i}{100} + \frac{S^i}{100} \quad (12.22)$$

1 kg yoqilg'ida $O^i/100 \text{ kg}$ kislorod borligini va havoda kislorod 23% (massa bo'yicha) ekanligini e'tiborga olib, 1 kg yoqilg'i to'liq yonishi uchun zarur bo'lgan havoning nazariy miqdorini hisoblab topish mumkin:

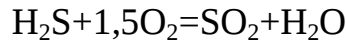
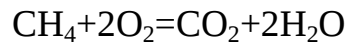
$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{100}{23} \left(\frac{8}{3} \cdot \frac{C^i}{100} + 8 \frac{H^i}{100} + \frac{S^i}{100} - \frac{O^i}{100} \right) = \\ &= 0,115(C^i + 0,375S^i) + 0,342H^i - 0,043O^i, \end{aligned} \quad (12.23)$$

bunda L_0 -zarur bo'lgan havoning nazariy miqdori, kg/kg.

Standart fizik sharoitda ($t=0^\circ\text{S}$, $p=1 \cdot 10^5 \text{Pa}$) . 1m^3 havo 1,293 kg bo'ladi. 1 kg yoqilg'i uchun havoning nazariy miqdori (m^3) quyidagiga teng.

$$V_0 = \frac{L_0}{1,293} = 0,0889(C^i + 0,375S^i) + 0,265H^i - 0,033O^i \quad (12.24)$$

Gaz yoqilg'isi uchun havo sarfi V_0 yonuvchan elementlarning hajmiy ulushlaridan kelib chiqqan holda va quyidagi yonish reaksiyalari asosida aniqlanadi:



$1m^3$ gaz yoqilg'isi to'liq yonishi uchun zarur bo'lgan xavoning nazariy miqdori (m^3/m^3) quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$V_0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 2CH_4 + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_m H_n - O_2 \right]$$

Ma'lumki, to'liq yonishdagi yoqilg'i maxsulotlari CO_2 , SO_2 , H_2O larning aralashmasidan iborat. Bulardan tashqari yonish maxsulotlari tarkibida N_2 va yonishda qatnashmagan havoning kislorodi bo'ladi. Yoqilg'i to'liq yonmasa, (challa yonsa) yonish maxsulotlari tarkibida uglerod oksidi, vodorod, metan va boshqa yonuvchan elementlar bo'lishi mumkin. Yonish mahsulotlari tarkibida ularning miqdori, odatda juda ozligi uchun bular deyarli xisobga olinmaydi. Yonish mahsulotlari hajmi V_{yo} ikki qismdan iborat:

Quruq gazlar $V_{q.g}$ va suv bug'lari V_{H_2O}

$$V_{yo} = V_{qg} + V_{H_2O} \quad (12.26)$$

$$U \text{ holda } V_{yo} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} = V_{O_2} \quad (12.27)$$

$$Tarkib \text{ foizi } CO_2 + SO_2 + N_2 + O_2 = 100\% \quad (12.28)$$

$$\text{Bunda } CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V_{K.2}} \cdot 100\%; \quad SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V_{K.2}} \cdot 100\% \text{ va hokazo.}$$

Hisoblashni soddalashtirish uchun quruq yoqilg'i mahsulotlari tarkibidagi uch atomli gazlar miqdorini birgalikda hisoblaymiz va RO_2 bilan belgilaymiz, ya'ni $CO_2 + SO_2 = RO_2$

U holda

$$V_{K.2} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} \quad (12.29)$$

Uch atomli gazlar miqdori quyidagiga teng:

$$V_{RO_2} = \frac{11}{3} \cdot \frac{C^i}{100\rho_{CO_2}} + 2 \frac{S^i}{100\rho_{SO_2}}, \quad (12.30)$$

Bunda $\rho_{CO_2}=1,977$ va $\rho_{SO_2} = 2,927$ – mos ravishda CO_2 va SO_2 larning zichliklari.

U holda

$$V_{RO_2} = 0,0186(S^i + 0,375S^i) \quad (12.31)$$

Havoning tarkibida 79% (hajm bo'yicha) azot bo'lgani uchun, yonish mahsulotlari tarkibida quyidagicha azot bo'ladi. (m^3/kg):

$$V_{N_2} = 0,79\alpha V_0 \quad (12.32)$$

Kislorod yonish mahsulotlari tarkibiga faqat ortiqcha havo bo'lsagina, kirib qoladi, u xavoda 21% (hajm bo'yicha) bo'lgani uchun uning miqdori quyidagiga teng (m^3/kg)

$$V_{O_2} = 0,21(V - V_0) = 0,21(\alpha - 1)V_0 \quad (12.33)$$

yonish mahsulotlaridagi quruq gazlar miqdori (m^3/kg) quyidagiga teng:

$$V'_{kg} = 0,0186(C^i + 0,375S^i) + (\alpha - 0,21)V_0 + 0,79\alpha V_0 \quad (12.34)$$

Yoqilg'i tarkibidagi azot butunlay yonish mahsulotlariga o'tishini hisobga olsak, u holda:

$$V_{kg} = 0,0186(C^i + 0,375S^i) + (\alpha - 0,21)V_0 + 0,008N^i \quad (12.35)$$

1 kg yoqilg'i yonganda xosil bo'lgan suv bug'lari miqdori yoqilg'idan chiqqan suv bug'lari va havo bilan kirgan suv bug'lari yig'indisiga teng:

$$V_{H_2O} = \frac{1}{\rho_{H_2O}} \left(9 \cdot \frac{H^i}{100} + \frac{W^i}{100} + W_c \right) \quad (12.36)$$

bu yerda $\rho_{H_2O} = 0,804 \text{ m}^3/\text{kg}$ -suv bug'i zichligi;

W_c - havo bilan o'txonaga kirayotgan suv bug'i massasi (8-10g/kg ga teng deb xisoblanadi);

ρ_{H_2O} va W_c qiymatlarini (12.36) formulaga qo'yib suv bug'i hajmini (m^3/kg) aniqlaymiz.

$$V_{H_2O} = 0,0124(9H^u + W^u) + 0,0161\alpha V_0 \quad (12.37)$$

Agar mazutni yoqishda bug' forsunkalari qo'llanilsa, u holda forsunka orqali uzatilayotgan suv bug'i miqdorini ham hisobga olish zarur. Yonish maxsulotlarining umumiy miqdori (12.37) va (12.35) formulalarni hisobga olgan holda (12.26) formuladan aniqlanadi.

Gaz yoqilg'isi uchun yonish maxsulotlari miqdori (m^3/m^3) quyidagiga teng:

$$V_{yo} = V_{RO_2} + V_{N_2} + (\alpha - 1)V_0 + V_{H_2O} \quad (12.38)$$

bu yerda

$$V_{N_2} = 0,79V_0 + 0,01N \quad (12.39)$$

$$V_{R_2O} = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + H_2S + \sum mC_mH_n) \quad (12.40)$$

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + 2CH_4 + H_2S + \sum 0,5nC_mH_n + 0,016V_0 + 0,124d_r) \quad (12.41)$$

bu yerda d_r gaz yoqilg'isining namligi, g/m^3 . Yoqilg'i chala yonsa, yonish maxsulotlari tarkibida yuqorida keltirilgan komponentlardan tashqari yana uglerod oksidi CO bo'ladi. U holda yonish maxsulotlari tarkibi (xajm bo'yicha) quyidagicha bo'ladi:

$$RO_2 + CO + N_2 + O_2 + H_2O = 100\% \quad (12.42)$$

yonish reaksiyasiga asosan:

$$V_{RO_2} + V_{CO} = 1,86 \frac{(C^i + 0,375S^i)}{100} \quad (12.43)$$

Shunday qilib, qattiq va suyuq yoqilg'i uchun yonish maxsulotlari hajmi (m^3/kg) quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$V_{kg} = 1,86 \frac{(C^i + 0,375S^i)}{RO_2 + CO} \quad (12.44)$$

gaz yoqilg'isi uchun (m^3/m^3)

$$V_{kg} = \frac{CO_2 + CO + CH_4 + \sum mC_mH_n}{CO_2 + CO + CH_4} \quad (12.45)$$

Issiqlik qurilmalarini hisoblash uchun gazlarning entalpiyasini bilish kerak. Qurilmaga kirishdagi va chiqishdagi entalpiyalar farqi foydali ishlatilgan issiqlikka teng bo'ladi. Gazlar entalpiyasini 1kg yondirilgan yoqilg'iga nisbatan olinadi va quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$h = \sum (Vc_p t)_k = V_{RO_2} + V_{O_2} (C_p t)_{O_2} + V_{N_2} (C_p t)_{N_2} + V_{H_2O} (C_p t)_{H_2O} \quad (12.46)$$

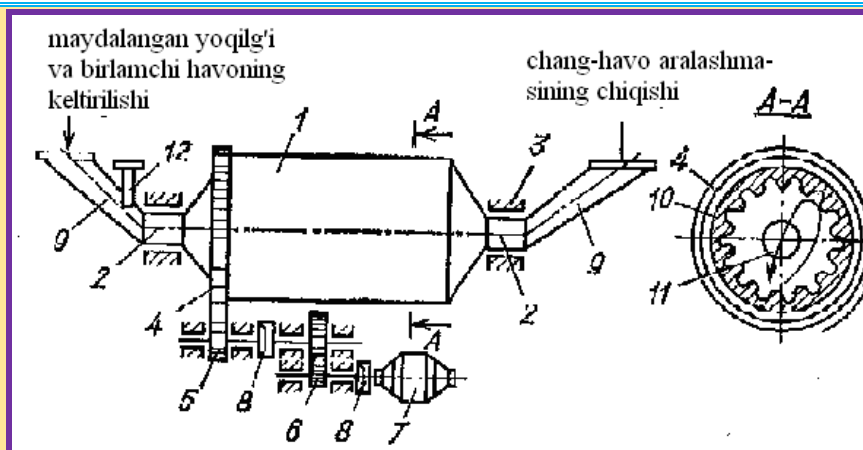
bu yerda $(c_p)_k$ -yonish maxsulotlarining o'zgarmas bosimdagi o'rtacha issiqlik sig'imi $J/(m^3 \cdot K)$.

12.4. Yoqilg'ini yondirishga tayyorlash.

Changsimon ko'mir yoqilg'i tayyorlash. Yirik energetik qurilmalarda changsimon va juda maydalangan yoqilg'i asosiy yoqilg'i hisoblanadi. U maxsus ko'mir tegirmonlarida antratsit, toshko'mir va qo'ng'ir ko'mir, torf hamda slanets bo'laklaridan va maydalaridan foydalanib tayyorlanadi. Yoqilg'ini maydalash uning sirtini keskin oshirib yuboradi va yanada to'liq yonishiga imkon tug'diradi.

Elektrostantsiyalarga yoki qozonxonalarga ko'mirning o'lchamlari turlicha bo'lgan (1-300 mm) bo'laklar ko'rinishida keladi. Ko'mir bo'laklari maydalash mashinalarida 15-25 mm gacha maydalanadi. Maydalangan ko'mir bo'laklari tegirmonlarga yuboriladi va u yerda o'lchami 0,1 – 1000 mkm gacha bo'lgan chang (kukun) holiga keltirilib, ko'mir changini yoqish gorelkasiga yuboriladi. Tegirmonlar quyidagi turlarga ajratiladi: Aylanish chastotasi $0,25-0,42 s^{-1}$ bo'lgan

sekin aylanadigan tegirmonlar. Bunday turdagi tegirmonlarga shar barabanli



12.6-rasm. Shar barabanli tegirmon.

1-baraban; 2- tsapfalar; 3-podshipniklar; 4-katta shesternya; 5-kichik shesternya; 6- reduktor; 7-elektrodivigatel; 8-ulash muftasi; 9- qo'zg'almas potrubkalar; 10- zirxli plitalar; 11- sharlarning harakat traektoriyasi; 12-separatordan qaytish.

tegirmon misol bo'la oladi(12.6-rasm).

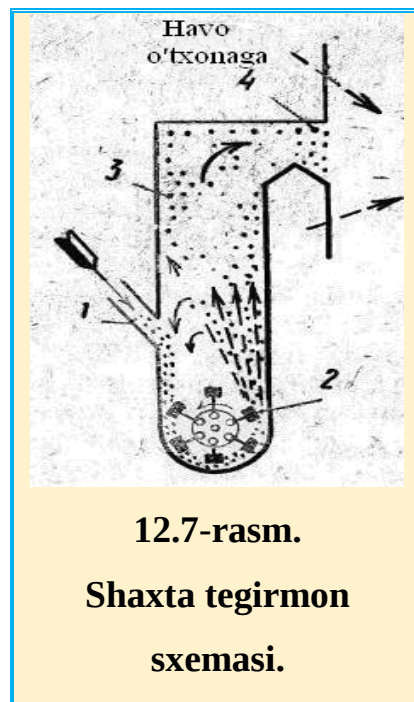
Diametri $\varnothing$ 2-4 m bo'lgan Silindrik baraban elektrodivigatel 7 va shesternyalar 4-6 yordamida aylanadi. Barabanning ichki qismiga yedirilishga chidamli marganetsli po'lat plitalar qoplangan. Barabanga diametri 30-40 mm li po'lat sharlar va maydalab kukunga aylantirilishi lozim bo'lgan yoqilg'i solinadi. Sharlar dumalab, yoqilg'ini urib kukunga aylantiradi. Bunday tegirmonlarda namligi yuqori bo'lgan qo'ng'ir ko'mir va torfdan tashqari barcha qattiq yoqilg'ilarni maydalash mumkin.

Aylanish chastotasi $0,85-1,3 \text{ s}^{-1}$ bo'lgan o'rtacha aylanadigan tegirmonlar. Ular ikki xil bo'ladi:

Aylanuvchi silindrli – silindrlar aylanayotgan plitalar ustida dumalab, yoqilg'ini ezadi va maydalaydi. Bunday tegirmonlarda uchuvchan moddalar miqdori o'rtacha va namligi ham o'rtacha bo'lgan toshko'mirlarni maydalash mumkin;

SHarli – bunday tegirmonlarda sharlar aylanuvchan xalqada dumalab, yoqilg'ini maydalaydi. Aylanish chastotasi $12,5-25\text{ s}^{-1}$ bo'lgan tez aylanuvchi tegirmonlar. Bularga quyidagilar kiradi:

To'qmoqli tegirmonlar. Bunda aylanib turadigan to'qmoqlar yordamida yoqilg'i maydalanadi.(12.7-rasm) Bunday tegirmonlarda namligi kam bo'lgan qo'ng'ir ko'mirlar maydalanadi.Tegirmon ventilyatorlar-parraklari marganetsli po'latdan tayyorlangan ventilyator tushayotgan yoqilg'i bo'laklarini maydalaydi. Bunday tegirmonlardan namligi yuqori bo'lgan qo'ng'ir ko'mirlarni va torfni maydalashda foydalaniladi. 12.7-rasmda to'qmoqli tegirmonning sxemasi ko'rsatilgan. Shaxta 3 ning tubida marganetsli po'latdan tayyorlangan to'qmoqcha 2 li rotor joylashgan. Shaxtaning ichki

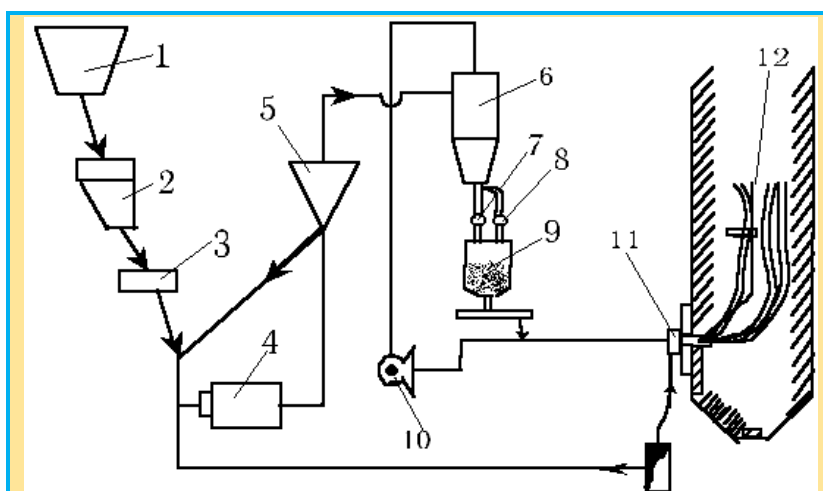


qismi zirx bilan himoya qilingan. Yoqilg'i patrubka 1 orqali tegirmon shaxtasi 3 ga solinadi va aylanib turadigan to'qmoqchalar 2 ga tushadi. To'qmoqcha 700-900 ayl/min. tezlik bilan aylanib, o'ziga tushayotgan yoqilg'ini parchalaydi va maydalaydi. Hosil bo'lgan yoqilg'i bo'laklari bilan chang aralashmasini qaynoq havo oqimi shaxtaning yuqorigi qismiga ilashtirib ketadi.

Yoqilg'ining yirik bo'laklari tegirmon shaxtasiga qaytib tushadi va yana maydalanadi. Qattiq yoqilg'ini changsimon holga keltirish alohida sxema yoki oraliq bunkerli sxema bo'yicha amalga oshiriladi. Alohida sxema bo'yicha chang bevosita tegirmondan o'txonaga o'tadi. Oraliq bunkerli sxemalarda ko'mir changining zahirasi bo'lishi nazarda tutiladi. Bu sxema eng ishonchli sxemadir, shu sababli mamlakatimizdagi yirik elektr stantsiyalarining qozonxonalarida keng ko'lamda qo'llaniladi. 12.8-rasmda chang tayyorlash usulining oraliq bunkerli sxemasi keltirilgan. Yoqilg'i bunker 1 dan tarozi 2 ga beriladi, so'ngra esa, ta'minlagich 3 ga uzatilib, undan tegirmon barabani 4 ga o'tadi. Barabanga xarorati $250-400^{\circ}\text{S}$ li qaynoq havo puflanadi. Bu yerda yoqilg'i quriydi va maydalanadi.

Havo changni tegirmondan separator 5 ga olib chiqadi, bu yerda chang fraktsiyalarga ajraladi. Tayyor chang separatordan tegirmon ventilyatori yordamida siklon 6 ga yo'naltiriladi, yoqilg'ining yaxshi maydalanmagan zarralari esa, tegirmonga qaytariladi. Siklonda changning 90%ga yaqini havodan ajraladi va cho'kadi, klapan 7 lar orqali oraliq bunker 9 ga yoki shnek 8 orqali boshqa bunkerga yo'naltiriladi.

Siklondagi o'zgina chang aralashgan havoni ventilyator so'rib oladi va aralashtirgichga yo'naltiradi, bu yerga bir vaqtning o'zida oraliq bunkeridan yoqilg'i changi ham beriladi. Tayyor chang yoqish uchun o'txona 12 ning gorelkasi 11 ga

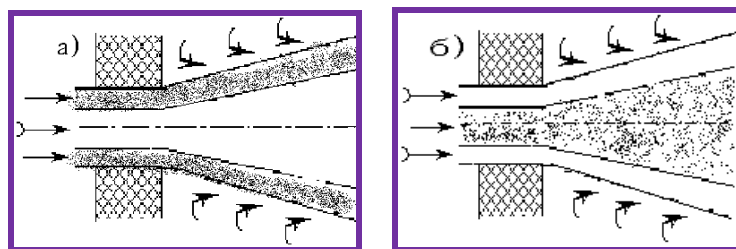


12.8-rasm. Oraliq bunkerli chang tayyorlash sxemasi.

puflanadi. Ko'mir changining sifati, asosan uning mayinlik darajasi, oxirgi namligi va portlash havfi yo'qligi bilan aniqlanadi.

Ko'mir changini yoqish gorelkasi. Changsimon yoqilg'ining tez va tejamli yonishi hamda hosil bo'ladigan mash'alaning barqarorligi asosan, ko'mir changining yonish kamerasiga purkab beradigan gorelkalarning ishlashiga bog'liq. Gorelkalar quyidagi talablarga javob berishi kerak: yoqilg'i bilan havoni yaxshi aralashtirishi lozim; yonuvchi aralashmaning yondirilishi puxta bo'lishi kerak; mash'ala o'txona kamerasini butunlay to'ldirishi kerak va gorelkani sozlash oson bo'lishi lozim. Changsimon yoqilg'ini yoqishda, asosan, gorelkalarning ikki xili: uyurmali (aralashma va ikkilamchi havo shiddat bilan uyurma hosil qilib harakatlanadi) va to'g'ri oqimli tirqishli gorelkalar ishlatiladi. Tirqishli gorelkalarda chang – havo aralashmasi o'txonaga tor tirqish orqali uzatiladi. Aralashmaning

bunday uzatilishida mash'alaning uzoqqa otilishi ancha ortadi. Bunday gorelkalar o'txona kamerasida qarama-qarshi yoki burchaklarga o'rnatiladi. Uyurmali gorelkalarda mash'ala uzunligi katta bo'lmaydi va ular o'txona kamerasining ro'parasidagi devorga o'rnatiladi. Chang havo aralashmasini va ikkilamchi havoni o'txonaga uzatish sxemasi 12.9-rasmda ko'rsatilgan.



12.9-rasm. Ko'mir changini yoqish gorelkalarining asosiy sxemalari.

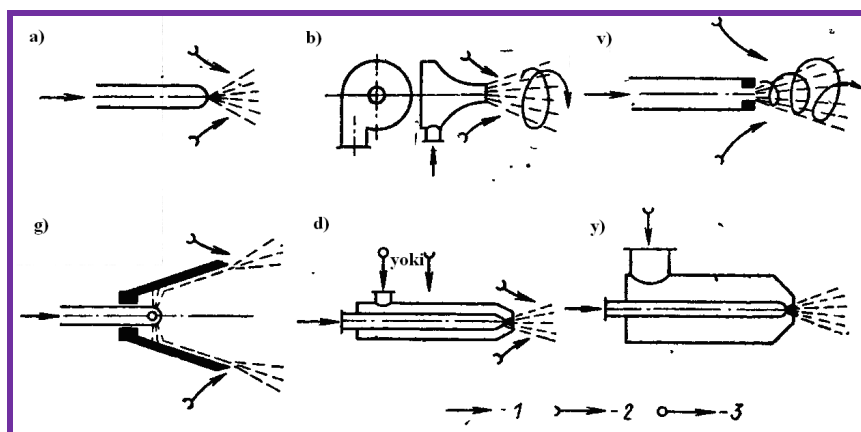
a,b- to'g'ri oqimli gorelkalar; v-uyurmali gorelkalar;

1-ikkilamchi havo; 2-chang-havo aralashmasi; 3-qaynoq gazlarning aylanishi.

12.9-rasmda (a,b) chang havoni va havoni to'g'ri oqimli tirqishli gorelkaga uzatish usullari ko'rsatilgan. Shu rasmda yana uyurmali gorelkaga chang havoni va havoni uzatish ko'rsatilgan. Chang havo aralashmasi markaziy quvur orqali uzatiladi, ikkilamchi havo esa, chekkadagi kanaldan uzatiladi.

Suyuq va gaz yoqilg'i yoqiladigan gorelka va forsunkalar. O'txonalarda yoqiladigan suyuq yoqilg'i gorelkaning tarkibiy qismi bo'lgan forsunkalar yordamida purkaladi va purkalgan yoqilg'i havo bilan yaxshi aralashib to'liq yonadi. Qozon qurilmalarida suyuq yoqilg'ilardan faqat mazut yoqiladi. Yaxshi purkalishi uchun mazut oldindan 140-160°S gacha isitib olinadi. U bir vaqtning o'zida mazut tashishni ham osonlashtiradi, chunki xarorat ko'tarilishi bilan mazutning qovushoqligi kamayadi. Mazut g'ilof-quvurli IAA larida bug' va issiq suv yordamida isitiladi. Mazutning qotib qolishining oldini olish uchun uni IAA va gorelka orasida uzluksiz aylanishi ta'minlanadi. Mazutni mayda qattiq zarralardan tozalash uchun, uning teshiklari soni xar 1 sm² da 5 ÷ 40 ta bo'lgan filtrlardan o'tkaziladi. Mazut forsunkalari purkash usuliga qarab to'rt guruxga ajratiladi: bug'li, havoli, kombinatsiyalangan va mexanikaviy.

12.10-rasmda qo'llanilayotgan forsunkalarning asosiy sxemalari ko'rsatilgan.



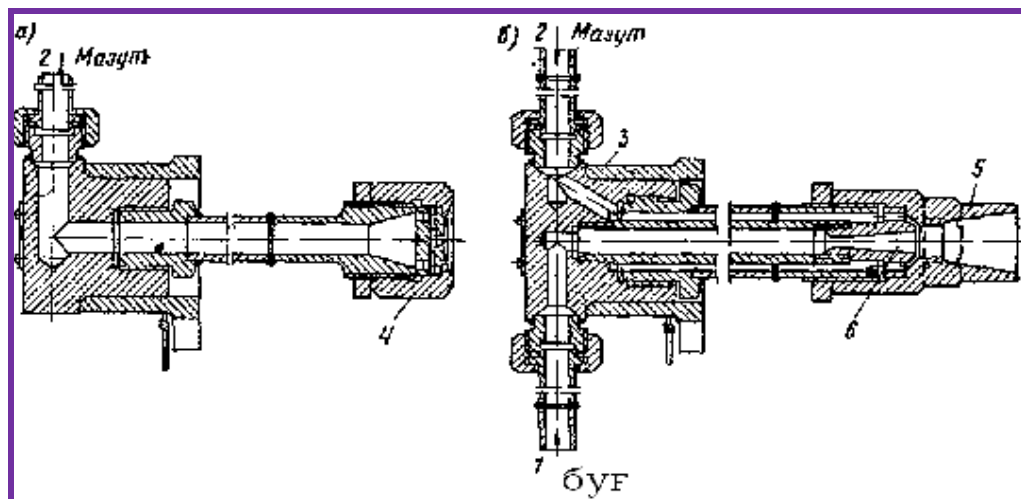
12.10-rasm. Mazut forsunkalarining asosiy sxemalari.

1-yoqilg'i; 2-havo; 3-bug'.

Mexanikaviy forsunkalarni to'g'ri oqimli, markazdan qochirma va rotatsion forsunkalarga bo'lish mumkin. To'g'ri oqimli forsunkalarda, yoqilg'i oqimi kichik diametrli soplo orqali o'tishida 1-2 MPa bosim bilan siqiladi va natijada u to'zg'itiladi(12.10-rasm,a). Markazdan qochirma forsunkalarda yoqilg'i markazdan qochirma kuchlar ta'sirida to'zitaladi (12.10-rasm, b,v). Rotatsion forsunkalarda (12.10-rasm,g) yoqilg'i tez aylanib sohib turuvchi stakan ichiga uzatiladi, u yerda yoqilg'i markazdan qochirma kuchlar ta'sirida yupqa plenka hosil qilib oqib chiqadi. Stakandan chiqaverishda yupqa plyonkaning birlamchi havo ilashtirib ketadi. Bug'li va havoli forsunkalarni bir guruxga – to'zg'itadigan muhitli forsunkalarga birlashtirish mumkin. Bug'li forsunkalarda (12.10-rasm, d)bunday muhit sifatida bosimi 0,4-1,6MPa bo'lgan suv bug'i ishlatiladi. Mazut forsunkaga 0.3-0,4MPa bosim ostida uzatiladi. Bug' oqimi tezligi qanchalik katta bo'lsa, yoqilg'i shunchalik mayda purkaladi. Aksariyat yoqilg'i forsunkalarida bug'ning kritik tezligiga erishiladi. Bug'li forsunkalarning tuzilishi mexanikaviy forsunkalarga qaraganda sodda lekin bug'ning sarfi katta bo'lganligi (1 kg mazutga 0,30-0,35 kg bug') va kuchli shovqin tufayli ular unumdorligi 3,3 kg/s gacha bo'lgan qozon agregatlarida ishlatiladi.

Havoli forsunkalarda to'zg'ituvchi muhit sifatida havo ishlatiladi. Bunday forsunkalarni past va yuqori bosimli forsunkalarga ajratish mumkin. Birinchi gurux forsunkalarida havoning bosimi 0,2-1 MPa ga teng bo'ladi(12.10-rasm,d), ikkinchi gurux forsunkalarida esa, havoning bosimi 0,002-0,008 MPa ga teng bo'ladi.

12.11-rasmda markazdan qochirma va bug'li forsunkalarning tuzilishi ko'rsatilgan.



12.11-rasm. Mazut forsunkalari.

a-markazdan qochirma: b-bug'li.

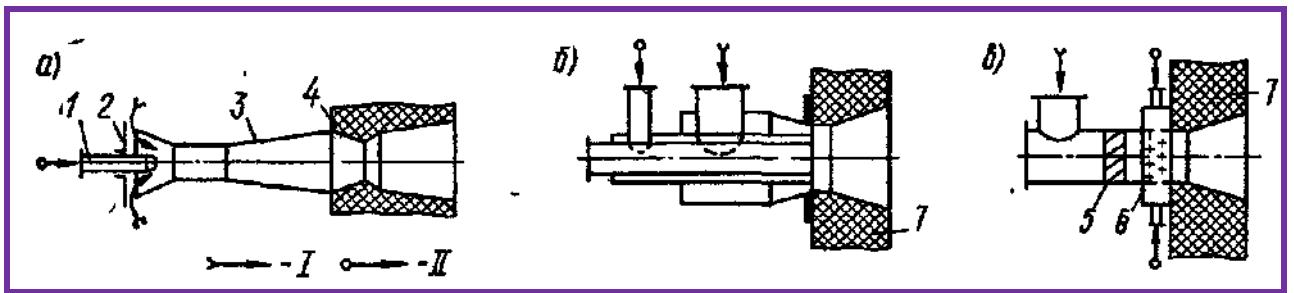
**1,2- bug' va mazut uchun quvurlar; 3-qobiq; 4-uzatish kanali; 5-nasadka;
6-soplo.**

Gaz gorelkalari ishlash usuliga qarab quyidagilarga bo'linadi:

Kinetik gorelkalar – bunda gaz havo bilan gorelkadan chiqishidan oldin to'liq aralashadi; Diffuzion – kinetik gorelkalar – bunda gaz havo bilan qisman aralashadi;

Diffuzion gorelkalar-bunda gaz havo bilan gorelkadan tashqarida aralashadi.

Havoni uzatish usuliga qarab gorelkalar injeksion va havo majburiy uzatiladigan (puflanadigan) gorelkalarga bo'linadi. Shunga asosan gorelkalar past bosimli (5kPa gacha), o'rta bosimli (5kPa-0,3 MPa) va yuqori bosimli (0,3MPa dan yuqori) gorelkalarga bo'linadi. 12.12-rasmda gaz gorelkalarining asosiy sxemalari ko'rsatilgan.



12.12-rasm. Gaz gorelkalari sxemalari.

1- gaz soplosi; 2-havo qopqog'i; 3-aralashtirgich; 4-sopol nasadka; 5-kurakli uyurmalantirgich; 6-gaz kollektori; 7-o'txonaning qoplamasi;

I-havo; II-gaz; a-injektsion gorelka; b- havo majburiy uzatiladigan gorelka.

Injektsion gorelkada (12.12-rasm,a) gaz soplodan chiqayotgan havoni so'radi va u bilan aralashadi. Gaz-havo aralashmasi gorelkaga bevosita qo'shilib ketgan o'tga chidamli materialdan tayyorlangan nasadkada yonadi. Gorelkadan o'tayotgan gazning sarfi tuzilishiga bog'liq ravishda 0,5 dan 1000m³/soat gacha o'zgaradi. Nasadkaning uzunligi 1m gacha, gaz-havo aralashmasining tezligi esa 30-80 m/s bo'lishi mumkin. 12.12-rasm (b) havo majburiy uzatiladigan oddiy gorelkaning sxemasi tasvirlangan. Gorelkada ichki quvurlar orasiga gaz uzatiladi. Tashqi quvurlar orasiga esa havo uzatiladi. Gaz ichki quvur orqali yondiriladi va shu orqali gorelkaning ishlashi kuzatilib turiladi. Gaz-mazut gorelkalari asosiy yoqilg'i gaz va zahiradagi yoqilg'i mazut bo'lgan ko'pgina xollarda qo'llaniladi. Bunday gorelkalarda gaz yoki mazutni aloxida va bir vaqtning o'zida ikkala yoqilg'ini yondirish mumkin. Lekin gaz va mazut birgalikda yoqilganda o'txona isroflanadi, ya'ni q_3 (kimyoviy) va q_4 (mexanik) isroflar ortib ketadi. Mazut forsunkasi gorelkaning markaziy kanali ichida joylashadi. Qozonlar, odatda ikki xil yoqilg'ini yoqish imkoniyatidan kelib chiqqan holda loyihalanadi. Masalan, changsimon yoqilg'i uchun o'txonalarda zahira yoqilg'isi sifatida asosan gaz ishlatiladi. Bunday xollarda ko'mir changini yoqish gorelkalari chang – gaz gorelkalariga o'zgartirilib, unga gaz yoqilg'isi uzatiladi.

Nazorat uchun savollar:

1. Qattiq yoqig'i tarkibini keltiring.
2. Gaz yoqilg'isi tarkibini keltiring.

3. Yoqilg'i turlari.
 4. Yonuvchan massa qanday elementlardan tashkil topgan?
 5. Kokslashni tushuntirib bering.
 6. Chala koks deb nimaga aytiladi?
 7. Yoqilg'ining yonish issiqligi.
 8. Shartli yoqilg'i deb nimaga aytiladi?
 9. Yonish reaksiyalarini keltiring.
 10. Chala yonish deb nimaga aytiladi?
- 

O'N UCHINCHI BOB

SANOAT PECHLARI VA O'TXONALARI

13.1. Sanoat pechlari. Sanoat pechlari haqida umumiy ma'lumot

Sanoat pechlarida yonish mahsulotlari – gazlar issiqlik tashuvchi vazifasini bajaradi. Ularning issiqligi energetik maqsadlarda emas, balki, texnologik maqsadlarda ishlatiladi.

Pechlar maishiy va sanoat pechlariga bo'linadi. Sanoat pechlarining asosiy vazifasi – materiallar va buyumlarga termik ishlov (materiallarni qizdirish va eritish, kulolchilik buyumlarini pishirish, non yopish, quritish va sh.k.) berishdir. Ular yuqori temperaturali jarayonlar kechadigan qurilmalar qatoriga kiradi. Masalan, metallarni marten pechlarida eritish uchun 1800-2000 °S temperatura zarur bo'ladi.

Temirchilik pechlarida po'latlar 1300 – 1500 °S temperaturada qizdiriladi, o'tga chidamli materiallar esa, 1500 – 1800°S temperaturalarda pishiriladi. Pechlar ishlab chiqarishning ko'p sohalarida (metallurgiya, mashinasozlik, oziq – ovqat va kimyo sanoati, qurilish materiallari va boshqalar) keng ko'lamda ishlatiladi. Sanoat pechlarida asosiy issiqlik manbai – organik yoqilg'idir. Elektr pechlari ham hozirgi vaqtda keng qo'llanilmoqda. Bugungi kunda sanoat pechlarining umumiy qabul qilingan aniq bir tasnifi yo'q. Masalan, ularni quyidagicha tasniflash mumkin:

1. Texnologik vazifasiga ko'ra: Eritish pechlari – bularda metallar, minerallar, shisha va shu kabilar (domna va marten pechlari, rangli metallar eritish pechlari va shu kabilar) eritiladi;

Qizdirish pechlari – bularda metallarga ishlov berishdan oldin ular qizdiriladi (temirchilik pechlari), termik pechlar –bularda materiallarga termik ishlov berish maqsadida ular qizdiriladi;

kuydirish (pishirish) pechlari – bularda turli hil materiallar (sopol, oxak, tsement) kuydiriladi;

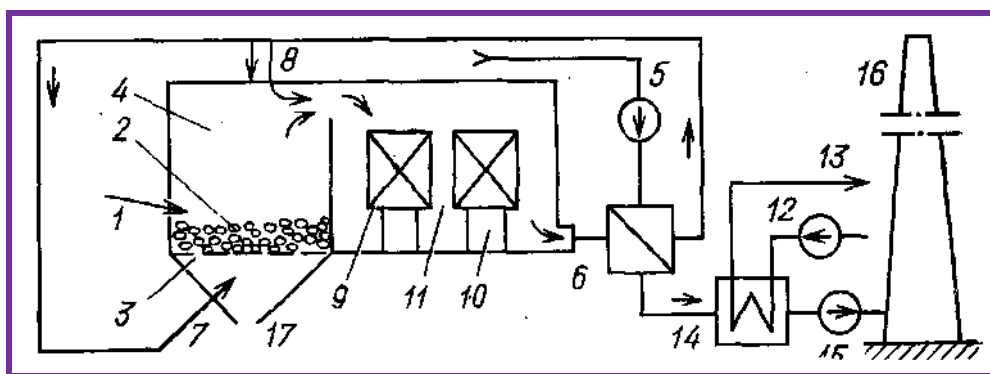
quritish pechlari - bularda materiallardan namlik chiqarib yuboriladi, bo'yalgan buyumlar quritiladi.

2. Energiya ta'minotiga ko'ra: yoqilg'i pechlari – bular ham o'z navbatida qattiq, suyuq va gaz yoqilg'i pechlariga bo'linadi.

Elektr pechlari – bularda elektr energiyasi isiqlik energiyasiga aylanadi. Bu pechlar ham quyidagicha ajratiladi: elektr qarshilik pechlari, yoy, induktsion, kontakt, elektron hamda yuqori chastotali pechlar.

3. Ishlash vaqtiga qarab: uzluksiz ishlaydigan (13.1-rasm); davriy ishlaydigan.

4. Ishchi yuzaning shakliga qbara: kamerali (13.1-rasm); tonnelli; xalqasimon (13.2-rasm) – bu pechlar pishiq g'isht ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.



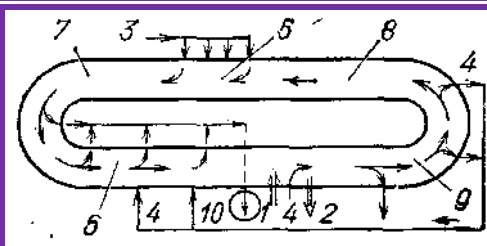
13.1-rasm. Sanoat pechining umumiy sxemasi.

1-yoqilg'ini uzatish; 2- yoqilg'i qatlami; 3-panjara; 4-o'txona (qatlamli) 5-puflash ventilyatori; 6- regenerativ havo isitkich; 7-birlamchi havo; 8-ikkilamchi havo; 9-termik ishlov berilayotgan buyum; 10-buyumni tashish qurilmasi; 11-pechning ishchi yuzasi; 12-ta'minot nasosi; 13-qaynoq issiqlik tashuvchi (suv, bug'); 14-qozon utilizator uzatish; 15-so'rish ventilyatori; 16-mo'ri; 17- kul va shlakni chiqarib yuborish.

Shaxta pechlar – bular bo'yi cho'zilgan, ko'ndalang kesimi yumaloq, yassi yoki to'g'ri burchakli bo'lgan inshootdir. Bunday pechlarga domna pechlari misol bo'ladi.

Sanoat pechi tuzilishini kamerali pech misolida ko'rib chiqaylik (13.1 - rasm)

Bu yerda issiqlik manbai sifatida panjarali cho'g'donda yondiriladigan qattiq yoqilg'idan foydalaniladi. Lekin, bizga ma'lumki eng qulay yoqilg'i gaz yoki suyuq yoqilg'i hisoblanadi. Qatlamli o'txona 4 dagi panjarali cho'g'don 3 ostiga puflash ventilyatori 5 orqali birlamchi havo 7 o'tkaziladi. Ikkilamchi havo 8 ni o'tkazish bilan pechning ishchi yuzasi 2 dagi temperatura boshqarilib turiladi. Qurilmaning F.I.K.ni oshirish maqsadida qozon utilizator 14 o'rnatiladi. Qozonga pechda ishlab



13.2-rasm. Xalqasimon

pechning sxemasi.

**1-yuklash; 2-tushurish; 3-
yoqilg'i; 4- havo; 5-kuydirish
sohasi; 6-sovutish soxasi; 7-
toblash sohasi; 8-isitish sohasi;
9-quritilish sohasi; 10-puflash.**

bo'lgan qaynoq tutun gazlari keladi. Qozonga ta'minot nasosi 12 orqali ta'minot suvi uzatiladi. Olingan bug' yoki qaynoq suv 13 isitish va elektr energiyasi olish uchun ishlatilishi mumkin.

Sanoat pechining asosiy ko'rsatkichlariga pechning F.I.K., η_p , yoqilg'ining solishtirma sarfi B_p , issiqlikning solishtirma sarfi q_p va issiqlik unumdorligi Q_p lar kiradi:

$$B_p = Q_f / Q_k^i \eta_p \tau [m^3 / s]; \quad Q_p = B_p Q_k^i [BT]; \quad q_p = B_p Q_k^i / G_p,$$

bu yerda G_p – pechning maxsuloti, kg/s; Q_f – foydalanilgan issiqlik.

Sanoat pechlari uchun yuqoridagi ko'rsatkichlarning o'rtacha qiymati quyidagiga teng:

$$\eta_p = 5 \div 70\%; \quad G_p = 0,0003 \div 0,3 \text{ kg} / \text{s};$$

$$V_p = 0,003 \div 0,03 \text{ m}^3 / \text{s}; \quad q_p = 1000 \div 10\,000 \text{ J/kg}.$$

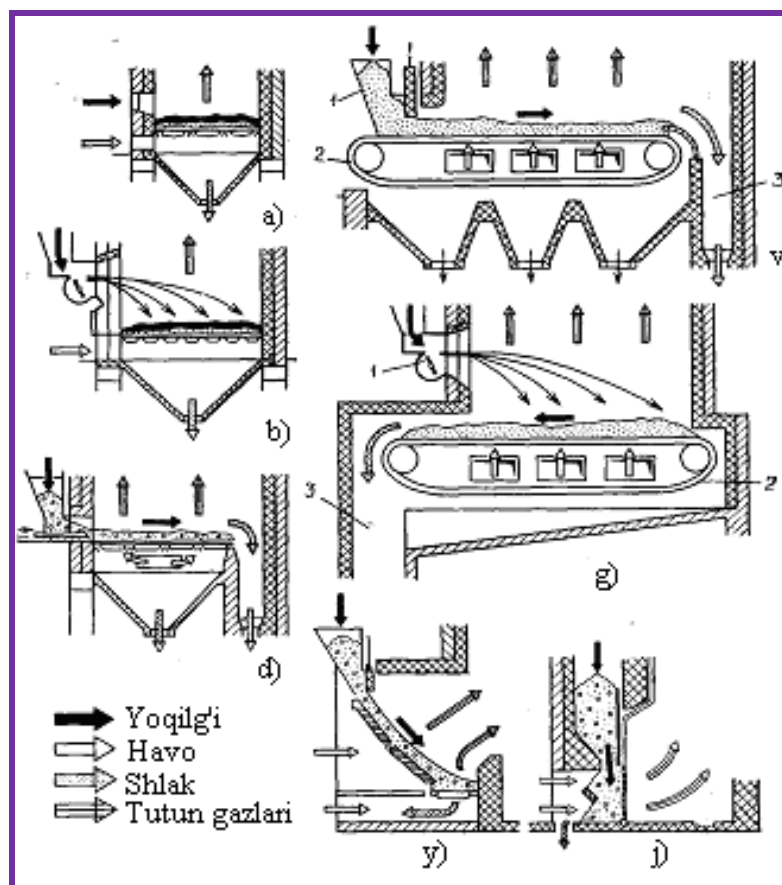
13.2. O'txona qurilmalari

Yoqilg'ining yonish jarayoni kechadigan qurilma o'txona deyiladi. Yonish jarayonining borishini ta'minlaydigan va boshqaradigan uskunalar majmui o'txona qurilmasi deyiladi. Har qanday o'txonani yondirish qurilmasi bilan o'txona bo'shlig'i (kamerasi) ning qo'shilmasidan iborat deb qarash mumkin. Qattiq

yoqilg'ini yoqishda yoqilg'i bo'laklarini tutib turadigan panjarali cho'g'don yondirish qurilmasi bo'lib xizmat qiladi. Suyuq va gaz holatidagi yoqilg'ini yoqishda o'txonaga to'zitalgan yoqilg'ini va yonish uchun zaruriy havoni purkab beradigan forsunka yoki gorelkalar yondirish qurilmasi bo'ladi. O'txona va uning yo'llarida qozonni isish sirtlari joylashadi, ular o'txonada yoqilg'i yonganda hosil bo'ladigan issiqlikni o'ziga oladi. Hozirgi o'txonalarda yoqilg'i shunchalik yuqori temperaturada yonadiki, yoqilg'ining yonishi natijasida hosil bo'lgan kul suyuqlanib shlakka aylanadi. O'txonaning yuqori temperaturasi va o'txona devoriga o'tirib qolgan suyuqlangan shlak ta'sirida o'txonaning ichki qoplamasi tez yemirilishi mumkin. Bundan tashqari, tutun gazlar bilan birga chiqib ketayotgan kulning suyuq zarralari isitish sirtlariga o'tirib, issiqlik uzatilishini yomonlashtiradi. Shu sababli o'txona devorlari ekranlanadi, ya'ni ularning oldiga ichida suv aylanib yuradigan metall quvurlar o'rnatiladi. Yoqilg'ini yoqish usuliga qarab o'txonalar qatlamli va kamerali o'txonalarga bo'linadi. Qatlamli o'txonalarda qattiq yoqilg'i qatlam usulida yoqiladi. Kamerali o'txonalar changsimon holidagi qattiq yoqilg'i, suyuq va gaz holidagi yoqilg'ini yoqishga mo'ljallangan. Kamerali o'txonalar mash'alali va uyurmali o'txonalarga bo'linadi.

Qatlamli o'txonalar. Qatlamli o'txonaning asosini panjarali cho'g'don tashkil etadi. Panjarali cho'g'don ustiga ma'lum qalinlikda qattiq yoqilg'i teng joylashtiriladi va panjara ostidan yonish uchun zarur bo'lgan havo tabiiy ravishda yoki majburan uzatiladi.

Panjarali cho'g'don yoqilg'ini tutibgina qolmasdan yoqilg'iga havoni o'tkazish, kul va shlakni kulxona tomonga uzluksiz o'tkazib turish vazifalarini ham bajaradi. Cho'g'dondagi hamma teshik va tirqishlarni ko'ndalang kesimlari yig'indisi panjaraning jonli kesimi deyiladi. Panjarali cho'g'don o'lchamlari yoqilg'i turi va uning bo'laklarining katta kichikligiga mos ravishda tanlanadi. Cho'g'don asosan cho'yandan quyib ishlanadi va yuzasi katta bo'lganda, u bir necha bo'lakdan tashkil topadi.



13.3-rasm. Qatlamli o'txonalar sxemasi

a-gorizontaal panjarali o'txona; b-tashlagichli o'txona; v-zanjirli o'txona; g-zanjirli teskari yo'lli va tashlagichli o'txona; d-tebranib turadigan cho'g'donli o'txona; ye-qiya cho'g'donli o'txona; j-jadal yonadigan o'txona (V.V.Pomerantsov sxemasi); 1-bunker; 2-zanjirli cho'g'don; 3-shlak bunkerlari;

Qatlamli o'txonalarning (13.3-rasm) quyidagi turlari mavjud:

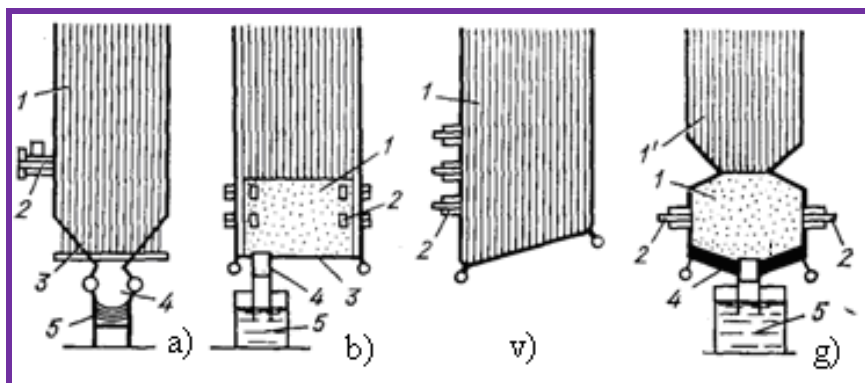
Qo'zg'almas cho'g'donli va qo'zg'almas qatlamli o'txonalar (13.3-rasm, a,b); yoqilg'i qatlamini aralashtirib harakatlanadigan cho'g'donli o'txonalar (13.3-rasm, v,g); Qo'zg'almas cho'g'don ustida harakatlanuvchi qatlamli o'txonalar (13.3-rasm, d, ye, j).

Hozirgi paytda qo'lda xizmat ko'rsatiladigan o'txonalar (13.3-rasm, d) juda kam uchraydi. Ulardan unumdorligi kam (1-2m/soatgacha) bo'lgan qozonlarda foydalaniladi. Faqat ba'zi jarayonlar mexanizatsiyalashgan o'txonalar yarim mexanizatsiyalashgan deyiladi. Bunday o'txonalarda mexanizatsiyalashgan tashlagichlar (13.3-rasm b) ishlatiladi, ular juda mashaqqatli ishdan - yoqilg'ini cho'g'donga qo'lda tashlashdan ozod qiladi. Bunday o'txonalarni qo'llash qozon

unumdorligini 6,5 – 10m/soatgacha oshirish imkonini beradi. Mexanizatsiyalashgan zanjirli cho'g'donni qo'llash qozonning bug' unumdorligini 150 m/soat gacha oshirish imkonini beradi (13.3 – rasm, v). Zanjirli cho'g'don yoqilg'i qatlam – qatlam qilib yoqiladigan hozirgi zamon kuchli o'txona uskunalarining asosiy qismi hisoblanadi. Yoqilg'i bunker 1 dan harakatlanayotgan zanjirli cho'g'don 4 ga tushadi. U bir – biriga parallel joylashgan uzluksiz ikkita zanjirdan iborat bo'lib, ularga cho'g'donlar mahkamlangan.

Yoqilg'i uchun zarur havo cho'g'don ostidan kiritiladi. Cho'g'donni boshlanish qismida yoqilg'i qizdiriladi. Qizigan yoqilg'i ozgina ortiqcha havo bilan yonadi. Cho'g'donni oxirida kuygan shlak shlak bunker 3 ga to'kiladi.

Teskari yo'lli zanjir - panjarali o'txonalarda (13.3 – rasm, g) toshko'mir va qo'ng'ir ko'mirlarni yoqish mumkin. Yoqilg'ini aralashtirish va kul hamda shlakni qisman yo'qotib turish uchun o'txonaga (13.3 – rasm, d) tebranib turadigan cho'g'donlar o'rnatiladi. Bu cho'g'donlar vaqti – vaqti bilan tebranib, shlakning oralarini bo'shatib uni kulxonaga tushiradi. Cho'g'don tebranganda yoqilg'i aralashib yonish yaxshilanadi. Qiya cho'g'donli o'txonalar (13.3 – rasm, ye) bug' unumdorligi 2,5 – 20 m/soat bo'lgan qozonlarda yog'och chiqindilarini yoqish uchun mo'ljallangan. Jadal yonadigan o'txonalar bug' unumdorligi 6,5 t/soat gacha bo'lgan qozonlarda torflarni yoqish uchun qo'llaniladi. Qatlamli o'txonalarning asosiy kamchiligi yonish yuzasi kichikligi tufayli uning quvvatini cheklanganidadir. Kamerali o'txonalar (mash'alali) changsimon, suyuq va gaz holidagi yoqilg'ini yoqishga mo'ljallangan. Qattiq yoqilg'i maxsus tegirmonlarda kun holiga keltirilib, havo oqimi bilan birgalikda o'txonaga uzatiladi. Kamerada yoqilg'i muallaq holatda yonadi (13.4-rasm). Kamerada yoqilg'i bilan birga kiradigan havo birlamchi havo deyiladi.



13.4 – rasm. Kamerali (mash'alali) o'txonalar sxemasi.

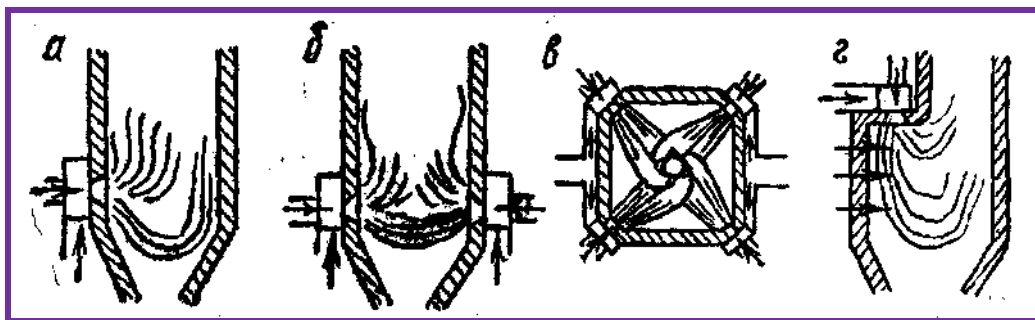
a – qattiq shlakli changsimon yoqilg'i yoqish uchun bir kamerali o'txona; b – suyuq shlakli changsimon yoqilg'i yoqish uchun bir kamerali o'txona; v – suyuq va gaz yoqilg'isi yoqish uchun o'txona; g – changsimon yoqilg'i yoqish uchun ikki kamerali o'txona;

Yoqilg'ini to'liq yonishi uchun zaruriy havoning bir qismi kameraga qo'shimcha ravishda beriladi. Bu havo ikkilamchi havo deyiladi. O'tga chidamli g'ishtdan ko'tarilgan o'txona kamerasi 1 ga gorelkalar 2 orqali yoqilg'i va havo aralashmasi uzatiladi. Bu yerda aralashma alangalanadi va yonib tomom bo'lib, yuqori temperaturali mash'alani hosil qiladi. O'txonadan chiqishda yonish mahsulotlari temperaturasi pasayadi, chunki mash'ala radiatsiya tufayli issiqlikni jadal ravishda isish sirtlariga (quvurlar to'plamiga) beradi. Ko'mir changini yoqish uchun mo'ljallangan kamerali o'txonalar asosan gorelkalarning joylanishi va shlakni chiqarib tashlash usuliga ko'ra bir-biridan farqlanadi. Shlakni chiqarib tashlash usuliga ko'ra o'txonalar shlak quruq (13.4-rasm, d) va suyuq holda chiqarib yuboriladigan o'txonalarga bo'linadi. Shlak quruq holda chiqarib yuboriladigan o'txonalarda ko'mir changining yonishidan hosil bo'lgan kulning 80-85% i tutun gazlar bilan chiqib ketadi. Qolgan 15-20% i shlakka aylanadi va o'txonaning pastki qismiga shlak varonkasi 3 ga tushadi. Suyuqlangan shlak zarralari sovuq varonkaning sirtiga tegib qotadi va shlak shaxtasiga to'kiladi.

Shlak suyuq holda chiqarib tashlanadigan o'txonalarda kulning 90% ga yaqin asosiy qismi suyuq shlakka aylanadi va shlak vannasiga oqib tushadi.

Suyuq va gaz xolidagi yoqilg'ini yoqishga mo'ljallangan kamerali o'txonalardan shlakni chiqarib tashlash qurilmalari bo'lmaydi. (13.4-rasm,v), shuning uchun un-

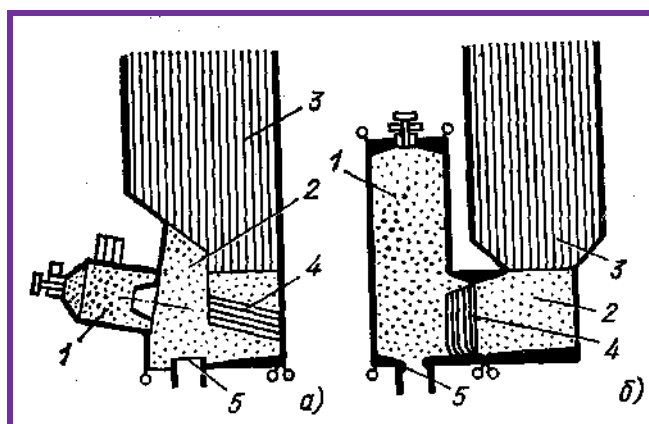
ing osti gorizontal yoki sal-pal qiya qilinadi. 13.5-rasmda kamerali o'txonada gorelkalarning joylashtirish sxemalari ko'rsatilgan.



13.5-rasm. Gorelkalarning joylashish sxemasi.

O'rtacha quvvatli qozon qurilmalari uchun asosan gorelkalar o'txonaning old tomoniga va qarama-qarshi ikki tomonga (13.5-rasm, a,b), yirik qozon qurilmalarida esa burchagiga (13.5-rasm,v) joylashtiriladi. Gorelkalar o'txonaning shipiga (13.5-rasm,g) kamdan-kam hollarda o'rnatiladi.

Uyurmali o'txonalar maydalangan ko'mirni hamda mazutni yoqish uchun mo'ljallangan (13.6 - rasm). Maydalangan ko'mir havo bilan birga uyurmali kamera 1 ga beriladi. Kameraga yana yon tomondan ikkilamchi havo beriladi, u 100 m/s tezlik bilan kiradi. Kamerada yonish mahsulotlarining aylanuvchan oqimi hosil bo'lib, bu oqim yoqilg'ining yirik donalarini kamera devorlariga otadi va ular bu yerda qizigan havo oqimlari ta'sirida gazga aylanadi.



13.6 – rasm. Uyurmali o'txonaning sxemasi.

a – gorizontal uyurmali o'txona; b – vertikal uyurmali o'txona.

Uyurmali kameradan yonish mahsulotlari yoqilg'ining yonib bo'lmagan zararlari bilan birga butunlay (oxirigacha) yonish kamerasi 2 ga, keyin radiatsion soha

3 ga o'tadi. Suyuq shlak tomchilari shlak tutib qoladigan to'plam 4 ga yopishib qoladi va undan oqib shlak vannasi 5 ga o'tadi.

Uyurmali o'txonalarning afzalliklari quyidagilardir:

1. Yoqilg'ining kam ortiqcha havo (1,05–1,1) bilan yonishi, bu hol issiqlikning chiqib ketayotgan gazlar bilan isrof bo'lishini kamaytiradi;
2. Maydalangan ko'mirda (changsimon ko'mir o'rniga) ishlash mumkin;
3. Yoqilg'ini kuli o'txonada 80 – 90 % ushlab qolinadi.

Kamchiliklariga quyidagilar kiradi:

1. Namligi ko'p bo'lgan ko'mirlarni va uchuvchan moddalar kam chiqadigan ko'mirlarni yoqish qiyin.
2. Puflash uchun energiya ko'p sarf bo'ladi.

O'txona qurilmalarining issiqlik-texnikaviy ko'rsatkichlari. O'txona bo'shlig'ining solishtirma issiqlik kuchlanishi o'txona ishini tavsiflaydigan asosiy kattalik hisoblanadi. Shu kattalikka asosan o'txonani loyixalash va qurish masalalari yechiladi, hamda uning ishining samaradorligi aniqlanadi. Bu kattalik Q/V_o nisbat bilan ifodalanadi va $1m^3$ o'txona bo'shlig'ida vaqt birligi ichida ma'lum bir miqdorda yoqilg'i yoqilganda ajralib chiqqan issiqlik miqdoriga teng.

$$Q_v = Q/V_o = Q_q \beta / V_o [Vt/m^3] \quad (13.1)$$

Bu yerda β -yoqilg'ining sarfi, kg/s; Q_q^i -quyi yonish issiqligi, kJ/kg.

Agar Q_v ning qiymati amalda aniqlangan ma'lum bir qiymatdan katta bo'lsa, u holda o'txonadagi yoqilg'i to'liq yonmaydi. Qozon qurilmalarini ishlatish tajribasi shuni ko'rsatadiki, turli xil yoqilg'i, va yondirish usullari va o'txona turlari uchun Q_v ning qiymati keng oraliqda o'zgaradi. Masalan, qo'lda xizmat ko'rsatiladigan qatlamli o'txonalar uchun $Q_v=290\div350$ kVt/ m^3 , mexanizatsiyalashgan qatlamli o'txonalar uchun $Q_v=290\div465$ kVt/ m^3 , kamerali o'txonalarda ko'mir changi yoqilganda $Q_v=145\div230$ kVt/ m^3 , $Q_v=230\div460$ kVt/ m^3 , qatlamli o'txonalar uchun o'txona ishining jadalligini tavsiflovchi yana bir kattalik cho'g'donning solishtirma issiqlik kuchlanishi kiritiladi:

$$Q_R = Q/R = Q_q^i \beta / R [\beta_T / M^2], \quad (13.2)$$

Bu yerda Q_R -cho'g'donning to'liq yuzasi, m^2 . Bu kattalik, $1 m^2$ yonish yuzasida vaqt birligi ichida ma'lum bir miqdordagi yoqilg'i yonganda ajralib chiqqan issiqlik miqdoriga teng. Q_R kattalik yoqilg'i turiga, uning bo'laklari kattaligiga, kul miqdoriga va shu kabilarga bog'liq bo'ladi va keng oraliqda – $350 \div 1100 kVt/m^2$ o'zgaradi.

Nazorat uchun savollar:

1. Sanoat pechlarining turlari.
2. Sanoat pechi qanday ishlaydi?
3. Sanoat pechining asosiy ko'rsatkichlari.
4. Yoqilg'i sarfi qanday aniqlanadi?
5. O'txona turlari.
6. O'txonaning asosiy ko'rsatkichlari.
7. Kamerali o'txonalar.
8. Uyurmali o'txonalar qanday ishlaydi?
9. Kamerali o'txonalarning qanday afzalliklari bor?
10. Uyurmali o'txonalarning afzalliklari va kamchiligi.
11. O'txona qurilmalarining issiqlik ko'rsatkichlari.

O'N TO'RTINCHI BOB

QOZON QURILMALARI

14.1. Qozon qurilmasi, uning tuzilishi va ishlash tartibi

Issiq suv va bug' ishlab chiqarish uchun mo'ljallangan inshoot va qurilmalar majmui qozon qurilmasi deb aytiladi. Qozon qurilmasi qozon agregati bilan qo'shimcha qurilmalardan tashkil topadi.

O'txonada yoqilgan yoqilg'idan ajralgan issiqlik hisobiga bosim ostida issiq suv va bug' hosil qiladigan uskunalar majmui qozon agregati deyiladi. Qozon agregati tarkibiga quyidagilar kiradi: o'txona qurilmasi (gorelkalar bilan kamera); qozon agregatining asosiy qismlaridan biri bo'lgan bug' qozoni, unda bug' hosil bo'ladi; bug' berilgan parametrgacha qizdiriladigan bug' qizdirgich; bug' qozoniga beriladigan suvni isitish uchun mo'ljallangan suv ekonomayzeri va yoqilg'ini yoqish uchun o'txonaga beriladigan havoni isituvchi havo isitkich. Qozon qurilmasining yordamchi qurilmalari jumlasiga mo'ri, shlak va kul chiqaradigan qurilmalar, kulni tutib qolish qurilmalari, karkas, ichki qoplama va boshqalarni kiritish mumkin.

Qozon qurilmasi ishlab chiqargan mahsulot turiga ko'ra bug' qozonlari, suv isitadigan qozonlar va bug'-suv isitadigan qozonlarga bo'linadi. Bug'-suv isitadigan qozonlarda bir vaqtning o'zida yoki har xil vaqtda bug' va issiq suv ishlab chiqariladi, lekin bunday turdagi qozonlar kam qo'llaniladi. Hozirgi vaqtda sanoatda qozon-utilizatorlar keng qo'llaniladi. Bunday qozonlarda issiqlik manbai sifatida texnologik jarayonlarning ikkilamchi energiya manbalari (masalan, sanoat pechlarining chiqib ketayotgan gazlari), metallurgiya zavodlaridan va domna pechlaridan chiqqan tutun-gaz aralashmalari ishlatiladi.

Qozon qurilmasining asosiy ish tavsiflariga quyidagilar kiradi:

1. Bug' unumdorligi (qozonning quvvati), bu vaqt birligida hosil bo'lgan bug' miqdori bilan aniqlanadi.
2. Bug'ning parametrlari (bosim va o'ta qizish temperaturasi).
3. Qozon agregatining F.I.K.

Qozon qurilmalarini quyidagi belgilariga ko'ra tavsiflash mumkin:

1. Bug' unumdorligiga ko'ra:

- a) bug' unumdorligi past $-(0,01-5,5 \text{ kg/s})$;
- b) bug' unumdorligi o'rtacha $-(30 \text{ kg/s gacha})$;
- v) bug' unumdorligi yuqori $-(500-1000 \text{ kg/s gacha})$;

2. Bug' bosimiga ko'ra:

- a) past bosimli $-(P=0,8\div 1,6 \text{ MPa})$;
- b) o'rta bosimli $-(P=2,4\div 4 \text{ MPa})$;
- v) yuqori bosimli $-(P=10\div 14 \text{ MPa})$;
- g) o'ta yuqori bosimli $-(P=25\div 31 \text{ MPa})$

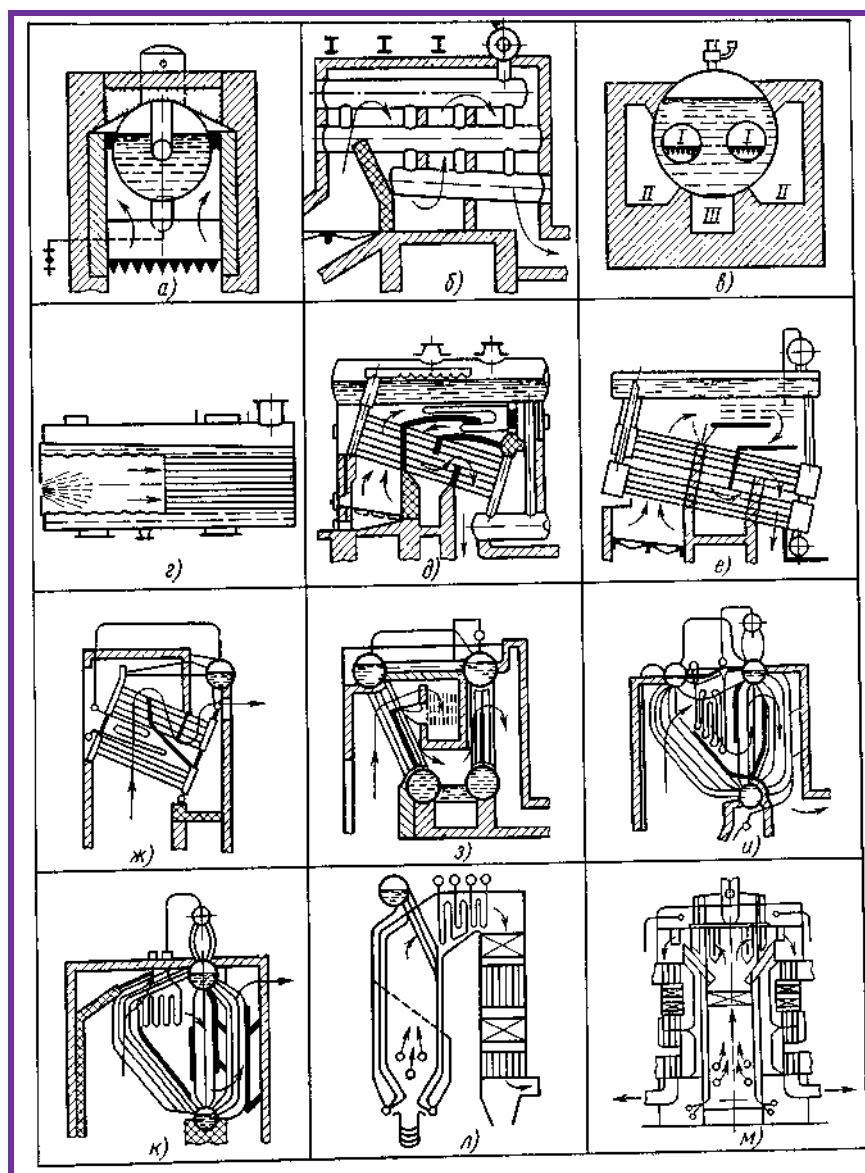
3. Ishlatilishiga ko'ra:

- a) Energetik qozon qurilmalari, bular issiqlik elektr stantsiyalarining bug' turbinalarini bug' bilan ta'minlaydi;
- b) Sanoat qozon qurilmalari, bular sanoat ehtiyojlari (issiqlik apparatlari, issiqlik almashinuv apparatlari, mashinalarning bug' uzatmalari va shu kabilar) uchun bug' ishlab chiqaradi;
- v) Isitish qozon qurilmalari, bular mahalliy qozon qurilmalari bo'lib, qozon qurilmasi yaqinida joylashgan binolarni issiq suv bilan ta'minlaydi.
- g) Issiqlik–energetik qurilmalar, bularda issiqlikning asosiy qismi elektr energiyasi olishga sarflanadi, kamroq qismi isitish va turli-tuman texnologik jarayonlarni bajarish uchun yuboriladi.

Suv isitadigan qozonlarning issiqlik unumdorligi $4\div 180 \text{ Gkal/soat}$ bo'lishi mumkin. Issiqlik unumdorligi 30 Gkal/soat bo'lgan qozonlarda, suvning qozondan chiqishidagi temperaturasi 423 K , suvning qozonga kirishdagi bosimi $1,6 \text{ MPa}$ bo'ladi. Issiqlik unumdorligi 30 Gkal/soat va undan yuqori bo'lgan qozonlarda, chiqishdagi eng yuqori temperatura $450-470 \text{ K}$, suvning kirishdagi bosimi $2,5 \text{ MPa}$ bo'ladi. Qozon agregatlari 14.1-rasmda ko'rsatilgan ketma-ketlikda takomillashib bordi. Takomillashtirishdan asosiy maqsad metal sarfini kamaytirish, qozonning tejamliligini va bug' unumdorligini oshirish, hamda parametrlari yanada ham yuqoriroq bo'lgan bug' olishdir. Hozirgi katta quvvatli qozonlarning boshlang'ich sxemasi 14.1-rasm (a,b) da keltirilgan silindr shaklidagi oddiy qozon edi.

XIX asrning o'rtalarida silindrsimon va o't-quvurli qozonlardan (v) suv-quvurli (v-m) qozonlarga o'tildi. Qozonlarni takomillashtirish ikki yo'nalishda bordi: birinchidan gaz-quvurli, ikkinchidan suv-quvurli qozonlar yaratildi. Natijada quvurlarning diametrini kamaytirgan holda isish sirtini kattalashtirishga erishildi, chunki gazlarga qaraganda suvga issiqlik berish yuqori bo'ladi, bu esa metallni tejash va unumdorlikni ko'tarish imkonini berdi.

Kamerali gorizontal suv-quvurli qozonlarda (d,e) qaynatish quvurlar to'plami o'zining uchlari bilan yassi kameralarga ulanar edi. Bular anker boltlari ko'pligi tufayli murakkab bo'lib, bug' bosimini 12-15 bar dan yuqori ko'tarishga imkon bo'lmadi.



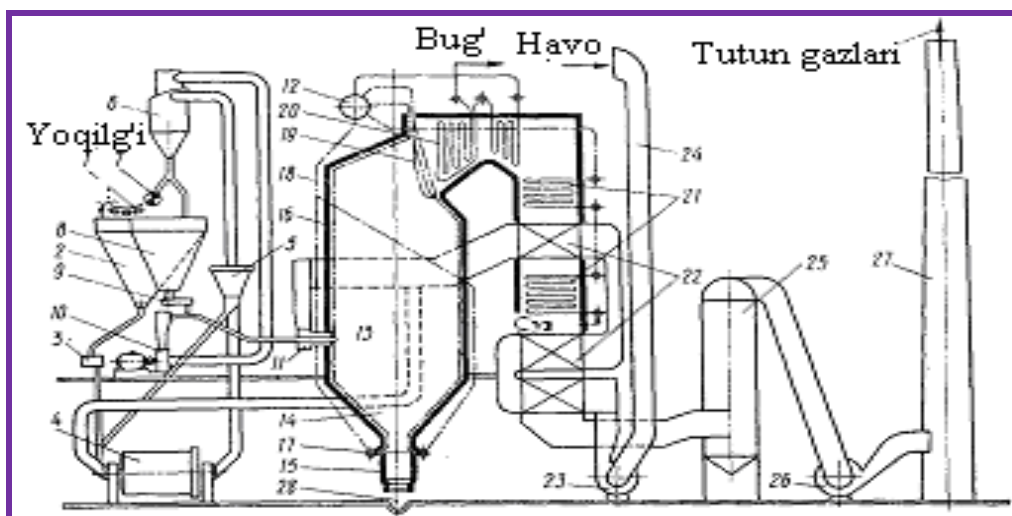
14.1-rasm. Tabiiy tsirkulyatsiyali qozonlarning takomillashib borishi:

a – silindrsimon; b-batareyali; v-o't quvurli; g-o't va tutun quvurli; d,e-kamerali gorizonta-suv quvurli; j-bo'limli gorizonta-suv quvurli; z-qaynatish quvurlari to'g'ri bo'lgan; i,k-qaynatish quvurlari egilgan; l- P-simon bir barabanli qozon; m-T-simon zamonaviy barabanli qozon agregati.

Bu kamchiliklar gorizonta suv-quvurli qozonlarda sezilarli darajada bartaraf etildi. Bularda yassi kameralar o'rniga silindrsimon qopqoqlar qo'llanildi, ularga to'g'ri quvurlar to'plami ulandi, quvurlar ikki to'plam holida gorizonta ravishda barabanga (j) birlashdi. Shu tufayli bug'ning bosimi ortdi, quvurlarning soni va uzunligi ortishi esa, qozonning unumdorligini oshirish imkonini yaratdi. Barabanlar avvalo uzunasiga, keyinroq ko'ndalangiga joylashtirildi. Suv ekonomayzerlari va havo isitkichlarni qo'llash natijasida qozonlarning tejamliligi va unumdorligi ortdi.

Gorizonta suv-quvurli qozonlar o'z vaqtida gaz quvurli qozonlarga nisbatan katta afzalliklarga ega edi, lekin ularning hozirgi vertika suv-quvurli qozonlarga qaraganda muhim kamchiliklari bor. Avvalo, bir necha barabanning bo'lishi metall sarfini oshirib yuboradi, qimmat turadigan tutashtirish kameralari esa, qozon narxini ortishiga sabab bo'ldi.

Shuning uchun ularni vertika suv-quvurli qozonlar siqib chiqardi va hozirgi paytda gorizonta suv-quvurli qozonlar ishlab chiqarilmaydi. Vertika suv-quvurli qozonlar dastlab qozonning eng qimmat qismining–barabanlarning soni ko'p qilib qurilar (z,i) edi.



14.2-rasm. Qozon qurilmasining texnologik sxemasi.

1 – transporter; 2 – nam ko'mir bunkeri; 3 – nam ko'mir taqsimlagich; 4– ko'mir maydalaydigan tegirmon; 5 – separator; 6 – siklon; 7 – chang vinti; 8 – ko'mir changi bunkeri; 9 – ko'mir changi ta'minlagichi; 10 – tegirmon ventilyatori; 11 – gorelkalar; 12 – baraban; 13 – o'txona; 14 – sovuq voronka; 15 – shlak yig'gich; 16 – o'txona ekranlari (ko'tarish quvurlari); 17 - ekran kollektorlari; 18 – tushirish quvurlari; 19 – feston; 20 – bug' qizdirgich; 21 – suv ekonomayzeri; 22 – havo qutisi; 23 – puflash ventilyatori; 24 – havo tortishi qutisi; 25 - gaz tozalash qurilmasi; 26 – so'rish ventilyatori; 27 – tutun quvuri –mo'ri; 28 – kul-shlak chiqarish kanali.

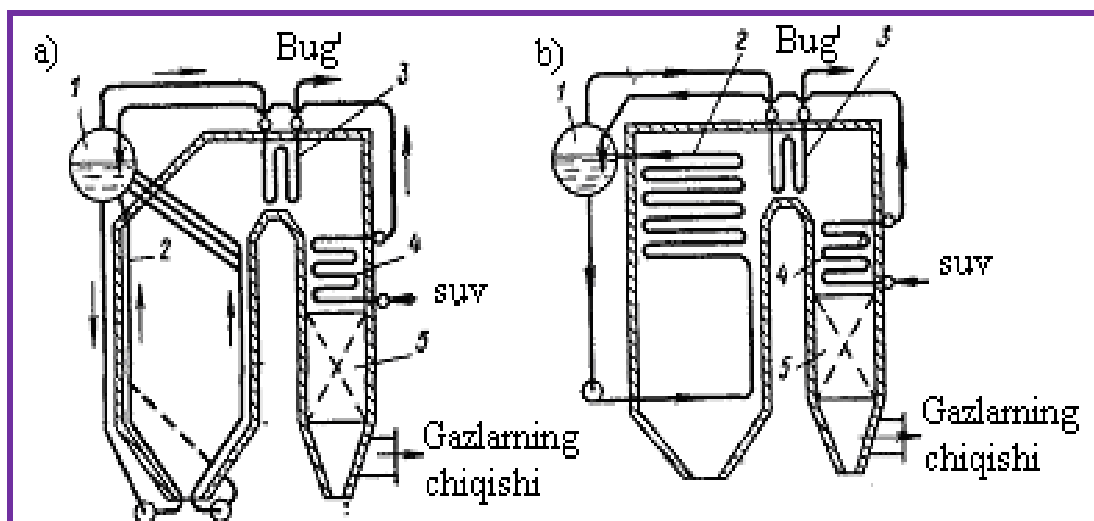
Vertikal suv-quvurli qozonlarning keyingi takomillashuvi natijasida barabanlarning soni bittaga keltirildi (k,l,m), qaynatish quvurlarining to'plami bevosita baraban bug' yig'gichga tutashtirildi. Shunday qilib, barabanlar sonining kamayishi bilan bir vaqtda qozon isish sirtining konvektiv qismi qisqardi va o'txonada ekranlar tarzida joylashgan radiatsion qismi ko'paydi. Zamonaviy bug' qozon qurilmasi (14.2-rasm) qozon agregatidan va yordamchi qurilmalardan (ko'mirni maydalash va chang tayyorlash, yoqilg'i va suvni uzatish, havoni va yoqilg'i mahsulotlarini tortish va puflash, nazorat-o'lchov asboblari, avtomatik boshqarish asboblari) tashkil topgan.

Qozon devorlarining o'ta qizib ketishi ularning buzilish xavfini tug'diradi. Buning oldini olish uchun qozonning qizigan sirtlaridan issiqlikni tez olib turish kerak. Buning uchun isitish sirtlari bo'ylab suv va suv-bug' aralashmasining harakatini tegishli tarzda tashkil etish lozim.

Suv va suv-bug' aralashmasining isitish sirtlari bo'ylab harakatlanish tavsifiga ko'ra qozon agregatlari uch turga bo'linadi:

- 1) tabiiy tsirkulyatsiyali;
- 2) majburiy tsirkulyatsiyali;
- 3) to'g'ri oqimli.

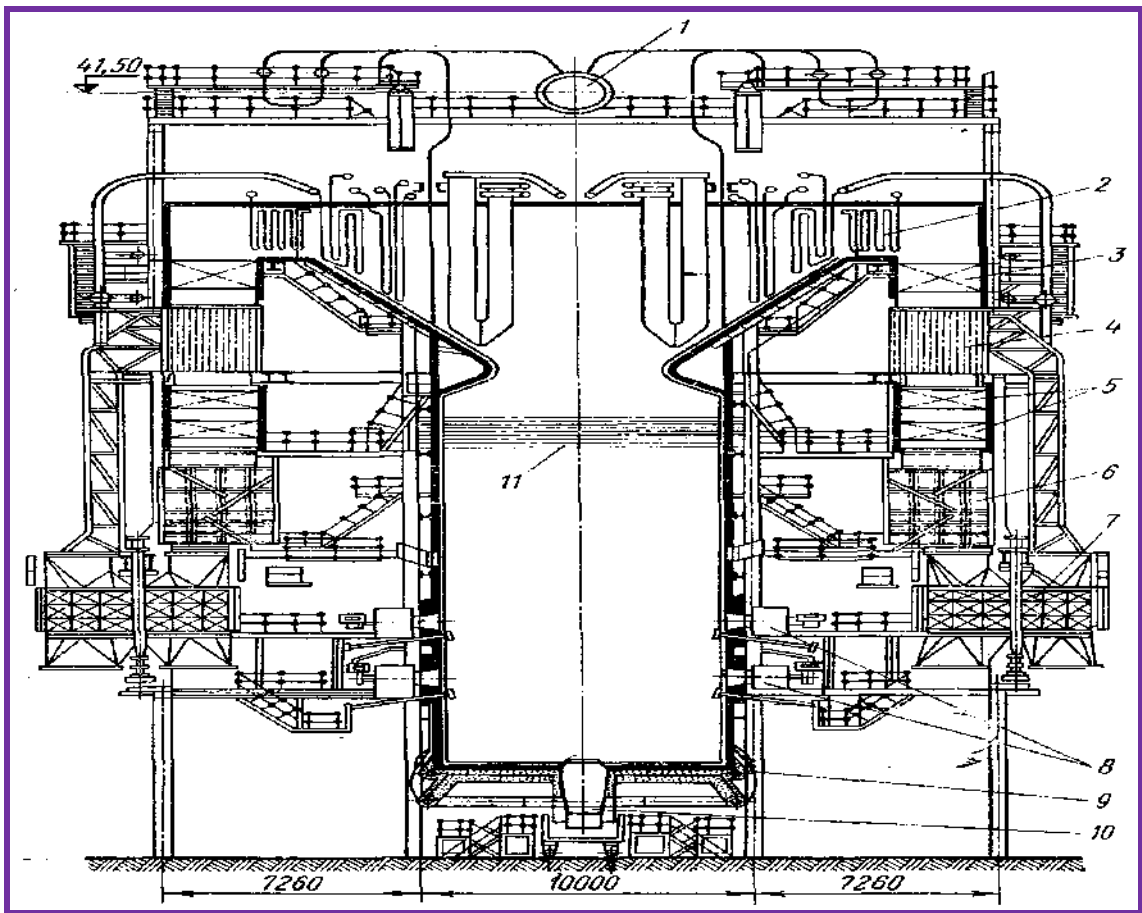
14.3-rasmda suv quvurli qozonlarning tsirkulyatsion sxemasi keltirilgan.



14.3-rasm. Qozon sxemalari.

a – tabiiy tsirkulyatsiyali; b – majburiy tsirkulyatsiyali; 1 – baraban; 2 – isitish sirtlari; 3 – bug' qizdirgich; 4 – ekonomayzer; 5 – havo isitkich.

Tabiiy tsirkulyatsiyali bug' qozonlarida suv yopiq tsirkulyatsiyali konturda (14.3-rasm, a): «baraban – tushirish quvuri – pastki kollektor – ko'tarish quvuri – baraban» da harakat qiladi. Bunday qozonlarda suvning va suv – bug' aralashmasining harakatlanishi ularning zichliklari orasidagi farqqa asoslanib amalga oshiriladi. Majburiy tsirkulyatsiyali qozonlarda suv bilan suv-bug' aralashmasi tsirkulyatsion nasos yordamida harakatlantiriladi.



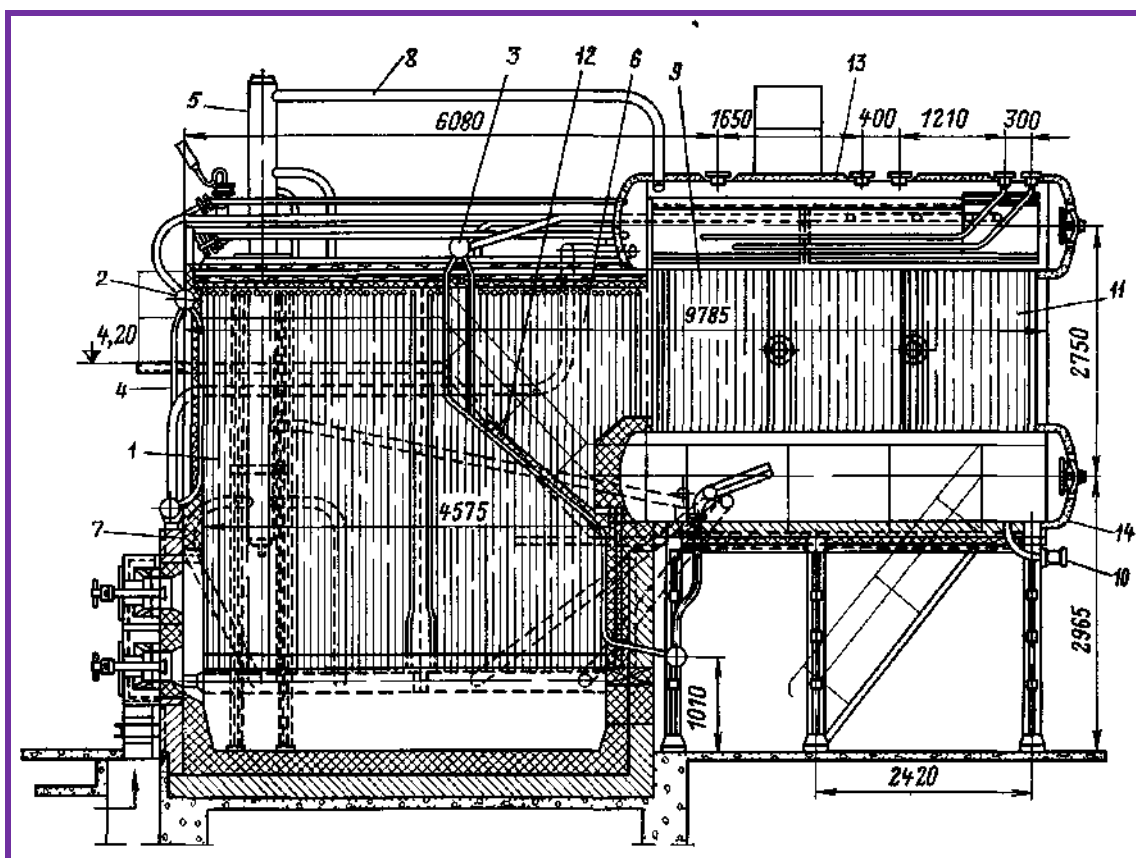
14.4-rasm. Tabiiy tsirkulyatsiyali TP-100 qozon agregati.

1- baraban; 2- bug' qizdirgichning konvektiv qismi; 3- ikkilamchi bug' qizdirgich; 4- quvurli havo isitkich; 5- ekonomayzer; 6- gaz yo'llari; 7- regenerativ havo isitkich; 8- ko'mir changini yoqish gorelkasi; 9- o'txonaning tirqishli tagi; 10- suv vannasi va shlak transporteri; 11- bug' qizdirgichning radiatsion qismi.

Zamonaviy qozon agregatlari asosan tabiiy yoki sunpiy gazda, mazutda, changsimon ko'mirda ishlaydi. Zamonaviy qozon agregatlarining ishlab chiqaradigan bug'ining sarfi 400-450 t/soat, bosimi 2,5 MPa gacha, temperaturasi 700-850 K ga yetadi. Qurilishi jihatidan zamonaviy qozon agregatlariga kam metall sarflangan, boshqarish yetarli darajada mexanizatsiyalashtirilgan va avtomatlashtirilgan, ekologik nuqtaiy nazardan atrof muhitga o'ta zaharli gazlarni kamroq chiqaradi. Bunga 14.4-rasmda keltirilgan yuqori quvvatli, qattiq yoqilg'ida ishlaydigan tabiiy tsirkulyatsiyali TP-100 markali (Taganrog zavodi, Rossiya) qozon agregati misol bo'la oladi. Bunday qozonning bug' unumdorligi 640 t/soat, bug'ning bosimi 14 MPa va temperaturasi 570⁰S, qaynoq havo temperaturasi 403⁰S, chiqib ketayotgan gazlar temperaturasi 128⁰S, F.I.K. 90,2%. Hozirgi vaqtda

qozon agregatlarini yig'ishni arzonlashtirish va tezlashtirish maqsadida uning qismlari tayyor bloklar tarzida tayyorlanmoqda. Masalan, unumdorligi past va o'rtacha (2,5 dan 15 kg/s gacha) bo'lgan SU va SA turdagi (Belgorod zavodi, Rossiya) qozonlar olti blokdan tashkil topgan. Bloklar yig'ish maydoniga oson tashib keltiriladi va u yerda qozon agregati tezda yig'iladi.

Odatda, bunday qozon agregatlari bir yoki ikki barabanli qilib tayyorlanadi. Unumdorligi past bo'lgan qozonlarga DKVR (Biysk qozon zavodi, Rossiya) markali qozonlar misol bo'ladi. Bu barabanlari uzunasiga joylashgan va konvektiv quvurlar to'plami zich joylashgan ikki barabanli vertikal suv-quvurli qozon agregatidir (14.5-rasm). Qozonda o'txona devorlarini ekran quvurlari 1 berkitadi. Orqa ekranning qiya qismida shaxmatli pardadevor 12 o'rnatilgan. Pardadevor o'txona kamerasini ikki qismga bo'ladi: o'txona va yonib bo'lish kamerasi 6. Yonib bo'lish kamerasidan chiqqan o'txona gazlari yuqori 12 va pastki 14 barabanlar o'rtasida joylashgan konvektiv quvurlar to'plamini yuvib o'tadi. To'plamning boshlanishida bug' qizdirgich quvurlari 9, keyinroq esa qozon quvurlar to'plami 11 joylashadi. Kollektorlar 2,3 ga bug'-suv aralashmasi keladi. Aralashmadan ajratilgan suv tsirkulyatsion quvurlar 4 bo'ylab pastki kollektorlarga tushadi, suv tomchilari ko'p bo'lgan bug' esa, bug' olib ketadigan quvurlar orqali ikkita vertikal siklon 5 ga yuboriladi. Siklonda ajralgan suv, suv uzatish quvurlari 7 bo'ylab ekranlarning pastki kollektorlariga tushadi. Siklondan chiqqan bug', quvurlar 8 bo'ylab baraban 9 ichidagi ajratish qurilmasiga yuboriladi, u yerdan esa qozonning bug' qizdirgichiga yoki birdaniga iste'molchiga (agar qozonda bug' qizdirgich bo'lmasa) yuboriladi. Ta'minot suvi klapanlar 10 orqali qozonga keladi. Qozonlar, masalan, DKVR-20–1,4-523 turidagi, quyidagicha belgilanadi: birinchi son – bug' unumdorligi (t/soatda), ikkinchi – bug' bosimi (MPa da), uchinchi – bug' temperaturasi (K da).



14.5-rasm. Gaz-mazutda ishlaydigan DKVR –20-13-250 qozon agregati.

Agar belgilashda uchinchi son bo'lmasa, demak qozon to'yingan bug' ishlab chiqaradi.

DKVR qozon agregatlarining asosiy ko'rsatkichlari.

14.1-jadval.

Qozon turi	Bug' unumdorligi, kg/s/m /soat	Qozon- dan chiqishdagi bug' bosimi, MPa	Bug' temperaturasi K	Qozonning isitish yuzasi, m ²			Bug' qizdirgich isitish yuzasi, m ²
				Radiatsion	Konvektiv	Umumiy	
DKVR-2,5-1,4	0,695/2,5	1,4	To'yingan *	17,7	72,6	91,3	-
DKVR-4-1,4-523	1,1/4	1,4	523	21,4	107,6	129	8,5
DKVR-6,5-1,4	1,8/6,5	1,4	To'yingan	27,9	197,4	225,3	-

DKVR-10-2,4-643	2,78/10	1,4/2,4	643	47,9	207,5	255,4	17
DKVR-20-1,4-523	5,56/20	1,4/2,4	523	73,5	285	358,5	34
DKVR-35-1,4	9,75/35	1,4	To'yingan	86,1	437,4	523,5	-

*To'yinish temperaturasi.

DKVR tarzidagi qozon agregatlari bug' qizdirgich bilan yoki bug' qizdirgichsiz ishlab chiqariladi. Bu qozonlarning asosiy ko'rsatkichlari 14.1-jadvalda keltirilgan.

DKVR turidagi qozon agregatlar sanoat issiqlik energetikasida va issiqlik ta'minoti tuzilmalarida keng qo'llanilmoqda. Bunday qozonlarda barcha turdagi yoqilg'ini yoqish mumkin. Shu sababli qozonlarning o'txonalari turlicha bo'lishi mumkin, F.I.K. esa, 75 dan 91% gacha bo'ladi. DKVR qozon agregatlarini suv-isitish qozonlari sifatida ishlatish mumkin. Buning uchun qozon ustiga bug'-suv isitkichi o'rnatiladi va qozonning tsirkulyatsiya sxemasiga ulanadi. Bug' tarmoq suvini isitib kondensatsiyalanadi, kondensat esa, isitkichdan pastki barabanga o'zi oqib tushadi.

Hozirgi vaqtda DKVR turidagi qozonlar past bosimli KE, DE, E-GMN kabi bug' qozon agregatlari bilan asta-sekin almashtirilmoqda. Bular ikki barabanli, vertikal suv-quvurli qozonlar bo'lib, ularning konvektiv quvurlar to'plami bukilgan quvurlardan tashkil topgan. Qozon qoplamasining vazni kamaytirilgan, qaynatish quvurlar to'plami zich joylashgan, yonish yuzasining issiqlik kuchlanishi va o'txona bo'shlig'ining solishtirma issiqlik kuchlanishi yuqori.

Bug' qozon agregatlarinig asosiy ko'rsatkichlari.

14.2-jadval.

Qozon agregati turi	Bug' unumdorligi, t/soat	Bug' bosimi, MPa	Bug' turi
KE-2,5-14S*	2,5	1,4	To'yingan bug'

KE-10-14S	10	1,4	To'yingan bug'
KE-10-14-225S	10	1,4	t=225°S li o'ta qizigan bug'.
KE-25-24-250S	25	2,4	t=250°S li o'ta qizigan bug'.
DE-4-14 GM	4	1,4	To'yingan bug'
DE-25-14-GM	25	1,4	To'yingan bug'
DE-16-14-225GM	16	1,4	t=225°S li o'ta qizigan bug'.
DE-25-24 GM	25	2,4	To'yingan bug'
E-4-14 GMN	4	1,4	To'yingan bug'
E-10-14 GMN	10	1,4	To'yingan bug'
E-10-14 225 GMN	10	1,4	t=225°S li o'ta qizigan bug'.
E-25-14 GMN	25	1,4	t=225°S li o'ta qizigan bug'.

* Seriyalab ishlab chiqariladi.

Buning natijasida yangi qozon agregatlarining bug' unumdorligi ortdi. Masalan, KE-4 (D=4 m/soat) qozon agregatining o'txona kamerasi o'lchamlari DKVR-2,5 (D=2,5 t/soat) qozon agregati kabi; KE-6,5 (D=6,5 t/soat) va KE-10 (D=10 t/soat) qozon agregatlari o'txona kamerasi o'lchamlari mos ravishda DKVR-4 (D=4 t/soat) va DKVR-6,5 (D=6,5 t/soat) qozon agregati o'lchamlari kabi. KE,DE, E-GMN seriyadagi qozonlarning asosiy ko'rsatkichlari 14.2-jadvalda keltirilgan.

14.2. To'g'ri oqimli qozonlar

Tabiiy yoki majburiy tsirkulyatsiyali suv-quvurli qozonlarda eng kamida bit-ta baraban bo'lishi kerak. Barabanda suv bug'dan ajraladi va unda qozonning bar-cha tsirkulyatsion konturlari tutashadi. Energetik qozonlarda ishchi bosimning oshishi baraban devorining qalinligini orttirishga (0,1 m gacha) sabab bo'ldi.

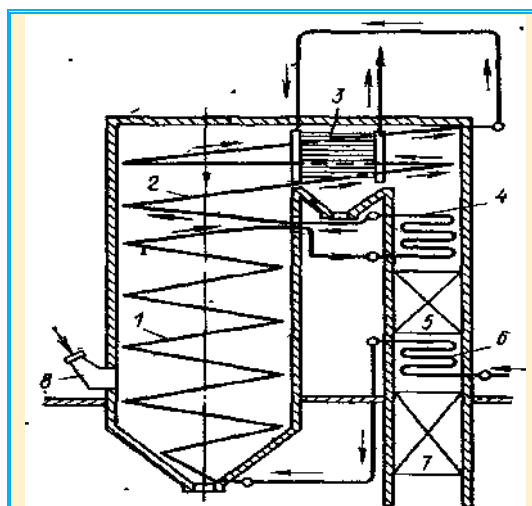
Buning natijasida barabanni tayyorlash jarayoni murakkablashdi va uning narxi oshib ketdi. Bosimning ortishi natijasida qozon konturidagi tsirkulyatsiya an-cha qiyinlashadi, chunki bosim ortishi bilan bug'ning zichligi suvning zichligiga yaqinlashadi, kritik nuqtada esa tenglashadi. Shuning uchun kritik bosimga yaqin va undan yuqori bosimlarda albatta majburiy tsirkulyatsiyani qo'llash lozim. Yuqorida ko'rsatilgan vaziyat barabansiz qozonlarni-to'g'ri oqimli qozonlarni

yaratishga asosiy sabab bo'ldi. Agar tabiiy tsirkulyatsiyali qozonlarda suvning majburiy harakatlanishi faqat suvning suv ekonomayzerlaridagina bo'lsa, to'g'ri oqimli qozonlarda qozonga suv kelishidan tortib, o'ta qizigan bug' olinishigacha bo'lgan jarayon majburiy ravishda va bir marta amalga oshiriladi. Suv, bug'-suv aralashmasi va bug' ta'minlash nasosi yordamida haydaladi.

XX asrning 30-yillarida prof. L. K. Ramzin to'g'ri oqimli qozonning o'ziga xos loyihasini yaratdi va bu qozon qurilib ishga tushirildi. Bu qozonning bug' unumdorligi 55 kg/s, bug' bosimi 137 bar va temperaturasi 500°S edi. L. K. Ramzin tizimidagi to'g'ri oqimli qozonning sxemasi 14.6-rasmda keltirilgan.

Ta'minlash suvi nasos yordamida ekonomayzer 6 ga uzatib beriladi, bu yerda u kirayotgan gazlarning issiqligi hisobiga isiydi va qozon agregati radiatsion qismining ekran quvurlariga kiradi. Ekranlarning pastki qismida suv qaynash temperaturasiga qadar isiydi. U quvurlar bo'ylab yuqoriga tomon siljigan sari bug' hosil bo'lish jarayoni davom etadi.

Tarkibidagi bug' miqdori 70-75% ($x=0,7\div0,75$) bo'lganda bug'-suv aralashmasi radiatsion qismdan konvektiv qismga – oraliq soha 4 ga o'tadi. Bu yerda suv oxirigacha bug'lanib, tuzlar cho'kmaga tushadi. Bu sohada gazlarning cho'kishi radiatsion sohadagidan xavfli emas, chunki bu yerda gazlarning temperaturasi qozon o'txonasidagi temperaturadan past bo'ladi. Shuning uchun quyqa qatlamning hosil bo'lishi quvurlarning xavfli darajada o'ta qizib ketishiga sabab bo'la olmaydi. Bug' oraliq soha 4 dan bug' qizdirgichning konvektiv qismi 3 ga va nihoyat iste'molchiga



14.6-rasm. To'g'ri oqimli qozon agregatining sxemasi.

1-radiatsion qism; 2-radiatsion bug' qizdirgich; 3-bug' qizdirgichning konvektiv qismi; 4-oraliq soha; 5,7-havo isitkichining birinchi va ikkinchi bosqichi; 6-ekonomayzer; 8-gorelka.

beriladi. Qozon agregatining konvektiv shaxtasida havo isitkich 5,7 ning ikki bosqichi joylashadi. To'g'ri oqimli qozonning barabanli qozonga nisbatan afzalliklari shundaki, unda yuqori va o'ta yuqori parametrli bug' olish mumkin (1900 t/soat gacha), qozonni tez ishga tushirish mumkin (≈ 1 soat) va portlash xavfi nisbatan kam.

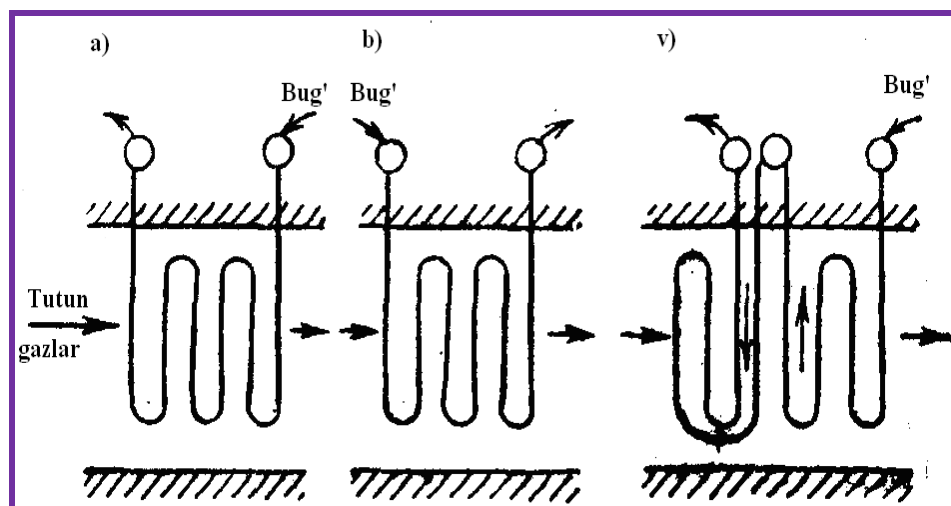
To'g'ri oqimli qozonlarning asosiy kamchiliklari quyidagilardan iborat:

- a) ta'minlash suvining sifatiga katta talab qo'yiladi. Suvning tarkibida tuzlar bo'lmasligi lozim, aks holda qasmoq to'planib quvurni kuyishiga sabab bo'ladi. Shuning uchun qozon o'tirib qolgan qasmoqdan tozalanib turiladi;
- b) issiqlikni to'plash xususiyati kichik. To'g'ri oqimli qozonlarda suv zahirasi yo'q. Shuning uchun o'txona ishini va ta'minlash suvini uzatishni bir-biriga moslash kerak, bu odatda, ancha qiyinchilik tug'diradi;
- v) qozonning gidravlik qarshiligi katta va demak ta'minlash nasoslariga elektr energiyasi ko'p sarf bo'ladi.

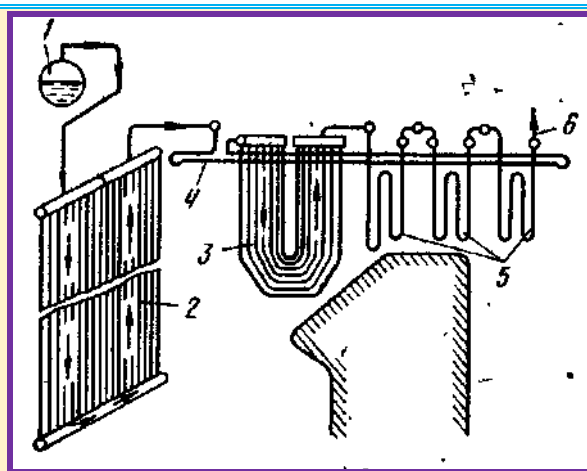
Hozirgi paytda bug'ning parametrlari kritik parametrlardan yuqori (25,5 MPa; 843 K), bug' unumdorligi 254 kg/s (300 MVt), 455 kg/s (500 MVt) va 695 kg/s (800 MVt) bo'lgan to'g'ri oqimli qozonlar keng qo'llanilmoqda.

14.3. Qozon agregatning asosiy issiqlik uzatish sirtlari

Bug' qizdirgichlar. Bug' qizdirgichlar bug'ni quritish va uni berilgan temperaturagacha qizdirish uchun mo'ljallangan. Qozon agregatida joylashuviga ko'ra bug' qizdirgichlar radiatsion, konvektiv va aralash xillariga bo'linadi. Bug' qizdirgich 30-40 mm li quvurlardan tayyorlanib, kollektorlarga payvandlangan parallel ishlaydigan bir qancha bukilgan quvurlardan iborat. Ular gorizontaal yoki ko'pincha vertikal joylashtiriladi. Bug' va tutun gazlari oqimlarining yo'nalishiga qarab bug' qizdirgichlar qarshi oqimli, to'g'ri oqimli va kombinatsiyalashgan xillarga bo'linadi (14.7-rasm).



14.7-rasm. Vertikal-konvektiv bug' qizdirgichlar sxemasi.



14.8-rasm. Radiatsion - konvektiv bug' qizdirgich:

1-baraban; 2-devorga o'rnatilgan radiatsion bug' qizdirgich; 3- pardasimon radiatsion bug' qizdirgich; 4- shiftga o'rnatilgan radiatsion bug' qizdirgich; 5- konvektiv bug' qizdirgich; 6- o'ta qizigan bug' olib keladigan quvur.

Qarshi oqimli bug' qizdirgichlarda (14.7-rasm, a) bug' quvurlarining birinchi (bug' yo'li bo'ylab) o'ramiga kirib qiziy boshlaydi. U ohirgi o'ramlarda deyarli oxirgi qizish temperaturasigacha qiziydi. Bu vaqtda quvurlarning tashqi sirti tutun gazlarining eng qaynoq oqimlari bilan yuvilib turadi. Shunday qilib qarshi oqimli bug' qizdirgichning isish sirtidan eng ko'p darajada foydalaniladi. To'g'ri oqimli bug' qizdirgichlarda (14.7-rasm, b) quvurlarning birinchi o'ramlari (bug'ning yo'li bo'ylab) eng issiq tutun gazlari bilan yuviladi. Bunda tutun gazlarining temperaturasi asta sekin pasayadi, bug'ning temperaturasi esa ko'tariladi. Buning natijasida gaz bilan bug'ning temperaturasi dastlab bir-biridan katta farq

qiladi. Oxirida esa bu farq juda kichik bo'ladi. Agar bunda bug' qizdirgichga nam bug' kiradigan bo'lsa, u holda namlik bug'langanda bug' tarkibidagi tuzlar quvurlarning gazlar juda kuchli qizdiradigan qismlariga o'tirib qoladi, bu bug' qizdirgich quvurlarining ortiqcha qizib ketishiga olib keladi.

Kombinatsiyalashgan bug' qizdirgichlar hozir eng ko'p qo'llanilib kelinmoqda. Bunday bug' qizdirgichlarining bir qismi qozon agregatining radiatsion qismida, qolgan qismi konvektiv qismida joylashgan. Radiatsion qism o'txonaning jadal yonish sohasining yuqori qismiga joylashtiriladi va issiqlikni nurlanish va konvektsiya tufayli o'ziga oladi (14.8-rasm)

Past va o'rta bosimli qozon agregatlarida asosan konvektiv bug' qizdirgichlar qo'llaniladi. Bug' qizdirgich quvurlari og'ir issiqlik sharoitida ishlaydi. Shuning uchun quvurlarni bug' bilan sovutib turish eng asosiy vazifa hisoblanadi. Bug' qizdirgich quvurlarini sovutish ishonchliligini ko'rsatuvchi kattalik – bug'ning massaviy tezligi $\rho \cdot \omega$ dir. Issiqlik jadal qabul qilinadigan sohada bug'ning massaviy tezligi 700-1100 kg/(m².s), konvektiv bug' qizdirgichlarda $\rho \omega = 250-600$ kg/(m².s) bo'lishi kerak. Bug' qizdirgich quvurlari legirlangan po'latlardan tayyorlanadi. O'ta qizigan bug' temperaturasi 500 °S gacha bo'lsa, 10 va 20 markali po'latlar ishlatiladi; 500 dan 600 °S gacha teperaturalarda 12X1MF markali po'lat va 600 °S dan yuqori teperaturalarda 12X2MSF R markali po'lat ishlatiladi. Bug'ning quvurlardagi o'rtacha tezligi 20 – 25 m/s bo'ladi. Tezlik ortgan sari gidravlik qarshiliklar ham ortadi, kichik tezliklarda esa, sovitish yomonlashadi. Shuning uchun quvurlarni sovitish uchun eng maqbul tezliklar aniqlanadi.

Suv ekonomayzerlari. Suv ekonomayzerlari ta'minlash suvini qozon agregatining bug'latgich qismiga kirgunga qadar isitish uchun mo'ljallangan. Ekonomayzerlarda ta'minlash suvi o'txonadan chiqayotgan tutun gazlari hisobiga isiydi.

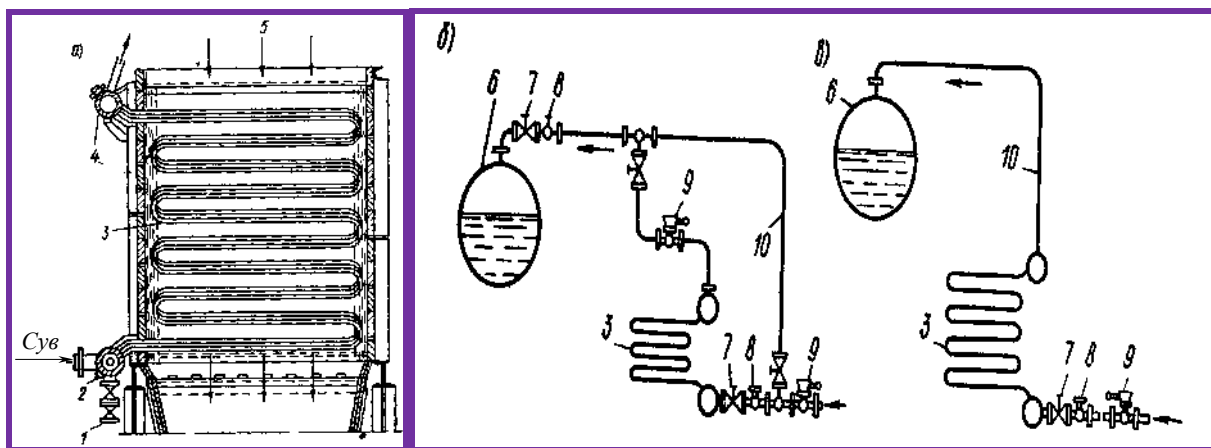
Ekonomayzerlar tayyorlangan material turiga qarab po'latli va cho'yanli, sirtning shakliga qarab qovurg'asimon va silliq quvurli, suvni isitish darajasiga qarab qaynaydigan va qaynamaydigan ekonomayzerlarga bo'linadi.

Cho'yan ekonomayzerlar odatda, issiqlik uzatishni orttirish maqsadida qovirg'alangan quvurlardan tayyorlanadi. Bunday ekonomayzerlar bosimi 2,3 MPa bo'lgan past va o'rta quvvatli qozon agregatlarida qo'llaniladi. Cho'yanning mexanik mustahkamligi kichikligi tufayli bunday ekonomayzerlarni yana ham yuqori bosimlarda qo'llash mumkin emas.

Cho'yan ekonomayzerlar qaynamaydigan ekonomayzerlar qatoriga kiradi. Bularda suv qaynash temperaturasidan 20 – 40 K past temperaturasiigacha isiydi. Isitish paytidagi suvning quvurdagi tezligi 0,5 – 1 m/s bo'ladi. Yuvib o'tayotgan gazlarning tezligi qattiq yoqilg'i yoqilganda 7 – 10 m/s atrofida, gaz va mazut yoqilganda 6 – 8 m/s atrofida bo'lishi mumkin. Bunday tezliklarda sirtning aerodinamik qarshiligi yo'l qo'yilishi mumkin bo'lgan chegarada bo'ladi. Po'lat ekonomayzerlar bosimi 2,3 MPa dan yuqori bo'lgan qozon agregatlarida ishlatiladi. Ular diametri 28 – 42 mm li quvurlardan gorizontal-bukilgan quvurlar tarzida tayyorlanadi (14.9-rasm).

Po'lat ekonomayzerlarning qaynaydigan xili ham, qaynamaydigan xili ham bo'ladi. Qaynamaydigan ekonomayzerlarda suv qaynash temperaturasidan 40–50 K past temperaturagacha isiydi. Quvurlarda suvning tezligi 0,3–0,5 m/s atrofida bo'ladi. Unumdorligi yuqori bo'lgan barabanli qozon agregatlarida asosan po'latli qaynaydigan ekonomayzerlar ishlatiladi.

Havo isitgichlari. Havo isitgichlar yoqilg'ini yoqish uchun o'txonaga yuboriladigan havoni isitishga mo'ljallangan. Havo tutun gazlari hisobiga isiydi. O'txonaga yuborilayotgan issiq havo yoqilg'i yonish sharoitini yaxshilaydi, kimyoviy va mexanik to'la yonmaslikdan kelib chiqadigan isroflarni kamaytiradi, yonish temperaturasini orttiradi, issiqlik almashuvini jadallashtiradi, natijada qurilmaning F.I.K. ortadi. Chiqib ketayotgan gazlarning temperaturasi 20-25 K ga pasaysa, qurilmaning F.I.K. 1% ga ortadi.



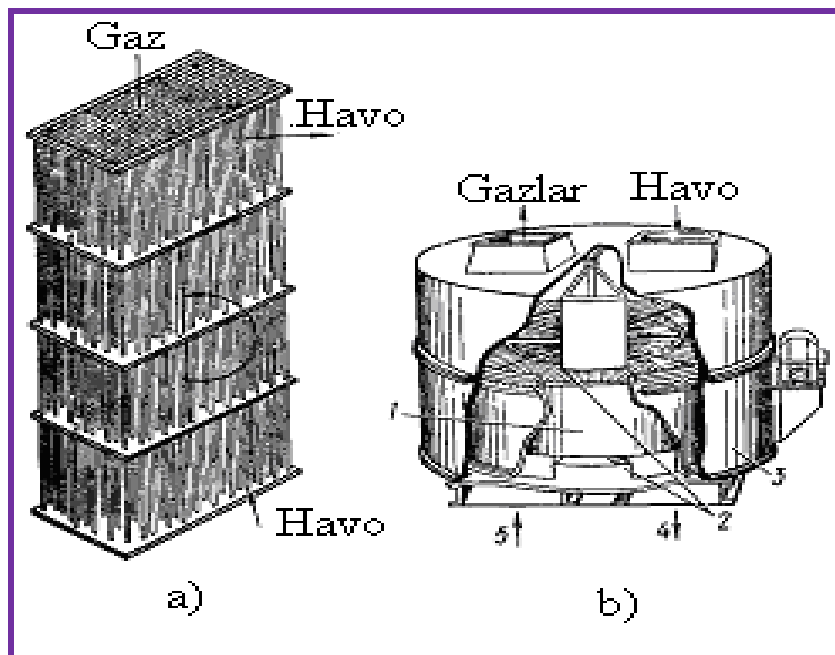
14.9-rasm. Po'latli ekonomayzer.

a – umumiy ko'rinish; b,v - mos ravishda qaynamaydigan va qaynaydigan ekonomayzerlarning ulash sxemasi; 1,7 – tushirish va berkitish jo'mragi; 2 – kiritish kollektori; 3 – ekonomayzer quvurlari; 4- isitilgan suvni kiritish kollektori; 5- gazlarni kiritish; 6- qozon barabani; 8,9 – ta'minlash va saqlash klapanlari; 10 – suv bilan ta'minlovchi aylanma quvur.

Havoni isitish temperaturasi yoqilg'i turiga va yondirish usuliga qarab tanlanadi. Qattiq yoqilg'ini qatlamli yoqishda bu temperatura namlikka va uchuvchan moddalarni chiqishiga bog'liq bo'ladi. Namlik va uchuvchan moddalar chiqishi kamayishi bilan yonayotgan qatlam temperaturasi ortadi. Shuning uchun suyuq shlakni hosil bo'lishini oldini olish va o'txonani mo'tadil ishlashini ta'minlash maqsadida qo'ng'ir va toshko'mirlar yoqilganda havo 520K gacha isitilishi kerak.

Bunday ko'mirlar mash'ala usulida yondirilganda havo 523-573 K gacha isitiladi, gaz va mazut yoqilganda ham havo 523–573K atrofida isitiladi.

Havo isitgichlar rekuperativ va regenerativ bo'ladi (14.10- rasm). Diametri 25-50 mm li po'lat quvurlardan tayyorlangan quvurli rekuperativ havo isitgichlar keng tarqalgan havo isitgichlaridir (14.10-rasm; a).



14.10-rasm. Havo isitgichlari.

a – rekuperativ havo isitgich; b – regenerativ havo isitgich;

1 –rotor; 2 – po'lat tunuka; 3 – g'ilof; 4- havo qutisi; 5- gaz qutisi.

Tutun gazlari havo isitgichning vertikal o'rnatilgan quvurlari ichida yuqori-dan pastga tomon harakat qiladi. Havo kirish qutisiga gorizontal yo'nalishda kiradi va quvurlarning tashqi devorini yuvib o'tib, isiydi; so'ngra chiqish qutisidan o'txonaga kiradi. Havo tezligini gaz tezligiga nisbati taxminan 0,5 ga teng qilib olinsa, eng yuqori issiqlik berish koeffitsientiga erishiladi ($15 - 20 \text{ Vt/m}^2 \cdot \text{K}$). Regenerativ havo isitgichlari asosan yirik energetik qozon agregatlarida qo'llaniladi (14.10-rasm, b). Aylanuvchan rotor alohida qismlarga bo'linib, ular issiqlikni yig'a oladigan metall tunukalar bilan to'ldiriladi. Aylanish jarayonida nasadka dastlab, chiqib ketayotgan gazlar bilan, so'ngra isitiladigan havo bilan yuvilib turiladi. Bunda issiqlik tutun gazlaridan sovuq havoga uzatiladi.

14.4. Qozon qurilmasining yordamchi uskunalari.

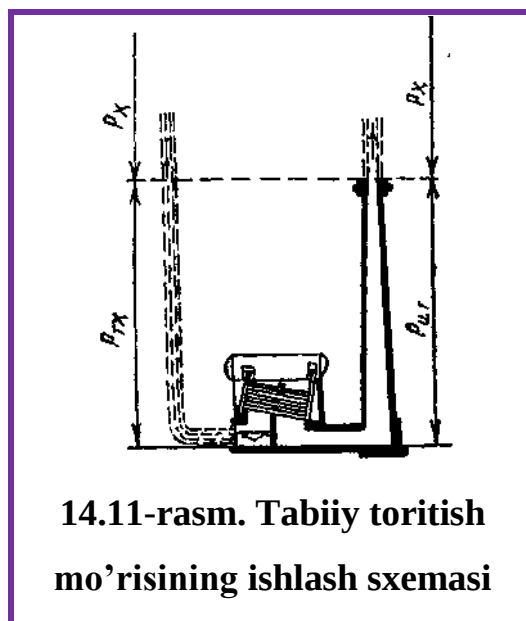
Tortish – puflash qurilmalari

Qozon agregatini bir me'yorda ishlashini ta'minlash maqsadida yoqilg'i yonishi uchun zarur bo'lgan havoni uzluksiz uzatib turish va yonish mahsulotlarini muttasil chiqarib turish kerak. O'txonaga, chang tayyorlash tizimiga va qozon agregatining boshqa qismlariga havo va gaz berish uchun ishlatiladigan ventilya-

torlarning barcha turlari puflash qurilmalari jumlasiga kiradi. Qozon agregatlarining rostlash surma klapanlari bor gaz yo'llari, tutun mo'risi va sun'iy ravishda tortadigan tutun tortgichlar tortish qurilmalari hisoblanadi. Tabiiy tortish mo'ridagi qizigan tutun gazlarining zichligi sovuq atmosfera havosining zichligidan farq qilinishiga asoslangan. Qozon qurilmasini bir tomoni qizigan gaz, ikkinchi tomoni esa sovuq havo bilan to'lgan tutash idish sifatida qarash mumkin (14.11-rasm). Mo'ri hosil qilayotgan maksimal tortish, bosim yo'qotishlaridan 20 % katta bo'lishi kerak.

Ma'lumki, gazlarning gaz yo'llari bo'ylab harakatida ishqalanish va mahalliy qarshiliklar natijasida bosim yo'qotishlari sodir bo'ladi. Qozon agregatining bosim yo'qotishlari aerodinamik qoidalar bo'yicha aniqlanadi. Tutun mo'rilari g'ishtli, temir-betonli va po'latli bo'ladi. 80 metr balandlikkacha, asosan g'ishtli mo'rilar keng qo'llaniladi, chunki ular arzon va betonli mo'rilarga nisbatan temperatura o'zgarishlariga chidamliroq va po'latli mo'rilarga qaraganda oltingugurt gazlari zararli ta'sir etmaydi. Mo'ri balandligi sanitariya texnikasi talablariga javob berishi kerak ya'ni tutun gazlari atmosferada ma'lum bir radiusda tarqalishi lozim. Tabiiy tortishni vujudga keltirish uchun mo'ri balandligini uzaytirish yoki chiqib ketayotgan gazlar temperaturasini ko'tarish lozim.

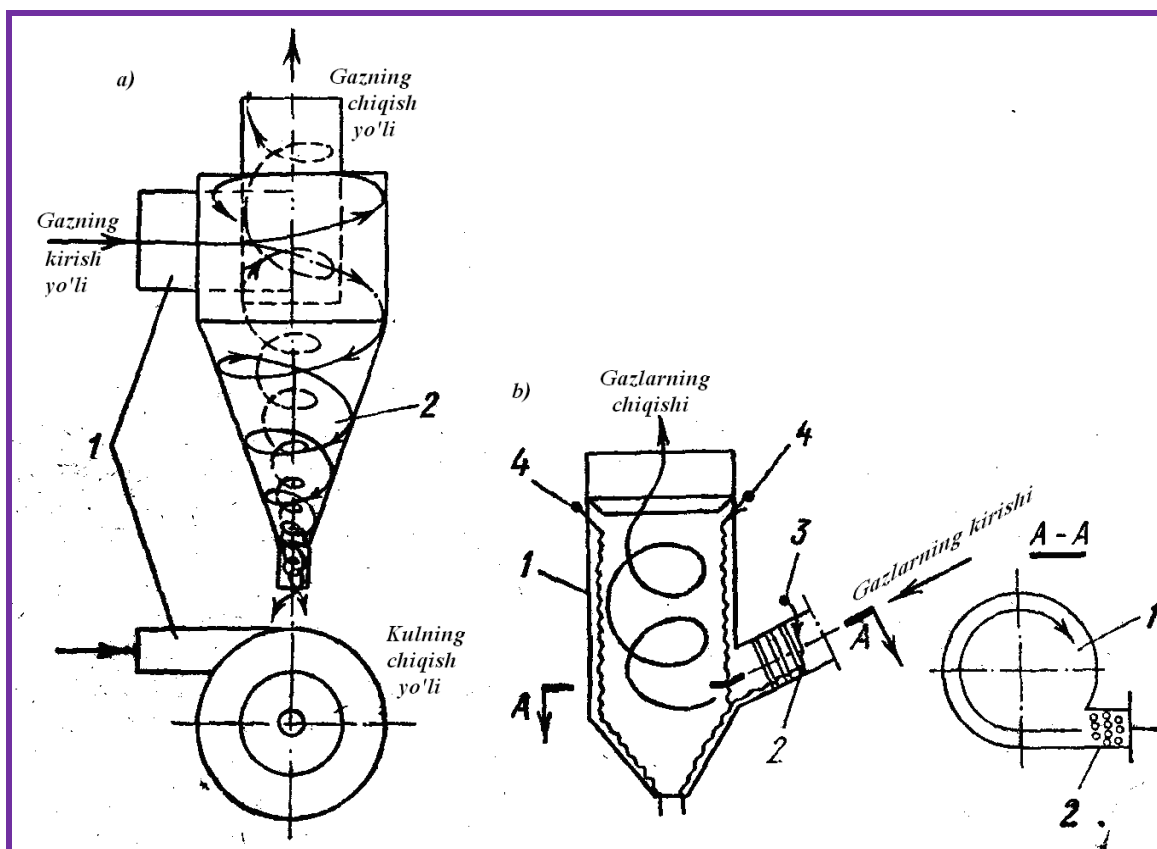
Lekin mo'ri balandligi uning narxi va mustaxkamligi bilan, gazlarning temperaturasi esa qozon qurilmasining eng maqbul F.I.K. bilan chegaralangan. Shuning uchun hozirgi zamonaviy qozon qurilmalarida sun'iy tortish vujudga keltirilgan. Tutun mo'risi oldiga tutun tortgich (tortish ventilyatori) o'rnatiladi, u qozon agregatlari qizigan gazlarini so'rib olib, mo'ri orqali atmosferaga chiqarib yuboradi.



Tutun gazlarini tozalash va kul hamda shlakni chiqaruvchi qurilmalar. Qatlamli o'txonalarda yoqilg'i yongan-

dan keyin hosil bo'ladigan kulning 70–80 % i o'txona cho'g'doni va shlak bunkerida qoladi, 20–30% esa tutun gazlari bilan birga atmosferaga chiqib ketadi. Kamerali o'txonalarda aksincha, kulning ko'p qismi (90 % yaqini) mo'ri orqali tutun gazlari bilan birga atmosferaga chiqib ketadi. Kulning qolgan qismi shlakka aylanadi va o'txona tagida joylashgan bunkerlarga tushadi. Kul va shlak qozonxonadan muntazam ravishda chiqarilib turiladi. Tutun gazlari bilan atmosferaga chiqib ketuvchi kulni yo'qotish ancha qiyin ish. Juda mayin uchuvchan kul atrof muhitni ifloslantiradi, tirik organizmlarga va o'simliklarga zararli ta'sir etadi. Sanitariya talablariga ko'ra nafas olish sohasida kulning kunlik o'rtacha kontsentratsiyasi $0,15 \text{ mg/m}^3$ dan ortib ketmasligi kerak. Bundan tashqari, abraziv xususiyatlarga ega bo'lgan kul tutun tortish yo'llarini tez ishdan chiqaradi.

Har yili jaxonda organik yoqilg'ilarning yoqilishidan atmosferaga o'rtacha 100 mln. tonna kul va 150 mln. tonna karbonat angidrid gazi chiqariladi. Masalan, mayda antratsit yoqiladigan quvvati 950 t/soat bo'lgan qozon mo'risida bir kechayu kunduzda 60 tonnagacha azot oksidi atmosferaga chiqariladi. Shuning uchun qattiq yoqilg'ini yoqishda qozon agregati gaz yo'llarining boshidan oxirigacha kulni tutib qoluvchi qurilmalar o'rnatiladi. Hozirgi vaqtda tutun gazlarini kuldandan tozalash uchun inertsion kul tutgichlar (quruq va xo'l), elektrofiltrlar va kombinatsiyalangan kul tutgichlar ishlatiladi. Quruq inertsion kul tutgichlarda (14.12-rasm, a) harakatlanayotgan kul zarrachalarining markazdan qochuvchi kuchidan foydalaniladi.

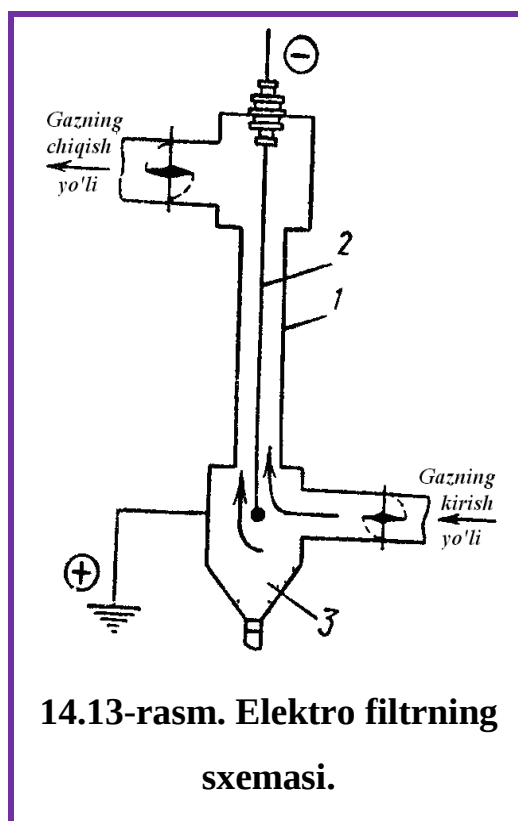


14.12-rasm. Inertsion kul tutgichlarning sxemalari.

Tutun gazlar oqimi uyurmalovchi naycha 1 lar orqali siklon 2 ga yo'naladi, bu yerda gazlarning harakati uyurmali harakatga aylanadi. Kul zarralari markazdan qochuvchi kuch ta'sirida siklon qobig'iga urilib to'xtaydi va harakatlanayotgan gaz oqimida ajralib bunkerga tushadi. Bunday siklonda tutun gazlarining tozalanish darajasi 60 % ga yetadi. Hozirgi paytda bir nechta o'nlab kichik siklonlardan iborat batareyali siklonlar keng qo'llanilmoqda. Bunday siklonda gazlarning tozalanish darajasi 65 – 70 % yetadi .

Ho'l inertsiya kul tutgichlar (14.12-rasm; b) ham inertsiya kuchidan foydalanish asosida ishlaydi. Forsunka orqali yuboriladigan suv qobiq devorlarida yupqa parda hosil qilib to'xtovsiz oqib turadi va kulni yuvadi.

Tutilgan kul va kir suv qurilmaning pastki qismidan, tozalangan gaz esa yuqori qismidan atmosferaga chiqib ketadi. Bunday turdagi kul tutgichlarda tutun gazlarining tozalanish darajasi 85 – 90 % yetadi. Elektr filtrlarda gazlarning yuqori kuchlanishli tok ta'sirida ionlashishidan hosil bo'lgan zaryadlarni ajratish xususiyatidan foydalaniladi (14.13-rasm).



Changli gaz po'lat silindr (musbat qutb) va nixrom sim (manfiy qutb) o'rtasida hosil bo'lgan elektr maydonidan o'tadi. Yuqori kuchlanishli elektr maydon ta'sirida tutun gazlari ionlashadi. Kulning asosiy massasi manfiy zaryadlanib silindr devoriga tortiladi, kulning ozroq qismi musbat zaryadlanib simga tortiladi. Elektrofiltrni vaqti vaqti bilan silkitib(kuchlanish ajratib qo'yilib) elektrofiltrlar kuldon tozalanadi. Elektr energiyasining sarfi katta emas (1000 m^3 gazga 0,15 KVt) , lekin yuqori kuchlanish (90 ming V gacha) elektrofiltrlar bilan ishlashda nixoyatda extiyot bo'lishni talab etadi. Kombinatsiyalangan kul tutgichlar ikki bosqichli bo'lib, ko'p hollarda batariyalik siklondan (birinchi bosqich) va elektrofiltrdan (ikkinchi bosqich) tashkil topgan bo'ladi. Kul tutgichlarning samaradorligi tozalik koeffitsienti orqali baxolanadi:

$$\varepsilon = S_k/S_0 \cdot 100\%,$$

Bu yerda S_k , S_0 – mos ravishda kul tutgichdan keyingi va kul tutgichdan oldingi gazlardagi kul miqdori.

Suv tayyorlash asoslari. Qozonlarga suv tayyorlab berishdan asosiy maqsad qozonga uzatiladigan suvni qayta ishlash yo'li bilan uning fizik xossalarini yaxshilash, qozon agregatining ish unumini va samaradorligini oshirishni ta'minlashdan iborat. Ma'lumki, tabiatdagi suvda turli-tuman kimyoviy elementlar va ularning tuzlari erigan holda uchraydi. Bularga erigan gazlar (kislorod va karbonat anhidrid), mineral tuzlar, organik moddalar, qattiq (qum) zarralar kiradi. Suvda erigan gazlar metallni tezda zanglatadi, qattiq zarralar issiqlik o'tkazuvchanlikni pasaytiradi, erigan kaltsiy va magniy tuzlari suvning qaynash jarayonida qozon devorlarida qasmoq hosil qiladi.

Qozon agregatlarida ishlab chiqarilgan bug' iste'molchidan kondensat xolida qaytadi, lekin kondensat miqdori odatda, ishlab chiqarilgan bug' miqdorlaridan oz bo'ladi. Kondensat isrofi mashinasozlik korxonalarida 20 % ni, kimyo sanoatida 40 % ni, neftni qayta ishlash zavodlarida 50% ni tashkil qiladi. Isitish qozonlarida kondensatni iste'molchidan qaytmasligi bir necha foizdan 100% gacha o'zgarishi mumkin. Bundan tashqari suvning ma'lum bir qismi (5-7%) barabandan puflab chiqariladi. Kondensat va suv isroflari qo'shimcha suv bilan to'ldiriladi. Bu suv qozon agregatiga yuborilishdan oldin tegishli tarzda tayyorlanadi. Dastlabki tayyorgarlikdan o'tgan suvni qo'shimcha suv, kondensat va qo'shimcha suv aralashmasini ta'minlash suvi, qozon konturida aylanayotgan suvni qozon suvi deyiladi.

Qozon agregatining mo'tadil ishlashi ta'minlash suvining sifatiga bog'liqdir.

Suvning sifatini quyidagi asosiy ko'rsatkichlar tavsiflaydi: tiniqlik, muallaq zarralar miqdori, quruq qoldiq, tuz miqdori, oksidlanuvchanlik, qattiqlik, ishqorlilik, erigan gazlar (CO_2 va O_2) miqdori. Tiniqlilik suv tarkibidagi muallaq mexanik zarralar va kolloid aralashmalar bilan tavsiflanadi, muallaq zarralar miqdori esa suvni qattiq erimaydigan aralashmalar bilan ifloslanish darajasini belgilaydi. Muallaq zarralar miqdori mg/l da belgilanadi. Quruq qoldiq – bu suvni qaynatib bug'lantirib va 110 – 120° S da quritilgandan so'ng qolgan qoldiq. Qoldiq tarkibida suvda erigan mineral va organik moddalar bo'ladi. Suvdagi kation va anionlarning umumiy

miqdori suvdagi tuz miqdorini belgilaydi. Oksidlanuvchanlik suvdagi organik aralashmalarning konsentratsiyasini belgilaydi. Suvning qattiq yoki yumshoqligi uning tarkibidagi kalsiy va magniy tuzlari ($\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HSO}_3)_2$, Ca SO_4 , Mg SO_4 , Ca Cl_2 , Mg Cl_2 va x.k.) miqdori bilan belgilanadi.

Qozon agregatining ishlashida qozon suvida muntazam ravishda zararli aralashmalar to'planib boradi. Suvda erigan aralashmalar (tuzlar) bug' hosil bo'lish jarayonida cho'kmaga tushadi va qozonning ichki yuzasiga quyqa va shlak tarzida o'tirib, issiqlik o'tkazuvchanlikni pasaytiradi, bu esa devorning o'ta qizib ketishiga sabab bo'ladi. Suvning qattiqligini pasaytirish (yumshatish) uchun qozonlarga suvni uzatishdan avval, unga soda, natriy fosfat, ayrim hollarda boshqa tuzlar qo'shiladi.

Suvdagi kaltsiy va magniy kationlari fosfatlarning ionlari bilan bog'lanadi va kam eriydigan tuzlar hosil qilib qozon tubiga cho'kadi va suv yumshaydi.

Qattiq mexanik aralashmalardan suvni tozalashda tindirish, filtrlash usullaridan keng foydalaniladi. Qozon barabanida suvning aralashmalar bilan ifloslanishi natijasida ko'pik hosil bo'ladi. Ko'pik parchalari suv yuzasiga qalqib chiqib, o'zi bilan birga zararli aralashmalarning ko'p qismini ilashtirib chiqadi. SHunday qilib, tuzlarning maksimal konsentratsiyasi qozon suvining yuqori qatlamlarida hosil bo'ladi. Suvning yuqori qatlamlarini yo'qotish uchun barabanga qator teshiklar bor quvur joylashtiriladi va shu quvur orqali yuqori qatlamdagi suv olinadi (puflanadi).

Barabandan puflab chiqarilagan suv separatorga yuboriladi. Separatorida suv qaynaydi va uning bir qismi bug'ga aylanadi, bug' esa qurilmaning umumiy tizimiga o'tadi. Tozalash suvining qolgan qismi texnik kanalizatsiyaga tushirib yuboriladi.

14.5. Qozon agregatining issiqlik balansi

Qozon agregatiga issiqlik kelishi va uni sarflanishi muvozanatlashgan, ya'ni balanslashgan bo'lish kerak. Issiqlik balansi asosida yoqilg'ini sarfi aniqlanadi va qozon agregatining asosiy tavsifi bo'lgan F.I.K. hisoblanadi. Issiqlik balansi tenglamasi 1 kg qattiq suyuq yoki 1 m³ gaz yoqilg'isi uchun tuziladi:

$$Q_{\mu}'' = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (14.1)$$

bunda Q''_{μ} - ixtiyorimizdagi issiqlik; Q_1 – foydalanilgan issiqlik; Q_2 – chiqib ketayotgan gazlar bilan issiqlikning isrof bo'lishi; Q_3 – kimyoviy to'la yonmaslikdan issiqlikning isrof bo'lishi; Q_4 – mexanik to'la yonmaslikdan issiqlikning isrof bo'lishi; Q_5 – atrof muhitga issiqlikning isrof bo'lishi; Q_6 – qozon agregatidan tashqariga chiqariladigan shlak issiqligi hisobiga bo'ladigan issiqlik isrofi.

Issiqlik balansi tenglamasini Q''_{μ} ga nisbatan foizlarda ifodalash mumkin.

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 100\% \quad (14.2)$$

bunda $q_1 = \frac{Q_1}{Q''_{\mu}} 100\%$; $q_2 = \frac{Q_2}{Q''_{\mu}} 100\%$ va h.q.

Ihtiyorimizdagi issiqlik quyidagi kattaliklarni yig'indisiga teng bo'ladi:

$$Q_i = Q_k^i + Q_{fm} + Q_{x,i} + Q_{b,m} \quad (14.3)$$

bunda Q_k^i - yoqilg'ining quyi yonish issiqligi; Q_{fm} - yoqilg'ining fizik issiqligi;

$Q_{x,i}$ - havo bilan kirgan issiqlik; bu issiqlik havo tashqi manbadan isitilganda hisobga olinadi; $Q_{b,m}$ - puflanadigan bug' bilan mazut yoqishda keladigan issiqlik.

Havo bilan kirgan issiqlikni quyidagi tenglamadan hisoblanadi:

$$Q_{x,i} = \alpha V_0 c'_p (T_{u,x} - T_{c,x})$$

bunda α - ortikcha havo koeffitsienti; c'_p - havoning o'rtacha xajmiy izobar issiqlik sig'imi; $T_{u,x}$ - isitilgan havo temperaturasi; $T_{c,x}$ - sovuq havo temperaturasi; V_0 - 1 kg yoki 1 m³ yoqilg'ining yonishi uchun zarur bo'lgan havoning nazariy miqdori. Bug' bilan kirgan issiqlik quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$Q_{6b,i} = W_f (h_f - r)$$

bunda W_f - bug'ning forsunkadagi sarfi, 0,3 – 0,4 kg/kg; h_f - bug' entalpiyasi, kJ/kg; r - bug' hosil qilish issiqligi, kJ/kg.

Yoqilg'ining fizik issiqligi:

$$Q_{f,i} = c_{yo} (T_{yo} - 273)$$

bunda c_e - yoqilg'ining issiqlik sig'imi; T_e - yoqilg'i temperaturasi, K.

Balans tenglamasidagi $Q_{f.i} + Q_{i.} + Q_{x.i.}$ yig'indi Q_k^i ga nisbatan juda kichik bo'lganligi sababli ularni ayrim taqribiy hisoblashlarda e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Unda tenglama quydagi ko'rinishga keladi:

$$Q_i^i = Q_k^i.$$

Chiqib ketayotgan gazlar bilan issiqliklikning isrof bo'lishi q_2 eng katta isrof bo'lib, asosan chiqib ketayotgan gazlarning temperaturasi va ortiqcha havo koef-fitsientiga bog'liq. Gaz va suyuq yoqilg'i yoqilganda (%) da :

$$q_2 = \frac{h_z - \alpha_r h_{c.x}}{Q_i^i} 100 \quad (14.4)$$

va qattiq yoqilg'i yoqilganda (%)

$$q_2 = \frac{h_z - \alpha_r h_{c.x} (100 - q_n)}{Q_{\mathcal{M}}^{\mathcal{M}}} \quad (14.5)$$

bunda α_r - chiqib ketayotgan gazlardagi ortiqcha havo koefitsienti; h_r - yonish mahsulotlari entalpiyasi; $h_{c.x}$ - o'txonaga kirayotgan sovuq havo entalpiyasi;

$$h_r = V_r \cdot c_r \cdot t_r \quad (14.6)$$

bu yerda V_r - chiqib ketayotgan yonish mahsulotlari hajmi; c_r, t_r - chiqib ketayotgan gazlarning issiqlik sig'imi va temperaturasi. Xozirgi paytda qozon qurilmalarini loyihalashda chiqib ketayotgan tutun gazlarning hisoblangan temperaturasini 120 -170° S ga teng deb qabul qilinadi. Unumdorligi katta bo'lgan agregatlarda $q_2 = 3-7\%$ ni tashkil etadi. Suv ekonomayzeri va havo isitgichlari bo'lmagan qozonlarda $q_2 = 20-30\%$ ga yetadi.

Kimyoviy to'la yonmaslikdan bo'ladigan issiqlik isroflari q_3 ga o'txonada havoning umuman yetishmasligi yoki yoqilg'ining havo bilan yomon aralashishi natijasida shu joyda havoning yetishmasligi sabab bo'ladi. Mexanik to'la yonmaslikdan bo'ladigan issiqlik isroflari q_4 , cho'g'donlarining teshiklaridan to'kilib qozon agregatlaridan kul va shlak bilan birga hamda tutun gazlari bilan birga chiqib ketadigan yoqilg'ining yonib bo'lmagan zarralari miqdoriga bog'liq. Kamerali o'txonada qattiq yoqilg'i yoqishda isroflar yig'indisi $q_3 + q_4$ 1-7% ni tashkil etadi.

O'txona devorlarining issiqlik izolyatsiyasi orqali issiqlik kam isrof bo'ladi. Umumdorligi 2,78 kg/s gacha bo'lgan bug' qozonlari uchun $q_5 = 2 \div 4\%$; 16,7 kg/s gacha - $q_5 = 1 \div 2\%$, 16,7 dan yuqori bo'lsa, $q_5 = 1 \div 0,5\%$ bo'ladi. Kul va shlak bilan bilan birga issiqlik isroflari kam bo'ladi va u asosan qatlamli va kamerali yoqishda hisobga olinadi ($q_6 = 1 \div 1,5\%$).

O'txonada yoqilg'i yonganda olingan issiqliklardan foydalanish darajasi qozon agregatining F.I.K. ga qarab aniqlanadi (% da) :

$$\eta_{ka} = q_1 = \frac{Q_1}{Q_i} 100 \quad (14.7)$$

yoki

$$\eta_{ka}^{br} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (14.8)$$

Bunda η_{ka}^{op} - qozon agregatining brutto F.I.K..

Qozon agregatining o'ziga sarf bo'ladigan issiqlik miqdorini hisobga olmasdan hisoblangan F.I.K. qozonning brutto F.I.K. deyiladi. Agar qozon agregatining o'ziga sarflangan issiqlikni e'tiborga olsak, u holda qozon agregatining netto F.I.K. ni hosil qilamiz:

$$\eta_{ka}^n = \eta_{ka}^{br} - q_{u.z}. \quad (14.9)$$

Zamonaviy qozon agregatining F.I.K. 90-95% bo'lib, ular sanoatning turli sohalarini bug' va suv bilan ta'minlaydi hamda bug' turbinasi bilan hamkorlikda elektr energiyasi ishlab chiqaradi. Foydalanilgan issiqlikni quyidagicha aniqlash mumkin. V bilan yoqilg'i sarfini, D bilan qozon agregatining bug' unumdorligini, Q_{ka} bilan ta'minlash suvini bug'ga aylanishi uchun sarflangan issiqlikni belgilaylik. U holda qozon agregatida issiqlik sarfi quyidagiga teng bo'ladi:

$$BQ_i^i \eta_{ka}^{br} = Q_{ka} \quad (14.10)$$

(14.10) tenglamadan yoqilg'i sarfi B ni (kg/s da) aniqlash mumkin:

$$B = \frac{Q_{ka}}{Q_{ii} \cdot \eta_{ka}^{op}} \quad (14.11)$$

Q_{ka} ni (kJda) quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$Q_{ka} = D(h_b - h_{t.s}) + D_p(h' - h_{t.s}), \quad (14.12)$$

Bunda h_b , $h_{t.s}$, h' - o'ta qizigan bug'ning, ta'minlash suvining va to'yingan bug'ning entalpiyasi, kJ/kg ; D – puflash suvining sarfi, kg.

Puflash suvining sarfi sanoat qozonlarining texnik ishlatish qoidalariga asosan D ning 5% dan ortmasligi kerak.

Nazorat uchun savollar:

1. Qozon agregatining tarkibiy qismi.
2. Qozon qurilmasi tarkibi.
3. Energetik qozon qurilmalari.
4. Isitish qozon qurilmalari.
5. Tabiiy tsirkulyatsiyali qozon qanday ishlaydi?
6. Qozon agregatining F.I.K.ni qanday yo'llar bilan oshirish mumkin?
7. TP-100 qozon agregati texnologik sxemasini tushuntirib bering.
8. DKVR turidagi qozon agregati ishlashini tushuntirib bering.
9. To'g'ri oqimli qozonlarning afzalligi nimadan iborat?
10. Qozon agregatining asosiy isitish sirlari.
11. Bug' qizdirgichlar.
12. Suv ekonomayzeri.
13. Havo isitgichlar.
14. Qozon qurilmasining yordamchi qurilmalari.
15. Kul tutgichlar qanday ishlaydi?
16. Qozon agregatining issiqlik balansi.

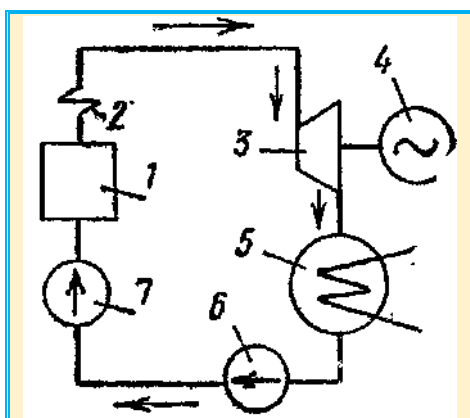
O'N BESHINCHI BOB

BUG' TURBINALI QURILMA

15.1. Bug' - kuch qurilmasining nazariy sikli

Hozirgi vaqtda elektr energiyasining asosiy qismi (80% ga yaqini) bug' - kuch qurilmalarida ishlab chiqariladi, ularda ish jismi sifatida suyuq va bug' xolatdagi suv ishlatiladi. Yoqilg'ining yonishida hosil bo'ladigan issiqlikni mexanikaviy ishga aylantiradigan qurilmalar yig'indisi bug'-kuch qurilmasi deyiladi.

Bug'-kuch qurilmalari qozon agregati, bug' turbinasi, kondensator, nasos, elektr generator va boshqa yordamchi uskunalardan tashkil topgan. Bug'-kuch qurilmalarida ishlatiladigan ish jismi – suv bug'i parametrlarining o'zgarishini qarab chiqamiz. Bug'-kuch qurilmalarining nazariy sikli Renkin sikli hisoblanadi (15.1-rasm). Bunday siklni XIX asrning 50 – yillarida shotlandiyalik muxandis va fizik U.Renkin hamda R.Klauziuslar qariyb bir vaqtda taklif etdilar; odatda bu siklni Renkin sikli deb ataydilar.



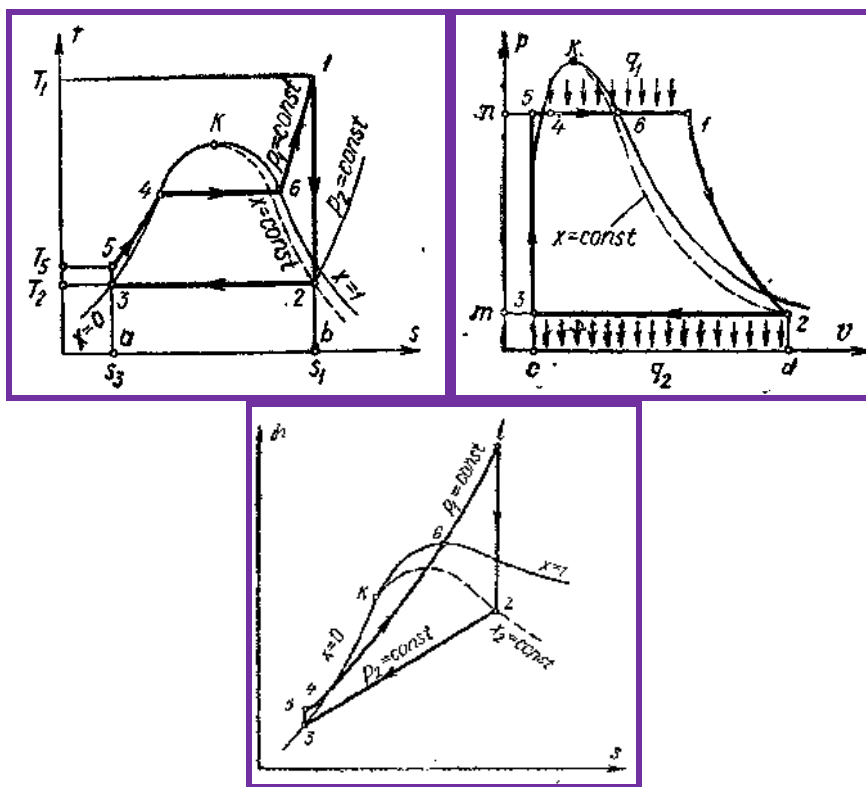
15.1-rasm. Bug'-kuch qurilmasining elementar sxemasi.

Bug' qozoni 1ga issiqlik keltiriladi. Qozondagi suv isiydi va to'yingan nam bug'ga aylanadi. Bug' bug' qizdirgich 2 ga o'tadi va yerda belgilangan temperaturagacha qiziydi. Yuqori bosim va temperaturadagi qizdirilgan bug' turbinaga 3 ga yuboriladi, bu yerda u kengayib ish bajaradi. Mexanik ish generator 4 ning valiga uzatiladi. Ishlab bo'lgan bug' esa turbinadan kondensator 5 ga o'tib u yerda kondensatlanadi. So'ngra kondensat nasosi 6 bilan ta'minlash nasosi 7 kondensatning bosimini berilgan qiymatgacha oshirib, keyingi sikl uchun qozonga uzatib beradi.

Renkin sikli to'rtta – ikkita izobarik va ikkita adiabatik jarayondan tarkib topadi. 15.2 – rasmda Renkin siklining Pv , Ts va hs diagrammalari tasvirlangan.

Bu diagrammalarda ordinatadagi 1 va 2 nuqtalar orasidagi masofa turbina bajargan ishga, 2 va 3 nuqtalar orasida ish bajarib bo'lgan bug', o'zidagi qoldiq is-

siqlikni kondensator – sovitgichga berib kondensatsiyalanadi, 3 va 5 nuqtalar orasida kondensat nasosda siqiladi, 1 va 5 nuqtalar orasidagi masofa siklda bajarilgan issiqlik q_1 ga mos keladi.



15.2 – rasmda Renkin siklining Pv , Ts va hs diagrammasi

Siklda ish jismiga, beriladigan issiqlik miqdori (q_1) Ts diagrammada $a-3-5-4-6-1-v-s$ yuza bilan tasvirlanadi. Sikldan olinadigan issiqlik (q_2) $a-3-2-v-a$ yuzaga, sikl ishi esa Pv diagrammada $3-5-4-6-1-2-3$ yuzaga ekvivalent.

Renkin siklida issiqlik berish va olish jarayonlari izobaralar bo'yicha amalga oshirilishi, izobarik jarayonda esa berilgan (olingan) issiqlik miqdori ish jismining jarayon boshi va oxiridagi entalpiyalari ayirmasiga teng bo'lishi tufayli, Renkin sikliga tadbiquan quyidagilarni yozish mumkin:

$$q_1 = h_1 - h_5 \quad (15.1)$$

va

$$q_2 = h_2 - h_3 \quad (15.2)$$

Bu yerda h_1 o'ta qizigan suv bug'ining qozondan chiqishdagi entalpiyasi (p_1 bosim va T_1 temperaturada); h_5 – suvning qozonga kirishdagi, ya'ni nasosdan chiqishdagi entalpiyasi (p_1 bosim va T_5 temperaturada); h_2 – nam bug'ning turbi-

nadan chiqishdagi, ya'ni kondensatorga kirishidagi entalpiyasi (bu entalpiya p_2 bosim bilan qat'iy aniqlanadigan to'yinish temperaturasi T_2 da suvning to'yinish chizig'idagi entalpiyasiga teng). 1 kg bug'ning sikl davomida bajargan foydali ishi l_{foy} bug'ning turbinaga kirishdagi h_1 va undan chiqishdagi h_2 entalpiyalarning farqiga teng:

$$l_{\text{foy}} = h_1 - h_2 \quad (15.3)$$

Umumiy ta'rifga ko'ra, har qanday siklning termik F.I.K. η_t foydalanilgan issiqlik $q_1 - q_2$ ning keltirilgan issiqlik q_1 ga nisbatiga teng:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{\text{foy}}}{q_1} \quad (15.4)$$

Renkin siklining F.I.K. ushbu ifodadan aniqlanadi:

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_5) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_5} \quad (15.5)$$

Bu tenglamani quyidagi ko'rinishda ham yozish mumkin:

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_5) - (h_5 - h_3)}{h_1 - h_5} \quad (15.6)$$

Nasos bajargan ish $(h_5 - h_3)$ turbinada bajarilgan ishga $(h_1 - h_2)$ nisbatan juda kichik bo'lishi tufayli, uni nazarga olinmasa, ya'ni $h_3 \approx h_5$ bo'ladi desak, u holda (15.6) tenglamani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin.

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \quad (15.7)$$

Bu munosabatdan past bosimli bug' – kuch qurilmalar siklini taxminan hisoblashda foydalanish mumkin. Yuqori bosimli qurilmalarda nasos ishi kattaligini nazarga olmasdan bo'lmaydi. Foydali ish birligi olish uchun turbina orqali muayyan miqdorda bug' o'tkazish kerak; bug'ning shu miqdori bug'ning solishtirma sarfi deyiladi va d_0 xarfi bilan belgilanadi (kg/J):

$$d_0 = \frac{1}{h_1 - h_2} \quad (15.8)$$

Barcha bug'-kuch qurilmalari, asosan elektr energiyasi ishlab chiqarishga mo'ljallangan bo'ladi, shuning uchun bug'ning solishtirma sarfi d_0 elektr energiyasi birligiga to'g'ri keladigan birliklarda o'lchanadi. Agar entalpiyalar farqi $h_1 -$

h_2 kJ/kg larda ifodalansa, u holda d_0 kg/(kVt·soat) bilan ifodalanadi. 1 kVt·soat = 3600 kJ ekanligini hisobga olib, (15.8) formulani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$d_0 = \frac{3600}{h_1 - h_2} \quad \text{kg/(kVt} \cdot \text{soat)}$$

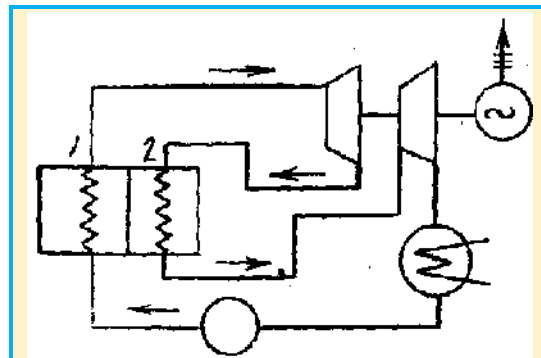
Muayyan quvvatda bug'ning nisbiy sarfi qanchalik kam bo'lsa, bug'-kuch siklining F.I.K. shunchalik katta bo'ladi. Zamonaviy bug'-kuch qurilmalari o'ta murakkab bo'lishiga qaramasdan F.I.K. 90-98% ni tashkil qiladi. Renkin sikli termik F.I.K.ning kattaligi suv bug'i parametrlariga qanday bog'liqligini aniqlaymiz. Tadqiqotlar natijasida Renkin siklining F.I.K. quyidagi hollarda ortishi aniqlangan: p_1 bosim ortsa, p_2 bosim kamaysa va bug'ning o'ta qizish temperaturasi T_1 ortsa. Bug'-kuch qurilmalarining F.I.K. ortishi tufayli ko'p miqdorda yoqilg'i tejaladi. Masalan, quvvati 50 ming kVt bo'lgan bug'-kuch qurilmasining F.I.K. 1%ga ortsa, har soatda 250 kg shartli yoqilg'i tejaladi. 15.1-jadvaldan ko'rinib turibdiki, t_1 va p_1 o'zgaras bo'lib, boshlang'ich bosim p_1 ortsa, Renkin siklining termik F.I.K. ortadi. Lekin p_1 bosimni ortishi natijasida kengayish oxirida bug'ning namligi ortadi.

η_t ning P_1 , t_1 , P_2 larga bog'liqligi

15.1 – jadval

P_1 , MPa	η_t , %	t_1 , °S	η_t , %	P_2 , MPa	η_t , %
1,5	34	300	37,4	0,004	38,9
2,5	36,9	350	38	0,01	36,3
5	38,9	400	38,9	0,08	29,6
7,5	40,5	450	39,5	0,12	27,8
10	41,5	500	40,2	0,2	25,5
12,5	42	550	40,8	0,3	22,3
$t_1=400^\circ\text{C}; P_2=0,004\text{MPa}$		$P_1=5\text{MPa}; P_2=0,004\text{MPa}$		$P_1=5\text{MPa}; t_1=400^\circ\text{S}$	

Namligi yuqori bo'lgan bug' turbina parraklarini tez ishdan chiqaradi. Namlikning yo'l qo'yilishi mumkin bo'lgan me'yordan (10% gacha) ortib ketmasligi uchun bug' oraliq bosqichda qizdiriladi. Bug' turbinada qisman kengaygandan keyin bug' qizdirgichga beriladi, bu yerda u qaytadan o'ta qizigan bug' holatiga o'tdi. Shundan keyin u bug' turbinaning oxirgi bosqichlariga yuboriladi. Bug'ni oraliq bosqichda qizdirish termik F.I.K. ni qisman ko'payishiga va turbina parraklari ishlash muddatining uzayishiga olib keladi.



15.3- rasm. Bug'ni oraliq bosqichda qizdiriladigan bug'-kuch qurilmasining sxemasi

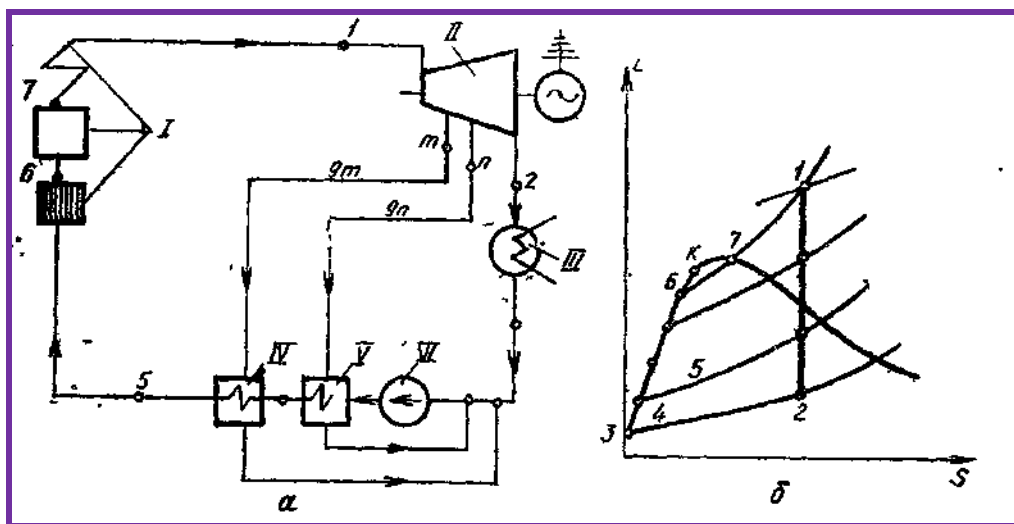
15.3- rasmda bug'ni oraliq bosqichda qizdirishning oddiy sxemasi keltirilgan.

Oraliq bug' qizdirgich 2 qozon agregatining gaz yo'llariga, odatda, asosiy bug' qizdirgich 1 dan keyin o'rnatiladi. Bug' qizdirgich 2 dagi bug' qizigan gazlar ta'sirida deyarli boshlang'ich temperaturasigacha isiydi va turbinaning oxirgi bosqichlariga o'tadi. p_1 va p_2 o'zgarmasdan bug'ning boshlang'ich temperaturasi t_1 ko'tarilishi bilan temperatura tushishi ko'payadi va natijada η_t ortadi (15.1-jadvalga qarang), bug'ning namligi esa, kamayadi. Bug'ning turbinadan chiqishdagi bosimi p_2 qanchalik past bo'lsa, bug' bajargan ish shunchalik ko'p va qurilmaning termik F.I.K. katta bo'ladi. Lekin p_2 bosim kondensatordagi sovutuvchi suvning temperaturasi bilan aniqlanadi. Suvning yillik o'rtacha temperaturasini 10-15° S dan past temperaturagacha sovitadigan tabiiy sovitgichlar yo'qligi sababli, p_2 ni juda kamaytirish yo'li bilan siklning F.I.K.ni oshirish amalda mumkin emas.

15.2. Regenerativ siklli bug' – kuch qurilmasi

Isiqlik texnikasida regeneratsiya so'zi chiqib ketayotgan issiqlikning bir qismini issiqlik qurilmasida yana ishlatish uchun qaytarish ma'nosini bildiradi.

Kondensatordan qozonga o'tadigan kondensatni isitish, ta'minlash suvini regenerativ isitish deyiladi. 15.4-rasmda ta'minlash suvi regenerativ isitiladigan bug'-kuch qurilmasining sxemasi va uning h_s diagrammasi keltirilgan.



15.4-rasm. Regeneratsiya siklli bug'-kuch qurilmasi va uning h_s -diagrammasi:

I – qozon qurilmasi; II- bug' turbinasi; III- kondensator; IV- kondensat nasosi; V va VI- regeneratsiya qurilmalari

Ta'minlash suvini (kondensatni) isitish uchun uning yo'liga regenerativ isitgich V va VI lar o'rnatilgan. Issiqlik tashuvchi sifatida turbinaning oraliq bosqichlaridan bug'ning bir qismi olinadi, ya'ni to'liq ishlamagan bug' olinadi va isitgichga yuboriladi. Issiq bug' bilan isitilgan kondensat ta'minlash nasosi IV bilan qozonga uzatiladi. Bug'ning boshlang'ich parametrlari p_1, t_1 ga qarab, kondensatning temperaturasi $145-245^\circ \text{S}$ ga yetkaziladi. Ta'minlash suvini regenerativ isitish natijasida siklning termik F.I.K. 10-14 % ga ortadi. Bug'ning boshlang'ich parametrlari qanchalik ortsa, shunchalik ko'p yoqilg'i tejaldi. Necha joydan va qaerdan bug' olinishi hamda shunga muvofiq holda isitgichlarning soni hisoblash yo'li bilan aniqlanadi. Tajribalarning ko'rsatishicha, suvni regenerativ isitish bosqichlari soni oshganda siklning F.I.K. ortadi. Zamonaviy, yuqori parametrli bug' turbinalari qurilmalarida regenerativ isitish bosqichlari soni o'ntaga yetadi.

15.4-rasmda tasvirlangan bug' ikki marta olinadigan bug'-kuch qurilmasining F.I.K. ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_t = \frac{A}{q_1} = \frac{(h_1 - h'_m - h''_n - h_2 g)}{(h_1 - h_{r.c.})} \quad (15.9)$$

bu yerda h_1 - turbinaga kirayotgan bug' entalpiyasi; h' , g_m - birinchi isitgichga kelayotgan bug' entalpiyasi va miqdori; h'' , g_n – ikkinchi isitgichga kelayotgan bug' entalpiyasi va miqdori; h_2 , g - kondensatorga kelayotgan bug' entalpiyasi va miqdori; $h_{t.s.}$ – ta'minlash suvi entalpiyasi.

Bug'ning solishtirma sarfi quyidagicha bo'ladi:

$$d_0 = \frac{1}{l} = \frac{1}{(h_1 - h'g_m - h''g_n - h_2g)} \quad (15.10)$$

15.3. Binar siklli bug' – kuch qurilmasi

Bug' – kuch qurilmasida ishchi jism sifatida suvning jiddiy kamchiligi shundan iboratki, suvning kritik temperaturasi nisbatan katta bo'lmagan holda ($t_{kr}=374,15^0\text{ S}$), kritik bosimi ancha yuqoridir ($p_{kr}=221,15\text{ bar}$).

Shu sababli siklning termik F.I.K. ni oshirish uchun, bug'ning boshlang'ich temperaturasi yuqori boshlang'ich bosim bilan birgalikda ko'tarish lozim bo'ladi, bunga esa, qo'llanilayotgan o'tga chidamli materiallar bardosh bera olmaydi.

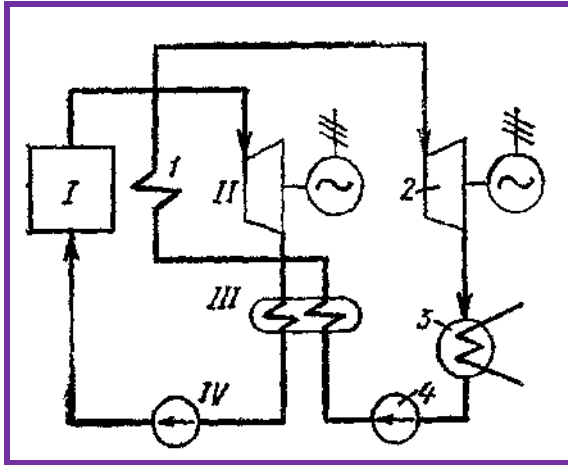
Agar, suvga nisbatan o'rtacha bosimda kritik temperaturasi yuqori bo'lgan ishchi jismni topish mumkin bo'lganda edi, Renkin siklini F.I.K.ni oshirish mumkin bo'lar edi. U holda siklga issiqlik keltirishni, izotermik jarayonda yuqori temperaturada va past bosimlarda amalga oshirish mumkin bo'lar edi. Shu bilan birgalikda past temperaturalar sohasida ishchi jismning to'yinish bosimi juda ham kichik bo'lmasligi lozim. Afsuski, hozirgi vaqtda bu shartlarning yetarli darajada qoniqtiradigan ish jismi ma'lum emas. Zamonaviy issiqlik energetikasida eng ko'p tarqalgan ish jismi – suv, siklning past temperaturali qismi uchun juda mos ishchi jism bo'ladi. Lekin, yuqorida aytib o'tilganidek, suvning kritik temperaturasi nisbatan pastligi tufayli, siklning yuqori temperaturali qismi uchun u mos kelmaydi.

Boshqa ish jismlariga boshqacha kamchiliklar hos bo'ladi. Masalan, simob yuqori temperaturada past to'yinish bosimiga va yuqori kritik parametrlarga ega bo'ladi: $P_{kr} = 151\text{ MPa}$, $t_{kr} = 1490^0\text{ S}$; masalan 557^0 S da to'yinish bosimi atigi 15 barni tashkil etadi. Lekin boshqa tomondan olganda, atrof muhit temperaturasiga yaqin temperaturada simobning to'yinish bosimi juda past: $t=300^0\text{ S}$ da $P=0,36\text{ Pa}$. Odatda bug' turbinalari kondensatorida qo'llaniladigan bosim uchun (P

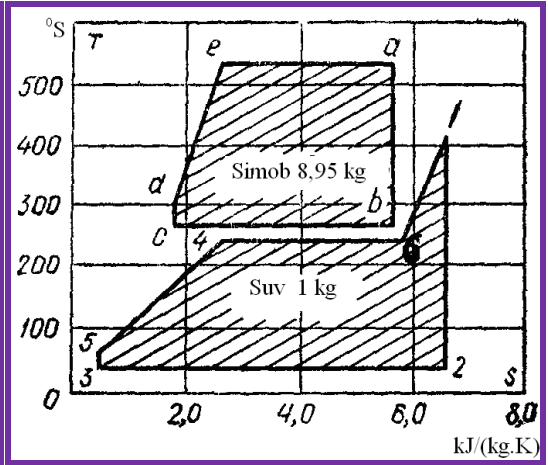
$\cong 4\text{Pa}$) simobning juda ham katta temperaturasi ($t \cong 217,1^0\text{S}$) mos keladi. Pastki temperaturasi shunchalik katta bo'lgan siklning termik F.I.K. katta bo'lmaydi.

Shunday qilib, simob ish jismi sifatida siklning yuqori (yuqori temperaturali) qismi uchun yaxshi, pastki qismi uchun qoniqarsiz bo'ladi. Hozirgi vaqtda siklning barcha temperaturali integralida aytib o'tilgan talablarni qoniqtiradigan ish jismlari bo'lmagani uchun, siklni ikkita ish jismi o'zaro uyg'unligidan foydalanib amalga oshirish mumkin; bu ikkita ish jismining har qaysisi eng ko'p afzalliklarga ega bo'lgan temperaturalar sohasida qo'llaniladi. Bunday turdagi sikllar binar sikllar deb aytiladi. Binar simob – suv sikli amalga oshiriladigan bug' kuch qurilmasining sxemasi 15.5 – rasmda va T_s – diagrammasi 15.6 – rasmda ko'rsatilgan.

Simob qozoni I da simobga issiqlik beriladi, simob bug'lanadi va simobning to'yingan quruq bug'i p_1^s bosimda simob turbinasi II ga kiradi, bu yerda u turbina bilan birlashtirilgan elektr generatoriga beriladigan ishni bajaradi. Ish bajargan va p_1^s bosimga ega bo'lgan simob bug'i kondensator – bug'latgich III ga yuboriladi, u yerda bug' kondensatsiyalanadi, so'ngra esa suyuq simob nasos IV yordamida qozon I ga yuboriladi; simob bosimi nasosda p_2^s dan p_1^s gacha ortadi. Kondensator-bug'latgich IAA dan iborat bo'lib, kondensatsiyalanayotgan simob bug'i o'z issiqligini bu yerda sovituvchi suvga beradi. Bu issiqlik hisobiga kondensator – bug'latgichdagi suv qaynash temperaturasigacha isiydi va bug'lanadi. To'yingan quruq suv bug'i bug' qizdirgich 1 ga yuboriladi. O'ta qizigan suv bug'i p_1^{suv} bosimda bug' turbinasi 2 ga kiradi. Ish bajargan suv bug'i P_2^{suv} bosimda kondensator 3 da kondensatsiyalanadi, so'ngra suv nasosi 4 yordamida kondensator – bug'latgichga yuboriladi.



15.5 – rasm. Binar simob-suv kuch qurilmasi sxemasi



15.6 – rasm. Binar simob-suv kuch qurilmasining Ts-diagrammasi

Aytib o'tish kerakki, siklda simob va suv sarflari turlicha bo'ladi. Kondensator – bug'latkichda 1kg suvni qaynaguncha isitish va so'ngra bug'latish uchun 8,95 kg kondesatsiyalanadigan simob bug'idan issiqlik olinishi zarur. Ko'rib chiqilayotgan siklning Ts diagrammasi 1kg suv va 8,95 kg simob uchun qurilgan (15.6-rasm). Bu yerda a v – simob turbinasidagi adiabatik jarayon; bs – kondensator-bug'latgichda kondensatsiyalanayotgan simob bug'idan issiqlik olish, sd – simob nasosidagi jarayon, yea – simob qozonida simobga izobarik issiqlik berish jarayoni.

Binar siklining termik F.I.K. quyidagi

$$\eta_t = \frac{L}{Q_1} = \frac{L_s + L_{suv}}{Q_1} = \frac{m(h_8^s - h_7^s) + (h_1^{suv} - h_2^{suv})}{m(h_8^s - h_6^s) + (h_1^{suv} - h_5^{suv})} \quad (15.11)$$

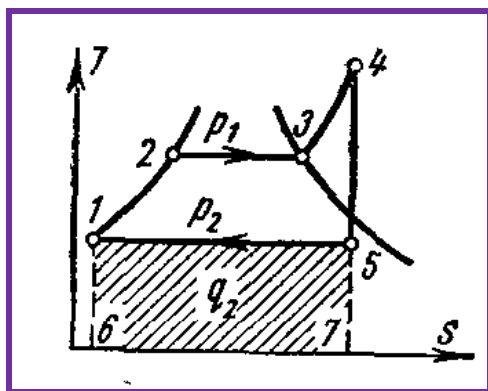
munosabat yordamida aniqlanadi, bu yerda L_s - m kg simob bug'ining ishi; L_{suv} – 1 kg suv bug'ining ishi, m- simobning aylanish karraligi (1kg suvga to'g'ri keladigan simob massasi, kg); h_8^s - simob qozonidan chiqqan simob bug'i entalpiyasi; h_7^s – simob turbinasidan chiqqan simob bug'i entalpiyasi; h_2^{suv} - turbinadan chiqqan suv bug'i entalpiyasi; h_1^{suv} - bug' qizdirgichdan chiqqan o'ta qizigan suv bug'i entalpiyasi; h_6^s -kondensatordan chiqqan simob entalpiyasi; h_5^{suv} – qozondan chiqayotgan to'yingan suv bug'i entalpiyasi. Simobni aylanish karraligi m ni kondensator-bug'latgichning issiqlik balansidan aniqlaymiz

$$m = (h_5^{suv} - h_3^{suv}) / (h_7 - h_6), \quad (15.12)$$

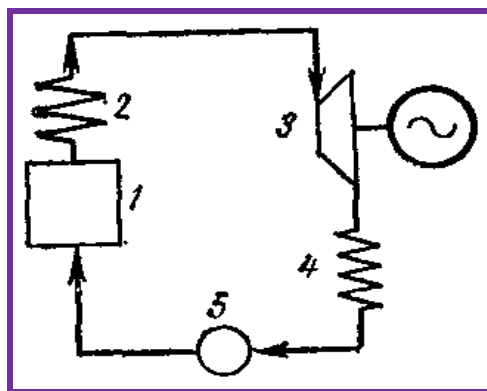
bu yerda: h_3^{suv} – kondensatordan chiqqan suv entalpiyasi.

Teplofikatsion bug’-kuch qurilmasi. Issiqlik elektr stantsiyalarida elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonida juda ko’p issiqlik miqdori kondensatorda sovituvchi suvga beriladi va shunday qilib, foydasiz yo’qoladi. Ma’lumki, ishlab chiqarish va turmush ehtiyojlari uchun issiqlik issiq suv va bug’ ko’rinishida har xil turdagi texnologik jarayonlarda binolarni isitish, hamda issiq suv bilan ta’minlashda juda ko’p miqdorda iste’mol qilinadi.

Odatda, bug’ turbinali qurilmalarda kondensatordagi bosim taxminan 4kPa ga teng bo’ladi, ya’ni bug’ – 28-29°S ga yaqin temperaturada kondensatsiyalanadi. Odatda, texnologik maqsadlar uchun bosimi 150-260 kPa bo’lgan to’yingan suv bug’i yoki temperaturasi ayrim qurilmalarda 180°S ga ko’tariladigan issiq suvdan foydalaniladi. Agar kondensatordagi bosimni 100-200 kPa gacha oshirilsa, siklning pastki temperaturasi oshadi, termik F.I.K ning kattaligi bir oz pasayadi, lekin texnologik va turmush ehtiyojlari uchun ko’p miqdorda issiqlik olish imkoni paydo bo’ladi. Elektr stantsiyalarida elektr energiya va issiklikni aralash ishlab chiqarish teplofikatsiya deb aytiladi, bunday elektr stantsiyalarda ishlatiladigan turbinalar teplofikatsion turbinalar deb aytiladi. Bunday elektr stantsiyalarni faqat elektr energiyasi ishlab chiqaradigan kondensatsion elektr stantsiyalari (KES) dan farqli o’laroq (IEM) – issiqlik elektr markazlari deb aytiladi. Teplofikatsion bug’ turbinolari qurilmasining sikli va sxemasi 15.7 va 15.8- rasmda tasvirlangan.



15.7-rasm. Teplofikatsion bug’ – kuch qurilmasining Ts-diagrammasi



15.8-rasm. IEM ning sxemasi.

Ts-diagrammada sikl ishi odatdagidek 1-2-3-4-5-1 yuza bilan tasvirlanadi. 1-5-7-6-1 yuza esa tashqi iste’molchiga berilgan issiqlik q_2 dan iborat. IEM bug’ qozoni 1,

bug' qizdirgich 2, qarshi bosimli bug' turbinasi 3, issiqlik iste'molchilari 4 va nasos 5dan tashkil topgan. Bunday turdagi kurilmalarda kondensator bo'lmaydi, ish bajargan bug' turbinadan bug' quvuri bo'yicha ishlab chiqarish ehtiyojlariga yuboriladi. Turbinadan chiqayotgan bug' bosimi ishlab chiqarish ehtiyojlari bilan aniqlanadi.

Siklning termik F.I.K. quyidagiga teng:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = l / q_1.$$

Qurilmada issiqlikdan foydalanish.

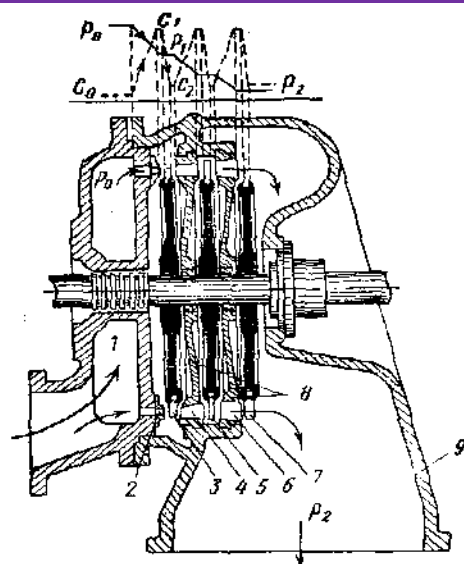
$$K = (L + q_2) / q_1.$$

munosabat bilan aniqlanadi.

Bu yerda L -ishga aylangan issiqlik, q_2 – issiqlik iste'molchilari foydalangan issiqlik.

Tezlik bosqichlari bor turbinalar. Qozon agregatlari takomillashib borishi bilan bug'ning parametrlari ham kattalashib bordi, natijada kuraklar va turbina disklarining aylanma tezligi U ham yanada ko'paydi. Lekin materialning mustahkamlik shartlariga ko'ra, aylanma tezlik 300-400 m/s dan ortib ketmasligi kerak, aks holda markazdan qochuvchi kuchlar turbina kuraklari va disklarida nihoyatda katta hamda xavfli kuchlanishlar paydo qiladi. Bug' turbinalarida tezlik bosqichlarini tatbiq etish yo'li bilan ish diskining aylanishlar sonini kamaytirishga, hamda bug'ning kinetik energiyasidan to'laroq foydalanishga muvofiq bo'lindi. 15.9-rasmda 2 ta tezlik bosqichi bor aktiv turbinaning sxemasi keltirilgan. Tezligi C_1 bo'lgan bug' tezlikning 1-bosqichiga, ya'ni birinchi qatordagi kuraklarning kanaliga kiradi, u yerda kinetik energiyaning faqat bir qismigina mexanik ishga aylanadi. So'ngra bug' $C_2 < C_1$ tezlik bilan turbina qobig'iga mahkamlangan yo'naltiruvchi kuraklarning kanallariga kiradi. Bu kuraklar bug' oqimining yo'nalishini o'zgartirishga mo'ljallangan. Bu yerda bug' yo'naltiruvchi kuraklarga ishqalanishi natijasida tezligining ozgina qismini yo'qotadi va ikkinchi qatordagi kuraklarga o'tadi. Tezlikning ikkinchi bosqichida kinetik energiyaning yana ma'lum bir qismi ishga aylanadi. Bunday turbinani Charlz Kyortis taklif etgan va birinchi marta 1900 yilda qurilgan.

Bosim bosqichlari bor turbina. 15.10-rasmda 3 ta bosim bosqichi bor, aktiv turbinaning sxemasi keltirilgan. Turbinani qobig'i to'siqlar: diafragma 8 lar bilan 3 ta kameraga bo'lingan. Bug' har qaysi diafragma va kuraklarning panjarasi 7 ga o'tadi. P_2 bosimli ishlab bo'lgan bug' potrubka orqali kondensatorga o'tadi. Bosim bosqichlari bor turbinaning F.I.K. i ancha yuqori bo'ladi. Bug'-kuch qurilmalarida asosiy Dvigatel sifatida keng ko'lamda ishlatiladi. Bosim bosqichlari aktiv turbinalarda ham reaktiv turbinalarda ham qo'llaniladi.



15.10-rasm. Uchta bosim bosqichi bor aktiv turbinaning sxemasi

Kombinatsiyalashtirilgan turbinalar. Kombinatsiyalashtirilgan turbinalarda bosim va tezlik bosqichlarining ijobiy tomonlaridan foydalaniladi va bunday turbinalar aktiv va aktiv-reaktiv bo'ladi. Masalan, ba'zi kombinatsiyalashtirilgan turbinalarda yuqori bosim qismiga aktiv turbina, pastki bosim qismiga reaktiv-turbina qo'yiladi. Bunday turbinalarda bosim bosqichlarining soni kamayadi bino-barin turbina ixchamlashadi, ancha arzon va ishonchli bo'ladi.

15.4. Bug' turbinasi.

Bug'ning issiqlik energiyasini bosqichma-bosqich mexanik energiyaga aylantirib beruvchi issiqlik mashinasi bug' turbinasi deyiladi. Hozirgi paytda bug' turbinasi zamonaviy yirik elektr stantsiyalarining yagona dvigateli hisoblanadi.

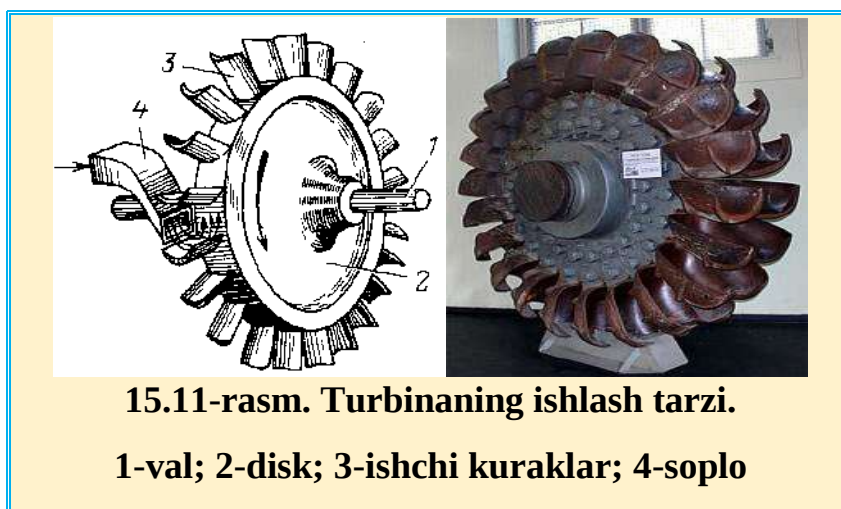
Italiyalik olim D.Branko bug' turbinasi modeliga hos bo'lgan bug' g'ildiragini 1629 yilda yaratgan, unda bug' oqimining kinetik energiyasi uyg'otgan impuls kurakli gildirakni aylantirishga sarflangan. Quvvati 4,4 kVt bo'lgan birinchi bug' turbinasini (reaktiv turbina) 1885 yili ingliz muxandisi Parsons yaratdi, 1913 yilda esa , turbinaning quvvati 25 MVt gacha yetkazildi. Keyinchalik bug' turbinalarining nominal quvvati 60 MVt, bosimi 12,8 MPa ga

yetkazildi, u kupchilik issiqlik elektr stantsiyalarida qo'llanilib kelinmokda. Zamonaviy turbinalarning kuvvati 1200 MVt dan ortib ketgan. Turbina rotorining aylanishlar soni esa 2000-50000 ayl/min oralig'ida. Suv bug'ining kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantirish mumkinligini shved muxandisi Loval 1888 yilda (aktiv turbina) isbotladi.

Shunday kilib, bug' turbinalari yaratilgandan so'ng, uni takomillashtirish tadqiqotlari davom etdi. Natijada bir, ikki va ko'p bosqichli bug' turbinalari yaratildi. Turbinadagi ish jarayoni ketma-ket kechadigan ikki bosqichdan tashkil topgan: bug'ning potentsial energiyasini kinetik energiyaga aylanishi va bug'ning energiyasini turbina valining aylanma energiyasiga aylanishi.

Turbinaning ishlash tarzi sodda. Turbinaning (15.11-rasm) oqib o'tish qismi ikkita asosiy qismdan: soplo apparati 4 va turbinaning vali 1 ga o'rnatilgan disk 2 dan tashkil topgan. Diskning aylanasi bo'ylab ishchi kuraklar 3 maxkamlangan, ular kanallar hosil qiladi.

Bosimi yuqori bo'lgan va odatda temperaturasi ham yuqori bo'lgan ishchi jism (bug', gaz, suyuqlik) soplo apparatiga kiradi. Soplolarda bug' kengayadi, uning bosimi pasayadi va tegishli tezligi ortadi, ya'ni soplo apparatida bug'ning ichki energiyasi kinetik energiyaga aylanadi. Ikkinchi bosqich ishchi kuraklar hosil qilgan kanallarda sodir bo'ladi, bu yerda bug'ning kinetik energiyasi diskning va



15.11-rasm. Turbinaning ishlash tarzi.

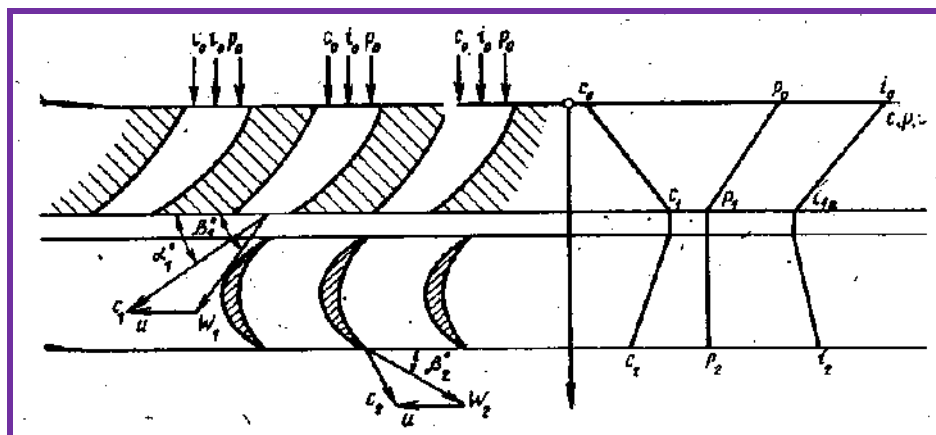
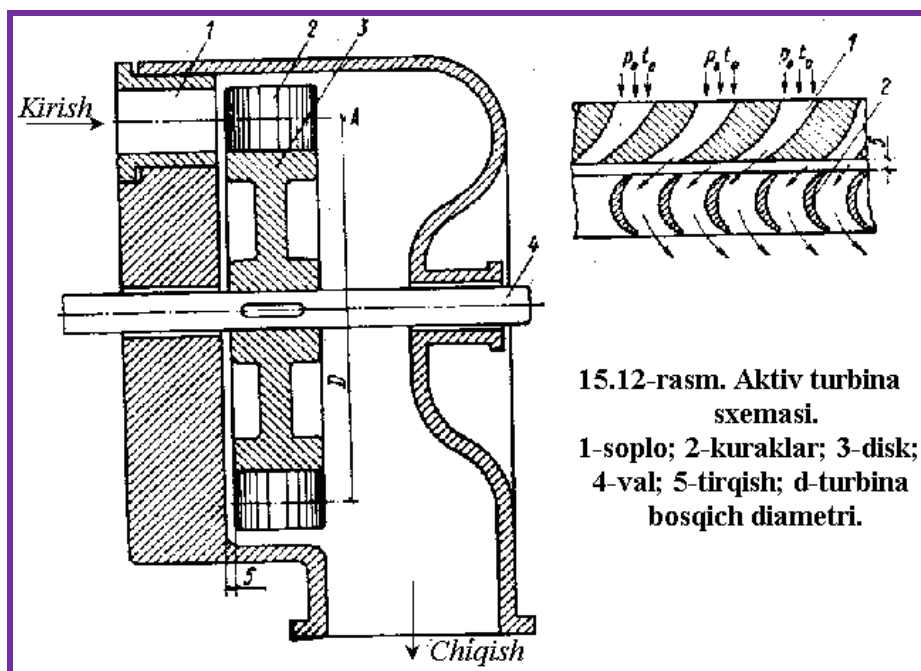
1-val; 2-disk; 3-ishchi kuraklar; 4-soplo

u bilan bog'langan turbina valining harakatlantiradigan mexanik ishga aylanadi. Turbina bosqichlariga bug' qo'zg'almas va aylanuvchan kanallar tizimi bo'yicha o'tadi. Shuning uchun harakat turiga ko'ra bug'ning uch xil tezligi

bo'ladi: C – absolyut tezlik; I – ko'chma harakat tezligi, u turbina diskining aylanma tezligiga teng; w – nisbiy tezlik.

Bug'ning soploga kirish oldidagi, soplodan keyingi va kuraklardan keyingi parametrlari tegishli 0,1,2 indekslar bilan belgilanadi. Ishchi kuraklar mahkamlangan bitta diskli soplo apparati turbinaning bosqichini hosil qiladi. Bitta bosqichdan iborat bo'lgan turbina bir bosqichli turbina deyiladi. Bir necha bosqichdan iborat bo'lgan turbinalar ko'p bosqichli turbinalar deyiladi.

Aktiv turbina. Aktiv turbina kuraklari panjarasining kanallarida bug' oqimi buriladi. Bug' oqimi harakat miqdorining o'zgarishi kuraklarga va aylanuvchan diskka hamda turbina valiga ta'sir etuvchi aktiv kuchga aylanadi (15.12-rasm). Ish kanallarida aktiv kuch ta'sir etuvchi turbina aktiv turbina deyiladi.



15.13-rasm. Aktiv turbinada bug' oqimi sxemasi

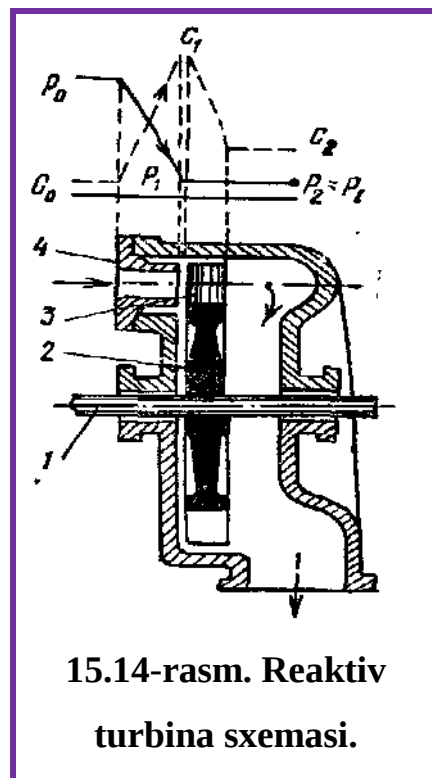
Parametrlari p_0 , c_0 va t_0 bo'lgan bug' soplo 1 ga kiradi. Parametrlari p_1 , c_1 va t_1 bo'lgan bug' soplodan kuraklar 2 ning kanallariga o'tadi, bu yerda bug'ning bosimi o'zgarmasligicha qoladi. ($p_1 = p_2$), tezligi esa s_1 dan s_2 gacha pasayadi, ya'ni bug'ning kinetik energiyasi disk 3 ni va u bilan bog'liq bo'lgan turbina vali 1 ni aylantiruvchi mexanik ishga aylanadi. Turbina valiga tushadigan kuch bug' oqimi burilgandagina uzatilgani tufayli, kuraklar kuchli bukilgan aktiv profilli bo'lishi kerak. Kuraklardan oldingi va ulardan keyingi bug' tezliklarining kattaligi va yo'nalishini kirish va chiqish tezlik uchburchaklari qurib aniqlash mumkin (15.13 - rasm). Jumladan, nisbiy tezlik vektori ushbu geometrik ayirmadan aniqlanadi:

$$w_1 = C_1 - U$$

Bug' nisbiy tezligi w_1 ning yo'nalishi turbina yuzasi bilan β_1^0 burchak hosil qiladi, u kirish burchagi deyiladi. c_1 vektorning yo'nalishi soplo o'qi va disk tekisligi orasidagi burchak α_1 bilan aniqlanadi. Bug' kanaldan o'tib, disk tekisligiga β_2^0 burchak ostida yo'nalgan w_2 nisbiy tezlikka ega bo'ladi. Bug'ning harakatidagi isroflar tufayli bug'ning chiqishdagi tezligi w_2 kirishdagi tezlik w_1 dan kichik bo'ladi. Bu isroflar kurakning tezlik koeffitsienti (odatda $0,93 \div 0,97$) ψ bilan hisobga olinadi; bunda

$$W_2 = \psi w$$

Bug'ning kuraklaridan chiqishdagi absolyut tezligi c_2 ni w_2 va U tezliklarini geometrik yig'indisidan aniqlanadi. Aktiv turbinaning o'ziga xos xususiyatlari shundan iboratki, birinchidan, bug'ning kengayish jarayoni mavjudligi, ya'ni uning bosimi faqat soplolarda pasayadi; ikkinchidan, kurakli kanallarda bug' bosimi o'zgarmasdan qoladi, bug'ning nisbiy va absolyut tezliklari esa kamayadi.



15.14-rasm. Reaktiv turbina sxemasi.

Reaktiv turbina. 15.14 – rasmda reaktiv turbina bosqichining sxemasi ko'rsatilgan. Turbinaning soplo apparati qo'zg'almas kuraklar 3 ning har qaysi jufti hosil qilgan torayib boradigan kanallar 4 dan iborat. Soplo apparatida bug' boshlang'ich bosimi p_0 dan biror oraliq bosim p_1 ($p_2 < p_1 < p_0$) gacha qisman kengayadi va energiyaning bir qismigina kinetik energiyaga aylanadi. Energiyaning qolgan qismi bevosita kurak kanallarida kinetik energiyaga aylanadi, bunda bug' p_1 bosimdan oxirgi p_2 bosimgacha kengayadi va natijada bug'ning nisbiy tezligi w_1 dan w_2 gacha ortadi. Reaktiv bosqichning tavsifi reaksiya darajasidir (ρ), u ish g'ildiragining kuraklarida vujudga keladigan issiqlik pasayishining barcha bosqichdagi issiqlik pasayish nisbati sifatida aniqlanadi. Zamonaviy bug' turbinalarining oxirgi bosqichida $\rho \approx 0,5$ bo'ladi. Birinchi bosqichlar uchun ρ 0,1-0,2 atrofida tanlanadi chunki bu holda soplo va kuraklar profili bir xil bo'ladi va natijada turbinalarni tayyorlash osonlashadi. Turbinani aylantiruvchi kuch bug' p_1 dan p_2 bosimgacha kengayadigan, kuraklari torayib boruvchi kanalning reaktiv ta'sirida vujudga keladi. Bosimning pasayishi natijasida bug'ning kuraklarga nisbatan oqish tezligi ortadi. Bunda itarish kuchi – reaktiv kuch vujudga keladi. Reaktiv kuchning yo'nalishi oqib chiqayotgan bug' tezligiga teskari yo'nalgan. 15.15–rasmda reaktiv bosqichning tezlik uchburchaklari ko'rsatilgan.

O'N OLTINCHI BOB

GAZ - TURBINALI QURILMALAR VA REAKTIV DVIGATELLAR SIKLI

16.1. Gaz – turbinali qurilmalar

Yuqori bosim va temperatura ostidagi yonish mahsulotlari energiyasini kuraklar yordamida rotor valining mexanik energiyasiga aylantiruvchi issiqlik mashinasi gaz turbinasi deyiladi. Gaz turbinalari ham bug' turbinalariday bo'lib, faqat ularda bug' o'rniga yonish mahsuloti – tutun asosiy ish jismi hisoblanadi.

GTQ gaz – turbinasi-dvigatel va yordamchi qurilmalardan iborat. Dvigatel tarkibiga turbina, yonish kamerasi, kompressorlar, yoqilg'i nasosi, bak, elektr generatori, regenerativ issiqlik almashtirgichlar kiradi. Yordamchi qurilmalar jumlasiga GTQ ning qaysi maqsadda ishlatilishiga qarab quyidagilarni kiritish mumkin: gaz yo'llari, quvurlar, ishga tushirish qurilmalari, moylash tizimlari, suv ta'minlash qurilmalari va boshqalar. GTQ dagi turbina, elektr generatori, havo kompressori va yoqilg'i nasosi yagona umumiy valda joylashtiriladi. Oxirgi 20 – 30 yil mobaynida GTQ xususan transport va energetikada keng qo'llanila boshlandi. Energetikada qo'llaniladigan GTQlari elektr energiyasi yetishmasdan qolganda, energetik tizimda buzilishlar bo'lganda iste'molchilarni elektr energiyasiga bo'lgan talabini qondirish maqsadida ishlatiladi. Bunday GTQ larning quvvati 1–100 MVt oralig'ida bo'lib, yil mobaynida 1500 soatdan ortiq ishlatilmaydi. Dengiz kemalaridagi GTQ asosiy energiya manbai hisoblanadi va ularning quvvati 30 kVt dan 10 MVt gacha bo'ladi.

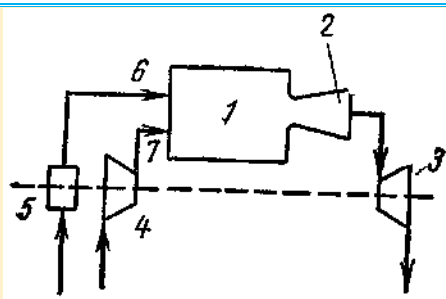
Neftni haydashda, gaz magistrali quvurlarida, turli xil kompressorlarni ishlatishda GTQ lari asosiy mexanik energiya manbai hisoblanadi. GTQ aviatsiya transportidagi turboreaktiv, turbovintli reaktiv samolyotlarning asosiy va forsaj (frantsuzcha forcer - jadallashtirmoq) dvigatellarida ham keng tadbiiq etilgan.

Hozirgi zamon GTQ ning deyarli hammasi yonish mahsulotlari turbinaning oqim qismi orqali o'tadigan sxema bo'yicha ishlaydi. Shu sababli gaz turbinalarida ishlatiladigan yoqilg'i tarkibida zararli aralashmalar miqdori juda kam bo'lishi kerak. Bunday yoqilg'ilar jumlasiga tabiiy gaz, yaxshi tozalangan sun'iy gazlar (domna gazi, koks gazi, generator gazi) gaz turbinalarida ishlatiladigan maxsus

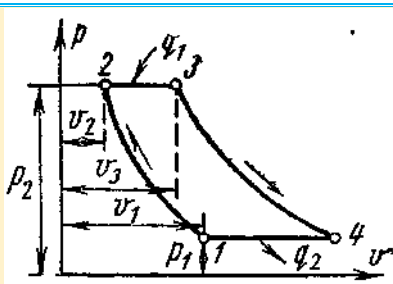
suyuq yoqilg'i (dizel, motor yoqilg'isi, solyar moyi) kiradi. GTQ lar ish moddasini yoqish uslubiga ko'ra $v = \text{const}$, $p = \text{const}$ va aralash bosqichli bo'ladi.

16.2. Issiqlik $p = \text{const}$ da uzatiladigan GTQ.

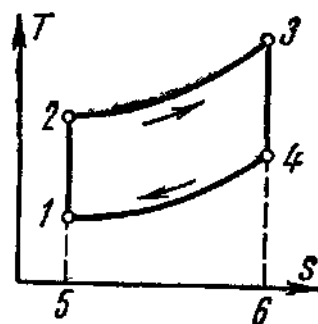
16.1–rasmda issiqlik $p = \text{const}$ da uzatiladigan GTQ ning soddalashtirilgan sxemasi ko'rsatilgan. Havo kompressori 4 atmosfera havosini so'rib oladi, uni siqadi va forsunka 7 orqali yonish kamerasi 1 ga haydaydi. Kameraga forsunka 6 orqali nasos 5 yordamida suyuq yoki gaz yoqilg'i ham beriladi. Kompressorda siqilgan havo qizib, uning temperaturasi yoqilg'ining yonish temperaturasidan katta bo'ladi. Siqilgan yuqori temperaturali va bosimli havoga yoqilg'i purkalganda kuchli kimyoviy reaksiya sodir bo'ladi, ya'ni u yonadi. Bunda yonish o'zgarmas bosim ostida ro'y beradi. Yonish mahsulotlari kameradan soplo 2 ga kelib, atmosfera bosimigacha kengayadi. Yonish kamerasida yuqori kaloriyali yoqilg'i yonganda temperatura 2000°S ga qadar ko'tariladi. GTQ tayyorlanadigan hozirgi zamon issiqbardosh po'lat va qotishmalar $700 - 900^\circ\text{S}$ ga chidaydi. Shuning uchun kameradagi temperaturani 2000°S dan $700 - 900^\circ\text{S}$ gacha pasaytirish uchun unga ko'p miqdorda sovuq havo yuboriladi. Odatda ortiqcha havo ko'effitsienti aviatsion qurilmalar uchun $\alpha=4-5$ ni, statsionar qurilmalar uchun esa $\alpha=6-10$ ni tashkil etadi. Birlamchi havo mash'ala o'zagiga, ikkilamchi havo yonish kamerasi devorlari tomon uzatiladi va yonish kamerasining oxirida yonish mahsulotlari bilan aralashadi. 16.2– va 16.3–rasmlarda issiqlik $p=\text{const}$ da uzatiladigan GTQ ning Pv va Ts -diagrammalaridagi ideal sikli tasvirlangan. Bu sikl ikkita adiabataga va ikkita izotermadan tashkil topgan.



16.1–rasm.



16.2–rasm.



16.3–rasm.

Boshlang'ich parametrlari p_1, v_1, T_1 bo'lgan ishchi jism 1–2 adiabatada bo'yicha 2 nuqtagacha adiabatik siqiladi. Ishchi jismga 2 nuqtadan boshlab 2–3 izobara bo'yicha q_1 issiqlik miqdori keltiriladi. Keyin ishchi jism 3–4 adiabatada bo'yicha boshlang'ich bosimgacha kengayadi va 4–1 izobara bo'yicha boshlang'ich holatga qaytadi. Bunda q_2 issiqlik chiqariladi. Siklni tavsiflovchi kattaliklar: bosimni kompressorda ortish darajasi $\beta = p_2/p_1$ va izobar kengayish darajasi $\rho = v_3/v_2$. Keltirilgan issiqlik miqdorini quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$q_1 = c_p(T_3 - T_2),$$

olib ketilgan issiqlik miqdorini esa quyidagi formuladan aniqlaymiz:

$$q_2 = c_p(T_4 - T_1)$$

Siklning termik F.I.K. quyidagiga teng:

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1 = 1 - c_r(T_4 - T_1)/c_r(T_3 - T_2) = 1 - (T_4 - T_1)/(T_3 - T_2) \quad (16.1)$$

T_2, T_3 va T_4 temperaturalarni ishchi jismning boshlang'ich temperaturasi T_1 orqali ifodalaymiz:

1 – 2 adiabatada uchun

$$\begin{aligned} T_2/T_1 &= (P_2/P_1)^{(K-1)/K} = \beta^{(K-1)/K}; \\ T_2 &= T_1 \beta^{(K-1)/K}; \end{aligned}$$

2 – 3 izobara uchun:

$$T_3/T_2 = v_3/v_2 = \rho; \quad T_3 = T_2 \rho; \quad T_3 = T_1 \beta^{(K-1)/K} \rho;$$

3 – 4 adiabatada uchun :

$$T_4 = T_1 \beta^{(K-1)/K} \rho \frac{1}{\beta^{(K-1)/K}} = T_1 \rho$$

Olingan temperatura qiymatlarini (16.1) formulaga qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1 \rho - T_1}{T_1 \beta^{(K-1)/K} \rho - T_1 \beta^{(K-1)/K}} = 1 - \frac{\rho - 1}{\beta^{(K-1)/K} (\rho - 1)} \quad (16.2)$$

yoki

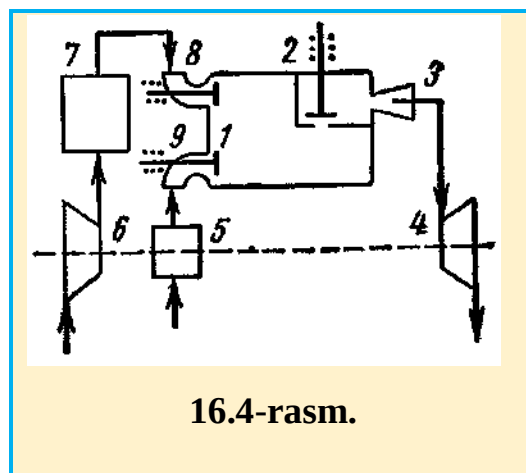
$$\eta_t = 1 - 1/\beta^{(K-1)/K} \quad (16.3)$$

η_t uchun keltirilgan ifodalardan ko'rinib turibdiki, uning kattaligi bosimning ortish darajasiga, shuningdek adiabatika ko'rsatkichiga bog'liqdir, bu kattaliklar ortishi bilan η_t ko'payadi.

16.3. Issiqlik $v=\text{const}$ da uzatiladigan GTQ

16.4 – rasmda issiqlik o'zgarmas hajmda yonadigan GTQ ning sxemasi ko'rsatilgan. Bu qurilmada kompressor 6 da siqilgan havo resiver (bosimni rostlaydigan idish) 7 dan havo klapani 8 orqali yonish kamerasi 1 ga keladi. Shu yerga yoqilg'i nasosi 5, yoqilg'i klapani 9 orqali suyuq yoqilg'ini uzatadi. Yonish mahsulotlari soplo klapani 2 orqali o'tib, soplo 3 da kengayadi va turbina rotori 4 ni aylantiradi. Yonish kamerasiga avvalo ma'lum parametrlri siqilgan havo, keyin yoqilg'i uzatiladi. Shunda hosil bo'lgan ish yoqilg'isiga elektr uchquni uzatiladi va ish yoqilg'isi yonadi.

Bu yonish natijasida yonish kamerasidagi bosim keskin ortadi. Ish yoqilg'isi to'la (kamida 95%) yongandan so'ng uning temperaturasi 2000°S ko'tariladi. Shunda yonish kamerasidagi bosim eng yuqori qiymatga yetadi. Ana shundagina 2 klapan ochiladi. Shu paytda yonish mahsulotlari temperaturasini $700\text{--}900^{\circ}\text{S}$ gacha pasaytirish uchun sovuq havo uzatiladi.



16.4-rasm.

16.5 va 16.6-rasmlarda shu siklning Pv va Ts diagrammalari tasvirlangan.

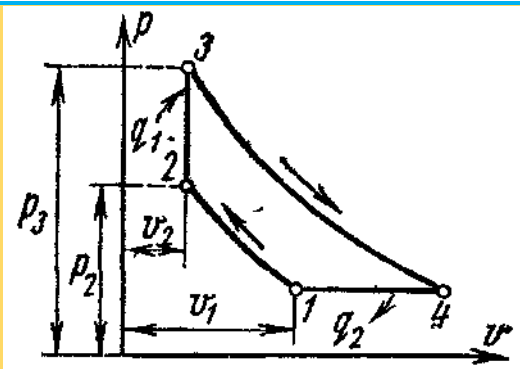
Bu siklda 1 – 2 adiabatik siqilish;

2–3 – ishchi jismga issiqlik keltirish;

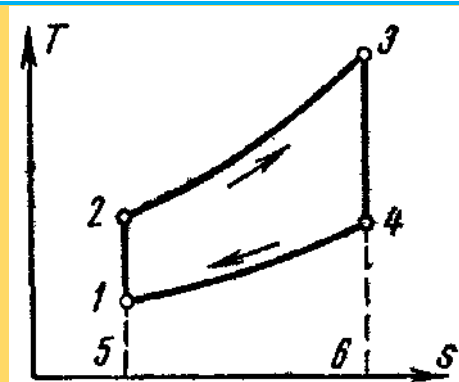
3–4 – adiabatik kengayish;

4–1 – boshlang'ich holatga qaytish.

Siklni tavsiflovchi kattaliklar: $\beta=p_2/p_1$ – bosimni ortish darajasi va $\chi=p_3/p_2$ – bosimni qo'shimcha ortish darajasi.



16.5-rasm.



16.6-rasm.

Keltirilgan issiqlik quyidagi formuladan:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2),$$

olib ketilgan issiqlik esa quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$q_2 = c_r(T_4 - T_1).$$

q_1 va q_2 larni qiymatlarini siklning termik F.I.K. formulasiga qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{c_r(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{\kappa(T_4 - T_1)}{T_3 - T_2}. \quad (16.4)$$

T_2 , T_3 va T_4 temperaturalarni ishchi jismning boshlang'ich temperaturasi T_1 orqali ifodalaymiz:

1-2 adiabata uchun

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(K-1)/K} = \beta^{(K-1)/K}; \quad T_2 = T_1 \beta^{(K-1)/K};$$

2 – 3 izoxora uchun

$$T_3/T_2 = P_3/P_2 = \chi; \quad T_3 = T_2 \chi \quad \text{va} \quad T_3 = T_1 \beta^{(K-1)/K} \chi;$$

3 – 4 adiabata uchun

$$T_4/T_3 = (P_4/P_3)^{(K-1)/K} = (P_1/P_1 \beta \chi)^{(K-1)/K} = 1/(\beta \chi)^{(K-1)/K};$$

$$T_4 = T_3 (1/\beta \chi)^{(K-1)/K} = T_1 \beta^{(K-1)/K} \chi (1/\beta \chi)^{(K-1)/K} \quad \text{va} \quad T_4 = T_1 \chi^{1/K}.$$

Olingan qiymatlarni (16.4) formulaga qo'yamiz.

U holda

$$\eta_t = 1 - \frac{K(T_4 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{\kappa(T_1 \chi^{1/K} - T_1)}{T_1 \beta^{(K-1)/K} \chi - T_1 \beta^{(K-1)/K}},$$

yoki

$$\eta_t = 1 - [K(\chi^{1/K} - 1)] / [\beta^{(K-1)/K} (\chi - 1)] \quad (16.5)$$

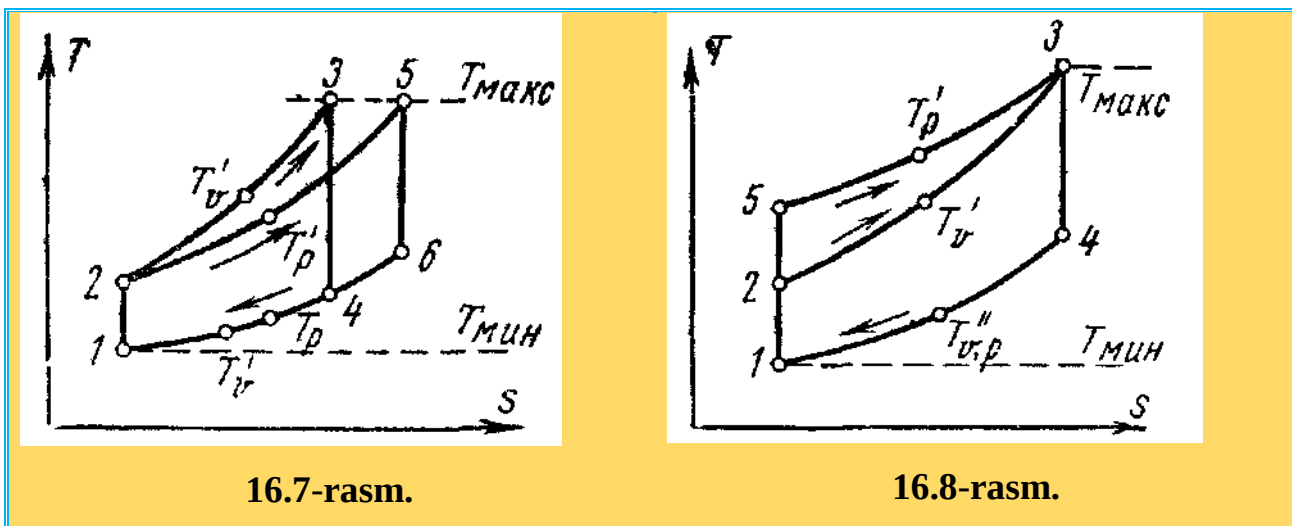
Ushbu GTQ ning termik F.I.K. k , β va χ larga bog'liq bo'lib, bu kattaliklar ortishi bilan ko'payadi.

16.4. GTQ sikllarini taqqoslash

16.7 – rasmda bosimning ortish darajalari bir xil va maksimal temperaturalarini ham bir xil bo'lgan GTQ ning sikllari keltirilgan. Rasmdan ko'rinib turibdiki, $v=\text{const}$ da issiqlik keltiriladigan GTQ siklining F.I.K. yuqori bo'lar ekan.

Haqiqatdan ham 16.7 – rasmdan ko'rinib turibdiki, issiqlik keltirishning o'rtacha integral temperaturalarini $T'_v > T'_p$ va issiqlik olib ketishning o'rtacha integral temperaturalarini $T''_v > T''_p$ bo'ladi, ya'ni:

$$\eta_{t, \text{izoh}} > \eta_{t, \text{izob.}}$$



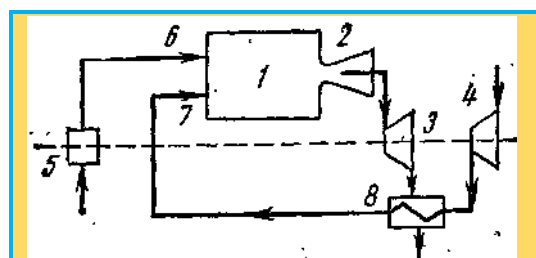
16.8 – rasmda bosimning ortish darajalari har xil va maksimal temperaturalarini bir xil bo'lgan GTQ ning sikllari tasvirlangan. Bu rasmdan ko'rinib turibdiki, $T'_v > T'_p$ va $T''_v = T''_p$, ya'ni o'rtacha integral temperaturalar bo'yicha aniqlangan termik F.I.K. $p = \text{const}$ da issiqlik keltiriladigan GTQ sikl uchun katta bo'lar ekan:

$$\eta_{t, \text{izob}} > \eta_{t, \text{izoh}}$$

16.5. Gaz – turbinali qurilmaning F.I.K. ni oshirish yo'llari

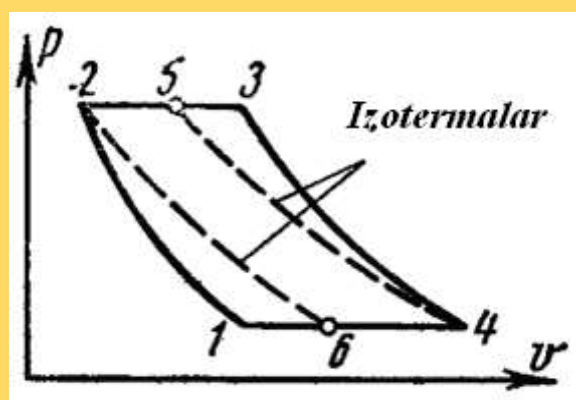
Issiqlik $p = \text{const}$ da uzatiladigan GTQ ning termik F.I.K. bosimning ortish darajasi β oshishi bilan ortadi. Lekin β oshishi bilan gazlarning yonish oxiridagi temperaturasi ham ortadi, buning natijasida turbina kuraklari va soplo apparatlarini sovitish qiyinlashadi va natijada ular tezda ishdan chiqadi.

GTQ larning F.I.K. ni oshirish uchun ularning ish sharoiti qisman o'zgartiriladi. Qurilmalarda issiqlikni regeneratsiyalash, havoni kompressorda ko'p bosqichli siqish, ko'p bosqichli yonish kabi usullar qo'llaniladi. Buning natijasida GTQ lar mukammallashadi va uning iqtisodiy jihatdan tejamlilik ortadi.

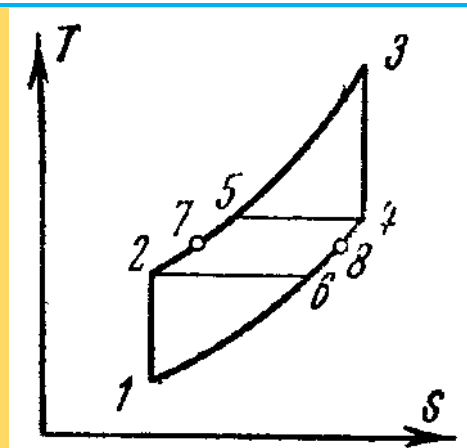


16.9-rasm.

Regeneratsiyalash usulini GTQ da tadbqiq etilishini mufassalroq ko'rib chiqaylik. 16.9 – rasmda regeneratsiyali, issiqlik $p=\text{const}$ da uzatiladigan GTQ tasvirlangan. Turbokompressor 4 da siqilgan havo regenerator 8 ga yuboriladi, bu yerda havo yonish kamerasi 1 dan soplo 2 orqali turbina 3 da ishlab bo'lgan gazlardan $p=\text{const}$ da issiqlik oladi. Regeneratorda isitilgan havo forsunka 7 orqali yonish kamerasi 1 ga yuboriladi. Shu yerga yoqilg'i nasosi 5 dan forsunka 6 orqali yoqilg'i yuboriladi. Shunday regeneratsiyali GTQ ning ideal sikli 16.10 va 16.11– rasmda tasvirlangan.



16.10-rasm.



16.11-rasm.

Bu rasmlarda: 1 – 2 – havoni kompressorda adiabatik siqilishi; 2 – 5 – regeneratorda issiqlikning izobarik keltirilishi; 3 – 4 – turbina soplosida yonish mahsulotlarining adiabatik kengayishi; 4 – 6 – regeneratorda issiqlikni olib ketilishi; 6 – 1 – regeneratordan chiqishda gazlardan issiqlikni izobarik olib ketilishi.

Agar gazlarning regeneratorda sovishi unga kirayotgan havo temperaturasi gacha bo'ladi deb faraz qilsak, ya'ni T_4 dan $T_6=T_2$ gacha, u holda regeneratsiya to'liq bo'ladi. To'liq regeneratsiyali $(T_4-T_6=T_5-T_2)$ siklning termik F.I.K. ni quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$\eta_t = 1 - q_2/q_1,$$

bu yerda

$$q_1 = c_p(T_3 - T_5) = c_p(T_3 - T_4),$$

$$q_2 = c_p(T_6 - T_1) = c_p(T_2 - T_1),$$

u holda

$$\eta_t = 1 - [(T_2 - T_1)/(T_3 - T_4)]$$

Siklning asosiy nuqtalaridagi temperaturalar quyidagicha aniqlanadi:

$$T_2 = T_1(p_2/p_1)^{(K-1)/K} = T_1\beta^{(K-1)/\chi}\rho;$$

$$T_4 = T_1\rho$$

Siklning termik F.I.K.

$$\eta_{tre2} = 1 - 1/\rho = 1 - T_1/T_4 \quad (16.6)$$

demak, ushbu siklning termik F.I.K. gazning boshlang'ich temperaturasi T_1 va adiabatik kengayish oxiridagi temperaturaga T_4 bog'liq bo'lar ekan.

Regeneratorning o'lchamlari cheklanganligi va isitilayotgan hamda sovutilayotgan gaz oqimlari oxirgi temperaturalar o'rtasidagi farq borligi tufayli to'liq regeneratsiyani amalga oshirib bo'lmaydi. Bunday holda regeneratorda isitilayotgan havoning temperaturasi T_7 ($T_7 > T_5$), sovutilayotgan gazlar temperaturasi esa T_8 ($T_8 > T_6$) bo'ladi. Shuning uchun siklning termik F.I.K. quyidagi temperaturalar nisbati bilan aniqlanadigan regeneratsiya darajasiga bog'liq bo'ladi:

$$\sigma = (T_7 - T_2)/(T_5 - T_2) = (T_4 - T_8)/(T_4 - T_6) = (T_4 - T_6)/(T_5 - T_2) \quad (16.7)$$

To'liq regeneratsiya bo'lmagan, ya'ni $\sigma < 1$, GTQ siklining termik F.I.K. quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_{tre2} = 1 - [T_4 - T_1 - \sigma(T_5 - T_2)]/[T_3 - T_2 - \sigma(T_5 - T_2)] \quad (16.8)$$

Regeneratsiya darajasi issiqlik almashinuv apparatining tuzilishiga (mukammalligiga) bog'liq bo'ladi. Regeneratsiyani $v = \text{const}$ da issiqlik uzatiladigan

GTQ da ham amalga oshirish mumkin. Regeneratsiya jarayoni IAA da o'zgarmas bosimda amalga oshishi sababli, bu holda issiqlik izobara bo'yicha ham, izoxora bo'yicha ham keltiriladi (16.12-rasm).

Ushbu sikl quyidagi jarayonlardan tashkil topgan:

1–2 –havoni kompressorda adiabatik siqilishi;

2–3 –siqilgan havoni regeneratorda $p=\text{const}$ da isitilishi;

3–4 –yonish kamerasiga $v=\text{const}$ da issiqlik keltirilishi;

4–5 –turbina soplolarida yonish mahsulotlarini adiabatik kengayishi;

5–6 –issiqlikni gazlardan regeneratorda $p=\text{const}$ da olib ketilishi;

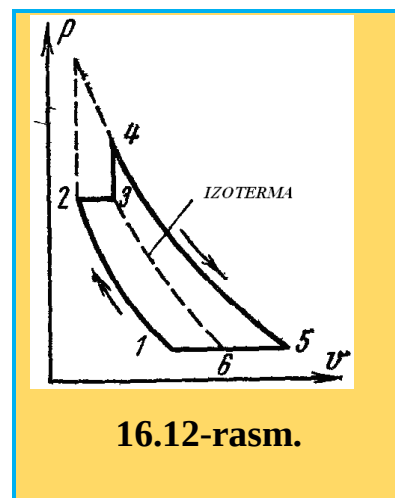
6–1 – regeneratorda $p=\text{const}$ da issiqlikni gazlardan havoga uzatilishi.

Tekshirilayotgan siklning termik F.I.K. quyidagiga teng:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{\kappa[(T_5 - T_1) - (T_3 - T_2)]}{T_4 - T_3} \quad (16.9)$$

Issiqlik $v=\text{const}$ da uzatiladigan GTQ siklining termik F.I.K. ham issiqlikni regeneratsiyalash natijasida ortadi. Undan tashqari GTQning tejamliligini issiqlikni $T=\text{const}$ da keltirish va olib ketish orqali ham oshirishi mumkin. Lekin, amalda bunday qurilmaning murakkabligi sababli $T=\text{const}$ da issiqlik keltirish va olib ketish jarayonini to'liq amalga oshirib bo'lmaydi. Kompressorlarda haqiqiy siqish jarayonini $T=\text{const}$ ga yaqinlashtirish uchun havo oraliq sovutish yo'li bilan bir necha marta siqiladi. GTQ da ham issiqlik keltirish jarayonini $T=\text{const}$ ga yaqinlashtirish uchun yonish mahsulotlari turbinaning alohida bosqichlarida kengayadigan bosqichli yonish usuli qo'llaniladi. Kengayish va siqish bosqichlari qanchalik ko'p bo'lsa, shunchalik termik F.I.K. yuqori bo'ladi. Biroq, yonish kameralari va sovutgichlarini ko'payishi qurilmani nihoyatda murakblashtirib yuboradi.

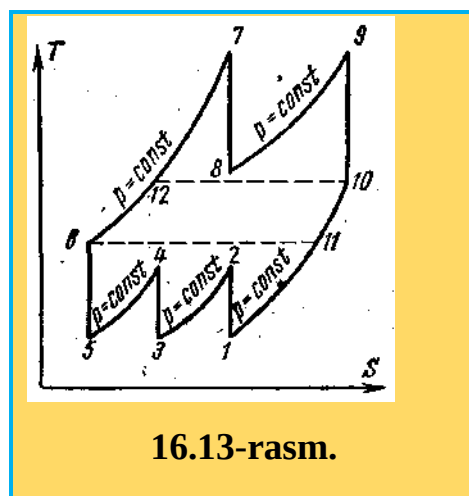
Odatda texnik va iqtisodiy mulohazalardan kelib chiqqan holda GTQ da kengayish ikki bosqichda va siqish uch bosqichda amalga oshiriladi. Bunday



qurilmada havo kompressorning alohida bosqichlarida ketma – ket siqiladi va oraliq sovutgichlarda sovutiladi. Yuqori bosimgacha siqilgan havo birinchi yonish kamerasiga kelib, u yerda maksimal temperaturagacha qiziydi. Turbinada kengaygan gaz ikkinchi yonish kamerasiga keladi va yoqilg'I $p = \text{const}$ da yonishi sababli u yana maksimal temperaturagacha qiziydi. Keyin yonish mahsulotlari turbinaning ikkinchi bosqichida kengayadi va atmosferaga chiqarib yuboriladi. Agar GTQ da issiqlik regeneratsiyalansa, u holda siqilgan havo ishlangan gazlar bilan isitilishi mumkin.

16.13–rasmda shunday GTQ ning ideal sikli Ts – diagrammada tasvirlangan.

Yuqorida keltirilgan usullarni qo'llash GTQ ning termik F.I.K. ni sezilarli darajada orttiradi. Yuqorida ko'rib o'tilgan GTQ lar ochiq sikl bo'yicha ishlaydi, ya'ni ularda yonish mahsulotlari turbinada ishlab bo'lgandan so'ng atmosferaga chiqarib yuboriladi. Shunday qilib siklda ishchi jism har doim o'zgarib turadi. Shunday sikllar borki, ularning sxemasida ish-



chi jism o'zgarmas miqdorda tsirkulyatsiyalanadi. Bunday sikllarni yopiq (berk) sikllar deb aytiladi.

Bunday sikllarda ishchi jism sifatida toza havo, geliy, argon, vodorod, freon kabi gazlar ishlatilishi mumkin. Bunday yopiq jarayon bir qancha afzalliklarga ega. Unda arzon, qattiq yoqilg'ilardan foydalanish, yuqori bosimli havoni qo'llash mumkin. Yopiq sxemani asosiy kamchiligi IAA larining o'lchamlari katta bo'lishidir.

16.6. Reaktiv dvigatellar sikli

Ichidan katta tezlikda zarrachalar oqimi uchib chiqishi hisobiga tortish kuchi hosil qila oladigan issiqlik mashinasi reaktiv Dvigatel deyiladi. Issiqlik, kimyoviy, yadro, elektr, quyosh energiyalarining ta'siri natijasida ish jismi oqimining kinetik energiyasi paydo bo'ladi. Ikkinchi jahon urushi oxirlarida aviatsiyada reaktiv dvigatellar paydo bo'ldi. Porshen dvigatelli samolyotlar tezligini 800 km/soat ga-

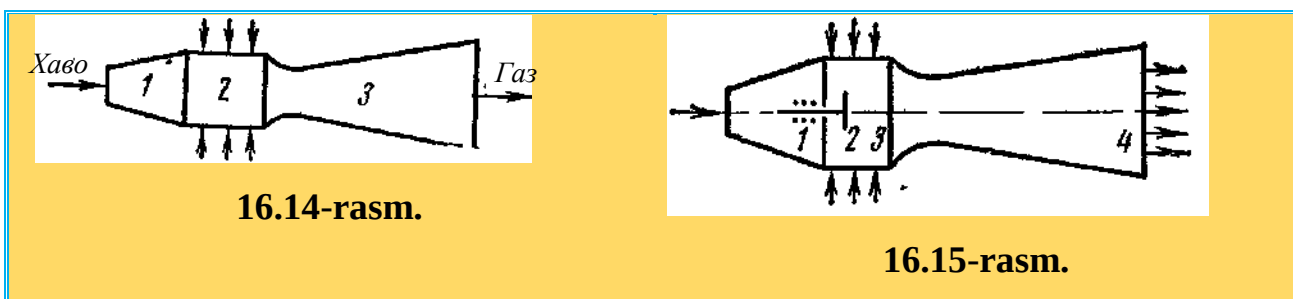
cha, reaktiv dvigatelli samolyotlar esa o'z tezligini 3000 km/soat gacha va undan yuqori oshirishi mumkin. Lekin, bu tezlik ham reaktiv samolyotlar uchun chegara emas.

Reaktiv dvigatellarda atmosfera havosining ishlatilishiga ko'ra, ular ikki xil bo'ladi: atmosfera havosidagi kisloroddan oksidlovchi sifatida foydalaniladigan havo – reaktiv dvigatellar (HRD); oksidlovchi kislorod uchuvchi apparatdagi maxsus idishda saqlanadigan hamma turdagi reaktiv dvigatellar raketa dvigatellari deyiladi. Raketa dvigatellari qattiq, suyuq yoqilg'ili va kimyoviy hamda yadro raketa dvigatellariga bo'linadi. Reaktiv dvigatellarni asosiy ko'rsatkichi bu tortish kuchidir. Tortish kuchi yonish mahsulotlarining soploda keskin kengayishi hisobiga gaz zarralari oqimining tezlanishi bilan atmosferaga otilib chiqishi natijasida paydo bo'ladi. Tortish kuchi quyidagiga teng:

$$P=m(w_r-w_c)$$

Bunda m – 1 s da hosil bo'layotgan yonish mahsulotlari massasi, kg/s; w_r – gazning soplodan oqish tezligi; w_c – samolyotning uchish tezligi.

HRD lar issiqlik uzatish jarayoniga bog'liq ravishda yonish $P=\text{const}$ da bo'ladigan to'g'ri oqimli va yonish $v=\text{const}$ da bo'ladigan Pulsatsiyali dvigatellarga bo'linadi. Ular o'z navbatida turbokompressorli va kompressorsiz dvigatellarga bo'linadi. HRD larning ideal sikllari GTQ larning issiqlik $v=\text{const}$ va $P=\text{const}$ da uzatiladigan sikllari kabi bo'ladi. 16.14 – rasmda issiqlik $P=\text{const}$ da uzatiladigan to'g'ri oqimli HRD larning sxemasi keltirilgan.



Dvigatel havo siqiladigan diffuzor 1 dan, forsunkalar orqali yoqilg'i yuboriladigan yonish kamerasi 2 dan tashkil topgan. Yonuvchan aralashma elektr uchquni yordamida yondiriladi. Gazlar reaktiv soplo 3 orqali chiqadi, u yerda gazlarning bosimi atmosfera bosimigacha pasayadi. Diffuzor hosil qilayotgan siqish dara-

jasi katta bo'lmaydi. Shuning uchun dvigatelning F.I.K. faqat katta uchish tezliklarda ancha yuqori bo'ladi. Turbokompressorli reaktiv dvigatellarda (TRD) havo diffuzorda siqilgandan so'ng, turbokompressorda qo'shimcha siqiladi. Turbokompressor yonish kamerasidan keyin joylashgan gaz turbinasi yordamida harakatga keltiriladi. Bunday dvigatellarning unumdorligi HRD larga nisbatan yuqori bo'ladi.

Shuning uchun TRD zamonaviy aviatsiyada keng qo'llanilmoqda. Umuman olganda, termodinamik nuqtai nazardan bu ikki dvigatel bir – biridan farq qilmaydi.

To'g'ri oqimli HRD va TRD lar ideal sikli issiqlik $P=\text{const}$ da uzatiladigan GTQ sikli kabi. Demak, HRDning termik F.I.K. quyidagiga teng bo'ladi:

$$\eta_t = 1 - 1/\beta^{(K-1)/K}$$

16.15–rasmda pulsatsiyali, issiqlik $v=\text{const}$ da uzatiladigan HRD ning sxemasi tasvirlangan. Diffuzor 1 da siqilgan havo yonish kamerasi 3 ga yuboriladi; bir vaqtning o'zida u bilan birgalikda kameraga yoqilg'i ham yuboriladi. Kamera to'lgandan so'ng, diffuzor va kamerani ajratib turuvchi klapan 2 lar berkitiladi va yonuvchan aralashma elektr uchquni yordamida yondiriladi. Aralashma yonib bo'lgandan so'ng soplo klapani (rasmda ko'rsatilmagan) ochilib, soplo 4 da yonish mahsulotlarining kengayish jarayoni ro'y beradi. Ishlab bo'lgan gazlar atmosferaga chiqarib yuboriladi va ish jarayoni yana takrorlanadi. Bunday dvigatelning o'ziga xos xususiyati shundan iboratki, yonish kamerasi soplodan davriy ravishda uzib qo'yilishi sababli Pulsatsiya kuzatiladi, shuning uchun bunday turdagi reaktiv dvigatellar ko'pincha Pulsatsiyali deb aytiladi.:

$$\eta_t = 1 - k(\chi^{1/\chi} - 1) / [\beta^{(k-1)/K}(\chi - 1)].$$

Nazorat uchun savollar:

1. Gaz turbinali qurilma (GTQ) tarkibi.
2. GTQ ning qo'llanilishi.
3. $v=\text{const}$ da ishlaydigan GTQ lar.
4. $P=\text{const}$ da ishlaydigan GTQ lar.
5. GTQ larni taqqoslash.

O'N YETTINCHI BOB

TERMOTRANSFORMATORLAR

17.1. Sovuq olishning nazariy asoslari

Jismlarni atrof – muhit temperaturasidan past temperaturagacha sovitish teskari issiqlik sikli bo'yicha ishlaydigan sovitish qurilmalari yordamida amalga oshiriladi. Siqish ishi kengaytish ishidan ortiq bo'lgan va keltirilgan ish hisobidan issiqlik past temperaturali manbadan yuqori temperaturali manbaga uzatiladigan sikl teskari sikl deb atalishini eslatib o'tamiz. Past temperaturalar turli usullar bilan hosil qilinadi. Ba'zi moddalar fazaviy o'tish (erish, bug'lanish, sublimatsiya) paytida past temperaturalarda ham ko'p miqdorda issiqlik yutadi. Bu esa ulardan sovuq olish uchun foydalanish imkonini beradi. Muzni eritish usulidan, $t > 0^{\circ}\text{S}$ temperaturalarda sovitishda foydalaniladi. Yana ham pastroq temperaturalar olish uchun muz yoki qorga tuz qo'shiladi. Masalan, muz bilan natriy xlor aralashmasi ($-21,2^{\circ}\text{S}$ gacha) va muz bilan kalptsiy xlor aralashmasi (-55°S gacha) sovitish uchun keng qo'llanilmoqda. Ma'lumki, bug' hosil bo'lishi jarayoni suyuqlikka issiqlik keltirilganda ro'y beradi.

Sovitish uchun atmosfera bosimida qaynash temperaturasi va bug' hosil qilish issiqligi yuqori bo'lgan suyuqliklardan foydalaniladi. Suyuqlikni bug'lanish jarayoni bug'li sovitish mashinalarida keng qo'llaniladi. Moddalarni qattiq holatdan suyuq holatga o'tmasdan gaz holatiga o'tishi sublimatsiya deyiladi.

Sovitish uchun sublimatsiyalanadigan qattiq CO_2 yoki «quruq muz» qo'llaniladi. Quruq muzning sublimatsiya temperaturasi P_{at} da $-78,9^{\circ}\text{S}$ ga teng. Ma'lumki, siqilgan gaz izobarik kengayganda uning temperaturasi pasayadi, chunki tashqi ish ichki energiyaning kamayishi hisobiga bajariladi. Bunday past temperaturalar olish usuli havoli sovitish mashinalarida qo'llaniladi. Real gazlar drossellanganda temperaturasi pasayadi (Joul – Tomson effekti). Ushbu usul ham past temperaturalar olishda keng qo'llanilib kelmoqda. Yuqorida keltirilgan usullardan tashqari frantsuz muhandisi ixtiro qilgan «uyurmali ta'sir» va Peltppe ixtiro qilgan termoelektrik sovitish usullari sovitish texnikasida qo'llanilib kelinmoqda. Sovitish qurilmalarida ish jismi sifatida oson qaynaydigan suyuqli-

klar: ammiak, freon, karbonat angidrid, sulifat angidrid va boshqalar ishlatiladi. Ular sovuq elitgichlar deyiladi. Sovuq elitgichlarga qo'yiladigan talablar to'rt guruhga bo'linadi: termodinamik, fizik – kimyoviy, fiziologik va iqtisodiy.

Termodinamik talablar. Sovuq elitgichning sovitish unumdorligi katta bo'lishi, bug' hosil qilish issiqligi yuqori bo'lishi, qotish temperaturasi past, kritik temperaturasi yuqori bo'lishi kerak.

Fizik – kimyoviy talablar. Sovuq elitgichlar suvda va yog'da erishi lozim, metall bilan reaksiyaga kirishmasligi, parchalanmasligi kerak.

Fiziologik talablar. Sovuq elitgichlar zaharli bo'lmasligi, nafasni qismasligi lozim.

Iqtisodiy talablar. Sovuq elitgichlar arzon va tanqis bo'lmasligi lozim. Yuqoridagi talablarga har tomonlama javob bera oladigan sovuq elitgichlar bugungi kunda topilgani yo'q. Shuning uchun sovuq elitgichlar vazifasiga, ishlash sharoitiga va tuzilishiga qarab tanlanadi.

Eng ko'p ishlatiladigan sovuq elitgichlar ammiak va freonlardir. Ammiak NH_3 yaxshi sovuq elitgichlari qatoriga kiradi. $t=20\text{ }^{\circ}\text{S}$ da ammiakning to'yingan bug'i bosimi 857 kPa ni tashkil etadi, atmosfera bosimida esa $-34\text{ }^{\circ}\text{S}$ ga teng to'yinish temperaturasi mos keladi. Ammiakning bug' hosil qilish issiqligi ancha katta. Ammiakning bu sifatlari sanoat sovitish mashinalarida ishlatiladigan sovuq elitgichlar ichida uni birinchi o'ringa qo'yadi. Ammiakning zaharliligi uning asosiy kamchiligi bo'lganligidan turmushda ishlatiladigan sovitish mashinalarida ishlatilmaydi.

Sovuq elitgichlari sifatida freonlar – eng oddiy to'yingan uglevodorodlarning (asosan metanning) fluor – xlorli hosilalari borgan sari ko'p ishlatilmoqda. Freonlarning boshqa sovuq elitgichlaridan farqi shuki, ular kimyoviy turg'un, zaharsiz bo'lib ($t < 200\text{ }^{\circ}\text{S}$ da), barcha metallarga nisbatan inertdir. Freonlar ichida eng ko'p tarqalgani freon – 12 bo'lib, undan o'y – ro'zg'or sovitgichlarida foydalaniladi. Freon – 12 o'zini texnik hossalari jihatidan ammiakka o'xshaydi. Lekin uni bug' hosil qilish issiqligi ammiaknikidan kichikdir. Atmosfera bosimida freon – 12 $t =$

-29,8 °S da qaynaydi. Ba'zi sovuq elitgichlarning fizik xossalari 17.1–jadvalda keltirilgan.

Sovuq elitgichlarning fizik xossalari.

17.1 – jadval.

Sovuq elitgichning nomi	Kimyoviy formulasi	Normal qaynash temperaturasi, °S	Kritik temperaturasi, °S	Qotish temperaturasi, °S
Suv	H ₂ O	+100,0	+374,15	0
Karbonat anhidrid	CO ₂	-78,52	+31,0	-56,6
Ammiak	NH ₃	-34,0	-132,4	-77,7
Freon-12	CF ₂ Cl ₂	-29,8	+112,04	-155,0
Freon-22	CHF ₂ Cl ₂	-40,8	+96,0	-160,0

Sovitish mashinasi issiqlik mashinasidan farqli ravishda teskari sikl bo'yicha ishlaydi. Karno sikliga teskari bo'lgan sikl sovitish mashinalarining ideal sikli deyiladi. Ideal siklga sovitish mashinalarining real sikllari solishtirilib, ularning takomillashganlik darajasi aniqlanadi. Karnoning sovitish siklidan ko'rinib turibdiki, sovituvchi moddaga q_2 issiqlik sovitiluvchi jismdan 1-4 jarayonda izoterma ($T_2=\text{const}$) bo'yicha uzatiladi (17.1-rasm). q_2 issiqlik miqdori 5-4-1-6-5 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatdan teng. 2-3 jarayonda sovituvchi moddadan 2-3-5-6-2 yuza bilan tasvirlangan q_1 issiqlik miqdori olib ketiladi. 4-2 jarayonda ish jismi adiabatik siqiladi va 3-4 jarayonda adiabatik kengayadi. Sovitish siklining bajargan ishi 1-2-3-4-1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatdan teng, ya'ni

$$A_{ts}=q_1-q_2 \quad (17.1)$$

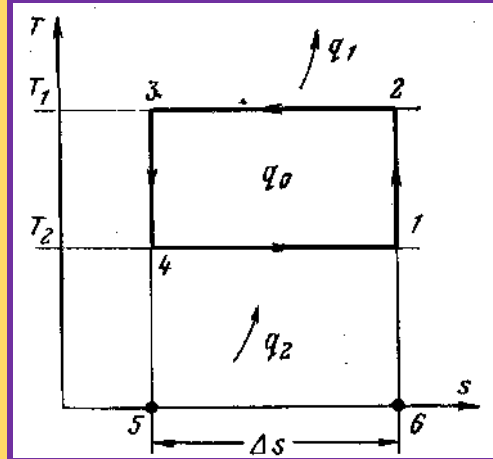
Sovitish mashinalarining mukammalligi sovitish koeffitsienti ε orqali aniqlanadi:

$$\varepsilon = q_2 / A_{ts} = T_2 / (T_1 - T_2) \quad (17.2)$$

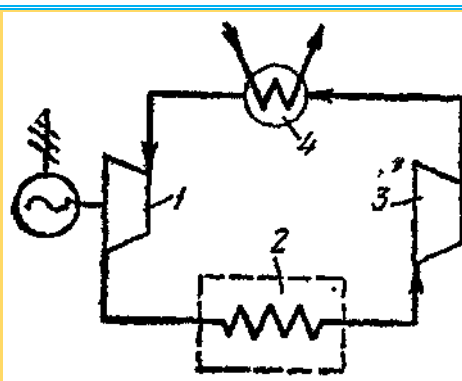
Demak, qancha ko'p issiqlik q_2 olinib va bunda shuncha kam mexanik ish sarflansa yoki ε qancha katta bo'lsa, shunchalik sovitish sikli takomillashgan bo'ladi. Sovitish qurilmalari sovituvchi modda turiga qarab ikkita asosiy guruhga bo'linadi:

1. Gazli (jumladan, havoli) sovitish qurilmalari;
2. Bug'li sovitish qurilmalari.

Bug'li sovitish qurilmalari o'z navbatida bug'-kompressorli, bug'-ejektorli va absorbtсион qurilmalarga bo'linadi. Termoelektrik va termomagnit sovitish mashinalari alohida guruhni tashkil etadi. Bunday turdagi sovitish mashinalarida sovituvchi modda bo'lmaydi.



17.1-rasm. Karnoning teskari (sovitish) sikli



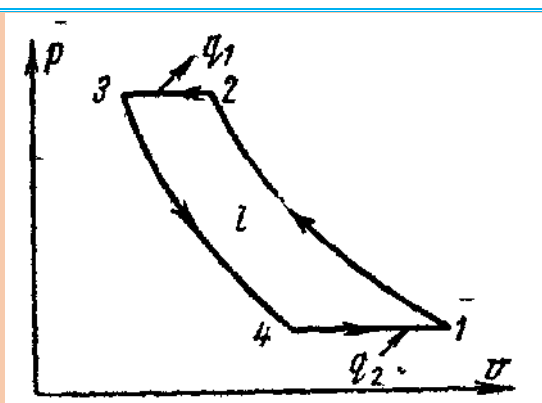
17.2-rasm

17.2. Havoli sovitish qurilmasi

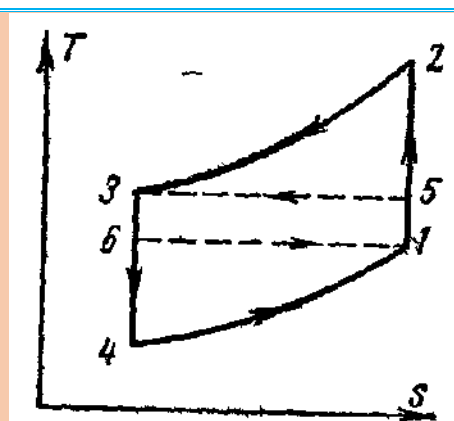
Havoli sovitish qurilmasi amalda ishlaygan sovitish qurilmasi turlaridan eng birinchisi bo'lgan. Bunday qurilmani amerikalik muhandis Garri 1845 yili ixtiro qilgan.

Havoli sovitish qurilmasining sxemasi 17.2–rasmda ko'rsatilgan. Havo detander 1 da p_1 bosimdan p_2 bosimgacha kengayib ish bajaradi; bu ishni detander tashqi iste'molchiga (masalan, elektr generatoriga) beradi. Detanderda adiabatik kengayish natijasida T_3 temperaturadan T_4 temperaturagacha ($\approx -60^\circ\text{S}$) sovutilgan havo sovutiladigan xona 2 ga kirib, undan issiqlik oladi. Sovutiladigan xonada havoga issiqlik berish jarayoni o'zgarmas havo bosimida ($p_2 = \text{const}$) sodir bo'ladi. Havo sovutiladigan xonadan chiqqanidan keyin kompressor 3 ga yuboriladi, bu

yerda havo bosimi p_2 dan p_1 gacha oshiriladi (bunda havo temperaturasi T_3 dan T_2 gacha ortadi). Kompessorda siqilgan havo sovitgich 4 ga kiradi. Sovitgich issiqlik almashtirgich bo'lib, unda sovituvchi suvga issiqlik berilishi natijasida havo temperaturasi pasayadi. Sovitgichda jarayon o'zgarmas havo bosimida ($p_1 = \text{const}$) sodir bo'ladi. Havoli sovitish qurilmasi siklining Pv – va Ts – diagrammalari 17.3 va 17.4-rasmlarda keltirilgan.



17.3-rasm.



17.4-rasm.

Bu yerda 1–2 – kompressorda siqish jarayoni; 2–3 – havoni sovitkichda izobarik sovitish jarayoni; 3–4 – havoni detanderda adiabatik kengayishi; 4–1 – sovitiladigan xonadan izobarik issiqlik olish jarayoni. Bu diagrammada 1–2–3 – siqish chizig'i, 3–4–1 – kengayish chizig'i.

17.4 – rasmdagi Ts – diagrammada siklda sarflangan A_{ts} ish 1–2–3–4–1 – yuza bilan tasvirlanadi. Siklni amalga oshirish uchun sarflangan ish q_1 va q_2 issiqliklar farqiga teng. Havoni o'zgarmas sig'imli ideal gaz deb hisoblab.

$$q_1 = c_p(T_2 - T_3); \quad q_2 = c_p(T_2 - T_4);$$

$$A_u = q_1 - q_2 = c_p(T_2 - T_3) - c_p(T_1 - T_4).$$

larga ega bo'lamiz.

U holda siklning sovitish koeffitsienti quyidagiga teng bo'ladi:

$$\varepsilon = \frac{q}{A_u} = \frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)} = \frac{1}{[(T_2 - T_3)/(T_1 - T_4)] - 1} \quad (17.2)$$

1–2 va 3–4 adiabat jarayonlardan iborat:

$$T_2/T_1 = (p_2 - p_1)^{(X-1/X)} \quad \text{va} \quad T_3/T_4 = (p_3 - p_4)^{(X-1/X)}$$

lekin

$p_2 = p_3$ va $p_1 = p_4$, u holda $T_2/T_1 = T_3/T_4$.

yoki

$$(T_2 - T_3)/(T_1 - T_4) = T_2/T_1 = T_3/T_4.$$

Shunday qilib

$$\varepsilon = \frac{1}{(T_2/T_1) - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}, \quad (17.3)$$

bunda T_1 – sovitiladigan xona temperaturasi yoki kompressorga soʻrilayotgan havo temperaturasi; T_2 – siqilgan havo temperaturasi.

Tashqi koʻrinishdan (17.3) tenglama Karno qaytar siklining sovitish koefitsienti tenglamasi (17.1) ga mos keladi. Lekin bu oʻxshashlik tashqaridan shunday koʻrinadi.

Temperaturaning bir xil oraligʻining oʻzida (17.4-rasm) amalga oshiriladigan qaytar Karno sikli (1 – 5 – 3 – 6 – 1) uchun sovitish koefitsientini aniqlaymiz.

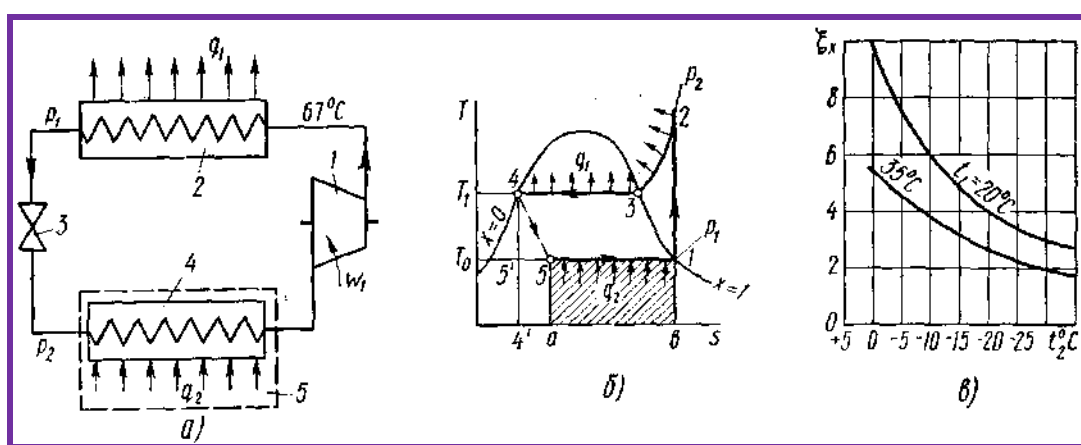
$$\varepsilon_K = q_2 / l = q_2 / (q_1 - q_2) = \frac{T_1}{T_3 - T_1},$$

$T_3 < T_2$ sababli, $\varepsilon_K > \varepsilon$ boʻladi.

17.3. Bugʻ-kompression sovitish qurilmasi

Sovituvchi modda sifatida biror suyuqlikning, yaʼni atmosfera bosimida qaynash temperaturasi $t \leq 0^\circ\text{S}$ boʻlgan suyuqlikning nam bugʻidan foydalanilsa sovitish qurilmasida issiqlik berish va olishni izotermalar boʻyicha amalga oshirish mumkin. Bu maʼnoda mazkur sikl Karno sikliga yaqinlashadi va shu sababli bunday qurilmaning samaradorligi eng yuqori va shu sababli ular eng koʻp tarqalgan.

Efir bug'lari bilan ishlaydigan bug' – kompression sovitish qurilmalari dastavval 1834 yildayoq yaratilgan edi. So'ngra bu xil qurilmalarda sovituvchi modda sifatida metil efir va sulifat angidrididan foydalaniladigan bo'ldi. Nemis muhandisi K. Linde 1874 yilda ammiakli, 1881 yilda karbonat angidridli bug' – kompression qurilmani yaratdi. XX asrning 30 – yillarida bunday qurilmalarda freonlar sovituvchi modda sifatida ishlatila boshlandi. Shu vaqtlargacha bunday qurilmalarda porshenli kompressorlar ishlatildi, so'ngra rotatsion, vintli va turbokompressorlar ishlatila boshlandi. 17.5-rasmda bug' – kompression sovitish qurilmasining sxemasi, sikli va sovitish koefitsientining o'zgarishi ko'rsatilgan.



17.5–rasm. Bug' – kompression sovitish qurilmasining sxemasi, sikli va sovitish koefitsientining o'zgarishi.

a - qurilma sxemasi; b – siklning Ts – diagrammasi; v – bir bosqichli ammiakli qurilmada ε ni t_1 va t_2 ga bog'liq ravishda o'zgarishi.

Sovituvchi moddaning to'yingan bug'i kompressor 1 da siqiladi (17.5 – rasm, a) va kondensator 2 ga uzatiladi, u yerda q_1 issiqlikni atrof – muhitga berib, qisman kondensatsiyalanadi. Ushbu, suyuqlik – bug' aralashmasi rostlovchi (drosselli) ventily 3 ga yuboriladi, u yerda uning bosimi va temperaturasi pasayadi. Quruqlik darajasi yuqori bo'lgan past temperaturali nam bug' sovitish xonasi 5 da joylashgan bug'latgich 4 ga keladi va xonaning q_2 issiqligi hisobidan bug'lanadi. Termodinamik sikl (17.5-rasm, b) qo'yidagi jarayonlardan tashkil topgan: 1 – 2 – sovituvchi moddaning kompressorda adiabatik siqilishi, 2 – 3 – 4 – q_1 issiqlikni atrof – muhitga olib ketilishi va kondensatsiyalanish, 4 – 5 – drossellash jarayoni,

5 – 1 – bug'latgichda olingan q_2 – issiqlik hisobiga sovituvchi moddaning bug'lanishi.

Bug' kompression qurilmaning sovitish koeffitsienti quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\varepsilon = q_2 / A_{st} = (h_1 - h_5) / (h_2 - h_1) \quad (17.4)$$

(17.4) formuladan ko'rinib turibdiki, sovitish xonasidagi temperatura qanchalik katta va sovituvchi muhit temperaturasi shunchalik past bo'lsa ε shunchalik katta bo'ladi. Hozirgi vaqtda bug' – kompression sovitish qurilmalari mo'tadil sovitish temperaturalari sohasida ko'pchilik hollarda, boshqa sovitish qurilmalariga qaraganda eng samarali qurilmalar bo'lib qoldi, ulardan sanoat va turmushda keng foydalaniladi.

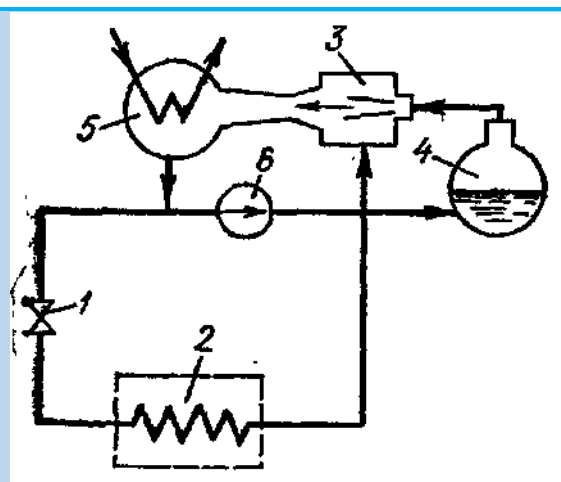
17.4. Bug' – ejektorli sovitish qurilmasi

Bug'-ejektorli sovitish qurilmasi sikli, bug' – kompression qurilma sikliga o'xshash, nam bug' tarzidagi sovitish moddasi vositasida amalga oshiriladi. Ular orasidagi asosiy farq quyidagilardan iborat: agar bug' – kompression qurilma siklida sovitilayotgan hajmdan chiqqan bug' kompressor yordamida siqilsa, bug'-ejektorli qurilmada bu maqsadda bug'-ejektordan foydalaniladi. Ejektor – gaz, bug' va suyuqliklarni siquvchi va harakatlantiruvchi qurilma. Bug'ni ejektor yordamida siqish uchun qozonda hosil bo'ladigan bug'ning kinetik energiyasidan foydalaniladi.

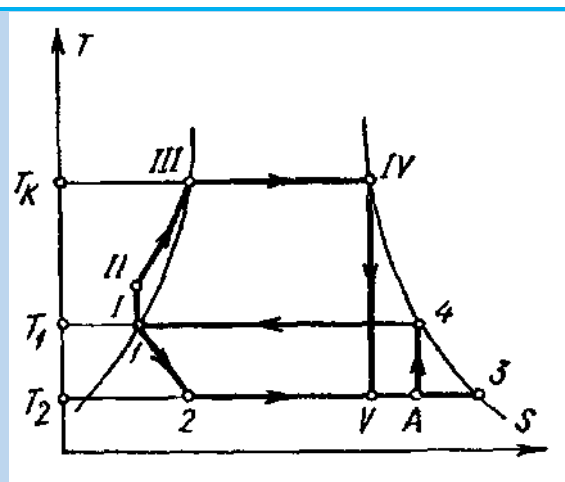
Kompressor o'rniga bug'-ejektori ishlatilishining sababi nima? Sovitish qurilmalarida uncha past bo'lmagan, taxminan 3 dan 10⁰S gacha bo'lgan temperaturalar olish uchun sovituvchi modda sifatida suv bug'idan foydalanish mumkin. Lekin 0⁰S ga yaqin temperaturalarda bug'ning solishtirma hajmi juda katta bo'ladi (masalan, t=5⁰C da $v''=147,2$ m/kg bo'ladi).

Zichligi bunchalik kichik bug'ni siquvchi porshenli kompressor juda katta mashina bo'ladi. Xuddi shuning uchun suv bug'i bilan ishlaydigan sovitish qurilmasi siklida, uncha takomillashgan bo'lmasada, ancha ixcham apparat bug' ejektori ishlatiladi va unda parametrlari past, arzon bug'dan foydalaniladi. Bug' – ejektorli qurilma sovitish mashinalarining eng eski turlaridan biridir. Bug' –

ejektorli sovitish qurilmasining sxemasi va sikli 17.6 va 17.7 – rasmda tasvirlangan.



17.6–rasm.



17.7–rasm.

To'yingan suv drossellash ventili 1 da p_1 bosimdan p_2 bosimgacha ken-gayganda hosil bo'lgan suv bug'i sovitiladigan hajmda joylashgan bug'latgich 2 ga kiradi.

Quruqlik darajasi yuqori bo'lgan bug' p_2 bosimda bug'latgichdan bug' ejektorining aralashtirish kamerasi 3 ga yuboriladi.

Ejektor soplosiga qozon 4 dan p_q bosimli bug' beriladi. Bug'latgichdan ejektorning aralashtiruvchi kamerasiga beriladigan bug' va qozonda ejektor soplo-siga keladigan bug' sarflari shunday tanlanadiki, bug'ning ejektor diffuzoridagi chiqishdagi bosimi p_1'' ga teng bo'ladi. To'yingan quruq bug' ejektordan konden-sator 5 ga yuboriladi. Bu yerda u o'z issiqligini sovituvchi suvga berib konden-satsiyalanadi. p_1 bosimda kondensatordan chiqayotgan kondensat oqimi ikki qismga bo'linadi. Suvning ko'p qismi sovitish konturiga, drossellash ventili 1 ga, oz qismi esa nasos 6 ga yuboriladi, nasosda suv bosimi p_q gacha ortadi. Nasos 6 suvni qozonga yuboradi. Qozonga beriladigan issiqlik hisobiga bug' hosil bo'ladi.

Bug' – ejektorli qurilma sikli 17.7 – rasmdagi Ts – diagrammada tasvirlan-gan. Bu diagrammada 1–2 – chiziq to'yingan suvning reduksion ventilda adiaba-tik drossellanish jarayoni, 2–3 – chiziq esa bug'latgichdagi izobar – izotermik ja-

rayonini ifodalaydi. Shu diagrammaning o'zida bug'ning «qozon – ejektor – kondensator - qozon» konturida aylanayotgan qismi bajaradigan sikl tasvirlangan. Bu siklning tasvirlanishi shartli ekanligini esdan chi-qarmaslik kerak, chunki – qurilmaning ikkala konturining har birida bug' sarfi turlicha bo'ladi. Ts – diagrammada esa ikkala sikl 1 kg bug' hisobidan tasvirlangan. Bu yerda I – II nasosda suv bosimining ortish jarayoni; II – III – IV $p_q - \text{const}$ bo'yicha qozonga issiqlik berish jarayoni, IV – V – ejektor soplosidan bug'ning kengayish jarayoni. Soplarda bug' p_2 bosimgacha (V nuqta) kengayadi – da, bug'latkichdan ejektorga shu bosimning o'zida keladigan (3 - nuqta) bug' bilan aralashadi. Nam bug'ning to'yingan quruq bug' bilan aralashuvi natijasida quruqlik darajasi V va 3 orasidagi bug' hosil bo'ladi – A nuqta. Qurilma siklida chetdan ish kiritilmaganligi, uning o'rniga esa qozonga issiqlik berilishi tufayli bunday qurilma siklining samaradorligi quyidagi formuladan aniqlanadigan issiqlikdan foydalanish koeffitsienti ξ bilan aniqlanadi:

$$\xi = \frac{q_2}{q_k}, \quad (17.5)$$

bu yerda q_2 – sovitilayotgan hajmdan olinadigan issiqlik, q_k – qozonga beriladigan issiqlik. (17.5) formulani ish moddasi entalpiyalari orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$\xi = \frac{h_3 - h_2}{(h_{IV} - h_I) \cdot g} \quad (17.6)$$

bu yerda g orqali qozonga ejektor soplosiga beriladigan p_q bosimli bug' miqdorining bug'latgichdan aralashish kamerasiga kiradigan bug' miqdoriga nisbatan berilgan.

17.5. Issiqlik nasosining ishlash printsipli

Har qanday sovitish ustanovkasining ishlash jarayonida sovitiladigan xajmdan isiqlik olinib, boshqa muhitga beriladi. Binobarin, sovitish siklining amalga oshirilishi natijasi issiqlik beruvchining sovishidangina emas, balki issiqlik qabul qiluvchining isishidan ham iboratdir. Bu narsa 1852 yilda Kelvinga sovitish siklidan binolarni isitish uchun foydalanish, ya'ni issiqlik nasosi deb aytiladigan

nasosni yaratish haqida taklif kiritish imkonini berdi. Odatda, isitiladigan xajmga issiqlik berish uchun foydalaniladigan sovitish ustanovkasi issiqlik nasosi deb aytiladi. Bu turdagi ustanovkaning issiqlik nasosi deb atalishiga sabab shuki, u issiqlikni sovuq manbadan qizigan manbaga «haydaydi»; qizigan manbaga sovitish manbaidan olingan issiqlik q_2 va sovitish siklini amalga oshirish uchun tashqaridan keltirilgan ish l_{ts} yig'indisiga teng issiqlik q_1 beriladi. Aslida har qanday sovitish ustanovkasi issiqlik nasosidir, lekin bu termin, odatda, asosiy vazifasi issiqlik qabul qiluvchilarni isitishdan iborat ustanovkalarni belgilash uchun qo'llaniladi.

Issiqlik nasosining samaradorligi isitish koefitsienti deb ataladigan koefitsientning qiymati bilan baholanadi; ε_{isit} koefitsient isitilayotgan xajmga beriladigan issiqlik miqdori q_1 ni siklda bajarilgan ish l_{ts} miqdoriga nisbatidan iborat:

$$\varepsilon_{isit} = \frac{q_1}{l_{ts}} \quad (17.7)$$

Isitish koefitsienti ε_{isit} bilan shu ustanovkaning sovitish koefitsienti ε ni bir-biriga bog'lash qiyin emas; qizigan manbaga beriladigan issiqlik:

$$q_1 = q_2 + l_{ts}.$$

bo'lganligini hisobga olib

$$\varepsilon_{isit} = \varepsilon + 1 \quad (17.8)$$

ni hosil qilamiz.

Bu munosabatdan sovitish koefitsienti qanchalik katta bo'lsa, siklning isitish koefitsienti ham shunchalik katta bo'ladi, degan xulosa kelib chiqadi. Har qanday sovitish siklini (shu jumladan ustanovkaning issiqlik nasosi sifatida foydalaniladigan siklini ham) amalga oshirishda tashqi manbadan keltiriladigan ish L_{ts}^* sarflanadi. Bu ish sovitish muhitini siqadigan kompressor yoki boshqa apparatni yurgizishga sarflanadi. Bu ishning hammasini issiqlikka aylantirish (masalan, elektr isitkichda) va bu issiqlikdan binolarni isitishda foydalanish mumkin, albatta. Issiqlik nasosining boshqa istalgan isitish qurilmasiga nisbatan afzalligi shundan iboratki, sarflanadigan energiya miqdori bir hil (l_{ts}) bo'lgani holda issiqlik nasosi yordamida isitiladigan xonaga beriladigan issiqlik miqdori istalgan boshqa usulda

beriladigan issiqlik miqdoriga qaraganda doimo ko'p ($l_{ts}+q_2$) bo'ladi (masalan, elektr energiyasi yordamida isitilganda isitiladigan xajmga beriladigan issiqlik miqdori l_{ts} ga teng bo'ladi). Bu hol taajjublanarli emas: agar elektr isitkich faqat ishni issiqlikka aylantirsa, issiqlik nasosi shu ish miqdorining o'zi yordamida past temperaturaviy potentsialli issiqlikka aylantiradi – issiqlikni bir muhitdan boshqa muhitga «haydaydi».

Issiqlik nasosida hamma vaqt $q_1>l_{ts}$ bo'lgani uchun, binobarin, doimo $\varepsilon_{isit}>1$ bo'ladi; bu (17.8) tenglamadan ham ko'rinib turibdi.

Odatda, issiqlik nasosi qaytar sikllari isitish koeffitsientining qiymati birdan ancha katta bo'ladi. Masalan, issiqlik nasosida Karno qaytar sikli amalga oshirilayotgan bo'lsa, u holda sovitilayotgan muhit temperaturasi $t_2=0^\circ\text{S}$, isitilayotgan xona temperaturasi esa $t_1=25^\circ\text{S}$ bo'lsa, bunday nasosning (17.8) munosabat yordamida aniqlanadigan isitish koeffitsienti tenglama:

$$\varepsilon_{isit} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} + 1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$$

ni hisobga olsak,

$$\varepsilon_{isit} = \frac{25 + 273,15}{25} = 11,9$$

bo'ladi, ya'ni bu xolda isitiladigan xonaga beriladigan issiqlik miqdori siklda sarflanadigan ish qiymatidan 11,9 barobar ortiq bo'ladi.

Sovitish ustanovkalarining Karno sikliga qaraganda kam takomillashgan siklidan foydalaniladigan issiqlik nasoslarining isitish koeffitsientlari kattaroq bo'ladi.

Real ustanovkalarda ε_{isit} ning kamayishiga ustanovkaning turli elementlarida jarayonlarning qaytmasligi natijasida albatta ro'y beradigan isrofgarchiliklar ham sabab bo'ladi. Real issiqlik nasoslarining isitish koeffitsienti 3,4 va undan ortiq bo'lishi mumkin. Ammiakli bug'-kompression issiqlik nasosli qurilmada birinchi marta 1930 yilda binoni isitish uchun foydalanilgan edi. O'sha vaqtdan beri juda ko'p issiqlik nasoslari qurildi. Issiqlik nasoslaridan bundan keyin keng ko'lamda foydalaniladi, deyishga to'la asos bor. Issiqlik nasoslarida havoli, bug'-kompression

va termoelektrik sovitish ustanovkalari sikllaridan foydalaniladi. Shuni eslatib o'tish kerakki, sovitish ustanovkalaridan issiqlik va sovuqlikni birgalikda hosil qilish uchun ham foydalanish mumkin. Masalan, sun'iy muzli yaxmalakka mo'ljallangan ammiakli sovitish ustanovkasi 1943 yildayoq qurilgan edi; bunda shu ustanovka kondensatorini sovitgan va buning hisobiga sezilarli darajada isigan suv shahar istish tarmog'iga yuborilgan. Kombinatsiyalangan bunday ustanovkalarining, shubhasizki, istiqboli porloq.

Nazorat uchun savollar:

1. Sovuq olish usullarini keltiring.
2. Sovituvchi moddalarga qanday talablar qo'yiladi?
3. Teskari Karno sikli.
4. Sovitish koeffitsienti.
5. Sovitish mashinalari turlari
6. Havoli sovitish qurilmasi qanday ishlaydi?
7. Bug' – kompression sovitish qurilmasi qanday ishlaydi?
8. Freonning afzalliklari nimadan iborat?

O'N SAKKIZINCHI BOB

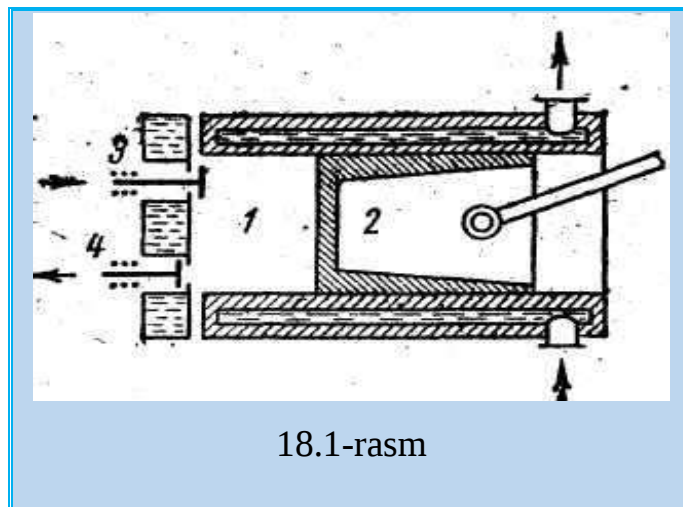
KOMPRESSORLAR

18.1. Bir bosqichli kompressor

Turli xil gazlarni siqish uchun mo'ljallangan mashinalarga kompressor deyiladi. Kompressorlar hozirgi zamon texnikasida keng qo'llaniladi. Ular kimyo sanoatida, mashinasozlik, metallurgiya, temir yo'llarida, aviatsiya, gaz turbinali qurilmalarda, sovitish mashinalarida va hokazolarda ishlatilib kelinmoqda.

Barcha kompressorlarni konstruksiyasiga va ishlash printsipiga ko'ra ikki guruhga ajratish mumkin: porshenli va turbinali (markazdan qochma).

Kompressorlarning tuzilishi va ularda siqish printsiplari turlicha bo'lishiga qaramasdan ularda siqishning termodinamik jarayonlari bir xil bo'ladi. Kompressordagi jarayonlar bir hil tenglamalar bilan ifodalanadi. SHuning uchun kompressorlardagi jarayonlarni o'rganish va tahlil qilish uchun bir bosqichli



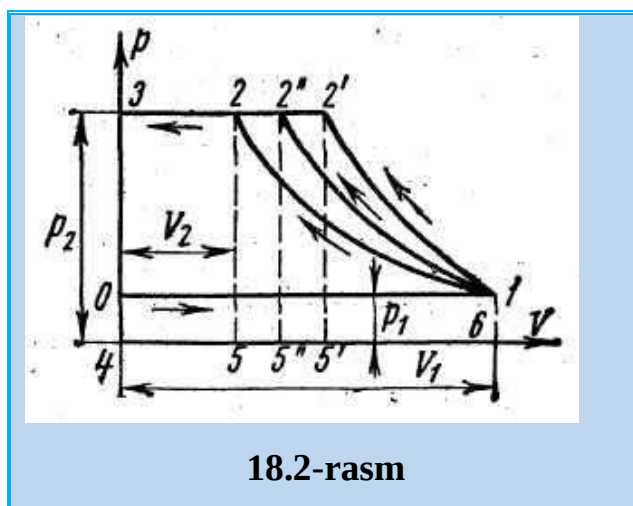
kompressorni ishini ko'rib chiqamiz. Kompressor (18.1-rasm) silindr 1 va krivoship-shatunli mexanizm orqali elektrodvigatel'g' bilan bog'langan porshen 2 dan iborat.

Silindr qopqog'ida so'rish 3 va haydash 4 klapanlari joylashgan. Kompressorda ish valning bir aylanishida yoki porshenni ikki marta yurishida amalga oshadi. Porshenning o'ng tomonga yurishida so'rish klapani ochiladi va silindrga ishchi jism-gaz so'riladi. Porshenning teskari yurishida so'rish klapani bekiladi va gaz kerakli bosimgacha siqilib rezePvuarga haydaladi. Shundan so'ng,

yana yuqoridagi jarayonlar takrorlanadi. Ohirgi bosim haydash klapani o'rnatilgan prujina orqali boshqarilib turiladi. Kompressorlarning termodinamik hisoblashdan maqsad 1 kg gazni siqish uchun sarflangan ishni va dvigatelg' yuritmasining quvvatini aniqlashdan iborat. Nazariy bir bosqichli kompressorni quyidagi shartlar asosida ko'rib chiqaylik:

- Silindrning geometrik hajmi ishchi hajmga teng (bo'shliq xajm yo'k);
- Porshenni silindr devori bo'ylab harakatlanishida ishqalanish yo'k, yahni ishqalanishga ish sarflanmaydi;
- Gazning tsilndrga so'rilishi va uni rezervuarga haydash o'zgarmas bosimda amalga oshadi.

Kompressorning nazariy indikator diagrammasi 18.2-rasmda tasvirlangan.



Porshenning chapdan o'ngga tomon harakatlanishida so'rish klapani 3 ochiladi va gaz silindrga o'zgarmas p_1 bosimda so'riladi. Bu jarayon diagrammada 0-1 chiziqli bilan tasvirlanib, so'rish chizig'i deb aytiladi. Porshenning o'ngdan chapga tomon teskari harakatida so'rish klapani 3 bekilib gazni siqish jarayoni sodir bo'ladi. Zaruriy bosim hosil bo'lganda gaz o'zgarmas p_2 bosimda haydash klapani 4 orqali rezervuarga uzatiladi. 1-2 egri chiziqli siqish jarayonini tasvirlaydi. 2-3 chiziqli haydash chizig'i deyiladi. Porshenning bundan keyingi harakatida haydash klapani bekiladi hamda so'rish klapani ochilib silindrdagi bosim p_2 dan p_1 ga tushadi va yana jarayonlar takrorlanadi. 1 kg siqilgan gazni olish uchun sarflangan ish (ishqalanishni ehtiborga olmasak), barcha jarayonlarni qaytar deb hisoblasak quyidagi formula orqali aniqlanadi:

$$\ell = p_1 v_1 - p_2 v_2 + \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

bu yerda $p_1 v_1$ – tashqi muhitni gazni silindrga to'ldirishdagi ishi;

$p_2 v_2$ – gazni haydashga sarflangan ish;

$\int_{v_1}^{v_2} p dv$ - gazning siqish ishi.

$p_1 v_1 - p_2 v_2 = \int_1^2 d(pv)$ bo'lgani uchun

$$\ell = \int_1^2 [-d(pv) + p dv] = - \int_1^2 v dp \quad (18.1)$$

Agar ishqalanishni ehtiborga oladigan bo'lsak kompressorning yuritmasi uchun sarflangan ish (xaqiqiy ish) nazariy ishdan katta bo'ladi:

$$\ell_x = - \int_{p_1}^{p_2} v dp - q_i \quad (18.2)$$

Bu yerda q_u – ishqalanishga qarshi bajarilgan ish. Agar siqish jarayonida gazdan q_x issiqlik olib ketilsa, termodinamikaning birinchi qonuniga asosan:

$$\ell_x = -(h_2 - h_1 - q_x) \quad (18.3)$$

Gazning kompressorda siqilishi ishchi jism va silindr devorlari o'rtasidagi issiqlik almashinuviga qarab izotermik 1-2, adibata 1-2¹ va politropa 1-2¹¹ bo'yicha kechishi mumkin. Izoterma bo'yicha gazni siqishda 01230 yuza eng kichik va eng kam ish sarflanadi. Ish shaklida keltirilgan barcha energiya gazdan issiqlik shaklida olib ketiladi. Adiabata 1-2¹ bo'yicha siqishda 012¹30 yuza eng katta va eng ko'p ish sarflanadi. Bu jarayonda ish shaklida keltirilgan barcha energiya gazning entalg'piyasini o'zgarishiga sarflanadi. Siqish ishini kamaytirish uchun siqish jarayonini izotermik jarayonga yaqinlashtirish lozim, yahni siqilayotgan gazdan issiqlikni olib ketish zarur. Buning uchun silindrning tashqi sirtlarini suv bilan sovutish lozim. Sovutish gazni yanada yuqoriroq bosimgacha siqish

imkonini berib, siqishni politrop ($n=1,18-1,2$) bo'yicha amalga oshirish mumkin bo'ladi.

Unumdorligi past va uncha yuqori bo'lmagan bosim hosil qiluvchi kompressorlar havo bilan sovitilib turiladi.

Kompressor yuritmasi uchun ishni aniqlash. Izotermik jarayonda gazni siqish uchun sarflangan ish 01230 (18.2-rasm) yuzaga teng. 1 kg gazni siqish uchun sarflangan to'liq ish:

$$\ell = 4325 \text{ yuza} + 5216 \text{ yuza} - 4016 \text{ yuza}$$

bu yerda $4325 \text{ yuza} = p_2 v_2$ xaydash ishi;

$4016 \text{ yuza} = p_1 v_1$ so'rish ishi;

$5216 \text{ yuza} = \int_{v_1}^{v_2} p dv$ siqish ishi;

Izotermik siqish jarayonidagi ish quyidagi tenglamadan aniqlanadi

$$5216 \text{ yuza} = \ell_{iz} = p_1 v_1 \ln p_2 / p_1$$

$t = \text{const}$ da $p_2 v_2 = p_1 v_1$ ekanligidan

$$\ell_{iz} = -p_2 v_2 - p_1 v_1 \ln p_2 / p_1 + p_1 v_1 = -p_1 v_1 \ln p_2 / p_1 \quad (18.4)$$

Kompressor yuritmasi uchun ish izotermik siqish ishiga teng. Olib ketilgan issiqlik miqdori:

$$q = \ell_{iz} = -RT \ln p_2 / p_1$$

Qaytar adiabatik siqishda jarayondagi ish quyidagi tenglama orqali aniqlanadi:

$$5216 \text{ yuza} = \ell_{ad} = \left[\frac{1}{(k-1)} \right] (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

Kompressor yuritmasi uchun ish:

$$\ell_{ad}^{yur} = -(p_2 v_2 - p_1 v_1) - \frac{1}{K-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = -\frac{K}{K-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1) = -\frac{K}{K-1} RT_1 \left[(p_2 / p_1)^{\frac{K-1}{K}} - 1 \right] \quad (18.5)$$

Kompressor yuritmasi uchun ish adiabatik siqish ishidan K marta katta bo'ladi. (18.5) ifoddani boshqacha shaklda ham ifodalash mumkin. Adiabat jarayonda siqish ishi quyidagiga teng:

$$\ell_{ad} = U_1 - U_2$$

u holda kompressor yuritmasi uchun ish:

$$\ell_{ad}^{yur} = -(p_2 v_2 - p_1 v_1) - (u_2 - u_1) = -(p_2 v_2 + u_2) + (p_1 v_1 + u_1) = (h_2 - h_1) \quad (18.6)$$

Adiabat siqishda kompressor yuritmasi uchun ish absolyut qiymati bo'yicha siqishning boshi va ohiridagi entalg'piyalar ayirmasiga teng. Bu formula real va ideal gazlar uchun to'g'ri. Politrop siqish jarayonida ish $5^{11}2^{11}16$ yuzaga teng.

$$\ell_n = -(p_2 v_2 - p_1 v_1) - [1/(n-1)](p_2 v_2 - p_1 v_1) = [n/(n-1)](p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (18.7)$$

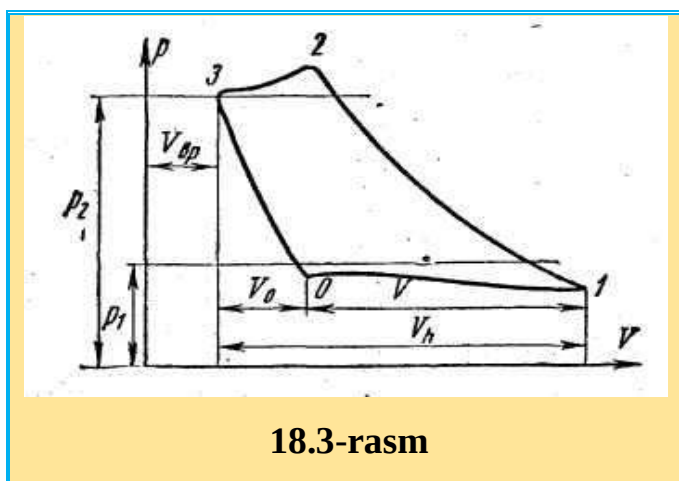
1 kg siqilgan gaz olish uchun sarflangan ish:

$$\ell_n = -[n/(n-1)]RT_1[(p_2/p_1)^{n-1/n} - 1] \quad (18.8)$$

Olib ketilgan issiqlikning nazariy miqdorini quyidagi tenglamadan aniqlaymiz:

$$q = C_v[(n-k)/(n-1)](T_2 - T_1) \quad (18.9)$$

Bir bosqichli kompressorning haqiqiy indikator diagrammasi (18.3-rasm) nazariysidan farq qiladi. Bu farq so'rish va haydash klapanlaridagi drosselashdagi



18.3-rasm

sarflar tufayli hosil bo'ladi.

Shu sababli gazning silindrga so'rilishi atrof-muhit bosimidan pastroq bosimda, haydash esa haydash truboprovodidagi bosimdan yuqoriroq bosimda ro'y beradi.

Bu isroflar kompressorlarning aylanma harakati ortishi bilan oshadi. Bundan tashqari, real kompressorda silindr qopqog'i va porshen o'rtasida mahlum bir hajm bo'ladi. Bu hajmga bo'shliq hajm deyiladi. Bu bo'shliq hajm ishchi hajm V_k ning 4-10% ni tashkil etadi (18.3-rasm). Gazning bir qismi haydashning oxirida (2-3-chiziq) bo'shliq xajmda qolib V_b xajmni egallaydi. Porshenning o'ngga harakatida bo'shliq hajmda qolgan gaz kengayadi va yangi gaz silindrdagi

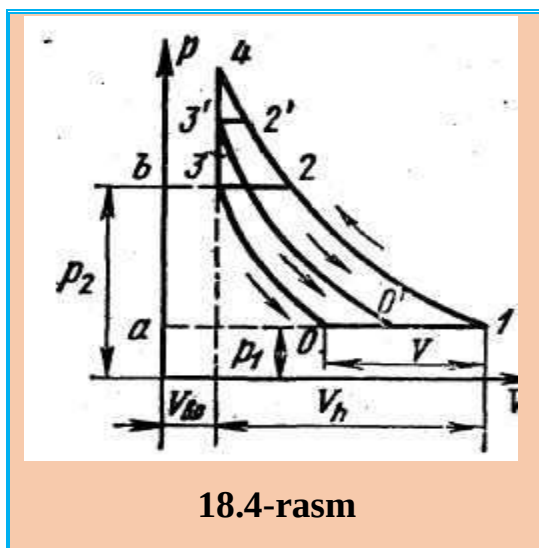
bosim atrof-muhit bosimiga teng bo'lgandagina so'riladi. Qolgan siqilgan gazning bo'shliq hajmdagi kengayishi 3-0 chiziq bilan tasvirlangan. Gazning kompressorga so'rilishi 0 nuqtadan boshlanadi va silindrga yangi gaz so'rilib uning hajmi $V_h - V_0 = V$ ga teng bo'ladi. Bo'shliq hajm silindrga so'rilayotgan gaz miqdorini kamaytiradi va shu sababli kompressorning unumdorligi pasayadi. V va V_h larning nisbatiga kompressorning hajmiy f.i.k. deb aytiladi:

$$\eta_x = V / V_h \quad (18.10)$$

Hajmiy f.i.k. bo'shliq hajmning ortishi bilan kamayadi va V_b ning ma'lum bir qiymatida nolga teng bo'lib qolishi mumkin. V_b o'zgarmas bo'lganda, siqish bosimi ortishi bilan hajmiy f.i.k. va kompressor unumdorligi ham kamayib, siqish chizig'i bo'shliq hajm chizig'i bilan kesishgan holda hajmiy f.i.k. nolga teng bo'ladi. Ushbu holatni 18.4-rasmdan ko'rish mumkin. Birinchi xolda, ya'ni siqish jarayoni 1-2 p_2 bosimda tugasa, xaydash 2-3 chiziq bo'yicha amalga oshadi. Silindrdagi bosim 3-0 chiziq bo'yicha pasayadi va so'rish 0 nuqtada boshlanadi. Ikkinchi holda siqish bosimi p_2 ortishi bilan siqish 2-nuqtada tugaydi va xaydash 2¹-3¹ chiziq bo'ylab amalga oshadi. Bu xolda haydalayotgan gaz miqdori birinchi holga qaraganda ancha kam bo'ladi. Uchinchi holda siqish bosimi p_2 yana xam ortganda siqilish 4-nuqtada ya'ni siqish chizig'i va bo'shliq hajmi chizig'i kesishgan nuqtada tugaydi. Bu holda siqish chizig'i nuqtaga aylanadi va yangi gaz silindrga so'rilmaydi. Ishlayotgan kompressorning porsheni xuddi shu va bir xil miqdordagi gazni xaydamasdan siqadi. Bu holda kompressorning hajmiy f.i.k. va unumdorligi nolga teng bo'ladi.

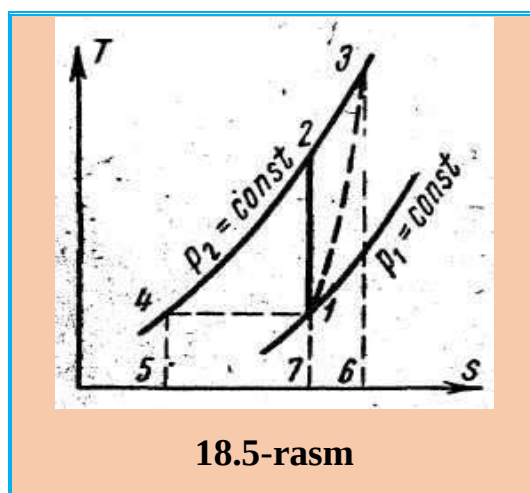
Bo'shliq hajmli kompressor yuritmasi uchun sarflangan umumiy nazariy ish 12301 yuza (18.4-rasm) bilan tasvirlanadi. Siqish bosimi ortishi tufayli kompressorning unumdorligini pasayishi natijasida bir silindrda yuqori bosimli gazlarni olib bo'lmasligini bildiradi. Bundan tashqari, yuqori bosimlarda gazning temperaturasi silindrdagi surkov moyining o'z-o'zidan alangalanish temperaturasidan ortib ketishi mumkin. Bu holda surkov moyi va qizigan havo aralashmasi portlab og'ir avariyalarga olib kelishi mumkin. Bir bosqichli

kompressorda havoni 6-10 bar dan yuqori ortiqcha bosimgacha siqib bo'lmagligining sabablaridan biri xam shunda.



Real kompressordagi siqish jarayonlari.

Real kompressordagi jarayonlarda mexanik va gidravlik isroflar bo'ladi. Real kompressorlarning hisobida sovitilayotgan kompressorning yuritmasi uchun ish



izotermik siqishdagi ishga, sovitilayotgan hol uchun adibatik siqish ishiga teng deb olinadi. Real kompressorning ish samaradorligi izotermik va adibatik f.i.k. lar bilan aniqlanadi. Bu f.i.k. lar kompressor yuritmasi uchun sarflangan nazariy va xaqiqiy ishlar nisbati bilan tavsiflanadi:

$$\eta_{iz} = \ell_{iz} / \ell_x ;$$

$$\eta_{AD} = \ell_{AD} / \ell_x$$

Ts – diagrammada qaytar 1-2 va (shartli) qaytmas 1-3 (xaqiqiy jarayon) adibatalarni tasvirlaylik (18.5-rasm). Adibat kompressor uchun haqiqiy ish quyidagiga teng.

$$\ell_{iz} = -(h_3 - h_1) = -C_p(T_3 - T_1)$$

Qaytar adibat siqilishdagi nazariy ish quyidagiga teng:

$$\ell_H = -C_p(T_2 - T_1)$$

Bundan kompressorning adibatik f.i.k. quyidagiga teng bo'ladi:

$$\eta_{ad} = (T_2 - T_1)/(T_3 - T_1)$$

Qaytmas adibatik jarayonni shartli ravishda politropa ko'rsatkich $n > K$ bo'lgan jarayon sifatida qarash mumkin. Bunda politropa ko'rsatkichi ishqalanish kuchiga bog'lik bo'ladi. U xolda

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(K-1)/K}, \quad T_3/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n}$$

Bundan

$$\eta_{AD} = \frac{(P_2/P_1)^{(K-1)/K} - 1}{(P_2/P_1)^{n-1/n} - 1} \quad (18.11)$$

Politropa ko'rsatkichi n ning qiymati gazning siqish boshida va oxiridagi parametrlariga qarab aniqlanadi. Sovitilayotgan kompressorning yuritmasi uchun sarflangan haqiqiy ish quyidagiga teng:

$$\ell_x = \ell_H / \eta_{Ad},$$

yoki

$$\ell_n = -[K/(K-1)]RT_1[(p_2/p_1)^{(n-1)/n} - 1] \quad (18.12)$$

Kompressor yuritmasi uchun sarflanayotgan effektiv quvvat quyidagicha aniqlanadi:

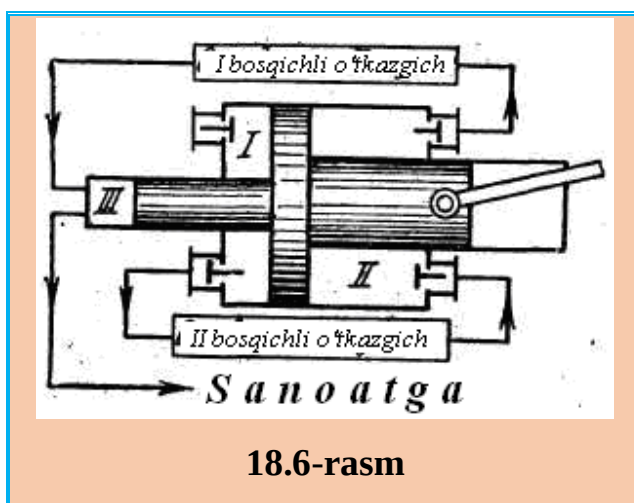
$$N_e = \ell_n m / \eta_n \cdot \eta_{mex} \cdot \eta_{to'l}, \quad (18.13)$$

bu yerda ℓ_n – gazning politrop siqilishdagi kompressor yuritmasi uchun sarflangan ish, J/kg; m – kompressor unumdorligi $m = V_n \cdot \rho_H$ (bu yerda V_n -normal sharoitdagi hajmiy unumdorlik, m³/sek; ρ_n – gazning normal sharoitdagi zichligi

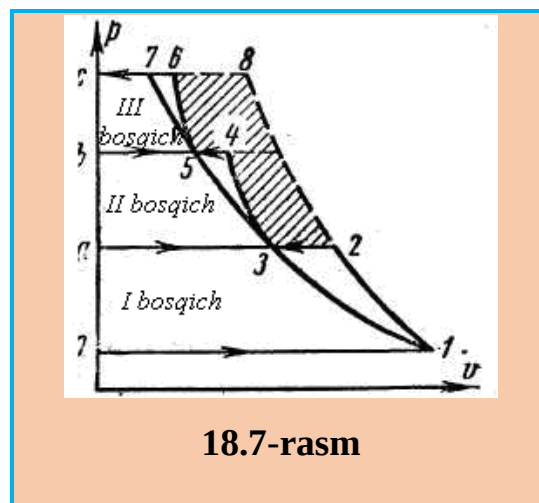
); η_n – gazning politrop siqishdagi kompressorning f.i.k.; η_{mex} – ishqalanishni xisobga oluvchi mexanik f.i.k.; η_{tol} – to'liq f.i.k.

18.2. Ko'p bosqichli kompressor

Yuqori bosimli gazlarni olish uchun ko'p bosqichli kompressorlar qo'llaniladi (18.6-rasm). Ularda gazni ancha yuqori bosimlargacha siqish uchun uni bosqich bilan, yahni oraliq sovutish yo'li bilan bir necha marta siqiladi. Gazni bir necha silindrda siqish kompressorning hajmiy f.i.k. orttiradi, surkov moyini



18.6-rasm



18.7-rasm

ishlashini yaxshilaydi hamda kompressor yuritmasi uchun energiya sarfini kamaytiradi. 18.7-rasmda uch bosqichli kompressorning ideal indikator diagrammasi tasvirlangan.

Bu yerda 0-1- birinchi bosqich so'rish chizig'i;

1-2-birinchi bosqichdagi politrop siqish jarayoni;

2-a- birinchi bosqichdagi birinchi sovutgichga xaydash chizig'i

a-3- ikkinchi bosqichga so'rish chizig'i;

3-4-ikkinchi bosqichdagi politrop siqish jarayoni;

4-v-ikkinchi bosqichdan ikkinchi sovutgichga xaydash chizig'i;

v-5-uchinchi bosqichga so'rish chizig'i;

5-6-uchinchi bosqichda politrop siqish jarayoni;

6-s-uchinchi bosqichdan rezePvuarga xaydash chizig'i.

2-3 va 4-5 chiziqlar gazning o'zgarmas bosimda sovishidagi hajmini kamayishini bildiradi. Ishchi jism - -gaz barcha sovitgichlarda boshlang'ich

temperatura T_1 gacha sovutiladi, shuning uchun gazning 1,3 va 5- nuqtalardagi temperaturalarini bir hil bo'lib 1-7 izotermada turadi. Barcha bosqichlarda bosimlar nisbati odatda bir hil bo'ladi:

$$p_2 / p_1 = p_4 / p_3 = p_6 / p_5 = x \quad (18.14)$$

Barcha bosqichlarda bosimlar nisbati, boshlang'ich temperaturalar hamda politropa ko'rsatgichi bir hil bo'lganligidan har bir bosqichdagi gazning ohirgi temperaturasi ham bir hil bo'ladi:

$$T_2 = T_4 = T_6$$

(18.14)-tenglamadan ko'rinib turibdiki:

$$x^3 = p_2 p_4 p_6 / p_1 \cdot p_3 \cdot p_5$$

bundan har bir bosqichdagi bosimning ortish darajasi quyidagiga teng bo'ladi:

$$x = \sqrt[3]{p_6 / p_1},$$

Yoki Z bosqich uchun:

$$x = \sqrt[Z]{p_Z / p_1}$$

Siqish bosqichlari sonini ko'paytirish siqish jarayonini izotermik jarayonga yaqinlashtiradi. Lekin shu bilan birga kompressorning konstruksiyasi murakablashadi, mexanik va gidravlik isroflar bo'ladi, kompressorning umumiy f.i.k. kamayadi.

Har bir bosqichdagi sarflangan ishni quyidagicha aniqlanadi:

$$\begin{aligned} \ell_1 &= \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} RT \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ \ell_2 &= \frac{n}{n-1} p_3 v_3 \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} RT_3 \left[\left(\frac{p_4}{p_3} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \\ \ell_3 &= \frac{n}{n-1} p_5 v_5 \left[\left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} RT_5 \left[\left(\frac{p_6}{p_5} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \end{aligned}$$

Bundan

$$\ell_1 = \ell_2 = \ell_3$$

Uchala bosqichdagi to'liq ish (J/kg) quyidagiga teng:

$$\ell_k = 3\ell_1 \quad (18.15)$$

Yoki m kg gaz uchun:

$$L_K = 3m\ell_1 \quad (18.16)$$

Ko'p bosqichli kompressorning yuritmasi uchun sarflangan ish bir bosqichdagi ishni bosqichlar soniga ko'paytirilganiga teng. Har bir bosqichda gazdan olib ketilgan issiqlik miqdori bir-biriga teng:

$$q = C[(n-k)/(n-1)](t_1 - t_2) \quad (18.17)$$

Izobar jarayonda xar qanday sovitgichdan olib ketilgan issiqlik miqdori quyidagicha aniqlanadi:

$$q_p = C_{pm}(t_2 - t_1) \quad (18.18)$$

Nazorat savollari:

- 1.Qanday mashina kompressor deyiladi?
- 2.Bir bosqichli kompressorni tavsiflab bering.
- 3.Bir bosqichli kompressorning nazariy indikator diagrammasi.
- 4.Xaqiqiy indikator diagrammasi nazariysidan nimasi bilan farq qiladi?
- 5.Bo'shliq xajm nima?
- 6.Hajmiy f.i.k.
- 7.Nima uchun ko'p bosqichli kompressorlar qo'llaniladi?
- 8.Ko'p bosqichli kompressorning nazariy indikator diagrammasi.
- 9.Ko'p bosqichli kompressorning yuritmasi uchun sarflangan ish.
- 10.Har bir bosqichda gazdan olib kelgan issiqlik miqdori.

O'N TO'QQIZINCHI BOB

ICHKI YONUV DVIGATELLARI

19.1. Qisqacha tarixiy ma'lumot

XIX asrlarning 70-80-yillarida mexanik ishning asosiy manbai bug' mashinasi hisoblanib, unda bosimi va temperaturasi past bo'lgan bug' qo'llanilgan.

Yoqilg'i yonganda hosil bo'lgan yuqori temperaturali gazlar bug' qozonlariga yuborilib, ma'lum bir temperatura va bosimli bug' olingan.

Yoqilg'i issiqligidan bunday usuldan foydalanish bug'-kuch qurilmalarining termik f.i.k.ni pasaytirishga olib kelgan. Shu sohada jahonning ko'p mamlakatlaridagi olimlarning xarakati tufayli yangi dvigatelg' yaratildi. Bu dvigatelda yoqilg'i yonishidan hosil bo'lgan gazlar bevosita mashinaning porsheniga tahsir qiladi.

Silindrning porsheni ostida yoqilg'i yondiriladigan mashinalarga ichki yonuv dvigatellari deb aytiladi. Bunday dvigatellarni yaratish mumkinligini birinchilardan bo'lib Sadi Karno aytgan. 1824 yili Karno o'zining "Olovning xarakatlantiruvchi kuchi xaqida mulohazalar" nomli asarida quyidagi fikrlarni keltirgan: "Menimcha havoni nasos yordamida siqib, uni yopiq bir idishga o'tkazish lozim, u yerga esa qandaydir mexanizm yordamida yoqilg'ini yuborish kerak, keyin gazlarga porshenga tahsir etish imkoniyatini yaratish kerak".

Karnoning g'oyalari keyinchalik to'liq ro'yobga chiqdi. 1860 yili frantsuz mexanigi Lenuar gazda ishlaydigan ichki yonuv dvigatelini yaratdi. Bu mashinada ishchi jism dastlab siqilmasligi tufayli uning f.i.k. past bo'ladi. Shu sababli u mashina keng tarqalmadi. 1862 yili yana bir frantsuz muhandisi Bo-de-Roshe Karno g'oyalariga yaqin bo'lgan dvigatelga patent oldi. 1877 yili nemis muhandisi Otto Bo-de-Roshe taklif qilgan printsiplariga asosan ishlaydigan benzinli dvigatelni qurdi.

1897 yili nemis muhandisi Dizelg' kerosinda ishlaydigan yuqori siqish darajasiga ega bo'lgan dvigatelni ishlab chiqdi. Bu dvigatelda havo kompressor yordamida siqilib silindrga purkalgan. Rus muhandislari ham shu sohada katta ish

qildilar. 1893 yili Mamin neftda ishlaydigan yuqori bosimli dvigatelini ixtiro qildi. 1898 yili Peterburgdagi Nobel zavodida neftda ishlaydigan dvigatel qurildi. 1903 yili shu zavodda birinchi marta kemalar uchun og'ir yoqilg'ida ishlaydigan dvigatelg' ishlab chiqarildi. 1904 yili rus muhandisi G.V.Trinkler kompressorsiz dvigatelni qurdi. Bu dvigatelda yoqilg'i avvalo o'zgarmas hajmda, keyin esa o'zgarmas bosimda yondirildi. Yoqilg'i aralash yonadigan bunday dvigatelg' xozir ham keng qo'llanilmoqda. Shunday qilib 40-50 yil ichida yuqori samaradorlikka ega bo'lgan ichki yonuv dvigatellari yaratildi. Barcha zamonaviy porshenli ichki yonuv dvigatellarini quyidagi uch guruhga bo'lsak bo'ladi:

yoqilg'i o'zgarmas hajmda yonadigan;

yoqilg'i o'zgarmas bosimda yonadigan;

yoqilg'i aralash yonadigan: o'zgarmas hajmda va o'zgarmas bosimda.

Porshenli ichki yonuv dvigatellarining ideal sikllarini termodinamik tadqiqotida quyidagi kattaliklar aniqlanadi: siklga keltirilgan va olib ketilgan issiqlik miqdori;

ishchi jismning siklning xarakterli nuqtalaridagi asosiy parametrlari; siklning termik f.i.k. Har qanday ichki yonuv dvigateli siklini tasvirlovchi kattaliklar quyidagilardir:

Siqish darajasi:

$$\varepsilon = v_1 / v_2 ,$$

bu kattalik ishchi jismning boshlang'ich solishtirma hajmini siqish oxiridagi solishtirma hajmiga nisbatini ifodalaydi;

Bosimni oshish darajasi:

$$\lambda = \rho_3 / \rho_2 ,$$

bu kattalik izoxor issiqlik keltirish jarayonidagi boshlang'ich va oxirgi bosimlar nisbatini ko'rsatadi;

Dastlabki kengayish yoki izobar kengayish darajasi:

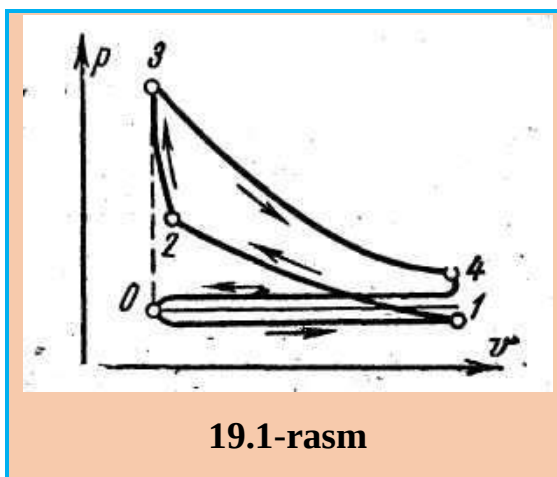
$$\rho = v_3 / v_2$$

Bu kattalik izobar issiqlik keltirish jarayonidagi bosimni va oxirgi hajmlar nisbatini ko'rsatadi.

19.2. Issiqlik $v=const$ sharoitda beriladigan sikl.

Porshenli ichki yonuv dvigatellarini ishini tadqiqot qilishda silindrdagi bosim o'zgarishini porshen holatiga bog'liklik diagrammasi orqali o'rganish maqsadga muvofiqdir. Maxsus asbob-indikator orqali aniqlangan diagrammaga indikatorli diagramma deb aytiladi. Indikatorli diagramma chegaralagan yuza mahlum bir masshtabda gazning bitta siklda bajargan ishiga teng bo'ladi.

19.1-rasmda o'zgarmas hajmda yoqilg'i yonadigan dvigatelning indikator diagrammasi tasvirlangan. Bunday dvigatellarda yoqilg'i siifatida yengil

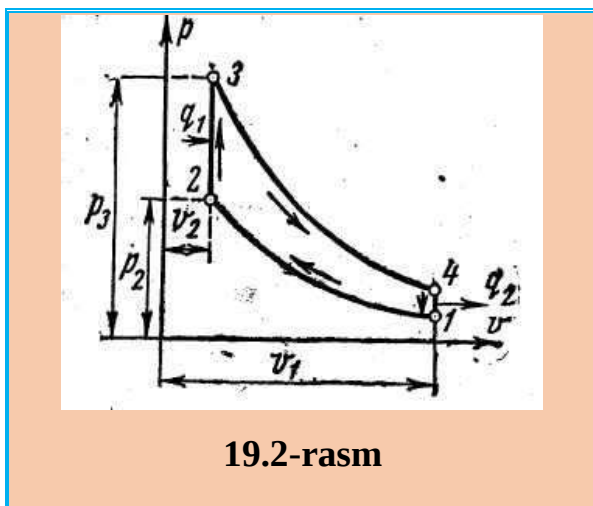


yoqilg'ilar-benzin, generator gazi, spirtlar v x.k.lar qo'llaniladi.

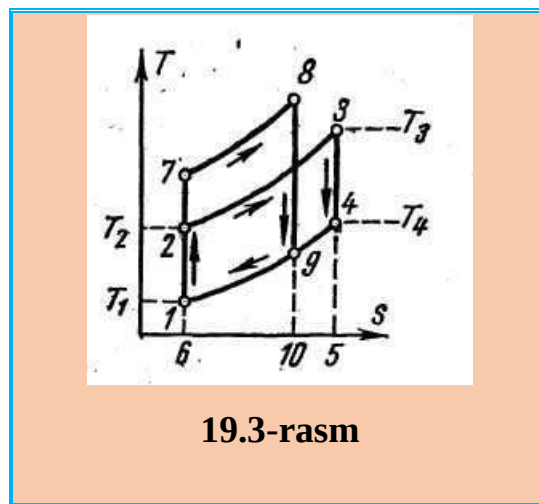
Porshening chapki turish nuqtasidan (CHTN) o'ng tomonga xarakatida so'rish klapani orqali yoqilg'i va havo aralashmasidan iborat bo'lgan yonuvchan aralashma so'riladi. Bu jarayon diagrammada 0-1 egri chiziq bilan tasvirlanib, so'rish chizig'i deb aytiladi. Ko'rinib turibdiki, 0-1 chiziq termodinamik jarayon emas, chunki bunda aralashmanig asosiy parametrlari o'zgarmasdan, uning massaviy miqdori va hajmi o'zgaradi xolos. Porshening teskari yurishida so'rish klapani berkiladi va aralashma siqiladi. Siqish jarayoni diagrammada 1-2 egri chiziq bilan tasvirlangan. Bu egri chiziq siqish chizig'i deb ataladi. 2-nuqtada, porshen CHTN ga ozgina yetmasdan turib aralashma elektr uchqunidan yondiriladi. Yonuvchi aralashmani yonishi bir lahzada, yahni o'zgarmas hajmda ro'y beradi. Bu jarayon diagrammada 2-3 egri chiziq bilan tasvirlangan. Yoqilg'ini yonishi natijasida gazning temperaturasi va bosimi keskin ortadi(3-nuqtada). Keyin yonish mahsulotlar kengayadi. Porsheng' o'ng turish nuqtasiga (O'TN) siljiydi va gazlar foydali ishni bajaradilar. Indikatorli

diagrammada kengayish jarayoni 3-4 egri chiziq bilan tasvirlangan. Bu egri chiziqqa kengayish chizig'i deb aytiladi. 4-nuqtada chiqarish klapani ochilib, silindrdagi bosim deyarli tashqi bosimgacha tushadi. Porshenning bundan keyingi o'ngdan chapga tomon xarakatida silindrdagi yonish mahsulotlari chiqarish klapani orqali atmosferaga chiqarilib yuboriladi. Bu jarayon diagrammada 4-0 egri chiziq bilan tasvirlangan. Bu chiziqqa chiqarish chizig'i deb aytiladi. Ko'rib chiqilgan ishchi jarayon porshenning to'rt yo'lida (taktida) yoki valning ikki aylanishida ro'y beradi. Bunday dvigatellarga to'rt taktli dvigatellar deb aytiladi. Yuqorida ko'rib chiqilgan o'zgarmas, hajmda yoqilg'i yonadigan real ichki yonuv dvigatelida sikl berk emas. Bunda qaytmas jarayonga xos bo'lgan xususiyatlar: ishqalanish, ishchi jismdagi kimyoviy reaksiyalar, porshenning mahlum bir tezligi, temperaturalar farqi tufayli issiqlik almashinuvi va x.k.lar ko'rinib turibdi. Shu sababli bunday siklni issiqlik jarayonlari nazariyasi nuqtai nazaridan tahlil qilib bo'lmaydi. Shuning uchun termodinamika real jarayonlarni emas balki, ichki yonuv dvigatellarida sodir bo'layotgan ideal, qaytar sikllarni tahlil qiladi. Bunda ishchi jism sifatida o'zgarmas sig'imli ideal gaz qabul qilinadi. Silindr o'zgarmas miqdordagi ishchi jism bilan to'ladi. Issiqlik manbai va ishchi jism temperaturalari farqi cheksiz kichik deb xisoblanadi. Ishchi jismga issiqlik yonayotgan yoqilg'idan emas, balki tashqi issiqlik manбайдan keltiriladi va olib ketiladi. Shunday qilib, ideal termodinamik sikllarni o'rganish (mahlum bir cheklanishlarni ehtiborga olgan holda) turli dvigatellar ishini taqqoslash, ularning samaradorligiga tahsir etuvchi omillarni aniqlash imkonini beradi. Yuqoridagi shartlarga asosan qurilgan diagrammani indikator diagramma emas, balki o'zgarmas hajmda issiqlik keltiriladigan pv- diagramma deb aytiladi.

Ikki izoxora va ikki adiabatadan iborat bo'lgan $v=\text{const}$ sharoitida issiqlik keltiriladigan ideal termodinamik siklni ko'rib chiqaylik. 19.2 va 19.3- rasmlarda shu siklning pv – va Ts – diagrammalari tasvirlangan.



19.2-rasm



19.3-rasm

Boshlang'ich parametrlari p_1 , v_1 va T_1 bo'lgan ideal gaz 1-2 adiabatada bo'yicha 2-nuqttagacha adiabat siqiladi. 2-3 izoxora bo'yicha ishchi jismga q_1 issiqlik miqdori uzatiladi. Ishchi jism 3-nuqtadan 3-4 adiabatada bo'ylab kengayadi. 4-1 izoxora bo'yicha ishchi jism boshlang'ich holatiga qaytadan, bunda q_2 issiqlik miqdori olib ketiladi. Siklni tavsiflovchi asosiy kattaliklar quyidagilar: siqish darajasi $\varepsilon = v_1 / v_2$; bosimni oshish darajasi $\lambda = p_3 / p_2$

Issiqlik sig'imi C_v adiabatada ko'rsatgichi K ni o'zgarmas deb xisoblab siklning termik f.i.k.ni aniqlaymiz.

Siklning termik f.i.k:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - (q_2 / q_1)$$

Keltirilgan issiqlik miqdori:

$$q_1 = C_v(T_3 - T_2)$$

Olib ketilgan issiqlik miqdori esa:

$$q_2 = C_v(T_4 - T_1)$$

U holda siklning f.i.k. quyidagiga teng:

$$\eta_t = 1 - (q_2 / q_1) = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - (T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)$$

Ishchi jismning siklning asosiy nuqtalaridagi parametrlari quyidagicha:

2-nuqtada

$$v_2 = v_1 / \varepsilon; p_2 = p_1 (v_1 / v_2)^k = p_1 \cdot \varepsilon^k$$

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \quad \text{va} \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

3-nuqtada

$$v_3 = v_2 = v_1 / \varepsilon; \quad p_3 = p_2 \chi = p_1 \varepsilon^k / \chi$$

$$T_3 / T_2 = p_3 / p_2 = \chi \quad \text{va} \quad T_3 = T_2 \chi = T_1 \varepsilon^{k-1} \cdot \chi$$

4 – nuqta

$$v_4 = v_1; \quad p_4 = p_3 (v_3 / v_4)^k = p_3 (v_2 / v_1)^k = p_3 / \varepsilon^k = p_1 \chi$$

$$T_4 / T_3 = (v_3 / v_4)^{k-1} = 1 / \varepsilon^{k-1} \quad \text{va} \quad T_4 - T_1 \varepsilon^{k-1} \chi (1 / \varepsilon^{k-1}) = T_1 \chi$$

Yuqorida aniqlangan kattaliklarni siklning termik f.i.k tenglamasiga qo'yamiz.

$$\eta_t = 1 - [(T_4 - T_1) / (T_3 - T_2)] = 1 - [T_1 \chi - T_1] / [T_2 \varepsilon^{k-1} \chi - T_1 \varepsilon^{k-1}] = 1 - (1 / \varepsilon^{k-1})$$

Demak o'zgaras xajmda issiqlik keltiriladigan siklning termik f.i.k. quyidagicha bo'ladi:

$$\eta_t = 1 - (1 / \varepsilon^{k-1}) \quad (19.1)$$

(19.1) tenglamadan ko'rinib turibdiki bunday tsiklning termik f.i.k. siqish darajasi ε va adiabat ko'rsatkichi K ga yoki ishchi jismning xususiyatiga bog'liqdir. F.i.k ε va K ortishi bilan oshadi. Bosimni ortish darajasi χ ga termik f.i.k bog'lik emas.

F.i.k ni ε ga bog'liq ravishda o'zgarishini Ts-diagrammadan (9.3-rasm) ko'rish mumkin. Ikki siklda keltirilgan issiqlik miqdorini tavsiflovchi yuzalar 67810=6235 bir xil bo'lib, lekin siqish darajasi turlicha bo'lganda f.i.k. siqish darajasi yuqori bo'lgan siklda katta bo'ladi, yahni 61910 yuza < 6145 yuza. Lekin, siqish darajasini ortishi yonuvchi aralashmani o'z-o'zidan yonib ketishiga olib keladi. Bu esa dvigatelni bir meyorda ishlashiga to'sqinlik qiladi. Bundan tashqari, siqish darajasi yuqori bo'lgan xolda yonish tezligi keskin ortib detonatsiya (portlab yonish) ro'y berishi mumkin, bu esa, dvigatelni buzilishiga olib keladi. Shuning uchun xar bir yoqilg'i uchun ma'lum bir siqish darajasi qo'llaniladi. Yoqilg'i

turiga qarab o'rganilayotgan dvigatelni siqish darajasi 4-9 oralig'ida o'zgarib turadi. Shunday qilib, issiqlik o'zgarmas xajmda keltiriladigan siklda yuqori siqish darajasini qo'llab bo'lmasligi ayon bo'ldi. Shu sababli bunday dvigatellarning f.i.k. nisbatan kichik bo'ladi. 1 kg ishchi jismning nazariy foydali ishi kengayish va siqish jarayonlarining o'zaro joylashishiga bog'liq bo'ladi. Kengayish va siqish chiziqlari o'rtasidagi o'rtacha bosimlar farqini ortishi dvigatelg' tsilindrining o'lchamlarini kamaytirish imkoniyatini yaratadi. Agar o'rtacha bosim p_i orqali belgilasak 1 kg ishchi jismning nazariy foydali ish quyidagiga teng bo'ladi:

$$\ell' = \ell_{keng} - \ell_{siq} = p_i(v_1 - v_2)$$

p_i ni o'rtacha indikator bosimi deb aytiladi. $v = \text{const}$ sharoitida issiqlik keltiriladigan sikl uchun p_i quyidagicha aniqlanadi:

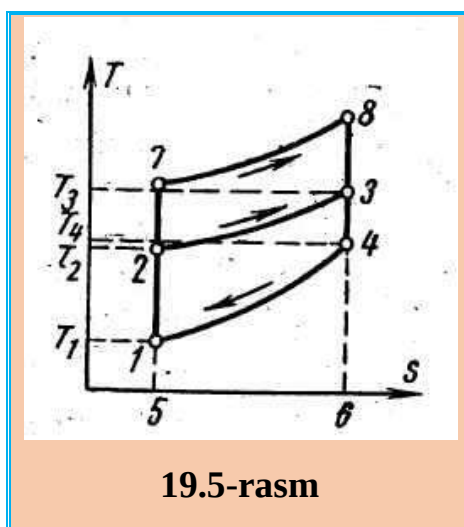
$$P_i = \ell^1 / (v_1 - v_2) = P_1 [(\varepsilon^k - \varepsilon)(\chi - 1) / (k - 1)(\varepsilon - 1)]$$

Ushbu formuladan ko'rinib turibdiki p_i , ε , χ va p_1 ortishi bilan oshadi. Bundan tashqari, 1 kg ishchi jismning bir siklda bajargan nazariy foydali ishi kengayish va siqish ishlarining ayirmasiga teng bo'ladi:

$$\ell^1 = \ell_{keng} - \ell_{siq} = \left[\frac{1}{(k-1)} \right] (p_3 v_3 - p_4 v_4) - \left[\frac{1}{(k-1)} \right] (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

19.3. Issiqlik $P = \text{const}$ sharoitida beriladigan sikli.

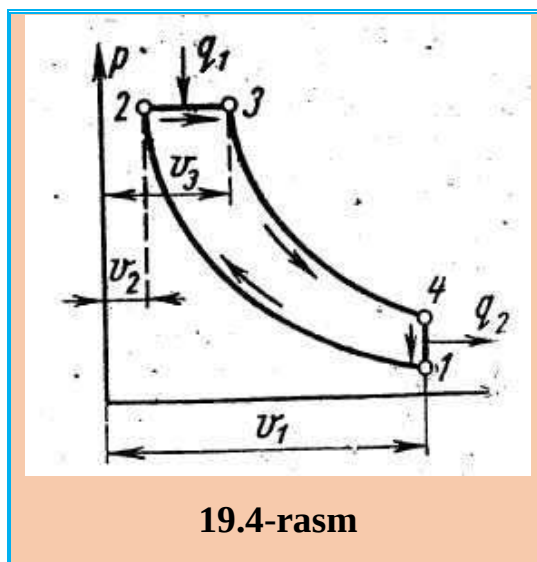
Issiqlik o'zgarmas xajmda keltiriladigan siklining taxlilidan ko'rinib turibdiki, dvigatelning tejankorligini oshirish uchun yuqori siqish darajalarini



19.5-rasm

qo'llash lozim. Lekin yuqori siqish darajalarini qo'llash yoqilg'ini o'z-o'zidan yonish temperaturasi bilan cheklanadi. Agar havo va yoqilg'i aloxida siqilsa

bunday cheklanishlar bartaraf etiladi. Havo yuqori bosimlarda siqilganda uning temperaturasi shunchalik ko'tariladiki natijada silindrga uzatilayotgan yoqilg'i xech qanday yondirish qurilmalarisiz yonib ketadi. Bundan tashqari, bu usulni qo'llash xar qanday suyuq va arzon: neftg', mazut kabi yoqilg'ilardan foydalanish imkoniyatini yaratadi. Yoqilg'i o'zgarmas bosimda asta-sekin yonadigan dvigatellar yuqorida aytib o'tilgan afzalliklarga ega. Bunday dvigatelda havo dvigatel silindrida siqiladi, suyuq yoqilg'i esa kompressor orqali havo bilan purkaladi. Alohida siqish usulini qo'llash yuqori siqish darajasini ($\varepsilon=20$) qo'llash imkoniyatini yaratadi va yoqilg'ini o'z-o'zidan yonib ketishini oldini oladi. O'zgarmas bosimda yoqilg'ini yonishi yoqilg'i forsunkasi yordamida boshqariladi. Bunday dvigatellarni yaratilishi nemis muxandisi Dizel nomi bilan bog'liqdir. Bunday dvigatelni ideal siklini ko'rib chiqaylik. 9.4 va 9.5 rasmlarda bunday siklni pv- va Ts- diagrammalari tasvirlangan. Boshlang'ich parametrlari p_1, v_1, T_1 , bo'lgan gazsimon jism adibata 1-2 bo'yicha siqiladi. Keyin 2-3 izobara bo'yicha unga q_1 issiqlik miqdori uzatiladi. Ishchi jism 3-nuqtadan adibata 3-4 bo'yicha kengayadi.



Va oxirida ishchi jism 4-1 izoxora bo'yicha boshlang'ich xolatiga kaytib keladi, bunda atrof muxitga q_2 issiqlik miqdori uzatiladi. Siklning asosiy tavsiflari, quyidagilar: siqish darajai $\varepsilon=v_1/v_2$ va dastlabki kengayish darajasi

$\rho = v_3 / v_2$ Issiqlik sig'implari c_p , c_v va $K=c_p/c_v$ larni o'zgarmas xisoblab siklni termik f.i.k ni aniqlaymiz. Siklning termik f.i.k quyidagiga teng:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - (q_2 / q_1)$$

Keltirilgan issiqlik miqdori

$$q_1 = Cp(T_3 - T_2)$$

Olib ketilgan issiqlik miqdori

$$q_2 = Cp(T_4 - T_1)$$

Bundan

$$\eta_t = 1 - (q_2 / q_1) = 1 - [Cv(T_4 - T_1) / Cp(T_3 - T_2)] = 1 - [(T_4 - T_1) / k(T_3 - T_2)]$$

Siklning asosiy nuqtalaridagi ishchi jismning parametrlari quyidagicha:

2-nuqtada

$$v_2 = v_1 / \varepsilon; \quad p_2 = p_1 \varepsilon^k$$

3-nuqtada

$$T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{k-1} \quad \text{va} \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1};$$

4-nuqtada

$$v_4 = v_1; \quad p_4 = p_3 (v_3 / v_4)^k = p_1 \varepsilon^k (v_2 \rho / v_1)^k = p_1 \rho^k;$$

$$T_4 / T_3 = (v_3 / v_4)^{k-1} = (v_3 / v_1)^{k-1}$$

$$\rho / \varepsilon = v_1 / v_2 v_3 / v_2 = v_3 / v_1,$$

yoki

$$T_4 = T_3 (\rho / \varepsilon)^{k-1} = T_1 \varepsilon^{k-1} \rho (\rho^{k-1} / \varepsilon^{k-1}) = T_1 \rho^k$$

Olingan qiymatlarni termik f.i.k tenglam asiga ko'yamiz.

$$\eta_t = -1[(T_4 - T_1) / k(T_3 - T_2)] = 1 - [(T_1 \rho^k - T_1) / k(T_1 \varepsilon^{k-1} \rho - T_1 \varepsilon^{k-1})] = 1 - [(\rho^k - 1) / K \varepsilon^{k-1} (\rho - 1)] \quad (19.2)$$

(19.2) tenglamadan ko'rinib turibdiki, siklning termik f.i.k siqish darajasi ε ga adiabata ko'rsatkichi K ga va dastlabki kengayish darajasi ρ ga bog'liqdir. ε va K ortishi bilan f.i.k oshadi, ρ ortishi bilan esa, kamayadi.

Siqish darajasini diagrammadan yaqqol ko'rish mumkin. Olib ketilgan issiqlik miqdorini tavsiflovchi yuzalar bir xil bo'lganda (1456 yuza) , qaysi siklning siqish darajasi yuqori bo'lsa o'sha siklning f.i.k katta bo'ladi, chunki

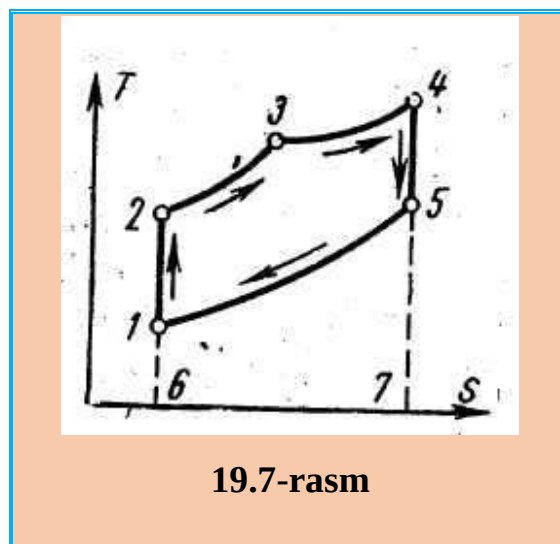
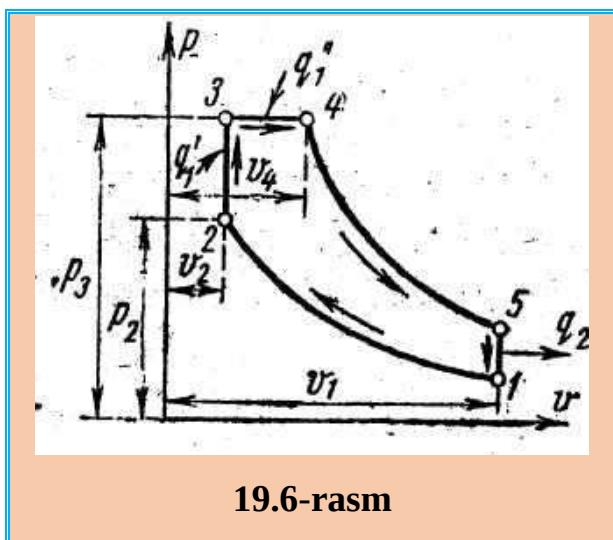
foydali ish yuzasi katta, ya'ni 1784 yuza > 1234 yuza. Ushbu siklning o'rtacha indikator bosimi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$p_i = \ell^1 / (v_1 - v_2) = \frac{p_1 \varepsilon}{(k-1)(\varepsilon-1)} [K \varepsilon^{k-1} (\rho-1) - (\rho^k - 1)]$$

O'rtacha indikator bosimi ε va ρ oshishi bilan ortadi 1 kg ishchi jismning bir siklda bajargan foydali ishi kengayish va siqish ishlarining ayirmasiga teng:

$$\ell^1 = \ell_{keng} - \ell_{siq} = p_2(v_3 - v_2) + \frac{1}{k-1}(p_3 v_3 - p_4 v_4) - \frac{1}{k-1}(p_2 v_3 - p_1 v_1)$$

19.4. $v=\text{const}$, $p=\text{const}$ bo'lgan sharoitda issiqlik aralash keltiriladigan sikl



$p=\text{const}$ sharoitda issiqlik keltiriladigan sikl bo'yicha ishlaydigan dvigatelning bahzi kamchiliklari mavjud. Bulardan biri yoqilg'i uzatish uchun kompressorlarning bo'lishidir. Kompressorga dvigatelning umumiy quvvatini 6-10% sarf bo'ladi, bu esa o'z navbatida konstruktsiyani murakkablashtiradi va dvigatelning tejamkorligini pasaytiradi. Bundan tashqari nasos va forsunkalar bo'lishi qurilmani og'irligini ortiradi. Dvigatellarning ishlashini soddalashtirish va yaxshilash maqsadida olib borilgan ishlar natijasida kompressorsiz dvigatellar yaratildi. Bunday dvigatellarda yoqilg'i 500-700 bar bosimda mexanik usulda purkaladi. Kompressorsiz, issiqlik aralash keltiriladigan sikl bo'yicha ishlaydigan

dvigatelg' loyixasini rus muxandisi G.V.Trinkler ishlab chiqqan. Bu dvigatelg' yuqorida ko'rib chiqilgan dvigatellardagi kamchiliklardan xolidir. Suyuq yoqilg'i yoqilg'i nasosi yordamida forsunka orqali silindrga mayda zarrachalar xolida uzatiladi. Issiq havoga uchragan yoqilg'i o'z-o'zidan forsunka ochiq turguncha avvalo o'zgarmas xajmda, so'ngra o'zgarmas bosmda yonadi. 9.6 va 19.7 rasmlarda issiqlik aralash keltiriladigan siklning Pv- va Ts- diagrammalari tasvirlangan. Parametrlari p_1, v_1, T_1 , bo'lgan ishchi jism 1-2 adiabata bo'yicha 2-nuqttagacha siqiladi. 2-3 izoxora bo'yicha ishchi jismga issiqlikning q'_1 birinchi qismi uzatiladi. 3-4 izobara bo'yicha issiqlikning q''_1 ikkinchi qismi uzatiladi. 4-nuqtadan ishchi jism 4-5 adiabata bo'yicha kengayadi. Va nixoyat 5-1 izoxora bo'yicha ishchi jism boshlang'ich xolatiga kaytib keladi va bu jarayonda q_2 issiqlik tashqi muxitga uzatiladi.

Siklni tavsirlovchi asosiy parametrlar quyidagilar:

Siqish darajasi $\varepsilon = v_1 / v_2$,

bosimni oshish darajasi $\chi = P_3 / P_2$ va dastlabki kengayish darajasi

$$\rho = v_4 / v_3.$$

Issiqlik sig'implari c_p, c_v , va adiabata ko'rsatkichi $K=c_p/c_v$ larni o'zgarmas hisoblab siklning termik f.i.k. ni aniqlaymiz:

$$\eta_t = (q_1 - q_2) / q_1 = 1 - q_2 / (q_1^1 + q_1^4)$$

Keltirilgan issiqlikning birinchi qismi:

$$q_1^1 = C_v(T_3 - T_2)$$

Keltirilgan issiqlikning ikkinchi qismi:

$$q_1^{11} = C_v(T_4 - T_3)$$

Olib ketilgan issiqlik:

$$q_2 = C_v(T_5 - T_1)$$

U holda :

$$\eta_t = 1 - q_2 / (q_1^1 + q_1^{11}) = 1 - C_v(T_5 - T_1) [C_v(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3)] = 1 - (T_5 - T_1) / [(T_3 - T_2) + k(T_4 - T_3)]$$

Siklning asosiy nuqtalaridagi ishchi jismning parametrlari :

2- nuqtada .

$$v_2 = v_1 / \varepsilon; \quad p_2 = p_1 \varepsilon^k; \quad T_2 / T_1 = (v_1 / v_2)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \quad \text{va} \quad T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$$

3 – nuqtada .

$$v_3 = v_2 = v_1 / \varepsilon; \quad p_3 = p_2 = p_1 \varepsilon^k \chi; \quad T_3 / T_2 = p_3 / p_2 = \chi; \quad T_3 = T_2 \chi \quad \text{va} \\ T_3 = T_1 \varepsilon^{k-1} \chi$$

4 – nuqtada .

$$v_4 = v_3 \rho = v_1 \rho / \varepsilon; \quad p_4 = p_3 = p, \varepsilon^k \chi; \quad T_4 / T_3 = v_4 / v_3 = \rho; \quad T_4 = T_3 \rho \quad \text{va} \\ T_4 = T_1 \varepsilon^{k-1} \chi \rho$$

5 – nuqtada .

$$v_5 = v_1; \quad p_5 = p_4 (v_4 / v_5)^k = p_1 \varepsilon^k \chi (v_1 \rho / v, \varepsilon)^k = p_1 \rho^k \chi; \\ T_5 / T_4 = (v_4 / v_5)^{k-1} = (v_4 / v_1)^{k-1}; \quad \rho : \varepsilon = (v_4 / v_3) (v_1 / v_2) = v_4 / v_1; \\ T_5 / T_4 = (\rho / \varepsilon)^{k-1}; \quad T_5 = T_1 \varepsilon^{k-1} \chi \rho \frac{\rho^{k-1}}{\varepsilon^{k-1}}; \quad T_5 = T_1 \chi \rho^k$$

Yuqorida olingan kattaliklarni termik f.i.k. tenglamasiga qo'ysak :

$$\eta_t = 1 - (\chi \rho^k - 1) / \varepsilon^{k-1} [(\chi - 1) + k \chi (\rho - 1)] \quad (19.3)$$

hosil bo'ladi .

(19.3) tenglamadan ko'rinib turibdiki siklning f.i.k. adibata ko'rsatkichi K ga, siqish darajasi, bosimni oshishi bilan f.i.k ortadi, R oshishi bilan esa f.i.k kamayadi. Ts- diagramma orqali siklning f.i.k. ni yuzalar nisbati orqali aniqlanadi:

$$\eta_t = (6247 \text{ yuza} - 6157 \text{ yuza}) / 6247 \text{ yuza} = 12345 \text{ yuza} / 6247 \text{ yuza}$$

Bunday dvigitellarda odatda $\varepsilon = 10-14$, $\chi = 1,2-1,7$ va $\rho = 1,1-1,5$ deb olinadi.

Issiqlik aralash keltiriladigan sikl yuqorida ko'rib o'tilgan ikkala siklni umumlashtiradi. Agar $\chi = 1$ deb xisoblasak, issiqlik aralash keltiriladigan sikli aylanadi., (9.3) tenglamadan shu siklning f.i.k ni tenglamasi (19.2) kelib chiqadi.

Agar $\rho = 1$ deb xisoblasak, issiqlik aralash keltiriladigan sikl izoxor issiqlik keltiriladigan siklga aylanadi. 1 kg ishchi jism bir siklda bajargan nazariy foydali ishi kengayish va siqish ishlarining ayrimasiga teng bo'ladi:

$$\ell^1 = \ell_{\text{кеш}} - \ell_{\text{сук}} = \rho_3 (v_4 - v_3) + \frac{1}{k-1} (p_4 v_4 - p_5 v_5) - \frac{1}{k-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

Siklning o'rtacha indikator bosimi:

$$p_i = \frac{\ell^1}{v_1 - v_2} = \frac{p_1}{(\varepsilon - 1)(k - 1)} + \frac{1}{k - 1}(p_4 v_4 - p_5 v_5) - \frac{1}{k - 1}(p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

19.5. Porshenli ichki yonuv dvigetellari sikllarini taqqoslash

Har qanday siklning takomillashganlik darajasi uning termik f.i.k orqali aniqlanadi. Odatda sikllarni Ts- diagrammada taqqoslanadi. Bunda ikki usuldan foydalaniladi.: birinchidan Ts-diagrammada yuzalar taqqoslanadi, ikkinchida esa siklda issiqlik keltirish va olib ketish jarayonlarining o'rtacha integral temperaturalari taqqoslanadi. Maksimal temperaturalar T_3 bir xil, olib ketilgan issiqlik miqdorlari teng, siqish darajalari turlicha izoxor va izobar issiqlik keltiriladigan sikllarni taqqoslash. 19.8-rasmda izoxor issiqlik keltirilgan siklning yuzasi 1234 bilan tasvirlangan. Izobar issiqlik keltiriladigan siklning yuzasi 1534 ga teng. Maksimal temperaturalar 3-nuqtada bir xil. Ikkala siklda olib ketilgan issiqlik 6147 yuza bilan tasvirlangan. Ts- diagrammadan ko'rinib turibdiki, izobar issiqlik keltirish yuzasi izoxor issiqlik keltirish yuzasidan katta, yahni 6537 yuza > 6237 yuza. Shuning uchun izobar issiqlik keltirish siklining f.i.k izoxor issiqlik keltirish siklining f.i.k dan katta bo'ladi.

Izoxor va izobar issiqlik keltiriladigan sikllarni o'rtacha integral temperaturalari orqali taqqoslash.

Har qanday jarayonning o'rtacha integral temperaturasi alohida jarayondagi issiqlik miqdorini ishchi jismining entropiyasining o'zgarishi nisbatiga teng:

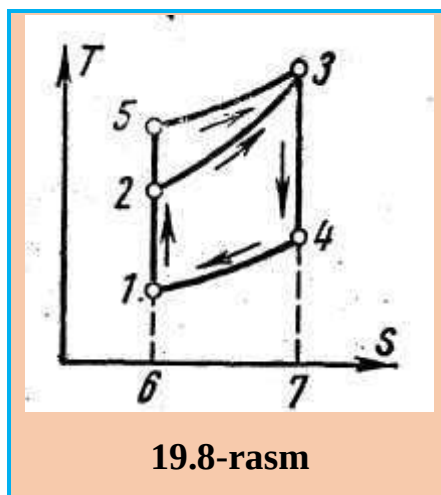
$$T_{it} = \frac{\int_1^2 T ds}{s_2 - s_1} = \frac{q}{s_2 - s_1},$$

yoki

$$T_{it} = \frac{T_2 - T_1}{\ln T_2 / T_1}$$

U xolda xar qanday siklning termik f.i.k quyidagiga teng bo'ladi:

$$\eta_t = 1 - T_{2it} / T_{1it}$$



bu yerda T_{1st} - issiqlik keltiriladigan jarayonning o'rtacha integral temperaturasi;
 T_{2it} - issiqlik olib ketiladigan jarayonning o'rtacha integral temperaturasi. 19.8-
 rasmdan ko'rinib turibdiki, izobar issiqlik keltirish jarayonining T_{2it} temperaturasi
 izoxor issiqlik keltirish jarayonining T_{2it} temperaturasidan katta, ikkala sikldagi
 izoxor issiqlik olib ketish jarayonining T_{2it} temperaturalari bir xil,
 Shuning uchun:

$$\eta_{t,izob} > \eta_{t,izox}$$

Nazorat savollari:

1. Ichki yonuv dvigateli (IYOD) qanday guruxlarga bo'linadi?
2. Siklning asosiy tavsiflarini aytib bering.
3. Indikator diagrammani tushuntirib bering.
4. $v = \text{const}$ sharoitida issiqlik keltiriladigan siklni tushuntirib bering.
5. $p = \text{const}$ sharoitida issiqlik keltiriladigan siklni tushuntirib bering.
6. IYOD sikllarini Pv - va Ts - diogrammalarda tasvirlab bering.
7. Siklning termik f.i.k.
8. Issiqlik aralash keltiriladigan siklni tavsiflab bering.
9. Issiqlik aralash keltiriladigan siklning termik f.i.k ni formulasini keltirib chiqaring.
10. $v = \text{const}$ va $p = \text{const}$ sharoitda issiqlik keltiriladigan sikllarni taqqoslang.

1. Giancoli, Douglas C. General Physics. New York : Pearson Prentice Hall, 2014
2. R.K. Rajput. Engineering Thermodynamics 2007.
3. Yunus Cengel, Michel Boies, Thermodynamics: an Engineering approach.2015
4. Modern engineering thermodynamics / Robert T. Balmer, British Library Cataloguing-in-Publication Data /2011 Elsevier Inc.
5. Advanced Thermodynamics for Engineers. Desmond E Winterbone hn. Wiley & Sons, Inc., 605 Third Avenue, New York, NY 1015. 2015.
6. R.A.Zoxidov, M.M.Alimova, Sh.S.Mavjudova «Issiqlik texnikasi» O'zbekiston faylasuflari milliy jamiyati nashriyoti. Toshkent 2010 yil
7. Баскаков А.П., Берг Б.В. и др. Учебное пособие. Теплотехника – М.: «Энергоиздат», 1982 – 262 с.
8. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. Учебное пособие. – М: Высшая школа, 1980 – 469 с.
9. Кириллин В.А., Сичев В.В., Шейндлин А.Е. Техникавий термодинамика, Дарслик – Т. «Ўқфитувчи», 1980, 440 б.
10. Немцев З., Арсеньев Г.В. Теплоэнергетические установки и теплоснабжение: Учебное пособие. – М.: «Энергоиздат», 1982, - 432 с.
11. Ларионов Н.Н. Теплотехника: Учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1985, - 432 с.
12. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика, Учебное пособие для Втузов. М.: Высшая школа. 2000 – 261 с.
13. Nurmatov J. va boshqalar. Issiqlik texnikasi. Oliy o'quv yurtlari talabalari uchun o'quv qo'llanma.–Т.: «O'qituvchi», 1998,- 256 b.
14. Kern D.Z., Kraus A.D. Extended surface Heat Transfer. London. 1987, 464 p.
15. Spolding D.B., Patankar S.V. Heat and mass Transfer in boundary layers. London. Edward Arnolds, 1989, 400 p.
16. Truesdell C. Rational thermodynamics. N.Y. Mc.Graw. – Hili. 1992, 208 p.
17. Еремкин А.И. Королева Т.М. Тепловой режим зданий. Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2000, - 368 с.