

**T.S. XUDOYBERDIYEV, B.P. SHAYMARDANOV,
R.A. ABDURAXMONOV, A.N. XUDOYOROV,
B.R. BOLTABOYEV**

ISSIQLIK TEXNIKASI ASOSLARI

Oliy o'quv yurtlari uchun o'quv qo'llanma

*O'zbekiston Respublikasi Oliy va o'rta maxsus ta'lim vazirligi
qoshidagi Muvofiqlashtiruvchi Kengash tomonidan qishloq va suv
xo'jaligi bilim sohasi Oliy ta'lim muassasalari ta'lim yo'nalishlari
uchun o'quv qo'llanma sifatida tasdiqlangan*

Taqrizchilar:

*R.A. Zoxidov — texnika fanlari doktori, akademik,
A.G. G'ofurov — «Fizika-Quyosh» ICHB katta ilmiy xodimi,
L.N. Taktayeva — texnika fanlari nomzodi, dotsent,
M.M. Alimova — katta o'qituvchi.*

Mazkur o'quv qo'llanmada «Issiqlik texnikasi» fanining «Texnikaviy termodinamika», «Issiqlik massa almashinuvi» bo'limlari bo'yicha nazariy va amaliy asoslari keltirilgan.

Qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishida issiqlik texnikasi fanining xususiyatlarini hisobga olib, termodinamika va issiqlik massa almashinuvi nazariyalari asoslari yoritilgan.

Qo'llanma qishloq va suv xo'jaligi oliy o'quv yurtlarining talabalari uchun mo'ljallangan bo'lib, undan shu sohada faoliyat yuritayotganlar ham foydalanishlari mumkin.

X $\frac{4306020900 - 49}{360(04) - 2008}$ — 2008

ISBN 978-9943-05-224-6

KIRISH

Qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishi oldiga qo'yilgan masalani hayotga muvaffaqiyatli tatbiq etish ko'p hollarda muhandislik muammolarini yechishga bog'liq bo'ladi. Ular orasida eng muhimi energiyadan ratsional foydalanishdir. Energiyaning asosiy turi issiqlik energiyasi bo'lib hisoblanadi. Boshqa turdagi energiyalar issiqlik energiyasining mahsulidir.

Elektr energiyasi, atom energiyasi, geotermal energiya, quyosh energiyasi, yonilg'i energiyasi va nihoyat, jonli va jonsiz tabiat iste'mol qiladigan narsalar (odamlar ovqati ham, shuning uchun kuchli ovqatni yuqori kaloriyali ovqat deyiladi) quyoshning issiqlik energiyasidan olingan mahsullardir.

/ Yonilg'ining yonishi natijasida ishlaydigan har qanday qurilma va mexanizm **issiqlik mashinalari** hisoblanadi. Masalan, teploxod, teplovoz, raketa, samolyot, tank, avtomobil, issiqlik elektrostansiyalari, traktorlar, issiqlik ishlab chiquvchi qozonlar va hokazo.

✓ Ma'lumki, kishilik jamiyati hozirgi kunda issiqlikka bo'lgan ehtiyojining asosiy qismini neft mahsulotlaridan olmoqda. Shu munosabat bilan neftning jahon bozori iqtisodiyoti sharoitida «qora oltin» deb atalganligi bejiz emas.

Mamlakatimiz mustaqil bo'lgan qisqa davr mobaynida neft mustaqilligiga erishuvi doimo muhtaram Prezidentimiz I.A.Karimovning diqqat-e'tiboridadir.

Ma'lumki, neftdan olinadigan yonilg'i (benzin, kerosin va hokazo)larning har bir kilogrammida 40...50 ming kiloJoul issiqlik mavjud bo'ladi. Afsuski, ishlayotgan dvigatellarning eng yaxshisi hisoblangan dizel dvigatellarida ana shu qimmatbaho issiqlikning taxminan 40 % ga yaqini mexanik ishga aylanadi, xolos.

Suv omborlari, elektr energiyasining omborlari (akkumulyatorlar batareyasi), gaz omborlari ishlayapti va qurilmoqda. Biroq Respublikamiz kabi serquyosh o'lkada yoz oylarida issiqlik keragidan ortiqcha bo'lib, isrof bo'lmoqda. Issiqlik texnikasi qonunlari bilan yaqindan tanishib, rivojlantirilsa, ehtimol yozdagi ortiqcha issiqlik miqdorini

saqlab qo'yib, qishda ishlatish, ya'ni issiqlik omborini yaratish muammosini hal qilish mumkin bo'ladi.

Hozirgi zamon qishloq xo'jaligi energetika balansida issiqlik energiyasi asosiy hal qiluvchi ahamiyatga ega. Qishloq va suv xo'jaligida iste'mol qilinayotgan energiyaning 80% ni issiqlik energiyasi tashkil qiladi. Energiyaning eng qulay turi bo'lgan elektr energiyasi, hozircha shu balansning faqat 6—7 % ni tashkil qiladi, xolos.

Issiqlik energiyasining qishloq xo'jaligidagi asosiy iste'molchisi traktorlar va avtomobillarga o'rnatilgan ichki yonuv dvigatellari hisoblanadi. Chunki ichki yonuv dvigatellari issiqlik dvigatellari hisoblanadi.

Issiqlik dvigatellarida yonilg'ining silindrda yonishi hisobiga hosil bo'lgan issiqlik miqdori mexanik ishga aylantiriladi. Shuning uchun issiqlik texnikasi fanining ahamiyati katta.

Bundan tashqari qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishida issiqlik energiyasidan har xil maqsadlarda foydalanilmoqda: xonalarni isitish va ventilatsiya qilish, binodagi havoni konditsirlash, issiqlik xo'jaliklari, sovitish mashinalari, ishlab chiqarish jarayonlarini bug' bilan ta'minlash va hokazolar.

✕ Qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishi jarayonlarida yonilg'i energiya zaxiralarini iqtisod qilish, atrof-muhitni himoyalash muammolari, noan'anaviy va tiklanuvchan energiya manbalaridan keng foydalanishga qo'yilayotgan qat'iy talablardan qishloq va suv xo'jaligi oliy o'quv yurtlarining ta'lim muassasalari ta'lim yo'nalishlari bitiruvchilari roli oshmoqda.

Ko'rsatilgan muammolar yechimi ko'proq energetik masalalar bo'yicha kadrlar tayyorlash darajasiga bog'liq.

O'quv qo'llanmada qishloq va suv xo'jaligining barcha sohalarida energetik qurilmalardan samarali foydalanish hamda turli issiqlik manbalarining ratsional ishlatilishi bo'yicha masalalarni hal qiluvchi kadrlar uchun zarur ma'lumotlar keltirilgan.

BIRINCHI QISM.

TEXNIKAVIY TERMODINAMIKA NAZARIY

ASOSLARI

I BOB. UMUMIY MA'LUMOTLAR VA ASOSIY TUSHUNCHALAR

1.1. Umumiy ma'lumotlar

Issiqlik texnikasi issiqlik mashinalari va qurilmalari yordamida issiqlik hosil qilish, uni boshqa turdagi energiyaga aylantirish, taqsimlash hamda uzatish usullarini nazariy va amaliy jihatdan qamrab olgan umumtexnikaviy fandır.

Issiqlik texnikasi va uning qismi bo'lgan termodinamikaning fan sifatida shakllanishida XVIII—XIX asrlar olimlaridan J. Joul, M.V. Lomonosov, S. Karno, R. Klauzius, V. Kelvin, D. Maksvel, E. Bolsman, D.I. Mendeleyev, E.X. Lens, A.G.Stoletov, K.E. Siolkovskiy kabi olimlarning xizmatlari katta.

Issiqlik energiyasini mexanik energiyaga, mexanik energiyani elektr energiyasiga aylantirish natijasida elektr energiyasini masofaga uzatish, mexanik energiyaga aylantirish masalasi hal etildi. Katta quvvatga ega bo'lgan GES, TES, AES lar kabi elektr markazlarini qurish natijasida ishlab chiqarish mexanizatsiyalashtirildi va avtomatlashtirildi.

Hozirgi vaqtga kelib termodinamika qonuniyatlari asosida yaratilgan asbob-uskunalardan xalq xo'jaligining barcha sohalarida foydalanilmoqda. Misol qilib, issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantirib beruvchi bug' mashinalarini, ichki yonuv dvigatellarini keltirish mumkin.

R. Mayer, J. Joul, E.X. Lens kabi olimlar energiyaning saqlanish qonunining mohiyatini nazariy jihatdan ochib berdilar. Ya'ni, termodinamikaning birinchi qonuni «energiyaning saqlanish va aylanish qonuni»dir. Termodinamikaning ikkinchi qonuni S. Karno, R. Klauzius, V. Tomson, V. Kelvinlar tomonidan fanga kiritildi.

Termodinamikaning rivojlanishida rus olimlarining xizmatlari ham beqiyosdir. E.X. Lens — mexanik energiyani elektr energiyasiga aylanish qonunini, A.G. Stoletov — konvektiv va radiaktiv issiqlik almashinuvi qonuniyatini, K.E. Siolkovskiy — ko'p bosqichli raketa dvigatelida issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylanish qonuniyatini yaratib, fanga katta hissa qo'shdilar.

Hozirgi kunda olim va mutaxassislarining oldida quyosh energiyasidan to'la foydalanish, insoniyatni energetik taqchillikdan butunlay ozod etish muammolari turibdi. Ma'lumki, quyosh energiyasi ta'sirida hosil bo'lgan torf, toshko'mir, neft, turli gazlarni quyosh energiyasining yerdagi akkumulyatorlari deb atash mumkin. Chunki yerning 1 m^2 yuzasiga tushadigan quyosh nurining energiyasi taxminan 1 kW ga teng. Biroq quyosh energiyasini elektr energiyasiga to'la aylantirish uchun hozirgi asbob-uskunalarining foydali ish koefitsientlari yetarli emas.

Termodinamika fani, asosan, ikki qonunga tayangan holda ish tutadi. **Birinchi qonun**, energiyaning aylanish va saqlanish qonuni, energiya yo'q bo'lmaydi, yo'qdan bor bo'lmaydi. **Ikkinchi qonun**, ish sarflamay issiqlikni harorati past jismdan harorati yuqori jismga o'tkazib bo'lmaydi (Klauzius ta'rifi).

Issiqlik texnikasidan barcha sohalar kabi qishloq va suv xo'jaligi sohalarida ham keng foydalaniladi. Yuqorida ta'kidlaganimizdek, qishloq va suv xo'jaligi energetika balansining 80% ni issiqlik energiyasi tashkil etadi. Energiyaning eng qulay, ekologik toza bo'lgan elektr energiyasi ushbu balansning $6-7\%$ ni tashkil etadi, xolos.

1.2. Asosiy tushunchalar. Termodinamika tizimi

Termodinamika fanida ham qator kattaliklar va tushunchalardan foydalaniladi. Quyida termodinamikaga oid asosiy tushunchalar bilan tanishamiz.

Ishchi jism — issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylanish jarayonidagi oraliq jismdir, ya'ni issiqlik energiyasi ishchi jismga beriladi va u kengayib mexanik ish bajaradi. Taxminiy sxemasi: issiqlik — ishchi jism — mexanik ish.

Issiqlik mashinalarida ishchi jism sifatida gazlar, gaz bug'larining aralashmalari yoki suv bug'i ishlatiladi, chunki ishchi jismlar kengayish va siqilish xususiyatlariga ega bo'lishi kerak. Masalan, ichki yonuv dvigatellarida havo ishchi jism bo'lib, yonilg'i yonishidan hosil bo'lgan issiqlik energiyasini qabul qiladi va kengayish jarayonida porshenni turtib mexanik ish bajaradi.

Gazlar va suv bug'lari o'rtasida aytarlik farq yo'q. Gazlarni ma'lum bir suyuqlikning bug'i (to'yinish holatidan uzoq bo'lgan) sifatida qarash mumkin. Issiqlik texnikasi jarayonlarida ishlatilayotgan gazlar, asosan, o'zining agregat holatini o'zgartirmaydigan, ya'ni suyuq holatiga yoki bug' holatiga o'zgarmaydigan turg'un ishchi

jism hisoblanadi. Ma'lumki, bug' gaz va suyuqlik orasidagi oraliq element hisoblanadi.

To'yingan bug'lar gazlardan o'zining agregat holatining o'zgaruvchanligi bilan farq qiladi, ya'ni to'yingan bug'lar ko'rsatkichlarining ozgina o'zgarishi bilan bug' holatidan suyuqlikka yoki aksincha o'zgarishi mumkin.

Qizdirilgan bug'lar o'zining agregat holatining turg'unligi bilan gazlarga yaqinlashadi. Qizdirilganlik darajasi qancha yuqori bo'lsa, qizdirilgan bug' shuncha gazlarga yaqinlashadi va gaz qonunlariga bo'ysunadi.

Ish — miqdoriy jihatdan atrof-muhitning jismga bo'lgan ta'siri bilan o'lchanadi. Mexanikada ish deganda, kuch qo'yilgan jismning vaziyatini o'zgarishi tushuniladi. Termodinamikada esa ish deganda, qo'yilgan kuch ta'sirida jismni faqatgina vaziyatigina emas, shaklining o'zgarishi ham tushuniladi. Masalan, ichki yonuv dvigatellarida suvni yuqori bosim bilan haydab beruvchi nasosning ish bajarishi hisobiga yondirilgan yonilg'ining kimyoviy energiyasining ma'lum qismi suvning potensial energiyasiga aylanadi.

Xulosa qilib aytganda, ish energiyaning makrofizik shakli bo'lib, unda kuch qo'yilgan nuqtaning harakatini bevosita ko'z bilan kuzatish mumkin. Ish bajarilishi uchun kamida ikkita jism, kuch beruvchi, ya'ni ish bajaruvchi va kuch qo'yilgan jism bo'lishi zarur.

Issiqlik — energiyaning berilish usuli bo'lib, mikrofizik jarayonlarning majmuasi hisoblanadi. Energiya atrof-muhitdan jismga faqat ish bajarish yo'li bilangina uzatib qolmay, issiqlik ko'rinishida ham berilishi mumkin. Masalan, molekulalarning o'zaro to'qnashuvdagi energiya almashinishi, kvant nurlanishi, har xil to'lqindagi nurlar va hokazolar shunday mikrofizik hodisalar bo'lib, ularni ko'z bilan ko'rib bo'lmaydi. Issiqlik berilishida ham ikkita — energiya beruvchi va energiya oluvchi jismlar bo'lishi zarur.

Ish (ish jarayoni) va issiqlik — energiya uzatilishining ikki xil shakli bo'lib, bir jismdan ikkinchi jismga berilayotgan energiya bajarilgan ishning yoki uzatilayotgan issiqlikning miqdorini belgilaydi.

Energiya — zaxiradagi imkoniyat, ya'ni hali bajarilmagan ishdur. Issiqlik harakatini o'rganishda jism tomonidan berilishi mumkin bo'lgan ish va issiqlikning yig'indisi bilan o'lchanadigan ichki energiya ko'zda tutiladi.

Issiqlik texnikasida ishlatiladigan energiya, ish va issiqlik tushunchalarining o'lchov birliklari SI sistemasida bir xil, ya'ni Joul (kilo-Joul), lekin bundan uchalasi ham bir xil kattalik, degan xulosa kelib chiqmaydi.

Termodinamika tizimi moddiy jismlar majmuasi bo'lib, ular o'zaro va tizimni o'rab turuvchi tashqi jismlar (bu o'rab turuvchi muhitdan iborat) bilan issiqlik va mexanik ta'sirda bo'ladi, ya'ni termodinamika tizimi deb bir-biri bilan termodinamika muvozanatida bo'lgan makroskopik tizimlar qabul qilingan.

Tashqi muhit bilan energiya va modda almashinmaydigan tizim **izolyatsiyalangan (yopiq)** tizim deyiladi. Agar tizim tashqi muhit bilan issiqlik almashinmasa, u **issiqlik izolyatsiyalangan** yoki **adiabatik tizim** deyiladi. Ochiq tizimda tizim va muhit orasida massa almashinish sodir bo'ladi (o'zaro massa almashinuv).

Termodinamika tizimi ishchi jism (gazlar, havo, bug'lar) va issiqlik manbalarini o'z ichiga oladi.

Tarkibidagi gazlar molekullari orasidagi o'zaro ta'sir kuchlari va ularning egallagan hajmlari hisobga olinmaydigan, ya'ni o'zaro ta'sir qilmaydigan xossalriga ega no'qtalardan iborat tizim **ideal tizim** deyiladi, va aksincha bo'lsa, **real tizimlar** deyiladi.

Termodinamika tizimida sodir bo'ladigan va uning holat parametrlaridan hech bo'lmaganda bittasi o'zgarishi bilan bog'liq bo'lgan har qanday o'zgarish **termodinamika jarayoni** deyiladi. Tashqi muhit bilan termodinamika tizimining o'zaro ta'sirlashuvi natijasida o'rganilayotgan tizimning holat parametrlari o'zgaradi. Tizimning holat parametrlarini ifodalashda **holat parametrlari** deb ataladigan fizik kattaliklar qabul qilingan.

1.3. Termodinamikaning holat parametrlari

Bizga ma'lumki, tabiatda mavjud bo'lgan moddalarning barchasi uchta asosiy holatning birida, ya'ni gaz, suyuqlik va qattiq jism ko'rinishida bo'lishi mumkin. Tekshirilayotgan o'zgarmas sharoitda bir modda doim bir xil ko'rinishda bo'ladi. Masalan, suv atmosfera bosimida va 200°C haroratda doim bir xil bug' holatida bo'ladi.

Modda tekshirilayotgandagi aniq fizikaviy sharoitlarni, binobarin, tekshirilayotgan modda holatini aniqlash uchun holat parametrlari deb yuritiladigan qulay tushunchalar kiritiladi.

Moddaning xossasi **intensiv** va **ekstensiv** bo'lishi mumkin. Tizimdagi modda miqdoriga bog'liq bo'lmagan xossalar **intensiv xossalar** deb yuritiladi (bosim, harorat va boshqalar). Modda miqdoriga bog'liq bo'lgan xossalar **ekstensiv xossalar** deb ataladi. Berilgan sharoitda modda miqdoriga proporsional ravishda o'zgaradigan hajm ekstensiv xossalarga misol bo'la oladi; 10 kg

moddaning hajmi 1 kg shu turdagi moddaning hajmiga qaraganda 10 marta katta bo'ladi. 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. Jism yoki jismlar guruhining — termodinamika tizimlarining holatini belgilovchi intensiv xossalar jism (yoki termodinamika tizimi) holatining **termodinamika holat parametrlari** deyiladi.

Holat parametrlaridan eng qulayi jismning absolyut harorati, absolyut bosimi va solishtirma hajmi yoki zichligi hisoblanadi.

Agar gazning zichligi (yoki solishtirma hajmi), bosimi va harorati ma'lum bo'lsa, uning holati aniqlangan bo'ladi. Zichlik hajm birligidagi massa bo'lib, ρ harfi bilan belgilanadi. Unga teskari bo'lgan kattalik solishtirma hajm — massa birligidagi hajm ϑ hisoblanadi. Ular o'zaro quyidagicha bog'lanadi:

$$\rho = \frac{1}{\vartheta}; \quad \vartheta = \frac{1}{\rho}. \quad (1.1)$$

Agar gazning massasi G (kg) va hajmi V (m³) ma'lum bo'lsa, zichlikni va solishtirma hajmni topish mumkin, ya'ni:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m}{V}; & m &= \rho \cdot V. \\ \vartheta &= \frac{V}{m}; & V &= \vartheta \cdot m. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Demak, zichlik va solishtirma hajmlarning birliklari quyidagicha bo'ladi:

$$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad \vartheta \text{ (m}^3\text{/kg)}. \quad (1.3)$$

Bosim — gazlarning molekulyar kinetik nazariyasiga ko'ra molekullarning idish devorlariga urilishining natijasi bo'lib, yuza birligiga ta'sir qilayotgan kuch bilan o'lchanadi.

SI sistemasida bosim birligi N/m² yoki Pa (Paskal) larda o'lchanadi. 1 Pa gazning 1m² yuzaga 1 N kuch bilan ko'rsatayotgan bosimiga teng, ya'ni 1 Pa = 1 N/m². Bu juda kichik bosim birligi bo'lganligi uchun amalda ko'pincha kPa (kiloPaskal), mPa (megoPaskal) yoki gPa (gigoPaskal) birliklari qo'llaniladi. Bundan tashqari bosimni o'lchashda atmosfera (1 at = 1 N/m²) va bar (1 bar = 10⁵ N/m²) hamda suyuqlik (xususan, suv va simob) ustunlaridan foydalaniladi.

Bosimning turli birliklari orasidagi bog'lanish quyidagicha:

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 1,01972 \text{ kg/sm}^2 = 750,06 \text{ mm.sim.ust.} = 10197 \text{ mm.suv ust.}; 1 \text{ kg/sm}^2 = 735,6 \text{ mm.sim.ust.} = 1000 \text{ mm.suv ust.} = 98066,5 \text{ N/m}^2; 1 \text{ gPa} = 1000 \text{ mPa}, 1 \text{ mPa} = 1000 \text{ kPa}, 1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}.$

Fizik normal sharoit deb, $t = 0^\circ\text{C}$ va $p = 760 \text{ mm.sim.ust.} = 101325 \text{ N/m}^2$ bo'lgan sharoit qabul qilingan.

Texnikada bosimni o'lchash uchun manometrlar va vakuummetrlardan foydalaniladi. Agar idishdagi gazning absolyut bosimi p_a tashqi muhit bosimi p_{bar} dan yuqori bo'lsa, ortiqcha yoki manometrik bosim p_{man} manometr yordamida o'lchanadi. Idishdagi gazning bosimi p_a tashqi muhit bosimi p_{bar} dan past bo'lsa, kam yoki vakuum bosim p_{vak} vakuummetr yordamida o'lchanadi.

Shunday qilib, absolyut (mutlaq) bosim asosan quyidagi munosabatda aniqlanadi:

$$p_a > p_{bar}; \quad p_a = p_{bar} + p_{man}. \quad (1.4)$$

$$p_a < p_{bar}; \quad p_a = p_{bar} - p_{vak}. \quad (1.5)$$

p_{man} va p_{vak} bosimlar quyidagi tengliklar orqali aniqlanadi:

$$p_{man} = p_{abs} - p_{bar} = g\rho h. \quad (1.6)$$

$$p_{vak} = p_{bar} - p_{abs} = g\rho h. \quad (1.7)$$

Bunda: g — erkin tushish tezlanishi; ρ — suyuqlik zichligi; h — asboddagi suyuqlik sathining farqi.

Harorat — jismning qizitilganlik darajasini ifodalaydi va turli harorat shkalalarida o'lchanadi. Hozirgi vaqtda, asosan, uchta harorat shkalalaridan foydalanilmoqda.

- absolyut yoki termodinamika harorati (Kelvin) shkalasi -K;
- yuz gradusli yoki Selsiy shkalasi — $^\circ\text{C}$;
- Farengeyt shkalasi — $^\circ\text{F}$.

Issiqlik texnikasi hisob-kitoblarida asosan Kelvin graduslari qo'llaniladi. 1848- yilda ingliz olimi Kelvin taklif etgan ushbu harorat shkalasining noli sifatida ideal gaz molekularining tartibsiz harakati to'xtaydigan harorat qabul qilingan, bu harorat absolyut (mutlaq) nol deyiladi va Selsiy haroratlari shkalasining $-273,15^\circ\text{C}$ ga to'g'ri keladi.

Ma'lumki, Selsiy shkalasining noli sifatida suvning muzlash harorati qabul qilingan. Selsiy shkalasining bo'lingan oraliqlari (graduslari) Kelvin shkalasiga to'g'ri keladi ($1\text{K} = 1^\circ\text{C}$). Bu ikki shkalalarda o'lchangan haroratlari o'zaro quyidagicha bog'langan: $T = t + 273,15 \text{ K}$.

Farengeyt shkalasi bo'yicha muzning erish harorati va suvning qaynash harorati fizik normal sharoitda 32 va 212 °F ga teng. Farengeyt shkalasi va Selsiy shkalasi o'zaro quyidagi tenglik orqali bog'langan: $T = 1,8 t + 32$ °F.

1.4. Ideal va real gazlarning asosiy qonunlari

Ideal va real gazlar. Gazlar kinetik nazariyasining asosiy tenglamasi. Ideal gaz deb, shunday faraziy gazga aytiladiki, uning molekullari nuqtaviy hisoblanib, ular (molekullalar) orasidagi o'zaro tortish kuchi nolga teng va zarralar egallagan hajm moddiy nuqtaga teng bo'ladi.

Bunday gazlarning o'zgarishi to'raligicha Boyl-Mariot va Gey-Lyussak qonunlariga bo'ysunadi. Ma'lumki, tabiatda bunday gazlar uchramaydi. Tabiatdagi gazlar (shu jumladan, bug'lar ham) hammasi real, mavjud gazlardir. Real gazlarda molekullalar ma'lum hajmga ega va ular o'zaro tortish kuchi bilan bog'langandir.

Biz quyida ideal gazlarning asosiy qonunlari bilan tanishib chiqamiz. Bunda shuni unutmaslik kerakki, ideal gaz qonunlarini real gaz bilan bog'liq bo'lgan texnik masalalarda qo'llanilsa, natija yuqori fizik aniqlikda bo'lmas-da, yetarli darajada texnik aniqlikda bo'ladi. Shunga qaramay ideal gaz qonunlarini o'rganishimiz va qo'llashimizning asosiy sababi, qonunlarning ifodalari hamda formulalarining juda soddaligidir.

XIX asr o'rtalarida M.V.Lomonosov tomonidan asos solingan gazlarning molekulyar kinetik nazariyasiga asosan, idishdagi ideal gaz molekullari ma'lum hajmda teng tarqalgan va ular uzluksiz issiqlik harakatida bo'ladi. Molekullalar o'zaro to'qnashadi hamda joylashgan idish devorlariga uriladi. Molekulalarning idish devoriga urilishi natijasida gaz turgan idishning har bir tomoniga normal (tik) va miqdor jihatdan bir xil bo'lgan bosim ta'sir qiladi.

Yuqorida aytilgan nazariyaga ko'ra fizika kursida gazlar kinetik nazariyasining quyidagi asosiy tenglamasi keltirilib chiqariladi:

$$p = \frac{n \cdot m \cdot \omega^2}{3}. \quad (1.8)$$

Bunda p — ideal gazning idish devoriga bo'lgan absolyut (mutlaq) bosimi;

n — hajm birligidagi molekullalar soni, ya'ni $n = \frac{N}{V}$;

V — ma'lum massadagi gazning hajmi;

N — shu hajmdagi molekulalar soni;

m — 1 ta molekulaning massasi (bir xil tarkibdagi gazlar uchun molekulalar massalari teng);

ω — molekula ilgarilanma harakatining o'rtacha kvadratik tezligi. o'rtacha kvadratik tezlik, gazni tashkil qiluvchi alohida molekulalar-ning ($\omega_1, \omega_2, \dots \omega_n$) tezliklari orqali quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\omega = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_n^2}{n}}. \quad (1.9)$$

(1.8) tenglikning surat va maxrajini 2 ga ko'paytirib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m\omega^2}{2}. \quad (1.10)$$

Fizika kursidan ma'lumki, (1.10) tenglikdagi $\frac{m\omega^2}{2}$ ifoda 1 ta molekulaning o'rtacha kinetik energiyasini ifodalaydi.

Ideal gazlar kinetik nazariyasiga ko'ra molekulalarning kinetik energiyasi bilan gaz harorati orasida ma'lum bog'lanish mavjud, ya'ni:

$$\frac{m\omega^2}{2} = B \cdot T. \quad (1.11)$$

Bunda: B — proporsionallik koeffitsiyenti bo'lib, son jihatidan gazning harorati bir darajaga o'zgargandagi molekulaning kinetik energiyasini o'zgarishiga teng.

Agar (1.10) tenglikdagi ifodalarning mos qiymatlarini keltirib qo'ysak, quyidagi ifodalar kelib chiqadi:

$$p = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \cdot B \cdot T; \quad pV = \frac{2}{3} NBT. \quad (1.12)$$

(1.12) tengliklar gazlar molekulyar kinetik nazariyasining termodinamikadagi ifodasi bo'ladi.

Boyl-Mariott qonuni. Agar gazlar molekulyar kinetik nazariyasining issiqlik dinamikasidagi ifodasi (1.12) da berilgan gaz massasi uchun $N = \text{sonst}$ va $\beta = \text{const}$ desak, haroratning o'zgarmagan holati ($T = \text{sonst}$) uchun quyidagiga ega bo'lamiz. Istalgan miqdordagi gaz $m(\text{kg})$ uchun:

$$pV = \text{const}. \quad (1.13)$$

1 kg gaz uchun esa:

$$p\vartheta = \text{const.} \quad (1.14)$$

(1.13) va (1.14) tenglamalar **Boyl-Mariott qonunini** ifodalaydi, ya'ni, **ma'lum miqdor massaga ega bo'lgan bir xil gazning hajmini bosimiga ko'paytmasi ularning holatidan qat'iy nazar, bir xil haroratda o'zgarmasdir.** Bundan quyidagi kelib chiqadi, ya'ni:

$$p_1\vartheta_1 = p_2\vartheta_2; \quad \frac{p_2}{p_1} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}. \quad (1.15)$$

Agar gazning zichligi o'zining solishtirma hajmiga teskari proporsional ekanligini hisobga olsak: $\rho_1 = \frac{1}{\vartheta_1}$; $\rho_2 = \frac{1}{\vartheta_2}$.

U holda:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{p_2}{p_1}. \quad (1.16)$$

(1.15) va (1.16) tenglamalar ideal gazlar uchun juda muhim bo'lib, quyida ulardan foydalaniladi.

Gey-Lyussak qonuni. Gey-Lyussak qonunida gaz holatining o'zgarishi o'zgarmas bosim sharoitida ko'rib chiqiladi. Buning uchun (1.12) tenglikni quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\frac{V}{T} = \frac{2}{3} \cdot \frac{N \cdot B}{p}. \quad (1.17)$$

$p = \text{const}$ sharoit uchun (bunda $N = \text{const}$ va $B = \text{const}$)
 $\frac{V}{T} = \text{const}.$

Gazning dastlabki va keyingi holatlari uchun yozamiz, ya'ni;

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (1.18)$$

$$1 \text{ kg gaz uchun esa:} \quad \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (1.19)$$

chunki: $V_1 = \vartheta_1 m$; $V_2 = \vartheta_2 m$.

(1.18) va (1.19) tengliklar **Gey-Lyussak qonunini** ifodalaydi. Ya'ni, **o'zgarmas bosimda bir xil massadagi bir gazning hajmlari harorat-lariga to'g'ri proporsional.**

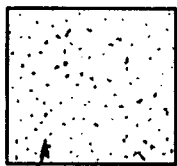
Agar gazning zichligi va solishtirma hajmlarning o'zaro teskari proporsional $\left(\rho_1 = \frac{1}{V_1} \text{ va } \rho_2 = \frac{1}{V_2} \right)$ ekanligini hisobga olsak:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2}{T_1}.$$

O'zgaras bosim, lekin haroratlari turlicha bo'lgan gazlar zichliklarining nisbati ularning absolyut (mutlaq) haroratlariga teskari proporsional bo'ladi.

1.5. Ideal gazning issiqlik holati tenglamasi

Agar 1.1- rasmda ko'rsatilgan idishga ideal gaz to'ldirilgan deb faraz qilib uni qizdirsak, ya'ni gazga issiqlik miqdori bersak, gazning holati o'zgaradi. Idishdagi ideal gaz uchun (1.12) tenglikning dastlabki (isitilmagan) va isitilgandan keyingi holatlari uchun quyidagini yozamiz:



Q

1.1- rasm.

$$p_1 V_1 = \frac{2}{3} N B T_1; \quad p_2 V_2 = \frac{2}{3} N B T_2 \quad (1.20)$$

Bunda: p_1, V_1, T_1 — gazning dastlabki holatidagi ko'rsatkichlari;

p_2, V_2, T_2 — gazning isitilgandan keyingi ko'rsatkichlari.

Yuqoridagi ikkala tenglikning bir-biriga mos ravishda nisbatini olib, quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1.21)$$

Tenglik tomonlarining ko'rsatkichlari o'rnini almashtirib, ifodani ixtiyoriy miqdordagi ideal gaz uchun ham yozish mumkin. Masalan, 1kg gaz uchun mos ravishda yozish mumkin:

$$\frac{p g}{T} = \text{const}. \quad (1.22)$$

(1.22) tenglikdan ko'rinib turibdiki, $\frac{p g}{T}$ ifoda gaz uchun o'zgaras miqdor ekan. Bu o'zgaras miqdor gaz doimiysi deb yuritiladi va R bilan ifodalanadi, ya'ni:

$$\frac{p\vartheta}{T} = R; \quad p\vartheta = RT. \quad (1.23)$$

Oxirgi (1.23) tenglik **ideal gazning issiqlik holatining termik tenglamasi** yoki soddaroq holatda, **1kg ideal gaz uchun holat tenglamasi** deyiladi. Bu tenglama 1 kg har qanday holatdagi ideal gaz uchun harorat, bosim va hajm orasidagi bog'lanishni ifodalaydi. Ba'zi holatlarda (1.23) tenglikni **Klapeyron tenglamasi** deb ham yuritiladi.

Gaz doimiysi R gazni tavsiflovchi kattalik bo'lib, u faqat gazning kimyoviy tarkibiga bog'liqdir.

Agar (1.23) tenglikdagi ϑ ning o'rniga $\vartheta = \frac{V}{m}$ qiymatini qo'ysak, ixtiyoriy (**G kg**) miqdoridagi ideal gaz uchun gaz holati tenglamasini olamiz, ya'ni:

$$\begin{aligned} p \frac{V}{m} &= RT; \\ pV &= mRT. \end{aligned} \quad (1.24)$$

(1.15) va (1.16) tengliklardagi kattaliklar quyidagi o'lchov birliklarida o'lchanadi, p (N/m²), T (K), V (m³) va m (kg). U holda:

$$R = \frac{p\vartheta}{T} = \left[\frac{N / m^2 \cdot \frac{m^3}{kg}}{K} \right]; \quad R = \left[\frac{N \cdot m}{kg \cdot K} \right]; \quad R = \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right].$$

Gaz doimiysining fizik ma'nosi — 1 kg gazni 1 darajaga isitilganda uning kengayishidagi bajargan ishidir.

Bir kilomol gaz uchun holat tenglamasi. Avagadro qonuniga ko'ra bir xil bosim va haroratda, teng idishlarda joylashgan har qanday ideal gazlar bir xil miqdordagi molekularlar soniga ega, ya'ni $p_1 = p_2$; $V_1 = V_2$; $T_1 = T_2$ bo'lsa, $N_1 = N_2$ bo'ladi.

Avagadro qonunidan quyidagi xulosa kelib chiqadi, bir xil bosim va haroratda ikki xil gazning zichliklari (ρ) va molekulyar massalari (μ) bir-biri bilan to'g'ri proporsionallikda bog'lanadi, ya'ni:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}.$$

Ma'lumki, $\rho = \frac{1}{g}$ bo'lganligi uchun:

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (1.25)$$

Ya'ni, bir xil bosim va haroratdagi ikki xil gaz uchun solishtirma hajmlarning nisbati, ular molekulyar massalarining nisbatiga teskari proporsionaldir. (1.25) tenglikdan quyidagini yozish mumkin:

$$\mu_1 \vartheta_1 = \mu_2 \vartheta_2 = \dots = \mu_n \vartheta_n = \text{const}.$$

Bunda: ϑ — 1 kg gazning egallagan hajmi; μ — shu gazning molekulyar massasi;

$\mu \vartheta$ — gazning molekulyar massasiga teng bo'lgan kilogramm (ya'ni, μ kg) gazning egallagan hajmi.

Shunday qilib, kilogramm-molekula yoki **kilomol deb kilogrammlar soni gazning molekulyar massasiga teng bo'lgan gaz miqdoriga aytiladi**. Masalan, 1 kmol kislorod = 32 kg; 1 kmol azot = 28 kg; 1 kmol metan = 16 kg.

Bir xil haroratda va bosimda har qanday ideal gaz teng (bir xil) hajmni egallaydi. Bu hajmni Ω bilan belgilaymiz. U holda:

$$\mu \cdot V = \Omega, \text{ m}^3/\text{kmol}. \quad (1.26)$$

Fizik me'yoriy (normal) sharoit ($\rho = 760$ mm sim. ust. va $T = 273$ K) uchun $\Omega = 22,4$ m³/kmol.

Bir xil sharoitda turgan 1 kilomol har qanday gazning egallagan hajmlari teng ekanligidan foydalanib, gazning me'yoriy sharoitdagi solishtirma hajmini yoki uning zichligini aniqlab olish mumkin:

$$\vartheta = \frac{\Omega_M}{\mu} = \frac{22,4}{\mu}, \text{ m}^3/\text{kg}, \quad (1.27)$$

$$\rho = \frac{\mu}{\Omega_M} = \frac{\mu}{22,4}, \text{ kg/m}^3. \quad (1.28)$$

Kilomol tushunchasi bilan tanishganimizdan so'ng shu gaz miqdori uchun holat tenglamasini yozamiz. Buning uchun (1.24) tenglikka qaytamiz, ya'ni $pV = mRT$. Agar bunda biz $m = \mu$, ya'ni gazni m , kg emas, μ kg deb olsak, hamda bosim va haroratni me'yoriy sharoitda desak, gaz holati tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$p\Omega_m = \mu RT. \quad (1.29)$$

Tenglikni o'zgartirib yozamiz, ya'ni:

$$\mu R = \frac{P\Omega_m}{T}. \quad (1.30)$$

(1.30) tenglikdagi ko'paytma $\mu R = R_u$ bilan belgilanadi va u **universal gaz doimiysi** deb yuritiladi, R_u ning son qiymatini me'yoriy sharoit uchun aniqlaymiz, ya'ni $p = 10,330 \cdot 9,81 \text{ N/m}^2$, $\Omega = 22,4 \text{ m/kmol}$, $T = 273 \text{ K}$.

$$\mu R = R_u = \frac{p\Omega}{T} = \frac{10330 \cdot 9,81 \cdot 22,4}{273} = 8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}. \quad (1.31)$$

Shunday qilib, Avagadro qonunidan kelib chiqadigan xulosa shuki, **har qanday ideal gazning 1 kilomolini egallagan hajmlarigina teng bo'lib qolmay, balki ularning universal gaz doimiylari ham tengdir.**

Universal gaz doimiysining son qiymatini (1.29) tenglikka keltirib qo'yib, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$p\Omega = 8314 \cdot T.$$

Olingan tenglik, **1 kmol gaz uchun holat tenglamasi** deyiladi. Bu tenglama birinchi marta D.I.Mendeleyev tomonidan taklif qilinganligi uchun uning nomi bilan yuritiladi, ya'ni **Mendeleyev tenglamasi** deyiladi.

Universal gaz doimiysining amaliy ahamiyati yana shundan iboratki, agar ixtiyoriy gazning molekulyar massasi ma'lum bo'lsa, uning gaz doimiysini aniqlash mumkin:

$$R = \frac{R_v}{\mu} = \frac{8314}{\mu} \text{ J/kg} \cdot \text{K}. \quad (1.32)$$

Eslatma. Texnikada ishlatiladigan ba'zi bir gazlarning molekulyar massalari, gaz doimiysi va boshqa xarakteristikalari ushbu o'quv qo'llanmaga ilova qilingan (1- jadval).

Real gaz holatining tenglamalari. Ideal va real gazlar orasidagi tafovut yuqorida aytib o'tilgan edi. Shu tafovutlar sababli Klapeyron tenglamasini real gazlarga qo'llanilganda ancha noaniqlik kelib chiqadi.

Ba'zi gazlar oddiy atmosfera sharoitidayoq ideal gaz tenglamasidan 2—3 % ga farq qilishi mumkin. Yuqori bosim va past haroratlarda real gaz bilan ideal gaz orasidagi tafovut sezilarli darajada ortib boradi. Jahon olimlari tomonidan real gaz holatini xarakterlovchi juda ko'p (150 dan ortiq) tenglamalar taklif qilingan. Lekin tenglamalar u yoki bu sabablarga ko'ra yetarli aniqlik va umumiylikka ega emas edi.

Real gaz holatini yaxshiroq (nisbatan) xarakterlovchi tenglama 1873- yilda golland fizigi Yan Diderik Van-der Vaals tomonidan taklif qilingan bo'lib, u quyidagi ko'rinishga ega:

$$\left(p + \frac{a}{g^2}\right)(g - b) = RT. \quad (1.33)$$

Van-der-Vaals tenglamasi ideal gaz tenglamasi ($pV = RT$) dan ikkita tuzatmasi bilan farq qiladi:

1) $\frac{a}{g^2}$ — ichki yoki molekulyar bosim, ya'ni molekulalarning o'zaro tortish kuchi hisobiga olinadigan bosim;

2) b — o'zgarish bo'lmaydigan hajm — ya'ni molekulalarning egallagan hajmlari hisobga olinadi.

Bunda « a » va « b » koeffitsiyentlarini Van-der-Vaals faqat gazning turiga bog'liq (ko'rsatkichlariga bog'liq emas) deb tushuntiradi.

Keyingi paytlarda yuqori bosim bilan ishlovchi issiqlik mashinalarining tez rivojlanishi sababli Van-der-Vaals tenglamasi yetarli aniqlik bermay qoldi. Shuning uchun rus olimlari M.P.Vukalovich va I.I.Novikovlar yuqoridagi tenglamani yanada rivojlantirib va aniqlik kiritib, o'zlarining quyidagi tenglamalarini taklif qildilar (1946- y.):

$$\left(p + \frac{a}{g^2}\right)(g - b) = RT \left[1 - \frac{A_1 \cdot T}{g - b} - \frac{A_2 \cdot T}{(g - b)^2}\right]. \quad (1.34)$$

Bunda: $A_1(T)$ va $A_2(T)$ — haroratlarning ma'lum funksiyalari; « a » va « b » — tuzatmalar, Van-der-Vaals tenglamasidagi ma'noga ega.

Bu tenglamada molekulalar orasidagi o'zaro tortish kuchi va molekulalar egallagan hajm tuzatmalari hisobga olinishi bilan birga molekulalarning birlashmalari ham hisobga olingan.

V. P. Vukalovich va I. I. Novikovlarning fikricha, real gazlarda yuqori bosim ostida odatdagi yakka molekulalar bilan bir qatorda ikkilangan (va hatto uchlangan) molekulalar majmuasi ham uchraydi.

1.6. Ideal gaz aralashmalari

Gaz aralashmalarining xossalari. Amaliyotda, masalan, ichki yonuv dvigatellarini, qozon qurilmalarini va hokazolarni hisoblashlarda hamda ko'p texnologik jarayonlarda ishchi jism sifatida

sof holdagi bir atomli gazlar emas, gaz aralashmalari qo'llaniladi.

Ko'p hollarda ishchi jism sifatida bir-biri bilan o'zaro reaksiyaga kirishmaydigan gaz aralashmalari ishlatiladi. Issiqlik texnikasida bular, asosan, atmosfera havosi, tabiiy gazlardir.

Boyl — Mariott va Gey-Lyussak qonunlarini gaz aralashmalariga ham tatbiq etish mumkin. Shuning uchun gaz aralashmalari uchun holat tenglamasini quyidagicha yozish mumkin, $pV_{ar} = m_{ar} R_{ar} T$.

Bunda: p — aralashmaning umumiy bosimi;

V_{ar} — aralashmaning hajmi;

R_{ar} — aralashmaning gaz doimiysi;

G_{ar} — aralashmaning massasi.

Gaz aralashmalarining asosiy xususiyatlarini Dalton qonuni yaxshi ifodalaydi. **Bu qonunga muvofiq, aralashmadagi har bir gaz idishda boshqa gazlar yo'q holdagidek tutadi va o'zining bosim ulushini (parsial bosimini) bosil qiladi.**

Shunday qilib, aralashma tarkibidagi har bir gaz uchun uning parsial bosimiga bog'liq holda holat tenglamasini yozish mumkin:

$$p_i V_{ar} = m_i R_i T. \quad (1.35)$$

Bunda: V_{ar} — aralashmaning egallagan hajmi;

p_i — alohida olingan gazning parsial bosimi;

m_i va R_i — mos holda alohida olingan gazning massasi va gaz doimiysi.

Dalton qonuniga binoan aralashmaning bosimi (p) alohida olingan gazlarning parsial bosimlarining yig'indisiga teng bo'ladi:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_1^n p_i. \quad (1.36)$$

Bunda: $p_1, p_2, \dots, p_n$ — alohida olingan gazlarning parsial bosimlari.

Gaz aralashmasining tarkibi. Gaz aralashmasining tarkibi, asosan, 2 xil usul bilan berilishi mumkin, ya'ni aralashmaning massa ulushi (hissasi) va aralashmaning hajm ulushi (hissasi).

a) alohida olingan (bir) gaz massasini aralashmaning umumiy massasiga nisbati aralashmadagi gazning massa ulushi (hissasi) deyiladi va « g » bilan belgilanadi:

$$g_i = \frac{m_i}{m_{ar}}.$$

Bunda: m_{ar} — aralashmaning umumiy massasi.

$$m_{ar} = m_1 + m_2 + \dots + m_n. \quad (1.37)$$

Massa bo'laklarining yig'indisi 1 ga teng:

$$g_1 + g_2 + \dots + g_n = \sum_{i=1}^n g_i = 1;$$

b) alohida olingan gazning keltirilgan hajmini aralashma egallagan umumiy hajmiga nisbati aralashmadagi gazning hajm bo'yicha ulushi (hissasi) deyiladi va « r » harfi bilan belgilanadi:

$$r_i = \frac{V_i}{V_{ar}}.$$

Bunda: V_{ar} — aralashmaning egallagan hajmi quyidagi formula bilan ifodalanadi:

$$V_{ar} = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i. \quad (1.38)$$

Hajm bo'laklarining yig'indisi ham 1 ga teng:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i. \text{ Ba'zi hollarda, gaz aralashmasining tarkibi}$$

kilomollar soni orqali ham berilishi mumkin. Bu usul ham r_i — keltirilgan hajm aralashma tarkibidagi alohida olingan gazning (aralashma haroratida va bosimida) egallagan hajm ulushlari orqali ifodalash usulidan deyarli farq qilmaydi.

Agar aralashma tarkibidagi gazlarning zichligi (ρ_i) yoki molekulyar massalari berilgan bo'lsa, hajm ulushlarida (r_i) berilgan aralashma tarkibini massa ulushlarida (g_i) ifodalash mumkin, ya'ni:

$$g_i = \frac{r_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n r_i \rho_i}; \quad r_i = \frac{r_i \cdot \rho_i}{\sum_{i=1}^n r_i \rho_i}. \quad (1.39)$$

Aksincha, gaz aralashmasining tarkibi massa ulushlari bo'yicha berilgan bo'lib, hajm ulushlariga o'tish lozim bo'lsa, u holda quyidagi ifodadan foydalanish mumkin:

$$r_i = \frac{\frac{g_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}; \quad r_i = \frac{\frac{g_i}{\rho_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}}. \quad (1.40)$$

Aralashmaning o'rtacha molekulyar massasi. Ma'lumki, gaz aralashmasining molekulasini (masalan, «havo» degan molekula) yo'q.

Shuning uchun aralashmaning o'rtacha molekulyar massasi deyilganda, aralashmaning faraz qilingan (o'rtachalashtirilgan) molekulyar massasini tushunish kerak.

O'rtacha molekulyar massa quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\mu_{ar} = r_1\mu_1 + \dots + r_n\mu_n = \sum_{i=1}^n r_i\mu_i \quad (1.41)$$

yoki (1.40) ifodani hisobga olgan holda quyidagi formulani yozish mumkin:

$$\mu_{ar} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{\rho_i}} \quad (1.42)$$

Aralashmaning gaz doimiysi (R_{ar}) ma'lum bo'lsa, o'rtacha molekulyar massani universal gaz doimiysi orqali sodda yo'l bilan hisoblash ham mumkin (1.31 tenglikka qarang):

$$\mu_{ar} = \frac{8314}{R_{ar}} \quad (1.43)$$

Aralashmaning gaz doimiysi. Aralashma massa ulushlari orqali berilganda uning gaz doimiysini Dalton qonunidan kelib chiqadigan tenglik orqali aniqlash mumkin. Bunda aralashmaning massasi G_{ar} , kg,

$$m_{ar} = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n.$$

U holda aralashma tarkibidagi alohida olingan gaz uchun holat tenglamalarini yozish mumkin:

$$p_1 V_{ar} = m_1 R_1 T;$$

$$p_2 V_{ar} = m_2 R_2 T;$$

$$\dots \dots \dots$$

$$p_n V_{ar} = m_n R_n T.$$

Tengliklarning o'ng va chap tomonlarini o'zaro qo'shib, quyidagini hosil qilamiz:

$$(p_1 + p_2 + \dots + p_n) V_{ar} = (m_1 R_1 + m_2 R_2 + \dots + m_n R_n) T.$$

$$\text{bunda, } p_1 + p_2 + \dots + p_n = p \text{ ekanligidan, } p V_{ar} = T \sum_{i=1}^n m_i R_i.$$

Demak, aralashma uchun R_{ar} ni hisobga olgan holda holat tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$pV_{ar} = m_{ar} R_{ar} T. \quad (1.44)$$

Bu oxirgi ikkala tenglikni chap tomonlari o'zaro tengligidan quyidagi tenglik kelib chiqadi, ya'ni:

$$m_{ar} R_{ar} = \sum_1^n m_1 R_1 + m_2 R_2 + \dots + m_n R_n$$

yoki:

$$R_{ar} = \frac{m_1}{m_{ar}} R_1 + \frac{m_2}{m_{ar}} R_2 + \dots + \frac{m_n}{m_{ar}} R_n. \quad (1.45)$$

Bu tenglikdan: $\frac{m_1}{m_{ar}} = g_1; \quad \frac{m_2}{m_{ar}} = g_2; \quad \dots; \quad \frac{m_n}{m_{ar}} = g_n.$

Demak, $R_{ap} = g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n. \quad (1.46)$

Parsial bosim. Aralashma tarkibiga kiruvchi alohida olingan gazning parsial bosimi gaz tarkibining qanday usulda berilishiga qarab, asosan, ikki xil usul bilan aniqlanadi:

a) aralashma tarkibi hajm bo'laklari bo'yicha berilgan, u holda parsial bosim:

$$p_i = \frac{V_i}{V_{ar}} \cdot p = r_i \cdot p. \quad (1.47)$$

b) aralashma tarkibi massa bo'laklari bo'yicha berilgan holda

$$p_i = g_i \frac{R_i}{R_{ar}} \cdot p. \quad (1.48)$$

Ba'zi hollarda aralashma tarkibi tashkil etuvchi gazlarning kilomollar soni orqali berilishi ham mumkin, u holda

$$p_i = \frac{\mu_i}{\mu_{ar}} \cdot p. \quad (1.49)$$

Bunda: μ_i — i - gazning (1 ta gazning) kilomollar soni;

μ_{ar} — aralashmadagi jami kilomollar soni;

p — aralashmaning umumiy bosimi.

Nazorat savollari va topshiriqlar

- 1. Termodinamika nimani o'rganadi? Qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishi sohalarida amaliy masalalar yechishda texnikaviy termodinamikaning ahamiyatini ta'riflang.*
- 2. Termodinamika tizimi nima?*
- 3. Holat parametrlari tavsifini va aniqlanishini keltiring. Mos hollarda misollar keltiring.*
- 4. Holat issiqlik parametrlarining asosiy ma'lumotlarini gapirib bering.*
- 5. Ideal va real ishchi jism uchun holat parametrlari orasidagi funksional bog'lanishlarni keltiring. Gaz doimiysi nima? Gaz aralashmasi uchun holat tenglamasini keltiring va tenglamaga kiritilgan har bir kattaliklarning fizik ma'nosini ayting.*
- 6. Gaz aralashmasi uchun parsial bosim va parsial hajm qanday aniqlanadi? Gaz aralashmasi uchun gaz doimiysi, komponentlarning massaviy va hajmiy ulushlari qanday aniqlanadi?*

II BOB. TERMODINAMIKANING BIRINCHI QONUNI

2.1. Asosiy tushunchalar

Agar moddiy jismlar o'zaro va tashqi muhit bilan mexanik hamda issiqlik ta'sirida bo'lsa, u holda bunday moddiy jismlar tizimini **termodinamika tizimi** deb yuritildi. Tizim tashqi muhitdan to'la ajratilgan bo'lsa — yopiq, tashqi muhitdan ajratilmagan bo'lsa — ochiq termodinamik tizim bo'ladi.

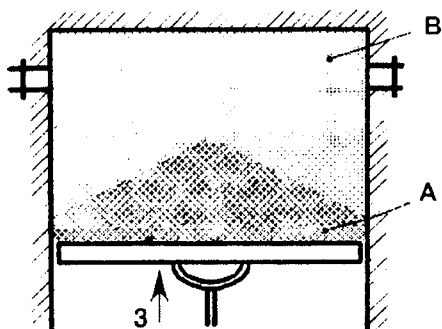
Agar termodinamik tizimning hamma nuqtalarida tashqi muhit bilan bir xil bosim va bir xil harorat vaqtga bog'liq bo'lmagan holda saqlansa (masalan, xonaga olib kirilgan biron ochiq idishdagi suyuqlik, bir necha soatdan keyin), termodinamik tizim **teng salmoqli** holatda deyiladi. Ya'ni, tizimda vaqt davomida ichki va tashqi issiqlik almashinish bo'lmaydi.

Ishchi jism (gaz, suyuqlik) teng salmoqli holatda saqlanishi uchun tashqi muhitning holati o'zgarmasligi kerak. Masalan, xonaning harorati o'zgarsa, xonadagi idish ichiga qamalgan gazning ham harorati asta-sekin o'zgarib boradi, ya'ni vaqt davomida gazning harorati o'zgaradi, gaz hajmi teng salmoqli holatdan chiqadi.

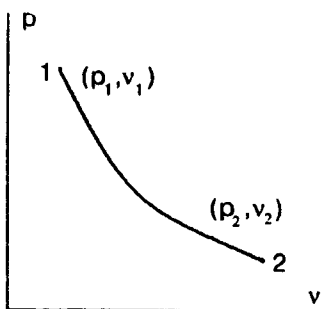
Agar idishdagi gaz xonada turaversa, bir qancha vaqtdan so'ng ishchi jism (gaz) yangi teng salmoqli holatiga keladi. Shu yangi teng salmoqli holatiga kelishi uchun sarflanadigan vaqt **tizimning reaksiya vaqti** deyiladi.

Ma'lumki, gazning biror parametri (p , V , T) o'zgarishi bilan boshqa parametrlari ham o'zgaradi. Masalan, agar gaz qisilsa (ya'ni, hajmi kamaytirilsa), uning bosimi va harorati ortadi. Natijada gazning yangi termodinamika holati vujudga keladi.

Gazning bir termodinamika holatdan ikkinchi termodinamika holatga o'tishi, ya'ni gaz holatini o'zgarishining ketma-ketligi **termodinamik jarayon** deyiladi. Agar termodinamika jarayonida gaz ketma — ket teng salmoqli holatini egallab borsa, **jarayon teng salmoqli** deyiladi. Vaqtning har bir paytida jarayon teng salmoqli holatidan biroz farq qilsa, bunday jarayonlar **kvizistatik jarayon**, ya'ni **teng salmoqli holatiga yaqin** deyiladi. Bunday jarayonda gazning ayrim nuqtalarida bosim va harorat bir-biridan juda oz farq qiladi.



2.1- rasm.



2.2- rasm.

Kvazistatik jarayonlarni amalda uchratish qiyin bo'lganligi uchun ularni **ideal jarayonlar** deyish mumkin.

Mavjud (real) termodinamika jarayonlarda qisish, kengayish, gazning isishi va sovishi kabi holatlar juda tez sodir bo'ladi. Natijada gaz hajmining har xil nuqtalarida bosim, harorat va zichlik har xil qiymatga ega bo'ladi, ya'ni bunday jarayonlarda teng salmoqli holat bo'lmaydi. Bunday jarayonlar teng salmoqli bo'lmagan jarayonlar deyiladi. 2.1- rasmda ko'rsatilgan sil'ndrning ichidagi gaz teng salmoqli holatda bo'lmaydi. Gazning «A» zonasida «B» zonasiga qaraganda bosim, harorat va zichlik sezilarli darajada farq qilishi mumkin. Porshenli ichki yonuv dvigatellarida porshenning harakati juda tez. Demak, rasmda ifodalangan qisish jarayoni teng salmoqli bo'lmagan, ya'ni **real jarayondir**.

Gaz holatining o'zgarish jarayonlarini o'rganishda gaz holatining asosiy tenglamasidagi kabi uch o'lchovli grafik usuldan (ya'ni, bosim, hajm va harorat) foydalanish mumkin. Fazoviy koordinatalar (p , V va T) tizimida bosim, hajm va harorat orasidagi bog'lanish **termodinamik sirt** bo'lib, uning har bir nuqtasi gazning biron-bir holatini ifodalaydi. Lekin, fazoviy koordinatalar tizimidan foydalanish amalda biroz qiyinchiliklarga olib keladi. Shuning uchun termodinamika jarayonlarni chiziqli ifodalashda tekislikdagi koordinatalar tizimidan foydalaniladi. Bunda gazning ikkita ko'rsatkichi ishtirok etadi.

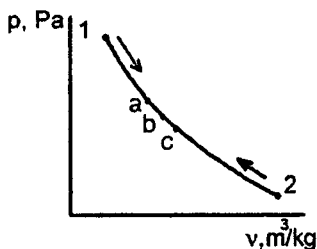
Ko'pincha termodinamika jarayonining chizmasi bosim bilan hajmni o'zaro bog'lovchi koordinatalar orqali ifodalanadi. Bunday sistema diagramma deb yuritiladi.

Masalan, 2.2- rasmda ifodalangan 1—2 egri chiziq ishchi jism (gaz)ning boshlang'ich (1 nuqta) holatidan, keyingi (2 nuqta) holatiga o'zgarishini ifodalaydi. Bunda ko'rinib turibdiki, jarayon — kengayish jarayoni bo'lib, bosim p_1 dan p_2 gacha kamayadi, hajm esa v_1 dan v_2 gacha ortadi.

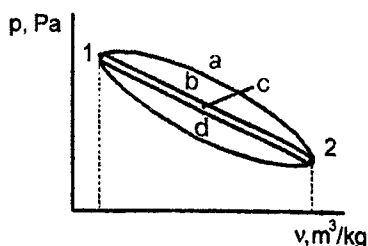
2.2. Qaytar va qaytmas termodinamika jarayonlari

Hamma termodinamika jarayonlari to'g'ri va teskari yo'nalishda bajarilishi mumkin. Shunga ko'ra termodinamika jarayonlarini ham ikkiga ajratib, to'g'ri jarayon yoki teskari jarayon deb yuritiladi. p, ϑ_1 — diagrammasida ixtiyoriy termodinamika jarayonini ifodalaymiz (2.3- rasm), bunda 1—2 chiziq shu jarayonlarni ifodalaydi. Jarayon 1- holatdan 2- holatga tomon borayotgan bo'lsa, kengayish jarayoni (to'g'ri jarayon) bo'ladi. Bunda ishchi jism ketma-ket a, b, c kabi qator teng salmoqli holatlarni egallab boradi hamda kengayish cheksiz sekin bo'ladi va gaz holati ko'rsatkichlarining qiymatlari bir-biriga cheksiz yaqin uch taraz qilinadi, ya'ni gaz 1- $a-b-c$...-2 jarayon orqali kengayadi.

Eski jarayonlarni teskari olib borsak, gaz yuqoridagi shartlarga ko'ra cheksiz sekin qisilib, ketma-ket teng salmoqli holatlarni ifodalab, 2-... $c-b-a$ -1 jarayonlarni bajaradi va dastlabki holatini egallaydi. Shunday qilib, termodinamika tizimi to'g'ri va teskari jarayonlarni bajargandan so'ng, u to'la dastlabki holatiga qaytadi. Bunday termodinamika jarayonlari **qaytar jarayonlar** deb yuritiladi.



2.3- rasm.



2.4- rasm.

Tabiatda mavjud bo'lgan barcha jarayonlar **qaytmas jarayonlardir**, chunki hech qanday haqiqiy jarayon yuqorida aytib o'tilgan shartlarni bajara olmaydi. Shuning uchun qaytuvchan jarayonlarni ideal jarayonlar deyish mumkin. Real jarayonlar ideal jarayonlarga oz yoki ko'proq yaqinlashishi mumkin, lekin hech qachon aynan o'zi bo'la olmaydi (2.4- rasm).

Termodinamika hisoblashlarida ideal jarayonlar o'rganiladi va qo'llaniladi. Natijalarga ma'lum tuzatishlar kiritilib, real (haqiqiy) jarayonlarga aylantiriladi.

2.3. Gazning ichki energiyasi

Moddiy gazning molekulasi molekulyar kinetik nazariyasiga asosan ilgarilanma va aylanma harakatda bo'ladi. Molekula va atomlarning massasi hamda tezligi natijasi sifatida mikrojismilar ilgarilanma kinetik energiya va aylanma kinetik energiyaga ega. Demak, ideal gazlarda ichki energiya quyidagilardan tashkil topadi:

- a) molekula ilgarilanma harakatining kinetik energiyasi;
- b) molekula aylanma harakatining kinetik energiyasi;
- d) atomlar aylanma harakatining kinetik energiyasi;
- e) molekula ichidagi atomlar tebranma harakatining kinetik energiyasi.

Real (mavjud) gazlarda esa yuqoridagidan tashqari molekullarning o'zaro ta'siri natijasida sodir bo'ladigan potensial energiya ham hisobga olinadi.

Yuqorida sanab o'tilgan energiyalarning yig'indisi gazning ichki energiyasi deyiladi va 1 kg gaz uchun « u » bilan, ixtiyoriy miqdordagi gaz uchun esa « U » orqali ifodalanadi, ya'ni:

$$u = u_k + u_n \quad \text{yoki} \quad U = U_k + U_n. \quad (2.1)$$

Gaz holatining ko'rsatkichlari p , ϑ va T o'zaro issiqlik tenglamasi orqali bog'langanligi uchun ichki energiyani ixtiyoriy ikkita ko'rsatkichlarning funksiyasi sifatida ko'rsatish mumkin, ya'ni:

$$u = f(T, \vartheta); \quad u = f(p, T); \quad u = f(p, \vartheta).$$

Ichki energiya gaz holatini ifodalovchi kattalikdir, chunki uning miqdori gaz holatining ko'rsatkichlariga bog'liq.

Ideal gazlarda molekulalar orasidagi o'zaro tortishish kuchi bo'lmaganligi uchun hajm va bosimning o'zgarishi ichki energiya miqdoriga ta'sir qilmaydi. Shuning uchun ideal gazlarda, $u = f(T)$, ya'ni ichki energiya — faqat haroratning funksiyasi. Termodinamika jarayonlarini o'rganishda ham, hisoblashlarda ham, ko'pincha ichki energiyaning mutlaq qiymati emas, uning o'zgarish miqdori zarur bo'ladi. Ma'lumki, ichki energiyaning eng ko'p o'zgarishi $\vartheta = \text{const}$ bo'lgan jarayonda sodir bo'ladi, chunki bunda hajm o'zgarmaganligi uchun tashqi ish bajarilmaydi va berilgan issiqlik miqdori faqat gazning ichki energiyasini orttirishga olib keladi.

1 kg gazga berilgan issiqlik miqdori $q = c_v (T_2 - T_1)$, lekin shu bilan birga:

$$q = u_2 - u_1. \quad (2.2)$$

U holda ichki energiyaning o'zgarishi:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \text{ yoki } \Delta u = c_v(T_2 - T_1) \dots (2.3)$$

Gaz holatining cheksiz kichik o'zgarishi uchun esa:

$$du = c_v dT.$$

Ideal gazlarda ichki energiyaning o'zgarishi Δu jarayonning borish xarakteri (yo'li)ga bog'liq bo'lmay, u faqat gazning oxirgi va boshlang'ich holatlarining haroratlariga bog'liq, xolos.

2.4. Gazning tashqi ishi

Biz yuqorida aytib o'tganimizdek, faqat bir jarayonda, ya'ni $q = \text{const}$ bo'lgan jarayonda gaz tashqi ish bajarilmaydi. Jarayonda gazga berilgan issiqlikning hammasi ichki energiyani orttirishga sarf bo'ladi. Bundan xulosa shuki, boshqa termodinamika jarayonlarida gazga berilgan issiqlik miqdori ichki energiyani orttiribgina qolmay, tashqi ish bajarishga (ya'ni, tashqi muhitning qarshiligini yengishga) ham sarf bo'ladi. Ma'lumki, ish bajarilishi uchun eng kamida 2 ta jism, energiya qabul qiluvchi va energiya beruvchi (yo'qotuvchi) mavjud bo'lishi shart. Demak, ilgari aytib o'tganimizdek, **ish — energiya uzatilishining bir shakli bo'lib, ishning miqdori berilayotgan energiyaning o'lchovi bo'ladi.**

Agar 2.5- rasmdagi harakatchan porshenli silindrdagi 1 kg gazga cheksiz kichik miqdordagi dq issiqlik miqdorini bersak, gaz kengayib porshen dS masofa yo'l yuradi. Gaz kengayishida $d\ell$ tashqi ish bajaradi. Bu ish kuchning porshen yurgan yo'lga ko'paytmasi bilan ifodalanadi:

$$d\ell = p F ds. \quad (2.4)$$

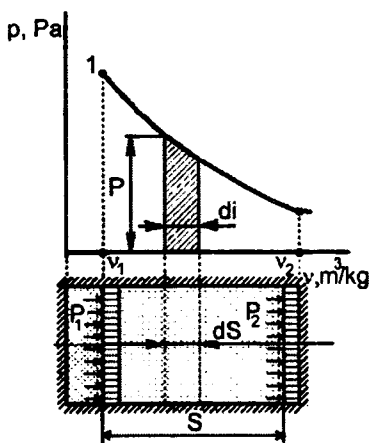
Bunda: p — gazning bosimi, N/m²

;

F — porshen (silindr)ning ko'ndalang kesim yuzasi, m². Ma'lumki, hajmning eng kichik orttirmasi $Fds = d\vartheta$ bo'lganligi uchun quyidagi tenglik kelib chiqadi:

$$d\ell = p d\vartheta. \quad (2.5)$$

U holda gazning ϑ_1 hajmdan ϑ_2 hajmgacha kengayishidan iborat termodinamika jarayonida bajarilgan ish quyidagicha bo'ladi:



2.5- rasm.

$$\ell = \int_{\theta_1}^{\theta_2} p d\theta. \quad (2.6)$$

2.5- rasmda ifodalangan $p\theta$ diagrammasida jarayon chizig'i ikkala chetki ordinatalar va abssissa o'qi bilan chegaralangan yuza — $S_{1-2-3-4-1}$ ma'lum masshtabda bajarilgan ishni ifodalaydi.

Bunda shuni esda tutish kerakki, kengayishdagi ishni musbat, qisish jarayonidagi ishni esa manfiy deb qabul qilingan (misolimizda bajarilgan ish — musbat) $p\theta$ koordinatalar tizimida yuza — ma'lum masshtabda ishning miqdorini ifodalaydi.

2.5. Termodinamika birinchi qonunining mohiyati va uning matematik ifodasi

Ma'lumki, issiqlikning ishga aylanishi (va aksincha), energiyaning saqlanish va aylanish qonunining xususiy holdir. Ish va issiqlikning ekvivalentlik qonunini quyidagicha ta'riflash mumkin: **«Ma'lum Q miqdordagi issiqlikning yo'qolishi, to'la aniq miqdordagi mexanik ish L ni keltirib chiqaradi va aksincha».**

Shunday qilib, termodinamika jarayonlarida issiqlik va mexanik hodisalar orasida aloqa qonuniyati mavjud. ***Issiqlik va ish orasidagi mana shu o'zaro aloqa termodinamika birinchi qonunining mohiyatini tashkil qiladi.***

Ba'zi adabiyotlarda termodinamikaning birinchi qonunini termodinamikaning birlamchi boshlanishi deb ham aytiladi. Buning sababi shuki, bu qonun hech qanday qonun va tushunchalardan kelib chiqmaydi, balki u energiyaning saqlanish hamda aylanish qonuni bilan issiqlik ishning ekvivalentlik, o'zaro almashinish qonunlarining qo'shilishidir.

Birinchi qonunga asosan, bir jinsli abadiy dvigatel, ya'ni sarflangan energiyaga nisbatan ko'proq energiya beradigan dvigatel yaratish mumkin emas.

Quyidagi termodinamika jarayonida gazga beriladigan issiqlik nimalarga sarf bo'lishini umumiy holda ko'rib chiqamiz.

Qo'zg'aluvchan porshenli silindrga solingan 1 kg gazga, ma'lum miqdordagi q issiqlikni bersak (2.6- rasm), uning harorati ortadi, ya'ni gaz qiziydi. Demak, gaz molekularining harakati tezlashadi.

Molekulaning ilgarilanma va aylanma harakatining kinetik energiyasi hamda molekula ichki tebranish energiyasi ham ortadi. Natijada gazning ichki kinetik energiyasi ortadi. Silindrdagi porshen qo'z-

g'aluvchan bo'lganligi uchun gazning isishi natijasida porshen yuqoriga ko'tariladi (porshen II holatni oladi).

Gazning kengayishi sababli molekular orasidagi o'rtacha masofa uzayadi, bu esa molekular orasidagi tortish kuchidan kelib chiqadigan ichki potensial energiyani Δu ga kamaytiradi. Shu jarayon uchun energiya balansi quyidagicha bo'ladi:

$$q = \Delta u_k + \Delta u_n + \ell.$$

Bunda: ℓ — porshenni harakatlantirish uchun sarflangan ish.

Ichki energiyaning umumiy o'zgarishini Δu bilan belgilaymiz:

$$\Delta u = \Delta u_k + \Delta u_n.$$

U holda:

$$q = \Delta u + \ell. \quad (2.7)$$

Bu termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasi bo'lib, har qanday termodinamika jarayonida gazga berilgan issiqlik, uning ichki energiyasini orttirishga va tashqi ishni bajarishga sarf bo'lishini ko'rsatadi.

Cheksiz kichik termodinamika jarayoni uchun (2.7) tenglikni o'zgartirish mumkin:

$$dq = du + d\ell. \quad (2.8)$$

Ilgari aytib o'tganimizdek, $du = c_v dT$ va $d\ell = pd\vartheta$ bo'lgani uchun:

$$dq = c_v dT + pd\vartheta. \quad (2.9)$$

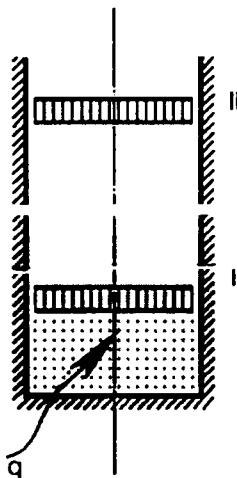
Oxirgi ifoda termodinamika birinchi qonunining differensial tenglamasi deyiladi.

(2.9) tenglamadagi $p \cdot d\vartheta$ o'rniga $d(p\vartheta) - \vartheta dp$ ifodani almashtirish mumkin, chunki $d(p\vartheta) = p d\vartheta + \vartheta dp$.

Demak:

$$dq = c_v dT + d(p\vartheta) - \vartheta dp. \quad (2.10)$$

Keyingi matematik o'zgartirishlarni bajarish uchun gaz holati tenglamasini 1 kg gaz uchun yozamiz: $p\vartheta = RT$. Uni differen-



2.6- rasm.

siallaymiz, $d(p\vartheta) = R dT$ va $d(p\vartheta)$ qiymatini (a) tenglikka keltirib qo'yamiz, ya'ni:

$$dq = c_v dT + R dT - \vartheta dp \quad \text{yoki} \quad dq = (c_v + R) dT - \vartheta dp.$$

Ma'lumki, $c_p - c_v = R$ yoki $c_p = R + c_v$.
Shuning uchun:

$$dq = c_p dT - \vartheta dp. \quad (2.11)$$

2.6. Gazlarning issiqlik sig'imi

Bir birlik miqdordagi (1kg, 1m³ yoki 1 kmol) gazni 1°C ga isitish uchun sarflanadigan issiqlikning miqdoriga gazning issiqlik sig'imi deb yuritiladi.

Shunga mos ravishda gazning issiqlik sig'imi ham 3 xil bo'ladi, ya'ni:

1. Gazning massa bo'yicha issiqlik sig'imi.
2. Gazning hajm bo'yicha issiqlik sig'imi.
3. Gazning kilomol bo'yicha issiqlik sig'imi.

Shunga ko'ra gazning issiqlik sig'imini 3 xil ishora bilan belgilaymiz, shuningdek, ularning o'lchov birliklari ham 3 xil bo'ladi, ya'ni:

1. c — massa bo'yicha issiqlik sig'imi, J / (kg. K).
2. $\bar{c}$ — hajm bo'yicha issiqlik sig'imi, J / (m³. K).
3. μc — kilomol issiqlik sig'imi, J / kmol.

Gazning kilomol issiqlik sig'imi massa bo'yicha issiqlik sig'imining molekulyar massaga ko'paytmasidan iborat, ya'ni:

$$\mu c = c \mu, \quad \text{J/(kmol K)}. \quad (2.12)$$

Massa bo'yicha issiqlik sig'imi kilomol issiqlik sig'imini gazning molekulyar massasiga bo'lgan nisbatiga teng:

$$c = \frac{\mu c}{\mu}, \quad \text{J/kg} \cdot \text{K}. \quad (2.13)$$

Hajm bo'yicha issiqlik sig'imi, massa bo'yicha issiqlik sig'imi bilan gaz zichligining ko'paytmasiga teng:

$$\bar{c} = c \cdot \rho, \quad \text{J/m}^3 \cdot \text{K}. \quad (2.14)$$

Umumiy holatda uchala turdagi issiqlik sig'imlarini o'zaro bog'lovchi ifodalari mavjud. Ular quyidagilar:

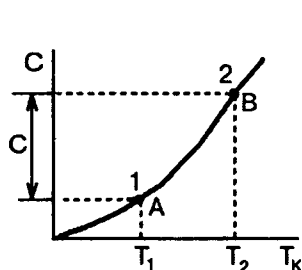
$$\mu c = c \cdot \mu = 22,4 \bar{C};$$

$$c = \frac{\mu c}{\mu} = \bar{C} \cdot g;$$

$$\bar{C} = c \cdot p = \frac{c}{g} = \frac{\mu c}{22,4}.$$

SI birliklar sistemasi bilan (ilgarigi) MKGS sistemasi orasida quyidagi bog'lanish mavjud: $\mu c = c \cdot \mu = 22,4 \bar{C}$.

O'rtacha va haqiqiy issiqlik sig'imi. Biror ixtiyoriy AB jarayonda (2.7- rasm) ishchi iisimning harakatini t_1 dan t_2 ga o'ttirish (yoki kamaytirish) uchun gazni qizdirish (yoki sovitish) kerak bo'lsin. Buning uchun ma'lum miqdordagi issiqlik miqdori sarf qilinadi. Jarayonning AB oralig'ida gazning haroratini 1°C ga orttirish uchun sarf bo'ladigan issiqlik quyidagicha bo'ladi:



2.7- rasm.

$$c_n = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (2.15)$$

(2.15) ifoda gazni t_1 dan t_2 gacha bo'lgan oralqdagi o'rtacha issiqlik sig'imini ifodalaydi, ya'ni u 1°C ga qizdirish uchun sarflangan issiqlik miqdoridir.

Agar A nuqta bilan B nuqta orasidagi masofani qisqartirib, ya'ni $t_2 - t_1$ farqni kamaytirib borsak, 1 kg gazni har bir darajaga qizdirish uchun sarflanadigan issiqlik miqdori boshlang'ich holatda (A nuqtada) sarflanadigan issiqlik miqdoriga yaqinlashib boradi.

Bunda $t_2 - t_1$ haroratlar farqi qancha kamaysa, o'rtacha issiqlik sig'imi shuncha haqiqiy issiqlik sig'imiga yaqinlashadi.

Demak, haroratlar farqi nolga teng bo'lganda, o'rtacha issiqlik sig'imi jarayonning A nuqtasidagi issiqlik sig'imi bilan bir xil bo'ladi.

Agar gazning haroratini Δt darajaga o'zgartirish uchun Δq miqdorda issiqlik sarflansa, haqiqiy issiqlik sig'imi quyidagicha bo'ladi:

$$c = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} \text{ yoki differensial ko'rinishda } c = \frac{dq}{dt}. \quad (2.16)$$

Haqiqiy issiqlik sig'imi deb, qizdirish jarayonida haroratlar farqi cheksiz kichik bo'lganda, bir miqdor birligidagi gazni qizdirishga sarflangan solishtirma issiqlik miqdoriga aytiladi.

Shu bilan birga jarayonning ma'lum nuqtasidagi issiqlik sig'imi, shu haroratda gazning haqiqiy issiqlik sig'imini ifodalaydi.

Gazga berilgan issiqlik miqdori esa quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (2.17)$$

M kg gaz uchun esa quyidagini yozish mumkin, ya'ni:

$$Q = M \cdot q = M \int_{t_1}^{t_2} c dt. \quad (2.18)$$

O'zgarmas va o'zgaruvchan issiqlik sig'implari. Ideal gazlarda bosim issiqlik sig'imiga kam ta'sir qiladi. Shuning uchun issiqlik sig'imi faqat haroratning funksiyasi bo'lib hisoblanadi, ya'ni ideal (shu jumladan, real) gazlarning issiqlik sig'imi harorat ortishi bilan ortib boradi va aksincha. Tajribalar shuni ko'rsatadiki, past haroratlarda gazning issiqlik sig'imiga haroratning ta'siri sezilarli miqdorda bo'lmaydi. Shuning uchun ba'zi hisoblashlarda shartli ravishda issiqlik sig'imini o'zgarmas (haroratga bog'liq emas) deb olinadi. Bunda hisoblash ishlari ancha yengillashadi:

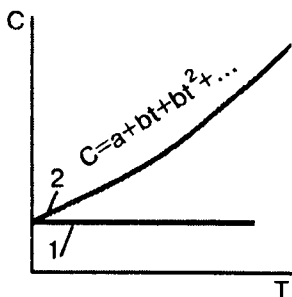
$$q = c (t_2 - t_1), J/kg; \quad Q = Mc (T_2 - T_1), J.$$

Issiqlik sig'imi o'zgarmas deb olinsa, chizmada abssissa o'qiga parallel 1- chiziq hosil bo'ladi (2.8- rasm).

Yuqori harorat va bosimda esa issiqlik sig'imining haroratga bog'liqligi juda sezilarli bo'lib qoladi. Bunday holda issiqlik sig'imining haroratga bog'lanishi 2.8- rasmdagi 2- chiziq orqali ifodalanadi. Egri chiziq tenglamasi esa quyidagicha:

$$c = a + bt_1 + bt_2 + \dots \quad (2.19)$$

Issiqlik sig'imi haroratning funksiyasi bo'lganligi uchun biron harorat oralig'idagi gazga sarflangan issiqlik miqdorini hisoblashda o'rtacha issiqlik sig'limidan foydalaniladi:



2.8- rasm.

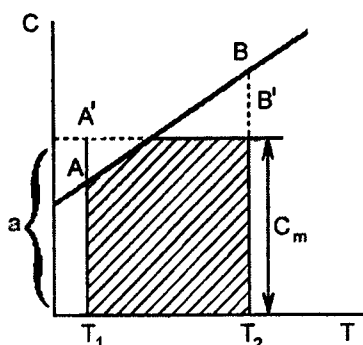
$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt = c \int_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1). \quad (2.20)$$

(2.17) tenglikdan o'rtacha issiqlik sig'imini aniqlaymiz:

$$c \int_{t_1}^{t_2} m = \frac{q}{t_2 - t_1}; \quad c \int_{t_1}^{t_2} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} c dt}{t_2 - t_1}.$$

«c» ning o'rniga (2.19) tenglikdagi ifodani keltirib qo'ysak:

$$c \int_{t_1}^{t_2} m = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (a + bt + dt^2 + \dots)}{t_2 - t_1} = a + b \frac{t_1 + t_2}{2} + d \frac{t_1^2 - t_1 t_2 + t_2^2}{2} + \dots \quad (2.21)$$



2.9- rasm.

Ko'rinib turibdiki, (2.21) ifoda orqali issiqlik sig'imini hisoblash ancha murakkab. Shuning uchun ko'pgina hollarda issiqlik sig'imini haroratga bog'lanishini to'g'ri chiziqli tenglama bilan ifodalab ham yetarli aniqlikka erishish mumkin, ya'ni:

$$c = a + bt.$$

Bunday issiqlik sig'imi haroratga to'g'ri chiziqli bog'langan issiqlik sig'imi deb yuritiladi (2.9- rasm).

Bunday hollarda o'rtacha issiqlik sig'imi quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$c_m = a + \frac{b}{3}(t_1 + t_2).$$

Bunda: c_m — haroratlar oralig'idagi o'rtacha issiqlik sig'imi;

a — gazning 273 K dagi issiqlik sig'imi;

b — chiziq AB ning gorizonttal o'qqa nisbatan qiyalik burchagining tangensi. Haroratga sig'imning bog'lanishi to'g'ri chiziqli bo'lganda o'rtacha issiqlik sig'imini hisoblashning boshqa usuli ham mavjud. Bunda gazni T_1 dan T_2 darajagacha qizdirish 2 ta davrga bo'lib olinadi.

1. 0°C dan $T_2^\circ\text{C}$ gacha bo'lgan oraliq.

U holda shu oraliqlarda sarflangan issiqlik miqdorlari quyidagicha bo'ladi:

$$q_1 = c_m \int_0^{T_1} T_1; \quad q_2 = c_m \int_0^{T_2} T_2.$$

2. T_1 dan T_2 gacha harorat oralig'idagi o'rtacha issiqlik sig'imi quyidagicha aniqlanadi:

$$c_m \int_{T_1}^{T_2} T_2 = \frac{c_m \int_0^{T_2} T_2 - c_m \int_0^{T_1} T_1}{T_2 - T_1}. \quad (2.22)$$

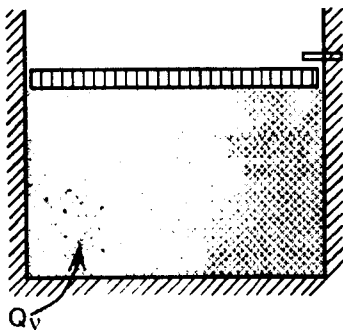
$c_v \int_0^{T_1}$ va $c_v \int_0^{T_2}$ larning son qiymatlari har xil gazlar uchun darslik va o'quv qo'llanmalarda jadval ko'rinishida berilgan bo'ladi.

O'zgarmas hajmdagi (c_v) va o'zgarmas bosimdagi (c_p) issiqlik sig'implari. Biz yuqorida issiqlik sig'imi haroratga bog'liq ekanligi haqida fikr yuritdik. Endi esa gazni qizdirish sharoitini o'zgartirib ko'ramiz. 2.10- rasmda ifodalangan silindrdagi porshen qo'zg'almas qilib qotirilgan, 2.11- rasmda esa shu porshen erkin harakat qila oladigan holatda ko'rsatilgan. Ikkala holatda ham G kg dan bir xil gazni T_1 dan T_2 gacha qizdirilsa, sarflanadigan issiqlik miqdorlarining teng bo'lmashligini ko'ramiz:

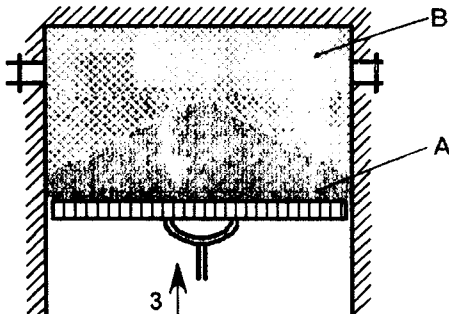
$$Q_p > Q_v; \quad Mc_p (T_2 - T_1) > Mc_v (T_2 - T_1).$$

Buning sababi shuki, 2.10- rasmdagi sharoitda gaz qizdirilsa, gazning hajmi o'zgarmaydi, ya'ni $\rho = const$. U vaqtda berilgan issiqlik miqdori faqat molekulalarning kinetik energiyasini orttirishga sarflanadi.

2.11- rasmdagi holatda esa porshen harakatchan, bunda gaz qizishi bilan birga tashqi ish bajaradi ($p = const$).



2.10- rasm.



2.11- rasm.

Gazni ikkala holatda isitishdagi sarflangan issiqlik miqdorlarining farqi 2.11- rasmda (ΔS) porshenning gaz kengayishidagi bajargan ishini ifodalaydi:

$$Q_p - Q_v = L. \quad (2.23)$$

Bajarilgan ish L ni hisoblash uchun 2.11- rasmdagi gazning bosimini ($p = \text{sonst}$), dastlabki va keyingi hajmlarini mos ravishda V_1 , V_2 hamda bajargan ishini L bilan ifodalaymiz. U holda, $L = pV_2 - pV_1$ bo'ladi.

Ma'lumki, gaz holati tenglamasiga asosan:

$$p_1 V_1 = MRT, \quad p_2 V_2 = MRT.$$

Shuning uchun: $L = MRT_2 - MRT_1 = MR(T_2 - T_1)$

Ishning olingan qiymati va Q_p hamda Q_v larning qiymatlarini (2.23) tenglikka keltirib qo'yamiz, natijada quyidagi ifoda kelib chiqadi:

$$Mc_p(T_2 - T_1) - Mc_v(T_2 - T_1) = MR(T_2 - T_1);$$

$$c_p - c_v = R. \quad (2.24)$$

Demak, bosim o'zgarmagandagi (c_p) va hajm o'zgarmagandagi (c_v) massa issiqlik sig'implarining farqi shu gazning gaz doimiysi R ga teng.

Ideal gazlarning kilomolli issiqlik sig'implari. Gazlarning molekulyar kinetik nazariyasiga asosan, ideal gazlarda kilomolli issiqlik sig'implari ularning turlariga bog'liq bo'lmay, faqat gazning atom sonlariga bog'liq, ya'ni: $\mu c_{O_2} = \mu c_{N_2} = \mu c_{N_2} = \dots = \text{const.}$

Har xil atomli gazlarning kilomolli issiqlik sig'implarining tarkibiy qiymatlarini esda saqlab qolish mumkin (eski, MKGS birliklar sistemasida) (1- jadval).

1- jadval

№	Gaz molekulasidagi atomlar soni	μc_v	μc_p
		Kkal/kmol.grad	Kkal/kmol.grad
1.	Bir atomli gazlar.	3	5
2.	Ikki atomli gazlar.	5	7
3.	Ko'p atomli gazlar.	7	9

1- jadvaldan ko‘rinib turibdiki, gazlarning o‘zgarmas bosimdagi kilomolli issiqlik sig‘imlari o‘zgarmas hajmdagidan 2 kkal/kmol grad. ga ko‘proq, ya’ni:

$$\mu c_p - \mu c_v = 1,985 = 2 \frac{\text{kkal}}{\text{kmol} \cdot \text{grad}}. \quad (2.25)$$

1- jadvaldagi sonlarni (issiqlik sig‘imlarining qiymatlarini) SI birliklari tizimiga keltirish uchun har bir sonni 4,19 ga ko‘paytirilsa kifoya.

Chunki, 1 kkal = 4,1868 kJ = 4,19 kJ.

Termodinamika hisoblarida issiqlik sig‘imlarining ayirmasi, (2.24) tenglikdan tashqari ularning nisbatlari ham katta ahamiyatga ega, ya’ni:

$$K = \frac{c_p}{c_v}. \quad (2.26)$$

Koeffitsiyent «K» ning son qiymatlari faqat gazlarning atom sonlariga bog‘liq. Son qiymatini aniqlash uchun (2.26) tenglikning o‘ng tomonidagi kasrning surat va maxrajini μ ga ko‘paytiramiz.

$K = \frac{\mu \cdot c_p}{\mu \cdot c_v}$ ya’ni, kilomol issiqlik sig‘imlarining nisbati hosil bo‘ladi.

1- jadvalga asosan, bir atomli gazlar uchun:

$$K = \frac{\mu \cdot c_p}{\mu \cdot c_v} = \frac{5}{3} = 1,67.$$

Ikki atomli gazlar uchun: $K = \frac{7}{5} = 1,4.$

Uch va ko‘p atomli gazlar uchun: $K = \frac{9}{7} = 1,29.$

Bunda shuni esda tutish lozimki, real gazlar uchun yuqoridagi sonlar biroz o‘zgarishi mumkin.

Issiqlik sig‘imlari c_p va c_v haroratga bog‘liq bo‘lgani uchun kattalik K ham o‘zgaruvchidir. Shuning uchun (2.24) ifodaga ko‘ra:

$$K = \frac{c_p}{c_v} = \frac{c_v + R}{c_v} = 1 + \frac{R}{c_v}.$$

Gaz aralashmalarining issiqlik sig‘imi. Aralashmaning issiqlik sig‘imini aniqlash uchun uning tarkibi va aralashmani tashkil etuvchi har bir gazning issiqlik sig‘imlari ma’lum bo‘lishi kerak. Odatda aralashmaning tarkibi masalaning shartida berilgan bo‘ladi.

Har bir gazning issiqlik sig'imi esa gazning haroratiga qarab jadvaldan topiladi.

Gaz aralashmasining tarkibi asosan ikki xil usulda berilishi mumkin ekanligi ilgari aytib o'tilgan edi. Shunga qarab aralashmaning issiqlik sig'imini aniqlashda ham ikki xil usul bo'ladi.

a) aralashma tarkibi massa ulushlari orqali berilgan:

$$M_{ar} \cdot c_{ar} = M_1 c_1 + M_2 c_2 + \dots + M_n c_n = \sum_{i=1}^n M_i \cdot c_i.$$

Ma'lumki, $\frac{M_i}{M_{ar}} = g_i$, shuning uchun:

$$C_{ar} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots + g_n c_n = \sum_{i=1}^n g_i c_i;$$

b) aralashma tarkibi hajm ulushlari orqali berilgan:

$$V_{ar} \bar{C}_{ar} = V_1 \cdot \bar{C}_1 + V_2 \cdot \bar{C}_2 + \dots + V_n \bar{C}_n = \sum_{i=1}^n V_i \bar{C}_i$$

yoki:

$$\bar{C}_{ar} = r_1 \bar{C}_1 + r_2 \bar{C}_2 + \dots + r_n \bar{C}_n = \sum_{i=1}^n r_i \bar{C}_i.$$

Chunki bunda: $r_i = \frac{V_i}{V_{ar}}.$

2.7. Gaz entalpiyasi

Faraz qilaylik, qo'zg'aluvchan porshenli silindrga 1kg ishchi jism (gaz) to'ldirilgan (2.12- rasm). Silindr ichidagi gazning bosimi p muhit bosimidan yuqori. U holda porshen ko'tarilib ketmasligi (muvozanatlash) uchun biror yuk qo'yish kerak bo'ladi. Uning og'irligi $G = pF$ bo'lishi kerak.

Bunda: F — silindrning ko'ndalang kesim yuzasi.

Yukni muvozanat holatda ushlab turgan gazning potensial energiyasi quyidagicha bo'ladi:

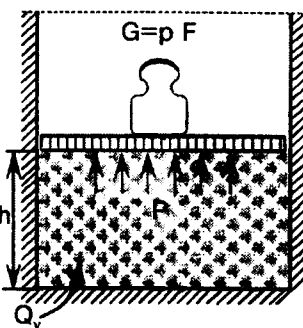
$$G \cdot g \cdot h = p \cdot F \cdot g \cdot h = pVg, \text{ chunki } g = F \cdot h.$$

Bunda: g — tortish kuchining erkin tushish tezlanishi.

Ushbu misolimizdagi gazning to'la energiyasi quyidagicha bo'ladi:

$$h = u + p g. \quad (2.27)$$

Bunda $p\vartheta$ ko'paytma ϑ hajmdagi gazni turtishdagi bajargan ishi bo'lib, shu ϑ hajm miqdoridagi muhitni turtib bo'shatishga sarf bo'ladi, ya'ni ϑ hajmdagi gaz muhitga chiqishi uchun unga shuncha hajmdagi muhit kerak. $p\vartheta$ ko'paytma, gazning turtish ishi yoki gaz bosimining potensial energiyasi deb yuritiladi.



2.12- rasm.

Gazning to'la energiyasi **h - gazning entalpiyasi** deb yuritiladi. Bu energiya gaz holati ko'rsatkichlarining funksiyasidir. Shuning uchun entalpiya h ham gaz holatini belgilovchi kattalik bo'lib hisoblanadi.

Endi entalpiyaning son qiymatini aniqlaymiz. Ma'lumki, ichki energiyaning absolyut qiymati $u = c_v T$.

Gaz holati tenglamasi esa 1 kg gaz uchun $p\vartheta = RT$.

Shuning uchun (2.25) tenglikni quyidagicha yozish mumkin:

$$h = c_v T + R T = (c_v + R) T = c_p T; \quad h = c_p T. \quad (2.28)$$

Demak, gaz entalpiyasining son qiymati, gaz haroratini mutlaq nol darajadan T darajagacha o'zgarmas bosimda qizdirish uchun sarflangan issiqlik miqdoriga teng. Entalpiyaning o'lchov birligini aniqlaymiz:

$$h = c_p \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right] \cdot T[K]; \quad \text{demak, } h = \frac{J}{kg}.$$

Gaz entalpiyasining fizik ma'nosini tushunish uchun misol keltiramiz. Masalan, biror gaz uchun entalpiyaning qiymati $h = 1500 \text{ J/kg}$ bo'lsa, buni shunday tushunish kerak. Demak, shu gazning har bir kilogrammida 1500 J energiya mavjud. Boshqacha aytganda, gaz entalpiyasi holat parametri bo'lib, u gaz tarkibidagi energiya miqdorini ifodalaydi. Termodinamika jarayoni uchun ishchi jism (gaz) entalpiyasining o'zgarishini yozamiz:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p \cdot T_2 - c_p \cdot T_1 = c_p (T_2 - T_1).$$

Demak, entalpiyaning o'zgarish miqdori ham ichki energiya o'zgarishi kabi har qanday termodinamika jarayoni uchun bir xil ifoda bilan aniqlanadi, ya'ni:

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1). \quad (2.29)$$

2.8. Gaz entropiyasi

Yuqorida ko'rib o'tganimizdek, p , ϑ , T , u va h gaz holatining parametrlari (ko'rsatkichlari) bo'lib hisoblanadi. Lekin issiqlik miqdori q va ish ℓ gaz holati ko'rsatkichlari bo'la olmaydi.

Har qanday termodinamika jarayonida qatnashadigan issiqlik miqdorini bilish nuqtai nazaridan termodinamikada yana bir gaz holatining ko'rsatkichi — **entropiya** kiritilgan. Faraz qilaylik, boshlang'ich va oxirgi holatiga ega bo'lgan ideal gaz qaytuvchan termodinamikaning jarayonini bajarmoqda. Jarayon davomida gazning harorati o'zgarib turadi.

Agar jarayonni cheksiz kichik va bir-biriga cheksiz yaqin bo'laklarga bo'lsakda, har bir bo'lakda ham issiqlik beriladi deb olsak, bunda biz cheksiz kichik jarayon oralig'ida gazning harorati deyarli o'zgarmaydi deyishimiz mumkin.

Cheksiz kichik jarayonda gazga berilgan issiqlikni gazning mutlaq haroratiga nisbatini **keltirilgan issiklik** deb ataymiz va ds bilan belgilaymiz, ya'ni:

$$\frac{dq}{T} = ds. \quad (2.30)$$

Bu ifodadan cheksiz kichik jarayonda gazga berilgan issiqlikni aniqlash mumkin:

$$dq = T \cdot ds. \quad (2.31)$$

Ma'lumki, gazning termodinamika harorati « T » doimo musbat qiymatga ega, shuning uchun oxirgi olingan tenglikka qarab fikr yuritish mumkin. Agar gazga issiqlik berilsa, entropiya ortadi (ya'ni, entropiyaning orttirmasi musbat) va aksincha, gazdan issiqlik olinsa, entropiya ham kamayadi.

Entropiyani aniqlashda boshqa yo'l tutish ham mumkin. Buning uchun termodinamika birinchi qonunining differensial ko'rinishdagi tenglamasi (2.9) ni T ga bo'lamiz, ya'ni:

$$\frac{dq}{T} = c_v \frac{dT}{T} + \frac{pd\vartheta}{T}.$$

Gaz holati tenglamasi $p\vartheta = RT$ ni quyidagicha o'zgartiramiz:

$\frac{p}{T} = \frac{R}{\vartheta}$ va yuqoridagi tenglamaga qo'yamiz.

$$\frac{dq}{T} = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{d\vartheta}{\vartheta} \quad \text{yoki} \quad ds = c_v \frac{dT}{T} + \frac{Rd\vartheta}{\vartheta}. \quad (2.32)$$

Bu kattalik gazning har bir holati uchun aniq qiymatga ega bo'ladigan gaz holatining ma'lum funksiyasi bo'lib, termodinamikada **entropiya** deyiladi. Demak, entropiya — ma'lum funksiya «s» ning to'la differensial bo'lib, u faqat gaz holatining ko'rsatkichlariga bog'liq. Shuning uchun entropiyaning o'zi ham gaz holatining ko'rsatkichi bo'lib hisoblanadi. Entropiyaning mutlaq qiymati termodinamikada unchalik ahamiyatsiz, o'zgarishi esa katta ahamiyatga ega, chunki yuqorida aytib o'tganimizdek, entropiyaning o'zgarishi jarayon davridagi gazga berilayotgan (yoki olinayotgan) issiqlik miqdorini to'la xarakterlaydi. Shuning uchun termodinamikada ishchi jism entropiyasining o'zgarishi aniqlanadi:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} - R \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{\vartheta}$$

yoki

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}. \quad (2.33)$$

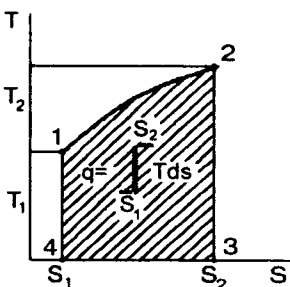
«Ts» — diagrammasi. Termodinamika jarayonlarini «pϑ» diagrammada ifodalash bilan bir qatorda «Ts» diagrammasida ifodalash ham juda qulay va tushunarlidir. Bunda abssissa o'qiga ma'lum masshtabda entropiyaning qiymati, ordinata o'qiga esa termodinamika haroratining qiymatlari qo'yiladi (2.13- rasm).

Agar gaz 1- holatidan 2- holatiga o'tishda $T = f(s)$ egri chizig'i orqali borilgan bo'lsa, u holda:

$$dq = T \cdot ds \quad \text{va} \quad q = \int_{s_1}^{s_2} T ds. \quad (2.34)$$

Demak, bundan ko'rinib turibdiki, «Ts» diagrammada jarayonni ko'rsatuvchi egri chiziq, boshlang'ich va oxirgi holatlar orqali o'tgan ikkala ordinatalar va abssissa o'qlari bilan chegaralangan yuza 1-2-3-4-1 ma'lum masshtabda jarayonda qatnashgan issiqlik miqdori (q) ni ifodalaydi.

Shuning uchun termodinamika jarayonlarini bunday koordinatalarda ifodalashni **«Ts» — diagrammasi yoki issiqlik diagrammasi** (yuza issiqlik miqdorini ifodalagani uchun) deyiladi.



2.13- rasm.

2.9. Yopiq tizimlarda termodinamikaning asosiy jarayonlari

Jarayonlarni o'rganishdagi asosiy qoidalar. Termodinamikada katta rol o'ynovchi va amaliy ahamiyatga ega bo'lgan asosiy termodinamika jarayonlari quyidagilar:

1. O'zgarmas hajmli (izoxorik) jarayon.
2. O'zgarmas bosimli (izobarik) jarayon.
3. O'zgarmas haroratli (izotermik) jarayon.
4. Tashqi muhit bilan issiqlik almashmaydigan (adiabatik) jarayon.
5. Ixtiyoriy, umumiy (politropik) jarayon.

Jarayonlarni o'rganish ikki yo'nalishda olib boriladi:

1. Ishchi jism ko'rsatkichlarining o'zgarish qonunlarini aniqlash.

2. Har bir jarayonda ishchi jism holatining ko'rsatkichlariga qarab energiyaning boshqa tur energiyaga aylanishidagi xususiyatlarini aniqlash.

Yuqoridagi talablarni hisobga olgan holda har bir termodinamika jarayoni quyidagi ketma-ketlikda tahlil qilinadi:

1. Termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasi va gaz holati tenglamasi asosida termodinamika jarayonining tenglamasini keltirib chiqarish.

2. Jarayonning tenglamasi bo'yicha « $p\theta$ » va « Ts » diagrammalarini chizish.

3. Jarayonda gaz holati ko'rsatkichlari orasidagi bog'lanishni aniqlash.

4. Jarayonda ichki energiyaning o'zgarishini aniqlash.

5. Jarayonda gazning bajarigan ishini hisoblash.

6. Jarayonni bajarish uchun gazga beriladigan (yoki olinadigan) issiqlik miqdorini aniqlash.

7. Jarayonda issiqlikning qanday taqsimlanishini o'rganish uchun gazning ichki energiyasini o'zgartirishga sarf bo'ladigan issiqlikning

qismini $\alpha = \frac{\Delta u}{q}$ hisoblash.

8. Jarayonda entropiya o'zgarishini hisoblash.

Izoxorik jarayon. Ishchi jismning hajmi o'zgarmagan holda bajariladigan termodinamika jarayoni **izoxorik jarayon** deyiladi.

1. Jarayonning tenglamasi $\theta = \text{const}$.

2. Jarayonning $p\theta$ va Ts diagrammalaridagi tasviri 2.14- va 2.15- rasmlarda ko'rsatilgan.

3. Ko'rsatkichlar orasidagi bog'lanishni aniqlash uchun gazning dastlabki va oxirgi holati uchun holat tenglamalarini yozamiz:

$$p_1 \vartheta_1 = RT_1 \quad \text{va} \quad p_2 \vartheta_2 = RT_2.$$

Izoxorik jarayon uchun $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \text{const}$ ekanligini hisobga olgan holda oxirgi ikkala tenglamani o'zaro bo'lib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

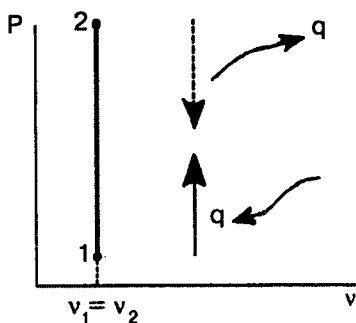
Demak, gazning bosimi uning termodinamika haroratiga proporsional ravishda o'zgarar ekan.

4. Ichki energiyaning o'zgarishi:

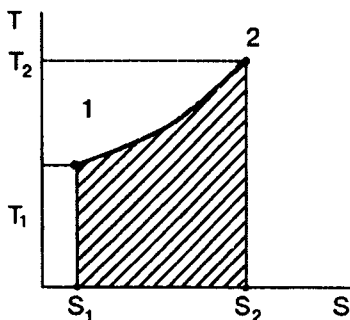
$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) \quad \text{va} \quad du = c_v dT.$$

5. Jarayonda bajarilgan ish: $\ell = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} p d\vartheta.$

Bunda: $\vartheta = \text{const}$ bo'lganligi uchun $d\vartheta = 0$ bo'ladi. Demak, $\ell = 0$, ya'ni izoxorik jarayonda gaz tashqi ish bajarmaydi. Ushbu xulosani 2.14- rasmda ko'rish mumkin. Grafikda ishni ifodalovchi yuza nolga teng.



2.14- rasm.



2.15- rasm.

6. Jarayonda gazga berilgan (yoki olingan) issiqlikni aniqlash uchun termodinamika birinchi qonunining tenglamasini yozamiz:

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

izoxorik jarayon uchun $\ell = 0$ bo'lgani uchun $q = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$, ya'ni **izoxorik jarayonda gazga berilgan issiqlik gazning ichki energiyasining ortishi (kamayishi)ga sarf bo'ladi.**

7. α ning qiymatini hisoblaymiz: $\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{q}{q} = 1$.

8. Jarayonda entropiyaning o'zgarishini (2.33) tenglik orqali aniqlash mumkin:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} - \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{\vartheta}.$$

Izoxorik jarayonda $\vartheta_1 = \vartheta_2 = \text{const}$, $\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$ bo'lgani uchun:

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (2.35)$$

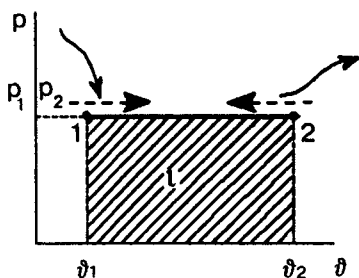
Jarayon Ts diagrammasida issiqlik berish bilan boradigan 1—2 egri chizig'i bilan ifodalanadi (2.15- rasm). Jarayon davomida gazning entropiyasi ortib boradi, chunki entropiyaning orttirmasi musbat.

Izobarik jarayon. O'zgarma bosim holatida bajariladigan har qanday termodinamik jarayon — **izobarik jarayon** deyiladi.

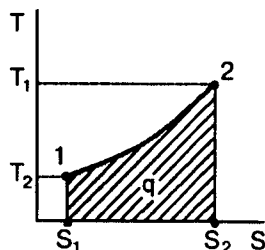
1. Jarayonning tenglamasi $p = \text{const}$.

2. Jarayonning $p\vartheta$ va Ts diagrammalaridagi ifodasi 2.16-, 2.17- rasmlarda tasvirlangan.

1—2 chizig'i $p\vartheta$ diagrammada ham, Ts diagrammada ham izobara chizig'i deb yuritiladi.



2.16- rasm.



2.17- rasm.

3. Ko'rsatkichlar orasidagi bog'lanishni aniqlash maqsadida gazning dastlabki va oxirgi holatlari uchun gaz holatlari tenglamalarini yozamiz:

$$p_1 \vartheta_1 = RT_1 \quad \text{va} \quad p_2 \vartheta_2 = RT_2.$$

Izobarik jarayon uchun $p_1 = p_2 = \text{const}$ ekanligini hisobga olgan holda tengliklarni o'zaro bo'lamiz va quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Izobarik jarayonda gaz hajmining ortishi uning termodinamika haroratiga proporsional bog'langan.

4. Ichki energiyaning o'zgarishi **izoxorik** jarayondagi kabi bo'ladi, ya'ni:

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) \quad \text{va} \quad du = c_v dT.$$

5. Jarayonda gazning bajargan ishi ($p = \text{const}$):

$$\ell = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} p d\vartheta = p \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} d\vartheta = p(\vartheta_2 - \vartheta_1). \quad (2.36)$$

Bajarilgan ishni boshqacharoq ifodalash ham mumkin. Buning uchun $p\vartheta = RT$ tenglamani hisobga olgan holda (2.36) tenglikka matematik o'zgartish kiritamiz, ya'ni:

$$\ell = p(\vartheta_2 - \vartheta_1) = p\vartheta_2 - p\vartheta_1 = RT_2 - RT_1 = R(T_2 - T_1).$$

Demak:

$$\ell = R(T_2 - T_1). \quad (2.37)$$

6. Jarayonda gazga berilgan issiqlikni termodinamika birinchi qonunining tenglamasi orqali aniqlaymiz, $q = \Delta u + \ell$ yoki (2.37) tenglikni va Δu ning qiymatini hisobga olganda:

$$q = c_v(T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = (c_v + R)(T_2 - T_1).$$

Ilgari ko'rib o'tganimizdek, $c_p - c_v = R$ edi. Tenglikni o'zgartirsak, $c_v + R = c_p$ bo'ladi. Shuning uchun:

$$q = c_p(T_2 - T_1). \quad (2.38)$$

Izobarik jarayondagi issiqlik (q) ni entalpiyalarning qiymatlari orqali ifodalash mumkin: $q = \Delta u + \ell$.

Bunda: $\Delta u = u_2 - u_1$ va $\ell = p(\vartheta_2 - \vartheta_1)$ bo'lgani uchun

$$q = u_2 - u_1 + p(\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad \text{yoki} \quad q = u_2 - u_1 + p\vartheta_2 - p\vartheta_1.$$

Bir xil indeksli kattaliklarni guruhlaymiz: $q = (u_2 + p\vartheta_2) - (u_1 + p\vartheta_1)$
 $h = u + p\vartheta$ bo'lganligi uchun:

$$q = h_2 - h_1. \quad (2.39)$$

Demak, izobarik jarayonda gazga berilgan issiqlik boshlang'ich va oxirgi holatdagi entalpiyalarning ayirmasiga teng.

7. Izobarik jarayon uchun α ning qiymati quyidagicha:

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{c_v (T_2 - T_1)}{c_p (T_2 - T_1)} = \frac{c_v}{c_p} = \frac{1}{K}. \quad (2.40)$$

Demak, izobarik jarayonda gazga berilgan issiqlikning $\frac{1}{K}$ hissasi yoki boshqacha aytganda, $100/K$ foizi, gazning ichki energiyasining ortishiga sarf bo'ladi.

8. Entropiyaning o'zgarishi quyidagicha aniqlanadi:

$$ds = \frac{\delta q}{T} = c_p \frac{\delta T}{T}.$$

Chunki $dq = c_p dT$ ga teng edi. Tenglikni T_1 dan T_2 oraliqda integrallasak.

Demak:

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.41)$$

Entropiyaning Δs ning o'zgarishini izobarik jarayon uchun boshqacha usulda hisoblash ham mumkin. Buning uchun (2.32) tenglikdan foydalanamiz:

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R \frac{d\theta}{\theta}.$$

Izobarik jarayon uchun ko'rsatkichlar orasidagi quyidagi bog'lanishni hisobga olsak:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\theta_2}{\theta_1};$$

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{\theta_2}{\theta_1} = (c_v + R) \ln \frac{T_2}{T_1}$$

yoki:

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{chunki:} \quad c_v + R = c_p.$$

Izobara chizig'i Ts diagrammasida abssissa o'qiga ma'lum qiyalik-dagi logarifmik egri chiziq bo'ladi. Qiyalik burchagi $\text{tg} \beta = \frac{T}{c_p}$ ga teng bo'ladi.

Agar Ts diagrammasidagi izoxora chiziqlari bilan izobara chiziqlarini taqqoslasak, mos ravishda quyidagi qiyalik burchaklarini ko'ramiz:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{T}{c_v} \quad \text{va} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{T}{c_p}.$$

Bir xil haroratlarda, izoxoraning izobaraga nisbatan o'qqa qiyaligi kattaroq bo'ladi, ya'ni izoxora chizig'i tikroq ko'tarilib boradi (2.15- va 2.17- rasmlar taqqoslab ko'rilsin).

Haroratning izoxorik jarayonda tez (nisbatan keskinroq) ko'tarilishining asosiy sababi — bu jarayonda gazga berilgan issiqlikning barchasi ichki energiyani orttirishga, ya'ni gaz haroratini ko'tarishga sarflanadi.

O'zgarmas haroratli (izoterma) jarayoni. Ishchi jism harorati o'zgarmas holda bajariladigan har qanday termodinamika jarayoni *izoterma* deyiladi.

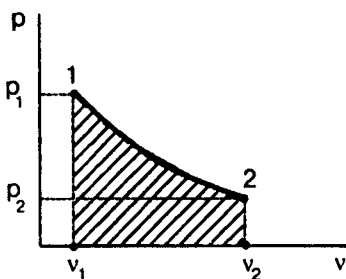
1. Jarayonning tenglamasi $p\vartheta = \text{const}$.

2. Jarayonning bajarilish sharti esa $T = \text{sonst}$.

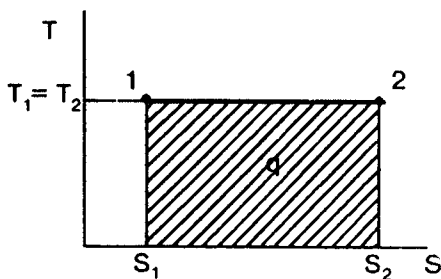
Jarayonning $p\vartheta$ diagrammadagi ifodasi logarifmik egri chiziq. Ts diagrammasida esa abssissa o'qiga parallel bo'lgan chiziqdir (18—21- rasmlar).

2. Ko'rsatkichlar orasidagi bog'lanishni jarayonning tenglamasidan aniqlash mumkin, ya'ni:

$$p_1 \vartheta_1 = p_2 \vartheta_2 = \text{const} \quad \text{yoki} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}. \quad (2.42)$$



2.18- rasm.



2.19- rasm.

Demak, jarayonda ishchi jismning bosimi uning solishtirma hajmiga teskari proporsional bog'langan.

4. Gazning bajargan tashqi ishini aniqlaymiz:

$$\ell = \int_{g_1}^{g_2} p dg.$$

Gaz holati tenglamasidan bosimi qiymatini aniqlaymiz va ishning tenglamasiga keltirib qo'yamiz, ya'ni: $p g = RT$; $p = \frac{RT}{g}$ dan

$$\ell = \int_{g_1}^{g_2} p dg = \int_{g_1}^{g_2} \frac{RT}{g} dg = RT \int_{g_1}^{g_2} \frac{dg}{g} = RT \ln \frac{g_2}{g_1}.$$

Chunki: $RT = \text{const}$ bo'lgani uchun:

$$\ell = RT \ln \frac{g_2}{g_1} \quad (2.43)$$

yoki

$$\ell = 2,3 RT \lg \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.44)$$

Jarayonda gaz ichki energiyasining o'zgarishi nolga teng bo'ladi: $\Delta u = 0$, chunki: $T_1 = T_2 = \text{const}$.

6. Jarayonda gazga beriladigan issiqlikni aniqlaymiz, bunda $\Delta u = 0$ bo'lgani uchun:

$$q = \ell = RT \ln \frac{g_2}{g_1}. \quad (2.45)$$

7. Oxirgi tenglikdan ko'rinib turibdiki, **izotermik jarayonda gazga beriladigan issiqlikning barchasi ish bajarilishiga sarf bo'ladi**. Gazning ichki energiyasi bu jarayonda o'zgarmaydi.

8. Gazga jarayonda issiqlik berilar ekan, demak uning entropiyasi ham o'zgaradi (ortadi), (2.32) tenglikka asosan:

$$\Delta s = c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} + R \int_{g_1}^{g_2} \frac{dg}{g}.$$

Ushbu jarayon $dT = 0$, ya'ni $T = \text{const}$ bo'lganligi uchun:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = R \ln \frac{g_2}{g_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}. \quad (2.46)$$

Tashqi muhit bilan issiqlik almashmaydigan (adiabata) jarayoni. Ishchi jism bilan tashqi muhit orasida issiqlik almashmaydigan har qanday holat o'zgarishidagi termodinamika jarayoni **adiabata**

deyiladi. Bu jarayonni ideal jarayon deyish mumkin, chunki haqiqiy(mavjud) jarayonlarning barchasida ham oz yoki ko'p miqdorda tashqi muhit bilan issiqlik almashinish hollari sodir bo'ladi.

Amalda adiabatik jarayonga yaqin keladigan jarayonlar o'ta tez sodir bo'ladigan jarayonlar bo'lib, ularda ichki jism tashqi muhit bilan issiqlik almashinib ulgura olmaydi, ya'ni jarayon qanchalik tez (oni) sodir bo'lsa, u shuncha adiabatga yaqinlashgan bo'ladi. Jarayon tenglamasini keltirib chiqamiz. Jarayonning bajarilish sharti esa $dq = 0$. Termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasi differensial ko'rinishda quyidagicha bo'ladi:

$$dq = c_v dT + p d\vartheta,$$

yoki (2.7) tenglikka asosan $dq = c_p dT - \vartheta dp$. Ikkala tenglikda ham $dq = 0$ bo'lgani uchun:

$$c_v dT + p d\vartheta = 0;$$

$$c_p dT - \vartheta dp = 0;$$

yoki

$$c_v dT = -p d\vartheta;$$

$$c_p dT = \vartheta dp.$$

Ikkinchi tenglikni birinchi tenglikka (qo'yamiz) bo'lib, quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$\frac{c_p}{c_v} = -\frac{\vartheta}{p} \cdot \frac{dp}{d\vartheta}.$$

$$K = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{bo'lgani uchun} \quad K = -\frac{\vartheta \cdot dp}{p \cdot d\vartheta}.$$

Ba'zi bir o'zgartirishlardan so'ng quyidagi formula hosil bo'ladi:

$$-K \frac{d\vartheta}{\vartheta} = \frac{dp}{p}.$$

Oxirgi tenglikni integrallaymiz va quyidagini hosil qilamiz:

$$-K \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{\vartheta} = \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p}.$$

Tenglikning chap tomonidagi koeffitsiyent «K» ning ishorasini hisobga olgan holda logarifm belgisi ostiga kiritamiz:

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = \ln \left(\frac{\vartheta_1^K}{\vartheta_2^K} \right).$$

Matematika kursidan ma'lumki, agar ikki sonning logarifmlari o'zaro teng bo'lsa, ularning o'zlari ham bir-biriga teng bo'ladi.

Shunga ko'ra:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{g_1^K}{g_2^K}.$$

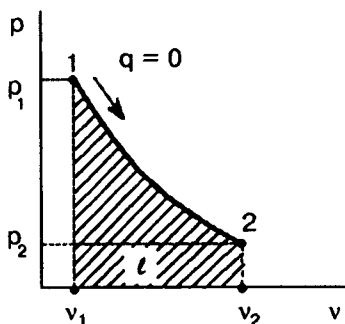
yoki oxirgi tenglikdan quyidagini yozish mumkin:

$$p_1 g_1^K = p_2 g_2^K = \dots = p_n g_n^K = \text{const}.$$

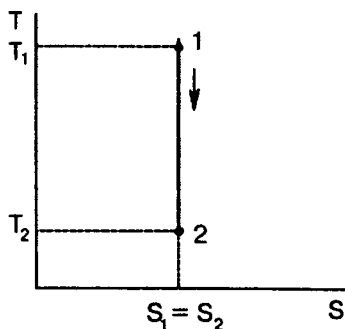
Shunday qilib, adiabatik jarayonning tenglamasi umumiy holatda quyidagicha bo'ladi:

$$p g^K = \text{const} \quad (2.17)$$

Adiabatik jarayonning $p\vartheta$ diagrammadagi ifodasi giperbola chizig'i bilan, Ts diagrammada esa vertikal (ordinata o'qiga parallel) chiziq bilan ifodalanadi.



2.20- rasm.



2.21- rasm.

Jarayonda gaz ko'rsatkichlari orasidagi bog'lanish:

a) bosim va solishtirma hajm orasidagi bog'lanishni jarayonning tenglamasidan olamiz:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{g_2}{g_1} \right)^k \quad \text{yoki} \quad \frac{g_1}{g_2} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}; \quad (2.48)$$

b) harorat va solishtirma hajm orasidagi bog'lanishni aniqlash uchun jarayondan gazning boshlang'ich va oxirgi holatlarini xarakterlovchi tenglamalarni yozib, ularni o'zaro bo'lamiz:

$$p_1 g_1 = RT_1 \quad \text{yoki} \quad p_2 g_2 = RT_2.$$

$$\text{va:} \quad \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (2.49)$$

Oxirgi (4) tenglikka p_1/p_2 nisbatning qiymatining (2.49) tenglikdan keltirib qo'yamiz:

$$\left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}\right)^K \cdot \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Soddalashtiramiz:

$$\left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}\right)^{K-1} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\text{yoki} \quad \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{1}{K-1}} = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}; \quad (2.50)$$

d) harorat bilan bosim orasidagi bog'lanishni aniqlash uchun (2.49) tenglikka ϑ_1/ϑ_2 nisbatning qiymatini (2.48) tenglikdan keltirib qo'yamiz:

$$\frac{p_1}{p_2} \cdot \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{K}} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Soddalashtiramiz:

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{K-1}{K}} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{va} \quad \frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\frac{K}{K-1}}. \quad (2.51)$$

Ichki energiyaning o'zgarishi yuqorida ko'rib o'tilgan termodinamika jarayoni kabi bo'ladi, ya'ni:

$$\Delta u = u_1 - u_2 = c_v (T_2 - T_1).$$

Jarayonda gazning bajargan tashqi ishini aniqlash uchun termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasidan foydalanamiz:
 $dq = du + d\ell$.

Adiabatik jarayonda $dq = 0$ bo'lgani uchun $d\ell = -du = -c_v dT$.
 Oxirgi tenglikni integrallaymiz:

$$\ell = - \int_{T_1}^{T_2} c_v dT = -c_v (T_2 - T_1) = c_v (T_1 - T_2).$$

Tenglikdagi c_v ning qiymatini quyidagi ko‘rinishda o‘zgartiramiz:

Ma'lumki, $c_p - c_v = R$ va $\frac{c_p}{c_v} = K$ edi. Demak: $c_p = c_v \cdot K$ yoki $c_v K = R$; $c_v (K - 1) = R$; $c_v = \frac{R}{K - 1}$ bo'ladi.

Endi c_v ning qiymatini ish tenglamasiga keltirib qo'yamiz va quyidagini hosil qilamiz:

$$\ell = \frac{R}{K - 1} (T_1 - T_2). \quad (2.52)$$

Gaz holati tenglamasidan $p_1 \vartheta_1$ foydalanib, oxirgi tenglikning ko'rinishini o'zgartirish mumkin, ya'ni tenglikdagi qavsdaagi T_1 va T_2 o'rniga $p \vartheta$ ko'paytmalarini qo'yamiz:

$$\ell = \frac{1}{K - 1} (p_1 \vartheta_1 - p_2 \vartheta_2). \quad (2.53)$$

Agar oxirgi tenglamadagi ni qavs tashqarisiga chiqarsak va jarayondagi ko'rsatkichlar orasidagi bog'lanishlardan foydalanib, tenglamaga matematik o'zgartirishlar kiritsak, adiabatik jarayonda bajarilgan ish uchun yana bir tenglama hosil qilamiz:

$$\ell = \frac{p_1 \vartheta_1}{K - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] = \frac{p_1 \vartheta_1}{K - 1} \left[1 - \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \right)^{K-1} \right]. \quad (2.54)$$

Adiabatik jarayonda gazga tashqaridan issiqlik berilmagani uchun ishchi jismning bajargan ishi ichki energiyaning kamayishi hisobiga bo'ladi, ya'ni gaz tashqi ish bajarishi uchun uning ichki energiyasi kamayishi kerak.

Gaz ichki energiyasini o'zgartirish uchun sarflanadigan issiqlikning qismi bu jarayon uchun quyidagicha bo'ladi:

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{\Delta u}{0} = \infty.$$

Adiabatik jarayonda $dq = 0$ bo'lgani uchun entropiya o'zgar-maydi. Shuning uchun adiabatik jarayon ba'zi hollarda «izoen-tropiya» jarayoni deb ham yuritiladi. Buni 2.22- rasmdan ham osongina tushunish mumkin. Jarayonning tenglamasidagi daraja ko'rsatkichi — « K » **adiabata ko'rsatkichi** deyiladi. Uning son qiymati gazning turiga bog'liq bo'lmay, faqat gaz molekulasining atom soniga bog'liq.

Umumiy (politrop) jarayonlar. Yuqorida ko'rib chiqilgan 4 ta termodinamika jarayonining har biri uchun bajarilish sharti mavjud edi. Masalan, hajm o'zgarmas, bosim o'zgarmas va hokazo. Tabiatda uchraydigan termodinamika jarayonida ishchi jismning barcha ko'rsatkichlari o'zgarishi va sistema tashqi muhitdan ajralmagan bo'lishi mumkin.

Haqiqiy (real) termodinamika jarayonlarida ishchi jism holati murakkab sharoitda o'zgaradi, yuqorida qarab chiqilgan 4 ta sodda termodinamika jarayonlari shu murakkab (real) jarayonlarning faqat xususiy hollari bo'ladi. Shunday qilib, politrop jarayonlari hech qanday bajarilish shartiga ega bo'lmagan eng umumiy termodinamika jarayonlaridir.

Jarayonning tenglamasi keltirib chiqariladi. Ilgari ko'rib o'tganimizdek, har bir termodinamika jarayoni uchun α ning qiymati quyidagicha:

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} \quad \text{yoki} \quad q = \frac{\Delta u}{\alpha}.$$

Tenglikni differensiallaymiz:

$$dq = \frac{1}{\alpha} du = \frac{c_v}{\alpha} dT.$$

Bunda: $\frac{c_v}{\alpha}$ nisbat politrop jarayoniga **gazning issiqlik sig'imi** deyiladi va c_n bilan belgilanadi. U holda:

$$dq = c_n dT. \quad (2.55)$$

Termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasini differensial ko'rinishda yozamiz:

$$dq = c_v dT + pd\theta.$$

Ushbu tenglik bilan (2.54) tenglikni taqqoslab, quyidagi tenglikka ega bo'lamiz:

$$c_n dT = c_v dT + pd\theta;$$

$$c_n dT - c_v dT - pd\theta = 0;$$

$$\text{yoki} \quad (c_n - c_v) dT - pd\theta = 0. \quad (2.56)$$

dT ning qiymatini aniqlash uchun gaz holati tenglamasidan « T » ni aniqlab, keyin differensiallaymiz:

$$p\vartheta = RT; \quad T = \frac{p\vartheta}{R}$$

yoki

$$dT = \frac{d(p\vartheta)}{R}.$$

dT ning qiymatini (2.56) tenglikka keltirib qo'yamiz:

$$\frac{c_n - c_v}{R} (pd\vartheta + \vartheta dp) = pd\vartheta.$$

Tenglikning o'ng va chap tomonlarini $\frac{c_n - c_v}{R}$ nisbatga bo'lamiz va ifodani ixtisamlaymiz:

$$pd\vartheta + \vartheta dp - \frac{R}{c_n - c_v} pd\vartheta = 0$$

yoki:

$$\vartheta dp + \left(1 - \frac{R}{c_n - c_v}\right) pd\vartheta = 0. \quad (2.57)$$

Qavs ichidagi ifodani soddalashtiramiz, ya'ni:

$$1 - \frac{R}{c_n - c_v} = \frac{c_n c_v - c_p + c_v}{c_n - c_v} = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}.$$

Oxirgi ifoda politrop jarayonning ko'rsatkichi deyiladi va « n » bilan belgilanadi:

$$\frac{c_n - c_p}{c_n - c_v} = n.$$

Shunday qilib, (2.57) tenglikni quyidagicha yozish mumkin:

$$\vartheta dp + n \cdot pd\vartheta = 0 \quad \text{yoki} \quad \vartheta dp = -n \cdot pd\vartheta.$$

Tenglikning shaklini quyidagicha o'zgartiramiz va integrallaymiz:

$$-n \frac{d\vartheta}{\vartheta} = \frac{dp}{p}; \quad \int_{p_1}^{p_2} \frac{dp}{p} = -n \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \frac{d\vartheta}{\vartheta}; \quad \ell n \frac{p_2}{p_1} = -n \cdot \ell n \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}.$$

Politrop ko'rsatkichi « n » ning ishorasini hisobga olgan holda

logarifm belgisi ostiga kiritamiz, ya'ni: $\ell n \frac{p_2}{p_1} = \ell n \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^{-n}.$

Tenglikni quyidagicha ham yozish mumkin:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\vartheta_1^n}{\vartheta_2^n} \quad \text{yoki} \quad p_1 \vartheta_1^n = p_2 \vartheta_2^n.$$

Shunday qilib, politrop jarayonning tenglamasi kelib chiqadi:

$$p\vartheta^n = \text{const.} \quad (2.58)$$

Politrop jarayoni (ilgari aytib o'tganimizdek), eng umumiy termodinamika jarayoni bo'lib, boshqa jarayonlar uning xususiy hollaridir. Buning isboti uchun politrop ko'rsatkichi « n » ga xususiy qiymatlar beramiz, ya'ni: 1) agar $n = 0$ bo'lsa, u holda $p\vartheta = \text{const}$, chunki $\vartheta^0 = 0$ bo'ladi yoki $p = \text{const}$ **izobarik jarayonga** aylanadi;

2) agar $p\vartheta^\infty = \text{const}$ yoki $n = \infty$ bo'lganda izoxor, $\vartheta = \text{const}$ bo'lib, **izoxorik jarayon tenglamasiga** aylanadi;

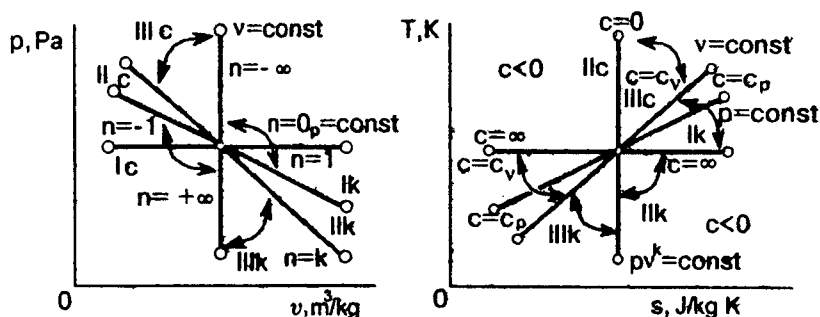
3) agar $n = 1$ bo'lsa, $p\vartheta = \text{const}$ izotermik jarayon.

4) agar $n = k$ bo'lsa, $p\vartheta^k = \text{const}$ bo'lib, mos ravishda **adiabatik jarayonning tenglamalari** holiga aylanadi.

Politrop jarayonlari faqat yuqorida qarab chiqilgan to'rtta jarayon-nigina o'z ichiga olib qolmasdan, politrop ko'rsatkichi « n » ning $+\infty$ dan $-\infty$ oraliqlaridagi qiymatlarida mavjud bo'lib, juda ko'p jarayon-lardan iborat bo'ladi. Politrop jarayonining « $p\vartheta$ » va « Ts » diagram-masida (2.22- rasm) bir nuqtadan o'tuvchi egri chiziqlar holida ifodalanadi.

Gazning kengayish jarayonini ko'rib chiqamiz. n soni qiy-matining $-\infty$ dan $+\infty$ gacha o'zgarishida ko'rilayotgan politropik jarayonlarni uch guruhga bo'lish mumkin.

Birinchi guruh uchun $-\infty < n < 1$ bo'lganda $dT > 0$, U holda $du = c_v dT > 0$ va $dh = c_p dT > 0$; politropik jarayonlarning bu qismida $ds > 0$ va demak, $\delta q > 0$. Bundan kelib chiqadiki, politropik



2.22- rasm.

jarayon uchun issiqlik sig'imi $c_n = \delta q / dT > 0$. Gazga kiritilgan issiqlik miqdori kengayish ishini bajarishga va ichki energiya ortishiga sarf bo'ladi.

Ikkinchi guruh uchun $1 < n < k$ da $dT < 0$. Bundan kelib chiqadiki, $du < 0$ va $dh < 0$. $ds > 0$ ekanligidan $\delta q > 0$, issiqlik sig'imi esa $c_n = \delta q / dT < 0$.

Ushbu guruh termodinamik jarayonlari uchun xos bo'lgan xususiyat shuki, bajarilayotgan ish kiritilayotgan issiqlik miqdori va ichki energiya hisobiga amalga oshadi.

Uchinchi guruh uchun $k < n < +\infty$; $dT < 0$; $du < 0$ va $dh < 0$. $ds < 0$ ekanligidan $\delta q < 0$ va issiqlik sig'imi manfiy ($c_n < 0$).

Ushbu jarayonlarda kengayish ishi ichki energiya hisobiga bajariladi. Shu bilan birga issiqlik ishchi jismdan o'rab turgan muhitga ham uzatiladi.

Xuddi shunday tahlilni gazning siqish jarayoni (I_s , II_s , III_s) uchun ham amalga oshirish mumkin.

Termodinamik politropik jarayonning « $p\theta$ » va « Ts » diagrammalaridagi tasvirlanishlaridan foydalanib, interpolyatsiya yo'li bilan politropik ko'rsatkich (n) qiymatlarini topish mumkin va berilgan jarayonda bizni qiziqtirayotgan kattaliklarni: gaz holati asosiy ko'rsatkichlarni, ular orasidagi bog'lanish, bajarilgan ish, ichki energiya o'zgarishi, entalpiya va hokazolarni aniqlash mumkin.

Politrop jarayonida gaz holati ko'rsatkichlari orasidagi bog'lanishni aniqlash usuli adiabatik jarayondagi kabi aniqlanadi, farqi shundaki, politrop jarayoni uchun « k » o'rniga « n » qo'yilsa yetarli, ya'ni:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^n. \quad (2.59)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{\theta_2}{\theta_1} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (2.60)$$

Shuningdek, jarayonda gaz (ishchi jism) bajargan ish ham adiabatik jarayondagi usul bilan aniqlanib, bunda ham mos ravishda « K » o'rniga « n » qo'yiladi:

$$1 = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2). \quad (2.61)$$

$$\ell = \frac{1}{n-1}(p_1 g_1 - p_2 g_2);$$

$$\ell = \frac{p_2 g_2}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = \frac{p_2 g_2}{n-1} \left[1 - \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^{n-1} \right]. \quad (2.62)$$

Politrop jarayonida gazning issiqlik sig'imi politrop ko'rsatkichi-ning ifodasi orqali aniqlanadi, ya'ni: $n = \frac{c_n - c_p}{c_n - c_v}$ tenglamada $c_p = c_v \cdot K$ ekanligini hisobga olgan holda « c_n » ning yechimini olamiz:

$$c_n = c_v \cdot \frac{n - K}{n - 1}. \quad (2.63)$$

Politrop jarayoni umumiy jarayon bo'lgani uchun issiqlik sig'imining tenglamasi boshqa (xususiyligi holdagi) termodinamika jarayonlaridagi gazning issiqlik sig'imlarini ifodalaydi, ya'ni:

- 1) $n = 0$, izobarik jarayon, $c_n = c_v \frac{0 - K}{0 - 1} = c_v \cdot K = c_p$;
- 2) $n = \infty$, izoxorik jarayon, $c_n = c_v \frac{\infty - K}{\infty - 1} = c_v \frac{\infty}{\infty} = c_v$;
- 3) $n = 1$, izotermik jarayon, $c_n = c_v \frac{1 - K}{1 - 1} = c_v \frac{1 - K}{0} = \infty$;
- 4) $n = K$ adiabatik jarayon, $c_n = c_v \frac{K - K}{K - 1} = 0$.

Izotermik jarayonda gazning issiqlik sig'imi cheksiz bo'lishiga sabab shuki, jarayonda gazga issiqlik berilaveradi, lekin uning harorati (jarayonning shartiga ko'ra) bir darajaga ham ortmaydi. Adiabatik jarayonda issiqlik sig'imi nolga teng, chunki jarayonning shartiga ko'ra gazga mutlaqo issiqlik berilmaydi, ya'ni $dq = 0$.

Politropik jarayonda gazga berilgan issiqlik quyidagicha aniqlanadi:

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

Ichki energiyaning o'zgarishi va ishning qiymatlarini formulaga qo'yamiz:

$$q = c_v(T_2 - T_1) + \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2).$$

Tenglikning ikkala tomonini $(T_2 - T_1)$ ga bo'lamiz:

$$\frac{q}{T_2 - T_1} = c_v + \frac{R}{n-1}$$

tenglikning o'ng tomonini soddalashtiramiz, ya'ni:

$$c_v - \frac{R}{n-1} = \frac{c_v \cdot n - c_v - c_p + c_v}{n-1} = \frac{c_v \cdot n - c_v \cdot k}{n-1} = c_v \frac{n-k}{n-1}.$$

Demak, yozish mumkinki: $\frac{q}{T_2 - T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1}$ chunki: $c_p = c_v \cdot k$

Shunday qilib, jarayonda gazga berilgan issiqlik quyidagicha bo'ladi:

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) \quad (2.64)$$

yoki (2.61) tenglikni hisobga olsak: $q = c_n(T_2 - T_1)$ (2.65)

yoki differensial ko'rinishda: $dq = c_n dT$. (2.66)

Jarayonda gazning ichki energiyasini orttirishga sarf bo'ladigan issiqlikning qismi (α) ni aniqlaymiz:

$$\alpha = \frac{\Delta u}{q} = \frac{c_v(T_2 - T_1)}{c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1)} = \frac{n-1}{n-k}. \quad (2.67)$$

Bu tenglikda ham shuni sezish mumkinki, « n » ning xususiy qiymatlarida α ning qiymatlari alohida termodinamika jarayonlarning qiymatlariga aylanadi.

Masalan, izoxorik jarayon uchun tekshirib ko'raylik:

$$\alpha = \frac{n-1}{n-k} = \frac{0-1}{0-k} = \frac{1}{k}.$$

Politropik jarayonda gaz entropiyasining o'zgarishini entropiya-ning asosiy tenglamasidan aniqlaymiz: $ds = \frac{dq}{T}$. Ushbu jarayon

uchun (2.66) tenglikni hisobga olgan holda $ds = c_n \frac{dT}{T}$.

Tenglikni integrallaymiz: $\Delta s = s_2 - s_1 = c_n \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$ yoki c_n ning qiymatini o'rniga qo'ysak:

$$\Delta s = c_n \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (2.68)$$

Shunday qilib, barcha jarayonlar bilan tanishib va qisqacha tahlil qilib chiqqanimizdan so'ng, ideal gazlar bilan bajariladigan barcha termodinamika jarayonlari (2.22- rasmga qaralsin) haqida quyidagi xulosalarni aytishimiz mumkin (xulosalar kengayish jarayoni uchun, siqish jarayonlari uchun esa q va Δu ning o'zgarishlarini hamda bajariladigan ishning ishorasini teskari yo'nalishda tushunmoq kerak).

1. Gazga jarayon davomida issiqlik berilishi (yoki olinishi) nuqtai nazaridan:

a) politrop ko'rsatkichi « n » ning $n > k$ qiymatlarida bajariladigan barcha jarayonlarda gazdan issiqlik olinadi, ya'ni sovitiq turish kerak bo'ladi;

b) ko'rsatkichning qiymati $n < k$ bo'lgan jarayonlarda gazga issiqlik berish (gazni isitish) orqali bajariladi;

d) ko'rsatkich « n » ning adiabat ko'rsatkichi « k » ga teng bo'lgan qiymatlarida bajariladigan jarayonlar davomida gaz tashqi muhitdan ajratilgan holda bajariladi, ya'ni gazga issiqlik berilmaydi ham, olinmaydi ham.

2. Jarayonda ishchi jism (gaz) ichki energiyasining o'zgarishi nuqtai nazaridan:

a) politrop ko'rsatkichi $n > 1$ bo'lgan jarayonlarda gazning ichki energiyasi kamayib boradi;

b) ko'rsatkichning qiymati $n < 1$ bo'lgan hollardagi jarayonlarda gazning ichki energiyasi ortadi, ya'ni jarayon davomida gaz qizib boradi;

d) $n = 1$ bo'lgan (izotermik) jarayonlarda esa gazning ichki energiyasi o'zgarmaydi.

3. Ba'zi umumiy xulosalar:

a) jarayon boshlanishida gazga berilgan issiqlik, adiabatik jarayon ($n = k$) da tashqi muhitga berilib isrof bo'lmaganligi uchun bunday jarayonda eng yuqori ish unumini olish mumkin;

b) issiqlik dvigatellarida politrop kengayish jarayonlarini adiabatik jarayonga yaqinlashtirish uchun intilish kerak;

d) porshenli issiqlik dvigatellarining mavjud konstruksiyalari sikllarida, politrop ko'rsatkichning qiymatlari $1 < n < k$ oralig'ida

bo'lganligi uchun shu oraliqdagi politrop jarayonlari dvigatel bilan shug'ullanuvchi mutaxassislar uchun alohida ahamiyatga ega.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. *Qaytuvchan jarayon va qaytuvchan sikl nima?*
2. *Tizim ichki energiyasining ma'nosi nima? U mikrozarralarning qaysi turdagi harakatlaridan iborat? Ichki energiya holat parametri ekanligini isbotlang. Ideal va real ishchi jism ichki energiyalari farqi nimada?*
3. *Ishni ifodasini ketirib chiqaring. pV — koordinatlarda jarayon egri chizig'i ostidagi maydon son jihatdan ishga tengligini tasvirlang.*
4. *Ish va issiqlik nima? Ular orasidagi umumiylik va farqlanishlar nimalardan iborat?*
5. *Termodinamikaning birinchi tenglamasini keltirib chiqaring.*
6. *Huquqiy va o'rinli issiqlik sig'imi nima? Ular orasidagi bog'lanishni (grafik va analitik) ko'rsating. Issiqlik sig'imining har xil turlarini sanang, ularning o'lchov birliklarini ayting.*
7. *Gaz aralashmalari issiqlik sig'imi, komponentlari massaviy va hajmiy ulushlari orqali qanday ifodalanadi?*
8. *Entalpiya nima, o'lchamlari qanday? Ichki energiya va entalpiya uchun hisoblash ifodalarini keltiring.*
9. *Termodinamika birinchi qonunining entalpiya orqali ifodalanishini keltiring.*
10. *Ts —koordinatalarida jarayon egri chizig'i ostidagi maydon son jihatdan ishchi jismga berilgan (yoki olingan) issiqlikka tengligini ko'rsating. Jarayonga kiritilgan yoki chiqarilgan issiqlik miqdori va entropiya o'zgarishi orasidagi bog'lanish qanday?*
11. *Termodinamika birinchi qonuni tenglamasining har xil ko'rinishlari, issiqlik sig'imi formulalarini, entalpiya, entropiya formulalaridan foydalanib, issiqlik, issiqlik miqdorini hisoblash ifodalarini keltiring.*
12. *Yopiq tizimlar uchun ideal gazning asosiy dinamik jarayonlari tahlilini bering. Ish, issiqlik miqdori, entropiya, holat asosiy parametrlarining orasidagi bog'lanishlarni keltirib chiqaring.*
13. *Politrop jarayon umumiy jarayon ekanligini isbotlang. pV , Ts —koordinatalarda politropik kengayish va siqish jarayonlarining har xil guruhlarini tahlilini keltiring.*

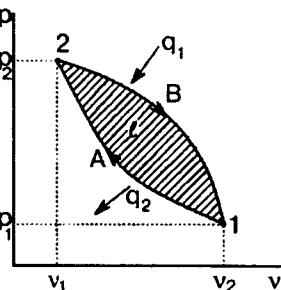
III BOB. TERMODINAMIKANING IKKINCHI QONUNI

3.1. Aylanma jarayonlar (yoki sikllar)

Issiqlik mashinasining uzluksiz ishlashi uchun avval qarab chiqilgan (ideal gazlarda termodinamika jarayonlarining tahlili qo'llanmaning II bobi) termodinamika jarayonlarining birortasidan ham alohida holatda foydalanib bo'lmaydi. Bu jarayonlar bajarilishi uchun mashinaning porsheni uzluksiz ravishda bir yo'nalishda harakat qilaverishi kerak, lekin bunga mashinaning cheklangan real o'lchamlari yo'l qo'ymaydi.

Biron bir arziydigan miqdordagi ishni olish uchun ishchi jism kengayish jarayonini uzluksiz takrorlab turishi taqozo qilinadi. Buning uchun ishchi jismni dastlabki ishchi holatiga siqish jarayoni orqali qaytarib kelish kerak bo'ladi.

Issiqlik mashinasida qisish jarayonida sarflanadigan ish kengayish jarayonida gazdan olinadigan ishdan ancha kam bo'lishi kerak, aks holda issiqlik mashinasi ishlamaydi. Boshqacha aytganda (3.1- rasmga qarang), pV - diagrammasida qisishni ifodalovchi egri chiziq (1-A-2), kengayishni ifodalovchi chiziq (2-B-1) dan ancha pastroqda joylashishi kerak. Mashina ishchi jismining holati 1-B-2-A-1 yopiq kontur bo'yicha o'zgarib turadi, ya'ni goh kengayib, goh qisilib dastlabki holati (1) ga kelib turadi. Bunday yopiq jarayonlarni *aylanma jarayonlar yoki sikllar* deyiladi.



3.1- rasm.

Tabiatdagi mavjud mashinalarning aksariyat qismi ochiq konturdagi aylanma jarayonlar bo'yicha ishlaydi, chunki ishchi jism ishni bajarib bo'lib, silindrdan atmosferaga chiqarilib yuborilib, silindrga yangi porsiya ishchi jism (havo) kiritiladi. Bunday jarayonlarni ham shartli ravishda shakl yopiq deb yuritilaveradi, chunki termodinamika tadqiqotlarda siklga yangi ishchi jism (havo) kiritamizmi yoki ilgirisini ayni paytda oldingi holatiga qaytarib (tutundan tozalab) yana qayta ishlatamizmi farqi yo'q.

Issiqlik mashinalarida sodir bo'ladigan hodisalar takroriy xarakterga ega bo'lganligi uchun termodinamika tadqiqotlarida faqat bir siklni qarab chiqsak yetarli bo'ladi.

Sikl uchun termodinamikaning birinchi qonuni quyidagicha yoziladi:

$$q_1 - q_2 = u_2 - u_1 + \ell . \quad (3.1)$$

Bunda: q_1 — kengayish jarayonida gazga berilgan issiqlik miqdori;

q_2 — qisish jarayonida gazdan sovitkichga o'tgan issiqlik miqdori.

Aylanma jarayonda gazning keyingi holati dastlabki holatiga to'g'ri keladi. va'ni gaz siklni bajarib bo'lib to'la ilgari holatiga qaytishi kerak, shuning uchun siklda ichki energiyaning o'zgarishi nolga teng:

$$u_2 - u_1 = 0 .$$

(3.1) ifodada ℓ siklda olingan (foydali) ish bo'ladi. Aylanma jarayonda olingan ish grafik usulda 1-A-2-B-1 egri chiziqning ichidagi yuza (3.1- rasm) orqali ifodalangan.

Siklning issiqlik tenglamasi termodinamikaning birinchi qonuniga asosan quyidagicha yoziladi:

$$q_1 - q_2 = \ell . \quad (3.2)$$

Uzluksiz ishlayotgan issiqlik dvigatelida gazga berilgan issiqlik miqdorining hammasi ishga aylanmay, bir qismi (q_2 qismi), albatta, sovitkichga o'tishi kerak. Shuning uchun siklning **termik foydali ish koeffitsiyenti** (FIK) degan tushuncha kiritiladi:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} . \quad (3.3)$$

Siklda ishga aylangan issiqlik miqdori ($q_1 - q_2$)ning jami gazga berilgan issiqlik miqdori (q_1) ga nisbati siklning foydali ish koeffitsiyenti deyiladi.

Termodinamika siklida hamma vaqt ($q_1 > q_2$) bo'lganligi uchun termodinamika FIK doimo 1 dan kichik bo'ladi, ya'ni: $\eta_t < 1$.

Agar siklda jarayonlarning bajarilishi soat mili yo'nalishida bo'lsa, issiqlik dvigatelining sikli (3.1- rasm), agar jarayonlarning bajarilish ketma-ketligi teskari yo'nalishda bo'lsa, sikldan foydali ish o'rniga salbiy ish olinadi (sarflanadi), bunday sikllar sovitish tizimlari (xolodilnik) ning sikli bo'ladi.

3.2. Karno sikli

Ilgari aytib o'tganimizdek, har qanday termodinamika siklining termik FIK quyidagicha bo'ladi:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}. \quad (3.4)$$

Bunda q_1 va q_2 larning qiymatlari siklni tashkil qilgan termodinamika jarayonlarning turiga va ularning ketma-ketligiga bog'liq. Shuning uchun termodinamikada mavjud bo'lgan xilma-xil sikllar orasida qanday sikl eng yuqori FIK beradi (hatto u faqat nazariy bo'lsa ham), degan muammo issiqlik texnikasi fani oldida turadi. Bunday sikl, har qanday boshqa siklning takomillashish darajasini, ya'ni issiqlikdan foydalanishning qay darajadaligini bilish uchun zarur. Ana shunday eng mukammal termodinamika siklini 1824- yilda fransuz muhandisi Sadi Karno taklif qildi. Karno taklif qilgan sikl ikkita izotermik va ikkita adiabatik jarayonlardan tashkil topgan (3.2- rasm: — 1—2 va 3—4 izotermik jarayonlar, 2—3 va 4—1 adiabatik jarayonlar).

T_1 — ishchi jismning dastlabki harorati bo'lib, issiqlik manbaining haroratiga teng.

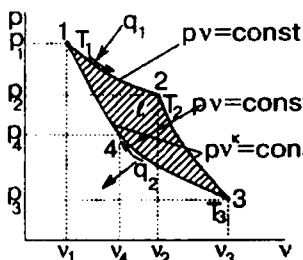
T_2 — adiabatik kengayish oxiridagi harorat bo'lib, sovitkichning harorati hisoblanadi.

Bunday siklning termik FIK eng yuqori bo'lishi sababini shu ikki xil termodinamika jarayonlarining tahlilidan qidirish kerak bo'ladi. Ma'lumki, izotermik jarayonda gazning ichki energiyasi o'zgarmaydi ($u = 0$), shuning uchun gazga berilgan issiqlik miqdorining barchasi ishga aylanadi ($q = \ell$). Adiabata Karnoning to'g'ri sikli jarayoni, ilgari aytib o'tganimizdek, gazga berilgan issiqlikni atrof-muhitga chiqarmaydi, ya'ni gazning izotermik jarayondan qolgan ichki energiyasini to'la ishga aylantiradi: ($q_1 - q_2 = \ell$).

Yuqoridagi mulohazalarga ko'ra gaz qator holat o'zgarishlarini (jarayonlarni) bosib o'tib, o'zining dastlabki holatini egallaydi va eng yuqori (nazariy) FIK ga ega bo'ladi. Siklning termik FIK ni keltirib chiqaramiz, (3) tenglikka ko'ra:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

Issiqlik miqdori gazga 1—2 izotermik jarayonda beriladi, shuning uchun:



3.2- rasm.

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}. \quad (3.5)$$

3–4 jarayonida gazni siqish (izo-termik) uchun sarflangan ishning barchasi issiqlikka aylanadi va q_2 issiqlik miqdori sovitkichga beriladi:

$$q_2 = RT_2 \ln \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}. \quad (3.6)$$

Issiqlik miqdorlarining qiymatlarini FIK tengligiga keltirib qo'yamiz:

$$\eta = \frac{RT_1 \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} - RT_2 \ln \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}}{RT_1 \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}} = \frac{T_1 \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} - T_2 \ln \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}}{T_1 \ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1}}. \quad (3.7)$$

Ushbu tenglikda $\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}$ ekanligini isbotlab ko'ramiz.

Ko'rsatkichlar orasidagi bog'lanishga asosan 2–3 adiabatik jarayoni uchun quyidagini yozish mumkin:

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_3} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Shunday bog'lanishni endi 4–1 adiabatik jarayoni uchun ham yozamiz:

$$\frac{\vartheta_1}{\vartheta_4} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Olingan ikkala tenglikni taqqoslasak:

$$\frac{\vartheta_2}{\vartheta_3} = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_4} \quad \text{yoki} \quad \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}$$

ekanligini ko'ramiz. Demak, $\ln \frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} = \ln \frac{\vartheta_3}{\vartheta_4}$ bo'lganligi uchun (3.4) tenglikda ular o'zaro qisqaradi, ya'ni:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; \quad \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.8)$$

Shunday qilib, qaytar Karno siklining termik FIK issiqlik manbaining va sovitkichning absolyut haroratlariga bog'liq. Haroratlar farqi qancha katta bo'lsa, siklning FIK shuncha katta bo'ladi.

(3.5) ifodadan yana shuni ko'rish mumkinki, siklning termik

FIK har doim birdan kichik bo'ladi. Bunda birdan ayriluvchi $\frac{T_2}{T_1}$ nisbat hech qachon nolga teng bo'lmaydi. Bu nisbat nol bo'lishi uchun quyidagi ikkita shartlardan biri bajarilishi kerak: $T_2 = 0$ ($t_2 = -237,15^\circ\text{C}$) yoki $T_1 = \infty$. Ma'lumki, ikkala shart ham bajarilishi mumkin emas.

Demak, siklda gazga beriladigan issiqlik miqdorini to'la ishga aylantirish mumkin emas, har qanday sharoitda ham berilgan issiqlikning bir qismi ishga aylanmay sovitkichga o'tadi. Agar sovitkich va issiqlik manbalarining haroratlariga teng bo'lsa, ya'ni: $T_1 = T_2$ bo'lsa, $\eta_i = 0$ bo'ladi.

3.3. Teskari Karno sikli

Karno siklining shakli o'zgarmay faqat jarayonlarning yo'nali-shi soat mili yo'nalishiga teskari bo'lsa, teskari Karno sikli deyiladi va sovitish mashinalarining ideal sikli bo'lib hisoblanadi. Bunda sikldan foydali ish olinish o'rniga, siklni bajarish uchun ish sarflash kerak bo'ladi. Siklda issiqlik miqdori sovuqroq jismdan issiqroq jismga haydaladi. Sovitkichlarning kompressorlariga sarflanadigan ish yuqorida aytilgan teskari siklni amalga oshirish uchun sarflanadi deb tushunish kerak. Teskari Karno siklining sovitish koeffitsiyenti quyidagicha bo'ladi:

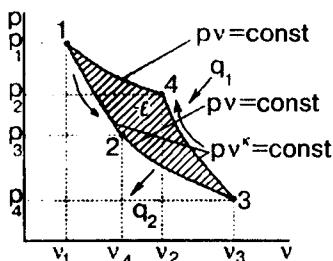
$$\varepsilon = \frac{q_2}{\ell} \quad \text{yoki} \quad \varepsilon = \frac{T_2}{T_1 - T_2}. \quad (3.9)$$

Bunda: q_2 — sovitkichdan olingan issiqlik miqdori;

ℓ — siklni bajarish uchun sarflanadigan ish miqdori.

Sovitish koeffitsiyenti ε ning ortishi uchun T_2 ning ortishi va ayniqsa T_1 ning kamayishi kerak.

Muhandis Karnoning termodinamika uchun xizmati asosan shunda bo'ldiki, uning taklif qilgan sikli orqali quyidagi qoida yaratildi: *Issiqlikni mexanik ishga aylantirish uchun issiqlik manbaidan tashqari sovitkich ham bo'lishi zarur, ya'ni faqat haroratlar farqi bo'lgandagina mumkin.*



3.3- rasm.

Texnikada shunday FIK ga ega bo'lgan sikl yaratilganmi degan savolga javob beradigan bo'lsak, faqat yo'q degan javobni berishimiz mumkin. Chunki bu sikl issiqlikdan foydalanish nuqtai nazaridan eng mukammal bo'lgani bilan kamchilikka ham ega.

Teskari sikl nihoyatda oz bo'ladi, ya'ni sikldan olinadigan ish (ℓ) oz bo'ladi. Yuqori bosim va katta hajmli mashina qilinsa shu mashinaning o'zini

aylantirish uchun ko'p energiya ketib qoladi. Yuqoridagi mulohazalarga 3.5- rasimga ko'ra Karno sikli issiqlikdan foydalanish nuqtai nazaridan eng yuqori FIK ga ega bo'lgan nazariy sikl bo'lib qolaveradi.

3.4. Termodinamika II qonunining mazmuni

Termodinamikaning birinchi qonuni energiyaning bir turdan ikkinchi turga aylanish yo'nalishini ham, aylanish sharoitini ham ko'rsatmaydi. Ishning issiqlikka aylanishi bilan issiqlikning ishga aylanishi hodisalari orasida keskin farq bor, lekin birinchi qonunda bunga e'tibor berilmaydi.

Dvigatel ishini tormozlash yo'li bilan to'la issiqlikka aylantirish, ya'ni har qanday holatlarda ham ishni issiqlikka to'la, 100 % aylantirish mumkin. Teskari hodisa — issiqlikning ishga aylanishi hech qachon to'la bo'lmaydi. Masalan, eng mukammal issiqlik dvigatellarida ham termik FIK 60 % dan ortmaydi.

Shunday qilib, issiqlikning ishga aylanishi uchun issiqlik manbai bo'lishidan tashqari sovitkichning ham mavjud bo'lishi shart.

Ikkinchi qonunning mazmuni haqida nemis fizigi L. Bolsman shunday yozgan: «*Hamma tabiiy jarayonlar beqarorroq holatdan barqarorroq holatga o'tishdan iboratdir*».

Masalan, pastga suvning oqishi tabiiy, chunki u barqaror holati — dengizga intiladi. Suvni balandlikka oqizish uchun esa maxsus mexanizm — nasos kerak. Ikkinchi misol, issiqroq jismdan sovuq jisimga issiqlik miqdorini o'tishi tabiiy, lekin teskari hodisa — sovuq jismdan issiqroq jisimga issiqlikning o'tishi uchun esa maxsus mexanizm — sovitkich kerak bo'ladi. Endi buni issiqlik texnikasi qoidasi bo'yicha tushuntiramiz. Ish va issiqlik energiyaning uzatilish

usuli bo'lib, ulardan issiqlik barqarorroqdir. Masalan, issiqlikni saqlash mumkin, ish esa faqat bajarilayotgan paytda mavjud bo'lib, keyin u saqlanmaydi. Demak, ish issiqlikka aylanishi tabiiy bo'lib, issiqlikni ishga aylanishi uchun maxsus mexanizm, dvigatel bilan majbur qilinadi, shunda ham 100% aylanmaydi.

Demak, termodinamikaning ikkinchi qonuni birinchi qonunining ta'sir doirasini qandaydir ma'noda cheklaydi. Shu ma'noda ingliz fizigi V. Tomson-Kelvin (1851- y.) ikkinchi qonunga quyidagicha ta'rif berdi, ya'ni: ***davriy ravishda ishlab turgan dvigatelda jismni faqatgina sovitmay turib, uning issiqligini ishga aylantirib bo'lmaydi.***

V. Ostvald esa termodinamikaning ikkinchi qonunini quyidagicha ta'riflagan: ***ikkinchi darajali perfektum mobileni yaratish mumkin emas.***

R. Klauzius (1850- y.) ta'rifi bo'yicha, ***issiqlik ancha sovuq jism-dan ancha issiq jismga o'z-o'zidan o'ta olmaydi.***

Nemis fizigi L.Bolsman termodinamikaning ikkinchi qonuni holatini quyidagicha ta'rifladi: ***ikkinchi tur perfektum mobileni yaratish mumkin emas.*** Bu degani shuki, tashqaridan oz energiya olib, miqdor jihatdan ko'p energiyaga ekvivalent bo'lgan ish bajaruvchi dvigatelning bo'lishi mumkin emas. Ortiqcha ishni «hech narsa» hisobiga bajarishga to'g'ri keladi. ***«Hech narsa» hisobiga ish bajaruvchi dvigatelni birinchi turdagi perfektum mobile deyiladi.***

Ikkinchi turdagi perfektum mobile deganda, qandaydir issiqlik manbaidan issiqlik olib, bir xil jarayonni ixtiyoriy ravishda takrorlash uchun issiqlikning bir qismini to'laligicha o'ziga qabul qiluvchi jismning ishtirokisiz ishga aylantiruvchi issiqlik dvigateli tushuniladi.

3.5. Karno teoremasi

Qaytar Karno siklining termik FIK ishchi jismning turiga bog'liq bo'lmay, u faqat issiqlik manbai va sovitkichlar haroratlarining farqiga bog'liq. Chunki termik FIK ni aniqlaydigan ifodada T_1 va T_2 haroratlar bor xolos, ishchi jismning fizik ko'rsatkichlari esa ifodada ishtirok etmaydi.

Teoremani shunday tushunish kerak: Karno siklini bajarishda ishchi jism bo'lib, ideal gaz bo'lsa ham, real gaz bo'lsa ham, suv bug'i bo'lsa ham, uning termik FIK bir xil bo'lib qolaveradi (T_1 va T_2 larning teng qiymatlarida):

$$\eta_{it}^{ideal\,gaz} = \eta_{it}^{real\,gaz} = \eta_{it}^{suv\,bug'i} = \dots \quad (3.10)$$

Chunki termik FIK ni aniqlaydigan ifoda T_1 va T_2 haroratlar bor xolos, ishchi jismning fizik ko'rsatkichlari esa ifodada ishtirok etmaydi.

Buning uchun ikkita A va B qaytuvchan Karno siklida ishlovchi ideal mashinaning ishlashini tahlil qilaylik.

Ikkala mashina ham T_1 haroratga ega bo'lgan umumiy issiqlik manbaiga va T_2 haroratga ega bo'lgan umumiy issiqlikni qabul qiluvchiga ega.

Ikkala mashina ham bir xil ℓ ish bajaradi. Ikkala sikl uchun ishchi jism ixtiyoriy ko'rinishda tanlangan bo'lib, A mashina uchun gaz va B mashina uchun bug' qabul qilingan.

A va B mashina uchun issiqlik manbaidan olingan issiqlik miqdori mos ravishda q_1, q_1' , haroratni qabul qiluvchiga berilayotgan issiqlik miqdori esa mos ravishda q_2, q_2' .

Karno sikli bilan ishlovchi ikkala mashina uchun termik FIKni yozamiz.

$$A \text{ mashina uchun (gaz dvigateli)} \quad \eta_I = \frac{q_1 - q_2}{q_1}.$$

$$B \text{ mashina uchun (bug' dvigateli)} \quad \eta_I' = \frac{q_1' - q_2'}{q_1'}.$$

Ikkala mashinaning ishlash sharoiti bir xil va teng ish bajargani uchun

$$q_1 - q_2 = q_1' - q_2'.$$

Demak:

$$\eta_I = \eta_I'.$$

3.6. Termodinamika II qonunining matematik ifodasi

Qaytuvchan Karno siklining termik FIK quyidagicha aniqlangan edi:

$$\eta_I = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad \text{yoki} \quad \eta_I = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Ikkala tenglikning o'ng tomonlarini yozamiz:

$$1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

Yoki matematik o'zgartirib yozish mumkin:

$$\frac{q_1}{T_1} = \frac{q_2}{T_2}. \quad (3.11)$$

Agar gazdan olinadigan issiqlik (q_2) ni manfiy, gazga beriladigan issiqlik (q_1) ni musbat deb hisoblasak, (3.7) tenglik quyidagicha o'zgaradi:

$$\frac{q_1}{T_1} = -\frac{q_2}{T_2} \quad \text{yoki} \quad \frac{q_1}{T_1} + \frac{q_2}{T_2} = 0.$$

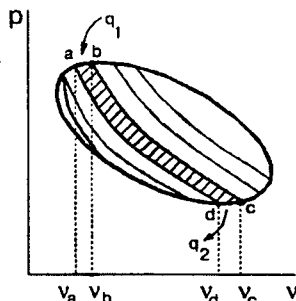
Umumiy holda:

$$\sum \frac{q}{T} = 0. \quad (3.12)$$

Bunda: $\frac{q}{T}$ — Klauzius ta'biri bilan aytganda, keltirilgan issiqlik.

Demak, qaytar Karno sikli uchun keltirilgan issiqliklarning yig'indisi nolga teng.

Yuqorida aytilgan qoida faqat qaytar Karno sikli uchun bo'libgina qolmasdan, balki hamma qaytuvchan sikllarga ham yaroqlidir. Buni isbotlash uchun ixtiyoriy qaytuvchan siklni ko'rib chiqamiz (3.4-rasm).



3.4- rasm.

Siklni bir-biriga cheksiz yaqin ad va bc va hokazo adiabatlar chiziqlari orqali bo'lib chiqamiz. ab , cd va hokazo chiziqlari uchun harorat o'zgarib ulgurmaydi va ular izotermik jarayonlar qaytuvchan sikl hisoblanadi. Shunday qilib, biz siklni cheksiz ko'p miqdordagi elementar Karno sikllariga bo'lib yubordik. Elementar Karno siklini $a-b-c-d$ uchun yozamiz:

$$\sum \frac{dq}{T} = 0.$$

Agar butun kontur bo'yicha integrallasak, qaytar sikl uchun quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\oint \frac{dq}{T} = 0. \quad (3.13)$$

Demak, **ixtiyoriy qaytuvchan sikl uchun keltirilgan issiqliklarning integral yig'indisi nolga teng.** Yuqoridagi (3.9) ifoda Klauzius (1854- y.) tomonidan taklif qilingan.

$\frac{dq}{T} = dS$ — ifoda gazning entropiyasi bo'lgani uchun qaytuvchan Karno sikli uchun entropiyaning o'zgarishi quyidagicha bo'ladi:

$$\oint \frac{dq}{T} = 0 \quad \text{yoki} \quad \oint dS = 0. \quad (3.14)$$

Demak, Karno sikli bo'yicha qaytar jarayon uchun entropiyaning o'zgarishi doimo nolga teng.

Har qanday qaytmas sikl uchun esa:

$$\eta_{\text{qaytmas}} < \eta_{\text{qaytuvchan}}; \quad \frac{dq_1}{T_1} - \frac{dq_2}{T_2} < 0.$$

Demak:

$$\sum \frac{dq}{T} < 0.$$

Agar bajarilayotgan siklni to'la kontur bo'yicha ifodalovchi funksiyani to'la differensialini hisobga olsak, quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\oint \frac{dq}{T} < 0 \quad \text{yoki} \quad \oint \frac{dq}{T} \leq 0.$$

Ularning yig'indisi esa:

$$dS = \frac{dq + dq_{\text{ishq}}}{T} = \frac{dq}{T} + \frac{dq_{\text{ishq}}}{T}. \quad (3.15)$$

Bunda: q_{ishq} — ishqalanishda yo'qotilgan issiqlik bo'lib, gaz entropiyasining ortishiga olib keladi.

Demak, elementar qaytmas siklda keltirilgan issiqliklarning yig'indisi manfiy bo'ladi.

Qaytmas sikl uchun esa quyidagicha bo'ladi:

$$dq + dq_{\text{ishq}}. \quad (3.16)$$

(3.9) va (3.12) tengliklarni umumlashtiramiz, ya'ni:

$$\oint \frac{dq}{T} \leq 0. \quad (3.17)$$

Bu ifoda termodinamika ikkinchi qonunining matematik ifodasi hisoblanadi.

3.7. Qaytmas siklda entropiyaning o'zgarishi

Faraz qilaylik, ixtiyoriy qaytmas siklda gaz tashqaridan issiqlik olib ish bajaradi. Gazning molekulari harakat natijasida bir-biri hamda idish devori bilan to'qnashadi.

Demak, bir-birining orasidagi, devor va molekula orasidagi ishqalanish kuchini yengadi. Ishqalanishdan hosil bo'lgan issiqlikni albatta ishchi jism (gaz) oladi. U holda gazning olgan barcha issiqligi quyidagicha bo'ladi:

$$q + q_{ishq}.$$

Ishchi jism entropiyasining elementar o'zgarishi dS har doim musbat, ya'ni $dS > 0$ bo'lgani uchun:

$$dS > \frac{dq}{T}. \quad (3.18)$$

(3.18) tengsizlikka asosan, aytish mumkinki, qaytmas sikllarda gaz (ishchi jism)ning entropiyasi ortib boradi.

(3.18) ifoda qaytmas sikl uchun termodinamikaning ikkinchi qonunining matematik ifodasi hisoblanadi.

Izolyatsiyalangan tizimda gaz entropiyasining o'zgarishi va sistema ish qobiliyatining yo'qolishi. Agar izolyatsiyalangan termodinamika tizimda qaytar jarayonlar sodir bo'layotgan bo'lsa, u holda $dq = 0$,

$ds = \frac{dq}{T} = \frac{0}{T} = 0$ bo'ladi, ya'ni izolyatsiyalangan termodinamika tizimida faqat qaytar jarayonlar sodir bo'layotganda gazning entropiyasi o'zgarmay qoladi.

Izolyatsiyalangan tizimda qaytmas jarayonlar bajarilgan holatini ko'rib chiqamiz. Har qanday qaytmas jarayon uchun (3.14) ifodaga asosan quyidagi ifodalarni yozishimiz mumkin:

$$\frac{dq_2}{T_2} > \frac{dq_1}{T_1} \text{ tizim uchun esa: } \int \frac{dq_2}{T_2} - \int \frac{dq_1}{T_1} > 0. \quad (3.19)$$

Tengsizlikdan ko'rinib turibdiki, issiqlik manbaidagi issiqlik energiyasining kamayishi hisobiga entropiyaning ozayishi sovitkichdagi entropiyaning ortishidan katta. Agar izolyatsiyalangan tizimdagi qaytmas jarayonlarning boshlanishidagi entropiyani s_1 , jarayonlar oxiridagi entropiyani s_2 deb olsak, (3.15) ifodaga asosan quyidagilarni yoza olamiz:

$$\Delta s = s_2 - s_1 > 0, \text{ ya'ni: } s_2 > s_1.$$

Shunday qilib, izolyatsiyalangan tizimda bajariladigan har qanday qaytmas jarayonlar natijasida gazning entropiyasi ortadi.

Qaytuvchan va qaytmas jarayonli izolyatsiyalangan tizim uchun olingan xulosalarni umumlashtirib, quyidagini yozish mumkin:

$$\Delta s_{\text{tiz}} \geq 0. \quad (3.20)$$

Bu ifoda ham termodinamika ikkinchi qonunining matematik ifodasi hisoblanadi.

Qaytmas jarayonlar natijasida entropiyaning ortishi sodir bo'lar ekan, demak, bu jarayonning yo'nalishi haqida fikr yuritishga imkon beradi. Entropiya orqali jarayonning qaytmaslik me'yorini ham aytish mumkin (izolyatsiyalangan tizimda) chunki qaytmaslik me'yori ortishi bilan entropiya ham ortadi.

Tizim entropiyasining ortib borishi issiqlik manbai hamda sovitkichlarning haroratlarini tenglashib borishi va demak, tizim ish qobiliyatini yo'qolishi bilan bog'liq, chunki haroratlar farqi yo'q joyda issiqlik ishga aylanmaydi.

3.8. Klauzius nazariyasining xatoligi

Biz yashab turgan tabiatda sodir bo'ladigan jarayonlarning barchasi qaytmas jarayonlardir, demak, entropiyaning ortib borishi bilan tizimning bosimi, harorati va boshqa ko'rsatkichlari tenglashadi, ya'ni muvozanat holatiga keladi.

Bunda tizimning energiyasi miqdor jihatidan o'zgarmagan holda, sifat jihatdan o'zgaradi.

Shuning uchun tizim muvozanat holiga kelganda uning ish qobiliyati nolgacha kamayadi.

Tizimning bu xususiyatini birinchi bo'lib 1865- yilda R. Klauzius aniqladi (keyinroq U.

Tomson va boshqalar) va asossiz ravishda bu xususiyatni butun olamga qo'lladi. Uning nazariyasiga ko'ra, butun olam izolyatsiyalangan tizim va unda qaytmas jarayonlar sodir bo'ladi. Bunday tizimning entropiyasi ortib boraveradi va o'zining maksimal miqdoriga yetadi.

Bundan keyin entropiya orta olmaydi. Tizim ish qobiliyatini yo'qotadi, hech qanday harakat qolmaydi. Olam to'la tinchlik holatiga o'tadi, ya'ni **issiqlikning o'limi** sodir bo'ladi.

Klauziusning issiqlikning o'limi nazariyasidagi hato shundan iboratki, XIX asrning ikkinchi yarmida ijdod qilgan u va boshqa

olimlar olamni noto'g'ri ravishda izolyatsiyalangan tizim deb qaradilar. Ma'lumki, izolyatsiyalangan tizim — ideal tizim bo'lib, tabiatda deyarli uchramaydi.

Butun olam bo'lsa, fazo bo'yicha ham, vaqt bo'yicha ham cheksizdir. Olam cheksiz ko'p miqdordagi holatlarga ega bo'lib, hatto cheksiz ko'p vaqt davomida ham ishlatib tugatib bo'lmaydi. Shuning uchun butun Olam uchun entropiyaning maksimum qiymati bo'lmaydi.

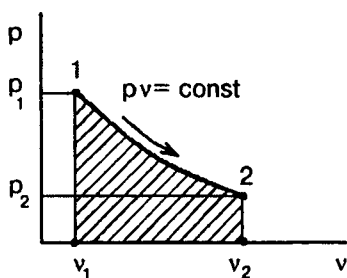
Keyinchalik issiqlikning o'limi nazariyasini o'z ilmiy ishlari bilan A. Bolsman, M. Plank, R. Xvolson, A. Smoluxovski va boshqa olimlar rad etdilar.

3.9. Termodinamika jarayonlarining va Karno siklining « pV » va « Ts » koordinatalaridagi shakllari

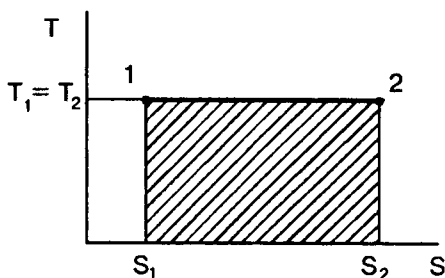
1. Izotermik jarayon ($pV = \text{const}$).

pV koordinatalarida jarayon chizig'i teng yonli giperbola chizig'i bilan ifodalanadi (3.5- rasm).

Bu jarayonda $T = \text{const}$ bo'lganligi uchun Ts da gorizontall chiziq bo'ladi (3.6- rasm). Agar shakllar masshtab bilan chizilsa, « ℓ » yuza « q » yuzaga teng bo'lishi kerak, chunki bu jarayonda $\Delta U = 0$ bo'lib, termodinamika birinchi qonunining matematik ifodasi $\ell = q$ bo'ladi.



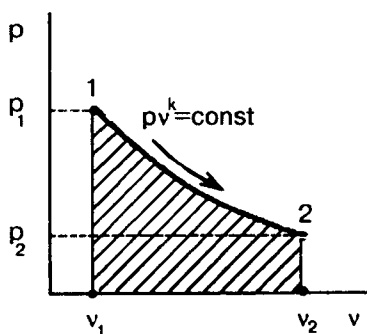
3.5- rasm.



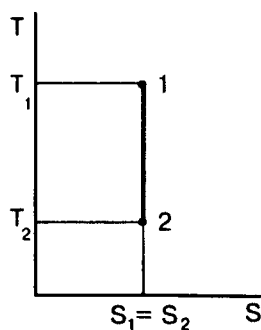
3.6- rasm.

2. Adiabatik jarayon.

Jarayonning koordinatalaridagi ifodasi oliy tartibli giperbola shaklida bo'ladi. Ts da esa $dq = 0$ bo'lganligi uchun $s = \text{const}$ bo'ladi. Shuning uchun adiabatik jarayonning yana bir nomi «izoen-tropiya»dir (3.7-, 3.8- rasmlar).



3.7- rasm.



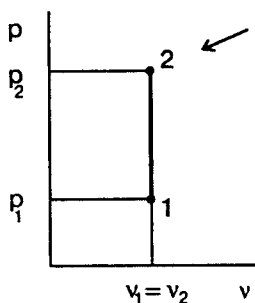
3.8- rasm.

3. İzoxorik jarayon.

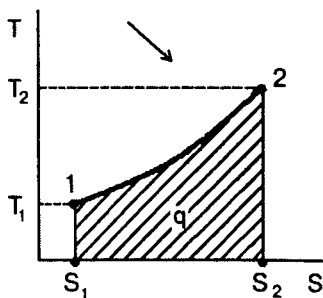
Bu jarayonda δp , ya'ni $\delta d = 0$ bo'lganligi uchun tashqi ish bajarilmaydi, ya'ni $\ell = 0$. Termodinamikaning birinchi qonunining matematik ifodasi quyidagicha bo'ladi:

$$q = \Delta u.$$

Gazga berilgan issiqlik miqdorining hammasi gaz ichki energiyasini orttirishga, ya'ni gazni qizdirishga sarflanadi (3.9-, 3.10-rasmlar).



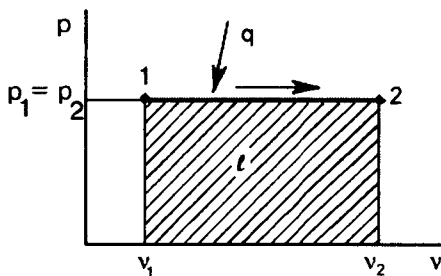
3.9- rasm.



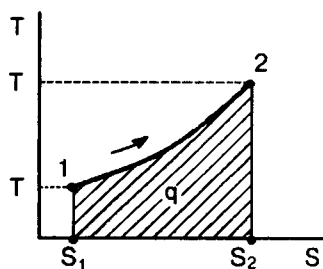
3.10- rasm.

4. Izobarik jarayon.

Bu jarayon pV koordinatalarida gorizontalar (yotiq) to'g'ri chiziq bo'lib $p_1 = p_2$ Ts da esa izoxoraga qaraganda yotiqroq egri chiziq bo'ladi, chunki izobarada gazga berilgan issiqlikning hammasi gaz haroratini orttirishga sarf bo'lmaydi. Tashqi ish (ℓ) ham bajariladi (3.11-, 3.12- rasmlar).



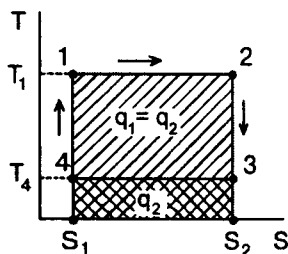
3.11- rasm.



3.12- rasm.

5. Karno sikli.

Sikl 4 ta jarayon, 2 ta izoterma va 2 ta adiabat (izoentropiya) dan iborat bo'lganligi uchun Ts koordinatalarida to'g'ri to'rtburchak shaklida bo'ladi. $p-v$ koordinatalaridagi ifodasi 3.13- rasmda berilgan.



3.13- rasm.

3.10. Eksergiya tushunchasi

Termodinamika jarayonlarning eksergetik usulda tahtili. Jismning boshlang'ich holati p_1 , T_1 dan oxirgi holati — o'rab turuvchi muhit bilan muvozanatlashgan holati ko'rsatkichlari p_0 , T_0 gacha bo'lgan qaytar jarayonda **maksimal ish** olish mumkin. Ishchi jism bajarayotgan maksimal ish **ishlash qobiliyati** yoki eksgeriya deyiladi, bunda sovitkich sifatida T_0 haroratli tashqi muhit qabul qilinadi va jarayon oxirida ishchi jism o'rab turuvchi muhit bilan termodinamika muvozanatga keladi.

Yopiq tizimlar uchun jismlar eksgeriyasini ko'rib chiqamiz. Ishchi jism p , v , T , u va S ko'rsatkichlari bilan qaytar jarayonni amalga oshirib, o'rab turuvchi muhit bilan termodinamika muvozanatiga kelsin. Ma'lumki, bu holda uning holat ko'rsatkichlari p_0 , v_0 , T_0 , u_0 va S_0 qiymatlarga ega bo'ladi. Termodinamikaning birinchi qonuniga ko'ra jarayonda ishchi jism ichki energiyasining o'zgarishi unga tashqi issiqlik ta'siri (kiritilishi yoki chiqarilishi) bilan yoki ish bajarish hisobiga amalga oshirilishi mumkin. Ishchi jismga issiqlik kiritish (yoki chiqarish) jarayonini muvozanatlash shartining bajarilishi o'rab turuvchi muhitning o'zgarmas harorati T_0 da amalga oshiriladi, ya'ni

berilgan holat uchun $\delta q = T_0 dS$. Yopiq tizimda jism eksergiyasi *de* bajarilgan ish $\delta \ell$ dan o'rab turuvchi muhit bosimini yengish uchun sarf bo'lgan ish ($p_0 d\vartheta$)ni ayirganiga teng bo'ladi. Shunday qilib:

$$de = \delta \ell - p_0 d\vartheta = \delta q - du - p_0 d\vartheta = T_0 dS - du - p_0 d\vartheta. \quad (3.21)$$

Integrallab, hosil qilamiz:

$$\begin{aligned} e &= T_0(S_0 - S) - (u_0 - u) - p_0(\vartheta_0 - \vartheta) = \\ &= (u - u_0) - T_0(S - S_0) + p_0(\vartheta - \vartheta_0). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Yoki:

$$e = (u - u_0) - T_0(S - S_0) + p_0(\vartheta - \vartheta_0). \quad (3.23)$$

Bunda: H_0 va S_0 — ishchi jismning o'rab turuvchi muhit bilan muvozanatlashgandagi entalpiyasi va entropiyasi.

Ma'lumki, yig'indi — $u_0 + T_0 S_0 - p_0 \vartheta_0 = \text{const}$, bundan ko'rindiki, agar o'rab turuvchi muhit ko'rsatkichlari ma'lum bo'lsa, eksergiyaning holat ko'rsatkichi sifatida qarash mumkin (ishchi jism holati eksergetik funksiyasi).

T_1 haroratli issiqlik manbasidan, o'rab turuvchi muhit harorati T_0 ga teng haroratli issiqlik qabul qiluvchi (sovitkich)dan va ishchi jismdan tashkil topgan izolyatsiyalangan tizimda issiqlik manbasidan ishchi jismga q_1 miqdorda issiqlik berilgan bo'lsin.

Bu holda olinishi mumkin bo'lgan maksimal ish Karnoning $T_1 - T_0$ oralig'ida amalga oshadigan qaytar sikli ishiga teng bo'ladi:

$$l_{\max} = \eta_k \cdot q_1. \quad (3.24)$$

Karno sikli uchun issiqlik FIK $\eta_k = 1 - T_0 / T_1$ ekanligidan issiqlik oqimi uchun eksergiya formulasini olamiz:

$$e_q = q_1(1 - T_0 / T_1). \quad (3.25)$$

Eksergiya tushunchasi issiqlik apparatlari jarayonlarining mukammallik darajasini tahlil qilish uchun foydalaniladi.

Issiqlik apparatiga p_1 , T_1 ko'rsatkichli ishchi jism oqimi kiritilganda issiqlik manbasidan q_1 miqdor issiqlik olinadi, issiqlik apparatidan shu ishchi jism oqimi p_2 , T_2 ko'rsatkichlari bilan chiqariladi. Bu holda issiqlik apparatida ℓ_n foydali ish bajariladi. Eksergiya yo'qolishi Δe quyidagiga teng:

$$\Delta e = [(e_1 + e_{q_1} - e_2)] - \ell_f. \quad (3.26)$$

Bunda: e_1 va e_n — jism va issiqlik oqimining issiqlik apparatiga kirishidagi eksergiyalari; e_2 — apparatdan chiqishdagi eksergiya; ℓ_f — ishchi jism bajargan foydali ish.

Eksergetik FIK:

$$\eta_e = 1 - \Delta e / e_1. \quad (3.27)$$

Bunda: Δe — kiritilayotgan va chiqarilayotgan eksergiyalar farqi;
 e_1 — kiritilayotgan eksergiya.

Issiqlik apparatlari yoki mashinalari uchun eksergetik muvozanat tenglamasi:

$$\sum_{i=1}^{l=n} e_{1,i} = \sum_{i=1}^{l=n} e_{2,i} + \ell_f + de. \quad (3.28)$$

Bunda: $\sum_{i=1}^{l=n} e_{1,i}$ va $\sum_{i=1}^{l=n} e_{2,i}$ — apparat (mashina)ga kirayotgan va undan chiqayotgan eksergiyalar yig'indisi;
 de — eksergetik yo'qotilish.

Issiqlik apparatlari va mashinalari uchun eksergetik FIK eksergetik muvozanatdan aniqlanadi:

$$\eta_{ex} = \frac{\sum_{i=1}^{l=n} e_{1,i} - de}{\sum_{i=1}^{l=n} e_{1,i}} = \frac{\sum_{i=1}^{l=n} e_{2,i} + \ell}{\sum_{i=1}^{l=n} e_{1,i}}. \quad (3.29)$$

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Termodinamikaning ikkinchi qonuni formulasini keltiring va ma'nosini ayting. Issiqlik hodisalari bilan boradigan makroskopik jarayonlari tahlili uchun nimaga termodinamika birinchi qonuniga qo'shimcha ikkinchi qonun kerak bo'ladi?
2. Siklning issiqlik FIK va sovitish koeffitsiyentining tahlilini bering.
3. Karno sikli uchun asosiy hollarni ifodalang. Karno sikli har qanday qaytar sikllarning etaloni ekanligini isbotlang.
4. Umumlashgan Karno sikli issiqlik FIK Karno sikli FIK teng ekanligini isbotlang.
5. Qaytar jarayonlar kechadigan izolyatsiyalangan tizim uchun $\oint \frac{dq}{T} = 0$

ekanligini, qaytmas jarayonlar uchun esa $\oint \frac{dq}{T} > 0$ ekanligini

ko'rsating. Entropiya o'zgarishi bilan S ($\delta q/T$) orasidagi bog'lanishlarni izolyatsiyalangan tizimdagi qaytmas jarayonlar uchun asoslang.

- 6. T_s koordinatalarda kengayish va siqish jarayonlarni tasvirlang. T_s koordinatalarda Karmo sikli, qaytmas adiabatik kengayish va siqish jarayonlar ko'rinishini keltiring.*
- 7. Termodinamika ikkinchi qonunini teng salmoqli bo'lmagan tizimlar uchun ifodalang va Klauzius integrali ma'nosini ayting.*
- 8. Entropiyaning fizik ma'nosini ifodalang.*
- 9. Eksergiya nima? Yopiq tizimda ishchi jism eksergiyasi uchun ifodani keltirib chiqaring.*
- 10. Issiqlik dvigatellari va issiqlik almashinish apparatlari eksergetik FIK ifodalanishini keltiring.*

IV bob. BUG' HOSIL BO'LISHI TERMODINAMIK JARAYONLARI

4.1. Suv bug'lari va uning asosiy xususiyatlari

Issiqlik mashinalarida, issiqlik dvigatellarida, isitish qurilmalarida ishchi jism sifatida suv bug'lari qo'llaniladi, chunki suv arzon, zaxirasi ko'p va termodinamika ko'rsatkichlari nisbatan yaxshi. Suvning suyuq holatidan bug' holatiga o'tishi **bug'lanish** deyiladi. Suvning bug'ga aylanishi 2 xil yo'l bilan bo'lishi mumkin: **bug'lanish** va **qaynash**.

Bug'lanish jarayonida suv sathiga yaqin sirtidagi molekulalar o'zlaridagi kinetik energiya hisobiga suyuqlik ichidan otilib chiqib, atmosfera (muhit)ga chiqib ketadi.

Bug'lanish — suyuqlikning ochiq turgan yuzasidan har qanday haroratda otilib chiqayotgan molekulalar hisobiga bo'ladi.

Qaynash — bug'lanishning faqat suyuqlik sirtidan tashqari butun suyuqlik hajmi bo'yicha bo'lish jarayoni. Fizika kursidan ma'lumki, suyuqliklarning qaynash harorati uning turiga va asosan muhit bosimiga bog'liq. Masalan, suv tog' sharoitlarida, ya'ni muhit bosimi past bo'lganda, 100°C dan ancha past haroratda qaynashi ma'lum.

Bug'ning suyuqlikka aylanish jarayonini **kondensatsiya** deyilib, bundan hosil bo'lgan suyuqlikni **kondensat**, qurilmaning nomi **kondensator** deb yuritiladi. Distillangan suv, yomg'ir va qor suvlari ham kondensat hisoblanadi.

Suyuqlikning bug'lanish jarayonida molekulalarning suyuqlikdan muhitga otilib chiqishidan tashqari molekulalarning suyuqlikka qaytishi ham sodir bo'ladi. Muhitga otilib chiqayotgan molekulalar sonining suyuqlikka qaytib tushayotgan molekulalar soniga tenglashganida **dinamik muvozanat** sodir bo'ladi. Bu holatdagi bug'ni **to'yingan bug'** deb ataladi. To'yingan bug'ning zichligi maksimal bug' zichligiga ega.

Bug'ning to'yingan holatga kelishi muhit haroratiga har bir muhit harorati uchun to'yinish harorati mav

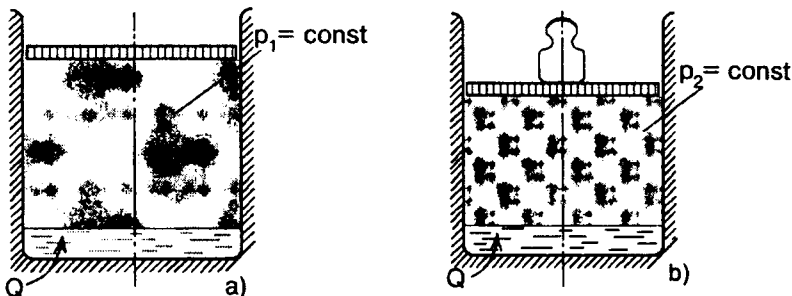
Bug'lanish jarayonida muhitga otilib chiqayotgan o'zlari bilan suvning mayda tomchilarini ham o mumkin. Shuning uchun to'yingan bug'da mayda ham bo'lib, bunday bug'ni **to'yingan nam bug'** deyil

Agar bug‘lanayotgan suvning ustki qismi (muhit) chegaralangan (aytaylik, qopqoq bilan yopilgan) bo‘lsa, ma‘lum sharoitda suv tomchilari qolmaydi. Bunday sharoitdagi bug‘ni **quruq to‘yingan bug‘** deb yuritiladi. Ko‘pincha bug‘ tarkibida ma‘lum miqdorda suv tomchilari bo‘ladi. Shu sababli bug‘lar uchun **quruqlilik darajasi** degan tushuncha kiritilgan. Agar bug‘ uchun quruqlilik darajasi $x = 0,9$ bo‘lsa, buning mazmuni bug‘ning tarkibida 10 % suv tomchilari bor, degani bo‘ladi.

Izoh: Bug‘ — moddaning gaz holati bo‘lib, oddiy ko‘z bilan ko‘rinmaydi. Agar bug‘, bug‘lanish jarayoni, ko‘zga ko‘rinayotgan ekan, demak, bug‘ tarkibida suv tomchilari bor bo‘lib, biz shu suv tomchilarini ko‘ramiz. To‘yingan bug‘ning haroratini yana orttirsak, ya‘ni qizdirsak — o‘ta qizigan bug‘ hosil bo‘ladi. O‘ta qizigan bug‘largina to‘la gaz holatiga o‘tgan bo‘ladi

4.2. Bug‘ holatining o‘zgarish diagrammalari

Suv bug‘i uchun « $p\nu$ » diagrammasi. Qo‘zg‘aluvchan porshen joylashtirilgan silindr ichiga suv quyilib, isitilmoqda. Bunday sharoitda gaz (bug‘) bosimining ortishi sodir bo‘lmaydi, ya‘ni jarayon — izobarik jarayondir (4.1- rasm, *a*). 4.1- *b*, *d* rasmlarda ham shu jarayon bo‘lib, porshen ustiga qo‘yilgan toshlar suyuqlik tepasidagi muhitning bosimini orttiradi, ya‘ni $p_2 = \text{sonst}$, $p_3 = \text{sonst}$ va hokazo sharoitlar hosil qiladi. Suvni har xil miqdordagi o‘zgarmas bosimlarda isitish va bug‘lantirish jarayonini $p\nu$ koordinatalarida ifodalaymiz. O‘ta qizigan tayyor bug‘ hosil bo‘lish 3 ta bosqichda sodir bo‘ladi: suvning qaynashgacha isishidagi izobarik kengayish — a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , ..., izobarik qaynab bug‘lanish b_1 , c_1 , b_2 , c_2 , ... va o‘ta qizigan bug‘ hosil bo‘lishi c_1 , d_1 , c_2 , d_2 , ... Shunday qilib, $p\nu$ koordinata sistemasida 3 ta qator nuqtalar hosil bo‘ldi. Mos nomlangan nuqtalarni o‘zaro birlashtirsak, 3 ta chiziq hosil bo‘ladi.

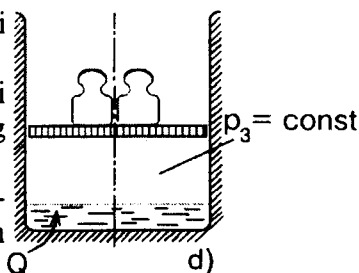


4.1- *a*, *b* rasmlar

1) «a» nuqtalarni birlashtiruvchi chiziq — sovuq suv chizig'i;

2) «b» nuqtalarni birlashtiruvchi chiziq — issiq suv chizig'i, qaynashning boshlanishi quyi chegara chizig'i;

3) «c» nuqtalarni birlashtiruvchi chiziq — qaynash (bug'lanish)ning tugash chizig'i — yuqori chegara chizig'i.



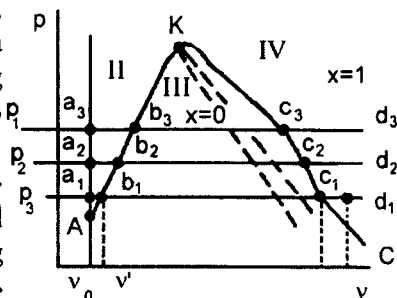
4.1- rasm.

Quyi va yuqori chegara chiziqlari o'zaro kesishgan «K» nuqta **kritik nuqta** deyiladi. Suv uchun bu nuqta ko'rsatkichlari.

$p_k = 220 \text{ bar}$ (225,5 at), $T_k = 647^\circ \text{K}$ (374°C), $v_k = 0,003 \text{ m}^3/\text{kg}$ kritik holatdagi suyuqlik uchun bug'ning va suyuqlikning xususiyatlari bir xil bo'ladi.

3 ta chiziq (A, B, C) «p-v» diagramma yuzasini 4 ta qismga ajratadi (4.2- rasm).

I — sovuq suv qismi; II — issiq suv qismi; III — qaynash, bug'lanish qismi; IV — o'ta qizigan bug' qismi. AK — quyi chegara chizig'ida bug'lanish boshlanadi, bug'ning quruqlik darajasi $X = 0$, KC — yuqori chegara chizig'ida bug'lanish tugaydi, bug'ning quruqlik darajasi $X = 1$, ya'ni 100% li bug' hosil bo'ladi.



4.2- rasm.

Suv bug'i uchun «Ts» diagrammasi. Suv bug'i hosil bo'lishida issiqlik miqdorining sarflanishini hisoblashda «Ts» diagrammasi juda qulay, chunki bu koordinatalarda grafikdagi yuza issiqlik miqdorini ifodalaydi (4.3- rasm).

Diagrammada:

ak va ks — quyi va yuqori chegara chiziqlari;

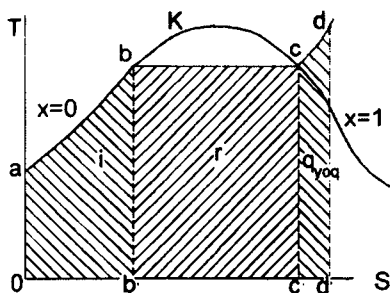
a — izobara chizig'ining boshlanishi, 0°C (273°K) T_0 ;

ab — suvni qaynash haroratigacha izobarik isitish;

i — qaynashgacha isitish uchun sarflangan issiqlik miqdori;

bc — izobarik qaynash jarayoni bir vaqtning o'zida izoterma bo'lib ham hisoblanadi, chunki qaynashning boshlanishidan tugaguncha suvning harorati o'zgarmaydi;

r — yuza ma'lum masshtabda suvning to'la bug'lanib tugashi uchun sarflanadigan issiqlikni bildirib, **bug'lanish issiqligi** deyiladi;



4.3- rasm.

$q_{o'q}$ — to'yingan (quruq) bug'dan o'ta qizigan bug' hosil qilish uchun bug'ga berilgan qo'shimcha issiqlik miqdori.

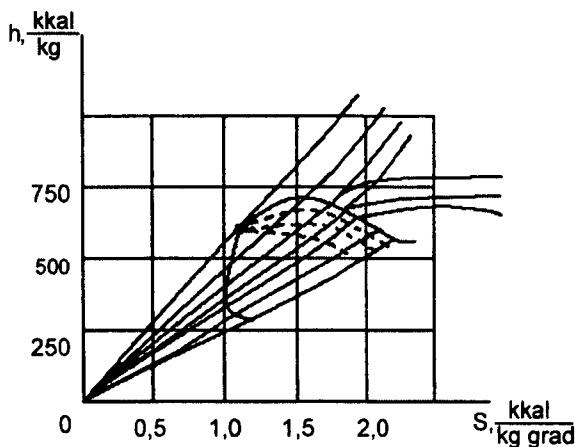
Uchala miqdorlarning yig'indisi sovuq suvdan ishlatish uchun tayyor bo'lgan, o'ta qizigan (quruq) bug' hosil qilishga sarflanadigan issiqlik miqdorini ifodalaydi:

$$q = h + r + q_{o'q}.$$

Suv bug'i uchun «hs» diagrammasi. Suv bug'ining issiqlik hisob-kitoblarida hs diagrammasidan foydalanish ancha qulayliklarga olib keladi (4.4- rasm). Lekin bu koordinatalarda issiqlik miqdorini aniqlash uchun egri chiziqlar bilan chegaralangan (qing'ir-qiyyshiq) yuzalarni o'lchashga to'g'ri keladi. Issiqlik hisoblarida bu biroz qiyinchilik va noaniqlik keltirib chiqaradi.

hs koordinatalardagi suv bug'ining diagrammasida issiqlik miqdori (entalpiya) chiziq uzunligi bilan ifodalanganligi uchun hisoblashlarga qulaylik va aniqlik kiritadi.

4.4- rasmda «0» nuqtadan chiqayotgan izobara chiziqlari $x = 1$ chizig'igacha (qaynab tugaguncha) izoterma bilan birga ketadi. Yuqori chegara chizig'i ($x = 1$) dan keyin izobara chizig'i yuqoriga tik ko'tariladi, izoterma chiziqlari esa pastroqqa qarab og'ib ko'tariladi.



4.4- rasm.

Rasmda bug'ning quruqlik darajasi bir xil bo'lgan chiziqlar ham berilgan: ($x_1 = 0,90$; $x_2 = 0,8$ va hokazo). Absissa va ordinata o'qlarida kattaliklar MKGS birliklari sistemasida berilgan. Kerakli paytda SI sistemasiga o'tish uchun olingan qiymatlarni 1 kkal = 4,19 kJ ga ko'paytirsak yetarli bo'ladi.

Issqlik mashinalarining hisoblarida yuqori bosim va quruqlik darajasi 0,5 dan yuqori bo'lganligi uchun amaliy foydalanishga mo'ljallangan «hs» diagrammalari noldan boshlanmaydi. Diagrammaning «K» nuqtadan chaprog'i va yuqorirog'i masshtablarda beriladi, ya'ni entalpiyaning $h = 1500 \frac{kJ}{kg}$ va entropiyaning $s = 4000 \frac{J}{kg \cdot K}$

dan yuqori qismi ko'proq amaliy ahamiyatga ega.

Diagrammadagi miqdorlar va suv bug'ining ko'rsatkichlari olimlar tomonidan (masalan, rus olimi M.P.Vukalovich) jadval holiga ham keltirilgan bo'lib, darsliklarda ilova sifatida berilishi mumkin.

4.3. Nam havoning xususiyatlari

Nam havoning asosiy ko'rsatkichlari. Atmosferadagi nam havo issqlik texnikasida ishchi jism sifatida juda ko'p sohalarida ishlatiladi. Issqlik dvigatellarining deyarli barchasida, quritish qurilmalarida, xonalar va texnologik jarayonlarni shamollatishda, dvigatellarning sovitish tizimlarida va hokazolarda ishchi jism — atmosferadagi havo bilan to'yingan yoki o'ta qizigan holatdagi suv bug'ining aralashmasidir. Suv bug'i bilan havoning bunday mexanik aralashmasini — **nam havo** deyiladi.

Havo tarkibida suv bug'lari ko'p hollarda o'ta qizigan holatda va bug'ning aralashmadagi bosim ulushi kam bo'lganligi uchun (shuning uchun havodagi bug' ko'zga ko'rinmaydi) nam havo ham ideal gazga juda yaqin turadi. Shu sababdan ideal gaz aralashmalarining qonuniyatlariga nam havo ham to'la bo'ysunadi.

Dalton qonuniga ko'ra nam havoning bosimi — quruq havo parsial (bosim ulushi) bosimi bilan bug'ning parsial bosimlarining yig'indisiga teng:

$$p_{bar} = p_x + p_b \quad \text{yoki} \quad b = p_x + p_b. \quad (4.1)$$

Bunda: p_{bar} — nam havoning barometrik bosimi;

p_x — quruq havoning parsial bosimi;

p_b — suv bug'ining parsial bosimi (bosim ulushi). Bosimlar birikmalari amalda ko'pincha millimetr simob ustunida (mm sm.ust.) beriladi.

Agar nam havo tarkibidagi suv bug'i qizigan holatda bo'lsa, uning zichligi quruq to'yingan bug' zichligidan ozroq bo'lib, bug'ning bosimi p_b ham to'yinish bosimi p_t dan kamroq bo'ladi. Bunday havo namlikka to'yinmagan hisoblanadi.

Agar nam havo tarkibida quruq to'yingan bug' bo'lsa, uning zichligi $p_b = p_t$, ya'ni bug'ning zichligi to'yinish zichligi bilan barobar. Bu holatda quruq bug'ning parsial bosimi, shu harorat uchun to'yinish bosimiga teng bo'ladi. Bunday havo namlikka to'yingan bo'lib, tarkibida shu sharoit uchun maksimum suv bug'i mavjud bo'ladi.

Agar nam havo tarkibida nam to'yingan bug' bo'lsa, uning zichligi (p_b) shu harorat uchun quruq to'yingan bug' zichligidan ortiq bo'lib, bunday havo tarkibida bug' miqdori to'yinish miqdoridan ham ortiqeha bo'ladi. Suv bug'ining parsial bosimidagi (p_b) to'yinish haroratini **shudring nuqtasi** deyiladi. Shundan harorat sal pasayganda havoda suv kondensatsiyalanadi, ya'ni shudring tomchilari hosil bo'ladi.

1m^3 havodagi suv bug'ining grammlarda ifodalangan miqdori **mutlaq (absolyut) namlik** deyiladi.

Bir xil haroratda havodagi mavjud suv bug'i massasining shu harorat va bosimda havoga sig'ishi (to'yinishi) mumkin bo'lgan bug' massasiga nisbati **nisbiy namlik** deyiladi:

$$\varphi = \frac{\rho_b}{\rho_T}.$$

Bunda: ρ_b , ρ_T — $2/\text{m}^3$ o'lchov birligiga ega.

Zichliklar ikkala holatda ham shu bitta harorat uchun olinganligidan quyidagini yozish mumkin:

$$\frac{\rho_b}{\rho_T} = \frac{\rho_T}{\rho_b} = \frac{p_b}{p_T}. \quad (4.2)$$

Bunda: indekslar b — bug'; T — to'yinishni bildiradi. Demak:

$$\varphi = \frac{p_b}{p_T}. \quad (4.3)$$

Bu ifoda bilan nisbiy namlikni aniqlash uchun nam havoning to'yinish bosimi (p_t) ni shu harorat uchun jadvaldan topish,

psixrometr yordamida esa bug'ning parsial bosimi (p_b) aniqlash kerak. Mahsulotlarni havo yordamida quritish jarayonida nam havodagi quruq havo miqdori o'zgarmay qolib, bug' miqdorining orttirib borish quritish tafsilotini bildiradi.

1 kg quruq havodagi suv bug'ining kg lardagi ifodasi **namlik miqdori** deyiladi:

$$d = \frac{m_b}{m_x}.$$

Namlik miqdori (d) ni topish uchun havo va suv bug'ining holat tenglamalarini olamiz:

$$p_x \cdot V_{ar} = R_x \cdot T_{ar} \quad \text{va} \quad p_b \cdot V_{ar} = m_b R_b \cdot T_{ar}.$$

Ikkinchi tenglikni birinchi tenglikka bo'lamiz:

$$\frac{p_b}{p_x} = \frac{m_b}{m_x} \frac{R_b}{R_x} = d \cdot 1,61.$$

Chunki $\frac{R_b}{R_x = 1,61}$ hamda (4.1) tenglikdan $p_x = B - p_b$ bo'lganligi uchun quyidagi ifoda kelib chiqadi:

$$d = 0,622 \frac{p_b}{B - p_b}. \quad (4.4)$$

Nam havoning gaz doimiysi va entalpiyasi. Nam havo ilgari aytganimizdek, havo va bug' aralashmasi bo'lgani uchun gaz aralashmasi sababli universal gaz doimiysi ifodasidan foydalanamiz:

$$\mu_{ap} \cdot R_{ap} = 8314$$

yoki

$$R_{ap} = \frac{8314}{\mu_{ap}} = \frac{8314}{\mu_x \cdot r_x + \mu_b \cdot r_b} = \frac{8314}{\mu_6 \frac{p_x}{B} + \mu_b \frac{p_b}{B}}. \quad (4.5)$$

(4.5) tenglikdagi havo va bug'ning molekulyar massalari $\mu_x = 29$ va $\mu_b = 18$ bo'lganligi uchun hamda parsial bosimlar $p_x = B - p_b$ bo'lganligini hisobga olib, tenglikka bir oz o'zgartirish kiritamiz:

$$R = \frac{8314}{28,3 - 10,3 \frac{\varphi \cdot p_T}{B}} \quad (4.6)$$

Nam havoning entalpiyasi quruq havo entalpiyasi bilan d kg suv bug'i entalpiyasining yig'indisiga teng:

$$h = h_x + dh_h. \quad (4.7)$$

Quruq havo uchun o'zgarmas bosimdagi issiqlik sig'imi $C_p = 1006 \text{ J/kg} \cdot \text{grad}$ bo'lganligi uchun:

$$h = 1006 t + d h_p. \quad (4.8)$$

Nam havo uchun «hd» diagrammasi. Mahsulotlarni quritish jarayomda qurituvchi ishchi jism (havo)ning fizik ko'rsatkichlarini formulalar yo'li bilan emas, grafikdan foydalanib hal qilish ancha qulaylik tug'diradi (4.5- rasm).

Mahsulotni quritishda quriyotgan moddadagi namlikning kamayishi hisobiga havo namligi ortib boradi, natijada umumiy entalpiya miqdori o'zgarmay qoladi ($h = \text{const}$). L.K.Ramzin nam havo uchun quyidagi «hd» diagrammasini taklif qilgan.

Kaloriferda qurituvchi havo $d = \text{const}$ holatda T_2 haroratgacha qizdiriladi (1-2- jarayon).

Kaloriferda havoni isitishga sarflangan issiqlik miqdori $h_2 - h_1$ koordinata bilan ifodalanadi. T_2 harorat va nisbiy namlikka ega bo'lgan havo quritish kamerasiga haydaladi, u yerda mahsulot $h = \text{const}$ sharoitida quriydi.

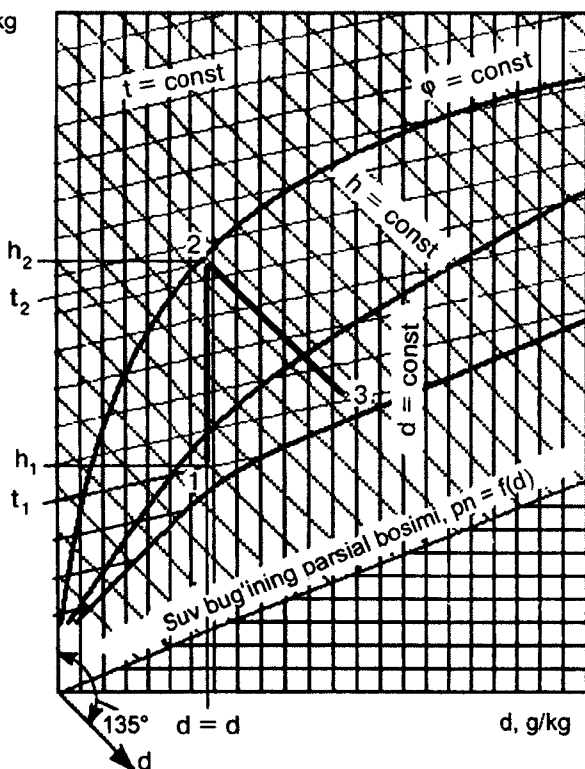
Qurituvchi havoning nisbiy namligi ortib boradi, harorati esa kamayadi. Quriyotgan mahsulotdan 1 kg havoga chiqqan namlik $d_3 - d_1$ ayirmaga teng.

Quritish kamerasidan chiqayotgan havoning harorati hd diagrammasida 3 nuqtadagi harorat bo'lib hisoblanadi.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. pV , Ts , hs koordinatalarda bug' hosil bo'lish jarayonlarini tahlil qiling. Ularning umumiy bir xilligini va farq qiluvchi xususiyatlarini ko'rsating.
2. Nam to'yingan, quruq to'yingan va qizdirilgan bug' nima? Suvni qizdirish, bug' hosil bo'lish qonuniyatlarini ko'rsating.
3. Suyuqlik va bug' holat parametrlarini o'zgarish qonuniyatlarini aniqlash tenglamalarini yozing. Ularga tushuntirish bering.
4. Bug' holati o'zgarishi jarayonlari (izoxorik, izobarik, izotermik va adiabatik) tahlil qiling. Nam va qizdirilgan bug' sohalari jarayonlarining xususiyatlarini ko'rsating.

$h, \text{kJ/kg}$



4.5- rasm.

5. To'yingan va to'yinmagan nam havo haqida tushuncha bering. To'yingan nam bug'ning turli mumkin bo'lgan yo'llarini ko'rsating (va aksincha).
6. Havoning namlik saqlash xususiyati, absolyut va nisbiy namligiga aniqlik kiriting. $\phi < 100\%$ va $\phi > 100\%$ bo'lgan sohalaridagi jarayonlar xususiyatlarini keltiring.
7. Nd diagramma yordamida aniq masalalar yeching.
9. Nam havoning ikki oqimi aralashishi jarayonini ko'rib chiqib, aniq masala yeching.
10. Havoning konditsionirlash jarayoni tahlilini Nd diagramma yordamida bajaring. Issiqlik-namlik almashinish koeffitsiyentini aniqlashni keltiring.
11. Nd diagrammada materialning nazariy quritish jarayonining tahlilini keltiring.

V BOB. OCHIQ TIZIMLAR TERMODINAMIKASI

5.1. Gaz va bug'larning quvurlarda oqishi

O'zgarmas me'yorda oqish. Texnikaning turli sohalarida uzluksiz gaz yoki bug' oqimlari bilan ishlashga to'g'ri keladi. Masalan, bug' mashinalarida, gaz turbinalarida, turbokompressorlarda, reaktiv dvigatel va qurilmalarda va hokazo.

Gaz va bug'larning uzluksiz oqimi termodinamikada muvozanatlashgan, bunda quvurning ko'ndalang kesimi bo'yicha gaz teng tarqalgan, quvur ko'ndalang kesimi o'zgargani bilan undan o'tayotgan gaz miqdori vaqt davomida o'zgarmas va gaz oqimi bo'yicha asosiy ko'rsatkichlari o'zgarmay qoladi. Bundan tashqari gaz (yoki bug') tashqi muhit bilan issiqlik almashmaydi, ya'ni adiabatik oqim deb qaraladi. Yuqorida qabul qilingan shartlarga ko'ra o'zgaruvchan ko'ndalang kesimli quvur (truba)dan 1 sekundda oqib o'tayotgan gaz massasi quyidagi formula yordamida aniqlanadi:

$$m = \frac{f_1 \cdot C_1}{v_1} = \frac{f_2 \cdot C_2}{v_2} = \frac{f_3 \cdot C_3}{v_3} = \frac{f \cdot C}{v} = \text{const}, \quad mv = f \cdot C, \quad (5.1)$$

bunda, m — 1 sekundda quvurdan oqib o'tayotgan gaz massasi, kg/s;

f_1, f_2, f_3 — quvur(lar)ning ko'ndalang kesim yuzalari, m^2 ;

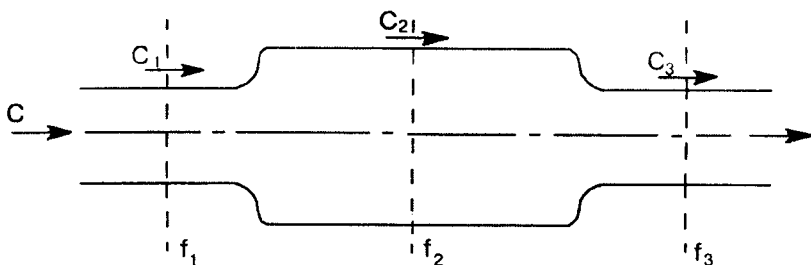
v_1, v_2, v_3 — ko'ndalang kesimlarda gaz solishtirma hajmlari, m^3/kg ;

C_1, C_2, C_3 — bu ko'ndalang kesimlarda gaz tezligi, m/s .

Yuqoridagi (5.1) tenglik gaz oqimining uzluksizlik yoki sidirg'alik shartining analitik ifodasi hisoblanadi. Soddashtirish uchun 5.1-rasmdagi quvurning 2 ta kesmasini tahlil qilamiz. Ma'lumki, gazning to'liq energiyasi uning ichki energiyasi va kinetik energiyalarining yig'indisiga teng:

$$u_1 + p_1 v_1 + \frac{C_1^2}{2} = M_2 + p_2 v_2 + \frac{C_2^2}{2}.$$

bunda, u_1 va u_2 — quvurning mos qirg'qlarida gazning ichki energiyasi;



5.1- rasm.

$p_1 v_1$ va $p_2 v_2$ — moc qirqimlardagi gaz bosimi va solishtirma hajm ko'paytmalari bo'lib, gazning itarish ishi deb yuritiladi.

Gaz entalpiyasi $h=u+p v$ bo'lganligi uchun

$$h_1 + \frac{C_1^2}{2} = h_2 + \frac{C_2^2}{2}. \quad (5.2)$$

Demak, gaz oqimi quvurda o'zgaras va adiabatik bo'lganda gaz entalpiyasi hamda kinetik energiyasining yig'indisi o'zgar-may qoladi.

(5.2) tenglikni biroz o'zgartirsak, quyidagi ifoda hosil bo'ladi:

$$\frac{C_2^2 - C_1^2}{2} = h_1 - h_2. \quad (5.3)$$

bunda, $\frac{C_2^2 - C_1^2}{2} = \ell_0$ — mavjud ish yoki quvurda harakat-lanayotgan gaz kinetik energiyasining ortishi;

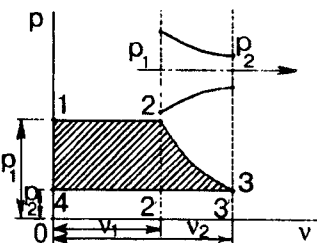
$h_1 - h_2 = h_0$ — issiqlikning pasayishini mavjudligi.

Demak, yozish mumkinki $\ell_0 = h_0$, ya'ni issiqlik dinamikasi birinchi qonuniga ko'ra ish issiqlikka teng.

5.2. Gaz va bug'larning soplodan oqib o'tishi

Ko'ndalang kesimi o'zgaruvchan quvurda oqayotgan gaz (kengayishi hisobiga) tezli-p-gining ortish nuqtasi **soplo** deyiladi.

Gaz oqimining soplo (teshigi) orqali o'tish jarayoni 5.2- rasmda ifodalangan, (pV koordinatalarida).



5.2- rasm.

Rasmdan ko'rinib turibdiki, $v_2 > v_1$ bo'lganligi uchun ham $p_2 < p_1$ bo'ladi. Gaz 2—3 adiabatik chizig'i bo'ylab kengayish jarayonini bajaradi. Shuning uchun gaz oqimi kinetik energiyasining ortishi tashqi ishlarning farqi hisobiga va kengayish ishi hisobiga bo'ladi. To'la ish miqdori:

$$\ell = \text{yuza } (1 - 2^1 - 0 - 1) + \text{yuza } (2 - 3^1 - 2^1 - 2) - \\ - \text{yuza } (4 - 3 - 3^1 - 0 - 4) = p_1 g_1 + \int_{g_1}^{g_2} p d g - p_2 g_2.$$

Adiabatik jarayon bo'lganligi uchun:

$$\int_{g_1}^{g_2} p d g = \frac{1}{k-1} (p_1 g_1 - p_2 g_2)$$

yoki

$$\ell = p_1 g_1 + \frac{1}{k-1} (p_1 g_1 - p_2 g_2) - p_2 g_2.$$

Matematik o'zgartishlar kiritib, quyidagi formulani hosil qilamiz:

$$\ell = \frac{k}{k-1} p_1 g_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right] = \frac{k}{k-1} p_1 g_1 \left[1 - \left(\frac{g_1}{g_2} \right)^{k-1} \right] \quad (5.4)$$

Gaz kinematik energiyasining ortishi $\ell = \frac{C_2^2 - C_1^2}{2}$ dan foydalanib,

$C_2 = \sqrt{2\ell + C_1^2}$ ni hosil qilamiz. Agar gazning dastlabki (boshlang'ich)

tezligi $C_1=0$ bo'lsa, $C_2 = \sqrt{2\ell}$ bo'ladi.

ℓ — ning qiymatini (5.4) tenglikdan keltirib qo'yamiz:

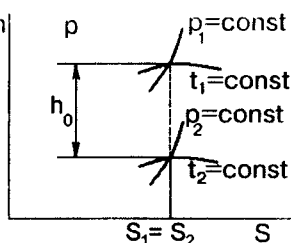
$$C_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 g_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \right]}. \quad (5.5)$$

Boshqa tomondan (5.3) tenglikni C_2 ga nisbatan yechsak:

$$C_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = 1,415\sqrt{h_0}. \quad (5.6)$$

Suv bug'i uchun issiqlikning pasayishini mavjudligi (h_0) ni tayyor «hs» diagrammasidan foydalanib osongina topish mumkin

(5.3- rasm). Soplodagi bug'ning kengayishi adiabatik (izoentropiya) deb qaralganda $S_1 = S_2$. Bug'ning boshlang'ich (p_1, ϑ_1) va keyingi (p_2, ϑ_2) holati nuqtalarini grafikdan topib vertikal tushirilsa, h_0 ning miqdorini o'lchab, masshtabga ko'paytiriladi.



5.3- rasm.

Endi soplodan otilib chiqayotgan gaz (bug') ning 1 sekunddagi sarflanish miqdorini aniqlaymiz. Buning uchun (5.1) tenglikdan foydalanamiz:

$$m = \frac{f \cdot C_2}{\vartheta_2}; \quad \frac{kg}{sek}. \quad (5.7)$$

Bunda: F — soplo uchining ko'ndalang kesim yuzasi, m^2 ;

C_2 — soplo uchidan chiqayotgan gaz tezligi, m/sek ;

ϑ_2 — chiqayotgan gaz solishtirma hajmi, m^3/kg .

Soplodagi gazning kengayish jarayoni adiabatik bo'lganligi uchun hajm va bosim orasidagi bog'lanishdan quyidagiga ega bo'lamiz:

$$\vartheta_2 = \vartheta_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}}.$$

(5.7) tenglikka C_2 va v_3 ning qiymatlarini (5.4) va (5.5) tengliklardan keltirib qo'shib, biroz matematik o'zgartishlar kiritamiz:

$$m = F \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{p_2} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (5.8)$$

(5.8) dan ko'rinib turibdiki, soplodan otilib chiqayotgan gazning sekundlik sarfi gaz (bug') ning boshlang'ich va keyingi ko'rsatkichlariga hamda soplo (teshik) yuzasining sathiga bog'liq.

5.3. Bosimlarning kritik nisbati. Kritik tezlik.

Gaz (bug') ning maksimum sarfi

Gaz oqimining nazariyasida tovushning shu muhitda tarqalish tezligi katta ahamiyatga ega bo'lib, quyidagi ifoda yordamida aniqlanadi:

$$a = \sqrt{kRT}.$$

Muhitdagi tovush tezligi gaz (bug') turiga, bosimi, haroratiga va zichliklariga bog'liq

Ikki atomli gazlar uchun

$$K = 1,4; \quad \gamma_{kr} = 0,528.$$

Uch atomli gazlar va o'ta qizigan suv bug'lari, quruq to'yingan bug' uchun:

$$K = 1,135; \quad \gamma_{kr} = 0,577.$$

(5.7) tenglikni va adiabatik jarayondagi gaz holati ko'rsatkichlari orasidagi bog'lanishni hisobga olgan holda kritik harorat formulasi keltirib chiqariladi:

$$\frac{T_{kr}}{T_1} = \left(\frac{p_{kr}}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \left[\left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k+1}} \right]^{\frac{k-1}{k}}. \quad (5.10)$$

Gaz oqimining torayib boruvchi soplodagi kritik tezligini aniqlaymiz. Buning uchun $C_{kr} = a$ tenglikdan va (5.10) tenglikdan foydalanamiz:

$$C_{kr} = a = \sqrt{kRT_{kr}} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 g_1}. \quad (5.11)$$

«K» ning ma'lum qiymatlarida:

$$K = 1,4; \quad C_{kr} = 1,08 \sqrt{p_1 g_1}.$$

$$K = 1,3; \quad C_{kr} = 1,06 \sqrt{p_1 g_1}.$$

$$K = 1,135; \quad C_{kr} = 1,03 \sqrt{p_1 g_1}.$$

Endi gaz massasi oqimining maksimal qiymatini hisoblaymiz, buning uchun (5.7) tenglikdan foydalanamiz:

$$m_{\max} = F \sqrt{2 \frac{K}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{g_1}}. \quad (5.12)$$

«K» ning ma'lum qiymatlari uchun ifoda yechimlari:

$$K = 1,4; \quad m_{\max} = 0,688 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{p_1}{g_1}}.$$

$$K = 1,3; \quad m_{\max} = 0,668 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{p_1}{g_1}}.$$

$$K = 1,135;$$

$$m_{\max} = 0,638 \cdot F \cdot \sqrt{\frac{p_1}{g_1}}.$$

Gaz otilib chiqish tezligini tovush tezligidan orttirish uchun kombinatsiyalashgan (omuxta) soplo ishlatilishi kerak. Bunday soplo 2 ta soplo birikmasi bo'lib, avval torayib boruvchi soploda tovush tezligigacha tezlik bo'lib, ikkinchi bosqich kengayib boruvchi soplo qismida gazning oqim tezligi tovush tezligidan yuqori bo'ladi.

Gaz va bug'larning otilib chiqishida qanday turdagi soplo ishlatilishi asosan bosimlarning nisbatiga bog'liq. Agar $\frac{p_2}{p_1} < \gamma_{kr}$ bo'lsa, torayib

boruvchi soplo orqali, aksincha $\frac{p_2}{p_1} > \gamma_{kr}$ bo'lsa, kengayib boruvchi soplo orqali otilib chiqadi.

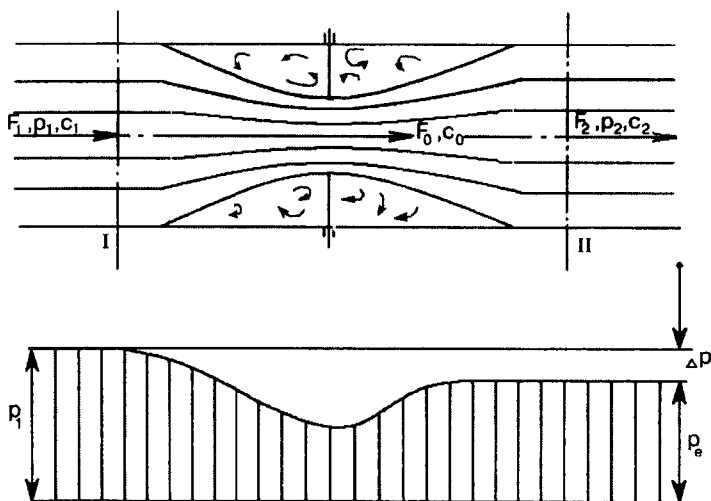
5.3. Gaz (bug') larni drossellash yoki ezish

Gaz harakatlanayotgan quvur yo'lida kanal ko'ndalang kesimining keskin kamayishi (torayishi) amaliyotda tez-tez uchrab turadi. Quvurning bu joyida gaz bosimining kamayishi sodir bo'ladi, lekin gaz tashqi ish bajarmaydi. Gaz va bug'lar quvurning toraygan joylaridan o'tayotganda bosimining kamayish hodisasi **drossellash** yoki **gazni ezish** deyiladi. Gaz oqayotgan quvur yo'lidagi har bir jo'mrak (kran), diafragma yoki boshqacha usulda quvurning torayishi drossellashga olib keladi. Gaz oqimining toraya boshlashi diafragmaga yetmasdan avvalroq boshlanadi. Oqimning torayishi diafragmadan biroz o'tguncha davom etadi, undan keyin gaz oqimi kengaya borib, quvur kengligini to'la egallaydi. Diafragma oldida va orqasida gaz oqimi bo'lmagan «o'lik zona» hosil bo'lib, u yerda gaz (bug') ning uyurmali harakati hosil qiladi. Diafragma orqasida quvur keskin kengayganligi va uyurmali harakat zonasining ta'sirida p_2 bosim p_1 dan biroz kamroq bo'lib, ularning farqi Δp bo'ladi:

$$p_1 - p_2 = \Delta p. \quad (5.13)$$

Gaz oqimining tezligi diafragma orqasida ham biroz kamayadi (C_2), keyinchalik quvurning kengligi bo'ylab oqim yoyilib tezlik avvalgi holatiga yetadi; ya'ni $C_1 = C_2$ bo'ladi.

Diafragma teshigi oldida gaz bosimining kamayishi uning kinetik energiyasining ortishiga olib keladi (5.5- rasm).



5.5- rasm.

$\frac{C_0^2}{2} - \frac{C_1^2}{2}$ — energiyalar farqi gaz zarralarining orasidagi ishqalash

kuchi va zarb kuchini yengishga hamda uyurmali harakatdan o'zishga sarf bo'ladi. Ma'lumki: sarflangan ish, oqibat natijada issiqlikka aylanadi va demak, gaz oqimiga qo'shilib ketadi.

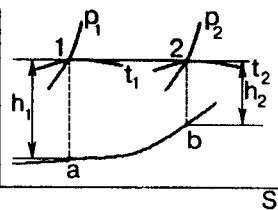
Agar quvurdan tashqariga biroz issiqlik chiqishini hisobga olmasak, kinetik energiyaning o'zgarishi:

$$\frac{C_1^2}{2} - \frac{C_2^2}{2} = h_1 - h_2.$$

$C_1 = C_2$ ekanligini hisobga olsak:

$$h_1 \approx h_2. \quad (5.14)$$

Quvurda oqayotgan gazni drossellanishida issiqlikning entalpiyasi o'zgarishsiz qoladi, ya'ni drossellash jarayoni — izoentalpiya hisoblanadi. Ideal sharoitda gazni drossellashda harorat o'z-garmaydi, chunki gazning entalpiyasi o'zgarmas. Suv bug'i drossellanganda uning harorati pasayadi. Suv bug'i quvur ichida drossellanganda entalpiya va haroratning pasayishini suv bug'i uchun «hs» diagrammasida qurish mumkin (5.6-rasm). Agar nam bug' drossellansa, namligi biroz



5.6-rasm.

kamayadi, ya'ni quriydi. Kuchliroq drosselanganda quruq bug', hatto o'ta qizigan bug' hosil bo'lishi ham mumkin. Drossellanganda bug'ning ish qobiliyati pasayadi. Agar drossel oldida p_1 bosimli bug'da issiqlikning pasayishi h_1 bo'lsa, drossel ortida p_2 bosimli bug'da issiqlikning pasayishi h_2 bo'ladi, ya'ni

$$h_2 < h_1.$$

Drosselda bug'ning ishlash qobilyatining pasayishi bug' turbinalarini boshqarishda keng qo'llaniladi.

5.4. Kompresorlarning sikllari

Tanallada qochma gazni modda (gaz va bug') tanini siqish qaytarga yoki idishga haydash uchun ishlatiladigan mashinalarni **kompressorlar** deb aytiladi. Ko'pincha porshenli yoki markazdan qochma asosda ishlaydigan kompressorlar ishlatiladi. I.YO.D.laridagi gazning issiqlik ta'sirida mexanik ish olinsa, kompressorlarda gazni siqish uchun mexanik ish sarflanadi. Bu ish (energiya) gazga tashqaridan beriladi, ya'ni kompressor siklini bajarishda manfiy ish bajariladi.

Bir pog'onali porshenli kompressor. Sikl quyidagi jarayonlardan iborat (5.7- rasm):

4—1— gazni kompressor silindriga so'rish.

1—2— gazni izotermik (politropik, adiabatik) qisish jarayoni.

2—3— kompressor silindridan qisilgan gazni itarib chiqarish (izobara) jarayoni.

3—4— gaz haydab chiqarilgandan so'ng kompressor porshenining qayta boshlashi (kengayish) natijasida bosimning (izoxorik) pasayish jarayoni.

$p\vartheta$ koordinatalar tizimida siklni bajarish uchun (1 kg qisilgan gaz uchun).

5.7- rasmdagi shtrixlangan yuza $\ell = S_{1-2-3-4-1}$ bilan ifodalangan mexanik ish sarflanadi.

a) agar gazni qisish izotermik bo'lsa, kompressorni harakatlantirishga sarflanadigan ish:

$$\ell = p_2 \vartheta_2 + \int_{\vartheta_2}^{\vartheta_1} p \vartheta - p_1 \vartheta_1.$$

Izotermada $p_1 \vartheta_1 = p_2 \vartheta_2$ bo'lganligi uchun:

$$\ell = 2,3 RT \lg \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}. \quad (5.15)$$

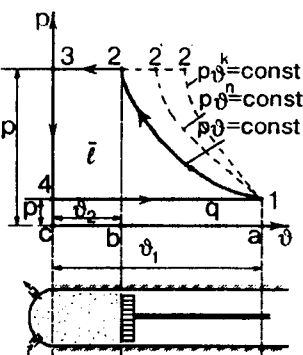
Ya'ni, kompressorda qisish jarayoni izotermik bo'lsa, siklga sarflanadigan ish faqat izotermik qisishga sarflanadi (5.8- , 5.9- rasmlar).

b) agar qisish jarayoni adiabatik bo'lsa, qisishga sarflanadigan ish miqdori:

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

Natijada ish uchun:

$$\ell = \frac{K}{K-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (5.16)$$



5.7- rasm.

Siklga sarflanadigan ish adiabatik qisish jarayonidagi ishga qaraganda «K» marta ko'proq bo'ladi. Ish miqdorini entalpiya orqali ifodalash ham mumkin. Adiabatik jarayonda $q=0$ bo'lganligi uchun issiqlik dinamikasi birinchi qonunining matematik ifodasi:

$$\ell = \Delta u \quad \text{yoki} \quad \ell = u_2 - u_1.$$

Demak:

$$\ell = p_2 v_2 + (u_2 - u_1) - p_1 v_1 \quad \text{yoki} \quad \ell = (p_2 v_2 + u_2) - (p_1 v_1 + u_1)$$

Bundan:

$$\ell = h_2 - h_1.$$

Kompressorda qisish adiabatik bo'lganda sarflanadigan ish miqdori gazning qisishdan keyingi va oldingi entalpiyalarining ayirmasidan iborat.

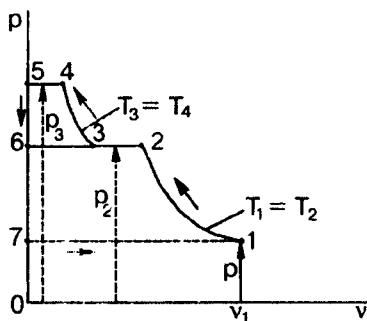
d) agar qisish jarayoni politropik bo'lsa, sarflanadigan ish miqdori:

$$\ell = \frac{n}{n-1} (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (5.17)$$

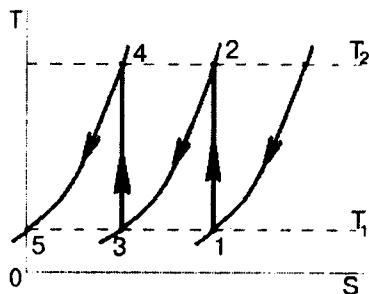
(5.17) ifodani keltirib chiqarish (5.16) tenglikni keltirib chiqarish kabi bo'ladi, faqat ko'rsatkich «K» emas «n» bo'ladi.

Ishlayotgan porshenli kompressorlarning ko'pchiligi politropik bo'lib, daraja ko'rsatkichi $n = 1,20 \dots 1,25$ oralig'ida o'zgaradi.

Ko'p pog'onali kompressorlar. Biz yuqorida ko'rib chiqqan bir pog'onali porshenli kompressorning ish unumi juda yaxshi, lekin yuqori bosimda ishlaganda tez qizib ketadi. Odatda 10 atmosferagacha bosim hosil qilinganda, gazni uzatish bir pog'onali kompressorlar bilan amalga oshiriladi. Kattaroq bosimlar bilan ishlashga to'g'ri



5.8- rasm.



5.9- rasm.

kelganda ikki yoki ko'p pog'onali kompressorlar (har bir pog'onada maxsus to'rtburchaklikni hosil qiladi). Bunda har bir pog'onadan so'ng gaz sovutiladi.

Qisish jarayonining izotermik bo'lishi maqsadga muvofiq bo'ladi, lekin amalda bajarilishi qiyin bo'lganligi uchun shu jarayonga yaqinlashtiriladi.

Har bir pog'onadan so'ng izobarik sharoitda gaz dastlabki haroratgacha sovutiladi. Agar kompressorda gazning qisilishi politropik bo'lib, ko'rsatkichi «n» bo'lsa:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Ikkinchi pog'ona uchun:

$$\frac{p_4}{p_3} = \left(\frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Kompressorning ishlash sharoitiga qarab, $T_1 = T_3$ va $T_2 = T_4$ bo'lganligi uchun:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{p_4}{p_3}.$$

Kompressorda qisish pog'onalari «z» marta bo'lganda

$$n = \sqrt[z]{\frac{p_{oxir}}{p_{boshl}}}$$

bo'ladi.

Kompressorda sarflanadigan ish miqdori quyidagi ifoda orqali aniqlanadi:

$$\ell = z \frac{n}{n-1} p_1 \vartheta_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (5.18)$$

Bunda: z — pogʻonalar soni.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Ochiq termodinamik tizimlarining aniqlanishini ifodalang va amaliyotdan misollar keltiring.
2. Oqim uchun termodinamikaning birinchi qonuni tenglamasini keltirib chiqaring va uning har xil yozilishlarini keltiring.
3. Texnikaviy va keltirilgan ish nima? Keltirilgan ishning geometrik interpretatsiyasini bering va bu ishning politropik va adiabatik jarayonlar uchun qanday aniqlanishini koʻrsating.
4. Qisqa kanallarda ishchi jism oqishida uning massaviy sarfi tezligi uchun ifodani keltirib chiqaring. Bu tenglamalar tahlilini bajaring.
5. Bosimlar kritik nisbati, kritik tezlik, ishchi jismning maksimal massaviy sarfi nimani bildiradi? Torayuvchi soplodan oqayotgan ishchi jismning kritik tezligi va maksimal sarfi uchun ifodalarni yozing.
6. Kritik tezlik chiqish joyidagi tovush tezligiga teng ekanligini koʻrsating. Tezlik tovush tezligidan past boʻlganda kanal torayuvchi boʻlishi kerakligini, tezlik tovush tezligidan yuqori boʻlganda kanal kengayuvchi boʻlishligini isbotlang.
7. Adiabatik toʻxtalish harorati nimani bildiradi?
8. Oqimning haqiqiy tezligi qanday aniqlanadi? h_s — diagramma yordamida adiabatik qaytar va qaytmas oqimlar jarayonini tahlil qiling. Energiya yoʻqotish koeffitsiyenti nimani bildiradi va uning qiymati qanday aniqlanadi?
9. $p_2/p_1 < \beta_{kp}$ nisbatda bugʻ oqimi uchun aniq masalani h_s — diagramma yordamida yeching. Kanalning eng tor va chiqish kesimida oqim jarayonini hisoblash tavsiflarini aniqlang.
10. Drossellanish va adiabatik drossellanish koeffitsiyenti aniqlanishini keltiring. Joule-Tomson samarasi nimani bildiradi? Inversiya egri chizigʻini tahlil qiling. Texnikada drossellanish ishlatilishiga misollar keltiring.
11. Kompresor nima? Uning tavsiflarini keltiring. Politropik, adiabatik va izotermik siqishda kompressor ishi uchun ifodalarni keltiring.
12. pV — Ts diagrammalarda koʻp bosqichli kompressorning siqish jarayonini tahlil qiling. Koʻp bosqichli siqishning bir bosqichligiga nisbatan afzalliklarini koʻrsating.
13. Sovutiladigan va sovitilmaydigan kompressorlarning FIK lari qanday aniqlanadi?

VI BOB. ISSIQLIK DVIGATELLARI VA QURILMALARNING IDEAL SIKLLARI

6.1. Porshenli ichki yonuv dvigatellari (IYOD) ning ideal sikllari

Ideal sikllarni o'rganib chiqishda dvigatelning silindrlari ichida sodir bo'ladigan jarayonlarni tadqiq va jarayonlarning FIK ga ta'sir qiluvchi omillar tahlil qilinadi.

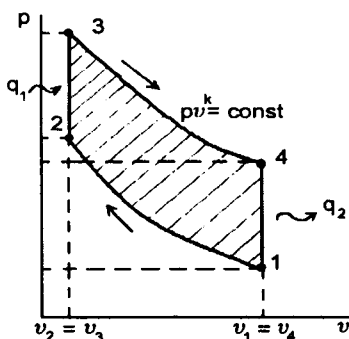
Sikllarni o'rganishda quyidagi shartlarga amal qilinadi:

1. Ishchi jism sifatida ideal gaz olinadi.
2. Sikllar — yopiq va qaytuvchan.
3. Ishchi jism kimyoviy o'zgarmas (ya'ni, yonish jarayoni sodir bo'lmaydi).
4. Yonish jarayoni o'rniga gazga teng miqdordagi issiqlik berish bilan almashtiriladi.

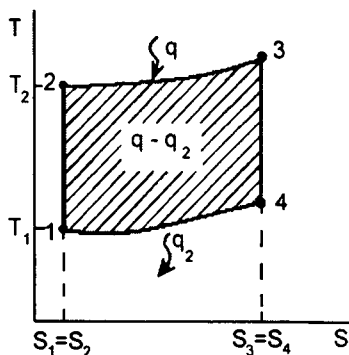
Shunday qilib, texnikaviy termodinamika faqat eng yuqori FIK beradigan jarayonlarni va ularning eng qulay kombinatsiyalarini ko'rib chiqadi va demak, dvigatelning ideal ishlash sharoitini o'rganadi.

O'zgarmas hajmda issiqlik beriladigan siklni $p\theta$ va Ts diagrammalarida ifodalaymiz (6.1- , 6.2- rasmlar).

Sikl ikkita izoxora va ikkita adiabat jarayonlaridan tashkil topadi. Boshlang'ich bosim p_1 va hajm θ_1 ga ega bo'lgan (1- holat) gaz silindrda adiabatik siqilish natijasida (1—2- chizig'i) bosim p_2 ga hajm θ_2 ga boradi (2- holat). Keyin gazga o'zgarmas hajmda, ma'lum miqdorda



6.1- rasm.



6.2- rasm.

(q_1) issiqlik beriladi (yonish). Shundan so'ng gaz (yonish mahsulotlari) adiabatik kengayish natijasida q_4 hajmga ortadi. Nihoyat 4—1 izoxorik jarayonda gazdan q_2 issiqlik sovitkichga o'tishi (chiqarish klapani ochiladi) natijasida gazning bosimi p_4 dan p_1 ga tushadi va gaz dastlabki holatiga qaytadi.

So'rish va chiqarish jarayonlari o'zgaruvchan gaz miqdorlarida bo'lganligi uchun ular termodinamika jarayonlari bo'la olmaydi va shu sababli siklga kirmaydi.

Siklda olingan foydali ish ma'lum masshtabda $p\vartheta$ diagrammasida 1—2—3—4—1 konturning yuzasi bilan ifodalanadi. Yoki matematik ko'rinishda quyidagicha ifodalanadi:

$$\ell = q_1 - q_2.$$

Ma'lumki, har qanday sikl uchun termik FIK $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}$.

2—3 va 4—1 izoxorik jarayonlarida gazga beriladigan va olingan issiqlik miqdorlari:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2); \quad q_2 = c_v(T_4 - T_1).$$

Bularni termik FIK formulasiga qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} - 1\right)}{T_2 \cdot \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)}.$$

Endi $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ ekanligini isbot qilib ko'ramiz.

Ichki yonuv dvigatellarida q_1 hajmni (silindrning to'la hajmi) hajm (qisish kamerasining hajmi)ga nisbati dvigatelning qisish darajasi deyiladi va ε bilan belgilanadi.

1—2- adiabatik qisish uchun yozish mumkin:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^{k-1}; \quad T_2 = T_1 \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^{k-1}; \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}. \quad (a)$$

3—4- adiabatik kengayish uchun esa:

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{q_4}{q_3}\right)^{k-1} = \left(\frac{q_1}{q_2}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}; \quad T_3 = T_4 \cdot \varepsilon^{k-1}.$$

Oxirgi ikkala tenglik quyidagicha taqqoslanadi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}; \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}.$$

FIK formulasiga olingan qiymatlarni qo'yamiz, ya'ni:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}} \quad \text{yoki} \quad \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (6.1)$$

Demak, siklning termik FIK dvigatelning qisish darajasiga va adiabata ko'rsatkichlariga to'g'ri proporsional bog'langan.

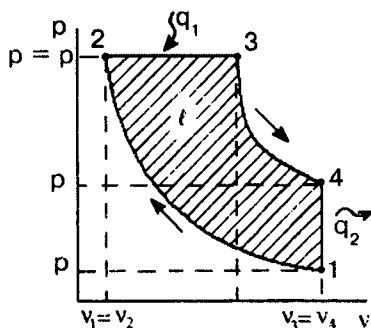
Yuqorida ko'rib chiqilgan sikl hozirgi zamon tez yurar karbyuatorli dvigatellarida keng ko'lamda ishlatiladi. Dvigatelning FIK ni o'rttirish uchun yuqoridagi « ε » ko'rsatkichlarini kattaroq qisish kerak (6.1- ifodaga qarang). « ε » ni kattalashtirish uchun dvigatelga oktan soni yuqoriroq benzin kerak bo'ladi. « K » ni o'rttirish uchun esa dvigatel silindriga havo emas, balki biror-bir atomli gaz kiritish kerak, bu esa mushkul masala. Demak, benzinning oktan sonini o'rttirish osonroq yo'l hisoblanadi.

O'zgarmas bosimda issiqlik beriladigan sikl. Yuqorida ko'rib chiqilgan sikldan bu siklning asosiy farqi shundan iboratki, bunda gazga beriladigan issiqlik q_1 oniy bo'lmay biroz davom etadi. Bu paytda silindrdagi bosim o'zgarmaydi (izobara).

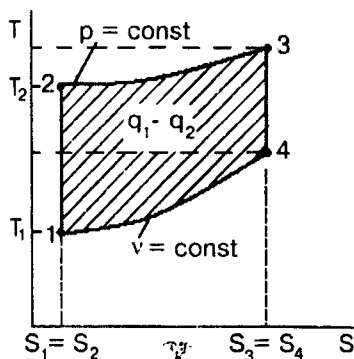
Siklni $p\theta$ va Ts diagrammalarida ifodalaymiz.

6.3- rasmda siklni ifodalovchi kontur ichidagi yuza ma'lum mashtabda sikldan olingan ishni ifodalaydi. Rasmdagi yuza esa siklda foydali ishga aylangan issiqlik miqdori bo'lib hisoblanadi.

Siklning termik FIK ni aniqlashdan ilgari quyidagi iboralarni kiritamiz (6.4- rasm):



6.3- rasm



6.4- rasm

$\frac{g_1}{g_2} = \varepsilon$ — dvigatelning qisish darajasi.

$\frac{g_3}{g_2} = p$ — dastlabki kengayish darajasi.

Termik FIK ning umumiy formulasidan foydalanamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

2—3 izobara jarayoni va 4—1 izoxora jarayonlarida gazga berilgan hamda olingan issiqlik miqdorlari quyidagicha bo‘ladi:

$$q_1 = c_p (T_3 - T_2) \quad \text{va} \quad q_2 = c_v (T_4 - T_1).$$

Qiymatlarni o‘rniga keltirib qo‘yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{K(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{K \cdot T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}.$$

1—2 va 3—4 adiabatik jarayonlari uchun ko‘rsatkichlar orasidagi bog‘lanishni yozamiz:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{g_2}{g_1} \right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}; \quad T_1 = T_2 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

va

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{g_3}{g_4} \right)^{k-1} = \left(\frac{g_3}{g_2} \cdot \frac{g_2}{g_4} \right)^{k-1} = p^{k-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Bundan: $T_4 = T_3 \cdot p^{k-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$

T_4 ning T_1 ga nisbatini aniqlaymiz:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3 \cdot p^{k-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}}{T_2 \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}} = \frac{T_3}{T_2} \cdot p^{k-1} = p \cdot p^{k-1} = p^k. \quad (6.2)$$

Chunki izobara jarayoni 2—3 uchun:

$$\frac{q_3}{q_2} = \frac{T_3}{T_2} = p.$$

Olingan natijalarni FIK formulasiga keltirib qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2} \cdot \frac{(p^k - 1)}{K(p - 1)} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{p^k - 1}{K(p - 1)}. \quad (6.3)$$

(6.1) va (6.3) tengliklarni o'zaro $\frac{p^k - 1}{K(p - 1)}$ taqqoslasak, nisbatga farq qilishini ko'ramiz.

Hozirgi zamon dvigatellarida va K ning mumkin bo'lgan qiymatlarida nisbat quyidagicha bo'ladi.

$$\frac{p^k - 1}{K(p - 1)} > 1.$$

Demak, $p = \text{const}$ sharoitida issiqlik beriladigan IYOD larida (bir xil sharoitda) η_t kamroq bo'ladi.

Biroq bu sikl bilan ishlaydigan dvigatellar sekin yurar (kema) dizellarida keng ko'lamda ishlatilmoqda. Buning sababi, dizel dvigatellarida qisish darajasi (ε) karbyuratorli dvigatellarga qaraganda

deyarli 2 marta yuqori bo'lganligi uchun ikkinchi siklda $\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$ nisbatan birinchi sikldan ancha kichik bo'lib, $p = \text{const}$ bo'lgandagi IYOD ning termik FIK larini amalda sezilarli yuqori bo'lishini ta'minlaydi.

Aralash usulda issiqlik beriladigan ichki yonuv dvigatellarining sikli. Siklni « $p\theta$ » va « Ts » koordinatalarida chizamiz. Sikl 5 ta jarayondan tashkil topgan: 1—2 adiabatik qisish; 2—3 izoxorik (gazga) issiqlik berish; 3—4 izobarik (gazga) issiqlik berish; 4—5 adiabatik kengayish (ish olish); 5—1 gazning izoxorik sovushi (gazdan issiqlikning sovutkichga o'tishi) (6.5- , 6.6- rasmlar).

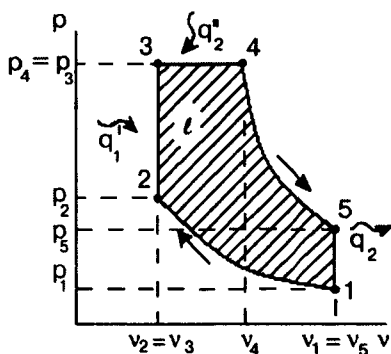
$$\text{Siklning termik FIK} \quad \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1 + q_1}$$

Gazga berilgan va gazdan sovutkichga o'tgan issiqlik miqdorlari:

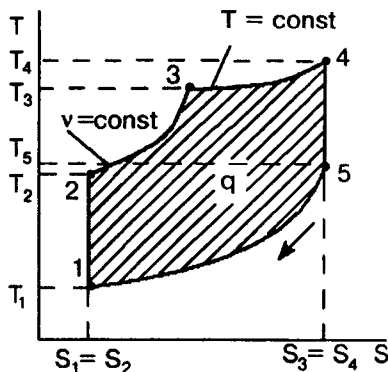
$$2-3 \text{ izoxorada} \quad q_1' = c_v(T_3 - T_2);$$

$$3-4 \text{ izobarada} \quad q_1'' = c_p(T_4 - T_3);$$

$$5-1 \text{ izoxorada} \quad q_2 = c_v(T_5 - T_1).$$



6.5- rasm.



6.6- rasm.

Termik FIK formulasiga qo'yamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_v(T_5 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{(T_3 - T_2) + K(T_4 - T_3)}. \quad (a)$$

Siklning 2 va 3 nuqtalari uchun gaz holati tenglamalarini yozamiz hamda ularni o'zaro bo'lamiz:

$$p_2 \vartheta = RT_2 \quad \text{va} \quad p_3 \vartheta = RT_3.$$

Chunki 2—3 izoxora uchun $\vartheta_2 = \vartheta_3 = \vartheta$.

$\frac{p_3}{p_2} = \frac{T_3}{T_2} = \lambda$ — IYOD larida yonishdagi bosimning ortish darajasi deyiladi.

1—2 adiabatik jarayoni uchun yozish mumkin:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{\vartheta_1}{\vartheta_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1} \quad \text{yoki} \quad T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}.$$

2—3 izoxora jarayoni uchun:

$$\frac{T_3}{T_2} = \lambda; \quad \text{yoki} \quad T_3 = T_2 \cdot \lambda = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda.$$

3—4 izobara jarayoni uchun ham holat tenglamalarini yozib, o'zaro bo'lamiz:

$$p \vartheta_4 = RT_4 \quad \text{va} \quad p \vartheta_3 = RT_3$$

Chunki $p_3 = p_4 = p$.

$\frac{\vartheta_4}{\vartheta_3} = \frac{T_4}{T_3} = p$ — IYOD larida dastlabki kengayish darajasi deyiladi.

Oxirgi tengliklardan T_4 ning qiymatlarini aniqlaymiz:

$$T_4 = T_3 \cdot p \quad \text{yoki} \quad T_4 = T_1 \cdot p \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}.$$

4—5 adiabatik kengayish uchun:

$$\frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{p_4}{p_5} \right)^{k-1}; \quad \frac{T_5}{T_4} = \left(\frac{p_4}{p_5} \cdot \frac{p_2}{p_3} \right)^{k-1} = p^{k-1} \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Tenglikdan T_5 ning qiymatini topamiz:

$$T_5 = T_4 \cdot p^{k-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \cdot p^k \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = T_1 \cdot \lambda \cdot p^k.$$

T larning topilgan qiymatlarini FIK ning (a) tengligiga keltirib o'q'namiz va matematik soddalashtirishlardan so'ng quyidagi ifodani hosil qilamiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1 \cdot \lambda \cdot p^k - T_1}{(T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot \lambda - T_1 \cdot \varepsilon^{k-1}) + K(p \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1} \cdot T_1 - T_1 \cdot \lambda \cdot \varepsilon^{k-1})}$$

yoki

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \cdot p^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(p - 1)}. \quad (6.4)$$

Aralash usulda gazga issiqlik beriladigan IYOD ning ko'rib chiqilgan sikli ilgari ko'rib chiqilgan 2 ta sikllarning umumlashmasi bo'lib, buni matematik usulda ham isbotlash mumkin.

a) agar $p=1$ bo'lsa, (6.4) tenglikdagi ikkinchi ko'paytiruvchi 1 ga teng bo'lib qoladi, ya'ni:

$$\frac{\lambda \cdot p^k - 1}{(\lambda - 1) + K \cdot \lambda(p - 1)} = \frac{\lambda - 1}{\lambda - 1} = 1.$$

(6.4) tenglik (6.1) tenglikka aylanadi. $\mathcal{G}=\text{const}$ bo'lganda issiqlik beriladigan IYOD siklining tengligi kelib chiqadi.

b) agar $\lambda=1$ bo'lsa, (6.4) tenglik (6.3) tenglikka aylanadi:

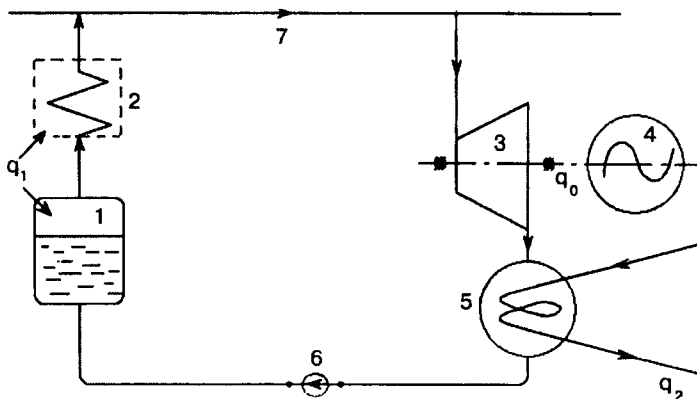
$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{p^k - 1}{k(p - 1)}.$$

Aralash usulda issiqlik beriladigan sikl hozir ishlatilayotgan tezyurar (tirsakli valning aylanish tezligi 1000 ayl/min dan ancha yuqori) avtotraktor dizellarida keng ko'lamda ishlatilmoqda. Buning sababi qisish darajasi (ε) ning yuqoriligi va p ning amaliy qiymatlarida siklning termik FIK ancha yuqori (karbyuratorli dvigatellarga qaraganda) bo'lmoqda.

Ana shu xulosaga ko'ra dunyo dvigatelsozligida shu kunga kelib traktor dvigatellari deyarli 100% dizellashdi, yengil avtomobil dvigatellari hozircha faqat 30...35% dizellashdi, bu jarayon ilg'or firmalarda davom etmoqda.

6.2. Bug'-kuch qurilmalarining sikllari, ishlash sxemasi

Bug' qozoni (1) dan chiqayotgan to'yingan bug', bug' qizdirgich (2) da izobarik quriydi ($x=1$) va qiziydi (6.7- rasm). Yuqori harorat va bosimdagi bug' quvur (7) orqali turbina (3) ga borib rotorni aylantiradi, ya'ni bug'ning bosim energiyasi mexanik energiyaga aylanadi. Turbina rotoridagi mexanik energiyani shu val davomiga ulangan elektrogenerator (4) bilan elektr energiyasiga o'tkazib olish mumkin. Asosiy energiyasini berib bo'lgan bug' suv bilan sovitib turiladigan kondensator (5) ga o'tib, suvga aylanadi. q_2 issiqlik miqdori sovituvchi suv bilan chiqib ketadi. Kondensator suv nasos (6) orqali yana bug' qozoniga yuboriladi va sikl takrorlanaveradi.

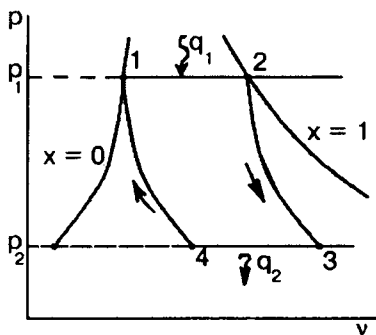


6.7- rasm.

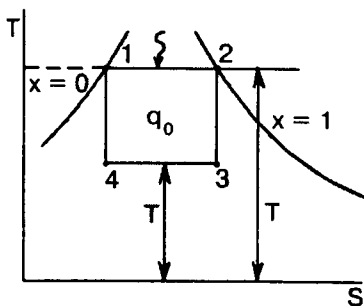
6.7- rasmdan ko'rinib turibdiki, ishchi jism (suv, bug') ga berilayotgan issiqlik miqdori q_1 ikki bosqichda: suvni qaynatish va bug' hosil qilishda hamda bug' qizdirgichda bug'ni quritish va qizdirishda beriladi.

Suv bug'i uchun Karno sikli. To'yingan quruq bug' uchun Karno siklini « $p\theta$ » va « Ts » koordinatalarida yuqori ($x=1$) va quyi ($x=0$) chegara chiziqlari orasida chizamiz (6.8 va 6.9- rasmlar).

1—2 chizig'i (jarayoni) izotermik va shu bilan birga izobarik jarayon hisoblanadi.



6.8- rasm.



6.9- rasm.

2—3 bug' turbinasidagi bug'ning adiabatik kengayish jarayoni.

3—4 izobarik va bir vaqtning o'zida izotermik sharoitda bug'ning kondensatsiyalanish jarayoni.

4—1 nam bug'ning adiabatik qisilishi (kompressorda).

Bug'ga berilgan va undan sovitkichga o'tgan issiqlik miqdorlari:

$$q_1 = (x_2 - x_1) r_1; \quad \text{J/kg};$$

$$q_2 = (x_3 - x_4) r_2; \quad \text{J/kg}.$$

Bunda: $p_1 - p_2$ bosim sharoitida bug' hosil qilish uchun kerakli issiqlik miqdori. Siklda foydalanilgan issiqlik miqdori «Ts» koordinatalarida 1—2—3—4—1 yuza bilan ifodalanadi.

$$q_0 = q_1 - q_2 = r_1(x_2 - x_1) - r_2(x_3 - x_4).$$

Nam bug' uchun Karno siklining termik FIK uchun ifoda:

$$\eta_t = \frac{q_0}{q_1} = \frac{r_1(x_2 - x_1) - r_2(x_3 - x_4)}{r_1(x_2 - x_1)}. \quad (6.5)$$

To'yingan quruq bug' uchun $x_1 = 0$ va $x_2 = 1$ bo'lganligi uchun termik FIK:

$$\eta_t = 1 - \frac{r_2}{r_1}(x_3 - x_4). \quad (6.6)$$

Suv bug'i uchun Karno siklining termik FIK ni issiqlik manbai va sovitkich haroratlari orqali ham ifodalash mumkin:

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6.7)$$

1kg quruq to'yingan bug'ning foydali ishi «P,9» koordinatalarida 1—2—3—4—1 yuza bilan ifodalanadi:

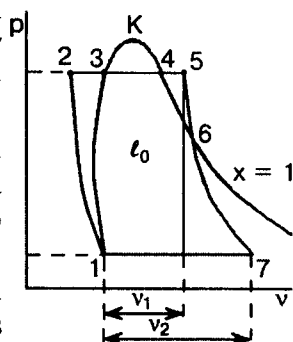
$$\ell_0 = r_1 \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6.8)$$

To'yingan bug' uchun umumiy holda

$$\ell_0 = r_1(x_2 - x_1) \cdot \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (6.9)$$

Karno siklining termik FIK yuqori (nazariy) bo'lishi bilan birga uning asosiy kamchiligi, ishlab bo'lgan bug'ning kondensatorda to'la suvga aylanmasligi bo'lib, kompressor bug'-suv aralashmasi, ya'ni katta hajmli massani qisishi kerak bo'ladi. Katta hajmni qisish uchun esa katta energiya talab qilinadi.

Suv bug'i uchun Renkin sikli. Bug' kuch qurilmalari (BKQ) uchun Renkin sikli asos qilib olingan. Karno siklidan bu siklning farqi shundaki, bug' kondensatorda to'la suvga aylanadi. Kompressor katta hajmli bug'-suv aralashmasini emas, nasos kichik hajmli suvni haydaydi, bu esa BKQ ning FIK ni ancha ortishiga olib keladi. Renkin siklini «*p*» va «*T*» diagrammalarida ifodalaymiz: Renkin sikli (6.10 va 6.11-rasmlar) da:



6.10- rasm

1—2 chizig'i suvni qisib bug' qozoniga uzatish jarayoni (chiziq vertikalidan biroz chapga og'adi). «*T*» diagrammasida 1 va 2 nuqtalar ustma-ust tushadi.

2—3 suvni bug' qozonida qaynatish (izobarik) jarayoni.

3—4 suvning (izobarik) bug'lanish jarayoni.

4—5 bug'ning (izobarik) qizdirish jarayoni.

5—7 o'ta qizigan (quruq) bug'm turbinada (adiabatik) kengayib mexanik ish bajarish jarayoni.

7—1 ishlab bo'lgan bug'ni kondensatordagi (izobarik) kichrayishi bo'lib, bug' suv holatiga o'tadi.

*T*s diagrammada:

λ — yuza 0—0'—2—a—0 kondensat suvdagi qoldiq issiqlik miqdori; λ — yuza: 2—3—b—a—2 suvni shu bosimda to'yinish haroratigacha qizdirish uchun sarflangan issiqlik miqdori;

r — yuza 3—4—c—b—Z bug' hosil qilish issiqligi, ya'ni qaynashning boshlanishidan to'la bug'lanib bo'lguncha sarflanadigan issiqlik miqdori;

Yoki 1 kW. soat elektr energiyasi olish uchun sarflanadigan solishtirma issiqlik miqdori:

$$q_0 = \frac{3,6 \cdot 10^6}{\eta_t} \cdot \frac{kW \cdot soat}{kJ} \quad (6.13)$$

Renkin sikli termik FIK ning son qiymati bug'ning asosiy ko'rsatkichlariga bog'liq.

Issiqlik bilan ta'minlash asoslari. Ishlatayotgan bug'-kuch qurilmalaridagi bug'ning boshlang'ich va oxirgi bosim hamda haroratlarida siklning FIK lari yuqori emas. Buning sababi, 50% yaqin issiqlik miqdori (q_2) kondensatorda sovutkichga o'tib ketadi.

Bu yo'qotilayotgan issiqlik miqdori «Ts» diagrammasida $a-e$ — $e'-a_0-a$ yuza bilan ifodalangan (6.12- rasm). Shuncha miqdordagi issiqlikni foydali ishga sarflash mumkin. Odatdagi BKQ larida q_2 issiqlikdan foydalanish imkoniyati yo'q, chunki kondensatordan chiqayotgan sovutuvchi suvning harorati xonalarni isitishga yetarli emas (30...35°C).

q_2 issiqlikni texnologik jarayonlar, xonalarni isitish va boshqa maqsadlarda ishlatish uchun uning harorati (T_2) yuqoriroq bo'lishi kerak. Buning uchun turbinadan chiqib ketayotgan bug'ning bosimi p_2 ham yuqoriroq bo'lishi kerak, demak, BKQ da kondensatorning bo'lmasligi maqsadga muvofiq bo'ladi. Kondensatori yo'q bug'-kuch qurilmalarini **aks-bosimli sikllar** deyilib, issiqlik bilan ham ta'minlovchi markazlashgan issiqlik elektrostansiya hisoblanadi (TES).

TES (teploelektrosentral)larda R_2 ning biroz ortishi siklning termik FIK ni biroz kamayishiga olib keladi, lekin umuman issiqlikdan foydalanish η_{if} darajasi ortadi:

$$\eta_{if} = \frac{\ell + q_2}{q_1} = \frac{(i_1 - i_2) + (i_2 - i_2^I)}{i_1 - i_2^I} \quad (6.14)$$

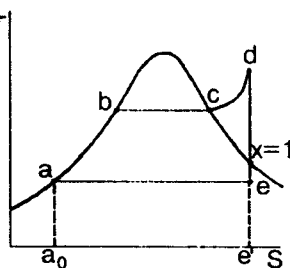
Bunda: ℓ — mexanik ishga aylangan energiya miqdori;

q_1 — bug' qozonida va bug' qizdirgichda suvga berilgan issiqlik miqdori;

q_2 — sovutkichga o'tgan issiqlik miqdori;

i_2 — isitish sistemalariga ketayotgan energiya;

i_2^I — isitish sistemalaridan qaytib kelayotgan issiqlik miqdori.



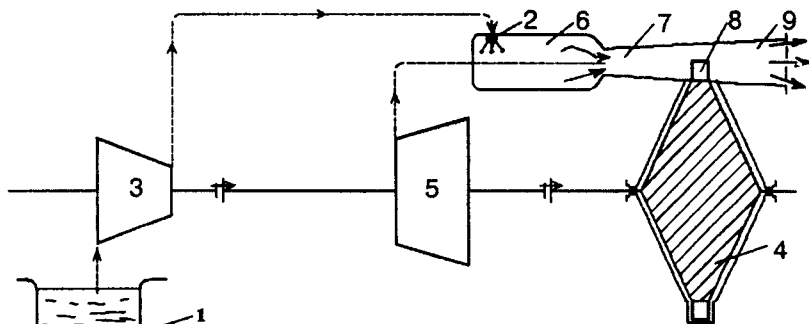
6.12-rasm

Ko'pchilik aks-bosimli TES larda issiqlikdan foydalanish koeffitsiyenti $\eta_{if} = 70...75\%$ bo'ladi.

6.3. Gaz turbinali qurilmalar va reaktiv dvigatellarning ish sikllari

Gaz turbinali qurilmalar. Issiqlik dvigatellari orasida porshenli ichki yonuv dvigatellaridan keyinroq, ulardan ancha afzalliklarga ega bo'lgan gaz turbinali qurilmalar va reaktiv dvigatellar ixtiro qilindi va keng ko'lamda ishlatilmoqda. Yuqorida aytib o'tganimizdek, porshenli ichki yonuv dvigatellarida ishchi jism sifatida havodan foydalaniladi. Gaz turbinali qurilmalar va reaktiv dvigatellar ham ishchi jism sifatida havodan foydalanuvchi issiqlik dvigatellari hisoblanadi. Bu, keyinroq ixtiro qilinib, keng ishlatilayotgan (ayniqsa, aviasiyada) qurilmalar tuzilishi, ishlashi va tezliklarida porshenli dvigatellardan keskin farq qiladi. 6.13- rasmdagi gaz turbinali qurilma (GTQ) ning ishlashini tushunish qiyin emas. Yonish kamerasida qizigan gazlarning bosim energiyasi soploda kinetik energiyaga aylanib, tashqariga katta tezlik bilan chiqib ketayotib turbina parragiga energiyasini berib, ya'ni turbinani aylantirib chiqib ketadi.

GTQ lar yonish jarayoni, ya'ni gazga issiqlik berishiga qarab ikki xil bo'ladi. 6.13- rasmdagi qurilmada ishchi jism — gazga q_1 issiqlik berish o'zgarmas bosimda ($p = \text{const}$) bo'ladi. Agar GTQ ning yonish kamerasi (6) da kiritish va chiqarish klapanlari, ya'ni gaz taqsimlash mexanizmi bo'lsa, qurilma sikli $\vartheta = \text{const}$ da issiqlik beriladigan sikl bo'yicha ishlaydi.



6.13- rasm. GTQ sining sxemasi:

- 1—yonilg'i baki; 2—yonilg'i purkagich (forsunka); 3—yonilg'i nasosi;
4—turbina parragi (rotori); 5—havo kompressori; 6—yonish kamerasi;
7—gaz puflagich (soplo); 8—parrakning ish kuraklari;
9—tutun chiqarish trubasi.

$p = \text{const}$ bo'lganda issiqlik beriladigan GTQ sikli:

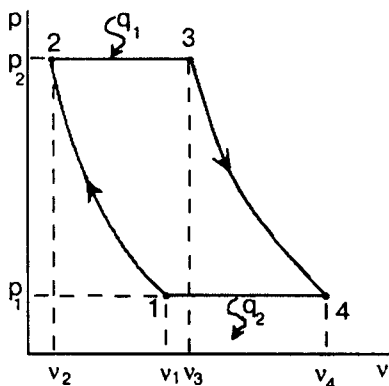
6.14- va 6.15- rasmlarda GTQ ning sikli $p\nu$ va Ts koordinatalarida ifodalangan. Bunda, 1—2 havoning kompressordagi adiabatik qisilishi;

2—3 yonilg'ining yonish kamerasidagi izobarik yonishi (issiqlik q_1 berilishi) jarayoni;

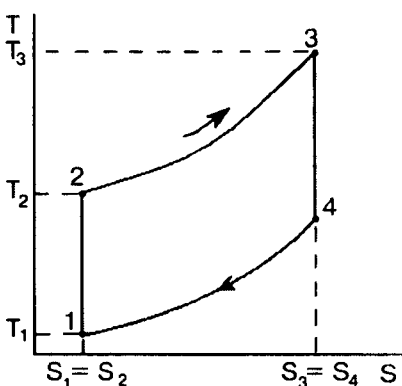
3—4 gaz (tutun) ning soplodagi adiabatik kengayishi;

4—1 gazni muhitga (izobarik) chiqib ketish jarayoni.

Gazga berilgan va olingan issiqlik miqdorlari:



6.14- rasm.



6.15- rasm.

$$q_1 = C_r (T_3 - T_2) \quad \text{va} \quad q_2 = (T_4 - T_1).$$

Siklning termik FIK:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}.$$

1—2 va 3—4 adiabatik jarayonlardan foydalanib, $\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$ ekanligini isbotlash qiyin emas, demak:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (6.15)$$

Tenglikning boshqa yechimini olsak, quyidagicha bo'ladi:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Agar kompressordagi havo bosimining ortish darajasini π deb belgilab olsak:

$$\pi = \frac{p_2}{p_1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

Siklning termik FIK ning ifodasi quyidagicha bo'ladi:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (6.16)$$

Bu ifodani qisish darajasi (ε) bilan ham ifodalash mumkin:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}.$$

Demak:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (6.17)$$

$p = \text{const}$ bo'lganda issiqlik beriladigan GTQ ish sikli.

GTQ ning yonish kamerasidagi klapanlar yonish jarayonida yopiq bo'lganligi uchun (q_1 berilayotganda) $v = \text{const}$ bo'ladi. Bunday sikl jarayonlari $p-v$ va $T-s$ koordinatalarida 6.16- va 6.17- rasmlarda ifodalangan.

Gazga berilgan q_1 va gazdan sovitkichga o'tib ketgan q_2 issiqlik miqdorlarini $q_1 = c_v (T_3 - T_2)$ va $q_2 = c_p (T_4 - T_1)$ deb belgilab olamiz.

$\lambda = \frac{p_3}{p_2}$ — yonish jarayonidagi bosimning ortish darajasi.

$\eta = \frac{p_2}{p_1}$ — kompressordagi havo bosimining ortish darajasi.

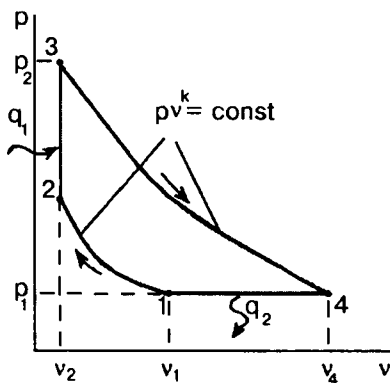
1—2 adiabatik jarayon uchun:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = \pi^{\frac{k-1}{k}} \quad \text{yoki} \quad T_2 = T_1 \cdot \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

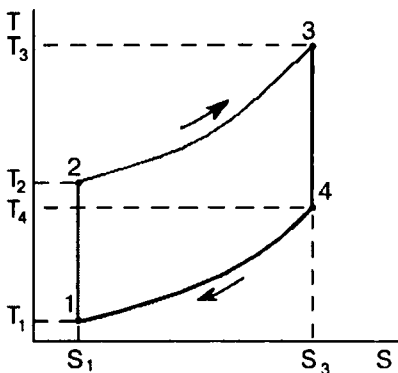
2—3 izoxora jarayoni uchun esa:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda \quad \text{yoki} \quad T_3 = T_2 \cdot \lambda = T_1 \cdot \lambda \cdot \pi^{\frac{k-1}{k}}.$$

3—4 adiabata jarayoni uchun:



6.16- rasm.



6.17- rasm.

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{p}{p_1 \lambda \pi}\right)^{\frac{k-1}{k}}.$$

Tenglikni T_4 ga nisbatan yechsak quyidagicha ko‘rinish oladi:

$$T_4 = T_3 \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}}}{\pi^{\frac{k-1}{k}} \cdot \lambda^{\frac{k-1}{k}}} = T_1 \cdot \lambda^{\frac{1}{k}}.$$

Endi siklning termik FIK ni aniqlaymiz:

$$\eta_t = 1 - \frac{c_p (T_4 - T_1)}{c_v (T_3 - T_2)} = 1 - K \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \right).$$

Haroratlarning qiymatlarini π va λ - orqali ifodalasak,

$$\eta_t = 1 - \frac{K \left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1 \right)}{\pi^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)}. \quad (6.18)$$

Demak, siklning FIK faqat π va λ ning qiymatlariga bog‘liq.

(6.17) va (6.18) ifodalarni o‘zaro taqqoslasak, teng haroratlarda va ε va π ning bir xil qiymatlarida $\vartheta = \text{const}$ bo‘lganda (q_1) issiqlik beriladigan GTQ da siklning termik FIK yuqoriroq bo‘ladi.

Reaktiv dvigatellar sikllari. Biz tanishib chiqqan porshenli va gaz turbinali ichki yonuv issiqlik dvigatellari texnikaning barcha sohalarida

keng ko'lamda ishlatilmoqda. Texnikaning hozirgi zamon turlari, ayniqsa aviatsiyada, juda katta quvvat talab qila boshladi. Bitta kuch agregat (qurilmasi)da katta quvvat olish imkoniyati reaktiv dvigatellarda mujasamlashgan. Bunday dvigatellar katta quvvat berishi bilan birga tuzilishi (porshenli IYOD lariga qaraganda) sodda.

«Reaktiv» so'zining ma'nosi: aktiv — faol (kuch), re — teskari, aks ma'nosini bildiradi. Demak, «reaktiv» — aktiv (faol)ga qarshi kuch hosil qiluvchi qurilma, dvigatel hisoblanadi.

Hozirgi kunda reaktiv dvigatellarining har xil turlari ishlatilmoqda: qattiq yonilg'ili RM (reaktiv dvigatel); suyuq yonilg'ili RD, turboreaktiv dvigatellar (TRD), turbovintli dvigatellar (TVD) va boshqalar. 6.18- rasmda reaktiv qurilmaning eng sodda sxemasi keltirilgan. Reaktiv qurilma (dvigatel) ning ishlashi ham sodda, yonish kamerasi (1) ga kiritilgan suyuq yoki qattiq yonilg'i va oksidlovchi gaz aralashib yonishi natijasida gazda (tutunda) bosim hosil bo'ladi (6.18- rasm). Yonish kamerasining davomiga (2) soplo (purkagich) o'rnatilgan bo'lib, yonish mahsulotlari juda katta tezlik bilan (soplo orqali) tashqariga otilib chiqadi. Rasmda gaz bosimi p va tezligi W ning soplo uzunligi bo'ylab o'zgarish jarayoni ko'rsatilgan.

Hozirgi zamon RD laridan katta tezlik olish uchun kombinatiyalashgan (omuxta) soplolar ishlatilmoqda.

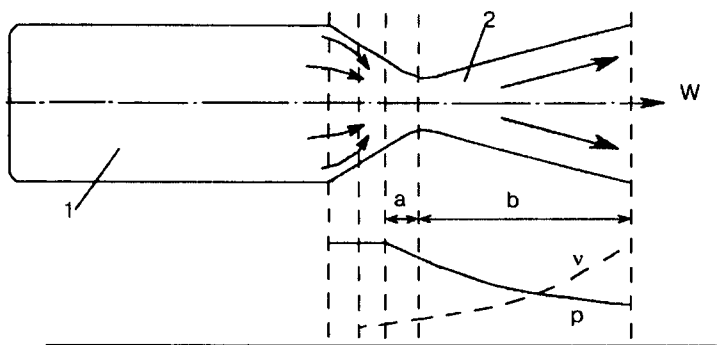
6.18- rasmda ifodalangan soplo 2 qismdan iborat: a — torayib boruvchi soplo, b — kengayib boruvchi soplo bo'lib hisoblanadi. Bunday murakkab, kombinatiyalashgan soploli «Loval» soplosi deb yuritilib, otilib chiqayotgan gazlarning tezligini kritik tezlik (tovush tezligi) dan oshirishga imkon beradi. Shunday qilib, reaktiv dvigatellarda harakatlantiruvchi (itaruvchi) kuch bo'lib, otilib chiqayotgan gaz massasining aks ta'sir kuchi hisoblanadi. Reaktiv qurilmalar sikllari ham ikki xil bo'lishi mumkin, $P = \text{const}$ yoki $v = \text{const}$ da issiqlik beriladigan reaktiv qurilmalar. Agar gazning soplodan otilib chiqish tezligini W bilan ifodalasak, gazning chiqishida olinadigan ish miqdori:

$$I = \frac{W^2}{2}.$$

Reaktiv qurilmaning termik FIK:

$$\eta_r = \frac{1}{q_1} = \frac{W^2}{2H_{ar}}. \quad (6.19)$$

Bunda: H_{ar} — yonilg'i va oksidlovchi gaz aralashmasining issiqlik berish imkoniyati mavjud reaktiv qurilmalarda:



6.18- rasm

$W = 2000 \dots 2500 \text{ m/sek (7200 \dots 9000 km/soat);}$

$H_{ar} = 6000 \dots 10000 \text{ kJ/kg.}$

Reaktiv qurilmalarning FIK ni aniqlash ham GTQ ning sikllaridagi kabi bo'ladi, ya'ni

a) agar siklda q_1 issiqlik $p = \text{const}$ da berilsa:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}};$$

b) agar siklda q_1 issiqlik $\vartheta = \text{const}$ da berilsa:

$$\eta_t = 1 - \frac{K \left(\lambda^{\frac{1}{k}} - 1 \right)}{\pi^{\frac{k-1}{k}} (\lambda - 1)}.$$

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Issiqlik dvigatellari termodinamik sikllarini tahlil qilishda qanday ruxsat etilgan cheklanishlar qabul qilinadi?
2. Ichki yonuv dvigatelining aralash issiqlik kiritish sikli haqida asosiy ma'lumotlarni gapirib bering. Siklning issiqlik FIK tahlilini keltiring.
3. Ichki yonuv dvigatelining hajm o'zgarmas jarayonida issiqlik kiritish sikliga doir asosiy ma'lumotlarni keltiring.
4. Hajm o'zgarmas va aralash issiqlik kiritish issiqlik FIK η_t larini solishtiruvchi tahlilni keltiring. Qaysi dvigatellar mos ravishda birinchi va keyingi sikllarni tavsiflaydi?
5. Bug' kuch qurilmalari sxemalarini tasvirlang va ularning bir-biridan farq qiluvchi xususiyatlarini ko'rsating.
6. Bug' kuch qurilmasi siklining FIK ni oshirish yo'llarini ko'rsating. Siklning T_s — koordinatalardagi tasvirlanishidan foydalanib, sikl tahlilini bajaring.

7.1. Umumiy ma'lumotlar

Qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishining ko'pgina sohalarida, masalan, qishloq xo'jalik mahsulotlarini saqlashda hamda boshqa texnologik jarayonlarda xona haroratini o'rab turuvchi muhit haroratidan ancha past darajada ushlab turish kerak bo'ladi. Ba'zida past haroratli muhitdan yuqori haroratli muhitga issiqlik haydash kerak bo'ladi. Jismning haroratini o'rab turuvchi muhit haroratidan pastroq qiymatga tushirish va uni talab qilinadigan darajada ushlab turish uchun sovitish qurilmalaridan foydalaniladi. O'rab turuvchi muhitdan issiqlik olib va uni yuqoriroq haroratli muhitga uzatishga mo'ljallangan sovitish qurilmalari **issiqlik nasoslari** deyiladi.

Sovitish qurilmalari va issiqlik nasoslarining ishlash tamoyillari ishchi jismning teskari aylanma sikl bajarishiga asoslangan. Buning natijasida issiqlik sovitiladigan jismdan ajratiladi va yuqoriroq haroratli o'rab turuvchi muhitga uzatiladi (issiqlik mashinalari teskari, yuqoriroq haroratli jismdan pastroq haroratli o'rab turuvchi muhitga issiqlik uzatiladi).

Sovitilayotgan jismdan vaqt birligida (bir soatda) ajralayotgan issiqlik miqdori **sovitish qurilmasining sovitish quvvati** deyiladi. 1kg sovitish agenti (ishchi jism) ga berilgan sovitish quvvati **sovitish agentining solishtirma sovitish quvvati** deyiladi.

Teskari sikl samarasini tavsiflash uchun sovitish koeffitsiyenti ε_x tushunchasi kiritiladi:

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{\ell_s} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}. \quad (7.1)$$

Bunda: q_1, q_2 — siklga kiritilayotgan va chiqarilayotgan issiqlik miqdori; ℓ_s — sikl ishi.

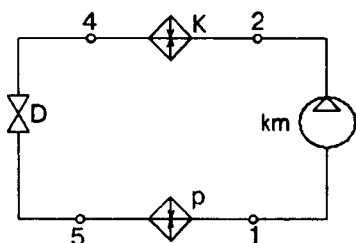
Sanoatda sun'iy sovuqni birinchi marta olishda sovitish qurilmasida ishchi jism sifatida havo ishlatilgan. Asosiy kamchiligi — sikl kam samarali bo'lib, o'ta chegaralangan qo'llanish sohasiga ega bo'lgan. qishloq xo'jaligida kompressorli qurilmalar keng tarqalgan. Bu qurilmada sun'iy sovuq ishlab chiqarishda kompressor uzatilmasi

uchun mexanik energiya sarflanadi va ishchi jism bosimini oshirish uchun termokimyoviy kompressiyali absorbsion qurilma ishlatiladi.

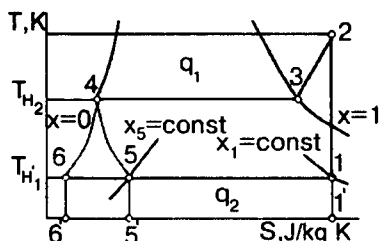
Ishchi jism (sovitish agentlari) sifatida past haroratda qaynovchi deb ataladigan suyuqliklar ishlatiladi. Sovitish agenti sifatida xlor metil CH_3Cl , CO_2 gazi, ammiak NH_3 va asosan freonlar — fluorlor uglevodorodning C_mH_n birikmalari ishlatiladi.

7.2. Bug' kompressiyali sovitish qurilmasi sikli

Qurilmaning prinsipial sxemasi 7.1- rasmda tasvirlangan. Ushbu shaklda siklning Ts — koordinatalardagi diagrammasi keltirilgan (sxema va diagrammadagi nuqtalar mos keladi).



7.1- rasm.



7.2- rasm.

Bug' kompressiyali sovitish qurilmasi sxemasi va siklning Ts -koordinatalardagi diagrammasi: KM —kompressor; R —refrejerator; D —drossel klapani; K —kondensator.

Qurilma quyidagicha ishlaydi. Refrejerator R dan to'yingan nam bug' X_1 quruqlik darajasiga, p_1 bosim va TH_1 haroratga ega bo'lib, kompressor KM bilan suriladi va p_2 bosim hamda T_2 haroratgacha siqiladi (1—2 jarayon). Kompressordan bug' kondensator K ga uzatiladi, bunda suv yoki o'rab turuvchi havo yordamida sovitiladi, uning bosimi p_2 o'zgarmagan holda boshlanishida quruq to'yingan bug'ga aylanadi (2—3 jarayon), keyin to'liq suyuqlikka aylanadi (3—4 jarayon). Kondensatorda ishchi jismdan olingan issiqlik q_1 diagrammada masshtabda 2—3—4—5—5'—1'—2 yuzaga teng.

Kondensatordan chiqayotgan suyuq ishchi jism drossel klapani D dan o'ta turib, drossellanadi (diagrammada bu jarayon shartli 4—5 bilan belgilangan) (7.2- rasm). Drossellanishda $h_4=h_5$, bosim P_2 dan P_1 ga tushadi. Bu jarayonda adiabatik drossellanish koeffitsiyenti $\alpha > 0$ ligidan ishchi jism harorati T_{N1} gacha tushadi. 5 nuqtadan bug'

to'yingan nam (quruqlik darajasi x_5) drossel klapanidan so'ng bug' refrerjatorga o'tadi. Ishchi jismga 0 bunda q_2 miqdor issiqlik o'rab turuvchi muhitdan uzatiladi ($5-1-1'-5'-5$ ekvivalent yuza), bug' bug'lanadi va 1 holatga o'tadi ($5-1$ jarayon). Bu qurilmaning sovitish ko'effitsiyenti:

$$\varepsilon_x = \frac{q_2}{q_1 - q_2} = \frac{h_1 - h_5}{(h_2 - h_4) - (h_1 - h_5)}. \quad (7.2)$$

$h_5 = h_4$ ekanligini hisobga olib, topamiz:

$$\varepsilon_x = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1}. \quad (7.3)$$

Bunda: $(h_2 - h_1)$ — kompressorda sarf bo'lgan ish.

Sovuqlik ishlab chiqarish unumdorligi Q bo'lsa, kompressorni harakatlantirish uchun (sovitkich qurilma oladigan) zarur bo'lgan quvvat quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$N = \frac{Q}{3,6 \cdot 10^6 \cdot \omega}, kW. \quad (7.4)$$

Bunda: ω — kompressor vali aylanishlar soni, 1/sek.

7.3. Absorbsion sovitkich qurilmasi sikli

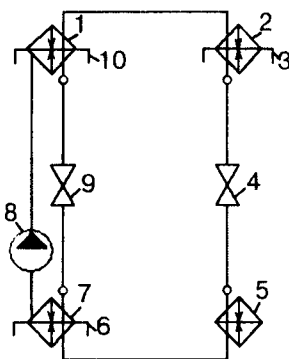
Ba'zi hollarda sovitkich qurilmasi siklida ishchi jism bosimini oshirishda mexanik energiya emas, issiqlik energiyasi, masalan, elektr qizdirgich yoki quyosh energiyasidan foydalanish maqsadga muvofiq. Bu xildagi sovitkich qurilmalarida ishchi jism sifatida jismlarning binar aralashmasidan foydalaniladi, bu aralashma bir xil bosimda har xil qaynash haroratiga ega bo'ladi.

Jismlardan biri past qaynash haroratga ega bo'lib, sovitish agenti hisoblanadi, boshqasi esa — absorbent. Odatda sovitkich agenti sifatida ammiak ishlatiladi, absorbent sifatida esa — suv.

Absorbsion sovitkich qurilmasining sxemasi 7.3- rasmda keltirilgan. Generator (1) da p_2 bosimda suvli ammiak eritma konsentrati mavjud. Tashqaridan q_1 miqdor issiqlik berish hisobiga (masalan, quvur 10 orqali qaynoq bug') sovitish agenti ammiak bug'lanishi sodir bo'ladi. Buning oqibatida generatorda kam konsentratli eritma qoladi. Hosil bo'lgan yuqori konsentratli sovitkich agenti bug'i kondensator (2) ga yo'llanadi, bunda quvur (3) orqali o'tadigan sovuq suv bilan sovitiladi va kondensiyalanadi. Kondensat drossel (4) orqali oqib o'tadi, natijada bosim p_2 dan p_1

ga kamayadi, keyin esa bug‘lantirgich (5) ga o‘tadi (refrijerator). Bug‘lantirgichda o‘rab turuvchi muhitda q_2 miqdorda issiqlik yutiladi va to‘yingan nam bug‘ bug‘lanadi. Bug‘lantirgichdan bug‘ absorber (7) ga yo‘llanadi, bunda u generatordan kelayotgan kuchsiz eritma (absorbent)da absorberlanadi. Bu holda absorbsiya issiqligi qabs quvur 6 dan oqayotgan sovitgich suviga yutiladi.

Generator (1) dagi bosim p_2 absorber (7) dagi bosim p_1 dan yuqori ekanligidan, ular orasidagi drossel klapan (9) o‘rnatiladi. Absorbsiyalanish jarayonida absorberdagi eritma tarkibidagi sovitish agenti konsentratsiyasi ortadi. To‘yingan eritma nasos (8) bilan absorberdan generator (1) ga uzatiladi.



7.3- rasm

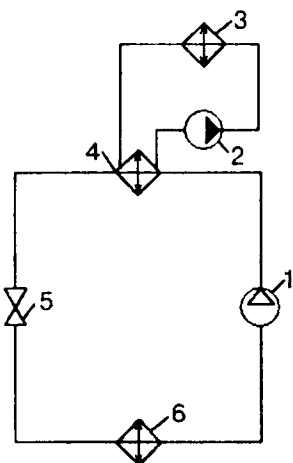
Shunday qilib, absorbsion sovitish qurilmasidan sovitish agentini kompressorda siqish o‘rniga desorbsiya jarayoni amalga oshadi, ya’ni eritma issiqlik berish hisobiga ortiqcha b o‘simli sovitish agenti (ammiak) ajratadi. Bug‘lantirgichda sovitiladigan jismdan ajratib olingan issiqlik q_2 ning sarf bo‘lgan issiqlik q_1 ga nisbati **issiqlik ishlatilish koeffitsiyenti**, yoki absorbsion sovitkich qurilmasi **issiqlik koeffitsiyenti** deyiladi.

$$\xi = \frac{q_2}{q_1}. \quad (7.5)$$

Absorbsion sovitish qurilmalari nisbatan past issiqlik dinamik samaraga ega, lekin qurilma soddaligidan (kompressor yo‘q) va foydalanishda yaroqliligidan keng tarqaldi. Qishloq va suv xo‘jaligida cheksiz quyosh energiyasidan foydalanuvchi gelioabsorbsion sovitkich mashinalari qo‘llanilishi kelajagi porloq hisoblanadi.

7.4. Issiqlik nasos sikli

Har xil haroratli jismlarning biridan ikkinchisiga issiqlik uzatishga mo‘ljallangan uskunalar **issiqlik transformatorlari (termo-transformatorlar)** deyiladi. Past haroratli jismlardan yuqori haroratli jismlarga issiqlik uzatishga xizmat qiladigan issiqlik transformatorlari kuchaytiruvchi transformatorlar deyiladi. Ularga issiqlik nasoslari kiradi, issiqlik nasoslari o‘rab turuvchi muhitdan yuqori haroratli obyektga issiqlik uzatishni amalga oshiradi. Past haroratli issiqlik manbai bo‘lib atmosfera havosi, havzalardagi suv



7.4- rasm.

yoki issiq suv havzalari, yer qari issiqligi (geotermal manbalar) xizmat qilishi mumkin, shu bilan birga turbina yoki kompressorlar kondensatorlari sovitish suvlari, ichki yonuv dvigatellarining chiqindi gazlari, chorvachilik, parrandachilik fermalaridan chiqayotgan havo va boshqalar ham issiqlik manbai bo'lishi mumkin.

Issiqlik qabul qiluvchi obyekt bo'lib, binoni isitish sistemasi qabul qilinishini birinchi bo'lib V.Tomson taklif qilgan, V.A.Mixelson esa yshbu g'oyaning texnik ishlanmalarini amalga oshirgan. Issiqlik qabul qiluvchi sifatida har xil texnologik jarayoni ishlatish mumkin. Issiqlik nasoslari — sovitkich qurilmalari bo'lib, boshqa chegaraviy haroratlarda ishlaydi. Masalan,

agar sovitgich qurilmalari uchun issiqlik qabul qiluvchi — o'rab turuvchi muhit bo'lsa, issiqlik nasoslari uchun o'rab turuvchi muhit issiqlik berish manbasi hisoblanadi. Shuning uchun issiqlik nasoslarining sikllari sovitkichlarnikidan farq qilmaydi.

Issiqlik nasosining sxemasi 7.4- rasmda tasvirlangan. Bug'lantirgich (6) da sovitish agenti o'rab turuvchi muhitdan (masalan, suv havzasi) qabul qilingan issiqlik hisobiga bug'lanadi, keyin kompressor (1) ga keladi. Sovitish agenti bug'langanda q_2 miqdorda issiqlik ajratib oladi. Sovitish agenti kompressorda siqiladi va kondensator (4) quvurlariga oqib o'tadi. Kondensator quvurlari isitiladigan obyekt orqali aylanayotgan isitish tizimi suvi bilan yuvib, sovitiladi. Issiqlik qabul qiluvchi (3) ga q_2 miqdor issiqlik bilan birgalikda kompressorda sarf bo'lgan ishga ekvivalent issiqlik ham beriladi. Keyin kondensat drossel klapan (5) orqali bug'lantirgich (6) quvuriga haydaladi. Issiqlikning nasos samarasi ***o'zgartirish koeffitsiyenti*** bilan baholanadi. Bu koeffitsiyent isitiladigan obyektga berilayotgan issiqlik $q_1 = q_2 + \ell_s$ bilan sarf bo'lgan ish nisbatidan aniqlanadi:

$$\psi - q_1 / \ell_s = (q_2 + \ell_s) / \ell_s = \varepsilon_x + 1. \quad (7.6)$$

Bunda: ε_x — sovitish koeffitsiyenti.

Bundan ko'rinadiki, o'zgartirish koeffitsiyenti birdan kattaligi ko'rinib turibdi. Uning qiymati 3...7 oraliq'ida bo'ladi, yuqori haroratli manbalardan foydalanilganda (masalan, issiqlik mashinalarining

chiqindi gazlari) bu ko'rsatkich yanada yuqori bo'ladi. Bu issiqlik nasoslaridan foydalanish maqsadga muvofiqligini ko'rsatadi. Issiqlik nasoslari samarasi tiklanuvchan va noan'anaviy energiya manbalaridan foydalanilganda yanada ortadi.

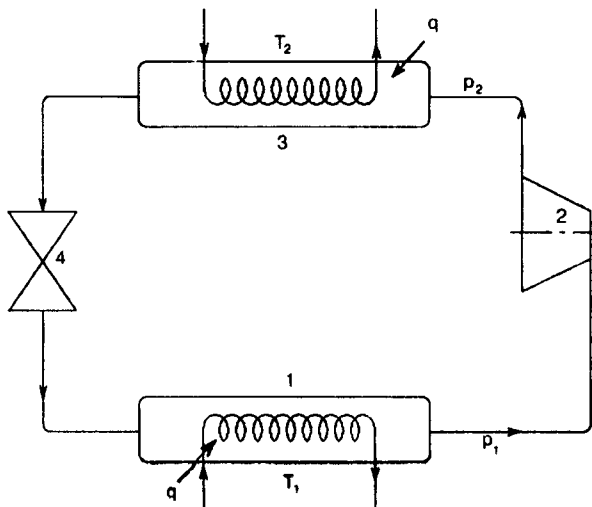
Issiqlik nasoslarining ishlatilishi. Tabiatda juda ko'p issiqlik manbalari mavjud bo'lib, ularning haroratlari 273 K dan yuqori, lekin issiqlik mashinalarida ishlatish uchun kamlik qiladi. Masalan, dengiz, daryo va buloq suvlarining haroratlari 0°C dan ancha yuqori. Ba'zi hollarda, korxona va xo'jaliklarda ancha yuqori haroratli suvlar ham tashqariga chiqarib yuboriladi.

Nisbatan yuqori bo'lmagan ($10\dots 20^{\circ}\text{C}$) haroratli issiqlik manbalarining issiqligidan foydalanish uchun **issiqlik nasoslari** degan qurilmalar ishlatiladi.

Izoh: Suv yuqoridan pastga o'zi oqadi, pastdan yuqoriga suv nasosi bilan majburan haydaladi. Shuningdek, issiqroq jismdan sovuqroq jismga issiqlik o'zi o'tadi, sovuqroq jismdan issiqroq jismga issiqlik o'zi o'tmaydi, issiqlik nasosi bilan majburan haydaladi.

Qurilmaning ishlash ketma-ketligi quyidagicha (7.5- rasm): T_1 haroratli daryo suvi bug'langich (1) ichidagi quvur chulg'ami (zmeyevik) orqali o'tib o'zidagi ko'p bo'lmagan issiqlik miqdori q_1 hisobiga yengil bug'lanadigan suyuqlik (freon)ni bug'lantiradi. Hosil bo'lgan freon bug'i kompressor (2) da siqilib, bosimi p_2 va harorati T_2 ga ko'tariladi.

Yengil bug'lanadigan ishchi jism (freon) ning bug'i kondensator (3) da suyuqlikka aylanib, bug'ning suyuqlikka aylanishidagi q issiqlik



7.5- rasm

miqdorini quvur chulg'ami ichidan o'tayotgan suvga beradi. Nisbatan sovigan ishchi jism (freon) suyuq holatda bosim pasaytirgich (4) (drossel) orqali yana bug'latgich (1)ga keladi va sikl takrorlanaveradi. Shunday qilib, nisbatan pastroq haroratli daryo suvining issiqligi, aytaylik xonalarni isitish uchun kerakli 50—60°C li isituvchi suv bilan ta'minlash mumkin.

Issiqlik nasosini ishlatish uchun sarflanadigan ish miqdori:

$$\ell = q - q_1.$$

Issiqlikdan foydalanish koeffitsiyenti esa:

$$\varepsilon = \frac{q}{\ell} = \frac{q}{q - q_1} = 1 + \frac{q_2}{\ell}. \quad (7.7)$$

Tenglikdan ko'rinib turibdiki, koeffitsiyent ε ning qiymati birdan katta. Agar issiqlik nasosi Karno (teskari) sikli bo'yicha ishlasa:

$$\varepsilon = \frac{q}{\ell} = \frac{T_2}{T_2 - T_1}. \quad (7.8)$$

Tushunarliroq bo'lishi uchun misol keltiramiz; daryo suvi +7°C (280 K), xonalarni isitish uchun esa +70°C (343 K) li suv kerak bo'lsa:

$$\varepsilon = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{343}{343 - 280} = 5,4 \quad (7.9)$$

yoki

$$q = \varepsilon \cdot \ell = 5,4 \cdot \ell.$$

Ya'ni, qurilma (nasos) o'zini aylantirishga sarflanadigan ishga qaraganda 5,4 marta ko'proq issiqlik beradi.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Sovitish qurilmalari va issiqlik nasoslarining aniqlanishlarini keltiring. Ularning umumiy va farq qiluvchi xususiyatlarini keltiring.
2. Kompression sovitkich qurilmasi prinsipial sxemasini tasvirlang va uni T_s diagrammasida tahlil qiling.
3. Absorbtsion sovitkich qurilmasi sxemasini tasvirlang va uni kompression sovitkich mashinalari bilan solishtirib, afzalliklari va kamchiliklarini ayting.
4. Issiqlik nasosining qo'llanilish sohalarini gapirib bering va farq qiluvchi xususiyatlarini ko'rsating. Issiqlik nasosi sxemasini keltiring.
5. Sovitkich qurilmasi va issiqlik nasosi uchun issiqlikdan qayta foydalanish koeffitsiyentini ifodalang. Ularni taqqoslab, tahlil qiling.

IKKINCHI QISM.

ISSIQLIK UZATILISH NAZARIYASI ASOSLARI

VIII BOB.

ASOSIY TUSHUNCHALAR

8.1. Fazoda issiqlik tarqalish usullari

Tabiatdagi barcha fizik jismlar va issiqlik dinamik tizimlar har xil haroratlarga ega bo'lsa, issiqlik energiyasi issiqroq jismdan sovuqroq jismga o'tadi, ya'ni issiqlik almashinishi sodir bo'ladi.

Jism ichidagi issiqroq zarralardan sovuqroq zarralarga yoki har xil haroratli jismlar orasida issiqlik energiyasining tarqalish hodisasini **issiqlik almashinish** deyiladi.

Issiqlik almashinish hodisasi sanoatdagi har turli texnologik jarayonlarda, qishloq xo'jaligida mahsulot quritish, yem tayyorlash, sut isitish va hokazo, odamlarning turmushida (xonalarni isitish, ovqat tayyorlash, sovitkichlar va hokazo) keng qo'llaniladi.

Jismlar issiqlik energiyasi uzatilishida bir-biriga tegishi yoki tegmasliklari mumkin. Jismlar bir-biriga tegishi natijasida issiqlik almashinishi ikki xil usulda: issiqlik o'tkazuvchanlik yoki konveksiya orqali sodir bo'ladi.

Issiqlik o'tkazuvchanlik deb, jism ichidagi zarralarning o'zaro bir-biriga tegishli yoki jismlarning bir-biriga tegishi natijasida issiqlikning uzatilish hodisasiga aytiladi. Bu hodisa jism zarralarining orasida haroratlar farqi bo'lganligi uchun sodir bo'ladi. Qattiq jismlarda bu hodisa erkin elektronlarning o'zaro ta'siri natijasida, gazlarda atom va molekulalarning diffuziyasi hisobiga, suyuqliklarda esa elastik to'lqinlar hisobiga sodir bo'ladi.

Konveksiya deb, suyuqlik va gazlarda zarralarning shu muhit ichida aralashuvi natijasida issiqlik almashinish hodisasiga aytiladi. Bu zarralarning haroratlari bir xil bo'lmaganligi uchun ular o'zaro to'qnashishi natijasida issiqlik almashinishi sodir bo'ladi. Zarralarning bir-biriga tegishi natijasida issiqlik almashganligi uchun konvektiv issiqlik almashinish issiqlik o'tkazuvchanlik bilan birga bo'ladi.

Harakatdagi muhit (gaz, suyuqlik) bilan idish devori orasidagi issiqlik uzatilishiga **issiqlik berish** deyiladi.

Bir jismdan ikkinchi jismga issiqlikning elektromagnit to'lqinlari orqali uzatilishini — **nurlanish bilan issiqlik almashinish** deyiladi.

Bunda 2 marta almashinish bo‘ladi: avval issiqlik energiyasi elektro-magnit tebranishlari energiyasiga o‘tadi, boshqa jismga tushgandan keyin to‘lqin energiyasi yana issiqlik energiyasiga aylanadi.

Uchala issiqlik almashinish usullarining yig‘indisi murakkab issiqlik almashinish deyiladi.

8.2. Asosiy aniqliklar

Issiqlik ko‘chishi (uzatilishi) har qanday fizik hodisa singari, fazoda va vaqt birligida sodir bo‘ladi, shuning uchun harorat u yoki bu muhitda umumiy holatda ko‘rilayotgan nuqta koordinatalariga va vaqtga bog‘liq $t = t(x, y, z, \tau)$. Fazoda haroratning oniy qiymatlarining yig‘indisi harorat maydoni deyiladi. Agar harorat maydoni vaqt birligida o‘zgarmasa, **statsionar harorat maydoni** deyiladi, aks holda, agar o‘zgarsa **nostatsionar harorat maydoni** deyiladi. Statsionar harorat maydoniga to‘g‘ri keladigan issiqlikning tartibli maydoni turg‘un deyiladi, nostatsionar harorat maydoniga to‘g‘ri keladigan issiqlikning tartibli maydoni **turg‘unsiz** deyiladi. Agar harorat bir koordinata o‘qi bo‘ylab o‘zgarsa, harorat maydonini bir o‘lchamli, agar ikki koordinata o‘qi bo‘yicha bo‘lsa, ikki o‘lchamli, uch koordinata o‘qi bo‘yicha bo‘lsa, uch o‘lchamli deyiladi. Harorat maydonlari bir turli va turlimas harorat maydonlariga ajratiladi. Birinchi holda harorat maydonlarining hamma nuqtalarida vaqtning har daqiqasida haroratlar bir xil, ikkinchi holda bir xil emas.

Bir turli bo‘lmagan harorat maydonida bir xil harorat ko‘rsatkichli nuqtalarni ajratish mumkin. Bu nuqtalar izotermik sirtni hosil qiladi. Bir turli bo‘lmagan harorat maydonida issiqlik ko‘chishi (uzatilishi) yuqorida (8.1) keltirilgan issiqlik tarqalish mexanizmlaridan (issiqlik o‘tkazuvchanlik, konveksiya, nurlanish) biri yoki bir nechitasi yordamida amalga oshishi mumkin. Ixtiyoriy yuzadan vaqt birligida o‘tayotgan issiqlik miqdori **issiqlik oqimi** Q deyiladi. Issiqlik ko‘chishi jadalligi issiqlik oqimining yuzaviy zichligi bilan tavsiflanadi, issiqlik oqimi zichligi oqimning yuza bo‘yicha tekis taqsimlanishini bildiradi:

$$q = Q/F, \text{ Wt/m}^2. \quad (8.1)$$

Bunda: F — Q issiqlik oqimi o‘tayotgan yuza maydoni.

Ma‘lum joydagi (lokal) va yuza F bo‘yicha o‘rtacha issiqlik oqimi zichliklari mavjud. Ular orasidagi bog‘lanish quyidagicha:

$$q = \frac{1}{F} \int_F q_l dF. \text{ Bunda: } q_l \text{ va } q — \text{ lokal va } F \text{ yuza bo‘yicha o‘rtacha}$$

issiqlik oqimi zichligi. Issiqlik oqimi va issiqlik oqimi zichligi vektor hamda skalyar kattaliklarda ifodalanishi mumkin. Issiqlik oqimi zichligining vektori deganda shunday vektor tushuniladiki, vektorning ixtiyoriy yo'nalishidagi proyeksiyasi lokal issiqlik oqimi zichligi bo'lib tanlangan yo'nalishga perpendikulyar yuzadan o'tadi.

Issiqlik tarqalishi qaysidir muhitda (qattiq, suyuq, gazli) yoki vakuumda(nurlanish bilan) sodir bo'lishi mumkin. Gidromexanikada va issiqlik almashinish nazariyasida quyidagi muhitlar farqlanadi: bir tekis, bir fazali, ko'p fazali. Bir tekis muhit — muhitni kontinuum sifatida qarash mumkin, bunda diskret tuzilish hisobga olinmaydi. Bir fazali muhit — bu bir tekis bir yoki ko'p komponentli muhit bo'lib, uning xususiyatlari fazoda uzluksiz o'zgarishi mumkin. Ko'p fazali muhit deganda tekis bir yoki ko'p komponentli muhit tushuniladi, bu muhit qator bir fazali qismlardan tashkil topadi, uning chegarasida fizik xususiyatlari ko'p qirrali o'zgaradi.

Muhitda issiqlik ko'chishi haroratlar farqidan tashqari, ichki issiqlik manbalari ta'sirida ham sodir bo'ladi. Ichki issiqlik manbalarining quvvati deb, ichki issiqlik manbasidan chiqayotgan (yoki yutilayotgan) muhit hajmi va vaqt birligidagi issiqlik miqdori tushuniladi.

8.3. Issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni)

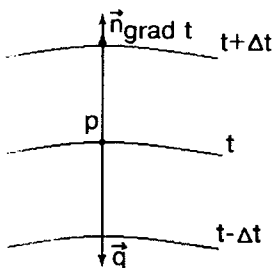
Issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni) issiqlik o'tkazuvchanlik natijasida yuzaga keladigan issiqlik oqimi bilan muhitda haroratlar har xilligi orasidagi miqdor jihatdan bog'liqlikni o'rnatadi. Uni ifodalash uchun muhitda $t + \Delta t$; t ; $t - \Delta t$ harorat ko'rsatkichli izotermik sirtlar ajratamiz (8.1- rasm).

Izotermik yuzada P nuqtani olamiz. P nuqtadan izotermik sirtga normal $\vec{n}$ o'tkazamiz. **Harorat gradiyenti** deganda, shunday vektor tushuniladiki, uning yo'nalishi harorat o'sishi bo'yicha to'g'ri keladi va u ushbu yo'nalishda haroratdan olingan xususiy hosilaga teng:

$$\text{grad } t = \frac{\partial t}{\partial n} \cdot \vec{n}. \quad (8.2)$$

Bunda: $\vec{n}$ — birlik vektori bo'lib, normal yo'nalishiga harorat o'sishi bo'yicha to'g'ri keladi.

Issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni)ga ko'ra issiqlik oqimining zichligi harorat gradiyentiga to'g'ri proporsional bo'ladi:



8.1- rasm.

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad } t. \quad (8.3)$$

Bunda: λ — proporsionallik koeffitsiyenti bo‘lib, issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti deyiladi, W/mK.

Tenglama (8.3) ning skalyar yozilishi quyidagicha:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (8.4)$$

(8.3) va (8.4) tenglamalardagi manfiy belgisi grad t va $\vec{q}$ vektorlarining qarama-qarshi yo‘nalganligini bildiradi; grad t vektori harorat ortishi tomonga yo‘nalgan, vektor $\vec{q}$ — harorat pasayishi bo‘yicha yo‘nalgan. (8.4) tenglamadan issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyentini ifodalaymiz:

$$\lambda = -q \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (8.5)$$

(8.5) tenglamani tahlil qilib, issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ ning fizik ma‘nosini aniqlash mumkin: issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti — bu haroratlar gradiyenti birga teng bo‘lganda birlik izotermik yuzadan birlik vaqtda o‘tayotgan issiqlik miqdori.

8.4. Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti

Issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti jismning fizik parametri bo‘lib, uning o‘tkazuvchanlik xususiyatlarini tavsiflaydi. Uning qiymatlari tajriba usulida aniqlanadi va issiqlik-fizik ma‘lumotnomalarda keltiriladi. Umumiy holda issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyent jism turi, harorati va bosimi funksiyalari bo‘ladi.

Gazlar uchun issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti $\lambda=0,006 \dots 0,6$ W/(mK) qiymatlariga ega bo‘ladi, bosim ortishiga bog‘liq bo‘lmaydi va harorat ko‘tarilishi bilan qiymati oshadi.

Suyuqliklar uchun issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti son qiymatlari $\lambda= 0,007 \dots 0,7$ W/(m K) bo‘lib, harorat va (suv va glitserindan tashqari) bosim oshishi bilan oshadi.

Qattiq materiallarning issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti metall va nometallar (dielektriklar) uchun har xil tartibga ega. Metallar yaxshi issiqlik o‘tkazuvchanlikka ega va $\lambda=3 \dots 450$ W/(m K) qiymatlari oralig‘ida bo‘ladi. Qurilish va issiqlik izolyatsiya materiallari uchun issiqlik o‘tkazuvchanlik koeffitsiyenti $\lambda=0,023 \dots 2.9$ W/(mK) qiymatlarga ega.

8.5. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasi

Haroratlar maydonini hisoblash issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasini integrallash yo'li bilan amalga oshiriladi. Differensial tenglama — bu issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonining kechishini tavsiflovchi kattaliklar bog'lanishi matematik yozilishidir. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasi haroratning vaqtga va ko'rilayotgan nuqta koordinatalariga bog'liqligini o'rnatadi. Differensial tenglamani keltirib chiqarish uchun ko'rilayotgan muhitda ixtiyoriy R nuqtani qarab chiqamiz.

Bu nuqtani F sirtli elementar V hajm bilan o'raymiz (8.2- rasm).

Muhitda haroratlari har xil maydonlar mavjudligidan issiqlik oqimlari paydo bo'ladi. F sirtga taalluqli dF yuza elementi issiqlik oqimi differensial tenglamasi

$$dQ = \vec{q} \cdot 1 \cdot \vec{n} \cdot dF \quad (8.6)$$

Bunda: $\vec{q}$ — issiqlik oqimi zichligi vektori, Bt/m^2 ; $1 \cdot \vec{n}$ — dF yuzaga tashqi normalning birlik vektori.

dF yuza elementining issiqlik o'tkazuvchanligi oqimi zichligi issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonunidan aniqlanadi, bundan:

$$dQ = -\lambda \cdot \text{grad} t \cdot 1 \cdot \vec{n} \cdot dF \quad (8.7)$$

F sirtidan ajralayotgan umumiy issiqlik oqimi (8.6) tenglamani F sirt bo'yicha integrallashdan topiladi:

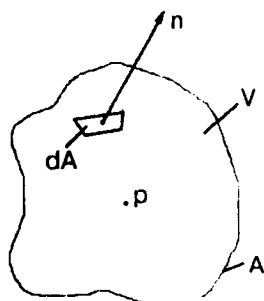
$$Q = \iint_F dQ = \iint_F \vec{q} \cdot 1 \vec{n} \cdot dF = - \iint_F \lambda \text{grad} t \cdot 1 \vec{n} \cdot dF \quad (8.8)$$

Q issiqlik oqimi V hajmdagi ichki energiya o'zgarishiga olib keladi, bu ichki energiya o'zgarishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\iiint_V c \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV \quad (8.9)$$

Bunda: c — muhitning solishtirma issiqlik sig'imi, $\frac{J}{\text{kg} \cdot K}$;

ρ — muhit zichligi, kg/m^3 ; $\partial t / \partial \tau$ — V hajm ichidagi nuqtalarda harorat o'zgarishi tezligi.



8.2- rasm.

V hajm ichida ichki issiqlik manbalari bo'lsa, (8.8) va (8.9) tenglamalar bilan aniqlanadigan issiqliklar miqdori teng bo'lishi kerak, demak:

$$\iiint_V c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = - \iint_F \lambda \text{grad} t \cdot l\vec{n} \cdot dF. \quad (8.10)$$

Ostrogradskiy-Gauss teoremasiga ko'ra yopiq F yuza orqali o'tuvchi issiqlik oqimi vektori $\vec{q}$ divergensiya (divq) dan olingan uchlamchi integralga teng bo'lib, chegaralangan F yuza sirtning V hajmi uchun olinadi:

$$\iiint_V c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = - \iiint_V \text{div}(-\lambda \cdot \text{grad} t) dV. \quad (8.11)$$

Tenglikning ikkala tomoni bir xil uchlamchi integral ekanligidan

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad} t). \quad (8.12)$$

Olingan tenglama issiqlik o'tkazuvchanlik uchun Fyuringning *defferensial tenglamasi* deyiladi. Tenglama funksiya $t(x, y, z, \tau)$ shartini qanoatlantiradi. Ko'p hollarda issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ haroratga bog'liq emas deb qabul qilish mumkin, u holda (8.12) tenglama dekart koordinatalari uchun quyidagicha yoziladi:

$$\partial t / \partial \tau = a(\partial^2 t / \partial x^2 + \partial^2 t / \partial y^2 + \partial^2 t / \partial z^2) = a\Delta t \quad (8.13)$$

Bunda: $a = \lambda / c\rho$ — harorat o'tkazuvchanlik, m^2/s ;

$\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ — Laplas operatori.

(8.13) tenglama ko'rilayotgan muhitda issiqlikning o'tkazuvchanligi orqali tarqalishida haroratning fazoviy va vaqt birligida o'zgarishining issiqlik uzatilishiga bog'liqligini aniqlaydi.

8.6. Chegaraviy shartlar

Issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasini umumiy integrali cheksiz ko'p xususiy yechimlardan iborat. Yechimlar yig'indisida u yoki bu xususiy yechimni ajratish (alohida olingan issiqlik o'tkazuvchanlik jarayoni) uchun bir xillilik shartlari (qo'shimcha shartlar)ni bilish zarur. Bir xillilik shartlari:

1. Issiqlik o'tkazuvchanlik kechayotgan muhitning shakli, o'lchamlarini tavsiflovchi geometrik shartlar.

2. Ichki issiqlik manbalari (agar ular bo'lsa)ni tavsiflovchi, issiqlik-harorat o'tkazuvchanlikni aniqlovchi fizik shartlar.

3. Jarayon boshlanish momentida harorat maydoni uchun beriladigan boshlang'ich shartlar.

4. Jismning o'rab turuvchi muhit bilan issiqlik almashinish shartlarini aniqlovchi chegaraviy shartlar.

Boshlang'ich va chegaraviy shartlar yig'indisi masalaning chegaraviy shartlari deyiladi. Birlamchi chegaraviy shartlar haroratning fazoviy chegaralariga tarqalishida va vaqt birligida o'zgarishida belgilanadi:

$$t = (P, \tau) = f(P, \tau); \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.14)$$

Bunda: p — F jism yuzasida yotgan nuqta; $f(P, \tau)$ — berilgan uzluksiz funksiya. Birlamchi chegaraviy shartlar uchun xususiy hol etib jism sirtidagi nuqtalarda harorat bir xil va vaqt birligida o'zgarishini qabul qilish mumkin:

$$t = (P, \tau) = \text{const}; \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.15)$$

Ikkilamchi chegaraviy shartlar — jismning fazoviy chegaralariga issiqlik oqimining tarqalishi va uning vaqt birligida o'zgarishi beriladi:

$$q(P, \tau) = f(P, \tau); \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.16)$$

Bunda: $q(P, \tau)$ — A yuzaga yotuvchi p nuqtadagi issiqlik oqimi zichligi;

$f(P, \tau)$ — berilgan uzluksiz funksiya.

Issiqlik oqimi zichligi $q(P, \tau)$ ni Fyuringning issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamasi bilan ifodasi quyidagicha bo'ladi:

$$q(P, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(P, \tau)}{\partial n}. \quad (8.17)$$

Bunda: n — F yuzaga p nuqtadagi normal.

(8.16) va (8.17) tenglamalarni birlashtirib, quyidagi ifodalarga ega bo'lamiz:

$$-\lambda \frac{\partial t(P, \tau)}{\partial n} = f(P, \tau); \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.18)$$

Ikkilamchi chegaraviy shartlar uchun xususiy hollar:

issiqlik oqimi doimiyligi (jismning yuzadagi hamma nuqtalarda o'zgarmas va vaqt birligida ham o'zgarmaydi):

$$q(P, \tau) = \text{const}; \quad P \in F; \quad \tau > 0 \quad (8.19)$$

absolyut issiqlik izolyatsiyasi sharti:

$$q(P, \tau) = 0; \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.20)$$

yoki (8.16) ni hisobga olib,

$$\partial t(P, \tau) / \partial n = 0 \quad P \in F, \quad \tau > 0 \quad (8.21)$$

Uchlamchi chegaraviy shartlar jism yuzasidagi issiqlik oqimi zichligining (jism issiqlik o'tkazuvchanligi hisobiga) jism yuzasi harorati va o'rab turuvchi muhit harorati bilan bog'lanishi beriladi:

$$q(P, \tau) = -\lambda \frac{\partial t(P, \tau)}{\partial n} = \alpha [t(P, \tau) - t_c(P, \tau)]; \quad P \in F; \quad \tau > 0. \quad (8.22)$$

Bunda: $t(P, \tau)$ — F jism yuzasidagi nuqtalar harorati; $t_c(P, \tau)$ — P nuqta joylashgan joyda o'rab turuvchi muhit harorati; α — proporsionallik koeffitsiyenti; uni issiqlik almashinish koeffitsiyenti deb ataladi. Issiqlik almashinish koeffitsiyentining o'lchov birligi (W/m^2K) va u jism yuzasidan issiqlik berish jadalligini aniqlaydi.

To'rtlamchi chegaraviy shartlar — harorat maydonining uzluksizlik va ikki muhit (jism) tegish yuzasida energiya saqlanish qonuni, ya'ni ikkala muhit (jism)da haroratlar va issiqlik oqimi zichligi o'zgaruvchanligi hisobiga tenglashishini ifodalaydi:

$$t_1(P, \tau) = t_2(P, \tau), \quad P \in F, \quad \tau > 0;$$
$$q(P, \tau) = \lambda_1 \frac{\partial t_1(P, \tau)}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(P, \tau)}{\partial n}, \quad P \in F, \quad \tau > 0. \quad (8.23)$$

1 va 2 indekslar bunda ikki muhit (jism)ga tegishli; F — ikki jismning tegishish yuzasi; n — p nuqtada yuzaga tushirilgan umumiy normal.

8.7. Turg'un tartibda issiqlik o'tkazuvchanlik

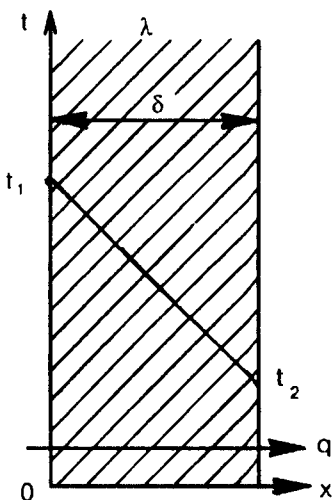
Yassi sirtlarda issiqlik o'tkazuvchanlik. 8.3- rasmda bir qatlamli yassi sirt ifodalangan. Sirt (to'siq)ning chap tomonidagi muhit t_1 haroratga ega, o'ng tomonidagi muhit t_2 haroratga ega bo'lib, ichki (chap) devor issiqroq, tashqi devor sovuqroq, ya'ni $t_1 > t_2$. Demak, issiqlik oqimi q chapdan o'ngga yo'nalgan. Bu jarayon uchun Furrye qonuni quyidagicha bo'ladi:

$$Q = \lambda F_d \tau \frac{t_{d1} - t_{d2}}{\delta}, J. \quad (8.24)$$

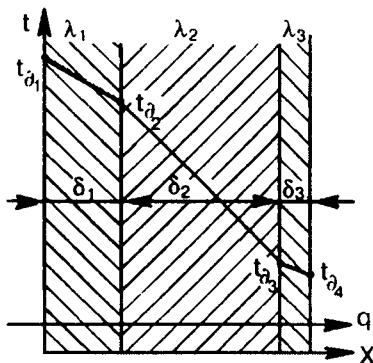
Bunda, F — devor (sirt) yuzasi, m^2 da; τ — issiqlik o'tish vaqti, sek.;

δ — devor qalinligi, m da.

Solishtirma issiqlik oqimi quyidagicha ifodalanadi:



8.3- rasm.



8.4- rasm.

$$q = \frac{Q}{F_d \cdot \tau} = \frac{t_{d1} - t_{d2}}{\frac{\delta}{\lambda}}; \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \quad (8.25)$$

Bundagi $\frac{\delta}{\lambda}$ nisbat — yassi sirtli devorning **termik qarshiligi** deyiladi. (8.25) tenglikdan kerakli paytda devorning ichki t_1 va tashqi harorati t_2 ni aniqlash qiyin emas:

$$t_{d2} = t_{d1} - q \frac{\delta}{\lambda}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8.26)$$

(8.25) tengliklarga e'tibor bersak, to'g'ri chiziq tenglamasi bilan bir xil, demak yassi devor qalinligi bo'lib harorat to'g'ri chizig'i qonuniyati bilan o'zgaradi.

Ko'p qatlamli yassi devorlardan issiqlikning o'tishi. Texnikaning turli sohalarida va turmushimizda issiqlik uzatilishining ko'p qatlamli holatiga duch kelamiz.

Masalan, uy devorlari, isitish pechlarida devor + suvoq + bo'yoq bo'lishi, pech ichlarida esa bundan tashqari qurum qatlami ham bo'ladi. 8.4- rasmda 3 qatlamli yassi devor ifodalangan.

Bunda: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ — devor qatamlarining issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyentlari;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ — devor qatamlarining qalinliklari.

Devorning chap (ichki) tomonida ham, tashqi tomonida ham haroratlar o'zgarmas va ular o'zaro $t_1 > t_2$ nisbatda bo'lsa, issiqlik oqimi q chapdan o'ngga bo'ladi. Issiqlik oqimining ifodasini har bir qatlam uchun yozamiz va qatlam devorlaridagi $t_{d1} - t_{d2}$ haroratlar farqini aniqlaymiz. Birinchi qatlam uchun:

$$q = \frac{t_{d1} - t_{d2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1}} \quad \text{yoki} \quad t_{d1} - t_{d2} = q \frac{\delta_1}{\lambda_1}. \quad (8.27)$$

Ikkinchi qatlam uchun:

$$q = \frac{t_{d1} - t_{d3}}{\frac{\delta_2}{\lambda_2}} \quad \text{yoki} \quad t_{d2} - t_{d3} = q \frac{\delta_2}{\lambda_2}. \quad (8.28)$$

Uchinchi qatlam uchun:

$$q = \frac{t_{d3} - t_{d4}}{\frac{\delta_3}{\lambda_3}} \quad \text{yoki} \quad t_{d3} - t_{d4} = q \frac{\delta_3}{\lambda_3}. \quad (8.29)$$

(8.27), (8.28) va (8.29) tengliklarning o'ng va chap tomonlarini o'zaro qo'shib, quyidagi ifodalarni hosil qilamiz:

$$t_{d1} - t_{d4} = q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \quad \text{yoki} \quad q = \frac{t_{d1} - t_{d4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}. \quad (8.30)$$

Agar qatlamlar soni 3 ta emas n ta bo'lsa:

$$q = \frac{t_{d1} - t_{dn+1}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (8.31)$$

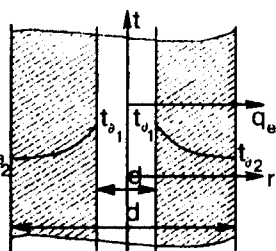
Yassi sirtli devorlarni hisoblashni soddalashtirish uchun issiqlik o'tkazuvchanlikning ekvivalent koeffitsiyentidan foydalanish mumkin:

$$\lambda_{ekv} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}. \quad (8.32)$$

Issiqlik o'tkazuvchanlikning ekvivalent koeffitsiyenti qatlamlar qalinliklari yig'indisining qatlamlar termik qarshiliklari yig'indisiga bo'lgan nisbatiga teng.

Silindrik shakldagi devorlardan issiqlikning o'tishi. Texnikada va turmushda ko'pincha isitish hamda sovitish moslamalari silindrik sirt ko'rinishida bo'ladi (8.5- rasm).

$t_{\partial 1}$, $t_{\partial 2}$ — mos ravishda silindr ichidagi va tashqi muhitdagi haroratlari; λ — silindr materialining issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti; d_2 va d_1 — silindrning tashqi va ichki diametrlari; $t_{\partial 2}$ va $t_{\partial 1}$ — silindr devorining haroratlari; L — silindr (truba)ning uzunligi.



8.5- rasm.

Silindrik sirt bo'lganda ham yassi sirtlardan issiqlikning o'tishi qonuniyatlariga bo'ysuniladi, faqat devor bir xil, shakli boshqa bo'lganligi uchun formulaning shakli biroz o'zgaradi.

Furye qonuni tenglamasini integrallash natijasida o'tayotgan issiqlik miqdori ifodasini hosil qilamiz:

$$Q = 2\pi\lambda\ell \frac{t_{\partial 1} - t_{\partial 2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (8.33)$$

Issiqlik oqimining chiziqli zichligi aniqlanishiga zarurat tug'lsa, quyidagi formuladan foydalaniladi:

$$q_e = \frac{Q}{\ell} = \frac{t_{\partial 1} - t_{\partial 2}}{\frac{1}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (8.34)$$

Ichki issiqlik manbalari mavjud bo'lganda issiqlik o'tkazuvchanlik.

Qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarish jarayonlarida qator hollarda ichki issiqlik manbalari — elektr qizdirgichlar, induksion qizdirgichlar, yuqori chastotali (YuCh) yoki o'ta yuqori chastotali (O'YuCh) nurlanish manbalaridan foydalaniladi. Uzluksiz ishlaydigan qurilmalarda ushbu issiqlik manbalari to'xtovsiz ishlatiladi, bundan esa har xil shakldagi jismlarda ichki issiqlik manbalarini hisobga olib, statsionar harorat maydonlarini hisoblash zarurati tug'iladi.

Misol sifatida aylana silindr shakldagi qizdiriladigan muhit (jism)ni ko'rib chiqamiz, silindrning radiusi uzunligiga nisbatan juda kichik ($r \ll \ell$) bo'lsin, ichki issiqlik manbai uning hajmi bo'yicha keng taqsimlangan. Silindr yuzasi harorati o'zgarmas va t_c ga teng bo'lsin. Silindrik koordinatalarda masalalar simmetrik bo'ladi va shuning uchun statsionar issiqlik tartibi uchun issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamasi ichki issiqlik manbaini hisobga olgan holda quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (8.35)$$

Bunda, q_v — ichki issiqlik manbalari quvvati, W/m^3

Chegara shartlari:

1) o'qli simmetriya sharti:

$$\left. \frac{dt}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad r = 0 \quad \text{bo'lsa;} \quad (8.36)$$

2) silindr yuzasida birinchi turdagi chegara sharti:

$$t_{r=r_0} = t_c = \text{const}, \quad r = r_0 \quad \text{bo'lsa.}$$

Differensial tenglama (8.34) ni birinchi chegara shartlari bo'yicha integrallab, ikkinchi sharti uchun λ va $q_v = \text{const}$ ekanligidan quyidagi ifoda kelib chiqadi.

$$t = t_c + \frac{q_v \cdot r_0^2}{4\lambda} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right]. \quad (8.38)$$

Oxirgi tenglamadan ko'rinib turibdiki, bu hol uchun harorat taqsimlanishi parabolik xarakterga ega, haroratning maksimal qiymati silindr o'qiga to'g'ri keladi:

$$t_0 = t_c + \frac{q_v \cdot r_0^2}{4\lambda}. \quad (8.39)$$

Xuddi shu usulda boshqa shakldagi jismlar uchun har xil chegaraviy shartlar va ichki issiqlik manbalari mavjud hollar uchun statsionar harorat maydonlarini hisoblash mumkin.

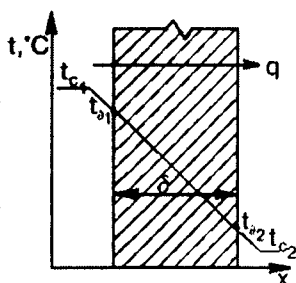
8.8. Uchinchi turdagi chegaraviy shartlarda issiqlik o'tkazuvchanlik. Issiqlik izolyatsiyasi

Amaliyotda bir harakatlanuvchi muhitdan (suyuqliklar yoki gazlar) boshqasiga ajratib turuvchi devor orqali issiqlik uzatilish jarayonlari keng qo'llaniladi. Issiqlik tashish uchun ishlatiladigan harakatlanuvchi muhit **issiqlik tashuvchi**, ajratib turuvchi devor orqali ikki issiqlik tashuvchi orasidagi issiqlik almashinishiga **issiqlik uzatish** deyiladi.

Misol sifatida chorvachilik yoki parrandachilik binolari ichki havosi tarkibidagi ortiqcha issiqlikning o'rab turuvchi devorlar orqali tashqi havoga uzatilishini; xona isitish asbobidagi issiq suvdan xona havosiga issiqlik uzatilishini; bug' qozoni qizdirish quvurlaridan oqayotgan

tutundan suvga issiqlik uzatilishi va boshqa hollarni keltirish mumkin.

Issiqlik uzatilishida issiqlik ketma-ketlikda ko'chadi, avval issiqroq issiqlik tashuvchidan devorga konvektiv issiqlik almashinuvi, keyin devor qalinligi orqali issiqlik o'tkazuvchanlik yo'li bilan (bir yoki ko'p qavatli) va oxiri yana konvektiv issiqlik almashinuvi yo'li bilan sovuq devor yuzasida sovuqroq issiqlik tashuvchiga issiqlik ko'chadi. 8.6- rasmda issiqlik uzatilishining umumiy ko'rinishi keltirilgan.



8.6- rasm.

Issiqlik uzatilishi statsionar va nostatsionar bo'lishi mumkin. Qalinligi δ va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ bo'lgan bir qavatli yassi devordan statsionar issiqlik uzatilishini ko'rib chiqamiz.

Qizigan issiqlik tashuvchi harorati t_{c1} bo'lsin, sovuqrog'ini esa t_{c2} . Qabul qilamizki, devorlardan issiqlik tashuvchilar bilan issiqlik almashinuvi uchinchi turdagi chegaraviy shartlar bo'yicha amalga oshadi va bunda t_{c1} , t_{c2} , α_1 , α_2 kattaliklar o'zgarmas.

(8.25) ga ko'ra va yuqorida keltirilganlardan qizigan issiqlik tashuvchidan devorga uzatilayotgan issiqlik oqimi tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$q = \alpha_1 (t_{c1} - t_{c2}). \quad (8.40)$$

Bunda: α_1 — qizigan issiqlik tashuvchi bilan devor orasida issiqlik almashinuv koeffitsiyenti. Statsionar tartibda shu issiqlik oqimi devor orqali uzatiladi, shuning uchun issiqlik o'tkazuvchanlik uchun Furiye tenglamasini quyidagicha yozish mumkin:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}). \quad (8.41)$$

Devorning ikkinchi yuzasidan va sovuq issiqlik tashuvchi ajralayotgan issiqlik oqimi zichligi ham (8.39) tenglama kabi topiladi:

$$q = \alpha_2 (t_{c1} - t_{c2}). \quad (8.42)$$

Bunda: α_2 — devorning ikkinchi yuzasi bilan sovuq issiqlik tashuvchi orasida issiqlik almashinuv koeffitsiyenti.

(8.39), (8.40) va (8.41) tenglamalarni quyidagicha yozamiz:

$$\left. \begin{aligned} q/\alpha_1 &= t_{c_1} - t_{\partial_1}; \\ q\delta/\lambda &= t_{\partial_1} - t_{\partial_2}; \\ q/\alpha_2 &= t_{\partial_2} - t_{c_2}. \end{aligned} \right\} \quad (8.43)$$

Tenglamalar tizimining o'ng va chap qismlarini qo'shib, hosil bo'ladigan tenglamani q ga nisbatan yechib, topamiz:

$$q = \frac{t_{c_1} - t_{c_2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (8.44)$$

Belgilab olamiz:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (8.45)$$

va (8.43) ni quyidagicha yozamiz:

$$q = k(t_{c_1} - t_{c_2}) \quad (8.46)$$

yoki issiqlik oqimi uchun:

$$Q = k(t_{c_1} - t_{c_2}) \cdot F. \quad (8.47)$$

Bunda: F — devor yuzasi maydoni, m^2 .

(8.46) tenglama **issiqlik uzatilish tenglamasi** deyiladi, koeffitsiyent k — **issiqlik uzatilish koeffitsiyenti** deyiladi, uning fizik ma'nosini aniqlash uchun (8.46) tenglamani k ga nisbatan yechamiz:

$$k = \frac{Q}{(t_{c_1} - t_{c_2}) \cdot F} = \frac{q}{t_{c_1} - t_{c_2}}. \quad (8.48)$$

(8.47) ga ko'ra issiqlik uzatish koeffitsiyenti issiqlik uzatish jadalligini tavsiflaydi va devor orqali issiqlik oqimi zichligining issiqlik tashuvchilar orasidagi harorati bosimiga nisbatiga teng. Koeffitsiyenti o'lchov birligi $W/(m^2K)$.

Devor yuzasining issiqlik berish koeffitsiyentiga teng teskari qiymat kattaligi **tashqi issiqlik qarshiligi** deyiladi. Shunday qilib, (8.44) tenglamasida:

$$R_{\alpha_1} = \frac{1}{\alpha_1} \text{ va } R_{\alpha_2} = \frac{1}{\alpha_2} \text{ — tashqi issiqlik qarshiliklari;}$$

$$R_{\lambda} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{t_{q_1} - t_{q_2}}{q} \text{ — ichki issiqlik qarshiligi.}$$

Issiqlik uzatilish ko'effitsiyentiga teskari va son jihatdan tashqi hamda ichki issiqlik qarshiliklari yig'indisiga teng kattalik **umumiy issiqlik qarshiligi** deyiladi. Bundan, yassi ko'p qatlamli devorlar uchun:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (8.49)$$

Bunda: i — qatlam tartib raqami; n — qatlamlar soni.

(8.48) tenglama issiqlik uzatilish ko'effitsiyentini hisoblashda va $d_{\gamma}/d_{\square}$ 1,5 shartga javob beruvchi yupqa silindrik devorlar orqali uzatiladigan issiqlik oqimlarini aniqlashda keng qo'llaniladi.

Issiqlik almashinish yuzalaridan issiqlik yo'qolishini kamaytirish maqsadida ko'pincha issiqlik izolyatsiyasi qoplanadi, izolyatsiya materiallarining issiqlik o'tkazuvchanlik ko'effitsiyenti λ kichik qiymatlarga ega.

Agar issiqlik o'tkazuvchanlik ko'effitsiyenti $\lambda < 0,2 \dots 0,25$ W/(m.K) bo'lsa, bu materiallar **issiqlik izolyatsiyasi materiallari** hisoblanadi. Issiqlik izolyatsiyasi materiallariga asbest, mineralli momiq, diatomli g'isht, penoplast, g'ovak betonlar kiradi. Ko'pchilik issiqlik izolyatsiyasi materiallari g'ovak tuzilishga ega, chunki g'ovaklardagi havo kam issiqlik o'tkazuvchanlik xususiyatiga ega. Xuddi shunday vakuum g'ovakli, vakuum ko'p qatlamli va vakuum — kukunli izolyatsiya materiallari ishlab chiqiladi, materiallarning vakuum — g'ovakligi hisobiga 10^{-4} W/(m.K) tartibdagi past issiqlik o'tkazuvchanlik (samarali issiqlik izolyatsiyasi) hosil qilinadi.

Silindrik sirt yuzaga issiqlik izolyatsiyasi qoplanishi o'ziga xos xususiyatlarga ega: issiqlik izolyatsiya qoplami qalinligining ortishida bir holda issiqlik oqimi kamayadi, boshqa holda — ortadi. Bunday sodir bo'lishiga sabab izolyatsiya qoplamasi qalinligi oshganda ichki issiqqa qarshilik kamayishi bilan birga tashqi issiqlik berish yuzasi oshadi, bu esa issiq yo'qolishini ortishiga olib keladi.

Ikki qatlamli silindrik qoplamaning issiqlik qarshiligi tahlili quyidagi izolyatsiya kritik diametri ifodasini keltirib chiqaradi: $d_{kp} = 2\lambda_{iz}/\alpha_2$, bu holda issiqlik yo'qolishi maksimal qiymatga ega bo'ladi.

$d_{iz} < d_{kr}$ bo'lganda izolyatsiya qalinligi ortishi issiqlik yo'qolishi oshishiga olib keladi. Shuning uchun loyihalashda shunday issiqlik izolyatsiyasi materiali tanlash kerakki, uning uchun d_{kr} izolyatsiyalanadigan quvurning tashqi diametridan kichik yoki teng bo'lsin: $d_{kt} < d_2$.

Ushbu tenglamani izlanayotgan issiqlik izolyatsiyasi issiqlik o'tkazuvchanligiga nisbatan yechib, topamiz:

$$\lambda_{iz} \leq \alpha_2 d_2 / 2. \quad (8.50)$$

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. *Qattiq, suyuq, gazli muhitli jismlarda va vakuumda issiqlik qaysi usullar bilan tarqaladi?*
2. *Harorat maydoni, izotermik sirt, issiqlik oqimi tushunchalariga aniqliklar kiriting.*
3. *Issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni) formulasini keltiring. Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ ning fizik ma'nosi qanday?*
4. *Issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasini yozing va unga kiruvchi a'zolarining fizik ma'nolarini tushuntiring.*
5. *Chegara shartlari tushunchasi nimani bildiradi? Birinchi, ikkinchi, uchinchi va to'rtinchi chegaraviy shartlarni aytib bering.*
6. *Tekis va silindrik devorlarning issiqlik qarshiliklarini hisoblash uchun formulalarni yozing.*
7. *Issiqlik uzatilish aniqlanishini bering. Issiqlik uzatilish tenglamasini yozing, issiqlik uzatilish koeffitsiyentining fizik ma'nosini aniqlang va uni hisoblash formulasini keltiring.*
8. *Issiqlik izolyatsiyasining kritik diametri nimani bildiradi? Silindrik uzatish quvurlari uchun issiqlik izolyatsiyasi materialini tanlash qoidasi qanday?*

IX BOB. NOSTATSIONAR TARTIBDAGI ISSIQLIK O'TKAZUVCHANLIK

9.1. Asosiy holatlar

Nostatsionar tartibdagi issiqlik o'tkazuvchanlik hodisasi qishloq va suv xo'jaligi ishlab chiqarishini ko'pgina jarayonlarida uchraydi, masalan, har xil mahsulotlarning qizishi va sovishida, issiqlik almashinish uskunalarini ishga tushirish yoki to'xtatishda, ularni bir issiqlik tartibidan ikkinchisiga o'tkazishda. Shuningdek, nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik hisobi inshootni o'rab turuvchi konstruksiyalarning, chorvachilik binolarida taglik (pol)ning va issiqxonalarda tuproqning **haroratlar maydonlarini aniqlash** uchun amalga oshiriladi. Ko'rib o'tilgan hollardagi o'tish jarayonlari isitish tizimlarini ishga tushirish (yoki to'xtatish) shartlariga va tashqi havo haroratining kunlik o'zgarishiga bog'liq.

Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik masalalarini ikki guruhga ajratish mumkin: birinchisi issiqlik muvozanatiga o'tishga intiluvchi o'tish jarayonlari; ikkinchisi jism harorati vaqt bo'yicha ma'lum qonun asosida o'zgaruvchi davriy jarayonlar.

Birinchi guruhga o'zgarmas haroratli muhitda qizish (sovish) jarayonlari, ikkinchi guruh uchun esa inshootga to'sinlar konstruksiyalarining kunlik harorat o'zgarishi misol bo'ladi.

Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik ta'rifi geometrik, fizik, boshlang'ich va chegaraviy shartlarga to'g'ri keladigan issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamalarini yechish asosida amalga oshiriladi.

Misol sifatida chegaralanmagan devor (masalan, tashqi va ichki havo bilan konvektiv issiqlik almashinuv qonuni bo'yicha issiqlik almashinayotgan chorvachilik binosi devori) da nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlikni aniqlashni keltiramiz. Devor $2R$ qalinlikka ega bo'lsin, boshlang'ich harorat tarqalishi — bir tekis, issiqlik fizik tavsiflar o'zgarmas, ichki issiqlik manbalari ishtirok etmasin, boshlang'ich vaqtda bino ichidagi havo harorati $t_{x_1} > t(x, 0)$ qiymatni qabul qiladi, tashqi havoniki — $t_{x_2} < t(x, 0)$. Ushbu masalani ta'riflovchi

differenceial shakldagi tenglamalar tizimi quyidagicha (koordinatalar boshi devor markaziga joylashgan):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; (\tau > 0; R < x < R); \\ t(x, t) &= td = \text{const}; \quad t = 0; \\ \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= +\alpha_1 [t_{x_1} - t(-R, \tau)] = 0; (x = -R, \tau > 0); \\ -\lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} &+ \alpha_2 [t_{x_2} - t(R, \tau)] = 0; (x = R, \tau > 0). \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

Bunda $t_b, t_{h1}, t_{h2}, \alpha_1, \alpha_2, \lambda, \alpha, R = \text{const}$.

(9.1.) tenglamalar tizimidagi birinchi tenglama issiqlik o'tkazuvchanlikning chiziqli tenglamasi bo'lib, integrallash mumkin; ikkinchi tenglama jarayon boshlanishida haroratning o'zgarish tarqalishini ifodalaydi; uchinchi devorning ichki yuzasi bilan havo orasida Nyuton-Rixman qonuni bo'yicha issiqlik almashinishini ifodalaydi; to'rtinchi tenglama devor tashqi yuzasining tashqari havo bilan Nyuton-Rixman qonuni bo'yicha issiqlik almashinishini tavsiflaydi.

Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlikning to'g'ri masalasini yechishdan maqsad quyidagilarni aniqlash: harorat maydonini: $t = t(x, y, z, \tau)$; jismning o'rtacha hajmiy haroratini: $\bar{t}(\tau)$; isitish (sovitish) uchun sarflangan issiqlikni.

Texnikaviy issiqlik fizikasida issiqlik o'tkazuvchanlikning teskari masalalari ham yechiladi, bundan maqsad harorat maydoni haqidagi axborotdan issiqlik fizik tavsiflari qiymatlarini topish, chegaraviy shartlar o'rnatish va boshqalardan iborat. Materialning issiqlik fizik tavsiflari — issiqlik o'tkazuvchanlik λ , harorat o'tkazuvchanlik α , solishtirma issiqlik sig'imini aniqlash maqsadli issiqlik o'tkazuvchanlikning teskari masalalari inversli deyiladi.

To'g'ri masalalarni yechish, masalan (9.1) tenglamalar tizimini, harorat maydonini $t(x, y, z, \tau)$ topish imkonini beradi. Jismning o'rtacha hajmiy haroratini $t(x, y, z, \tau)$ funksiyani jism hajmi bo'yicha integrallab aniqlanadi:

$$\bar{t}(\tau) = \frac{2}{V} \int_V \tau(v, \tau) v. \quad (9.2)$$

Jismning o'rtacha hajmiy harorati ma'lum bo'lsa, uni qizdirish uchun sarf bo'lgan issiqlikni topish mumkin:

$$\Delta Q = c' [\bar{t}_{bosh}(\tau) - \bar{t}_{ox}(\tau)] V. \quad (9.3)$$

Bunda: c' — jismning hajmiy issiqlik sig'imi, J/(m³K).

Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik masalalarini yechishda o'lchamli kattaliklarni o'lchamsiz kattaliklarga keltirib yechim izlash qulay, chunki bunda o'zgaruvchilar soni kamayadi. Masalan, umumlashgan (o'lchamsizlar) o'zgaruvchilarni quyidagicha kiritsak:

$$\theta = \frac{t(x, \tau) - t_T}{t_{u_1} - t_T}; \quad F_0 = \frac{a\tau}{R^2}; \quad B_{i_1} = \frac{\alpha_1 R}{\lambda},$$

$$B_{i_2} = \frac{\alpha_2 R}{\lambda}; \quad \theta = \frac{t_{u_2} - t_T}{t_{u_2} - t_T}; \quad \xi = \frac{x}{R}. \quad (9.4)$$

Tenglamalar tizimi (9.4) quyidagicha o'zgaradi:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \theta(\xi, F_0)}{\partial F_0} &= \frac{\partial^2 \theta(\xi, F_0)}{\partial \xi^2}; \quad (F_0 > 0, -1 < \xi < +1); \\ \frac{\partial \theta(\xi, F_0)}{\partial F_0} &= B_{i_1} [1 - \theta(-1, F_0)] = 0; \quad (\xi = -1, F_0 > 0); \\ \frac{\partial \theta(\xi, F_0)}{\partial F_0} &= B_{i_2} [\theta_1 - \theta(1, F_0)] = 0; \quad (\xi = 1, F_0 > 0). \end{aligned} \right\} \quad (9.5)$$

bo'lganda bog'liq bo'lmagan o'zgaruvchilar va masala parametrlari soni 10 tadan 5 tagacha qisqaradi, ya'ni ikki marta.

Umumlashgan o'zgaruvchi $F_0 = a\tau/R^2$) Furye soni deyiladi, u vaqtning o'lchamsizligi ma'nosini bildiradi. Umumlashgan o'zgaruvchi $B_i = \alpha R/\lambda$ Bio soni yoki kriteriyasi nomi bilan yuritiladi va ichki hamda tashqi issiqlik qarshiliklari nisbatini ifodalaydi:

$$B_i = \frac{(R/\lambda)}{(1/\alpha)} = \frac{R_\lambda}{R_\alpha}. \quad (9.6)$$

$B_i > 0$ bo'lganda (amalda $B_i < 0,2$ bo'lganda) ichki issiqlik qarshiligi cheksiz kichik, bu holda jism qizishi (sovushi) konvektiv issiqlik almashinishi jadalligi bilan aniqlanadi, jism harorat maydoni bir xil (harorat gradiyenti ahamiyatsiz kichik). $B_i \rightarrow 0$ (amalda $B_i \rightarrow 50$ bo'lganda) tashqi issiqlik qarshiligi chiksiz kichik, konvektiv issiqlik almashinishi jadalligi jismning qizishi (sovishi)ga ta'sir qilmaydi, jadallik ichki issiqlik qarshiligi bilan nazorat qilinadi. Bu holda jism yuzasi harorati amalda jarayon boshlangandan so'ng darhol tashqi

muhit haroratiga tenglashib oladi, jismda esa maksimal haroratlar farqi kuzatiladi, bu farqlar jarayon borishida doimiy kamayib boradi.

9.2. Masalalarni yechish va modellash usullari

Umumiy ma'lumotlar. Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik masalalarini yechish usullari analitik sonli va analogli turlarga bo'linadi.

Issiqlik o'tkazuvchanlikning chiziqli bo'lmagan differensial tenglamasi analitik yechishlarda (9.5) har xil chegaraviy shartlarda yetarli qiyinchiliklar keltirib chiqaradi va ba'zida juda oddiy xususiy holatlar uchun yechimlar olinadi. Issiqlik o'tkazuvchanlikning chiziqli ($a = \text{const}$) differensial tenglamasini (9.5) yechish uchun turli usullar ishlab chiqilgan, ulardan asosiylari Furiyning klassik usuli (o'zgaruvchilarni ajratish). Laplasning operatsion usuli, oxirgi integral o'zgarishlar usuli va boshqalar.

O'zgaruvchilarni ajratish usulida avvalambor differensial tenglamani va chegara shartlarini qanoatlantiruvchi masalaning xususiy yechimlari topiladiki, shundan biri $v(\tau)$ ko'rinishida faqat vaqtga bog'liq bo'lsa, ikkinchisi $\varphi(x, y, z)$ faqat koordinatalarga bog'liq: $t = (x, y, z, \tau) = c v(\tau) \varphi(x, y, z)$ bunda c — ixtiyoriy o'zgarmas.

Keyin masalaning umumiy yechimi hususiy yechimlar yig'indisi ko'rinishda yoziladi:

$$t(x, y, z, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n t_n. \quad (9.7)$$

c_n koeffitsiyentlar boshlang'ich shartlarni qanoatlantirish shartlaridan topiladi.

Laplasning operatsion usulida integrallanadigan differensial tenglama hamda boshlang'ich va chegaraviy shartlar integral ko'rinish yordami bilan:

$$f_L(S) = \int_0^{\infty} f(\tau) e^{-S\tau} d\tau = L[f(\tau)] \quad (9.8)$$

tasvirlash tekisligiga o'tkaziladi. Natijada oddiy differensial tenglama olinadi, ushbu tenglamani integrallab orqaga original tekislikka o'tish amalga oshiriladi.

Oxirgi integral o'zgarishlar usuli ham originaldan tasvirlashga to'g'ri keladigan integral nisbatlar bo'yicha o'tishga asoslangan.

Tasvirlash fazosida yechim topilgandan so'ng formulalar bo'yicha orqaga originalga qaytish amalga oshiriladi.

Oxirgi farqlar usuli (to'r usuli) nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik chiziqli bo'lmagan masalalarni yechish uchun qo'llaniladi, shu bilan birga analitik usullarni qo'llash o'ta qiyin bo'lgan masalalar — murakkab geometrik va chegaraviy shartlar bilan berilgan masalalarni yechishda qo'llaniladi.

Usulning qo'llanish mantig'i shudan iboratki, izlanayotgan funksiya (berilgan holda harorat) ning barcha aniqlanadigan sohalari qator intervallarga (fazoviy va vaqt birligida) bo'linadi, integrallanadigan tizim tenglamasidagi hosilalar ularning taqribiy qiymatlari bilan interval chekkalaridagi qiymatlar farqi (tur bo'g'inlaridagi) orqali almashtiriladi. Natijada differensial tenglamalar algebraiklari bilan almashtiriladi. Bu tenglamalarni ikki yoki uch vaqt qatlamlari (integrallar) uchun yozamiz va algebraik tenglamalarni yechish tegishli qoidalarini hamda funksiyaning oldingi qatlam bo'g'inidagi ma'lum qiymatlarini qo'llab, keyingi bo'g'inning izlanayotgan qiymatlarini topish mumkin. Ushbu tartibni ko'p karrali qo'llash vaqtning har qanday berilgan momentida harorat maydonini hisoblab topish imkonini beradi. Amaliyotda sonli hisoblash mashinalarining ishlatilishi bilan to'r usuli yana ham kengroq qo'llanilmoqda.

Oxirgi farqlar usulining aniq va noaniq usullari farqlanadi. Aniq usuli funksiyaning oldingi vaqtinchalik qatlam bo'g'inida ma'lum qiymatlari bo'yicha uning keyingi bo'g'indagi qiymatlarini bevosita hisoblash imkonini beradi. Ushbu usul sodda, lekin katta hajmdagi hisoblash ishlari talab etiladi, chunki hisoblash jarayonining barqarorligi va bir tekisligini ta'minlash uchun vaqtning juda qisqa oraliqlarini olish kerak bo'ladi. Shuning uchun hozirgi vaqtda hisoblash amaliyotida, odatda, turli noaniq hisoblash usullari qo'llaniladi, ular oxirgi — farqli algebraik tenglamalar tizimidan tashkil topgan bo'lib, hisoblanayotgan vaqtinchalik qatlam bo'g'inlarida funksiyaning izlanayotgan qiymatlari noaniq ko'rinishda bo'ladi. Noaniq usullar hisoblash algoritmi aniq usulnikidan murakkabroq, shu bilan birga ularning qo'llanishi hisoblash ishlari hajmini birdan qisqartiradi, chunki hisoblash jarayoni barqarorligi va bir tekisligiga javob beradigan vaqt bo'yicha yirik qadamni tanlash imkonini beradi. O'xshashlik usuli nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarini tekshirishda qo'llaniladigan ushbu usul turli fizik tabiatli jarayonlari (jarayonlar izomorfizmi) matematik yozilishi rasmiy o'xshashligiga asoslangan.

Modellashtirish — bu berilgan jarayonni eksperimental tekshirish usuli bo'lib, jarayonni, fizik tabiati xuddi shunday yoki boshqa unga

o'xshash bo'lgan jarayon o'ringa qo'yishga asoslangan. To'g'ri va o'xshashlik modellashtirish farqlanadi. To'g'ri modellashtirish o'rganiladigan fizik jarayonni unga o'xshash, lekin fizik tabiati boshqa bo'lgan jarayon o'rniga qo'yishga asoslangan.

Issqlik o'tkazuvchanlik jarayonlarini tekshirish uchun gidroissqlik va elektroissqlik o'xshashliklari ishlatiladi, ayniqsa, oddiyligi va qulayligidan elektroissqlik o'xshashliklar ko'proq qo'llaniladi.

Elektroissqlik o'xshashligi issqlik va elektr o'tkazuvchanliklar differensial tenglamalari va ular chegaraviy shartlarining shaklan o'xshashligiga tayanadi. Masalan, issqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni) va Om qonuni tuzilishi o'xshashdir:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n_T}; \quad (9.9)$$

$$i = -\sigma_e \frac{\partial U}{\partial n_e}. \quad (9.10)$$

(9.9) va (9.10) tenglamalarni solishtirishdan ko'rinadiki, issqlik oqimi zichligi q elektr tok kuchi i ga o'xshash, harorat t potentsiali U ga o'xshash, issqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ solishtirma elektr o'tkazuvchanlik σ_e ga o'xshash. Tuzilishi (9.9), (9.10) qonunlar bo'yicha issqlik va elektr o'tkazuvchanliklar differensial tenglamalari ham o'xshash:

$$\frac{\partial t}{\partial n_T} = \frac{\lambda}{c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (9.11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial n_e} = \frac{\sigma_e}{c_e} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \right). \quad (9.12)$$

Bu holda avvalgiga qo'shimcha tarzda aniqlaymizki, hajmiy issqlik c' solishtirma elektr sig'imi c_e ga o'xshashdir.

9.3. Binolar tagidagi va tuprog'idagi harorat maydonini aniqlash

Nostatsionar issqlik o'tkazuvchanlik tartibiga misol sifatida chorvachilik binosi tagligi va issiqxona tuprog'idagi harorat maydonini aniqlash bo'yicha masalaning qo'yilishini ko'rib chiqamiz.

Tuproq osti ishtirokisiz tuproqning harorat maydoni. Boshlang'ich vaqt momentida issiqxona gunti yoki chorvachilik binosidagi isitilmagan pol (taglik) hamma nuqtasida harorat t_0 bir xil qiymatga

ega bo'lib, u bino (issiqxona) ichki haroratiga teng bo'lsin. Vaqtning boshlang'ich momentida havoni isitish tizimi ishga tushsin va ichki havo harorati inersiyasiz doimiy $t_b > 0$ qiymatgacha ko'tariladi. Pol (tuproq)ning ichki havo bilan issiqlik almashinishi konvektiv (Nyuton qonuni) usulda amalga oshadi.

Pol (tuproq)ni yarim cheksiz izotrop muhit, masalani esa bir o'lchamli deb qaraymiz: harorat faqat tuproq chuqurligi X va vaqt birligida τ o'zgaradi (devoroldi chegaraviy samarani hisobga olmaymiz). Koordinata boshlanishini pol yuzasiga joylashtirib, yuqoridagilarni hisobga olib, masalani quyidagicha ifodalaymiz:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0, 0 < x < \infty \quad \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \\ &= a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2}; \tau > 0, 0 < x < \infty; \\ t(x, \tau) &= t_0; \tau = 0; \\ \lambda \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} + \alpha [t_{ich} - t(0, \tau)] &= 0, \tau > 0, x = 0; \\ t(\infty; \tau) &= t_0; \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0; \tau > 0. \end{aligned} \right\} \quad (9.13)$$

Bunda: $t_0, t_{ich}, \alpha, \lambda, a = const, x$ — pol (tuproq) yuzasidan masofa.

Tizim (9.13) dagi birinchi tenglama jarayonning differensial tenglamasi, ikkinchisi boshlang'ich shartlarni ko'rsatadi, uchinchi — pol (tuproq) yuzasidagi chegaraviy shartlar, to'rtinchisi — jismning yarim chegaralanish shartlari.

Tizim (9.13) ning yechimi Laplasning operatsion usuli bilan aniqlansa, quyidagi natija olinadi:

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_{ich} - t_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) - e^{\frac{ux + \alpha}{\lambda}} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} + \frac{a}{\lambda} \sqrt{a\tau}\right). \quad (9.14)$$

Bunda: $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y)$; $\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y e^{-y^2} dy$ — Gauss xatolar

funksiyasi; y — funksiya argumenti, $t = f(x)$, egri chiziq monoton kamayuvchi funksiya bo'ladi. Yuzadagi jadal issiqlik almashinuvi ($\alpha/\lambda \rightarrow \infty$)da tuproqning yuza qatlami harorati tezda t_b qiymatini

qabul qiladi, (9.13) formulaning yechimi esa quyidagicha topiladi:

$$\frac{t(x, \tau) - t_0}{t_{ich} - t_0} = \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (9.15)$$

(9.14) tenglamani koordinatalar bo'yicha $x=0$ holat uchun differensiallab va (8.4) tenglamaga hosila qiymatini qo'yib, tuproq issiqlik oqimi zichligini topamiz:

$$q = \alpha(t_q - t_0)e^{\left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 a\tau} \operatorname{erfc}\frac{a}{\lambda}\sqrt{a\tau}. \quad (9.16)$$

Ushbu tenglama yordamida aniqlanadigan $q(\tau)$ funksiya monoton-so'nuvchi (kamayuvchi); tuproq issiqlik oqimi maksimal qiymati vaqtning boshlang'ich momentida ($q_{max} = a(t_h - t_0)$), keyin esa tuproqning qizishi bo'icha asta-sekinlik bilan kamayadi va asimptotik ravishda nulgga intiladi.

Tuproq osti isitiluvchi gruntning harorat maydoni. Tuproq osti isitiladigan tizimli issiqxonada gruntning isishi dinamikasini ko'rib chiqamiz (9.1- rasm).

Tuproq osti isitish gruntga $x=\xi$ chuqurlikda $2R$ oraliq masofa qadami o'rnatilgan quvurlar shaklida joylashtirilgan.

Isitish tizimi chiziqli, nuqtali, kesimli va o'zgarmas quvvatli shaklda berilgan. Gruntning boshlang'ich harorati teng tarqalgan bo'lsin, $t_0 = \text{const}$, issiqxona ichki harorati $t_h \neq t_0$ bo'lib, vaqt birligida o'zgarmasin.

Grunt bilan havo orasida issiqlik almashinuvi konvektiv issiqlik almashinuvi (Nyuton) qonuni bo'yicha amalga oshiriladi. Gruntni yarim cheksiz izotrop muhit, masalan, izotrop muhit, masalan, ikki o'lchamli bo'lsin.

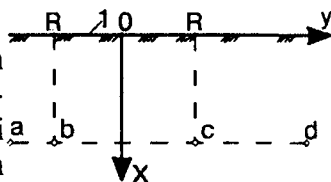
Grunda vertikal kesim ajratamiz, u ikkita qo'shni quvurlar bilan chegaralangan, ushbu kesimga simmetrik shaklda Dekart tizimini koordinatalari joylashtiramiz. Birinchi bosqichda ajratilgan kesim harorat maydonini qarab chiqamiz, qo'shni kesimlar harorati ta'sirini hisobga olmaymiz.

Kesim «b» va «c» manbalar solishtirma issiqlik quvvati W kesim issiqlik quvvatining yarmiga teng bo'lsin. Yuqoridagilarni hisobga olib, issiqlik o'tkazuvchanlik tenglamasini kesim uchun quyidagicha yozamiz:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial \tau} &= a \left[\frac{\partial^2 t(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x, y, z)}{\partial y^2} \right] + \frac{W(\xi; -R, \tau)}{c'} + \frac{W(\xi; R, \tau)}{c'} \\ 0 < x < \infty, & 0 < y < \infty; \\ \tau > 0; (\xi, R, \tau) &= t_0; \tau = 0; \\ \lambda \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial \tau} + a[t - t(0, y, r)] &= 0; x = 0; \tau > 0; \\ x = (\infty, y, \tau) = t_0, & \frac{\partial t(x, y, z)}{\partial \tau} = 0; x \rightarrow 0; \tau > 0; \end{aligned} \right\} (9.17)$$

Bunda: $t_0, t, W, \lambda, \alpha, a = \text{const.}$

Masalani analitik usulda yechish murakkab, shuning uchun harorat maydonini hisoblash sonli usuldan yoki elektroanalogiya usulidan foydalanish maqsadga muvofiq. Tenglamalar tizimi yopiq holda va integrallash $t=f(x, y, \tau)$ funksiyani olish imkonini beradi. Ko'rilayotgan harorat maydoniga qo'shni kesimlarning ta'sirini hisobga olish uchun superpozitsiya usuli (yechimlar yig'indisi)ni qo'llanish mumkin. Elementar superpozitsiya tamoyili (EST) ko'rilayotgan alohida olingan kesimlardagi issiqlik samarasi yig'indisi topiladi. EST haroratdan bog'liq bo'lmagan hollarda qo'llaniladi. Material issiqlik fizik tavsiflari, issiqlik manbasi jadalligi, chegarada issiqlik almashinish shartlari (birinchi navbatda α issiqlik almashinish koeffitsiyenti), jismining geometrik o'lchamlari.



9.1- rasm. Tuproq osti isitiluvchi grunt sxemasi:
1- grunt yuzasi;
 a, b, c, d — quvurlar

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Issiqlik o'tkazuvchanlikning to'g'ri va teskari masalalarini yechishda nima topiladi?
2. Umumlashgan o'zgaruvchilar nima uchun qo'llaniladi? F_0 va B_1 sonlarining fizik ma'nosi qanday?
3. Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik masalalarini analitik yechishning qaysi usullarini bilasiz, ularning ma'nosi nimada?
4. Oxirgi farqlar usuli nimadan iborat? Aniq va noaniq hisoblash usullari nima?
5. Elektroissiqlik o'xshashlikka misollar keltiring. Elektr model o'xshashliklarning qanday turlari mavjud?
6. Tuproq osti isitishsiz gruntta konvektiv isitishning matematik masalasini ifodalang. Tuproq osti isitishli gruntta matematik masalaning ifodasini keltiring.

X BOB. KONVEKTIV ISSIQLIK ALMASHINISH

10.1. Asosiy tushunchalar va aniqliklar

Sanoatda va qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishida turli issiqlik almashinuvi jihozlari bir muhitdan boshqasiga issiqlik uzatish maqsadida ishlatiladi (binò va inshootlarni isitkich asboblari yordamida isitish, sutni qizdirib pastemizatsiya qilish, qozon qurilmalarida suvni qizdirish va bug' ishlab chiqish, havoni kalorifer va isitish-ventilyatsiyalash agregatlarida qizdirish va hokazolar). Bu jihozlarda, odatda, issiqlik almashinuvi harakatlanayotgan muhitlarning fazalar ajralish yuzasi orqali yoki ularni ajratuvchi devorlar orqali amalga oshadi.

Issiqlikni tashish uchun ishlatiladigan harakatlanuvchi muhit **issiqlik tashuvchi** deb ataladi. Harakatlanuvchi muhit va boshqa muhit bilan ajratuvchi yuza — qattiq jism (masalan, devor) bilan suyuqlik yoki gaz orasidagi konvektiv issiqlik almashinuv **issiqlik berish** deyiladi. Issiqlik uzatilish sodir bo'ladigan ajratish yuzasi **issiqlik almashinish yuzasi** yoki **issiqlik berish yuzasi** deyiladi.

Issiqlik berish jadalligi ko'p hollarda issiqlik tashuvchining issiqlik berish yuzasiga nisbatan harakat tezligiga bog'liq bo'ladi. Issiqlik tashuvchining harakati erkin yoki majburiy bo'lishi mumkin. **Erkin harakatlanish** yoki **erkin konveksiya** deganda, tizimda suyuqlik yoki gazning tashqi bir xil bo'lmagan massaviy kuchlar maydoni (gravitatsion, magnit, elektr yoki inersiya maydonlari kuchlari) ta'siridagi harakati tushuniladi. **Majburiy harakat** yoki **majburiy konveksiya** tizim chegaralariga qo'yilgan tashqi yuza kuchlari, yoki tizim ichidagi suyuqlikka qo'yilgan massaviy kuchlarning bir xilligi maydoni, yoki suyuqlikka tizimdan tashqaridan berilgan kinetik energiya zaxirasi hisobiga yuzaga keladigan harakat hisoblanadi.

Amaliyotda suyuqlik yoki gazlarda erkin konveksiya ko'pincha gravitatsion kuchlar maydonida (gravitatsion erkin konveksiya) joylashgan suyuqlikning issiq va sovuq zarralari zichliklari farqi hisobiga amalga oshadi, majburiy konveksiya esa nasos va ventilyator harakati natijasida amalga oshadi.

10.2. Issiqlik berish qonuni (Nyuton — Rixman qonuni)

Issiqlik berilishini son qiymati bo'yicha yozilishi uchun issiqlik **berish qonuni** qo'llaniladi, unga ko'ra issiqlik berish yuzasidan muhitga konveksiya yo'li bilan uzatilayotgan issiqlik oqimi zichligi (yoki, *aksincha, muhitdan issiqlik almashinish yuzasiga*) issiqlik almashinish yuzalari haroratlari absolyut qiymatlari farqiga $|t_b - t_c|$ proporsional:

$$q = \alpha |t_b - t_c|. \quad (10.1)$$

Bunda: q — issiqlik oqimi zichligi, W/m^2 .

(10.1) tenglamadagi proporsionallik koeffitsiyenti α $W/(m^2K)$ o'lchov birligiga ega bo'lib, **issiqlik almashinuv** yoki **issiqlik berish koeffitsiyenti** deyiladi. Issiqlik almashinuv koeffitsiyenti issiqlik berish yuzasi issiqlik tashuvchi o'rtasidagi issiqlik berilish jadalligini tavsiflaydi. U issiqlik almashinuvi yuzasidagi yuza va muhit orasidagi harorat bosimiga to'g'ri keladigan issiqlik oqimi zichligiga teng.

Konvektiv issiqlik almashinish hodisasi suyuqlik (gaz) bilan uni to'sib turgan devor orasida ularning bevosita bir-biriga tegishi natijasida sodir bo'ladi. 10.1- rasmda yassi sirt (devor) ga suyuqlik bo'ylama oqim bilan tegib o'tmoqda.

Agar $t_1 > t_2$ bo'lsa, issiqlik oqimi:

$$Q = \alpha (t_s - t_f) F. \quad (10.2)$$

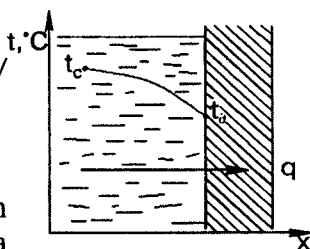
10.1- rasmda suyuqlikdan devorga issiqlik berilishi tasvirlangan. Bunda: t_s — suyuqlik harorati, $^{\circ}C$; t_f — idish ichki sirtining harorati, $^{\circ}C$; F — idish devorining sirt yuzasi m^2 ; α — issiqlik berish koeffitsiyenti $W/(m^2 \cdot K)$. Uning aniqlanishi (10.2) tenglikdan kelib chiqariladi:

$$\alpha = \frac{Q}{F |t_b - t_c|}; \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (10.3)$$

Issiqlik oqimining zichligi $q = Q/F$, W/m^2 ekanligidan:

$$q = \alpha (t_d - t_f). \quad (10.4)$$

Issiqlik berish koeffitsiyenti α ning son qiymati o'zgaruvchan bo'lib, ko'pgina omillarga bog'liq bo'ladi:



10.1- rasm.

1. Suyuqlik yoki gazning fizik xususiyatlariga, ya'ni zichligi, qovushoqligi, issiqlik sig'imi, issiqlik o'tkazuvchanligi va hokazoga.

2. Idish devoriga nisbatan suyuqlik yoki gazning tezligiga. Nisbiy tezlikning ortib borishi bilan α ortib boradi (masalan, piyoladagi yoki chelakdagi issiq choyni aylantirilib turilsa, choyning tez sovishi ma'lum).

3. Idish devorining shakliga.

4. Idish devorining sirt tekisligiga.

5. Idish devoriga tegib harakatlanayotgan suyuqlikning oqish turiga (turbulent yoki laminar).

Yuqoridagi sabab (omil) larga ko'ra α ning son qiymati fizik kattaliklar jadvallariga berilmaydi, balki har bir aniq holat uchun tajriba yo'li bilan aniqlanishi kerak yoki taxminiy qiymatini «o'xshashlik nazariyasi» yordamida hisoblab topish mumkin.

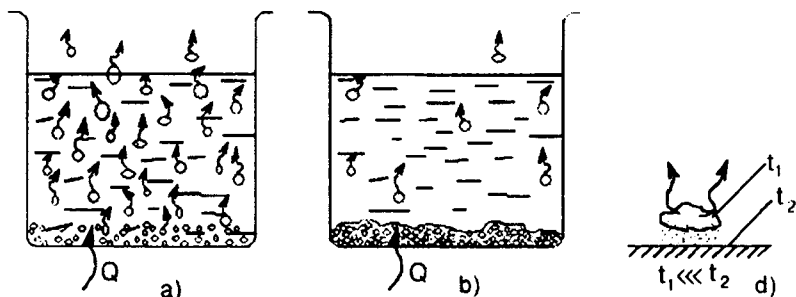
Suyuqliklar (gazlar) ning erkin harakati holatida issiqlikning berilishi deb, isigan va sovuq gazlar (suyuqliklar) zichliklarining har xilligi hisobiga sodir bo'ladigan issiqlik almashinuviga aytiladi. Bunday tabiiy konveksiya usulida xonalarning isishi, idishdagi suv yoki suyuqliklarning isishi, sovitkichdagi mahsulotlarning sovishi, atmosfera havosining sovishi (isishi) va hokazolar sodir bo'ladi.

Suyuqlikning qaynashi (bug'ga aylanishi) va bug'ning suyuqlikka aylanishi (kondensatsiya) da issiqlik almashinish. Qaynash jarayonida idish devoriga tegib turgan suyuqlik qatlamining harorati to'yingan bug' haroratidan yuqoriroq bo'ladi. Bunday haroratlar farqini haroratlar bosimi deb yuritiladi. Harorat bosimining ortib borishi bilan qaynash jarayoni kuchayib, juda ko'p miqdorda bug' pufakchalari hosil bo'ladi. Bu **pufakchali qaynash** deyiladi (10.2- a rasm).

Harorat bosimining ortib borishi natijasida bug' pufakchalari bir-biriga qo'shilib, yupqa qatlam (plyonka) hosil qiladi, bug'ning bunday berilishi plyonkali qaynash deyiladi 10.2- b, d rasmlarda haroratlar bosimi juda katta bo'lganda suyuqlik va idish devori tasvirlangan. Masalan, qizigan qozonga, dazmolga yoki pechga suv tomsa, oniy bug' plyonkasi hosil bo'ladi va suv tomchisini otib (sachratib) yuboradi.

Bug'ning suyuqlikka aylanishi (kondensatsiyadagi) issiqlik berilishi kondensatsiyalanish turiga bog'liq bo'ladi. Kondensatsiyalanish plyonkasimon yoki tomchisimon bo'lishi mumkin (10.3- rasm).

Ma'lumki, bug' tegib turgan idish devorining harorati (t_d) bug' harorati (t_b) dan ancha past bo'lganida kondensatsiya sodir bo'ladi, ya'ni $t_b > t_d$. Suv bug'ining kondensatsiyalanishi ko'pincha plyonkasimon bo'ladi, tomchisimon kondensatsiyalanish bo'lishi uchun idish devori moylangan bo'lishi kerak.



10.2- rasm. Qaynashda issiqlik berilish sxemasi.

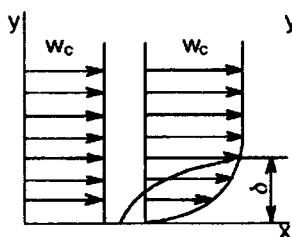


10.3- rasm. Kondensatsiyalanishda issiqlik berish sxemasi.

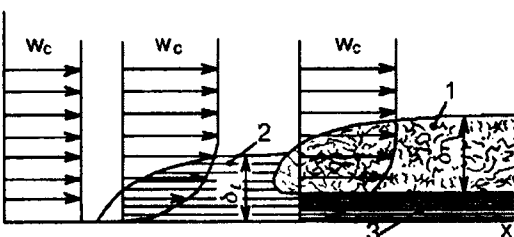
10.3. Gidrodinamik, issiqlik va diffuzion chegaralar

Issiqlik berish jadalligi suyuqlikning issiqlik almashinish yuzasiga nisbatan harakatlanish tavsifiga bog'liq bo'lib, laminar yoki turbulent harakatli bo'lishi mumkin. Laminar harakat deb, shunday harakatga aytiladiki, bunda suyuqlik zarralarining statsionar (turg'un) trayektoriyasi yuzaga keladi. Laminar tartibli oqimda suyuqlik zarralari bir-biriga aralashmasdan, kanal devorlariga va boshqa zarralar trayektoriyasiga parallel harakatlanadi. Turbulent tartibli harakatda zarralar trayektoriyalari xaotik o'zgaruvchan bo'ladi. Bu holda oqimda muntazam ravishda pulsatsiyali tezlik, bosim va boshqa ko'rsatkichlar yuzaga keladi, bu esa o'z vaqtida suyuqlik zarralarining bir-biri bilan jadal aralashishiga olib keladi.

Suyuqlik qo'zg'almas devorga nisbatan harakatlanganda (laminar yoki turbulent) devor yaqinida ishqalanish hisobiga suyuqlik harakati sekinlashadi. Devor yuzasidan ko'rilayotgan suyuqlik qatlami orasidagi masofa qancha kam bo'lsa, suyuqlik tezligi shuncha kam bo'ladi. Devor bilan tegib turgan yupqa suyuqlik qatlami, odatda, harakatsiz hisoblanadi (yopishish sharti). Yupqa qatlam va katta ko'ndalang tezliklar gradiyenti bilan tavsiflanuvchi quyushqoq suyuqlik oqimi doirasi ta'sirini doiraning bo'ylama o'lchamlariga taqqoslaganda



10.4- rasm.



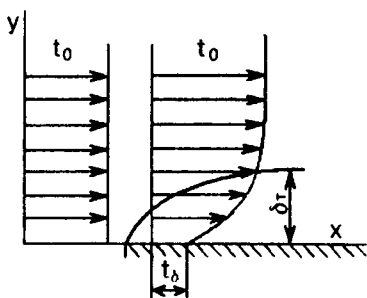
10.5- rasm.

harakat miqdorining ko'ndalang siljishi kelib chiqadi, bu esa **gidrodinamik chegara qatlam** deb ataladi. Bu tushunchani birinchi bo'lib 1904- yilda L. Prandtl kiritdi. 10.4- rasmda suyuqlikning berilgan yuzaga nisbatan bo'ylama oqishida gidrodinamik qatlamning shakllanishi ko'rsatilgan. Kirish kesimida ($x=0$) va gidrodinamik chegara qatlami chegarasidan tashqarida $x>0$ bo'lganda buzilmas oqim kuzatilib, u devorga cheksiz kam ta'siri bilan tavsiflanadi.

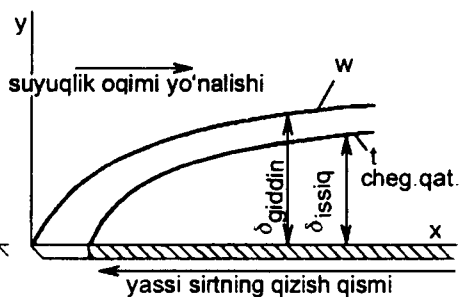
Chegara qatlam qalinligi δx koordinatasi o'sishi bilan oshadi, ya'ni suyuqlik harakatida quyushqoqlik ta'siri buzilmas oqimga kirib boradi. Devor yoni chegara qatlamida suyuqlik laminar, turbulent yoki bir tartibdan ikkinchi tartibga o'tish tartibida bo'lishi mumkin. Turbulent chegara qatlamida bevosita devor yonida yupqa qatlamli suyuqlik laminar harakati kuzatiladi — bu **quyushqoq** yoki **laminar qatlam osti** deyiladi. Dinamik chegara qatlamida oqim turbulentli 1 va laminarli 2 bo'lishi mumkin (10.5- rasm). Oqim ko'rinishi va qalinligi (δ_l va δ_t) asosan reynolds soni Re bilan aniqlanadi.

Gidrodinamik chegara qatlam analogiyasi bo'yicha G. N. Krujilin issiqlik chegara qatlam tushunchasini kiritdi, unga ko'ra **issiqlik chegara qatlami** deganda, quyushqoq issiqlik o'tkazuvchi suyuqlik oqimi doirasi tushunilib, u kichik qalinlikdagi (doiraning bo'ylama o'lchamlariga taqqoslaganda) va katta ko'ndalang haroratlar gradiyentli issiqlik siljishini yuzaga kelishini tavsiflaydi (10.6- rasm).

Gidrodinamik yoki issiqlik chegara qatlam qalinligi deganda shunday shartli kattalik tushuniladiki, u devordan normal bo'yicha masofani aniqlaydi, bu masofa tezliklar yoki haroratning bo'ylama tashkil etuvchisiga to'g'ri keladi va u berilgan aniqlikda o'zining chegaraviy qatlamiga devordan uzoqda, ya'ni, chegara qatlamdan farq qiladi: $\delta_f \neq \delta_h$. Gidrodinamik va issiqlik chegaraviy qatlamlar bilan bir qatorda diffuzion chegaraviy qatlam mavjud bo'lib, qaysiki aralashmada berilgan komponent konsentratsiyaning katta gradiyenti bilan tavsiflanadi. Bu gradiyent ta'sirida ko'rilayotgan komponentning ko'ndalang siljishi yuzaga keladi.



10.6- rasm.



10.7- rasm.

10.4. Konvektiv issiqlik almashinishning differensial tenglamalari

8.5- mavzuda qo'zg'almas muhitda issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamasi xulosasi keltirilgan, xuddi shu usulda harakatlanuvchi muhit uchun ham differensial tenglama keltirib chiqarish mumkin, bu tenglama **energiya tenglamasi** deb ataladi, u dekart koordinatalarida quyidagicha bo'ladi:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} v_x + \frac{\partial t}{\partial y} v_y + \frac{\partial t}{\partial z} v_z = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (10.5)$$

yoki

$$Dt/d\tau = a\Delta t. \quad (10.6)$$

Bunda: τ — vaqt, s; v_x , v_y , v_z — x , y , z o'qlarida tezlik vektori proyeksiyasi, m/s; a — harorat o'tkazuvchanlik, m^2/s ;

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} v_x + \frac{\partial t}{\partial y} v_y + \frac{\partial t}{\partial z} v_z \text{ — haroratning vaqt } \tau \text{ bo'yicha to'liq}$$

hosilasi bo'lib, harakatlanuvchi materiya yoki substansiya bilan bog'liq substansial hosila deyiladi va alohida belgilanadi ($Dt/d\tau$).

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ — Laplas operatori.}$$

(10.5) tenglama qo'zg'almas koordinatalar tizimida nuqtada harorat o'zgarishini ta'riflaydi, bunda tenglamaning chap tomonidagi birinchi hadi haroratning vaqt bo'yicha o'zgarishini tavsiflaydi, chap qismning keyingi hadlari esa suyuqlikning fazoda ko'rilayotgan nuqtadagi harakati sababli harorat o'zgarishini tavsiflaydi; tenglamaning o'ng qismi issiqlik o'tkazuvchanlik sababli harorat o'zgarishini ifodalaydi.

$v_x = v_y = v_z = 0$ bo'lganda energiya tenglamasi issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamasi (8.12) ga aylanadi. (10.5) tenglamani integrallash va harorat maydonini hisoblashda tezlikning komponentlarini bilish zarur. Bu umumiy holda qo'shimcha harakat tenglamasi (Nave-Stoks tenglamasi) va oqimning uzluksiz tenglamasini ko'rib chiqish zaruratiga olib keladi. Siqilmaydigan suyuqlik ($\rho = \text{const}$) uchun harakat tenglamasi dekart koordinatalar o'qidagi proyeksiyalari quyidagi ko'rinishga ega bo'ladi:

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{Dv_x}{D\tau} &= \rho g_x \beta (t - t_c) \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla v_x; \\ \rho \frac{Dv_y}{D\tau} &= \rho g_y \beta (t - t_c) \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \nabla v_y; \\ \rho \frac{Dv_z}{D\tau} &= \rho g_z \beta (t - t_c) \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \nabla v_z. \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

Bunda: ρ — suyuqlik zichligi, kg/m^3 ; g_x, g_y, g_z — tashqi massaviy kuchlar tezlanish maydonining x, y, z o'qlaridagi proyeksiyalari, m/s^2 ; p — bosim, Pa ; μ — dinamik quyushqoqlik, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; β — hajmiy kengayish koeffitsiyenti, $1/\text{K}$; t_c — muhit harorati (oqim yadrosidagi suyuqlik harorati);

$$\frac{D}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial \tau} + v_x \frac{\partial}{\partial x} + v_y \frac{\partial}{\partial y} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \text{ — substansial hosila;}$$

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ — Laplas operatori.}$$

Fizik nuqtai nazardan (10.7) tenglama suyuqlik hajmi elementiga ta'sir qiluvchi (tenglamaning o'ng qismlari) barcha kuchlar teng ta'sir qiluvchilari proyeksiyalari inersiya kuchlari (tenglamaning chap qismlari) proyeksiyalari tengligini ifodalaydi. Bunda (10.7) tenglamalar tizimining o'ng qismlari birinchi bo'g'inlari — ko'taruvchi kuchlar proyeksiyalarini ifodalaydi, ikkinchi bo'g'inlari — bosim kuchlari proyeksiyalarini, uchinchi bo'g'inlari ichki ishqalanish kuchlari proyeksiyalarini ifodalaydi. Siqilmaydigan suyuqliklar uchun uzluksizlik tenglamasi quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (10.8)$$

(10.5), (10.7), (10.8) tenglamalar tizimlarini integrallash noma'lum funksiyalar $t(x, y, z, \tau)$, $v(x, y, z, \tau)$, $P(x, y, z, \tau)$ ni olish imkonini beradi. Ko'rilayotgan tenglamalar tizimlarining konkret (xususiyy) yechimlarini olish uchun issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamasi (8.12) holatidagi kabi tarkibiga geometrik, fizik, boshlang'ich va chegara shartlarini bir xillilik shartlari bilan to'ldirish zarur.

Geometrik shartlari suyuqlik oquvchi yuzaning shakli va o'lchamlarini aniqlaydi. Fizik shartlar ko'rilayotgan jarayon topshirig'i tarkibiga suyuqlikning fizik kattaliklari qiymatlarini (zichlik, quyushqoqlik, issiqlik o'tkazuvchanlik, issiqlik sig'imi, hajmiy kengayish koeffitsiyenti) qamrab oladi. Chegaraviy shartlar topshiriqda yuvib o'tiladigan devor yuzasidagi va oqim yadrosidagi suyuqlik tezligi va harorati qiymatlari berilishidan iborat. Devor yuzasida, odatda, oqim tezligi nolga teng qilib qabul qilinadi: tezlikning bo'ylama tashkil etuvchisi esa yopishish sharti bo'yicha, normal tashkil etuvchisi esa devor yuzasining sizib o'tkazmaslik sharti bo'yicha olinadi. Jism (devor) yuzasida suyuqlik harorati $t = t_0$; $t = t_c$ — mavjlanmagan oqimda (suyuqlik oqimi yadrosida), bunda t_0 , t_c — devor harorati va devordan uzoqdagi muhit (suyuqlik) harorati. Oqimning barqarorlik tartibi uchun boshlang'ich shartlar berilmaydi.

Berilgan bir xilliklar shartlaridan (10.5) tenglamalar tizimi yechimini hosil qilib, issiqlik almashinish koeffitsiyenti α ni hisoblab topish mumkin. Shu maqsadda devor yuzasidagi issiqlik oqimi zichligini issiqlik berish uchun Nyuton-Rixman tenglamasi orqali (10.3) va issiqlik o'tkazuvchanlik uchun Furiye tenglamasi orqali (8.3) ifodalaymiz:

$$q_0 = \alpha(t_c - t_0) = -\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_0. \quad (10.9)$$

Bunda: y — devor yuzasidan hisoblanuvchi yuzaga normal koordinatasi, m; λ — suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti, W/(M·K); $\partial t / \partial y$ — devor yuzasidagi chegara qatlam harorati gradiyenti moduli, K/M (Kelvin/metr).

(10.9) tenglama issiqlik berish differensial tenglamasi deyiladi, uni issiqlik almashinish koeffitsiyentiga nisbatan yechib, quyidagini hosil qilamiz:

$$\alpha = -\frac{\lambda}{t_0 - t_c} \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_0, \quad (10.10)$$

Issiqlik almashinish koeffitsiyenti α ni (10.10) tenglama bo'yicha hisoblash (10.5), (10.7), (10.8) differensial tenglamalar tizimini

oldindan integrallash bilan bir xillilik shartlariga mosligi uchun yechilishi qiyin masalaga aylanadi, u kam hollarda amalga oshiriladi. Analitik yechim mos holda soddalashtirilgandan so'ng alohida xususiy hollardagina imkoni bo'ladi, EHM dasturlar yordamida sonli yechimlar katta hajmdagi ishlar bajarishni talab etadi.

10.5. O'xshashlik nazariyasini issiqlik berilishiga qo'llash

Issiqlik almashinish koeffitsiyentini analitik va sonli hisoblashlardagi ko'rsatilgan qiyinchiliklar borligi sababli konvektiv issiqlik almashinishining differensial tenglamasini integrallash asosida amaliyotda issiqlik berishni ifodalash uchun o'xshashlik nazariyasi keng tarqaladi, bu nazariya hodisalar o'xshashligi ilmiga asoslanadi. Texnikada geometrik o'xshashlik tushunchasi fizik hodisalar o'xshashligiga keng tarqalgan. Geometrik o'xshashlik jismning chiziqli o'lchamlari o'xshashliklari proporsionalliklarida ifodalanadi:

$$\ell_1''/\ell_1' = \ell_2''/\ell_2' = \ell_3''/\ell_3' = C_\ell = \text{const.} \quad (10.11)$$

Bunda: $\ell_1'\ell_2'\ell_3'$ — birinchi jismning xarakterli o'lchamlari;

$\ell_1''\ell_2''\ell_3''$ — ikkinchi jismning xarakterli o'lchamlari;

C_ℓ — geometrik o'xshashlik koeffitsiyenti.

Geometrik o'xshash jismlar konstantasi C_ℓ o'xshash jismlar masshtabini ko'rsatadi. Geometrik o'xshash tizimlarda fizik kattaliklar maydonlari o'xshash bo'lishi mumkin bo'lib, agarda bu tizimlardagi o'xshash nuqtalarda fizik kattaliklar qiymatlari proporsional bo'lsa, faqat masshtablari farq qilishi mumkin. Masalan, haroratga qo'llagan holda yozish mumkin:

$$\frac{t_1''}{t_1'} = \frac{t_2''}{t_1'} = \frac{t_3''}{t_3'} = \dots = C_t = \text{const.} \quad (10.12)$$

bunda: t_1', t_2', t_3' — birinchi geometrik tizimning 1,2,3... nuqtalaridagi aniqlangan haroratlar qiymatlari;

t_1'', t_2'', t_3'' — xuddi shu birinchi geometrik tizim uchun.

Taqqoslanayotgan geometrik tizimlarning belgilangan nuqtalardagi bir jinsli fizik kattaliklar proporsionallik koeffitsiyentlari **o'xshashlik konstantalari** deyiladi.

Hodisalar o'xshash bo'lishi uchun ko'rilayotgan jarayonda ahamiyatli barcha fizik kattaliklar maydonlari o'xshash bo'lishligi talab etiladi. Fizik hodisalar orasidagi o'xshashlik borligi nuqtai nazaridan tahlil ko'rsatadiki, geometrik tizimlarni solishtirishdan kelib chiqib, ko'rilayotgan hodisalardagi har xil fizik kattaliklar o'xshashlik konstantalari umumlighi ixtiyoriy bo'lishi mumkin emas, ular aniq chegaralarga bo'ysunadi. Bu chegaralanishlar ma'nosi — o'xshash hodisalar uchun o'xshashlik kriteriyalari ham teng bo'lishi shart — **o'xshashlik kriteriyalari** o'lchovsiz kattaliklar bo'lib, berilgan jarayon uchun fizik kattalik o'lchamlaridan tashkil topadi.

O'xshashlik kriteriyalari ko'rilayotgan jarayonni ifodalovchi tenglamalarni o'lchovsiz ko'rinishga aylantiriladi va keltirib chiqariladi. Misol sifatida issiqlik o'tkazuvchanlikning bir o'lchamli differensial tenglamasini (8.12) o'lchamsiz ko'rinishga aylantiramiz:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right). \quad (10.13)$$

O'zgaruvchilarni $x = x/\ell$; $F_0 = \alpha\tau/\ell^2$; $\Theta = (t - t_c)/(t_T - t_c)$ nisbatlar bilan almashtirsak, (10.13) quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2}; \quad (10.14)$$

Bunda: x — o'lchovsiz koordinata; Θ — o'lchovsiz harorat; F_0 — Fure kriteriyasi (soni) bo'lib, o'lchovsiz vaqtni ko'rsatadi; ℓ — jismni tavsiflovchi o'lcham bo'lib, uzunlik masshtabi etib tanlanadi.

Bir xil fizik tabiatli o'xshash hodisalar bir xil tenglama (odatda differensial) bilan yozilsa va bir xillik o'xshashlik shartlariga ega bo'lsa, hodisalar o'xshashdir.

O'xshashlik kriteriyalarining fizik ma'nosi shundan iboratki, ular har xil fizik samaralar orasidagi munosabatlarni ifodalaydi. Masalan, yuqorida topilgan Fure kriteriyasi ma'nosi jarayon kechishi vaqti

(τ) bilan vaqt birligida jismda harorat maydoni $\left(\frac{\ell^2}{a} \right)$ o'zgarishi

vaqtiga nisbatini namoyon qiladi.

O'xshashlik nazariyasida barcha o'xshashlik kriteriyalari **aniqlovchi** va **aniqlanadiganlarga** bo'linadi. Aniqlovchi deb, masala shartida berilgan kattaliklardan tashkil topgan o'xshashlik kriteriyasiga aytiladi. Izlanayotgan kattaliklardan tashkil topgan o'xshashlik kriteriyalari aniqlanadigan o'xshashlik kriteriyalari yoki o'xshashlik sonlari

deyiladi. O'xshashlik nazariyasi eksperimental izlanishlar natijalarini umumlashtirish va yarim emperik bog'liqliklarni keltirib chiqarish uchun qo'llaniladi. Unda aniqlovchi va aniqlanadigan kriteriyalarni kriterial tenglamalar shaklida namoyon qilish isbotlanadi, aniqlanadigan kriteriyalar aniqlovchilarning funksiyalari bo'ladi:

$$K_1 = f(K_2, K_3, \dots). \quad (10.15)$$

Bunda: K_1 — aniqlanadigan kriteriya; K_2, K_3 — aniqlovchi kriteriyalar.

O'xshashlik nazariyasi u yoki bu jarayonni matematik yozilishining tahlili asosida kriterial tenglamada qancha kriteriya bo'lishi kerakligi va kriteriyalar mazmunini ochib beradi, biroq aniqlanadigan kriteriyaning aniqlovchi bilan konkret funksional bog'liqligini topish imkonini bermaydi. Oxirgi masala (kriterial tenglamani aniqlash) tekshirilayotgan jarayon modellashtiruvchi eksperimentlar o'tkazish yo'li va olingan ko'rsatkichlarga kerakli ishlov berish bilan yechiladi.

Kriterial tenglamalar aniqlanadigan kriteriyaga kiradigan izlanayotgan kattaliklarni hisoblash uchun qo'llaniladi. Ular faqat aniqlanuvchi o'xshashlik kriteriyalar o'zgarishi oralig'ida izlanishlar uchun to'g'ri hisoblanadi, shuning uchun ularni ko'rsatilgan chegaralardan tashqarida ekstrapolyatsiya qilish hisoblashlarda ancha xatoliklarga olib kelishi mumkin.

Hamma o'xshashlik kriteriyalari o'lchamsiz kattaliklar. Ularning birini boshqasiga ko'paytirish va bo'lish, darajaga ko'tarish mumkin. Bu holatlarda olinadigan o'lchamsiz kattaliklar komplekslari ham o'xshashlik kriteriyalari bo'ladi. O'xshashlik kriteriyalari, odatda, ilmning ma'lum sohasi rivojiga talaygina hissa qo'shgan yetuk olimlar familiyasining birlamchi ikki harfi bilan belgilanadi.

Konvektiv issiqlik almashinishda juda tez-tez kriterial tenglamadan issiqlik almashinish koeffitsiyenti hisoblab topiladi. Issiqlik almashinish koeffitsiyenti o'z tarkibiga oluvchi aniqlanuvchi kriteriyani issiqlik berish differensial tenglamasi (10.9) da o'lchamsiz o'zgaruvchilarga o'tish orqali aniqlash mumkin.

Yangi o'zgaruvchilar kiritamiz: $\Theta = (t_T - t_c)/(t_T - t_c)$, $Y = U/\ell$, bunda ℓ — ba'zi tavsiflovchi o'lcham. Bu holda (10.9) tenglama quyidagi ko'rinishga ega:

$$\alpha\ell/\lambda = -\partial\Theta/\partial Y. \quad (10.16)$$

(10.16) ifodadan ko'rinadiki, o'lchamsiz o'zgaruvchilarda issiqlik chegara qatlamida harorat gradiyenti sonli kattaligi faqat o'lchamsiz kompleks $(\alpha\ell/\lambda)$ dan aniqlanadi, bu Nusselt soni nomi bilan ataladi:

$$Nu = (\ell/\lambda). \quad (10.17)$$

Nu ni $Nu = (\ell/\lambda)/(l/\alpha) = R_\lambda/R_\alpha$ ko'rinishda tasvirlab, shu xulosaga kelamizki, Nusselt soni ℓ qalinlikli suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanlikka qarshiligi R_λ ning issiqlik berishga qarshiligi R_α ga nisbatiga teng. O'lchamsiz kattaliklarni kiritib:

$$X = \frac{x}{\ell}; \quad Y = \frac{Y}{\ell}; \quad Z = \frac{z}{\ell}; \quad W_x = \frac{v_x}{v_c};$$

$$W_Y = \frac{v_Y}{v_c}; \quad W_z = \frac{v_z}{v_c}; \quad \Theta = \frac{t - t_c}{t_g - t_c}; \quad Fo = \frac{a\tau}{\ell^2}.$$

Energiya tenglamasi (10.5) ni, harakat tenglamasi (10.7) ni va uzluksizlik tenglamasi (10.8) ni o'lchamsiz ko'rinishga keltirish mumkin, bunda β, g, μ, ρ, a kabi fizik kattaliklar o'rniga matematik

yozuvda umumlashgan komplekslar paydo bo'ladi: $Pe = \frac{v\ell}{a};$

$Gr = \frac{g\ell^2}{\gamma^2} \beta(t_g - t_c)$, shu bilan birga o'lchamsiz vaqt F_0 va o'lchamsiz

koordinatlar X, Y, Z .

$$\text{Pekle kriteriyasi } Pe = \frac{v}{a} \frac{\nu l}{\nu} = \text{PrRe}. \quad (10.18)$$

U harakatlanuvchi suyuqlik bilan keltirilayotgan issiqlik oqimi zichligining issiqlik o'tkazuvchanligi yuzasiga keltirgan issiqlik oqimi zichligiga nisbati bilan tavsiflanadi. Pekle kriteriyasi, odatda, ikki kriteriya ko'paytmasi orqali aniqlanadi:

$$Pe = \nu / a.$$

$$\text{Prandtl kriteriyasi } \text{Pr} = \nu / a \quad (10.19)$$

suyuqlikning issiqlik fizik xususiyatlarini ifodalaydi.

Reynolds kriteriyasi:

$$Re = v\ell/\nu \quad (10.20)$$

inersiya kuchining qovushqoqlik ishqalanish kuchiga nisbatini ifodalaydi. Grasgof kriteriyasi:

$$Gr = \frac{g\ell^2}{\nu^2} \beta(t_g - t_c) \quad (10.21)$$

devor oldi va undan uzoqda suyuqliklar zichliklari farqi oqibatida hosil bo'ladigan ko'tarish kuchlarining qovushqoqlik kuchlariga nisbatini tavsiflaydi.

$$\text{Furye soni: } F_0 = \alpha \tau / \ell^2. \quad (10.22)$$

Jarayon o'tishida vaqt masshtabini aniqlovchi kompleksni ifodalaydi. Bu son nostatsionar jarayonlarni ifodalashda qo'llaniladi va bu holda, odatda, aniqlanuvchi kriteriya bo'ladi. Statsionar (turg'un) jarayonlar vaqtga bog'liq emas, shuning uchun F_0 kriteriya bu holatda kriterial tenglamaga kiritilmaydi.

(10.19) ... (10.21) tenglamalarda: ν — kinematik qovushqoqlik, m^2/s ;

α — harorat o'tkazuvchanlik, m^2/s ; β — harorat koeffitsiyenti, $1/\text{K}$; ν — suyuqlik tezligi m/s ; ℓ — tavsiflovchi o'lcham; t_d , t_s — suyuqlikning devor oldi va oqim yadrosidagi harorati, $^\circ\text{C}$.

Issiqlik almashinish to'liq yuzasi bo'yicha o'rtacha va murakkab bo'lmagan fazoviy yoki kimyoviy o'zgarishlar bilan issiqlik berishni ifodalashda aniqlanadigan va aniqlovchi o'xshashlik kriteriyalari orasidagi funksional bog'liqlik quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr}). \quad (10.23)$$

Odatda tajriba yo'li bilan topiladigan (10.23) tenglamaning konkret ko'rinishi qaralayotgan issiqlik berish hodisasi xarakteriga, tizimlar geometrik parametrlariga va jarayonni o'tkazish shartlariga bog'liq.

Issiqlik almashinish koeffitsiyentini hisoblashda avval kriterial tenglamadan Nu sonini topiladi, so'ngra issiqlik almashinish koeffitsiyenti hisoblanadi:

$$\alpha = \text{Nu} \frac{\lambda}{\ell}.$$

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Issiqlik berishni ta'riflang.
2. Issiqlik berish qonuni (Nyuton-Rixman qonuni) ni yozing. Issiqlik almashinish koeffitsiyentining fizik ma'nosi qanday?
3. Tabiiy va majburiy konveksiya deganda nima tushunasiz?
4. Energiya, harakat, uzluksizlik, issiqlik berish differensial tenglamalarini yozing va tenglamalardagi fizik kattaliklar ma'nolarini yoriting.
5. O'xshashlik nazariyasi nima va u nima uchun qo'llaniladi? O'xshashlik kriteriyasi nima, aniqlanadigan va aniqlanuvchi o'xshashlik kriteriyalari ta'rifini keltiring.
6. Nu, Pe, Re, Pr, Gr o'xshashlik kriteriyalarini ifodalang va fizik ma'nosini yoriting. Issiqlik almashinishni hisoblash uchun kriterial tenglamaning umumiy ko'rinishini keltiring.

XI BOB. ISSIQLIK ALMASHINISH KOEFFITSIYENTLARINI ANIQLASH UCHUN KRITERIAL TENGLAMALAR

11.1. Issiqlik tashuvchining majburiy harakati

Qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishida ko'p hollarda issiqlik tashuvchining issiqlik almashinish yuzasiga nisbatan majburiy harakatli issiqlik berish jarayonlari uchraydi, bular har xil turdagi issiqlik almashinuvchilar, kaloriferlar, qozon agregatlarida issiqlik almashinish uskunolari, issiqlik generatorlari, konditsionerlar, traktor va avtomobillar radiatorlaridan iborat.

Muhandislik amaliyotida issiqlik almashinishdagi issiqlik almashinuv koeffitsiyentlarni topish masalasi ko'riladi [5,9,10,15].

Tekis yuzadan bo'ylama yuvib harakatlanishda chegara qatlam oqimida uchta oqim tartibi kuzatilishi mumkin: laminar, o'tish va turbulent. Tekis yuzadan bo'ylama yuvib harakatlanishda va laminar oqim tartibida chegara qatlamda oqimning butun uzunligi bo'yicha o'rtacha issiqlik almashinish koeffitsiyenti uchun kriterial tenglama quyidagi ko'rinishda bo'ladi [15]:

$$Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25} \quad (11.1)$$

Bunda: $Re = v \cdot l / \nu < 5 \cdot 10^5$; $Pr = 0,6 \dots 1,5$; l — tekis yuza uzunligi (oqim bo'yicha).

Tekis yuzadan suyuqlikning bo'ylama yuvib harakatlanishida chegara qatlamda turbulent tartibli oqim uchun $Re \gg 5 \cdot 10^5$, $Pr = 0,7 \dots 200$ kuzatiladi va quyidagi formula olinadi (5):

$$Nu = 0,037 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_0} \right)^{0,25} \quad (11.2)$$

Aniqlovchi harorat deb shunday haroratga aytiladiki, bunda kriterial tenglamalarda suyuqlikning fizik xususiyatlari qiymatlari olinadi. (11.1) va (11.2) tenglamalarda aniqlovchi harorat sifatida qabul qilinadi: Re va Pr kriteriyalarni hisoblab topishda tezlashgan oqim harorati, Pr_g kriteriyani hisoblab topishda devorning o'rtacha harorati.

Suyuqlikning aylana kesimli silliq to'g'ri quvurlarda yoki aylana bo'lmagan kesimli kanallarda oqish hollarida quyidagi bog'liqliklar

o‘rinli bo‘ladi [15]: laminar tartibli quyushqoq — gravitatsion oqimda ($Re < 2000$) va $\ell/d \geq 50$:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,33} (Gr \cdot Pr)^{0,1} (Pr/Pr_\theta)^{0,25}, \quad (11.3)$$

$$\text{Bunda: } Nu = \alpha \cdot d / \lambda; \quad Re = v \cdot d / \nu, \quad Gr = \frac{g d^3}{\nu^2} \beta (t_\theta - t_c);$$

d — quvurning ichki diametri; ℓ — quvur uzunligi.

Turtbulent tartibli oqimda ($Re = 10^4 \dots 5 \cdot 10^6$) va $\ell/d \geq 50$:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_\theta} \right)^{0,25}.$$

Bunda: $Pr = 0,6 \dots 2500$;

o‘tish tartibli oqimda ($Re = 2000 \dots 10.000$):

$$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43} \quad (11.5)$$

(11.4) va (11.5) tenglamalarda aniqlovchi harorat — suyuqlikning quvurdagi o‘rtacha harorati, aniqlovchi o‘lchov — quvurning ichki diametri. Rr_s kattalik devor yuzasi o‘rtacha harorati bo‘yicha hisoblanadi. Issiqlik tashuvchining «quvur quvurda» shakldagi issiqlik almashgichdagi aylana kanali bo‘yicha harakatida yuqorida keltirilgan formulani qo‘llash mumkin, bunda aniqlovchi o‘lchov sifatida quvurlar orasidagi aylanali kesim ekvivalent diametri olinadi:

$$d_e = 4 F / P. \quad (11.6)$$

Bunda: F — oqimning ko‘ndalang kesim yuzasi, m^2 ; P — ho‘llangan perimetr, m .

Issiqlik tashuvchining quvurlar orasi muhitida harakatlanganda g‘ilof quvurli sistemali ajratkichli issiqlik almashgichlarda issiqlik almashinuv koeffitsiyenti ushbu formuladan hisoblab topiladi [15]:

$Re < 1000$ bo‘lganda:

$$Nu = 0,34 \cdot Re^{0,5} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_\theta} \right)^{0,25}. \quad (11.7)$$

$Re \geq 1000$ bo‘lganda:

$$Nu = 0,24 \cdot Re^{0,6} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_\theta} \right)^{0,25}. \quad (11.8)$$

Bunda aniqlovchi o‘lchov sifatida quvurning tashqi diametri olingan, oqim tezligi quvurlar orasi muhitning eng kichik qirqimi uchun hisoblanadi, aniqlovchi harorat quvurlar bog‘lamiga kirish va chiqishdagi o‘rtacha harorat.

$(Pr/Pr_p)^{0,25}$ kattaliklar nisbati chegara qatlamdagi (devordan oqimga va teskari) issiqlik oqimi yo'nalishining issiqlik almashinish koeffitsiyenti kattaligiga ta'sirini hisobga oladi. Bu nisbat faqat tomchili suyuqliklar uchun kerakli qiymatga ega gazlar uchun qabul qilish mumkin: $(Pr/Pr_p)^{0,25} \approx 1$.

Qovurg'ali quvurlar bog'lamini yuvib o'tishda issiqlik almashinish koeffitsiyentini quyidagi tenglamadan topish mumkin [15]:

$$Nu = 0,18 \left(\frac{d_T}{t} \right)^{-0,54} \cdot \left(\frac{h}{t} \right)^{-0,14} \cdot R^{0,65} \cdot Pr^{0,4} \quad (11.8)$$

Bunda: dt — qovurg'ali quvurning tashqi diametri, m;
 t — qovurg'alar orasidagi qadam, m; $h = 0,5(D-d_n)$ — qovurg'a balandligi, m; D — qovurg'a diametri, m.

11.2. Issiqlik tashuvchining erkin harakati

Amaliyotda issiqlik tashuvchining erkin harakati (erkin konvek-siya) ko'p hollarda gravitatsion maydon harakati orqali yuzaga keladi va bu holda gravitatsion erkin harakat nomi bilan ham yuritiladi (gravitatsion erkin konveksiya).

U, masalan, isitish asbobi yordamida isitilayotgan honada havoning erkin konveksiyasida kuzatiladi.

Gravitatsion erkin harakatda issiqlik almashinish koeffitsiyentining hisobi katta hajmda, odatda, quyidagi kriterial tenglama bo'yicha amalga oshiriladi [15]:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^m \varepsilon \quad (11.9)$$

Bunda: C , m , ε koeffitsiyentlari issiqlik shartiga bog'liq holda tanlanadi.

Issiqlik berish sharti	C	m	ε	Aniqlovchi o'lcham
Vertikal plastina va quvurlar: $Gr = 10^3 \cdot 10^9$ $Gr \cdot Pr > 10^9$	0,8 0,15	0,25 0,33	$1+(1+1/ver)1$	Quvur, plastina uzunligi.
Gorizontal quvurlar: $10^{-2} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^3$ $10^{-8} \leq Gr \cdot Pr \leq 10^8$	0,18 0,5	0,125 0,25	1 1	Quvur diametri.
Laminar tartibli oqimdagi gorizontal plastina: yuqoridan sovitiladi pastdan sovitiladi	0,54 0,27	0,25 0,25	1 1	Plastina qisqa tomoni.

(11.9) formulada aniqlovchi harorat etib issiqlik tashuvchining hajm bo'yicha va devor oldidagi o'rta harorati olinadi:

$$t = 0,5(t_g - t_c). \quad (11.10)$$

11.3. Qaynash

Qaynash deganda, bug' hosil bo'lish tushuniladi, u to'yinish haroratdan yuqori darajada qizdirilgan suyuqlik ichida suyuq va bug' fazalari ajralishida yangi erkin yuzalar paydo bo'lishini ta'minlaydi.

Qishloq xo'jalik ishlab chiqarishi issiqlik jarayonlarida qaynashda issiqlik berish ko'p hollarda qozon qurilmalarida bug' generatsiyasida uchraydi. Ikki tartibli qaynashning — pufakli va plyonkali turlari mavjud. Pufakli qaynash davriy pufaklar paydo bo'lish va hajmiy pufaklarish shaklida yuzaga keladi. Plyonkali qaynash deb, qizdirish yuzasida tekis plyonka hosil bo'lishi, uning davriy ravishda suyuqlik hajmiga yorib kirishiga aytiladi.

Bug' paydo bo'lish manbalari bo'lib suyuqlikda erigan va qaynashda paydo bo'layotgan pufaklar hisoblanadi. Ular davomiy qizdirish natijasida yuzaga keladi. Bug' qizigan suyuqlikdan yuzalarda gaz pufaklardan tashkil topadi. Pufaklarning eng ko'p soni qizdirilayotgan yuzada yig'iladi. Paydo bo'layotgan bug' pufaklar hajm bo'yicha ko'payadi, ajraladi, suzib chiqadi va o'zining o'rnini qisman yangi paydo bo'layotgan pufakchalarga qoldiriladi. Suzib chiqayotgan bug' pufakchalari suyuqlik va uning issiqlik chegara qatlamini aralashtiradi, bu esa issiqlik berishni jadallashtiradi. Qizdirish yuzasi orqali qancha ko'p issiqlik oqimi zichligi uzatilsa, shunchalik bug' pufakchalari generatsiyasi (paydo bo'lishi) yuzaga keladi va suyuqlik aralashishi jadallashadi. Buning oqibatida qaynashning pufakli tartibida issiqlik almashinish koeffitsiyenti ortadi (11.1- rasm). Shu bilan birga ma'lum issiqlik oqimi zichligida bug'ning pufakchalari shunchalik ko'p bo'ladiki, ular chaplashib tekis bug' plyonkasi hosil qiladi, natijada qaynashning plyonkali tartibi boshlanadi. Hosil bo'lgan bug' plyonkasi katta issiqlik qarshiligiga ega, shu sababli qaynashning pufakli tartibidan plyonkalisiga o'tilishda issiqlik koeffitsiyenti α ning qiymati keskin kamayishi kuzatiladi va shunga ko'ra issiqlik oqimi zichligi ham keskin kamayadi. Issiqlik berish mexanizmi (qonuniyati) ning pufakli qaynash tartibidagi plyonkaliga o'tish boshlanishida yoki plyonkalidan pufakli tartibga o'tish boshlanishidagi buzilishi issiqlik texnikasida qaynashda issiqlik berish krizisi deyiladi, pufakchali qaynashda

maksimal issiqlik oqimi zichligi imkoniyati — issiqlik oqimining **birinchi kritik zichligi** q_{kr} deyiladi.

Issiqlik oqimi birinchi kritik zichligida yotganda harorat bosimining yana ortishi (devor va suyuqlik haroratlari farqi) boshlanishida issiqlik oqimi zichligining sezilarli kamayishiga (11.1- rasm), natijada plyonkali qaynashda issiqlik oqimi zichligining minimal oqimi zichligining minimal imkon darajasiga yetishiga olib keladi, bu holat **issiqlik oqimining ikkinchi kritik zichligi** q_{kr2} deyiladi.

Issiqlik almashinishining keyingi jadallashuvi harorat bosimini ancha ko'paytirish imkonini yaratishni talab etadi, bu o'z vaqtida qizdirilayotgan devor va suyuqlik haroratlari farqini o'ttirishni talab etadi, qaysiki devor materialining issiqlikka chidamlilik imkoniyati bo'yicha chegaralanadi. Shu sababli amaliyotda bug' generatorlarida $q < q_{kr1}$ shartga javob beradigan ish tartibini ta'minlashga harakat qilinadi.

Qaynashda issiqlik koeffitsiyentini hisoblash uchun ko'p sonli empirik bog'lanishlar taklif etilgan. Katta hajmda suyuqlikning pufakchali qaynash tartibida erkin harakatlanish shartlarida quyidagi bog'lanish to'g'ri bo'ladi [15]:

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n. \quad (11.11)$$

Bunda: $Re = 10^{-5} \dots 10^4$;

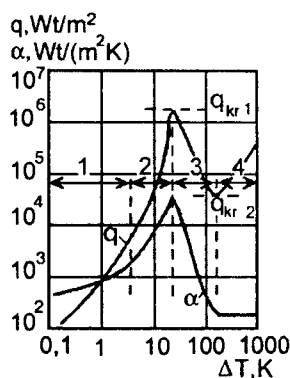
$Pr = 0,86 \dots 7,6$; $v \leq 7$ m/c, $Nu = \alpha \cdot l /$

λ_c ;

$Re = v_k \cdot l / v_c$; $Pr = v_c / \alpha_c$;

$l = \frac{c_c \cdot \sigma \cdot \rho_c \cdot T_T}{(r \cdot \rho_b)^2}$ — tavsiflovchi o'lcham, m;

$v_k = q / (r \cdot \rho_b)$ — qaynashda bug'ning shartli tezligi, m/s; r — bug' paydo bo'lish solishtirma issiqligi, j/kg; q — qizdirilayotgan devor orqali issiqlik oqimi zichligi, W/(m² K); λ_s , α_s , v_s , ρ_s — suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligi, kinematik quyushqoqligi va zichligi; σ — suyuqlik — bug' chegarasida yuza taranglashuv koeffitsiyenti, N/m; ρ_b — bug' zichligi, kg/m³; T_T — to'yinish harorati, K; C , m , n — tajriba konstantalari.



11.1- rasm.

Issiqlik oqimi zichligi va issiqlik berish koeffitsiyentlarining qaynashda harakat bosimiga bog'lanishi:

1 — bir fazali suyuqlikda issiqlik berish; 2 — pufakli qaynashda issiqlik berish; 3 — qaynashning o'tish tartibida issiqlik berish; 4 — plyonkali qaynashda issiqlik berish.

11.4. Kondensatsiyalanish

Jismning gaz holatdan suyuq yoki qattiq holatga o'tishi **kondensatsiya** deyiladi. Qattiq holatga kondensatsiyalanish **desublimatsiya** deyiladi. To'yingan yoki qizdirilgan bug'ni kondensatsiyalash uni to'yinish haroratidan past haroratda sovitish bilan amalga oshiriladi. Kondensatsiyalash bug'li yoki bug' — gazli hajmda, qattiq yoki suyuqlik yuzasida bug'ning ular bilan o'zaro kontaktida bo'lishida sodir etiladi. Jism yoki suyuqlik yuzasida kondensatsiya jarayoni kechishi har xil holatlari bo'ladi: plyonkali, tomchili yoki aralash.

Plyonkali kondensatsiyalanish deb, suyuq holatga kondensatsiyalanishning liofil (suyuqlik bilan yaxshi ho'llanadigan) yuzali qattiq jismda kondensatning tekis plyonkasi hosil bo'lishi bilan amalga oshadi. **Tomchili kondensatsiya** — bu kondensatsiyalanishda suyuqlik holati liofob (ho'llanmaydigan) yuzali qattiq jism yuzasida alohida kondensat tomchilari paydo bo'lishi bilan sodir etiladi. **Aralash kondensatsiyalanishda** suyuqlik holati qattiq jism yuzasida paydo bo'lishida yuzaning har hil uchastkalarida bir paytda ham plyonkali, ham tomchili kondensatsiyalanish sodir bo'ladi. Suyuqlikning aynan yuzasida bug' kondensatsiyalanishi (tomchi, oqim va boshqalar) **kontaktli kondensatsiya** deyiladi.

Qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishi issiqlik almashinish uskunalarida bug' kondensatsiyasi issiqlik tashuvchi sifatida to'yingan suv bug'i ishlatilganida sodir bo'ladi: ko'ylakli issiqlik almashinish isitish apparatlari, bug' kaloriferlari, g'ilof quvurlari issiqlik almashinish apparatlar va boshqalar. Ko'rsatilgan apparatlar, qoida bo'yicha plyonkali kondensatsiyalanish tartibida sovitish yuzasining yaxshi ho'llanuvchanligi natijasida amalga oshadi. Plyonka kondensatsiyalanishda ajraladigan issiqlik sovitish devor va unda hosil bo'lgan kondensat plyonkasi orqali olinadi. Bu holda termik qarshilik kondensat plyonkasi termik qarshiligi va suyuqlik va bug' fazalari bo'linish chegarasida fazoviy o'tish qarshiliklaridan iborat: $R \equiv 1/\alpha = R_p + R_f$.

Tomchili kondensatsiyalanishda plyonka termik qarshiligi bo'lmaydi, shuning uchun $R \equiv 1/\alpha = R_f$. Plyonkali kondensatsiyalanishda issiqlik almashinish koeffitsiyenti bir xil shartlarda ham tomchili kondensatsiyalanishdagidan bir tartibga yuqori bo'ladi. Plyonkali kondensatsiyalanishda issiqlik berish issiqlik almashinish yuzidagi plyonka qalinligiga, kondensatsiya tartibiga va suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligiga bog'liq. Issiqlik almashinish koeffitsiyenti qiymatiga kondensatsiyalanishda bug' tarkibidagi kondensatsiyalanmaydigan gazlar (masalan, havo) ishtiroki ham katta ta'sir ko'rsatadi,

bu issiqlik almashinish yuzasida gaz qatlami ekrani hosil bo'lishi va issiqlik almashinish ko'effitsiyenti kamayishiga olib keladi. Shunda, suv bug'ida hajm bo'yicha 1% havo bo'lishi issiqlik almashinish ko'effitsiyentining 2,5 marta, 2% — 3,2 marta, 3,5% — 5 marta kamayishiga olib keladi. Gorizontallik quvurda harakatlantirilgan bug'ning plyonkali kondensatsiyadagi issiqlik berish ko'effitsiyenti quyidagi formuladan aniqlanishi mumkin [15]:

$$Nu = 0,72 B Re_b^{0,16} R_*^{-0,25} Ga^{0,045} \left(\frac{\mu_b}{\mu_c} \right)^{0,08} \quad (11.12)$$

$$\text{Bunda: } Nu = \lambda d / \lambda_c; Re_b = v_b d / \nu_b; Re_* = \frac{\lambda_c \Delta t}{r \rho_c \nu_c}; Ga = g d^3 / \nu_c^3 —$$

Galiley kriteriyasi; d — quvur tashqi diametri; ν_b — kanalning qisqargan kesimida bug'ning o'rtacha tezligi; $\Delta t = t_T - t_d$ — to'yinish va devor haroratlari farqi; r — kondensatsiylanish issiqligi; g — erkin tushish tezlanishi; λ_c, ν_b, ρ_c — suyuqlikning issiqlik o'tkazuvchanligi, kinematik quyushqoqligi va zichligi, ν_b — bug'ning kinematik quyushqoqligi; μ_c, μ_b — suyuqlik va bug'ning dinamik quyushqoqligi; β — kondensatsiylanmaydigan gazlar aralashmasini hisobga oluvchi ko'effitsiyent (toza bug' uchun $B=42$; amaliy hisoblash uchun $B=30$ qabul qilish tavsiya etiladi).

Gorizontallik quvurlar bog'lami yuzasida bug' kondensatsiylanishida issiqlik almashinish ko'effitsiyenti α_p bittalik quvurniki α_1 ga nisbatan kichik, sababi quvurlardan oqib tushayotgan kondensat qalinligi ortadi. α_p va α_1 ko'effitsiyentlar nisbati quyidagicha: $\alpha_p / \alpha_1 = 0,84 / n^{0,07}$.

Bundan — bir-birining ustiga joylashgan quvurlarning balandlik bo'yicha qatorlar soni.

11.5. Qishloq xo'jalik binolarida konvektiv issiqlik almashinish

Bino ichida havo uzluksiz harakatlanadi. Uning harakati erkin yoki majburiy bo'lishi mumkin. Tabiiy havo oqimlari hosil bo'lish shartlari to'sin yuzalari yoki isitish asboblari va bino ichki havosi hayvonlardan issiqlik ajralishi, pol isitilishi, bruder, taglik solinishi va boshqalar hisobidan hosil bo'ladigan harorat farqidan yuzaga keladi. Binoga noizotermik havo oqimi uzatilganda issiqlik almashinish jarayoni oqimning bino ichki havosi bilan aralashish natijasida massa almashinish jarayoni bilan birga amalga oshadi. Issiqlik-massa almashinuvi jarayonlari saqlagichlarda, fermalarda va boshqalarda

mikroiqlimni ta'minlash uchun kerak. Bu jarayonlar qishloq xo'jalik binolari hajmi cheklanishi va nisbatan yuqori darajada issiqlik va namlik ajralishiga ma'lum ta'sir ko'rsatadi.

Tabiiy konveksiya sharti uchun issiqlik almashinish koeffitsiyenti (11.11) tenglamadan aniqlanadi. Bunda haroratlar farqi va yuza o'lchamlari turbulent oqimi rejimiga javob beradi. Bu holda issiqlik almashinish koeffitsiyenti α_k , $W/(m^2 \cdot K)$ ning o'rtacha qiymati uchun hisoblash qiymati ifodasi quyidagi ko'rinishga ega:

$$\alpha_k = 1,66^3 \sqrt{\Delta t}. \quad (11.13)$$

Bunda: $\Delta t = t_h - t_{yu}$ — bino ichki havosining harorati t_h va to'sin yuzasining harorati t_{yu} orasidagi haroratlar farqi, $^{\circ}C$.

(11.13) formula vertikal yuzalar uchun o'rinli. α_k ning o'rtacha qiymatini aniqlashda gorizontall joylashgan yuzalar uchun ham shunga o'xshash ifoda qo'llaniladi. Bu holda (11.13) formuladagi koeffitsiyent quyidagi qiymatlarga ega bo'ladi:

gorizontall yuza, yuqoriga qaratilgan: isitilgan — 2,16; sovitilgan — 1,16;

gorizontall yuza, pastga qaratilgan: isitilgan — 1,16; sovitilgan — 2,16.

To'sinlar ichki yuzasining majburiy konveksiya sharti binoni majburiy ventilyatsiyalab, shamollatishda yuzaga keladi. To'sinning tashqi tomoni majburiy konveksiyasi shamol ta'sirida yuzaga keladi.

(11.13) ifodadan issiqlik almashinish koeffitsiyenti o'rtacha qiymati uchun quyidagi hisoblash tenglamasi to'g'ri keladi:

$$\alpha_k = 5,94 \nu^{0,8} \cdot x^{0,2}. \quad (11.14)$$

Bunda: ν — tezlik, m/s; x — tavsiflovchi o'lcham (masalan, devor balandligi), m.

A.A. Runovning ko'rsatmalaridan, chorvachilik binolari ichki yuzalari issiqlik almashinish koeffitsiyenti qabul qilinishi mumkin:

Vertikal to'sinlar uchun:

$$\alpha_k = 2,6(t_h - t_{yu})^{1/3}; \quad (11.15)$$

gorizontall yoki kam engashish burchakli to'sinlar uchun:

$$\alpha_k = 3,2(t_h - t_{yu})^{1/3}. \quad (11.16)$$

(11.15) va (11.16) formulalardagi koeffitsiyentlar qiymatlarining (11.13) tenglamadagiga nisbatan yuqori ekanligi chorvachilik binolarida to'sinlar ichki yuzalarida havo harakati katta ekanligi bilan tushuntiriladi.

Issiqxonalarda tuproq yuzasidagi konvektiv issiqlik oqimi quvvati:

$$Q_{k.m} = F(t_{myn} - t_x)^3 \sqrt{t_{myn} - t_x}. \quad (11.17)$$

Bunda: A — to'sinlar joylashishini hisobga oluvchi koeffitsiyent;
 t_{up} — tuproq yuzasi harorati, $^{\circ}\text{C}$.

Issiqxona to'sinlariga ichki havodan konvektiv issiqlik oqimi quvvati:

$$Q_{k.m} = F_0 \eta (t_{myn} - t_x)^3 \sqrt{t_x - t_T} . \quad (11.18)$$

Qiyalik burchagi 30° bo'lgandagi koeffitsiyent:

$$F = 0,216(8,70 - \frac{F_{B.T}}{F_T}) . \quad (11.19)$$

Bunda: $A_T, A_{B.T}$ — barcha to'sin va vertikal to'sin yuzalari.

To'sin koeffitsiyenti η to'sin yuzasining ichki pol yuzasiga nisbatiga teng (27 bobga qarang).

Qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishi binosi to'sinlari tashqi yuzasi o'rab turuvchi muhit uchun issiqlik almashinish koeffitsiyent α_k^T (11.14) formuladan aniqlanadi. α_k^T ning qiymatlarini aniqlashda Yurgensning taqribiy formulalaridan foydalanish mumkin:

$$0 < v < 5 \text{ m/s bo'lganda} \\ \alpha_k^T = 6,14 + 4,1 v \quad (11.20)$$

$$5 < v < 30 \text{ m/s bo'lganda} \\ \alpha_k^T = 7,54 v^{0,78} \quad (11.21)$$

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. *Chegara qatlamda issiqlik tashuvchining qanday oqim tartiblari kuzatiladi, ular issiqlik berishga qanday ta'sir qiladi?*
2. *Aniqlovchi harorat nima?*
3. *Kriterial tenglamalarga kiritilgan $(Rr/Rrg)^{0,25}$ kompleks nimani hisobga oladi, u gazlar uchun nimaga teng?*
4. *Issiqlik tashuvchining erkin harakati uchun kriterial bog'lanishning umumiy ko'rinishi qanday?*
5. *Qaynash tartiblari turlari qaysilar? Ularni tavsiflang.*
6. *Qaynash krizisi nima, issiqlik oqimining birlamchi va ikkilamchi kritik zichligi nima?*
7. *Kondensatsiya nima, plyonkali, tomchili, aralash, kontakli kondensatsiyalar nima? Desublimatsiya nima?*
8. *Kondensatsiyalanishda issiqlik qarshiligi nimalardan tashkil topadi? Qaysi kondensatsiya turi — plyonkalimi, tomchilimi kam issiqlik qarshiligi bilan tavsiflanadi?*
9. *Kondensatsiyalanmaydigan gazlar va kondensat plyonkasi qalinligi issiqlik almashinish koeffitsiyentiga qanday ta'sir qiladi?*
10. *Binoda issiqlik almashinishi koeffitsiyenti o'rtacha qiymati qanday aniqlanadi?*
11. *Issiqxona to'sinlari va tuproq yuzasi uchun konvektiv issiqlik oqimi quvvati uchun formulalarni keltiring.*

XII BOB. NURILANISH ISSIQLIK ALMASHINISHI

12.1. Asosiy tushunchalar, aniqliklar va qonunlar

Asosiy tushunchalar va aniqliqlar. Issiqlik nurlanishi nurlanuvchi jism ichki energiyasining elektromagnit tebranishlar nuriy energiyasiga aylanishini anglatadi. Nuriy energiyaning boshqa jismga tushishida energiya qisman jismga yutiladi va uning ichki energiyasiga aylanadi. Nuriy issiqlik almashinishda jismlar bir-biriga tegishi shart emas. Elektromagnit to'liqlar sifatida nur chiqarish hamma jismga xos.

Nurlanish *to'liq* va *korpuskulyar* xususiyatlarga ega, aynan elektromagnit to'liqlarning uzluksizligi va diskretligi *foton* zarralari chiqarishi bilan tavsiflanadi. Fazoda nur tarqalishi to'liq xossalari bilan nur energiyasi tarqalishi esa korpuskulyarlik xossalari bilan aniqlanadi. Issiqlik nurlanishi *to'liq uzunligi* λ va *tebranish chastotasi* ν bilan tavsiflanadi. Bu holda ular orasida bog'lanish mavjud: $\nu = c/\lambda$, bunda $c = 3 \cdot 10^8$ m/c — yorug'lik tarqalish tezligi.

Hamma jismning nurlanishi uning haroratiga bog'liq. Harorat oshishi bilan jismning ichki energiyasi ortadi, buning oqibatida jism nurlanishi ham ko'chayadi.

Haroratdan tashqari nurlanish jism tabiati, yuza holati, gazlar uchun gaz qatlami qalinligi va bosimiga bog'liq. Ko'pchilik qattiq va suyuq jismlar to'liq uzunliklarining barcha diapazonida nuriy energiya tarqatadi. Toza metallar va gazlar ma'lum to'liq uzunliklari oraliq'ida energiya chiqaradi, bu nur chiqarish *selektiv nurlanish* deyiladi.

Texnikada, qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishida uchraydigan past haroratli jismlarda nurlanish to'liq uzunligining $0,8 \cdot 10^{-6}$ dan $0,8 \cdot 10^{-3}$ gacha diapazoniga to'g'ri keladi. Bu nurlanish issiqlik (infraqizil) nurlanishiga kiradi.

Yarim sferik fazoda barcha yo'nalishlarda va barcha to'liq uzunliklarida yuza birligidan vaqt birligida nurlanayotgan integral nur oqimi integral nurlanish oqimi yuza zichligi yoki *jismning nurlanish qobiliyati* E , Vt/m^2 deyiladi.

Cheksiz kichik to'liq uzunligi oraliq'ida ajratayotgan nurlanish oqimi zichligining shu oraliq to'liq uzunligi kattaligiga nisbatan nurlanish oqimining spektral zichligi nomi bilan ataladi, Vt/m^2 ,

$$I_\lambda = dE/d\lambda. \quad (12.1)$$

Umumiy holda jism o'ziga tushayotgan nur oqimini qisman yutadi, qisman qaytaradi va qisman o'tkazib yuboradi (12.1- rasm). Energiyaning saqlanish qonuniga binoan:

$$E_{\text{tush}} = E_A + E_R + E_D. \quad (12.2)$$

Yoki o'lchamsiz shaklda

$$A + R + D = 1. \quad (12.1)$$

Bunda: $A = E_A/E_{\text{tush}}$ — jismning yutish qobiliyati;

$R = E_R/E_{\text{tush}}$ — jismning qaytarish qobiliyati;

$D = E_D/E_{\text{tush}}$ — jismning o'tkazib yuborish qobiliyati.

$A = 1, R = D = 0$ bo'lganda **jism absolyut qora** deyiladi. Agar $R = 1, A = D = 0$ bo'lsa, bunday **jism absolyut oq**, agar $D = 1, A = R = 0$ bo'lsa **absolyut shaffof** yoki **diatermik** deyiladi. Ko'pchilik qattiq jismlar uchun $D = 0$.

Keyinchalik absolyut qora jismga taalluqli barcha kattaliklar «0» indeks bilan belgilanadi. Yutish koeffitsiyenti $0 < A < 1$ bo'lgan va yutish qobiliyati tushayotgan nur uzunligiga bog'liq bo'lmagan jismlar **kulrang jismlar** deyiladi.

Jismning xususiy nurlanishi bilan undan qaytayotgan nurlanish yig'indisi **samarali nurlanish** bo'ladi:

$$E_{\text{sam}} = E + RE_{\text{tush}}. \quad (12.3)$$

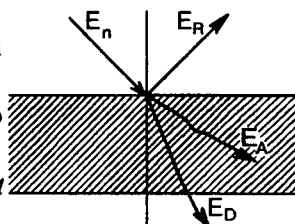
Xususiy nurlanish E va yutilayotgan nur oqimi $E_{\text{yut}} = AE_{\text{tush}}$ farqi **natijaviy nurlanish** E_n deyiladi:

$$E_H = E - AE_{\text{tush}} = E_{\text{sam}} - E_{\text{tush}}. \quad (12.4)$$

Jismlar tizimlarida o'zaro nurlanish energiya chiqarish, yutilish, qaytarish va o'tkazib yuborish jarayonlar yig'indisi **nuriy issiqlik almashinish** deyiladi.

Plank qonuni. Absolyut qora jismlar uchun nurlanish oqimi spektral zichligi I nur to'liq uzunligi va jismning absolyut haroratiga bog'liq:

$$M_{\text{sa}}(\lambda, T) \approx C_1 \cdot \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1). \quad (12.5)$$



12.1- rasm.

Bunda: $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$; $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ — nurlanish doimiylari. T — termodinamika harorati, K ; e — natural logarifm asosi. Haroratning nurlanish maksimal jadalligiga qadar oshishi bilan to'liq uzunligi qisqaroq to'liq uzunligi oralig'iga siljiydi.

Vin qonuni. I_{λ_0} ning maksimal qiymatiga to'g'ri keladigan to'liq uzunligi $\lambda_{\max}$ ning harorat T ga ko'paytmasi — o'zgarmas kattalik:

$$\lambda \cdot T = 2,896 \cdot 10^{-3}. \quad (12.6)$$

Stefan — Bolsman qonuni. Plank qonunidan $I_{\lambda_0}(\lambda)$ ni to'liq uzunligi bo'yicha integrallash yo'li bilan kelib chiqadiki, absolyut qora jism uchun:

$$E_0 = \sigma_0 T^4. \quad (12.7)$$

Bunda: $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ — Stefan — Bolsman doimiysi (absolyut qora jismning nurlanish konstantasi).

Texnik hisoblashlarda Stefan—Bolsman qonuni quyidagi ko'ri-nishda yoziladi:

$$E = C_0 (T/100)^4. \quad (12.8)$$

Bunda: $C_0 = 5,67 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$ — absolyut qora jism nurlanish koeffitsiyenti.

Kulrang jismlarda nurlanish jadalligi absolyut qora jismlarga nisbatan kichik, demak $E < E_0$. Berilgan jismning xususiy integral nurlanishi yuza oqimi zichligi E ni xuddi shu haroratdagi absolyut qora jism xususiy integral nurlanishi yuzaviy oqimi zichligi E_0 ga nisbati jismning qoralik darajasi deyiladi:

$$\varepsilon = E/E_0. \quad (12.9)$$

Bunda: $\varepsilon < 1$.

Nurlanish oqimi zichligi E ni ushbu tenglamadan topiladi:

$$E = \varepsilon \cdot E_0 = \varepsilon \cdot C_0 (T/100)^4 = C (T/100)^4. \quad (12.10)$$

Bunda: $C = \varepsilon \cdot C_0$ — kulrang jism nurlanish koeffitsiyenti.

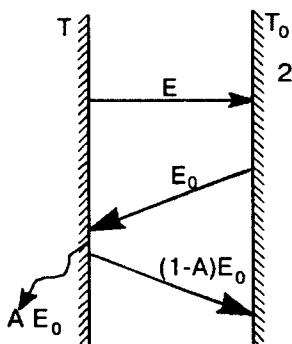
Kirxgof qonuni. Nurlanish va yutilish energiyalari orasidagi bog'lanishni kulrang va absolyut qora jismlar uchun keltirib chiqarish Kirxgof qonuni nomi bilan yuritiladi.

Absolyut qora va kulrang jismlarning issiqlik nurlarini yutish hamda tarqatish xossalari orasidagi bog'lanishni G. Kirxgof 1882 yili o'rganib, quyidagi qonuniyatni ochgan:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \frac{E_0}{A_0} = E_0(T). \quad (12.11)$$

Bunda, $\frac{E_1}{A_1} = E_0$ — absolyut qora jismning nur tarqatish qobiliyati.

Jismning nurlash xususiyatining nur yutish qobiliyatiga nisbati jism tabiatiga bog'liq emas va barcha jismlar uchun harorat funksiyasidir; jismning nur chiqarish qobiliyati absolyut qora jismning shu haroratdagi nur chiqarish qobiliyatiga teng.



12.2- rasm.

O'zaro parallel joylashgan tekis yuzali kulrang 1 va absolyut qora 2 jismlar orasidagi nurlanish issiqlik almashinishni ko'rib chiqamiz (12.2- rasm). Kulrang va qora jismlar muvofiq holda T , va T_0 haroratlarga ega. Jismlar nurlanish energiyalari E_0 va E teng, yutilish koeffitsiyentlari A va A_0 1 ga teng. Kulrang jismdan qora jismga uzatilayotgan natijaviy issiqlik oqimi zichligi:

$$E_H = E - AE_0. \quad (12.12)$$

Nuriy issiqlik almashinishda ishtirok etuvchi jismlar haroratlari tenglashganda ($T=T_0$), $E_p=0$ va shunga ko'ra $E=AE_0$. Bundan:

$$A = E/E_0 \quad (12.13)$$

(12.9) tenglikni e'tiborga olib:

$$\varepsilon = A. \quad (12.14)$$

Kirxgof qonunidan kelib chiqadiki, jismning qoralik darajasi issiqlik dinamik muvozanat holatida uning yutish koeffitsiyentiga teng. Kulrang jism yutish koeffitsiyenti tushayotgan nur to'liq uzunligiga bog'liq emas, ya'ni kulrang jism uchun Kirxgof qonuni nur tarqatuvchi va issiqlik qabul qiluvchi har xil haroratlarga ega bo'lganda o'rinli.

Lambert qonuni. Qora jism chiqarayotgan nurlanish energiyasi tarqalishining nur yo'nalishining jism yuzasiga nisbatan bog'liqligining aniqlanishi Lambert qonuni nomi bilan ataladi. Maksimal nurlanish E_p yuzaga tushirilgan normal yo'nalishda bo'ladi. Boshqa yo'nalishlarda nurlanish kamroq va ushbu formula bilan aniqlanadi:

$$dE_\varphi = E_p \cdot \cos \varphi \cdot d\Omega. \quad (12.15)$$

Bunda E ning qiymati (12.10) formuladan aniqlanadi.

12.2. Jismlar orasida nurlanish issiqlik almashinish va uning jadalligini o'zgartirish usullari

Umumiy ma'lumotlar. Kulrang shaffof bo'lmagan, cheksiz tekis yuzalar bir-biriga qaragan jismlar orasidagi nurlanishi issiqlik almashinishni ko'rib chiqamiz. Hisobni yuzaning birlik maydoni ($1m^2$) ga nisbatan olib boramiz. Birinchi jismning ikkinchi jismga berayotgan xususiy nurlanishi energiyasini E_1 , ikkinchi jismning birinchi jismga berayotgan xususiy nurlanishi energiyasini E_2 bilan belgilaymiz. Jismlar orasidagi o'zaro nurlanish va yutilish ko'p karrali cheksiz amalga oshadi (12.3- rasm). Bu masalani yechishda natijaviy nurlanish oqimi zichligi tushunchasi qo'llaniladi. Har bir jism to'liq samarali nurlanish — muvofiq holda $E_{CAM\ 1}$ va $E_{CAM\ 2}$ bilan tavsiflanadi.

$$E_{cam\ 1} = E_1 + (1 - A_1) \cdot E_{CAM\ 2}. \quad (12.16)$$

$$E_{sam\ 2} = E_2 + (1 - A_2) \cdot E_{CAM\ 1}. \quad (12.17)$$

Bunda: A_1 va A_2 — birinchi va ikkinchi jism yutish koeffitsiyenti; $(1-A_1) \cdot E_{cam2}$ va $(1-A_2) \cdot E_{cam1}$ kattaliklar birinchi va ikkinchi jismlarning cheksiz qaytargan nur oqimlari yig'indisi.

Natijaviy nurlanish oqimi zichligi:

$$q_{1,2} = E_{cam\ 2}. \quad (12.18)$$

(12.16) va (12.17) tenglamalarni hisobga olib, topamiz:

$$q_{1,2} = \frac{A_2 E_1 - A_1 E_2}{A_1 + A_2 - A_1 \cdot A_2}. \quad (12.19)$$

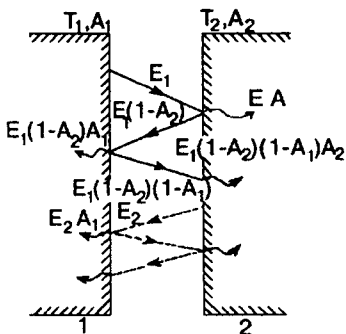
Ma'lumki, $E = \varepsilon \cdot C_0 (T/100)^4$ va $\varepsilon = A$; Bundan:

$$q_{1,2} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1} \cdot C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] =$$

$$= \varepsilon_{kel} \cdot C_0 [(T_2/100)^4] \quad (12.20)$$

Bunda: $\varepsilon_{kel} = (1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)^{-1}$ — jismlar tizimining keltirilgan qoralik darajasi.

Amaliyotda tez-tez uchraydigan hollarda bir jism issiqlik almashinish sirti ikkinchi yopiq sirt ichida yotadi (masalan, ferma binosi ichidagi hayvonlar).



12.3- rasm

1- sirtidan 2- sirtga natijaviy nurlanish oqimi bu holda ushbu ifodadan aniqlanadi:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{kel} \cdot C_0 F_1 [(T_2/100)^4] - (T_2/100)^4]. \quad (12.21)$$

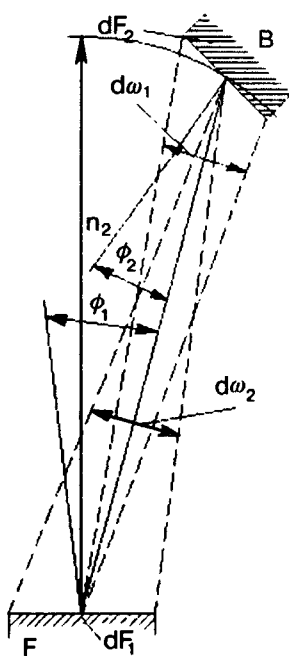
Bunda: $\varepsilon_{kel} = 1/[1/\varepsilon_1 + (F_1/F_2)(1/\varepsilon_2 - 1)]$;

F_1 va F_2 — jismlar sirtlarining yuzalari.

Fazoda ixtiyoriy joylashgan ikki jism orasidagi nurlanish issiqlik almashinish holatini ko'rib chiqamiz (12.4- rasm). Lambert qonuniga ko'ra birinchi jism sirtidagi elementar maydon dF_1 dan ikkinchi jism sirtidagi elementar maydon dA_2 ga nurlanish oqimi tushadi:

$$d_2 Q_{1,2} = (E_1/\pi) \cos \varphi_1 d\Omega_1 dF_1. \quad (12.22)$$

Xuddi shunga o'xshash dF_2 maydonchadan dF_1 maydonchaga tushadigan nurlanish oqimi: 12.4- rasm.



12.4- rasm.

$$d^2 Q_{1 \rightarrow 2} = (E_2/\pi) \cos \varphi_2 d\Omega_2 dF_2. \quad (12.23)$$

Jismlar joylashish burchaklari qiymatlarini quyidagi tenglamalardan topamiz:

$$d\Omega_1 = dF_2 \cos \varphi_2 / r^2; \quad d\Omega_2 = dF_1 \cos \varphi_1 / r^2.$$

Bunda: r — maydonchalar orasidagi masofa.

Jismlar orasidagi natijaviy nurlanish oqimi:

$$d^2 Q_{1,2} = d^2 Q_{1 \rightarrow 2} - d^2 Q_{2 \rightarrow 1} = [(E_1 - E_2)/(\pi r^2)] \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 dF_1 dF_2. \quad (12.24)$$

Integrallab olamiz:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{kel} C_0 [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] \int_{-A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2 \quad (12.25)$$

yoki:

$$Q_{1,2} = \varepsilon_{kel} C_0 \varphi_{1,2} [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (12.26)$$

Bunda: $\varphi_{1,2} = \frac{1}{F_1} \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_1 dF_2$ — nurlanish koeffitsiyenti.

Keltirilgan ifodadan ko'rinadiki, $\varphi_{1,2}$ koeffitsiyent jismning fazoda joylashishiga, jismlar oarsidagi masofaga hamda bu jismlar sirtga

bog'liq bo'ladi.

Xuddi shunday hisoblashlar tenglamasini $Q_{2,1}$ va $\varphi_{2,1}$ lar uchun ham topish mumkin. U holda $\varphi_{2,1}F_1 = \varphi_{1,2}F_2$.

Nurlanish koeffitsiyenti qiymati analitik yoki eksperimental aniqlanadi. Amaliyotda ko'p uchraydigan hollarda nurlanish koeffitsiyenti qiymatlari issiqlik texnikasi ma'lumotlaridan olinadi. ε_{kel} kattalikni unchalik katta bo'lmagan xatoliklar bilan qabul qilish mumkin: $\varepsilon_{kel} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$.

Nurlanish issiqlik almashinish jadalligini o'zgartirish usullari. (12.26) tenglamadan ma'lumki, nurlanish issiqlik almashinishning jadallashtirishni: nurlanuvchi jism harorati T_1 ni oshirish, jism qoralik darajasini oshirish, shu bilan birga jismlarning bir-biriga nisbatan muayyan joylashuvini, $\varphi_{1,2}$ koeffitsiyentini oshirish yo'llarini qo'llab amalga oshirish mumkin.

Nurlanish issiqlik almashinishni kamaytirish uchun jismlar orasiga ekranlar o'rnatiladi.

Misol uchun, himoyalagan tuproq inshootlarida o'simlik barglari ekran rolini o'ynaydiki, ular tuproq va to'sinlar ichki sirtlari orasidagi nurlanishi issiqlik almashinishni kamaytiradi.

Ikkita cheksiz tekis parallel sirtlar berilgan bo'lsin, ular haroratlari mos ravishda T_1 va T_2 ga teng va $T_1 > T_2$ bo'lsin. Ular orasida ekran joylashgan bo'lib, uning harorati T_{ek} noma'lum. Aytaylik, ekranning issiqlik qarshiligini hisobga olmaymiz. Bundan tashqari jismlar nurlanish koeffitsiyentlari bir xil. Jarayon turg'un ekanligidan 1 sirtidan nurlanish oqimi ekranga tushishi ekrandan 2 sirtga tushayotgan nurlanish oqimiga teng:

$$q_{ek} = \varepsilon_{kel} c_o [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] = \varepsilon_{kel} c_o [(T_{ek}/100)^4 - (T_2/100)^4], \quad (12.27)$$

Bunda: $T_{ek}^4 = (T_1^4 - T_2^4)/2$.

Ekran mavjud bo'lganda nuriy energiya oqimining izlagan kattaligi

$$q_{ek} = 0,5 \varepsilon_{kel} c_o [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4]. \quad (12.28)$$

Binobarin,

$$q_{ek} = q_{1,2} / 2 \quad (12.29)$$

ya'ni, bitta ekran mavjud bo'lganda 1 jismdan 2 jismga nurlanish oqimi 2 marta kamayadi. n ta ekranlar mavjud bo'lganda nurlanish oqimi $(n+1)$ martaga kamayadi.

12.3. Gazlarda nurlanish

Turli xil gazlar nurlanish energiyani chiqarish va yutish qobiliyatlarini bir xil bo'lmaydi. Tajribalar ko'rsatishicha bir va ikki atomli simmetrik molekulyar gazlar (O_2 , N_2 va boshqalar) nisbatan past haroratlarda amalda nurlanmaydi, nuriy energiya yutmaydi va ularni shaffof deb hisoblash mumkin bo'ladi. Uch va uchdan ortiq atomli gazlar (CO_2 , N_2O , SO_2 , NH_3 va boshqalar) energiya yutish va nurlanish bo'yicha katta imkoniyatga ega.

Gazning yutish qobiliyati uning tabiatiga, haroratiga, zichligiga va tushayotgan nurlanish spektrial tavsifiga bog'liq. Gazlar tabiatdagi qattiq (quyqa, chang va boshqalar) yoki suyuq zarralar gazning nurlanish va qaytarish qobiliyatiga ta'sirini ko'rsatadi, bu jismlar qattiq shaffof bo'lmagan jismlardan farqliroq hajmiy xarakterga ega bo'ladi va yupqa sirt qatlamli nuriy energiya chiqaradi.

Gazning nurlanishi oqimi zichligi quyidagi tenglamadan aniqlanadi:

$$E = \varepsilon_g c_0 (T_g / 100)^4. \quad (12.30)$$

Bunda: ε_g — gazning qoralik darajasi; T_g — gaz harorati, K.

Amaliy masalalar hisoblash uchun gaz va jism (devor) sirti orasidagi nurlanish issiqlik almashinish jarayoni muhim hisoblanadi. Natijaviy nurlanish oqimi zichligi ushbu formuladan aniqlanadi:

$$q_a = \varepsilon_d \varepsilon_g c_0 [(T_g / 100)^4 - (T_d / 100)^4]. \quad (12.31)$$

Bunda: $\varepsilon_d = 1 / [1/\varepsilon - A_g(1/\varepsilon_d - 1)]$ — devorning samarali qoralik darajasi;

$\varepsilon_g = [\varepsilon_g - A_g(T_d / T_g)^4] / [1 - (T_d / T_g)^4]$; ε_d — devor qoralik darajasi.

Gazlar qoralik darajasining parsial bosim va gaz qatlami qalinligi S_g ga bog'liqligi issiqlik almashinish nazariyasi bo'yicha ma'lumotnoma adabiyotlarda keltirilgan.

12.4. Qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishi binolarida nurlanish issiqlik almashinish

Bino ichki havosi, asosan, ikki atomli gazlardan tashkil topgan bo'lib, nurlanish oqimi uchun diatermik deb hisoblash mumkin. Havo tarkibida ko'p atomli gazlar (suv bug'lari, uglerod dioksidi, ammiak va boshqalar) oshishi mobaynida havoning nurga shaffoflik xususiyati buziladi. Qishloq xo'jaligi binolari muhitiga xos bo'lgan

nisbatan past haroratli havoda, shu bilan birga tuproq va to'sin sirti uchun nurlanish nisbatan to'liq uzunliklari qisqa diapazonida ro'yobga chiqadi. Shuning uchun integral nurlanishni aniqlashda nurlanish va yutilish koeffitsiyentlarining o'rtacha qiymatlari qabul qilinadi.

Himoyalangan tuproq inshootlarida nurlanish issiqlik almashinish to'proq va to'sin sirti orasida amalga oshadi, isitish asboblari dan to'proqqa va to'sinlarga beriladi.

Tuproqdan to'singa uzatilayotgan nurlanish oqimi zichligi $q_{tup.t.}$, W/m^2 , ushbu formuladan aniqlanadi:

$$q_{tup.t.} = \varepsilon_{kel} c_o q_{tup.yu.t.} [(T_{tup.} / 100)^4 - (T_i / 100)^4]. \quad (12.32)$$

Bunda: ε_{kel} — tuproq va to'sin uchun keltirilgan qoralik darajasi ($\varepsilon_{kel} = 0,865$); $q_{tup.yu.t.}$ — tuproq sirtidan to'singa nurlanish koeffitsiyentining o'rtacha qiymati ($q_{tup.yu.t.} = 0,91 \dots 0,95$); $T_{tup.}$ — tuproq sirti harorati, K; T_i — to'sin ichki sirti o'rtacha harorati, K.

Issiqlonxona isitish asboblari dan tuproqqa uzatilayotgan nurlanish oqimi zichligi, $q_{a.tup.}$ W/m^2 .

$$q_{a.tup.} = \varepsilon_{kel} c_o \varphi_{a.tup.} F_a [(T_a / 100)^4 - (T_{tup.} / 100)^4]. \quad (12.33)$$

Bunda: $\varepsilon_{kel} = \varepsilon_a \varepsilon_{tup.}$ — isitish asbobi ε_a va tuproq sirti $\varepsilon_{tup.}$ ning keltirilgan qoralik darajasi; $\lambda_{a.tup.}$ — isitish asbobi sirti va tuproq sirti nurlanishi koeffitsiyenti o'rtacha qiymati bo'lib, issiqlonxona kengligiga bog'liq; F_a — isitish asbobi sirti yuzasi, m^2 ; T_a — isitish asbobi sirti harorati, K; $T_{tup.}$ — tuproq sirti harorati, K.

Issiqlonxonalarda isitish asbobi bilan to'sinlar ichki sirti yuzalari orasidagi nuriy issiqlik almashinish ham yuqoridagi singari aniqlanadi.

12.5. Hayvonlar va bino to'sinlari orasida nurlanish issiqlik almashinish

Hayvon tanasining sirti va to'sinlar konstruksiyalarining ichki sirti orasidagi nurlanish solishtirma issiqlik oqimi ushbu formula yordamida aniqlanadi:

Tashqi devor uchun:

$$Q_{h.d.} = 0,87 c_{kel} \varphi_{h.d.} F_n [(T_H / 100)^4 - (T_d / 100)^4]. \quad (12.34)$$

Bino tomi uchun:

$$Q_{h.tom.} = 0,87 c_{kel} \varphi_{h.tom.} F_n [(T_h / 100)^4 - (T_{tom.} / 100)^4]. \quad (12.35)$$

Bunda: F_n — nurlanish yuzasi, m^2 ; T_h , T_d , T_{tom} — mos holda hayvon tanasi sirti yuzasi, devor va tomlarning absolyut haroratlari, K; c_{kel} — nurlanishning keltirilgan koeffitsiyenti, u quyidagi tenglamadan topiladi:

$$C_{kel} = 1 / [(1/C_h) + (1/C_{to's.}) + (1/C_o)] . \quad (12.36)$$

Bunda: C_h — hayvon tanasi junli qoplami nurlanishi koeffitsiyenti, $C_h = 5,4 \text{ W}/(m^2 \text{ K}^4)$; $C_{to's.}$ — to'sin sirti nurlanishi koeffitsiyenti. qizil g'isht uchun $C_{to's.} = 0,93$, beton uchun — 0,62, qumli suvoq uchun — 0,91..0,94, yog'och taxta uchun — 0,7...0,9 $\text{W}/(m^2 \text{ K}^4)$.

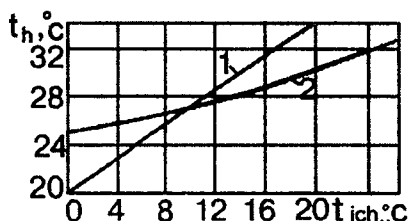
Chorvachilik binolari uchun nurlanish koeffitsiyentining quyidagi qiymatlarini qabul qilish mumkin: tom uchun $\varphi_{h.tom.} = 0,30$; bo'ylama devorlar uchun $\varphi_{h.d.} = 0,21...0,13$ va old devor uchun $\varphi_{h.d.} = 0,08...0,4$. Koeffitsiyentning boshlang'ich qiymatlari eni 12 metrlik binolarga taalluqli, oxirgilari — eni 24 metr bo'lgan binolar uchun.

Hayvon tanasining nurlanish yuzasi F_{yu} ushbu tenglamadan topiladi:

$$F_{yu} = K_{yu} F_h. \quad (12.37)$$

Bunda, K_{yu} — tananing nurlanish yuzasi ulushi (0,8 ga teng etib qabul qilinadi); F_h — hayvon tanasi yuzasi, m^2 ; cho'chqalar uchun $9,2 \cdot m^{2/3}$, qoramol uchun $10,5 \cdot m^{2/3}$ (m — hayvon massasi, tonna).

Hayvon tanasi junli qoplamasi harorati bino havo haroratiga bog'liq holda o'zgaradi. T_h — hayvon tanasi jo'nli qoplamasi haroratini aniqlash uchun 12.5- rasmda keltirilgan grafikdan foydalaniladi.



12.5- rasm. Hayvon tanasi junli qoplamasi haroratining bino ichidagi havo haroratiga bog'liq holda o'zgarishi:
1 — qoramol uchun; 2 — cho'chqa uchun.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. Jismlar orasida nuriy issiqlik almashinish qanday amalga oshirladi? Issiqlik nurlanishining asosiy xususiyatlarini keltiring.

2. Integral nurlanish oqimining yuza zichligi deb nimaga aytamiz, xuddi shunday nurlanish oqimi spektrial zichligichi?
3. Jismning nurlarni yutishi, qaytarishi va o'tkazib yuborishi xususiyatlarining aniqlanishlarini keltiring. Samarali va natijaviy nurlanish nima?
4. Plank va Vin qonunlarini ifodalang.
5. Absolyut qora jism va kulrang jismlar uchun Stefan — Bolsman qonunini ifodalang.
6. Kirxgof qonunining aniqlanishini keltiring. Jismning qoralik darajasi nima? Uning yutish koeffitsiyenti bilan qanday bog'liqligi bor?
7. Lambert qonunini ifodalang va (12.14) hamda (12.15) tenglamalar tarkibini ochib tushuntiring.
8. Jismlar orasidagi nuriy issiqlik almashinishini qarang. Bir jismdan ikkinchisiga nurlanishida natijaviy oqim uchun hisoblash ifodasini keltiring. Keltirilgan qoralik darajasi nimaga teng, shu jumladan, bir jism ikkinchi jism ichida joylashgan hol uchun.
9. Nurlanish koeffitsiyenti aniqlanishini keltiring.
10. Jismlar orasidagi nuriy issiqlik almashinish jadalligini o'zgartirish usullarini keltiring. Ekran mavjud bo'lganda nuriy energiya oqimi kattaligi nimaga teng?
11. Issiqxonalardagi nurlanish oqimi zichligini aniqlash uchun qo'llaniladigan formulalarni tahlil qiling.
12. Hayvon tanasi va to'sin konstruksiyalari ichki sirti orasidagi nurlanish oqimini aniqlash uchun formulalarni keltiring va tenglamaning har bir a'zosi fizik ma'nosini tushuntiring.
13. Gazlar nurlanish xususiyatlarini ko'rsating. Gazlar nurlanish oqimi zichligi qanday hisoblanadi?
14. Himoyalangan tuproq inshootlarida tuproqdan to'sinlarga nurlanish oqimi zichligi qanday aniqlanadi?
15. Isitish asboblariidan tuproqqa nurlanish oqimi zichligi qanday hisoblab topiladi? Isitish asboblariidan to'sinlarga nurlanish oqimini aniqlash uchun ifodani hosil qiling.

XIII BOB. ISSIQLIK ALMASHINISH APPARATLARINING ISSIQLIK HISOBI ASOSLARI

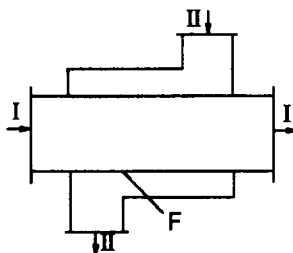
13.1. Turlanishi

Umumiy ma'lumotlar. Issiqlik almashinuv apparatida ikki yoki bir necha issiqlik tashuvchilar yoki issiqlik tashuvchi va qo'zg'almas qattiq jismlar (devor va boshqalar) orasida issiqlik almashinish amalga oshiriladi. Xususiy holdagi issiqlik almashinuvida tashuvchi vazifasini uni o'rab turuvchi muhit bajaradi. Issiqlik almashinuvchilar harakat prinsiplari, ishlatilishi, issiqlik tashuvchi harakatini tashkil etish usullari va boshqa belgilari bo'yicha turlarga bo'linadi.

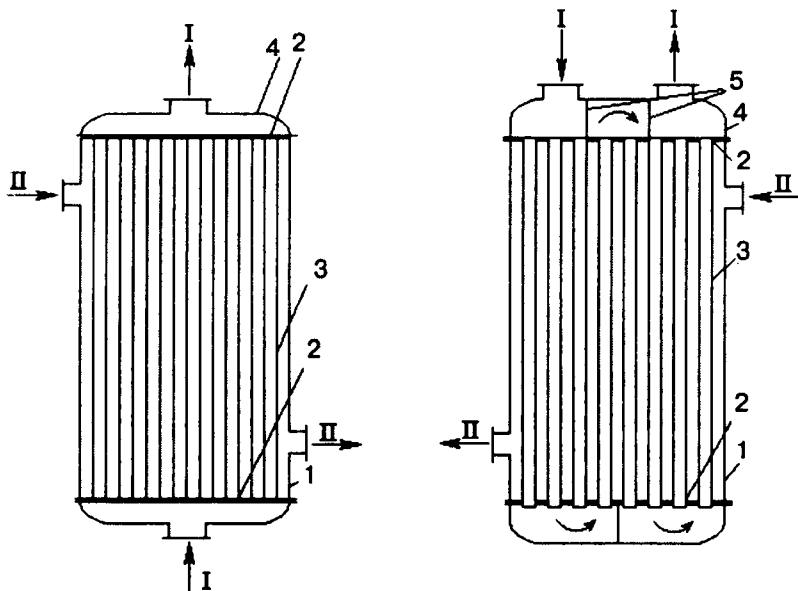
Aralashtirgichli issiqlik almashinuvchilar. Ushbu issiqlik almashinuvchilarda issiqlik uzatilishi issiqlik tashuvchilarning bevosita aralashuvi natijasida amalga oshiriladi. Bu apparatlar oddiy, ixcham va issiqlik tashuvchilarni bir-biridan keyinchalik ajratish kerak bo'lmagan hollarda (masalan, suvni suv bug'i qizdirish yoki qaynoq suv) ishlatiladi. Nihoyat, issiqxonani isitishda, shuningdek, binoni suvli isitish tizimida qozonxonadan yoki IEM dan olingan qaynoq suv iste'molchidan kelayotgan sovitilgan qaytish suvi bilan aralashtiriladi.

Rekuperativ (lat. recuperator — qayta olinadigan) issiqlik almash-tirgichlar. Bu turdagi issiqlik almash-tirgichlarda issiqlik uzatilishi qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga ajratuvchi devor orqali amalga oshiriladi.

Oddiy rekuperativ issiqlik alma-shinish apparati «quvur ichida quvur» turdagi bo'lishi mumkin (31.1- rasm). Unda issiqlik almashinish yuzasi sifatida ichki quvurning yon sirlari xizmat qiladi. Apparat afzalliklari — konstruksiyasi oddiyligi, kamchiliklari — issiqlik almashinish yuzasi katta bo'lganda u og'ir va beso'naqayligidir.



13.1- rasm. «Quvur ichida quvur» turidagi teskari oqimli issiqlik almashtirgich sxemasi:
*I va II issiqlik tashuvchilar;
F — issiqlik almashinish yuzasi.*



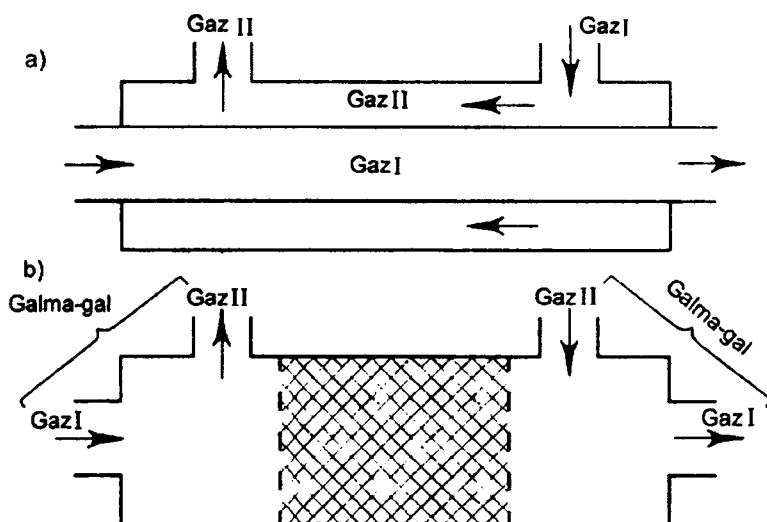
13.2- rasm. G'ilofli quvur turidagi issiqlik almashtirgich:
 chapda — bir yo'lakli; o'ngda — quvur muhitidagi ko'p yo'lakli;
 I va II — issiqlik tashuvchilar; 1 — korpus;
 2 — quvurli panjara; 3 — quvurlar;
 4 — qopqoq; 5 — oraliq to'siq.

«Quvur ichida quvur» turidagi issiqlik almashtirgichning kelgusi rivojida g'ilof quvurli issiqlik almashtirgich (13.2- rasm) paydo bo'ldi. Tashqi quvur (g'ilof) ga endi bir quvur emas, kichik diametrli quvurlar bog'lami joylashtirilgan, ularning oxiri quvur panjara (yuza) ga payvandlash yo'li bilan qotirilgan. Quvurli panjara apparat korpusi (g'ilof)ga payvandlangan va unga zichlovchi tagliklar orqali boltli bog'lanish yordamida qopqoqqa qotirilgan. Issiqlik almashtirgich issiqlik tashuvchining kirishi va chiqishi uchun shtuserlarga ega, issiqlik tashuvchining bittasi quvurlar orasidagi muhitda, boshqasi esa quvurlar ichida harakatlanadi. *Apparat afzalliklari:* ixcham, bitta apparatda issiqlik yuzasini ko'paytirish imkoni bor, foydalanishga qulay, texnologik tayyorlash osonligi. *Kamchiliklari:* quvurlar orasi muhitini tozalash qiyin. G'ilof quvurli issiqlik almashtirgichlar eng ko'p tarqalgan issiqlik almashinish apparati turiga kiradi.

Oxirgi yillarda **plastinkali rekuperativ issiqlik almashinuvchilar** keng ko'lamda ishlatilmoqda, ular ixchamligi, past gidravlik qarshilikligi va issiqlik yuzasini tozalash qulayligi bilan farq qiladi. Plastinkali issiqlik almashtirgichlarning solishtirma issiqlik

almashinish yuzasi $1500 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ga yetadi. Bir-biriga parallel joylashgan plastinalar to'liqinli kanallar tizimini hosil qiladi, kanallar eni 3...6 mm bo'lib, kanallar bo'ylab plastinkalarning ikkala tomonidan issiqlik tashuvchilar harakatlanadi. Plastinkalarni qavartirish oqimlar turbulizatsiyasining jadallashuviga olib keladi, bu esa yuqori issiqlik uzatish koeffitsiyenti ($3800 \text{ Vt}/(\text{m}^2\text{K})$) ni ta'minlaydi.

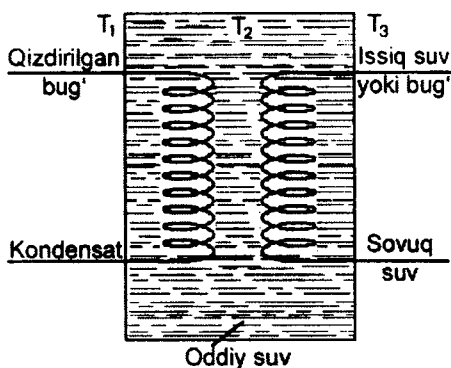
Regenerativ (lat. *regeneratio* — tiklanish) issiqlik almash-tirgichlar. Ushbu issiqlik almashtirgichlarda qaynoq va sovuq issiqlik tashuvchilar navbat bilan bitta issiqlik almashinuv yuzasini yuvib turadi (13.3- rasm b). Regenerativ issiqlik almashinuvida atmosferaga chiqarib yuborilayotgan gaz (yonish mahsuloti) tarkibidagi issiqlik miqdori yangidan kirayotgan gaz, bug', suv, yoqilg'i, yonilg'i va havo aralashmasini isitishda (siklga qaytarilayotgan issiqlik) qo'lla-niladi. Bu asbob **regenerator** deyiladi.



13.3. Rekuperator (a) va regenerator (b) larni solishtirish.

Regeneratorlarda ular devori sirtining harorati yuqori ($t > 1000^\circ\text{C}$) va oraliq issiqlik o'tkazuvchi material qalin bo'ladi. Oraliq devor sifatida og'ir metall listlar, o'tga chidamli g'isht, shlak, shag'al-dan foydalaniladi. Metall listlarning old qismiga issiqbardosh (shamot, magnezit) g'ishtar terib chiqiladi. Issiq gaz oqimi avval issiqbardosh g'ishtlarga asosiy issiqlik miqdorini beradi, so'ngra atmosferaga yoki boshqa issiqlik almashtirgichga yo'naltiradi. G'ishtdagi issiqlik metall listga, u esa suyuqlikka issiqlikni uzatadi. Oraliq issiqlik tashuvchi muhit qattiq devor, suyuqlik yoki bug' bo'lishi mumkin.

Atom reaktorining birinchi berk konturida issiqlikni tashuvchi (sovitkich-kondensator) sifatida og'ir suv ishlatiladi (13.4- rasm), uning faol zonasidagi issiqlik suv yordamida tashqariga chiqariladi. Bunday issiqlik almashtirgichlar **oraliq issiqlik tashuvchi issiqlik almashtirgichlar** deyiladi.



13.4- rasm. **Oraliq issiqlik tashuvchili issiqlik almashtirgich.**

suv — qattiq devor (II) — suv ketma-ketligidagi rekuperativ issiqlik almashinuvi yuz beradi.

Rekuperator va regeneratlarning ishlash tartibi bir-biriga o'xshaydi. Rekuperator sirtining harorati past ($t < 200...250\text{ }^{\circ}\text{C}$) va isituvchi bilan isuvchi moddalar o'rtasida yupqa devor bo'ladi. Rekuperatorga avtomobil va traktor radiatorini spiralsimon quvurini, bir-birining ichiga joylashtirilgan quvur g'ilofli naychalar dastasini misol qilib ko'rsatish mumkin.

Ichki issiqlik manbali issiqlik almashtirgichlar. Ushbu issiqlik almashtirgichlarda sovuq issiqlik tashuvchilarni qizdirish apparat ichida issiqlik ajratish yordamida, masalan, elektr qizdirgichlar yoki yuqori yoki o'ta yuqori chastotali tok generatorlari hisobidan amalga oshiriladi. Masalan, qishloq xo'jalik ishlab chiqarishida har xil quvvatli uzluksiz ishlovchi elektr qizdirgichlar qo'llaniladi.

13.2. Rekuperativ issiqlik almashtirgich hisobi

Issiqlik almashtirgichlar uchun **to'g'ri (konstruktiv)** va **teskari (tekshiruv)** hisoblashlar farqlanadi. **Konstruktiv** hisoblashda, odatda, ma'lum bo'lgan ko'rsatkichlar: qizdiriladigan issiqlik tashuvchining sarfi, ikkala issiqlik tashuvchi boshlang'ich va oxirgi haroratlari.

Hisoblash jarayonida issiqlik almashtirgich turi tanlanadi va uning issiqlik quvvati, qaynoq issiqlik tashuvchi sarfi va issiqlik almashinish yuzasi aniqlanadi, shu orqali apparat o'lcamlari tanlanadi. Tekshiruv hisobida issiqlik almashtirgich turi va o'lcamlari ma'lum, demakki, issiqlik almashinish yuzasi, issiqlik tashuvchilar sarfi, ularning boshlang'ich harorati, solishtirma issiqlik sig'imi va issiqlik uzatish koeffitsiyentlari ham ma'lum. Talab qilinadigan aniqlanuvchilar — apparat issiqlik quvvati va issiqlik tashuvchilarning oxirgi harorati, ya'ni bor bo'lgan ma'lum issiqlik almashtirgichning aniq sharoitlarga qo'llanuvchanligini tekshirish. Issiqlik almashinuvi asboblari hisoblashda issiqlik muvozanati tenglamasi asosiy hisoblanadi. Issiqlik muvozanati tenglamasini tizim entalpiyasining o'zgarishi orqali quyidagi formula yordamida ifodalash mumkin, W:

$$Q_1 = m (h_1 - h_2) = m(c_{p1}^I \cdot t_1 - c_{p2}^{II} \cdot t_2). \quad (13.1)$$

Bunda: Q_1 — tizimga keltirilgan to'liq issiqlik oqimi W; m — issiqlik eltuvchi massaning sarfi, kg/c; c_{p1}^I va c_{p2}^{II} — o'zgarmas bosim ostida issiqlik eltuvchi moddaning mos ravishda t_1 va t_2 haroratlardagi issiqlik sig'imi, kJ/(kg·K) ; h_1 , h_2 — apparatga kirayotgan va undan chiqayotgan issiqlik tashuvchining mos ravishdagi entalpiyalari, kJ/kg.

Issiqlik isrofi e'tiborga olinganda keltirilgan issiqlik miqdorining ikkinchi qismiga o'tgan ulushini asbobning foydali ish koeffitsiyenti (FIK) orqali ifodalash mumkin:

$$Q = \eta \cdot Q_1. \quad (13.2)$$

Bunda: Q — sovuq issiqlik tashuvchi qabul qiladigan issiqlik oqimi, W;

η — asbobning FIK.

Issiqlik almashtirgichning turg'un tartibli ishida konstruktiv hisob uchun hisoblash bog'liqliklarini ko'rib chiqamiz. Sovuq issiqlik tashuvchi qabul qiladigan issiqlik oqimi apparatga kirish va undan chiqishdagi entalpiyalar farqi orqali aniqlanadi, W:

$$Q = m_2 c_{p2} (t_{20} - t_{1b}) = m_2 (h_{20} - h_{2b}). \quad (13.3)$$

Bunda: m_2 — sovuq issiqlik tashuvchining massaviy sarfi kg/s; s_{r2} — sovuq issiqlik tashuvchining $t_{2b} \dots t_{20}$ haroratlari oralig'idagi o'rtacha solishtirma issiqlik sig'imi, kJ/(kg·K); $t_{2b} \dots t_{20}$ — sovuq issiqlik tashuvchining apparatga kirish va chiqishdagi harorati, K; h_{2b} , h_{20} — sovuq issiqlik tashuvchining apparatga kirish va chiqishdagi entalpiyasi, kJ/kg.

Qaynoq issiqlik tashuvchidan uzatiladigan umumiy issiqlik oqimi (atrof-muhitga issiqlik yo'qolishlari hisobi bilan) quyidagicha bo'ladi, W :

$$Q_o = CQ. \quad (13.4)$$

Bunda: $C = 1,05 \dots 1,12$ — issiqlikni atrof-muhitga yo'qolishini hisobga oluvchi koeffitsiyent.

Qaynoq issiqlik tashuvchi sarfini uning agregat holati o'zgarish ekanligi hisobidan olib, ushbu tenglamadan topamiz:

$$Q_o = m_1 c_{p1} (t_{1\delta} - t_{10}) = m_1 (h_{1\delta} - h_{10}). \quad (13.5)$$

Bundan:

$$m_1 = \frac{Q_o}{c_{p1}(t_{1\delta} - t_{10})}, \quad (13.6)$$

ya'ni, Q_o issiqlik oqimi ma'lum bo'lsa, (13.6) tenglamadan Q_o issiqlik oqimini uzatish uchun kerak bo'ladigan issiqlik tashuvchining sarfi m , (kg/s) ni hisoblab topishimiz mumkin.

Q issiqlik oqimini qaynoq issiqlik tashuvchidan sovuq issiqlik tashuvchiga uzatish uchun kerak bo'ladigan issiqlik almashinish yuzasi F issiqlik uzatish tenglamasi (8.45) dan topiladi:

$$Q = k (t_{c1} - t_{c2}) F.$$

Umumiy holda issiqlik uzatish koeffitsiyenti k va issiqlik tashuvchilar haroratlari farqi $(t_{c1} - t_{c2})$ issiqlik almashinish bo'ylama yuzasi bo'yicha o'zgaradi, shuning uchun tenglama faqat differensial kichik element yuzasi dF uchun o'rinli:

$$dQ = k (t_{c1} - t_{c2}) dF = k \Delta t_{o\gamma} dF. \quad (13.7)$$

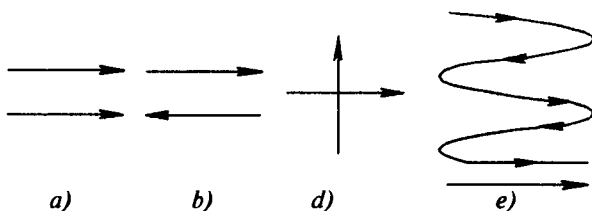
bunda $\Delta t_{o\gamma} = t_{c1} - t_{c2}$.

Umumiy issiqlik oqimi uchun ifoda olish uchun (13.7) tenglamani 0 dan F gacha integrallaymiz:

$$Q = \int_0^F k \Delta t dF = k \int_0^F k \Delta t dF = k \Delta t_{ypm} F. \quad (13.8)$$

Bunda: k , $\Delta t_{o\gamma}$ — issiqlik uzatish koeffitsiyenti va jami issiqlik tashuvchilar haroratlari farqining issiqlik almashinish yuzasi bo'yicha o'rtacha qiymati, mos holda $W/(m^2K)$ va K .

Haroratlar farqining issiqlik almashinishi yuzasi bo'yicha o'zgarish xarakteri issiqlik tashuvchilarning harakat sxemalariga bog'liq bo'lib, ularning turlari: to'g'ri oqimli, qarshi oqimli, oqimlar kesishuvi, aralash oqimli bo'ladi (13.5- rasm):



13.5- *rasm. Issiqlik tashuvchilar harakatlari sxemasi: a—to'g'ri oqimli; b—qarshi oqimli; d—oqimlar kesishuvi; e—aralash oqimli.*

Issiqlik almashgichni konstruktiv hisobida issiqlik almashinishi yuzasi (13.8) tenglamadan aniqlanadi:

$$F = Q / (k \Delta t_{o,r}). \quad (13.9)$$

(13.9) bo'yicha issiqlik almashgich hisobi uchun o'rtacha harorat farqi Δt ni bilish kerak. 13.6- rasmda joriy haroratlar farqining o'zgarishi $\Delta t_{o,r} = t_1 - t_2$ (harorat tushishi) issiqlik almashinish yuzasi bo'yicha to'g'ri va qarshi oqimli hollar uchun ko'rsatilgan.

To'g'ri va teskari oqimli sxemalarning sonli tahlili shuni ko'rsatadiki, bir xil boshlang'ich shartlarda qarshi oqimli sxema sovuq issiqlik tashuvchini to'g'ri oqimliga nisbatan yuqoriroq haroratgacha qizdirish imkoniyatini beradi (to'g'ri oqim 13.6- rasm ko'rsatilgandek, sovuq issiqlik tashuvchining qaynoq issiqlik tashuvchidan yuqori bo'la olmaydi). Bundan tashqari qarshi oqimda haroratlarning o'rtacha farqi to'g'ri oqimdagidan yuqoriligi issiqlik almashinish yuzasini kerakligicha kichikroq qilish imkonini beradi va oqibatda, ixchamroq issiqlik almashgich yaratiladi. To'g'ri oqimli sxemali qizdirishning sekinroq tartibini ta'minlaydi, bu esa termolabil mahsulotlar uchun ayni muddao. Amaliyotda ko'pincha issiqlik tashuvchining qarshi oqimli sxemasi qo'llaniladi.

Boshlanishida to'g'ri oqimli sxemani ko'rib chiqib, issiqlik tashuvchining har xil sxemalarida haroratlar o'rtacha farqini hisoblash uchun bog'liqliklarni aniqlaymiz.

A elementar yuzani ajratamiz, uning issiqlik muvozanat tenglamasi:

$$dQ = -m_1 c_{p1} dt_1 = m_2 c_{p2} dt_2 \quad (13.10)$$

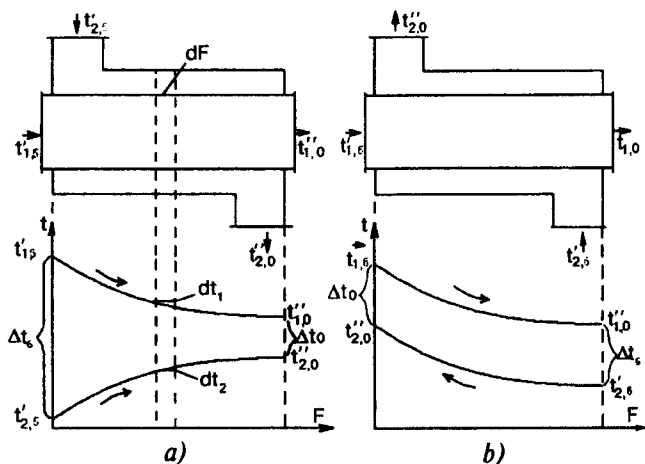
$$\text{Bundan:} \quad dt = -dQ / (m_1 c_{p1}) = -dQ / c_1, \quad (13.11)$$

$$\text{Bunda:} \quad dt_2 = -dQ / (m_2 c_{p2}) = -dQ / c_2$$

$$c_2 = t_1 c_{p1}, \quad c_2 = m_2 c_{p2}. \quad (13.12)$$

Yuza elementida harorat bosimi o'zgarishi quyidagicha bo'ladi:

$$d\Delta t = d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2 = -dQ / c_1 - dQ / c_2 = b dQ. \quad (13.13)$$



13.6- rasm. Harorat tushishi o'zgarish xarakteri:
 a—to'g'ri oqimda; b—qarshi oqimda.

Bunda: $b = 1/c_1 + 1/c_2$; $\Delta t = (t_1 - t_2)$.

Issqlik uzatish tenglamasi (13.7) dan dF ni (13.13) ga qo'yib, quyidagi ifodani topamiz:

$$d\Delta t = -bk\Delta t dF. \quad (13.14)$$

(13.14) dagi o'zgaruvchilar ajratib olingan ifodani Δt_b dan Δt_0 va 0 dan F oraliqlarida integrallaymiz (Δt_b – issqlik almashinish yuzasi boshlanishidagi harorat bosimi, Δt_0 – oxiridagisi):

$$S \int_{\Delta t_0}^{\Delta t_b} \frac{d\Delta t}{\Delta t} = -bF;$$

$$\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_0} = -bkF;$$

$$b = \ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_0} / kF. \quad (13.15)$$

Endi (13.13) tenglamani Δt_b dan Δt_0 gacha va 0 dan F gacha integrallasak, quyidagi tenglama kelib chiqadi:

$$S \int_{t_0}^{\Delta t_b} \frac{d\Delta t}{\Delta t} = -b \int_0^F dQ.$$

$$\text{Bundan: } Q = \frac{1}{b}(\Delta t_b - \Delta t_0). \quad (13.16)$$

(13.16) ga b ning qiymatini (13.15) dan olib qo'yib, yozamiz:

$$Q = k \frac{\Delta t_b - \Delta t_0}{\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_0}} F. \quad (13.17)$$

(13.8) va (13.17) larni taqqoslash shuni ko'rsatadiki, to'g'ri oqimda issiq tashuvchilar haroratlari o'rtacha farqi ularning issiqlik almashinishi yuzasi boshi va oxiri qiymatlaridan o'rtacha arifmetik kattalik sifatida topilishi kerak:

$$\Delta t_{o'r} = \frac{\Delta t_b - \Delta t_0}{\ln \frac{\Delta t_b}{\Delta t_0}}. \quad (13.18)$$

Xuddi shunday o'rin almashtirishlar bilan ko'rsatish mumkinki, (13.18) formula qarshi oqimli hol uchun ham o'rinli. Kesishuvchi va aralash oqimlarda harorat o'rtacha farqi qarshi oqimli $\Delta t_{o'r}$ uchun topiladi, bunda issiqlik tashuvchilar konkret harakat sxemasiga $\varepsilon \Delta t$ tuzatish kiritiladi:

$$\Delta t_{o'r} = \Delta t_{o'r,q.o} \varepsilon \Delta t. \quad (13.19)$$

Tekshiruv hisobi amaliyoti, to'g'ri hisobdan farqli o'laroq, murakkab bo'ladiki, chunki issiqlik tashuvchi oxirgi haroratlari haqida axborot yetishmasligi issiqlik tashuvchilar parametrlari, odatda, apparatdagi o'rtacha harorati bo'yicha tanlanadi. Shuning uchun berilgan hol uchun qoida bo'yicha inersiya usulidan foydalaniladi.

13.3. Issiqlik uzatish jarayonlarining jadallashtirish usullari

Issiqlik almashinish apparatlari sanoatning turli sohalarida va qishloq xo'jaligida keng ishlatilishi ular konstruksiyasini to'xtovsiz takomillashtirishni talab qiladi. Apparatlar ixchamligi imkoniyatini beradigan asosiy usullardan biri issiqlik uzatishni jadallashtirishdir, buni issiqlik tashuvchilar haroratlari farqini oshirish hisobiga, yoki issiqlik uzatish koeffitsiyentini oshirish hisobiga amalga oshirish mumkin. Birinchi usulni ko'pincha texnologik nuqtai nazardan qabul qilish mumkin, shu sababli ikkinchi usul ushbu masalani yechish uchun asosiy bo'lib qoladi.

Issiqlik uzatish koeffitsiyenti K tenglama (8.43) da har doim α_1 , α_2 , λ/δ qiymatlarining kichik qiymatlarida kichik, shu sababli K koeffitsiyent qiymatini oshirish uchun issiqlik qarshiliklari: $R_{a1} = 1/\alpha_1$;

$R=1/\alpha_2$, $R_\lambda=\delta/\lambda$ ni kamaytirish zarur, chunki boshqa turdagi issiqlik qarshiliklar qiymati kamayishi K koeffitsiyentning ahamiyatli oshishiga olib kelmaydi. Konvektiv issiqlik almashinishda issiqlik qarshiligini kamaytirish issiqlik tashuvchi tezligini oshirish, oqim turbulentlik darajasini oshirish, issiqlik tashuvchi tegadigan yuzani qovurg'alash hisobiga amalga oshiriladi.

Issiqlik almashinishni jadallashtirishning samarali usullari bo'lib: quvur sirtida oqimni sun'iy turbulizatsiyalash (masalan, qovurg'alarda chulg'am o'ramlar hisobiga, issiqlik almashuvchi qovurg'alarini davriy nisbiy siljitish, qovurg'alarga ko'ndalang do'ngliklar va chulg'am yopishtirish hisobiga).

Oval qovurg'alar ichida oqimni uyurmali aylantirish, quvurlar va simlar dastasini oqimning ko'ndalang yuvishini amalga oshirish;

Quvurlar dastasini ko'ndalang yuvishda chegara qatlamni boshqariluvchi ajratib olish uchun ularda maxsus turbulizatorlar yaratish.

Issiqlik almashinish koeffitsiyentlari gazlar uchun bir xil sharoitlarda suyuqlikka nisbatan ikki tartibli kamroq, shuning uchun «gaz-suyuqlik» issiqlik tashuvchili issiqlik almashinish holida gaz muhitga qaragan devor yuzasi tomonidagi issiqlik almashinish jadalligini oshirishga harakat qilinadi. Ushbu masalaning samarali yechimi bo'lib gaz oqimiga qaragan devor yuzasi qovurg'alanishi ham muhim. Bu issiqlik berishga issiqlik qarshiligini mos ravishda kamaytirish imkonini beradi. Qovurg'alangan issiqlik almashinish yuzasiga misol qilib isitish radiatorlarini, shu bilan birga avtomobillar sovitish tizimini, ichki yonuv dvigatellari korpusining qovurg'alarini va boshqalarni keltirish mumkin.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. *Issiqlik almashinish apparatlari turlarini ayting va ular ishlashini tushuntiring.*
2. *Rekuperativ issiqlik almashgichlarning qanday issiqlik hisoblash turlari mavjud? Hisoblash maqsadi nima?*
3. *Issiqlik uzatish tenglamasining differensial va integral shakllarini yozing.*
4. *Rekuperativ issiqlik almashgichda issiqlik oqimi hisobi uchun formulani yozing.*
5. *O'rtacha harorat farqi nima va u qanday hisoblanadi?*
6. *Amaliyotda issiqlik tashuvchilarning qanday harakat sxemalari uchraydi?*
7. *Issiqlik tashuvchilarning to'g'ri oqim va qarshi oqimli harakat sxemalarini solishtirish tahlilini bering.*
8. *Issiqlik almashinish apparatlarida issiqlik uzatish jarayonlarini jadallashtirishning qanday usullari mavjud?*

XIV BOB. IKKI KOMPONENTLI MUHITDA ISSIQLIK-MASSA ALMASHINUVI

14.1. Asosiy tushunchalar va aniqliklar

Sanoatda va qishloq xo'jaligi ishlab chiqarishida turli massa almashinish jarayonlari keng tarqalgan: quritish, absorbsiya, adsorbsiya, ekstraktsiya, distillyatsiya, erish, havoni konditsionirlash.

Har qanday muhit (qattiq, suyuq, gaz) elementar zarralardan tashkil topgan va zarralar bir turli (masalan, molekula), yoki turli xil aralashmalar (har xil kimyoviy tabiatli) bo'lishi mumkin. **Muhit komponenti** deb, har qanday kimyoviy individual moddaga aytiladi. Bir jinsli bo'lmagan issiqlik dinamik tizimning ajratish yuzasi bilan chegaralangan qismi **faza** deyiladi.

Faza uning komponentlarini hajm bo'yicha bir tekis yoki notekis taqsimlanishi bilan tavsiflanishi mumkin. Izobarik-izotermik sharoitlarda komponentlarning muhit hajmi bo'yicha teng taqsimlanishi potensial ta'sirida ro'yobga chiqadi.

Kimyoviy potensial deb, tizimning qaralayotgan fazasida berilgan komponent massasining bir birlikka oshishidan ichki energiyaning o'sishiga aytiladi, bunda entropiya, hajm va massa fazaning qolgan barcha komponentlari uchun o'zgarmas bo'lib qoladi. Bir fazali muhitda komponentlar notekis taqsimlangan bo'lsa, kimyoviy potensial maydoni bir jinsli emas va muhitda alohida komponentlar konsentratsiyalari o'z-o'zidan taqsimlanish jarayonlari paydo bo'la boshlanadi.

Massa almashinuvi deb, bir jinsli bo'lmagan kimyoviy potensial maydonli fazoda berilgan komponent massasining (oddiy holda konsentratsiyaning bir jinsli bo'lmagan maydoni yoki shu komponentning parsial bosimi) o'z-o'zidan qaytmas jarayon bo'yicha ko'chishiga aytiladi.

Massa ko'chishi bitta faza oralig'ida yoki bir fazadan boshqasiga ko'chishida sodir bo'ladi. Ajratuvchi yuza yoki ikki modda orasidagi o'tkazuvchan devor orqali yoki fazalar orasida massa almashinuvi **massa uzatish** deyiladi. Massa uzatilishida bir fazadan boshqasiga o'tuvchi modda **taqsimlangan modda** yoki **maqsadli komponent** nomi bilan ataladi. Massa almashinuvida ishtirok etadigan fazalarni ajratadigan yuzasi **massa almashinuvi yuzasi** deyiladi.

Massa almashinuvi jadalligi ifodasi uchun massa oqimi va massa oqimi zichligi tushunchalari qo'llaniladi. Aralashmada berilgan komponent massasi oqimi deganda, uning vaqt birligida ixtiyoriy yuzadan o'tayotgan massasi tushuniladi. Agar modda massasi kg da, vaqt sekunda ifodalansa, massa oqimi o'lchov birligi kg/s bo'ladi. Yuzaning birlik maydoniga keltirilgan massa oqimi **massa oqimi zichligi** deyiladi. Modda massasi kg da, vaqt s da, oqim o'tadigan yuza maydoni m^2 da ifodalansa, massa oqimi zichligi o'lchov birligi $kg/(m^2 \cdot s)$ bo'ladi. Massa oqimi va massa oqimi zichligi ham skalyar, ham vektor shaklida ifodalanishi mumkin. Massa **oqimi zichligi vektori** vektor sifatida uning proyeksiyasi ixtiyoriy yo'nalishda olingan joydagi massa oqimi zichligi bo'lib, tanlangan yo'nalishga perpendikulyar yuza orqali o'tadi.

Muhitdagi komponentlar konsentratsiyalarining oniy qiymatlari yig'indisi **konsentratsiyalangan maydon** deyiladi: $C = C(x, y, z)$. U bir jinsli bo'lishi mumkin [ko'rilyotgan vaqt momentida komponent konsentratsiyasi faza hajmi bo'yicha o'zgarmas: $C(x, y, z)|_t = \text{const}$] va aksincha, bir jinsli bo'lmagan [$C(x, y, z)|_t = \text{var}$], shu bilan birga turg'un (vaqt birligida o'zgarmas) yoki turg'un bo'lmagan (vaqt birligida o'zgaruvchan). Bir jinsli bo'lmagan bir xil konsentratsiyaga ega maydondagi nuqtalar yig'indisi izokonsentratsiyalashgan yuzani tashkil qiladi.

Massa almashinuvi jarayonlari ta'riflanishi ko'p jihatdan issiqlik almashinish jarayonlari ta'riflanishi bilan o'xshash bo'ladi. Bu o'xshashlik, ayniqsa, massa ko'chishida harakatlantiruvchi kuch sifatida kimyoviy potensial qabul qilinganda to'la bo'ladi. Biroq kimyoviy potensialning harakatlantiruvchi kuch sifatida ishlatilishi amaliyotda noqulay, chunki qoida bo'yicha uni to'g'ridan-to'g'ri o'lchash mumkin emas. Shuning uchun amaliy hisoblarda harakatlantiruvchi kuchni, odatda, taqsimlangan modda konsentratsiyasi farqi yoki gradiyenti orqali ifodalanadi, bu issiqlik va massa almashinuvi ta'riflanishida katta farqlarni keltirib chiqaradi.

14.2. Diffuziya va issiqlik o'tkazuvchanlik

Mikrozarralar issiqlik harakatlari shartidan aralashmadagi modda ko'chishi (masalan, molekulalar) **molekulyar diffuziya** deyiladi. U qattiq, suyuq va gazli muhitlarda sodir bo'lishi mumkin. Aralashmada komponentlar konsentratsiyasining bir jinsli bo'lmagan taqsimlanishidan yuzaga keladigan molekulyar diffuziya **konsentratsiyalashgan diffuziya** deyiladi. Konsentratsiyalashgan diffuziyaning ta'riflanishi,

odatda, shunday qonunga asoslanadiki, unga ko'ra diffuziya-lanayotgan komponent massasi oqimi zichligi uning konsentratsiya gradiyentiga to'g'ri proporsional:

$$\vec{i} = -D \cdot \text{grad} C. \quad (14.1)$$

Bunda: $\vec{i}$ — massa oqimi zichligi vektori, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C — taqsimlangan komponent konsentratsiyasi, kg/m^3 .

Bir o'lchamli hollar uchun (massa ko'chishi faqat bitta koordinata bo'yicha) **konsentratsiyalashgan diffuziya qonuni** birinchi marta olim Fik tomonidan aniqlangan va shuning uchun uning nomi bilan aytiladi. Uch o'lchamli hollar (modda ko'chishi bir vaqtda uchala dekart koordinatalari bo'yicha amalga oshadi) Nernst tomonidan umumlashtirilgan va shuning uchun (14.1) formula Nernst qonuni deyiladi.

Konsentratsiya gradiyenti deganda shunday vektor tushuniladiki, u izokonsentratsiya yuzaga normal bo'yicha konsentratsiya oshish tomonga yo'nalgan va son jihatdan konsentratsiyaning shu yo'nalishi bo'yicha xususiy hosilasiga teng (14.1- rasm):

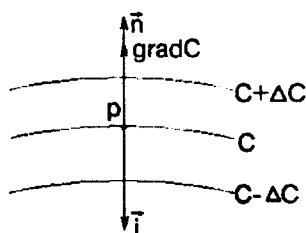
$$\text{grad} C = \frac{\partial C}{\partial n} \vec{n}. \quad (14.2)$$

Bunda: $\vec{i}$ — birlik vektor bo'lib, normal bo'yicha konsentratsiya oshish tomonga yo'nalgan. (14.1) tenglamadagi proporsionallik koeffitsiyenti **D molekulyar diffuziya koeffitsiyenti** yoki oddiy **diffuziya koeffitsiyenti** deyiladi. U m^2/s o'lchov vektorlar joylashishi birligiga ega va vaqt birligida birlik yuza orqali diffuzion oqim normal vektori bo'yicha konsentratsiya gradiyenti birga teng bo'lganda

o'tayotgan massa miqdorini aniqlaydi: $D = -\frac{\vec{i}}{\text{grad} C}.$

(14.1) tenglamadagi (-) belgisi $\text{grad} C$ va $\vec{i}$ vektorlarning har xil yo'nalganligini hisobga oladi.

(14.1) tenglamada yozilgan diffuziya qonuni issiqlik o'tkazuvchanlikning (8.2) tenglamadagi ifodalangan asosiy qonuniga (Furye qonuni) o'xshash bo'ladi, diffuziya koeffitsiyenti D esa issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti λ ga o'xshash. Xuddi shunday, (8.2) tenglamaga o'xshab, $\lambda = \text{const}$ holda issiqlik o'tkazuvchanlik differensial



14.1- rasm.

tenglamasi (8.12) ga mos keladi, xuddi shunday $D = \text{const}$ da (14.1) tenglamaga diffuziyaning differensial tenglamasi mos keladi, u o'xshashlik nazariyasi bo'yicha olinishi mumkin:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right). \quad (14.3)$$

Bunda: x, y, z — dekart koordinatalari; τ — vaqt.

(14.3) va (8.11), (8.12) tenglamalar solishtirilganda ularning o'xshashligi oydinlashadi, biroq to'liq o'xshashlik bo'lolmaydi: diffuziya differensial tenglamasi issiqlik o'tkazuvchanlik differensial tenglamasiga bir xillilik hajmiy issiqlik sig'imli materiallar uchun o'xshash, bu holda diffuziya koeffitsiyenti D issiqlik o'tkazuvchanlik λ ga o'xshash bo'lib, shu bilan birga materiallar harorat o'tkazuvchanligi a ga $C' = C\rho = 1$ da o'xshash. Bu to'liq bo'lmagan o'xshashlik shunday shartlashganki, (14.1), (14.3) tenglamalarda massa uzatish potentsiali sifatida harorat o'xshashi — kimyoviy potentsial emas, balki konsentratsiya qabul qilingan.

(14.3) ni u yoki bu real jarayonga javob beruvchi bir xillilik shartlariga mos holda integrallash $C = f(x, y, z, \tau)$ funksiyani beradi. Issiqlik o'tkazuvchanligi bo'lgani uchun bir xillilik shartlari quyidagilar: fizik, geometrik, boshlang'ich va chegaraviy shartlar, qaysiki issiqlik o'tkazuvchanlik nazariyasiga o'xshash berilgan bo'lishi mumkin. Kapilyar-g'ovak va kolloid kapilyar-g'ovak materiallarda (kolloid-kapilyar-g'ovak materiallarga o'simliklar ham kiradi) massa ko'chishi umumiy holda har xil mexanizmlar ta'siri hisobida amalga oshadi.

Quritishda qattiq fazoda massa ko'chishi murakkab jarayonini shartli ravishda soddalashtirib, pastulatga aylantiriladi, u massa o'tkazuvchanlik tenglamasi bilan yoziladi, bunda molekulyar diffuziya tenglamasi (14.1) ga o'xshash:

$$i = -a_m \text{grad} C. \quad (14.4)$$

Bunda: a_m — massa o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti (namlik diffuziya koeffitsiyenti deb ham ataladi), u molekula diffuziya koeffitsiyentiga o'xshash bo'ladi, m^2/s .

(14.1) tenglama adsorbsiya va ekstraktsiyalashda qattiq fazoda massa o'tkazuvchanlikni ifodalashda ham qo'llaniladi.

Adsorbsiya — qattiq g'ovak materiallarning gazlar va bug'larni yutishi.

Ekstraksiyalash — kerakli komponentni materialdan erituvchilar yordamida ajratib olish.

(14.1) tenglamadagi proporsionallik koeffitsiyenti *diffuziyaning samarali koeffitsiyenti* D , deyiladi, u molekulyar diffuziya koeffitsiyentiga va qattiq faza g'ovak tuzilishi tavsiflariga bog'liq.

14.3. Massa va issiqlik berish

Harakatlanuvchi muhitda massa ko'chishi bir vaqtda konveksiya (muhitning harakati hisobiga) va diffuziya hodisalari bilan amalga oshadi. Konvektiv massa ko'chishi va molekulyar diffuziyalarning birgalikdagi ta'siridan massa almashinish *konvektiv massa almashinish* nomi bilan ataladi.

Amaliy masalalarda suyuq yoki qattiq yuzalar va o'rab turuvchi muhit orasida konvektiv massa almashinuvi katta ahamiyatga ega. Issiqlik berishga o'xshashlikdan, konvektiv massa almashinuvning harakatlanuvchi muhit va boshqa muhit (qattiq jism, suyuqlik yoki gaz) bilan ajratuvchi yuzasi orasida ishtiroki *massa berish* deyiladi.

Massa berishni son jihatdan yozish uchun *massa berish qonuni* (*Shukarev qonuni*) qo'llaniladi:

$$i = \beta(C_{yu} - C_m). \quad (14.5)$$

Bunda: i — massa oqimi zichligining faza ajratish yuzasidan oqim yadrosiga berilishi (yoki aksincha), $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C_{yu}, C_m — mos ravishda, taqsimlanadigan moddaning faza ajratish yuzasidagi va oqim (muhit) yadrosidagi konsentratsiyasi, kg/m^3 (14.2- rasm).

(14.5) tenglama bo'yicha hisoblashlarda $(C_{yu} - C_m)$ farq har doim modulda olinadi. (14.5) tenglamadagi proporsionallik koeffitsiyenti β *massa almashinish koeffitsiyenti* deb ataladi, uning o'lchov birligi m/s va u fazolar kontraktida vaqt birligida yuza birligi orqali konsentratsiyalar farqi $(C_{yu} - C_m)$ birga teng bo'lganda oqib o'tadigan massani ifodalaydi: $\beta = i/(C_{yu} - C_m)$.

(14.5) massa berish tenglamasi issiqlik berish tenglamasi (10.1) ga o'xshash bo'lib, massa almashinuv koeffitsiyenti α ga o'xshash bo'ladi. Massa almashinuv koeffitsiyenti β ga teskari kattalik *chegara qatlami diffuzion qarshiligi* deyiladi: $R_\beta = 1/\beta$.

Gaz fazasida massa berishda, ideal gaz holati qonunini qo'llab,

mos ravishda $C = \rho/(RT)$. ($c = \frac{m}{v}$), (14.5) tenglamani quyidagi ko'rinishga keltirish mumkin:

$$i = \beta(P_{yu}/RT - P_m/RT) = \frac{\beta}{RT}(P_{yu} - P_m) = \beta_p(P_{yu} - P_m). \quad (14.6)$$

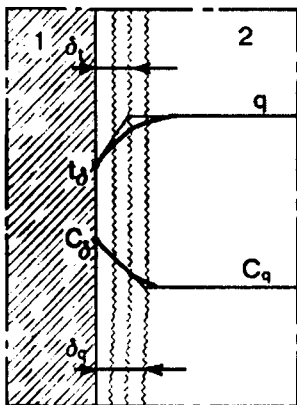
Bunda: R_y, R_m — taqsimlanadigan komponentning fazalar ajralish yuzasi va oqim yadrosidagi parsial bosimlari, Pa; R — gaz doimiysi,

$J/(kg \cdot K)$; $\beta p = \frac{\beta}{RT}$ — massa almashinuvi koeffitsiyenti bo'lib, parsial bosimlar farqi ($R_y - R_m$) ga nisbatan olinadi, $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$.

(14.6) tenglamani birinchi bo'lib E.Dalton 1788- yilda keltirib chiqargan.

Massa almashinish yuzasining harakatlanuvchi muhit bilan yuvilishida harakatlanuvchi muhit gidrodinamik va issiqlik bilan birgalikda diffuzion chegara qatlam shakllanadi, uning chegarasida taqsimlanadigan komponent konsentratsiyasi o'zgarishi kuzatilib, uning qiymati massa almashinuv yuzasi C_y dan oqim yadrosigacha C_m o'zgaradi. Diffuzion chegara qatlam, unda muhit harakati to'xtagan, turbulentli pulsatsiyalar chegaralangan yoki ishtirok etmasa-da, massa berishga asosiy qarshilik ko'rsatadi.

Diffuzion qatlamda konsentratsiya gradiyenti qanchalik massa almashinuvi yuzasiga (quritish, sublimatsiya, suyuqlik erkin yuzasidan bug'lanish, desorbsiya, erish) yo'naltirilgan bo'lishi mumkin bo'lsa, shunchalik yuzadan teskariga yo'nalgan bo'ladi (kondensatsiya, absorbsiya, adsorbsiya, desublimatsiya).



14.2- rasm. Konvektiv quritishda quriyotgan material yuzasida bug' va harorat konsentratsiyalari taqsimlanishi:

1—qattiq faza; 2—gaz fazasi; δ_p, δ_q — issiqlik va diffuzion chegara qatlamlari qalinliklari.

Absorbsiya — gaz va bug'larning suyuqlikda yutilishi. Issiqlik va massa almashinishda birgalikda kechadigan jarayonlarda u issiqlik chegara qatlamida harorat gradiyenti bilan yo'nalishi to'g'ri kelishi mumkin (kondensatsiya), yoki yo'q (suyuqlik erkin yuzasidan bug'lanish, konvektiv quritish).

(14.2) rasmda misol sifatida bug' konsentratsiyasi taqsimlanishi va konvektiv quritishda quritiladigan material yuzasidan harorat taqsimlanishi ko'rsatilgan; ushbu holda, rasmdan ko'rinib turibdiki, harorat va konsentratsiya gradiyentlari har tomonga yo'naltirilgan.

Erkin yuzadan bug'lanish, quritish, sublimatsiya va bug'-gaz aralashmasidan bug' kondensatsiyalanish jarayonlarida

massa almashinish yuzasi yarimo'tkazgich bo'ladi, ya'ni bug' uchun o'tkazuvchan va gaz uchun o'tkazuvchan emas. Chegara qatlam orqali bug' diffuziyasi qarshi uchrashuv gaz diffuziyasini keltirib chiqaradi (o'zaro diffuziya hodisasi). Chegara qatlamda bug'-gaz aralashmasi umumiy bosimi o'zgarmas: $\rho = \rho_b + \rho_g = \text{const}$ (ρ_b, ρ_g — bug' va gaz parsial bosimlari), gazning massa almashinuvi yuzasiga siljishini (bug'lanishda, quritishda, sublimatsiyada) yoki yuzadan ketishini (kondensatsiya, disublimatsiya) umumiy bug'-gaz aralashmasi konvektiv oqimi qoplashi kerak. Bu hodisaning nazariy tahlili quyidagi chegara qatlam orqali diffuzion oqim zichligi uchun quyidagi tenglamaga olib keladi:

$$\vec{i}_b = -D\rho/(\rho - \rho_b)\text{grad}S_b, \quad (14.7)$$

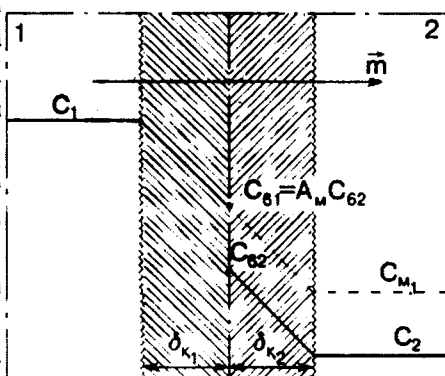
Bunda: $\vec{i}_b$ — bug' diffuzion oqimi zichligi vektori, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; ρ, ρ_b — bug'ning umumiy va parsial bosimlari, Pa. (14.7) tenglama **Stefan tenglamasi** deb ataladi, u birinchi marta ushbu tenglamani keltirib chiqaradi. Ko'paytma $\rho/(\rho - \rho_b)$ stefan oqimiga tuzatish beradi (bug'-gaz aralashmasi ko'ndalang oqimi).

14.4. Massa va issiqlik uzatilishi

Bir fazadan boshqasiga faza ajratish yuzasi orqali massa uzatilishini ko'rib chiqamiz (14.3- rasm).

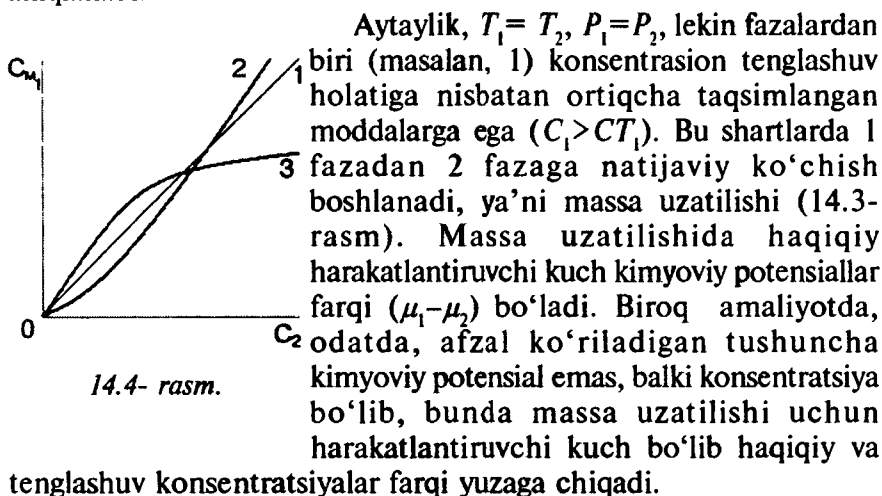
Ikkala faza ham ikki komponentli bo'lsin; oqim yadrosi birinchi fazasida taqsimlangan komponent konsentratsiyasi C_1 , oqim yadrosidagi ikkinchi fazasida esa C_2 . Issiqlik dinamikasi muvozanati holatida ko'rilayotgan tizimda komponentlar harorati, bosimi va kimyoviy potentsiali ikkala faza uchun teng: $T_1 = T_2$, $p_1 = p_2$, $\mu_1 = \mu_2$.

Bu holda taqsimlanadigan moddaning molekulari soni, 1 fazadan 2 fazaga o'tishda, shu oraliq vaqtida va shu fazalar kontakt yuzasi orqali orqaga qaytayotgan molekularlar soniga teng, ya'ni komponentlar natijaviy oqimi nolga teng.



14.3- rasm. Faza 1 dan faza 2 ga (qattiq fazasiz tizim, $C_1 > C_2$) massa uzatish sxemasi: δ_{k1} va δ_{k2} — birinchi va ikkinchi fazalarning chegara qatlamlari qalinliklari.

Fazalar fizik-kimyoviy xossalari har xilligidan fazalarda taqsimlanadigan komponentning tenglashgan konsentratsiyalari bu holda har xil, lekin aynan aniqlangan: har bir konsentratsiya C_1 ga o'zining to'g'ri keladigan tenglashgan konsentratsiyasi va aksincha, C_2 konsentratsiyaga mos keladigan tenglashgan konsentratsiya C_p , ya'ni $T, p = \text{const}$ va $C = \text{var}$ bo'lganda tenglashgan bog'liqlik bo'ladi (tenglashuvning konsentratsiya funksiyalari): $C_{T1} = f_1(C_2)_{T,p}$ va $C_{T2} = f_2(C_1)_{T,p}$. 14.4- rasmda misol sifatida ba'zi mumkin bo'lgan tenglashuv funksiyalari konfiguratsiyalari ko'rsatilgan. Tenglashuv funksiyalari ko'rinishi berilgan aniq tizim T va p qiymatlaridan aniqlanadi.



tenglashuv konsentratsiyalar farqi yuzaga chiqadi.

Massa uzatilishini ifodalash uchun **massa uzatilish tenglamasi** qo'llaniladi, unga ko'ra bir fazadan boshqa fazaga vaqt birligida uzatilayotgan modda miqdori fazalar ajratish yuzasi va boshqa fazadagi taqsimlangan modda konsentratsiya bo'yicha olingan konsentratsiyalar farqi (haqiqiy va tenglashuv)ga to'g'ri proporsional. Agar massa uzatilishida ikki faza ishtirok etsa, u holda massa uzatish tenglamasini birinchi yoki boshqa faza bo'yicha yozish mumkin, masalan, ($C_1 > C_{p2}$) bo'lganda:

$$m = iF = K_1(C_1 - C_{p1})F \quad (14.8)$$

yoki

$$m = iF = K_2(C_{p2} - C_2)F. \quad (14.9)$$

Bunda: m — faza 1 dan faza 2 ga fazalar ajratish yuzasi F orqali vaqt birligida uzatilayotgan taqsimlangan modda miqdori, kg/s; C_{p1} va C_{p2} — tenglashuv konsentratsiyalari.

Konsentrasiyalar farqi ($C_1 - C_{p1}$) va ($C_2 - C_2$) (14.8) va (14.9) tenglamalarda **massa uzatish harakatlantiruvchi kuchlari** deyiladi (mos holda birinchi va ikkinchi fazalarda), qaysiniki modullari bo'yicha olinadi (katta konsentratsiyadan kichigi olib tashlanadi). Proporsionallik koeffitsiyentlari K_1 va K_2 bu tenglamalar uchun **massa uzatilish koeffitsiyentlari** deyiladi: ular bir-biri bilan quyidagi nisbatda bog'langan:

$$K_1(C_1 - C_{p1}) = K(C_2 - C_2). \quad (14.10)$$

Massa uzatish koeffitsiyenti o'lchov birligi konsentratsiyani ifodalash usuliga bog'liq: agar konsentratsiya kg/m^3 o'lchamlarda ifodalansa, m esa — kg/s da, massa uzatilish koeffitsiyenti (m/s) o'lchov birligiga ega. Fizik nuqtai nazardan massa uzatilish koeffitsiyenti — vaqt birligida fazalar ajratish birlik yuzasi orqali massa uzatilish harakatlantiruvchi kuchi birga teng bo'lganda uzatilayotgan taqsimlangan komponent massasini ifodalaydi:

$$K_1 = i/(C_1 - C_{p1}); \quad K_2 = i/(C_2 - C_2).$$

14.5. Konvektiv massa — issiqlik almashinish differensial tenglamalari. Uchlamchi analogiya (o'xshashlik)

Konvektiv massa almashinuvi differensial tenglamasi harakatlantiruvchi muhitda massa ko'chishini ifodalaydi, u energiya differensial tenglamasiga o'xshash keltirib chiqariladi. Massa manbalari ishtirok etmaganda konvektiv massa almashinuvi tenglamasi $D = \text{const}$ bo'lganda quyidagi ko'rinishga ega:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + g_x \frac{\partial C}{\partial x} + g_y \frac{\partial C}{\partial y} + g_z \frac{\partial C}{\partial z} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right), \quad (14.11)$$

yoki

$$DC/d\tau = \Delta C. \quad (14.12)$$

Bunda: $\frac{DC}{d\tau} = \frac{\partial C}{\partial \tau} + g_x \frac{\partial C}{\partial x} + g_y \frac{\partial C}{\partial y} + g_z \frac{\partial C}{\partial z}$ — substansial hosila;

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \text{ — Laplas operatori.}$$

g_x, g_y, g_z — oqim tezligi tashkil etuvchilari, m/s .

(14.11) tenglamaning chap qismini birinchi hadi taqsimlangan modda konsentratsiyasi o'zgarishini ixtiyoriy x, y, z koordinatali

qo'zg'almas nuqtasida vaqt τ bo'yicha o'zgarishini tavsiflaydi; tezlikni tashkil etuvchilar tuslanuvchilar — konsentratsiyaning ko'rsatilgan nuqtadagi oqim harakati hisobiga o'zgarishi; tenglamaning o'ng qismidagi tuslanuvchilar molekulyar diffuziya ta'sirida konsentratsiya o'zgarishi. (14.11) tenglama umumiy shaklda yozilgan; xususi hollarda (bir o'lchamli harakat, molekulyar diffuziyaning ishtirokisiz va boshqalar) u o'ta oddiy ko'rinishga ega bo'ladi.

$\vartheta_x = \vartheta_y = \vartheta_z = 0$ bo'lganda (14.11) tenglama molekulyar diffuziya differensial tenglamasi (14.3) ga aylanadi.

(14.11) tenglamani mos holda bir xillilik shartlarida integrallasak, konsentratsiya qiymatlarini koordinata va vaqt funksiyalari sifatida beriladi: $C = C(x, y, z, \tau)$. Biroq bu yechim analitik ko'rinishda juda oddiy hollar uchun olinishi mumkin. Umumiy holda, bir jinsli bo'lmagan tezliklar maydonida (masalan, faza ajralish yuzasi yaqinida oqim harakati holatida) (14.11) tenglamani Nave-Stoks harakat tenglamasi, tezlik maydoni va uzluksizlik tenglamasi bilan birgalikda integrallash lozim, bu murakkab masalaga aylanadi. Shuning uchun konvektiv massa almashinuvining asosiy yo'li (konvektiv issiqlik almashinuvi singari) tajriba yo'li bo'lib, o'xshashlik nazariyasini jalb qilishi lozim. Bunday izlanishlar maqsadi, odatda, tajribadan kriterial bog'lanishlar keltirib chiqarish va massa almashinuv koeffitsiyentini hisoblashdan iborat.

Massa berishda faza ajratuvchi yuzadagi massa oqimi zichligini massa almashinuvi tenglamasi (14.5) va molekulyar diffuziya tenglamasi (14.1) orqali ifodalash mumkin:

$$i = \beta(C_{yu} - C_m) = -D\left(\frac{\partial C}{\partial n}\right)_{yu}. \quad (14.13)$$

(14.13) tenglamani o'xshashlik nazariyasi usullari yordamida o'zgartirib, Nusseltning massa almashinuv sonini olamiz:

$$Nu_D = \beta / \ell D. \quad (14.14)$$

Bunda: ℓ xarakterli o'lcham, m.

Konvektiv massa almashinuvi tenglamasi (14.11) ni tahlil qilib, Reynolds va Prandtl kriteriyalari (sonlari) ni massa almashinuvi uchun olamiz:

$$Re = g\ell / \nu \quad \text{va} \quad Pr_D = \nu / D.$$

Bunda: ν — kinematik quyushqoqlik, m^2/s .

Nu_D soni chegara qatlam diffuziya qarshiligi $R_D = \ell / D$ bilan massa berish qarshiligi $R_\beta = 1/\beta$ nisbatini ifodalaydi:

$$Nu_D = R_D / R_\beta.$$

Pr_m kriteriyasi massa berish uchun ahamiyatli bo'lgan muhit fizik xususiyatlarini tavsiflaydi. Massa almashinuvi Nusselt soni issiqlik almashinuv Nusselt soni $Nu_D = \alpha \ell / \lambda$ ga o'xshash bo'ladi; massa almashinuv Prandtl soni — issiqlik Prandtl soniga o'xshash: $Pr_D = \nu / a$. Chet el adabiyotlarida massa almashinuv Nusselt va Prandtl sonlari mos holda **Shervud soni** $Sh = (\beta \ell) / D$ va **Shmidt soni** $S_c = V / D$ deb ataladi.

Muhokama qilinadigan kriteriya sonlari ichida Nu_D aniqlanuvchi bo'ladi, u izlanayotgan kattalik — massa almashinuv koeffitsiyentini β ni o'z ichiga oladi, Re va Pr_D kriteriyalari — aniqlanuvchi, chunki ular masala shartida berilgan kattaliklardan tashkil topadi. Shuning uchun massa almashinuvi kriteriyal tenglamasi muhitning majburiy harakatida, odatda, quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$Nu_D = f(Re, Pr_D). \quad (14.16)$$

yoki qoida bo'yicha, darajali funksiya shaklida:

$$Nu_D = C Re^m, Pr_D^n). \quad (14.17)$$

Bunda: C, m, n — tajriba konstantalari.

Nu_D ni hisoblash uchun kriteriyal tenglamalar boshqa aniqlovchi kriteriyalarni ham olishi mumkin, ular borligi yoki yo'qligi masalaning aniq shartlariga bog'liq.

Konvektiv massa almashinuvi tenglamasi (14.11) ni energiya (10.4) va harakat (10.5) tenglamalari bilan birga qarab chiqib, ularning **uchlamchi o'xshashligi** topiladi.

Uchlamchi o'xshashlik nazariyasi hodisalar o'xshashligiga ko'ra agar ular bitta differensial tenglama bilan ifodalansa, bir xillilik o'xshashlik shartlariga ega bo'ladi. Shuning uchun vaqt momentlari o'xshashligidan va belgilangan uchlamchi o'xshashlikdan o'xshash konsentratsiyalar, haroratlar va tezliklar maydonlari bo'lishi kerak. Shunday ekan, konvektiv issiqlik almashinish kriterial tenglamasi (10.21) massa almashinuvi koeffitsiyenti β ni hisoblash uchun ishlatilishi mumkin, konvektiv massa almashinuvi kriteriyal tenglamasi — issiqlik almashinish koeffitsiyenti α ni hisoblash uchun, faqat konstantlarning bir xil sonli qiymatlari C, m, n bir xil issiqlik va massa almashinuvi sharoitlari uchun.

Tajribaviy o'lchashlar ko'rsatadiki, diffuzion, issiqlik va gidrodinamik chegara qatlamlar har xil qalinliklarga ega, konsentratsiyalar, haroratlar va tezliklar maydonlari ular uchun umumiy holda bir-

biriga o'xshash emas. Oqibatda faqat taqribiy uchlamchi o'xshashlik haqida gapirish mumkin. Bu taqribiylik shundayki, xususan, fizik ko'rsatkichlar D , λ , ν , a , c ning haroratga va konsentratsiyalarga bog'liqligi va yana qator boshqa sabablar bor.

Nazorat savollari va topshiriqlar

1. *Massa almashinuvi, massa uzatilishi, massa oqimi va massa oqimi zichligi, konsentratsiya maydoni, taqsimlangan modda, izokonsentrasyon yuza, massa almashinuvi yuzasi nima?*
2. *Konsentrasyon diffuziya qonunini ifodalang, uni issiqlik o'tkazuvchanlik asosiy qonuni bilan taqqoslang, diffuziya koeffitsiyenti fizik ma'nosini oching.*
3. *Diffuziya va issiqlik o'tkazuvchanlik jarayonlari o'zaro bog'lanishi nimada namoyon bo'ladi?*
4. *Massa berish qonunini ifodalang, uni issiqlik berish qonuni bilan taqqoslang, massa almashinuv koeffitsiyentining fizik ma'nosini oching.*
5. *Gaz fazasida massa berish uchun Dalton tenglamasini yozing; β va β_p koeffitsiyentlar orasidagi o'zaro bog'lanish qanday? Stéfanov oqimi nima, qachon va nima uchun u paydo bo'ladi? Diffuziya tenglamasini stefanov oqimi tuzatishi bilan yozing.*
6. *Izobarik-izotermik massa ko'chishi potentsiali nimadan iborat? Tenglashuv konsentratsiyasi bog'lanishi nima? Nima uchun massa almashinuvi harakat kuchini, odatda, konsentratsiya farqi (gradiyenti) orqali ifodalanadi?*
7. *Konvektiv massa-issiqlik almashinuvi, harorati tenglamasini yozing va ularni taqqoslang. Uchlamchi o'xshashlik nimadan iborat va nima uchun u taqribiy hisoblanadi?*
8. *Massa almashinuvi koeffitsiyenti qanday hisoblanadi? Nu_D va Pr_D kriteriyalarning fizik ma'nosini ayting.*

Gazlarning atomligi va molekulyar massasi

Ko'r-satkichlar	O ₂	H ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	NO ₂	CH ₂	Ar	H ₂ O	havo	NH ₃	SO ₂
Atomligi	2	2	2	2	3	5	3	4	1	2	3	4	3
Molekulyar massasi	32	2	28	28	44	16	64	17	40	18	29	17	64

2-jadval.

Kislorodning issiqlik sig'imi

Harorat, °C	Issiqlik sig'imi, kJ/kg·°C			
	massaviy		hajmiy	
	c_{m}	c_{m}	c'_{m}	c'_{m}
0	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	0,9353	0,6753	1,3352	0,9462
300	0,9500	0,6900	1,3561	0,9854
400	0,9651	0,7051	1,3775	1,0065
500	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	1,0157	0,7557	1,4479	1,0789
900	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1000	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1100	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1200	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1300	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396

Gazlarning molyar issiqlik sig'imi ($c = \text{conts uchun}$)

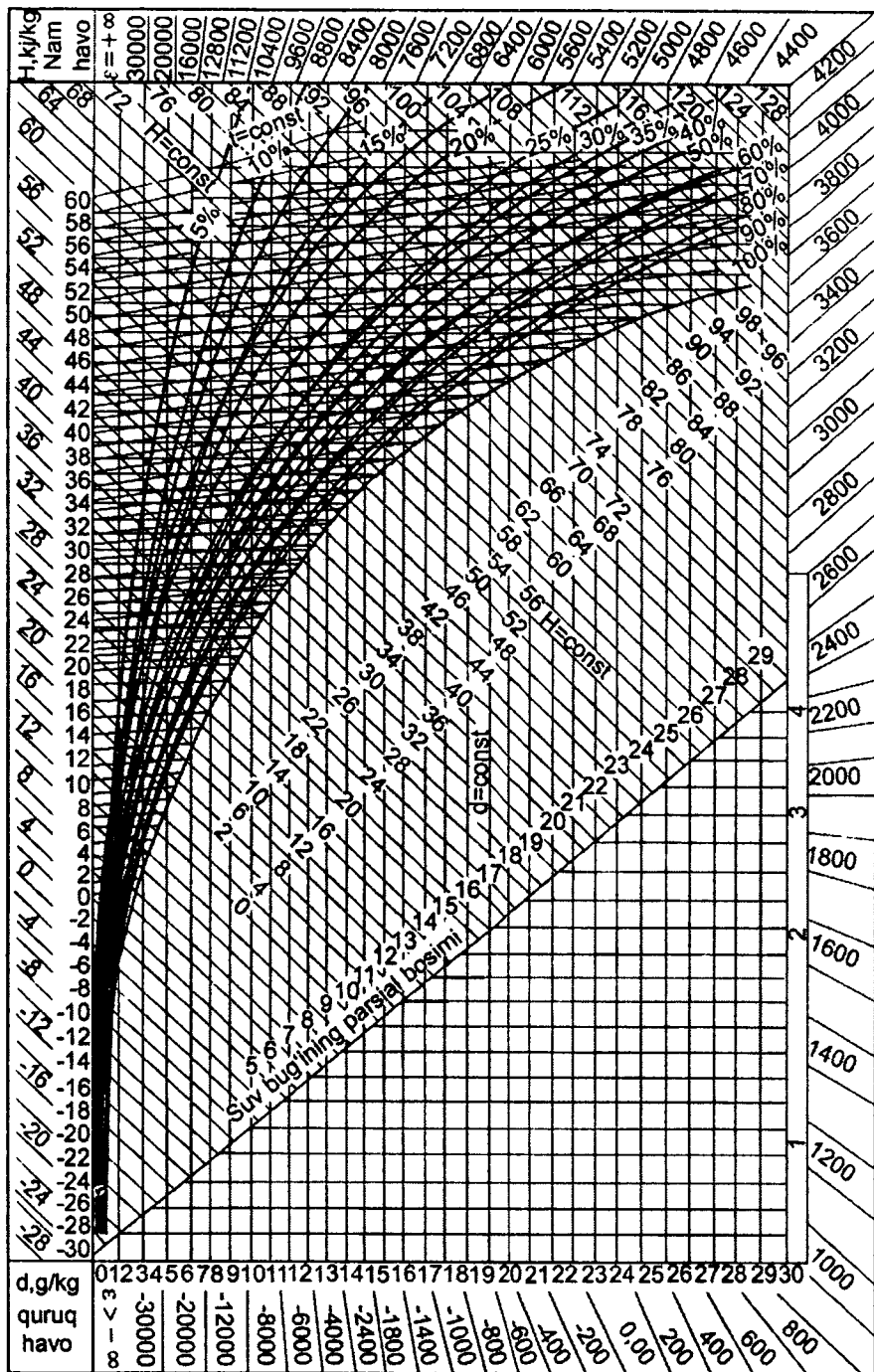
Gazlar	Issiqlik sig'imi, kJ/kmol·°C	
	μc_v	μc_p
Bir atomli	12,56	20,93
Ikki atomli	20,93	29,31
Uch va ko'p atomli	29,31	37,68

Gazlarning massaviy va hajmiy issiqlik sig'implari

Gaz	Issiqlik sig'imi, kJ/kg·°C	
	massaviy	hajmiy
1	2	3
O ₂	$c_{pm} = 0,9127 + 0,0001272 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183 \cdot t$
	$c_{vm} = 0,6527 + 0,00012724 \cdot t$	$c'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183 \cdot t$
N ₂	$c_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,28330,00010492 \cdot t$
	$c_{vm} = 0,7289 + 0,00008382 \cdot t$	$c'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492 \cdot t$
CO	$c_{pm} = 1,7335 + 0,00009575 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,2883 + 0,00011966 \cdot t$
	$c_{vm} = 1,7335 + 0,000009575 \cdot t$	$c'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966 \cdot t$
Havo	$c_{pm} = 0,9952 + 0,00009349 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091 \cdot t$
	$c_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 \cdot t$	$c'_{vm} = 1,9161 + 0,00012091 \cdot t$
H ₂	$c_{pm} = 1,8401 + 0,00029278 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551 \cdot t$
	$c_{vm} = 1,3783 + 0,00029378 \cdot t$	$c'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551 \cdot t$
SO ₂	$c_{pm} = 0,6314 + 0,00015541 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,4872 + 0,00004571 \cdot t$
	$c_{vm} = 0,5016 + 0,00015541 \cdot t$	$c'_{vm} = 1,8472 + 0,00004571 \cdot t$
0-1500 °C haroratlar chegarasida o'rtacha issiqlik sig'imi		
H ₂	$c_{pm} = 14,2494 + 0,00059574 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355 \cdot t$
	$c_{vm} = 10,1241 + 0,00059574 \cdot t$	$c'_{vm} = 1,9094 + 0,00005355 \cdot t$
CO ₂	$c_{pm} = 0,8725 + 0,00024053 \cdot t$	$c'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756 \cdot t$
	$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053 \cdot t$	$c'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756 \cdot t$

Termodinamika jarayonlari ko'rsatkichlari

Jarayonning nomi. Sharti belgisi	Jarayondagi boshlang'ich oxirgi ko'rsatkichlar bog'lanishi	Issiqlik miqdori	Jarayonda bajarilgan ish	Ichki energiya	Entropiya o'zgarishi
Izoxorik $V=\text{const}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$	$q_{x,1-2} = c_v(t_2 - t_1)$	$l = 0$	$u_2 - u_1 = q_v$	$S_2 - S_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$
Izobarik $P=\text{const}$	$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{p_2}{p_1}$	$q_{p,1-2} = c_p(t_2 - t_1)$	$l = R(T_2 - T_1)$	$\Delta u = c_v(t_2 - t_1)$	$S_2 - S_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{p_2}{p_1}$
Izotermik $T=\text{const}$	$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_1}{v_2}$	$q = l$	$l = p_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1} = q$	$du = dn = 0$	$S_2 - S_1 = R \ln \frac{v_2}{v_1} = c_p \ln \frac{p_1}{p_2}$
Adiabatik $p v^k = \text{const}$	$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$	$q = 0$	$l = \left(\frac{1}{k-1} \right) \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2)$	$\Delta u = c_v(t_2 - t_1)$	$S_2 - S_1 = \text{const}$
Politropik $p v^n = \text{const}$	$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n$	$q = c_n(t_2 - t_1)$	$l = \left(\frac{1}{n-1} \right) \cdot (p_1 v_1 - p_2 v_2)$	$\Delta u = c_n(t_2 - t_1)$	$S_2 - S_1 = c_n \lg \frac{T_2}{T_1}$



Nam havoning X-d diagrammasi (bosimi $P=99,3\text{kPa}$)

Bosimni o'lchash birliklari orasidagi bog'lanish

Birtikning nomlanishi	Metr kvadratga Nyuton, Pa	Bar, bar	Metr kvadratga kilogram kuch, kgk/m ²	Fizik atmosfera, atm	Millimetr suv ustuni ¹ , mm suv ust.	Millimetr simob ust ² , mm simob ust.	Kvadrat dyuymga funt, lbf/in ²
1 H/m ² , Pa	1	10 ⁻⁵	1,101972	0,98692 · 10 ⁻⁵	0,101972	750,06 · 10 ⁻⁵	14,5038 · 10 ⁻⁵
1 bar	10 ⁻⁵	1	10197,2	0,98692	10197,2	750,06	14,5038
1 kgm/m ²	9,80665	9,80665 · 10 ⁻⁵	1	0,96784 · 10 ⁻⁴	1	735,55 · 10 ⁻⁴	14,2233 · 10 ⁻⁴
1 atm(fiz)	1,01325 · 10 ⁵	1,01325	1,03323 · 10 ⁴	1	1,03323 · 10 ⁴	760	14,6959
10 ⁴ mm. simob ust.	0,980665 · 10 ⁵	9,80665	104	0,96784	10 ⁴	735,55	14,2233 ·
10 ³ mm. simob ust.	1,33322 · 10 ⁵	1,33322	1,35951 · 10 ⁴	1,31579 · 10 ⁴	1,35951 · 10 ⁴	103	19,3368
10 lbf/in ²	0,68948 · 10 ⁵	0,68948	0,70307 · 10 ⁴	0,68046	0,70307 · 10 ⁴	517,15	10

¹t = 4 °C da va normal tezlanishda erkin tushish tezlanishi gN=9,80665 m/s²

²t = 0 °C da gN = 9,80665 m/s²

Energiya, ish hamda issiqlik orasidagi bog'lanish

O'ichov birligi	Kilojoular, kJ	Kilokaloriya- lar, kkal	Kilovatt-soat, kW·soat	Kilogram- metrlar, kgs·m	Soatda ot kuchi, o.k. ·soat
10 kJ	10	2,38846	0,002778	1019,72	0,0037767
10 kkal	41,868	10	0,011630	4269,4	0,015813
1 kW·soat	3600	859,845	1	367098	1,35962
100 kgs·m	0,980665	0,23423	0,00027239	100	0,00037037
1 o.k.·soat	2647,8	632,41	0,73550	270000	1

ФЙДАЛАНИЛГАН АДАБИЁТЛАР

1. *Базаров И.П.* Термодинамика. — М.: «Высшая школа», 1983.
2. *Драганов Б.Х.* Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. — Киев.: «Высшая школа», 1988.
3. *Драганов Б.Х., Есин В.В., Зуев В.П.* Применение теплоты в сельском хозяйстве. — Киев.: «Высшая школа», 1990.
4. Инженерное оборудование сельских производственных зданий: Справочник/*А.Ф. Строй, В.И. Семенов, В.П. Василенко.* — Киев: «Урожай», 1988.
5. *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.* Теплопередача. — М.: «Энергоиздат», 1981.
6. *Ливчак И.Ф., Воронов Ю.В.* Охрана окружающей среды. — М.: «Стройиздат», 1988.
7. *Ноздрин С.И., Руденко Г.С.* Рациональное использование топлива и теплоты на предприятиях мясной и молочной промышленности. — М.: «Агропромиздат», 1985.
8. Отопление и вентиляция теплиц/*Шишко Г.Г., Потапов В.А., Злобин Л.Л.* — Киев.: «Будивельник», 1984.
9. Теплотехника/*А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожин* и др.; Под общ. ред. *В.И. Крутова.* — М.: «Машиностроение», 1986.
10. Теплотехника/*А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт* и др.; Под ред. *А.П. Баскакова.* — М.: «Энергоиздат», 1982.
11. Справочник по теплозащите зданий/*В.П. Хоменко, Г.Г. Фаренюк* — Киев.: «Будивельник», 1986.
12. Холодильная техника/*В.Ф. Лебедев, И.Г. Чумак, Г.Д. Аверин* и др.; Под ред. *В.Ф. Лебедева.* — М.: «Агропромиздат», 1986.
13. *Цубанов А.Г.* Теплоснабжение, отопление и вентиляция животноводческих помещений. — Минск: Ураджай, 1987. — 151 бет.
14. *Чечеткин А.В., Занемонец Н.А.* Теплотехника. — М.: «Высшая школа», 1986.
15. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник/Под общ.ред. *В.А. Григорьева и В.М. Зорина,* книга 2. — М.: «Энергоатомиздат», 1988.
16. *Драганов Б.Х.* и др. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве — М.: «Агропромиздат», 1990.

17. Луканин В.Н., Шатров М.Г., Камфер Г.М. и др. Теплотехника. Учебник для студентов технических специальностей. – М.: «Высшая школа», Изд.5-е. 2005.
18. Алферов Ж.И. Гелиотехника. – М., «Наука», «Энергия»: «Экономика, техника, экология», 1988/4.
19. Кириллин В.А., Сичев В.В., Шейндлин А.Е. Технический термодинамика, – Т., «Ўқитувчи», 1979.
20. Михеев М.А., Михеев И.М. Основы теплопередачи. –М., «Энергия», 1977.
21. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2001.
22. Солодов А.П. Принципы тепломассообмена – М.: Издательства МЭИ, 2002.
23. Кузма – Кичта Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. – М.: Издательства МЭИ, 2001.
24. Сборник задач по технической термодинамике: Учеб. пособие с 332/ Т.Н. Андрианова, Б.В.Дзамнов, В.Н. Зубарев, С.А.Ренмизов, Н.Я. Филатов. Ч-е изд., перераб. и доп. – Издательство МЭИ, 2000.
25. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник Рен. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Издательство МЭИ, 1999.

MUNDARIJA

Kirish	3
--------------	---

BIRINCHI QISM. TEXNIKAVIY TERMODINAMIKA NAZARIY ASOSLARI

I bob. Umumiy ma'lumotlar va asosiy tushunchalari

1.1. Umumiy ma'lumotlar	5
1.2. Asosiy tushunchalar. Termodinamika tizimi.....	6
1.3. Termodinamikaning holat parametrlari	8
1.4. Ideal va real gazlarning asosiy qonunlari.....	11
1.5. Ideal gazning issiqlik holat tenglamasi.....	14
1.6. Ideal gaz aralashmalari	18

II bob. Termodinamikaning birinchi qonuni

2.1. Asosiy tushunchalar	24
2.2. Qaytar va qaytmas termodinamika jarayonlari.....	26
2.3. Gazning ichki energiyasi	27
2.4. Gazning tashqi ishi	28
2.5. Termodinamika birinchi qonunining mohiyati va uning matematik ifodasi	29
2.6. Gazlarning issiqlik sig'imi	31
2.7. Gaz entalpiyasi	38
2.8. Gaz entropiyasi	40
2.9. Yopiq tizimlarda termodinamikaning asosiy jarayonlari	42

III bob. Termodinamikaning ikkinchi qonuni

3.1. Aylanma jarayonlar (yoki sikllar).....	61
3.2. Karno sikli.....	63
3.3. Teskari Karno sikli	65
3.4. Termodinamika II qonunining mazmuni	66
3.5. Karno teoremasi	67
3.6. Termodinamika II qonunining matematik ifodasi.....	68
3.7. Qaytmas siklda entropiyaning o'g'zgarishi	71
3.8. Klauzius nazariyasining xatoligi	72
3.9. Termodinamikaviy jarayonlarning va Karno siklining Pv - va Ts -koordinatalaridagi shakllari.....	73
3.10. Eksergiya tushunchasi.....	75

IV bob. Bug' hosil bo'lish termodinamik jarayonlari

4.1. Suv bug'lari va uning asosiy xususiyatlari.....	79
4.2. Bug' holatining o'zgarishi diagrammalari.....	80
4.3. Nam havoning xususiyatlari.....	83

V bob. Ochiq tizimlar termodinamikasi

5.1. Gaz va bug'larning quvurlarda oqishi.....	88
5.2. Gaz va bug'larning soplodan oqib o'tishi	90
5.3. Bosimlarning kritik nisbati. Kritik tezlik. Gaz (bug')ning maksimum sarfi.....	92
5.4. Gaz (bug')larni drossellash yoki ezish.....	94
5.5. Kompresorlarning sikllari.....	96

VI bob. Issiqlik dvigatellari va qurilmalarining ideal sikllari

6.1. Porshenli ichki yonuv dvigatellari (IYOD)ning ideal sikllari	100
6.2. Bug' — kuch qurilmalarining sikllari ishlash sxemasi.....	107
6.3. Gaz turbinali qurilmalar va reaktiv dvigatellarning ish sikllari.....	112

VII bob. Sovutish qurilmalari va issiqlik nasoslari sikllari (Taskari termodinamika sikllari)

7.1. Umumiy ma'lumotlar.....	118
7.2. Bug' kompressiyali sovutish qurilmasi sikli.....	119
7.3. Absorbsion sovutkich qurilmasi sikli.....	120
7.4. Issiqlik nasos sikli.....	121

IKKINCHI QISM. ISSIQLIK UZATILISH NAZARIYASI ASOSLARI

VIII bob. Asosiy tushunchalar

8.1. Fazoda issiqlik tarqalish usullari.....	125
8.2. Asosiy aniqliklar.....	126
8.3. Issiqlik o'tkazuvchanlikning asosiy qonuni (Furye qonuni).....	127
8.4. Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsiyenti.....	128
8.5. Issiqlik o'tkazuvchanlikning differensial tenglamasi.....	129
8.6. Chegaraviy shartlar.....	130
8.7. Turg'un tartibda issiqlik o'tkazuvchanlik.....	132
8.8. Uchinchi turdagi chegaraviy shartlarda issiqlik o'tkazuvchanlik. Issiqlik izolyatsiyasi.....	136

IX bob. Nostatsionar issiqlik o'tkazuvchanlik

9.1. Asosiy holatlar	140
9.2. Masalalarni yechish va modelleshtirish usublari	143
9.3. Bino tagidagi va tuproqdagi harorat maydonini aniqlash	145

X bob. Konvektiv issiqlik almashinish

10.1. Asosiy tushunchalar va aniqliklar.....	149
10.2. Issiqlik berish qonuni (Nyuton-Rixman qonuni).....	150
10.3. Gidrodinamik, issiqlik va diffuzion chegara qatlamlar.....	152

10.4. Konvektiv issiqlik almashinishning differensial tenglamalari.....	154
10.5. O'xshashlik nazariyasini issiqlik berilishiga qo'llash.....	157

XI bob. Issiqlik almashinish koeffitsiyentlarini aniqlash uchun kriterial tenglamalar

11.1. Issiqlik tashuvchining majburiy harakati.....	162
11.2. Issiqlik tashuvchining erkin harakati.....	164
11.3. Qaynash.....	165
11.4. Kondensatsiyalanish.....	167
11.5. Qishloq xo'jalik binolarida konvektiv issiqlik almashinish.....	168

XII bob. Nurlanish issiqlik almashinish

12.1. Asosiy tushunchalar, aniqliklar va qonunlar.....	172
12.2. Jismlar orasida nurlanish issiqlik almashinishi va uning jadalligini o'zgartirish uslublari	176
12.3. Gazlarda nurlanish	179
12.4. Qishloq xo'jalik ishlab chiqarishi binolarida nurlanish issiqlik almashinish.....	179
12.5. Hayvonlar va bino to'sinlari orasida nurlanish issiqlik almashinish	180

XIII bob. Issiqlik almashinish apparatlarining issiqlik hisobi asoslari

13.1. Turlanishi	183
13.2. Rekuperativ issiqlik almashtirgich hisobi.....	186
13.3. Issiqlik uzatish jarayonlarining jadallashtirish usullari.....	191

XIV bob. Ikki komponentli muhitda issiqlik — massa almashinuvi

14.1. Asosiy tushunchalar va aniqliklar	193
14.2. Diffuziya va issiqlik o'tkazuvchanlik.....	193
14.3. Massa va issiqlik berish	197
14.4. Massa va issiqlik uzatilish	199
14.5. Konvektiv massa — issiqlik almashinish differensial tenglamalari. Uchlamchi analogiya.....	201
Ilova	205
Foydalanilgan adabiyotlar.....	211