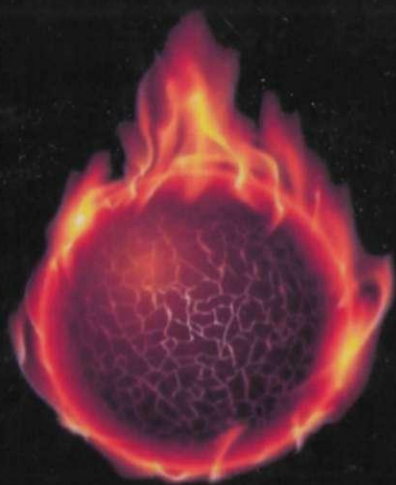


ISSIQLIK TEXNIKASINING
NAZARIY ASOSLARI FANIDAN
TAJRIBA ISHLARI



31.3 ya7
I-78

579

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

O'RTA MAXSUS, KASB-HUNAR TA'LIMI MARKAZI

O'RTA MAXSUS, KASB-HUNAR TA'LIMINI
RIVOJLANTIRISH INSTITUTI

M.M. Alimova, Sh.S. Mavjudova, X.S. Isaxodjayeov,
R.T. Raximjonov, F.Sh. Umarjonova

ISSIQLIK TEXNIKASINING NAZARIY ASOSLARI FANIDAN TAJRIBA ISHLARI

TOSHKENT «O'QITUVCHI» 2003

Davlat ta'lim standartlari talabiga muvofiq tuzilgan «Kasb-hunar kollejlari» mutaxassislar tayyorlash o'quv reja va dasturlari asosida yaratilgan «Issiqlik texnikasi asoslari» darsligi ikki qismdan iborat. Uning birinchi qismiga termodinamika qonunlari, gaz qonunlari va sikllari hamda gazlarda sodir bo'ladigan issiqlik hodisalari kiritilgan. Ikkinchi qismida esa issiqlik kuch qurilmalari, issiqlikni uzatish asoslari, muqobil energetika, havo va issiqlik energiyasining ekologik muammolari bayon etilgan.

Mazkur darslik energetika va mashinasozlik kasb-hunar kollejlari ta'lim olayotgan talabalarga mo'ljallangan.

N 4306020200117 qat'iy buyurtma —2003
353(04)-2003

ISBN 5-645-04095-3



© «O'qituvchi» nashriyoti,
«Ziyo-noshir» KShK, 2003.

SO'ZBOSHI

Mustaqil O'zbekiston Respublikasining ravnaqi ko'p jihatdan oliy o'quv yurtlari va o'rta maxsus ta'lim yo'nalishidagi akademik litsey va kasb-hunar kollejlari tayyorlab berayotgan mutaxassislarning bilimi va ularning egallagan malaka hamda ko'nikmalariga bog'liq. Chunki bu yosh mutaxassislarning olgan bilimlari ta'lim standartlari talabi darajasida bo'lgandagina ular ta'lim-tarbiya berishdan boshlab ishlab chiqarishdagi turli-tuman texnologik jarayonlarni boshqarishgacha bo'lgan murakkab va mas'uliyatli vazifalarni bajarishda faol qatnasha oladilar.

Respublikadagi energetik manbalardan to'g'ri foydalanish, qurilmalarning samaradorligini oshirish, yangilarini yaratish, muqobil energetik manbalarni o'rganish va ularni hayotga tadbqiq etish, ishlab chiqarish va atrof-muhitni ekologik jihatdan himoyalash masalalarini fan va texnika yutuqlari asosida o'rganish, albatta, yosh mutaxassislar zimmasiga yuklanadi.

Shunday ekan, O'zbekiston Respublikasi iqtisodiyotining kun sayin yuksalib borishida, texnika salohiyatining o'sib borishida o'rta va oliy ma'lumotli muhandis-texniklar, ustalar alohida o'rin tutadi.

Energetik manbalar asosini o'rganishda «Termodinamika» fani va uning amaliy qismi bo'lgan «Issiqlik texnikasi asoslari» alohida o'rinni egallaydi. Termodinamika qonunlarini bilish, muhandis va ustalarning amaliyotda issiqlik mashinalaridan oqilona foydalana olishlari hamda yangilarini loyihalash bilan bog'liq bo'lgan masalalarni hal etishlarida «Issiqlik texnikasi» fani muhim amaliy ahamiyat kasb etadi.

Mazkur darslik «O'zbekiston Respublikasi uzluksiz ta'lim Davlat standartlari tizimi» va «Kash-hunar kollejlari mutaxassislari tayyorlash o'quv reja va dasturlari»ga hamda mualliflarining A. Qodiriy nomli Jizzax davlat pedagogika va Toshkent kimyo-texnologiya institutlarida, «Shirin» kasb-hunar

energetika kollejida ta'lim berish jarayonida o'qilgan ko'p yillik ma'ruza matnlari hamda amaliyotda to'plangan materiallar, shuningdek, avval nashr etilgan «Issiqlik texnikasi» o'quv qo'llanmasini qayta ishlash asosida nashrga tayyorlandi. Unda termodinamika qonunlari, uning asosiy tenglamalari hamda ular asosida yaratilgan issiqlik hosil qilish qurilmalari, inshootlari, shuningdek, issiqlik mashinalari siklidagi termodinamik jarayonlar, muqobil energetika manbalari va ulardan energiya olish qurilmalari bilan bir qatorda, issiqlik texnikasining ekologik muammolari kasb-hunar kollejlarning o'quv reja va dasturlariga muvofiq bayon etilgan.

Mazkur darslikdan kasb-hunar kollejlari talabalari va shu soha o'qituvchilari, ishlab chiqarishda faoliyat ko'rsatayotgan muhandis-mexanik, usta hamda texnik xodimlar ham foydalanishlari mumkin.

Darslik qo'lyozmasi bilan batafsil tanishib chiqib o'zlarining fikr va mulohazalarini bildirgan Toshkent kimyo texnologiyasi instituti «Issiqlik texnikasi» kafedrasining bir guruh xodimlariga hamda Sirdaryo viloyati «Shirin» kasb-hunar energetika kolleji jamoasiga, Guliston Davlat universiteti dotsenti T. Risboyevga, A. Qodiriy nomli Jizzax Davlat pedagogika instituti professori G'. M. Muxamedov va professor X. T. To'raqulovga, shu institutning «Texnika va kasb ta'limi fanlari» kafedrasida dotsenti N. G'afforovga, «Shirin» GRES bosh muhandisi A. Xo'janovga mualliflar o'z samimiy minnatdorchiliklarini bildiradilar.

MUQADDIMA

«Issiqlik texnikasi» fani issiqlik mashinalari, apparatlari, qurilmalari va uskunalari yordamida issiqlik energiyasini hosil qilish, uni boshqa turdagi energiyaga aylantirish, taqsimlash, uzatish usullarini nazariy hamda amaliy qamrab olgan holda o'rganadigan umumtexnika fanidir.

Insonda qadim zamonlardan boshlab issiqlik energiyasiga bo'lgan ehtiyoj uyg'ona boshlagan va uni hosil qilish hamda undan foydalanish usullarini qidiringan. Termodinamika qonunlari amaliyotini o'rganuvchi «Issiqlik texnikasi» fanining shakllanishiga XVIII—XIX asrning buyuk olimlaridan R. Mayyer, J. Joul, M. V. Lomonosov, G. Gelmgols, S. Kamo, Klauzius, V. Kelvin, V. Nernst, D. Maksvell, D. Bernulli, L. Boltsman, D. Gibbs, D. I. Mendeleyev, E. X. Lens, A. G. Stoletov, K. E. Siolkovskiy va boshqa olimlar ilmiy izlanishlari bilan o'z hissalarini qo'shgan bo'lsalar, XX asr olimlaridan E. Fermi va Kurchatov (Atom reaktorida ajralgan issiqlik), N. G. Basov, O. N. Kroxin va Ch. Tauns (Lazer nurlanishi), Saxarov (Termoyadro sintez reaksiyasi) kabi ko'psonli olim hamda muhandislarning ishlari uni yana ham rivojlantirdi.

Hozirgi kunda dunyo olimlari qatori O'zbekiston Respublikasining Fizika-texnika ilmiy-tadqiqot instituti, «Fizika—Qo'yosh» ilmiy-ishlab chiqarish birlashmasi hamda Energetika va issiqlik texnikasi institutlari olimlari ham nazariy va amaliy gelioenergetika hamda issiqlik texnikasi bo'yicha ancha samarali ishlarni amalga oshirmoqdalar. Shu o'rinda, olimlarimizdan G' . Y. Umarov, S. A. Azimov, U. O. Orifov, P. Q. Habibullayev va ularning ko'p sonli shogirdlarining xizmatlarini ta'kidlash joiz.

Issiqlik energiyasini mexanik energiyaga, mexanik energiyani esa elektr energiyasiga aylantirish usullarining yaratilishi, uni xalq xo'jaligiga tatbiq etilishi tufayli elektr energiyasini masofaga uzatish hamda uni yana mexanik energiyaga aylantirish masalalari hal etildi. Katta quvvatli GES, IES, AES va boshqa turdagi muqobil energetik

markazlarning barpo etilishi natijasida ishlab chiqarish mexanizatsiyalashtirildi, elektrlashtirildi, avtomatlashtirildi, robotlashtirildi hamda kompyuterlashtirilgan texnika va texnologiya yaratildi.

O'zbekistonda issiqlik energiyasini ishlab chiqarish va uni boshqa turdagi energiyaga aylantirish usullari samaradorligining ortib borishi mintaqa iqtisodiy salohiyatining o'sishiga ta'sir ko'rsatibgina qolmasdan, albatta aholining maishiy va madaniy sharoitining yuksalishiga ham ijobiy ta'sir ko'rsatadi. Albatta, energetik boylik va uning zaxirasidan to'g'ri foydalanish mamlakatni energetik inqirozdan saqlaydi. Biroq, bugungi kunda, inson o'zining antropogen issiqlik energiyasining ko'p qismini asbob-uskunalaridan noto'g'ri foydalanish, samarasiz uskunalarni qo'llashi va boshqa sabablar oqibatida isrof qilyapti. Buning oldini olish uchun mamlakatga chet elning yangi uskuna, qurilma va texnologiyasi kiritilayapti.

Energiyaning asosiy qismi (90—92%) neft va tabiiy gazdan olinadi. O'zbekistonda esa asosiy energiya manbai — bu tabiiy gaz, oz miqdorda neft va toshko'mir hamda daryolarning potensial energiyasi hisoblanadi. Gelio, geotermal, shamol va boshqa qo'shimcha energiya manbalarining ulushi hisobga olinmaydigan darajada kam.

Energiya zaxiralaridan tejamkorlik bilan to'g'ri foydalanmaslik oqibatida Yerdagi ekologik muvozanat yomonlashib, «Parnik» effektining ta'siri tufayli iqlim isib bormoqda.

Sun'iy energetik manbalardan eng quvvatlisi atom energiyasi bo'lib, uning qurilmalarini takomillashtirish hisobiga radioaktiv moddalarning atrof-muhitga tarqatmaslik va ishlatib bo'lingan atom yoqilg'isini saqlash muammolarining yechimi jahon miqyosida hal etilmoqda. Chunki, ayrim Yevropa mamlakatlari-da energetik zaxiralar tugab bormoqda. Aksincha, zamonaviy ishlab chiqarishning energiyaga bo'lgan talabi esa ortib bormoqda.

Ekologik jihatdan toza bo'lgan muqobil energetikaning asosini Quyosh, suv, shamol, dengiz to'lqini, geyzerlar kabi energetik manbalar tashkil qiladi va ulardan foydalanish keyingi yillarda ba'zi mamlakatlarda sezilarli darajada rivojlanib bormoqda.

Kelajakda ekologiya talablariga javob beruvchi sun'iy energetik manbalar orasida gelioenergetika va boshqariladigan termoyadro sintez reaksiyalari asosida ishlaydigan energetik markazlar insoniyatga xizmat qiladi. Shular qatorida ekologik jihatdan toza bo'lgan gidro, geo, shamol, dengiz to'lqini energiyalari asosiy energiya manbalari bo'lib qoladi. Bu energetik manbalar orasida O'zbekiston uchun eng istiqbollisi gelioenergetika hisoblanadi.

Birinchi qism

1 BOB. TERMODINAMIKA

1.1. Issiqlik texnikasi fani, uning maqsad va vazifalari

Termodinamika (grekcha *therme* — *issiqlik*, *dunamikos* — *kuch*) issiqlik hodisalarida sodir bo'ladigan jarayonlarda energiya aylanish va saqlanish, moddalarning ichki tuzilishini e'tiborga olmagan holda, nisbatlari orasidagi munosabatlarni o'rganadigan fan bo'lib, issiqlikning texnikada qo'llanilishida uchraydigan termodinamik jarayonlarning nazariy yechimini hal etadi. Fanning asosiy vazifasi sodda qoidalar, ya'ni qonunlar yordamida ochib beriladi.

Issiqlik texnikasi asoslari dvigatelni o'rganish jarayonida fan sifatida shakllangan bo'lsa, keyinchalik issiqlik hodisalarini amaliy va nazariy jihatdan o'rganish davomida yanada rivojlandi.

Termodinamika qonunlari asosida qurilgan murakkab va mukammal asbob-uskunalar amaliyotda keng qo'llanilmoqda. Bunga ishlab chiqarishda va turmushda issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi bug' va gaz turbinolari, ichki yonuv dvigatellari, isitish tizimidagi batareyalar va h. k. misol bo'la oladi.

Issiqlik mashinalari nazariyasini o'rganuvchi texnik termodinamika XIX asrning oxirida fan sifatida shakllandi. Muhandislik masalalar yechimini va amaliyotdagi texnika tadbqiqini topishda issiqlik texnikasi fan bo'lib shakllanib bordi. Bunga 1774-yili yaratilgan Jeyms Uattning bug' mashinasi, 1883-yili de-Laval yaratgan mukammallashgan bug' turbinasi misol bo'la oladi. Aslida texnik termodinamika avvalroq, 1597-yilda Galileo Galiley yaratgan birinchi simobli termometr yasaliishi bilan yuzaga kelgan deyish mumkin. Bu sanani texnik termodinamikaning paydo bo'lgan va rivojlana boshlagan vaqti, deb hisoblash bo'ladi. Termometr yasalgandan so'ng 200—250 yil davomida bu sohada deyarli rivojlanish bo'lmadi. XIX asrda termodinamikaning fan sifatida

shakllanishida R. Mayyer (1842-y.), J. Joul (843—846-y.y.), E. X. Lens (1844-y.), G. Gelmgols (1847-y.) kabi olimlarning ishlari beqiyos bo'lgan. Ular energiyaning aylanish va saqlanish qonuni mohiyatini nazariy jihatdan tushuntirib berganlar. Shu olimlar qatorida, S. Karno (1824-y.), R. Klauzius (1845-y.) va V. Tomson-lord Kelvin (1856-y.) termodinamikaning ikkinchi qonunini ta'riflab bergan bo'lsalar, oradan yarim asr o'tgandan so'ng V. Nernst (1906-y.) termodinamikaning uchinchi qonunini ta'riflab berdi.

XVIII—XIX asrda D. Bernulli (1738-y.), M. Lomonosov (1758-y.), D. Maksvell (1860-y.), L. Boltsman (1877-y.), D. Gibbs (1880-y.), D. I. Mendeleyev (1860-y.) va boshqa olimlar o'z ilmiy ishlarida termodinamik jarayonlardagi issiqlik hodisalarini molekular-kinetik nazariya asosida yoritib berdilar.

Turli xil energiyalarning bir-biriga aylanishini tushuntirishda E. X. Lens (elektr energiyasining issiqlik energiyasiga aylanish qonuni), A. G. Stoletov (konvektiv va nurli issiqlik almashinuvi qonuni), K. E. Siolkovskiy (ko'p bosqichli raketa dvigatelida issiqlik energiyasining mexanik energiyaga aylanishini izohlash orqali), M. V. Kirpichov bilan A. A. Gluxmanlar termomodellash nazariyasini tushuntirib berdilar.

Jahonda jon boshiga to'g'ri keladigan energiya miqdori yil sayin ortib bormoqda. Ammo faqat organik yoqilg'ilar hisobiga energiyani ishlab chiqarish uzoq vaqt davom etishi mumkin emas. Chunki Yerdagi toshko'mir, neft, gaz zaxiralari tobora kamayib bormoqda. Hozirgi kunda olimlarning hisobiga ko'ra, Yer planetasining yillik energetik boyligi (1-jadval) taqriban $86,13 \cdot 10^{17}$ kW · soat atrofida bo'lib, uning miqdori kun sayin kamayib bormoqda. Quyosh energiyasi (91,7%) eng ko'p miqdordagi beminnat energiya manbayidir. Insoniyat Quyosh energiyasidan samarali foydalana olmayapti. Faqat Quyosh energiyasining ta'sirida planetamizda hosil bo'lgan torf, toshko'mir, antratsit, gaz, neft va boshqa yoqilg'ilardan o'z energetik ehtiyojlarini qondirish maqsadida foydalanayapti, xolos. Yerning 1 m^2 yuzasiga tushadigan Quyosh energiyasidan foydalanib, taxminan 1,36 kW energiya olish mumkin.

Ayrim energiya beruvchi manbalar

Tar. №	Energiya beruvchi manbalar	Yerdagi energetik boylik imkoniyati, kW · soat
1.	Gidroenergetika	$23 \cdot 10^{12}$
2.	Yerning issiqlik energiyasi	$232 \cdot 10^{12}$
3.	Neft	$153 \cdot 10^{13}$
4.	Torf	$439 \cdot 10^{13}$
5.	Shamol energiyasi	$601 \cdot 10^{14}$
6.	Toshko'mir	$997 \cdot 10^{14}$
7.	Yadro energiyasi	$547 \cdot 10^{15}$
8.	Quyosh radiatsiyasi	$79 \cdot 10^{17}$
	Jami:	$86,13 \cdot 10^{17}$

Issiqlik texnikasi qurilmalarining takomillashganligi sababli qo'ng'ir ko'mir, yonuvchi slaneslar, torf va h. k. yoqilg'ilardan unumli foydalanilyapti. Keyingi chorak asr mobaynida issiqlik texnikasi apparatlari qatoriga sun'iy va tabiiy gaz yoqilg'isini yoqa oladigan, *fik* yuqori bo'lgan asbob-uskunalar, qurilmalar qo'shildi.

Shamol energiyasidan ham jahonning juda ko'p mamlakatlarda foydalanilmoqda. Gelioenergetika ham samarali rivojlanib bormoqda. Yerda va kosmonavtikada issiqlik texnikasi qurilmalari (issiqxonalar, isitkich uskunolari, elektr tokini ishlab chiqarishda va sh. k.) yordamida Quyosh nuridan samarali foydalanilmoqda.

Atom energetikasida aktinoidlar guruhidagi Uran—235 va 238, Toriy—232, Plutoniy—239 yadrolari issiq va jadal neytronlar ta'sirida parchalanishida ajralgan issiqlikdan foydalanilmoqda. Atom yoqilg'isining zaxirasi juda kam, insoniyat undan abadiy foydalana olmaydi. Bu energiya turidan foydalanishda atrof-muhitni muhofaza qilishda, ya'ni ekologik musaffolikni saqlashda ayrim muammolar yuzaga keladi. Shunday bo'lsa-da, hozirgi kunda rivojlangan mamlakatlarda atom energetikasidan samarali foydalanilmoqda.

Issiqlik mashinalari, qurilma va uskunolari qo'llaniladigan texnikaning hamma tarmoqlarida issiqlik texnikasi qonun-qoidalariga rioya qilinmasa, issiqlik mashinasidan foydalanib

bo'lmaydi. Shuning uchun ham issiqlik texnikasi fan sifatida maydonga kelib, uning qonuniyatlari esa amaliyotga tadbiiq etilmoqda hamda rivojlanib bormoqda. Xalq xo'jaligi, madaniy-maishiy xizmatning barcha sohalarida issiqlik mashinalari, apparatlari, uskunolari va komplekslari keng qo'llanilmoqda. Issiqlik mashinalari va asboblariidan ortiqcha issiqlik sovitkichga chiqarib turilmasa, ular ishdan chiqadi. Shuning uchun issiqlik-ni hisoblashda, ichki yonuv dvigatellarida yonish jarayonini to'g'ri rostlashda, ulardagi ortiqcha issiqlikni tashqariga chiqarishda, materiallar mustahkamligining hamda elektr qarshiligining temperaturaga bog'liqligini aniqlashda, elektr va magnit maydonlari qiymatlari po'lat o'zak temperaturasiiga bog'liqligini o'rganishda issiqlik texnikasi qonuniyatlarini bilish taqazo etiladi.

Issiqlik mashinalari siklidagi jarayonlarni bilmasdan turib, bo'lg'usi kichik muhandis-elekt-r texnolog, kimyogar-texnolog, ta'mirlovchi va uskunalarni yig'uvchi ustalar o'z kasblarining mohir ustasi bo'la olmaydilar. Shuning uchun ham issiqlik texnikasi fani mashinasozlik va energetika sohasida ta'lim olayotgan bo'lajak muhandis va ustalarga umumtexnika fani sifatida o'r-gatiladi.

1.2. Texnik issiqlik dinamikasining tushunchalari

Texnik issiqlik kuchi(dinamikasi)ning asosida sistemaga kiritilgan issiqlik miqdori qanday hodisalarda qatnashib, foydali ish bajarishi bosh masala hisoblanadi. Texnik issiqlik kuchi issiqlik va sovitkich mashinalarida qo'llanilganda, bu mashinalarning ish bajarish jarayonini tushuntiruvchi nazariyani hamda ularda sodir bo'ladigan issiqlik hodisalarini tavsiflashda turli-tuman atama va iboralardan foydalaniladi. Bu tushunchalar orasida Xalqaro atama so'zlar ham mavjud bo'lib, ular dunyo miqyosida qabul qilingan. Bu texnik tushunchalar to'g'risida qisqacha to'xtab o'tamiz.

Termodinamik sistema. Issiqlik harakati bir yoki bir guruh jismlar majmuasining o'zaro energiya va modda almashinuvida sodir bo'ladi.

O'zaro va boshqa jismlar bilan energiya va modda almashaloladigan jismlar majmuiga *termodinamik sistema* deyiladi.

Masalan, termodinamik sistema sifatida silindrda joylashgan ideal gazni yoki yoqilg'i bug'i bilan atmosfera havosi aralashmasini olish mumkin. Ustuvor va noustuvor termodinamik sistemadagi energiya tashqi ta'sir hisobiga boshqa jismga o'tishi yoki aksincha, boshqa jismlardan birlamchi jismga uzatilishi, ya'ni jism bilan issiqlik oluvchi (yoki uzatuvchi) o'rtasida modda (energiya) almashinuvi bo'lishi mumkin. Sistemaning termodinamik parametrlari o'zgarmas va hamma nuqtalarida vaqt davomida bir xil bo'lsa, bunday sistema *ustuvor sistema*, aksincha, sistemaning har xil nuqtalaridagi parametrlari o'zgaruvchan qiymatlarga ega bo'lsa, uni *noustuvor sistema* deyiladi.

Ishchi gazning holati tashqi ta'sir hisobiga o'zgarganida uning termodinamik parametrlari (P , V , T) ham, mos ravishda, o'zgaradi, ya'ni termodinamik sistemaning muvozanati buziladi.

Tashqi muhit. Termodinamik sistema parametrlarini o'zaro ta'sirlashuvi natijasida, oz miqdorda bo'lsa ham, sistema holatini o'zgartira oladigan jismga *tashqi muhit* deyiladi. Ideal gaz — ish jismi bo'lsa, uni o'rab turgan silindr devorlari va porshen kallagining ustki yuzasi bilan chegaralangan sirt bu *tashqi muhit* bo'ladi.

Termodinamik sistemadagi jarayon *nazorat sirti* bilan chegaralangan hajmda yuz beradi. Ichki yonuv dvigateli (IYD) silindri devori va porshen kallagining ustki yuzasi bilan chegaralangan sirt hosil qilgan hajm nazorat hajmga misol bo'la oladi. Termodinamik sistema nazorat hajmda joylashadi va shu hajmda termodinamik jarayon (ish aralashmasining yonishi) sodir bo'ladi.

Holat parametrlari. Tashqi muhit bilan termodinamik sistemaning o'zaro ta'sirlashuvi natijasida o'rganilayotgan sistemaning *holat parametrlari* o'zgaradi.

Solishtirma hajm, bosim va temperatura (P , V , T) *sistemaning holat parametrlari* deyiladi.

Gazga tashqaridan issiqlik miqdori uzatilsa (yoki chiqarilsa), sistemaning uchala (P , V , T) parametri yoki ulardan birortasi o'zgarishi mumkin. Gazga tashqaridan issiqlik kiritmasdan uning hajmini kamaytirib (kengaytirib), holat parametrlarini o'zgartirish mumkin. Ma'lumki, real gaz siqilsa *isiydi*, aksincha, kengaytirilsa — *soviydi*.

Termodinamika qonunlarini tushuntirishda «ideal gaz» tushunchasidan foydalaniladi. Ideal gaz tabiatda mavjud bo'lmagan va nazariy jihatdan qabul qilingan tushuncha. Termodinamikada ideal gaz sifatida, molekulalari o'zaro ta'sirlashmaydigan modda qabul

qilingan. Bunday xossaga ega bo'lgan modda zarralari moddiy nuqta deb qaraladi.

Ideal gaz qonunlarini o'rganishda ba'zan *ideal izolator* (mutlaqo issiqlik energiyasini o'tkazmaydigan material) tushunchasidan foydalaniladi. Shuning uchun *izolyatsiyalangan termodinamik sistema* deyilganda tashqi muhitga issiqlik energiyasini uzatmaydigan va tashqaridan qabul qilmaydigan sistema tushuniladi. Kundalik hayotda, ishlab chiqarish jarayonlarida, issiqlik energiyasini izolyatsiyalashda, ya'ni issiqlikning isrofini kamaytirish maqsadida real issiqlik izolatorlari keng qo'llaniladi. Bunday materiallarga chinni, shisha va shisha tolasi, yuqori temperatura-larga bardosh bera oladigan plastmassa turlarini keltirish mumkin.

Termodinamik jarayon. Fizik-kimyoviy hodisalar asosan issiqlik ta'sirida sodir bo'ladi. Bularning uzluksiz ketma-ket, davriy takrorlanishi natijasida termodinamik sistema parametrlari o'zgaradi.

Termodinamik sistemada sodir bo'ladigan va uning holat parametrlari (P , V , T) dan hech bo'lmaganda bittasi o'zgarishi bilan bog'liq bo'lgan har qanday o'zgarishni tavsiflovchi hodisalarni *termodinamik jarayon* deyiladi. Termodinamik jarayon qaytar, qaytmas, muvozanatli (kvazistatik), nomuvozanat, aylanma, izoxorik, izotermik, adiabatik, politropik turlarga bo'linadi.

Jarayon kechishi uchun muayyan termodinamik holatdagi sistemaning tashqi ta'sir hisobiga holat parametrlari o'zgarishi shart va sistema ma'lum ish bajargandan keyin o'zining oldingi holatiga muhit bilan energiya va modda almashinuvidan so'ng qaytishi kerak. Ammo jarayonning davriy, ketma-ket takrorlanishida sistema mutlaqo tashqi muhit bilan issiqlik va modda almasha ham avvalgi holatiga to'liq qaytmaydi.

Sikl. Termodinamik jarayon uzluksizligini ta'minlash uchun sistemaga qo'shimcha energiya kiritiladi va uning ishga aylanmasdan qolgan qismi tashqi muhitga chiqariladi.

Davriy takrorlanadigan va ketma-ket sodir bo'ladigan jarayonlarning majmuasiga *sikl* deyiladi.

Har qanday aylanma jarayon siklga misol bo'la oladi. Sikl *to'g'ri* (Karno, Dizel, umumlashgan, Otto, Trinkler-Sabate) va *teskari* (sovitish mashinalari sikli) bo'lishi mumkin. Musbat ishorali ish bajaradigan aylanma jarayonga *to'g'ri sikl* deyiladi. To'g'ri siklda jarayonning kechish yo'nalishi soat mili (strelkasi) yo'nalishi bo'yicha sodir bo'ladi. Issiqlik mashinalarining ish bajara oladigan sikli to'g'ri siklga misol bo'la oladi. Manfiy ishorali ish bajaradigan aylanma

jarayonga *teskari sikl* deyiladi. Teskari sikldagi jarayonlarning kechish yo'nalishi soat mili yo'nalishiga qarama-qarshi bo'ladi. Sovitkich mashinalarining ish sikli teskari siklga misol bo'la oladi.

Siklda termodinamik sistema muvozanatining o'zgarishi bilan uning parametrlari orasidagi bog'lanishni *termodinamik sistemaning holat tenglamasi* shaklida ifodalanadi. Masalan,

$$f(P, V, T) = 0 \text{ yoki}$$

$$V = f(P, T); \quad P = f(V, T); \quad T = f(V, P). \quad (1)$$

Moddaning xossalari mos ravishda termodinamik sistemaning holat tenglamalari ham o'zgarishi mumkin. Bunda termodinamik sistemani soddalashtirib, ayrim shartlarni kiritib, yechim qidiriladi. Masalan, ideal gaz yoki real gaz holat tenglamalari bir-biridan katta farq qiladi.

Texnikada real gazlar qo'llaniladi, ular past bosimlarda ideal gazlarga o'xshab ketadi. Shuning uchun ayrim hisoblashlarda molekulalar orasidagi o'zaro ta'sirlashish kuchlari va molekula egallagan hajm e'tiborga olinmaydi. Ammo real gazdan foydalanilganda, gaz molekulalari orasidagi tutunish kuchlarini va molekula hajmini e'tibordan chetda qoldirib bo'lmaydi. Yuqoridagilarni hisobga olib, Van-der-Vaals real gazlarning holat tenglamasini bergan. Van-der-Vaals tenglamasi tajribada har doim ham kutilgan natijani bera olmaydi.

Xulosa qilib shuni aytish mumkinki, termodinamik sistema muvozanatining o'zgarishiga unga issiqlik miqdorining uzatilishi yoki undan chiqarilishi hamda mexanik ta'sir sababchi bo'lar ekan.

Entropiya (yunoncha *entropia* — *aylanish, o'zgarish*) termodinamik sistemaning holat funksiyasi bo'lib, tashqi muhitning o'zaro issiqlik almashinish jarayonining kechish yo'nalishini ifodalaydi va *S* harfi bilan belgilanadi:

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T} \quad (2)$$

Sistemaning tashqi muhit bilan ta'sirlashish xususiyatiga qarab, kvazistatik (qaytuvchan, muvozanatli) jarayonlarda entropiya qiymati musbat va manfiy hamda nolga teng bo'lishi mumkin, ya'ni:

$$\Delta S > 0 \text{ — modda isitilyapti;}$$

$$\Delta S < 0 \text{ — modda sovitilyapti;}$$

$$\Delta S = 0 \text{ — modda muvozanat holatida.}$$

«Entropiya» tushunchasini fanga 1865-yili R. Klauzius kiritgan bo'lib, SI o'lchov birligi sistemasida Joul/K tarzida beriladi. Massa o'lchov birligida esa Joul/kg · K bo'ladi.

Sistemaning entropiyasini sistemaning absolut temperaturasi nolga intilganda aniqlab bo'lmaydi. Bunday ($\Delta S \rightarrow 0$) holatda nazariy usul bilan entropiyaning absolut qiymatlarini izojarayonlarda hisoblab topish mumkin emas. Bunday qiyinchilikdan faqat tajriba yo'li bilan aniqlangan natijalar orqali chiqish mumkin. V. Nernst (1906-y.) o'ta past temperaturalarda moddalar xossalarini o'rganib, tadqiqotlar natijalariga tayanib, ***absolut nol temperaturada kechadigan har qanday izotermik jarayondagi entropiyaning o'zgarishi nolga teng*** degan xulosaga keldi. Bunga ***V. Nernst prinsipi*** yoki ***termodinamikaning uchinchi qonuni*** deyiladi.

Moddaning absolut temperaturasi nolga yaqinlashganda, undagi zarralar harakati deyarli to'xtaydi. Modda har qancha o'ta past temperaturagacha sovitilganda ham ***zarralarning harakati mutlaqo to'xtamaydi***, faqat ayrim nazariy masalalar yechimini topishda shunday shart qabul qilinadi.

Amaliyotda entropiyaning absolut qiymatidan emas, balki uning termodinamik jarayondagi o'zgarishidan foydalaniladi, ya'ni

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{\Delta q}{T} \quad (3)$$

Termodinamik jarayonda qatnashgan sistema holatlari o'rganilganda, entropiya haqida to'laroq ma'lumotga ega bo'lasiz.

Entalpiya (yunoncha *enthalpo* — *isitaman*) termodinamik sistemaning holat funksiyasi bo'lib, uni *i* yoki *H* harfi bilan belgilanadi. ***Termodinamik sistema ichki energiyasi U bilan shu sistema ustida bajarilgan ish (bosimi R ning hajmi V ga ko'paytmasi) yig'indisiga entalpiya*** deyiladi va u quyidagicha belgilanadi:

$$i = U + PV. \quad (4)$$

Entalpiya energiya o'lchov birligi (Joul) da o'lchanadi.

Hisoblashlarda solishtirma entalpiya ifodasi *i/m* dan foydalaniladi va SI o'lchov birligida Joul/kg bo'ladi. Entalpiyaning o'zgarishi sistema qatnashayotgan jarayon turiga bog'liq bo'lmasdan, shu sistemaning boshlang'ich va oxirgi holatlariga bog'liq, ya'ni

$$\Delta i = i_2 - i_1 \quad (5)$$



1. Termodinamika nimani o'rganadi, uning maqsad va vazifalari nimalardan iborat?
2. Termodinamik tushunchalarni ayting va ta'riflang: sistema, muvozanatli va nomuvozanat sistema, sistemaning holat parametrlari, jarayon, sikl, muhit va sh.k.
3. Entropiya va entalpiyaning ma'nosi nimadan iborat?

1.3. Issiqlikning ishga aylanish jarayoni.

Issiqlik mashinasining ish jismi

Tabiatdagi hamma jismlar turi, agregat holati, tinch yoki harakatlanishidan qat'iy nazar, ular zarralardan tuzilgan va bu zarralar uzluksiz harakatda bo'ladi. Shuning uchun jismlarning temperaturalarini o'lchash orqali ularning isiganlik darajasi aniqlanadi. Issiqlikning o'zi nima degan savol tug'iladi.

Moddani tashkil etgan zarrachalar va maydonlar majmuasi bo'lgan materiya harakatining bir turi issiqlik deb ataladi. Moddaning tarkibiy qismiga kirgan elektron, atom, molekula, zarra, kristall panjara tugunlarida joylashgan ion-atomlarning murakkab harakati natijasida paydo bo'ladigan energiyani issiqlik deyish mumkin.

Issiqlikni molekular-kinetik nazariya asosida tushuntirish g'oyasini XVIII asrda D. Bernulli va Y. Valter rivojlantirdi. XIX asrga kelib, issiqlik energiyasi haqidagi ta'limotni R. Mayyer, J. Joul, R. Klauzius, D. Maksvell yana ham to'ldirdi va takomillashtirdi.

Issiqlik energiyasi jismlarning o'zaro ta'sirlashuvi (kontakti) da, konveksiya va nurlash vaqtida hamda jismlar orasida temperatura farqi mavjud bo'lgandagina issiqlik bir jismdan ikkinchisiga o'tadi. Jismlar temperaturasi o'rtasida farq bo'lgandagina issiqlik energiya sifatida biridan ikkinchisiga o'tadi. Shunda, $T_1 > T_2$ shart o'rinli bo'lsa, birinchi jism temperaturasi ikkinchisidan katta, ya'ni issiqlik uzatilyapti; ikkala jismning temperaturalari bir xil, ya'ni $T_1 = T_2$ bo'lsa, issiqlik o'tmayapti; $T_1 < T_2$ shart o'rinli bo'lganda sovuq jismdan issiqlik energiyasi issiq jisimga o'z-o'zidan uzatilmaydi.

Issiqlik mashinasi. Jisimga keltirilgan issiqlik energiyasining foydali ishga aylantirish uchun albatta energiya bilan ish o'rtasida birorta qurilma bo'lishi shart. Chunki issiqlik o'z-o'zidan ishga aylanib qolmaydi.

Issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi qurilma issiqlik mashinasi deyiladi. Bug' va gaz turbinasi hamda mashinalari, ichki yonuv dvigatellari, turli xil raketa dvigatellari issiqlik mashinalari hisoblanadi. Issiqlik mashinalarining ishlashi davriy ravishda takrorlanadigan termodinamik jarayonlarga asoslangan sikldan iborat bo'lib, bu jarayonlarda issiqlik energiyasi avval sistemaga uzatiladi, u tashqi kuchlarga qarshi muayyan ish bajar-gandan so'ng, qoldiq issiqlik miqdori sistemadan sovitkichga chiqariladi.

Aylanma jarayonda ish jismiga uzatilgan to'la issiqlik miqdorining foydali ishga teng qismini jami issiqlik miqdoriga nisbati bilan o'lchanadigan kattalik issiqlik mashinasining termik *fik* deyiladi va u har doim birdan kichik bo'ladi:

$$\eta = \frac{Q_{foy.}}{Q_{is'it.}} = \frac{A_{foy.}}{A_{is'it.}} < 1 \quad (6)$$

Issiqlik mashinalarining foydali ish koeffitsienti ularning turiga va holatiga qarab, bir necha o'n foizdan 98,9 % gacha bo'lishi mumkin.

Ish jismi. Issiqlik energiyasini mexanik yoki boshqa turdagi energiyaga aylantirish uchun, ishga aylantiruvchi issiqlik mashinasidan tashqari, birorta ish bajaruvchi modda bo'lishi shart.

Energiyani bir turdan boshqa turga aylantirish jarayonida ish bajaradigan modda ish jismi deyiladi. Ish jismi deyilganda yoqilg'i bilan havo aralashmasi (benzin, mazut, kerosin, solyar moylari bug'i va gazning havo bilan aralashmasi), porox, suv bug'i, zarralar yoki plazma oqimi tushuniladi. Masalan, karbyuratorli ichki yonuv dvigatellarida benzin bug'i bilan havo aralashmasi bu ish jismi hisoblanadi.

Issiqlik hosil qilish uchun texnikada quyidagi gazlar eng ko'p ishlatiladi: O_2 — kislorod, N_2 — azot, H_2 — vodorod, CO — uglerod oksidi (is gazi), CO_2 — karbonat angidrid, CN_4 — metan (botqoq gazi), H_2O — suv bug'i, tabiiy va sun'iy gaz, gazlar aralashmasi — atmosfera havosi, propan, butan, asitilen va sh. k.

Issiqlikning uzatilish qonuniyatiga muvofiq isitkich sirti sovitkich sirtiga bevosita tegib, ma'lum issiqlik miqdorini uzatib turgandagina q_1 issiqlik miqdori sovitkichga o'tadi, ammo bunda issiqlik ish bajarmaydi. Har qanday issiqlik dvigateli isitkichning temperaturasi T_1 , sovitkichning temperaturasi T_2 dan katta, ya'ni

$T_1 > T_2$ shart bajarilganda ish bajarishi mumkin. Ish bajarilishi uchun ish jismi bo'lishi shart.

1.4. Ish jismining asosiy termodinamik parametrlari

Ish jismiga tashqaridan keltirilgan yoki undan chiqarilgan issiqlik hisobiga uning termodinamik parametrlari (bosimi, solishtirma hajmi va temperaturasi) ortishi yoki kamayishi mumkin. Masalan, katta bosimli bug'ni biror o'zgarmas hajmga joylashtirib, so'ngra bug' temperaturasi pasaytirilsa, uning bosimi kamayadi, aksincha bo'lganda esa temperaturasi bilan bosimi ham ortadi.

Sistema bilan kontaktdagi yoki sistema temperaturasidan ozgina farq qiladigan atrof-muhit elementini termodinamikada *issiqlik manbayi* deyiladi. Issiqlik manbayi o'zining issiqlik sig'imi bilan tavsiflanadi. Issiqlik manbayining temperaturasi sistemanikidan katta bo'lsa, *issiq*, past bo'lsa esa *sovuq* manba deb yuritiladi.

Holat parametrlari. Tashqi muhit bilan termodinamik sistemaning o'zaro ta'sirlashuvi natijasida sistemaning holat parametrlari o'zgaradi. Sistemaning holat parametrlarini ifodalashda holat parametrlari deb ataladigan fizik kattaliklar qabul qilingan.

Solishtirma hajm, bosim va temperatura (P, V, T) sistemaning holat parametrlari deyiladi. Berilgan hajmdagi gazga tashqaridan issiqlik miqdori uzatilsa (yoki undan chiqarilsa), sistemaning birdaniga uchala parametri (P, V, T) yoki ularning birortasi o'zgarishi mumkin. Gazga tashqaridan issiqlik kiritmasdan gaz egallagan hajmni kamaytirib (kengaytirib), uning holat parametrlarini o'zgartirish mumkin. Ma'lumki, real gaz siqilsa *isiydi*, aksincha, kengaytirilsa *soviydi*.

Bosim. Qattiq jism, suyuq va gazsimon moddalar, albatta, o'zi tayangan yuzaga va to'ldirgan hajm devori sirtiga tik (perpendikular) yo'nalishda ta'sir etadi. Bu kuch modda zarralarining uzatgan impulsi hisobiga paydo bo'ladi va u *bosim kuchi* deb yuritiladi. Gaz, suyuqlik molekulalarining idish devoriga bergan impulslari hisobiga bosim yuzaga keladi. *Suyuqlik va gaz molekulalari, plazma yoki zarralar oqimining idish devorining yuza hirligiga uzatgan ta'sir kuchi kattaligiga bosim* deyiladi.

$$P = \frac{F}{S}$$

(7)



Bosim SI o'lchov birliklari sistemasida Paskalda o'lchanadi.
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$; $1 \text{ kPa} = 10^3 \text{ Pa}$; $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ teng.

Texnik atmosfera $1 \text{ atm} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$;

$1 \text{ kgs/sm}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$;

$1 \text{ funt/dyuym} = 6,89 \cdot 10^3 \text{ Pa}$;

Fizik atmosfera $1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ mm.sim.ust.}$;

$1 \text{ atm} = 1013 \text{ gPa}$;

$1 \text{ mm.sim.ust.} = 133,32 \text{ Pa}$;

$1 \text{ mm.suv ust.} = 9,81 \text{ Pa}$;

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa} = 0,1 \text{ MPa}$.

Gaz molekulalarining xaotik harakati natijasida x , y , z o'qlari yo'nalishida bosimni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$P = P_x = P_y = P_z = \frac{n}{V} kT = \frac{R}{N_A} n_0 \left(\frac{m\bar{v}^2}{2} \right) = n_0 kT. \quad (8)$$

bunda $R = 8,31441 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$ — universal gaz doimiysi;

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ — Avogadro soni.

Termodinamik sistema parametri sifatida qabul qilingan *bosim absolut bosimdir*.

Temperatura (lot. *temperatura* — o'lchamdoshtlik, normal holat) — makroskopik sistemaning termodinamik muvozanat holatini tavsiflovchi kattalik. Shuning uchun temperatura sistemaning issiqlik holatini tavsiflaydigan asosiy holat parametrlaridan biri hisoblanadi. Jismning isiganlik darajasi temperatura orqali ifodalanadi. Jism tarkibidagi zarralarning tezligi qancha katta bo'lsa, ularning kinetik energiyasi ham shuncha katta bo'ladi. *Temperatura bu modda tarkibidagi zarralarning kinetik energiyasi o'lchovidir*, ya'ni

$$\frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (9)$$

bunda $k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ — Boltsman doimiysi;

$$E_k = \frac{m\bar{v}^2}{2} \text{ — zarraning kinetik energiyasi.}$$

Temperatura Selsiy yoki Kelvin shkalasida gradusda o'lchanadi.

Termodinamik jarayonlardagi temperatura Kelvin (K) shkalasi bo'yicha o'lchanadi. 1848-yili ingliz fizigi lord Kelvin tomonidan fanga «termodinamik temperatura» tushunchasi kiritilgan.

Demak, zarraning o'rtacha kinetik energiyasini absolut temperatura orqali ifodalash mumkin:

$$T = \frac{2}{3} \frac{E_k}{k} \quad (10)$$

Termodinamik temperatura shkalasining «nol» nuqtasi uchun ideal gaz molekulasining tartibsiz harakati go'yoki to'xtaydigan shunday temperatura qabul qilinganki, uni *absolut nol* deb ataymiz. O'zgarmas hajmdagi ideal gaz bosimi shu gazning absolut temperaturasi mutanosib, ya'ni $R \propto T$ bo'ladi. Shu qonuniyatga muvofiq gaz va suyuqlik termometrlari yaratilgan. Temperatura boshqa fizik kattaliklarni o'lchash yo'li bilan topiladigan (bevosita o'lchanmaydigan) kattalik.

Demak, *sistema temperaturasi o'lchash — bu gaz yoki suyuqlik hajmining o'zgarishini yoki termojuft uchlari orasidagi potentsiallar ayirmasini o'lchash demakdir.* Gaz va suyuqlik termometrlari hamda termojuftlar asosida yaratilgan termometrlar bunga misol bo'la oladi.

Kelvin (K) — termodinamik temperatura shkalasida absolut temperatura qiymati bo'lib, toza suvning uchlama nuqtasi, ya'ni muz, suv, va bug' o'zaro muvozanatda bo'ladigan holat temperaturasi $T = 273,16$ K deb qabul qilingan. Temperatura shkalasi qilib Selsiy (0°C), Kelvin (0°K), Farengeyt (0°F) va Renkin (R) graduslaridagi temperaturalar olingan. Bu temperatura shkalalarida normal bosim ostidagi suvning qaynash temperaturasi qilib 100°C , muzning eriy boshlash temperaturasi 0°C nuqtalari temperatura shkalasining tayanch (reper) nuqtalari qilib tanlangan. Bu temperatura shkalalari orasida quyidagi bog'lanish mavjud, ya'ni

$$\begin{aligned} T &= (t^{\circ}\text{C} + 273,16)\text{K}; \\ t^{\circ}\text{F} &= (1,8t^{\circ}\text{C} + 32); \\ t^{\circ}\text{C} &= (t^{\circ}\text{F} + 32)/1,8; \\ T^{\circ}\text{R} &= 1,8T \end{aligned} \quad (11)$$

Muhit temperaturasi simobli, spirtli termometrlar, fizik qonuniyatlar asosida yasalgan termojuft yordamida o'lchanadi (1.1-rasm).



1.1-rasm. Termometr.

Solishtirma hajm (v) deb birlik hajmni to'ldirgan modda miqdoriga aytiladi. Biror m massali bir jinsli moddaning solishtirma hajmi (m^3/kg) quyidagicha aniqlanadi:

$$v = \frac{V}{m} \quad (11)$$

Jismlar geometrik shaklidan qat'iy nazar muayyan hajmni egallaydi. Termodinamik jarayonlarda qatnashuvchi ish modda hajmi *kub metrda* o'lchanadi. Moddalarning birlik massasining hajmi bir xil bo'lmaydi, masalan, massalari bir xil bo'lgan suv, benzin, simob va shunga o'xshash boshqa moddalar turli hajmni egallaydi.

Jismning birlik massasi egallagan birlik hajmdagi modda miqdori zichlik deyiladi. Zichlik quyidagi ifodadan topiladi:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V}, \quad (12)$$

bunda ρ — modda zichligi, kg/m^3 ;

m va V — modda massasi va hajmi, kg va m^3 .

Nazorat savollari

?

1. Issiqlik va issiqlik mashinasi deb nimaga aytiladi?
2. Issiqlik mashinasiga qanday mashinalar kiradi?
3. Issiqlik mashinalarining ish jismi deganda nimani tushunasiz va unga nimalarni kiritish mumkin?
4. Issiqlik mashinalari qayerlarda qo'llaniladi?
5. Ishchi jismning holat parametrlariga nimalar kiradi?
6. Bosim, temperatura va solishtirma hajm deb nimaga aytiladi. P , T va V ning o'lchov birliklarini va ularning bog'lanishini yozing.
7. Absolut nol temperaturasiining ma'nosini ayting.

1.5. Ideal va real gazlar

Tabiatda mavjud bo'lmagan, molekulalari bir-biri bilan ta'sirlashmaydigan va ularning o'lchami hisobga olinmaydigan darajada kichik bo'lgan, ayrim nazariy masalalar yechimini topishda hamda hisoblashlarda modda sifatida qabul qilinib, istalgan bosim va temperaturadagi siqiluvchanligi birga teng bo'lgan gaz ideal gaz deyiladi.

Ideal gaz molekulalari o'zaro ta'sirlashmasa-da, nazariy jihatdan uning molekulalari idish devori sirtiga muayyan tarzda ta'sir etadi,

ya'ni impuls beradi. Faraz qilaylik, gaz molekulasi massasi m_0 , harakat tezligi v , hajm birligidagi molekular soni, ya'ni konsentratsiyasi $n = N/V$ bo'lsin. Unda, gaz molekulasi idish devoriga urilib unga bosim kuchini uzatadi. Ma'lumki, impulsning vaqt birligida uzatilishi kuchni yuzaga keltiradi. Shuning uchun yagona molekulaning idish devoriga ta'sir etgandan keyingi impulsi $2m_0v$ ga teng bo'ladi. Molekulalarning umumiy soni va ularning biror koordinata o'qiga proyeksiyasi e'tiborga olinsa, unda vaqt birligidagi uzatilgan impuls $2m_0v_xz$ ga teng bo'ladi. Idish devorining yuzasi S , molekula tezligi v va uning konsentratsiyasi n qancha katta bo'lsa, mos ravishda, ta'sirlashuvchi molekular soni ham ko'p bo'ladi, ya'ni $z \approx nv_xS$. O'rganilayotgan hajmdagi molekular ikki devor oralig'ida harakatlanayapti deb olinganligi sababli molekulalarning bitta devorga uzatgan impulsini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$2m_0v_xz = m_0nv_x^2S \quad (13)$$

Ta'kidlaganimizdek, (13) tenglamaning o'ng tomoni kuchni beradi. Bu kuchning kattaligini aniqroq topish uchun albatta, barcha molekular bir xil tezlikda harakatlanmasligini va ularning faqat bir qismi koordinata o'qlari x , y , z bo'yicha harakatlanishini e'tirof etish lozim. Unda v_x^2 ning o'rtacha qiymatidan va molekulalarning faqat uchdan bir qismi (ya'ni $\frac{1}{3}\sigma^2 = v_x^2$) faqat x o'qi bo'ylab, qolgan qismi esa y va z o'qlari bo'ylab harakatlanib, idish devoriga ta'sir uzatadi. Molekulalarning ta'sir kuchini yuqoridagilar asosida quyidagicha yozish mumkin:

$$F = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2S. \quad (14)$$

Demak, molekulalarning idish devoriga bergan bosimini topish uchun (14) ifodaning ikkala tomonini yuza kattaligi S ga bo'lamiz:

$$P = \frac{F}{S} = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2. \quad (15)$$

Tenglama (15) ideal gazning molekular-kinetik nazariyasi-ning asosiy formulasi bo'lib, ideal gazning idish devoriga bergan bosimini molekular-kinetik qonuniyat asosida tushuntirish va issiqlikni hisoblashda qo'llaniladi. Tenglama (15) ni ikkiga

ko'paytirib va bo'lib, soddalashtirib, ideal gaz bosimi gaz molekulasiining kinetik energiyasiga bog'liqligini ifodalovchi tenglik hosil qilinadi:

$$P = 2 \frac{1}{3} n \frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3} n \bar{E}_k \quad (16)$$

Issiqlik muvozanatidagi gaz molekulalari bir xil kinetik energiyaga ega bo'ladi. Gaz molekulalari konsentratsiyasi hisobga olinsa, (16) formulani qayta yozib, so'ngra gaz bosimi va hajmini tajribada topish mumkinligini e'tirof etib, o'rganilayotgan ixtiyoriy gaz massasi va molyar massasidan foydalanib, hajmini egallagan gaz molekulalari sonini topish mumkin, ya'ni

$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k \quad (17)$$

yoki

$$P \frac{V}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}_k \quad (18)$$

$$N = N_A \frac{m}{M} \quad (19)$$

Ideal gaz qonuniyatiga muvofiq, hamma gazlar temperatura muvozanati o'rinli bo'lganida, gaz bosimi bilan hajmi ko'paytmasining gaz molekulalari soniga nisbati o'zgarmas kattalik bo'lishi kerak. Unda, shu fikr asosida (18) ifodaning chap tomoni ham o'zgarmas kattalikka teng bo'ladi. Bu kattalik absolut temperaturaga mutanosibligini L. Boltsman aniqlagan, ya'ni

$$P \frac{V}{N} = kT, \quad (20)$$

bunda $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$.

(18) va (20) ifodalarning chap tomonlari tengligi asosida gaz molekulalarining kinetik energiyasi, keyin esa (18) dan foydalanib ideal gaz bosimi topiladi:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT \quad (21)$$

$$P = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}_k = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT \quad (22)$$

Demak, *gaz molekulalarining betartib (xaotik) ilgarilanma harakatining o'rtacha kinetik energiyasi absolut temperaturaga to'g'ri mutanosib ekan*. Gazning bosimi ham taqriban gaz temperaturasi ga mutanosib bo'la oladi.

Ideal gaz hajmi bilan bosimining ko'paytmasi universal gaz doimiysi bilan gazning absolut temperaturasi ko'paytmasiga teng bo'ladi, ya'ni

$$PV = RT \quad (23)$$

Bu tenglama ideal gazning holat tenglamasi deb ataladi. Ixtiyoriy gaz massasi uchun ideal gazning holat tenglamasini keltirib chiqarish uchun (22) ifodadagi gaz konsentratsiyasi ifodasini gaz massasi, molyar massasi va gaz egallagan hajmi hamda Avogadro soni bilan bog'lab, quyidagicha yozamiz:

$$PV = N_A \frac{m}{M} kT = \frac{m}{M} RT \quad (24)$$

Bu ifoda Mendeleyev-Klapeyron tenglamasi deyiladi. Tenglama (24) ning ikkala tomonini absolut temperaturaga bo'lib, gaz holat parametrlarining (istalgan holatlari uchun) o'zgarmas kattalik ekanligini B. P. Klapeyron isbotlagan. Bu kattalik *universal gaz doimiysi* deyiladi. Universal gaz doimiysi R ning fizik ma'nosini uning o'lchov birligini chiqarish yo'li bilan aniqlash mumkin, ya'ni

$$[R] = \left[\frac{PV}{T} \right] = \left[\frac{N}{m^3} \frac{m^3}{K} \right] = \left[\frac{N \cdot m}{K} \right] = \left[\frac{J}{mo'l \cdot K} \right]$$

Demak, *universal gaz doimiysi bir mo'l gazning temperaturasi bir Kelvinga o'zgarishida bajarilgan solishtirma ishga teng kattalikdir*.

Demak, gaz turini e'tibordan chetda qoldirmaslik uchun albatta, o'rganilayotgan gaz molyar massasi tenglamaga kiritilishi shart ekanligini D. I. Mendeleyev isbotlagan. Gazning molekular massasi son jihatidan atom og'irligida ifodalangan yagona molekula massasidir. Mo'l o'miga kilomo'l ham ishlatiladi. Masalan, 1 mo'l kielorod 32 kg kelsa, 1 mo'l vodorod 2 kg, 1 mo'l suv 18 kg va h.k. bo'ladi. Chunki bu moddalarning molyar massalari 32 va 2 hamda 18 birlikka teng.

Gazning molyar massasi va hajmi orqali (23) ni quyidagi ko'rinishda ifodalash mumkin, ya'ni

$$PV_{\mu} = R_{\mu} T, \quad (25)$$

bunda $V_{\mu} = \mu V$ — gazning molyar hajmi;

$$R_{\mu} = \mu R = \mu R_0 = 8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Gazlarning molekulari soni va massasi o'zaro teng bo'lganida, ularning zichliklari va molyar massalari ham teng bo'ladi. Unda, gazning solishtirma hajmi bilan molyar massasining ko'paytmasi o'zgarmas kattalik bo'ladi, ya'ni

$$\mu_1 v_1 = \mu_2 v_2 = \dots = \mu_n v_n = V_{\mu} = \text{const.} \quad (26)$$

Demak, istalgan gaz va gazlar aralashmasi yoki modda uchun $V_{\mu} = 22,4 \text{ m}^3/\text{molda}$ teng bo'lishi asosida zichlik, molyar massa va bir mol modda egallagan hajmni topish mumkin bo'ladi. Masalan, azotning zichligi $\rho_{N_2} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ bo'lganligi uchun $v_{N_2} = 1/\rho_{N_2} = 0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$ bo'ladi. Azotning molyar massasi $\mu_{N_2} = 28$. Uning bir moli, ya'ni ikkita atomi egallagan molyar hajmi quyidagiga teng bo'ladi:

$$V_{\mu} = v_{N_2} \mu_{N_2} = 0,8 \cdot 28 = 22,4 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Avogadro qonuniga muvofiq, normal sharoit uchun ideal gazning molyar hajmi $V_{\mu} = \mu V_0$ da teng. Unda, $V_{\mu} = 22,4 \text{ m}^3/\text{kmol}$.

Gaz bosimi $P_0 = 101325 \text{ Pa}$, temperaturasi $T_0 = 273,16 \text{ K}$, hajmi $V_0 = 22,4 \text{ m}^3$ bo'lgan holatdagi gazning zichligini quyidagicha yozish mumkin:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{RT_0} = \frac{\mu}{22,4}. \quad (27)$$

Unda, istalgan temperatura va bosim ostidagi ixtiyoriy gaz zichligini quyidagi ifodadan topiladi, ya'ni

$$\rho = \frac{\mu}{22,4} \frac{P T_0}{P_0 T}. \quad (28)$$

Avogadro qonuniga muvofiq bir xil bosimi va temperaturadagi hamma gazlar o'zaro teng bo'lgan hajmlarda bir xil miqdordagi molekular soni joylashadi. Gazdagi molekular soni

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}$$

Masala. Uzunligi 1,2 m va ichki diametri 25 sm bo'lgan ballonda 7 MPa bosim ostida 300 K kislorod joylashgan. Shu ballondagi kislorod massasini aniqlang.

Yechimi. Mendeleyev-Klapeyron tenglamasidan gaz massasini topamiz va unga masala shartidagi qiymatlarni qo'yib hisoblaymiz.

$$m = \mu \frac{PV}{RT} = 32 \frac{7 \cdot 10^6 \cdot 0,08478}{8,31 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^2} = 7,6 \text{ kg.}$$

Nazorat savollari

?

1. Gaz deb nimaga aytiladi? Ideal va real gaz deb nimaga aytiladi?
2. Ideal gazning yuza birligiga ta'sir etuvchi kuch va bosim formulalarini yozing.
3. Ixtiyoriy gaz uchun Mendeleyev-Klapeyron tenglamasini modda miqdori, molekulalar soni bilan bog'lab yozing va uni tushuntirib bering.
4. Bir mo'l modda, Avogadro sonining fizik ma'nosini ayting.
5. Normal sharoitda gaz qancha hajmni egallaydi?

1.6. Gaz qonunlari

Gazning termodinamik parametrlari uning bir holatdan boshqa holatlarga o'tganda o'zgaradi. Bunda gazning bosimi, hajmi va temperaturasi turli qiymatlarni qabul qiladi. Bu bog'lanishlarni gaz qonunlari o'rganadi.

Ideal yoki juda siyraklashgan gaz parametrlarining birortasi o'zgarmas, qolgan ikkitasi o'zgaruvchan bo'lgan holatlardagi o'zaro miqdoriy bog'lanishlar **gaz qonunlari** deb yuritiladi. Bu qonunlarni o'rganish uchun gazning parametrlaridan biri ($R = \text{const}$, $V = \text{const}$ yoki $T = \text{const}$) o'zgarmas saqlanadi.

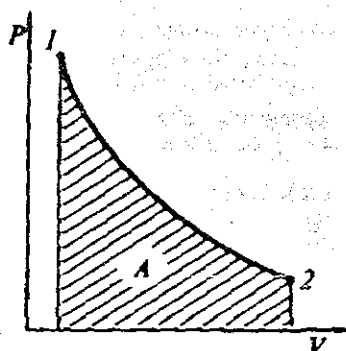
Masalan, $T = \text{const}$ bo'lganda ideal gaz temperaturasi o'zgarmas saqlash uchun undan ortiqcha issiqlik miqdori tashqi muhitga uzluksiz chiqarib turiladi. Uning boshlang'ich va oxirgi holatlaridagi parametrlari mos ravishda, P_1 , V_1 , T_1 va P_2 , V_2 , T_2 bo'lsin. Shu gaz uchun holat tenglamalarini yozib, ularning nisbatlaridan Boyle-Mariott qonuni tenglamasini topamiz, ya'ni

$$P_1 V_1 = RT_1 \text{ va } P_2 V_2 = RT_2$$

$$P_1 V_1 / P_2 V_2 = \text{const}$$

yoki

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots = P_n V_n = \text{const} \quad (29)$$



1.2-rasm. Izotermik jarayonning PV diagrammasi.

Bu qonun *izotermik jarayon* deyiladi.

Izotermik jarayon *grafigi* (diagrammasi) — bu gaz bosimi bilan hajmi orasidagi bogʻlanishni tushuntiruvchi *izoterma* boʻlib, uning koʻrinishi *giperbola* shaklida boʻladi (1.2-rasm). Izotermik jarayonda bajarilgan ish kattaligi son qiymati jihatidan chiziqli yuzaga teng.

$P = \text{const}$ boʻlganda, yaʼni izobarik jarayondagi gazning ikkita holati uchun holat tenglamalari

tuziladi, soʻngra ularning nisbatlaridan J. Gey-Lyussak (1802-y.) qonuni tenglamasi topiladi:

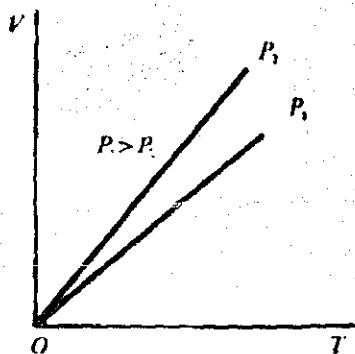
$$P_1 V_1 = RT_1 \text{ va } P_2 V_2 = RT_2$$

$$V_1 / V_2 = T_1 / T_2$$

yoki
$$V_1 / T_1 = V_2 / T_2 = \dots = V_n / T_n = \text{const.} \quad (30)$$

Gazning bunday qonuniyat asosida oʻzgarishi *izobarik jarayon* deyiladi va uning grafigi *izobara* (1.3-rasm) deb yuritiladi.

Izobarik jarayonning VT diagrammasidan koʻrinadiki, izobara koordinata boshidan boshlanmaydi. Chunki gaz absolut nol gradusda ham muayyan hajmga ega boʻladi.



1.3-rasm. Izobarik jarayonning PV diagrammasi.

Gazning temperaturasi ortgan sayin izobara grafiklarining tikligi kamayib boradi. Bu bosimni temperaturaga taqriban mutanosibligini koʻrsatadi va past temperaturalarda izobara chizigʻi koordinata boshidan oʻtadi.

Demak, $P = \text{const}$ ostidagi *ixtiyoriy massali gaz hajmining temperaturaga nisbati oʻzgarmas kattalik* ekan. Issiqlik energiyasi oʻzgarmas hajmdagi gazga kiritilsa, unda gaz parametrlaridan

bosim va temperatura o'zgaruvchan bo'la oladi. Bu jarayon *izoxorik* jarayon deb ataladi.

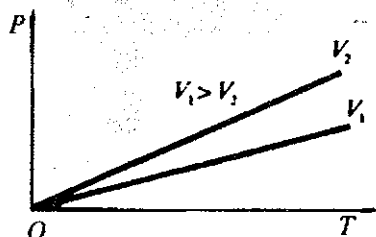
Gazning ixtiyoriy ikkita holatlari uchun holat tenglamalarini tuzib, so'ngra ularning nisbatlaridan J. Sharl qonuni hosil qilinadi:

$$P_1 V_1 = RT_1 \text{ va } P_2 V_2 = RT_2$$

$$P_1 / P_2 = T_1 / T_2$$

yoki
$$P_1 / T_1 = P_2 / T_2 = \dots = P_n / T_n = \text{const} \quad (31)$$

$V = \text{const}$ bo'lgan gazga tashqaridan issiqlik kiritilsa yoki tashqi kuchlar ta'sirida gaz siqilsa (yoki kengaysa), unda gaz qiziydi (soviydi). Bunda ortiqcha issiqlik gazdan chiqarilmaganligi uchun gaz molekulalarining tezligi ortadi, ya'ni bosimi va temperaturasi ko'tariladi. Bu jarayon grafik shaklida PT koordinatasida ifodalansa, uning *izoxorasi* izobarik jarayon grafigiga o'xshash bo'ladi (1.4-rasm).



1.4-rasm. Izoxarik jarayonning PV diagrammasi.

Absolut nol temperaturadagi gaz bosimi nolga teng bo'lsa-da, hajmi mutlaqo nolga teng bo'lmaydi. Diagrammadan ko'rinadiki, gaz hajmi qancha katta bo'lsa, uning bosimini muayyan qiymatga yetkazish uchun unga ko'proq issiqlik kiritish yoki gazni ko'proq siqish kerak bo'ladi.

Demak, $V = \text{const}$ bo'lganda berilgan ixtiyoriy massali gaz bosimining temperaturasi ga nisbati o'zgarmas kattalik ekan.

Siyraklashtirilgan real gaz ideal gaz qonunlariga bo'ysunadi. Bosim ortib borishi bilan bu qonunlar bajarilmaydi. Muhandislik hisoblarida bu holatni e'tiborga olish zarur bo'ladi.

1.7. Gazlar aralashmasi va uning tarkibi.

Dalton qonuni

Issiqlik mashinalarining ish moddasi sifatida gazlar aralashmasi ishlatiladi. Mashinalarni to'g'ri ishlatish uchun albatta, gazlar aralashmasining issiqlik hisobini bilish kerak bo'ladi. Buning uchun gazlar aralashmasining tarkibi va ularning miqdori aniqlanadi.

Gaz aralashmasi komponentlari o'zaro kimyoviy reaksiyaga kirishmaydigan bo'lsa, unda bu aralashma ideal gaz qonuniga bo'ysunadigan gaz bo'la oladi. Gaz aralashmasi tarkibiga kiruvchi turli-tuman gazlarning har biri muayyan hajmni egallaydi va idish devoriga parsial bosim beradi. Gaz aralashmasi bir idishda bo'lgani uchun har bir komponent temperaturasi aralashma temperaturasiga teng bo'ladi. Gaz aralashmasining bosimi, *Dalton qonuniga* muvofiq, har bir komponentning parsial bosimlari yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (32)$$

bunda n — komponentlar soni.

Amaga qonuniga muvofiq gaz aralashmasining egallagan hajmi har bir komponent egallagan hajmlarining yig'indisiga teng, ya'ni

$$V = v_1 + v_2 + \dots + v_i = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (33)$$

bunda n — komponentlar soni.

Parsial bosim va hajm — bu yagona gaz turining idish devoriga bergan bosimi va egallagan hajmi.

Muhandislik hisoblashlarida odatda, gaz aralashmasi tarkibiga kiruvchi gazlarning ta'sirini massa g , yoki hajm v_i ulushlarida olinadi.

Gaz aralashmasi tarkibidagi i -chi komponent massasi M_i ning aralashmaning umumiy massasi M ga nisbatiga *massa ulushi* deyiladi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$g_i = M_i/M. \quad (34)$$

Gaz aralashmasi tarkibidagi i -komponent hajmi V_i ning aralashmaning umumiy hajmi V ga nisbati *hajm ulushi* deyiladi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$r_i = V_i/V. \quad (35)$$

Gaz aralashmasidagi hamma komponentlar yig'indisi 100% bo'lsa, unda massa va hajm ulushlarini foizlarda hisoblashda mutanosiblik qonuniyatidan foydalaniladi.

Aralashma tarkibidagi i -gaz komponentining kilomo'l soni N_i ni aralashma kilomo'l soni N ga nisbatiga *molyar ulushi* deyiladi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$n_i = N_i/N, \quad (36)$$

bunda N_i — aralashma tarkibidagi yagona komponentning kilomo'l soni.

Aralashmadagi yagona komponentning kilomo'l sonini hisoblash uchun o'rganilayotgan gazning bir kilomo'l egallagan hajmi V_i ni shu komponent molyar hajmi v_{μ_i} ga nisbatidan foydalaniladi, ya'ni

$$N_i = V_i/v_{\mu_i} \quad (37)$$

Xuddi shunday, gaz aralashmasi uchun *kilomo'l soni* quyidagicha ifodalanadi:

$$N = V/v_{\mu} \quad (37)$$

bunda v_{μ} va v_{μ_i} — gaz aralashmasi va undagi yagona komponentning molyar hajmlari.

$r_i = n_i$ tengligidan ko'rinadiki, ideal gazlar uchun *molyar va hajmiy ulushlari o'zaro teng bo'lar ekan*.

Demak, Avogadro qonuniga muvofiq, bir xil bosim va temperaturadagi barcha gazlar, o'zaro teng bo'lgan hajmga bir xil, ya'ni Avogadro soniga teng bo'lgan molekulalar soni joylashar ekan.

Hajm bo'yicha gazlarni taqqoslash uchun muayyan temperatura va bosimdagi aralashmani tashkil qiluvchi gaz komponentlarining parsial hajmlari aniqlanadi. Ma'lumki, aralashma temperaturasi uning komponentlari temperaturasi bilan bir xil bo'lishini hisobga olinsa, istalgan gaz uchun Boyle-Mariott qonunini qo'llash mumkin. Unda, bu qonunni quyidagicha ta'riflash mumkin: *o'zgarmas temperatura ostidagi gaz bosimining muayyan hajmiga ko'paytmasi o'zgarmas kattalikdir*.

Bu qonuniyatni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$R_1 V_1 = P_1 V_1; \quad R_2 V_1 = P_2 V_2; \quad R_n V_1 = P_n V_n.$$

Bundan gazning V_1, V_2, V_n larini topib, hajmlar yig'indisini quyidagicha ifodalaymiz:

$$V_1 + V_2 + \dots + V_n = \frac{V_1}{P_1} (P_1 + P_2 + \dots + P_n) \quad (39)$$

bunda $V_1 + V_2 + \dots + V_n = V_1$ teng, chunki $P_1 + P_2 + \dots + P_n = P_1$.

Gaz aralashmasi va umuman aralashmaning yagona komponenti massasini hisoblash uchun aralashma zichligi ρ , uning egalagan umumiy hajmi V bilan aralashmaning kilomo'l soni N va molyar massasi μ orasidagi bog'lanish quyidagicha ifodalanadi:

$$M = \rho V = \mu N = \frac{8314.4}{R} N = \mu \frac{V}{22.4} \quad (40)$$

bunda ρ — aralashma zichligi, kg/m^3 .

Gaz aralashmasining o'rtacha molyar massasi μ_a va solishtirma gaz doimiysi R_a ni e'tiborga olinsa, gazning holat tenglamasini gaz tarkibidagi yagona komponent va aralashma uchun yozish mumkin:

$$P_i V = M_i R_i T \quad \text{va} \quad PV = M R_a T. \quad (41)$$

Unda, Dalton qonuniga muvofiq oxirgi ifodadan gaz aralashmasi uchun R_a va μ_a quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$R_a = \sum_i R_i g_i \quad \text{va} \quad \mu_a = \frac{8314.4}{\sum_i R_i g_i} \quad (42)$$

Universal gaz doimiysi va aralashmaning molyar massasini aniqlashda (42) formuladan foydalanish mumkin. Bu formula gaz aralashmasining tarkibiy qismi berilganda aniqroq natijalarni beradi. Aralashma tarkibi foizlarda berilganida, yuqoridagilar asosida quyidagini yozish mumkin:

$$\sum_i g_i = \frac{\sum_i r_i \mu_i}{\mu_a},$$

bunda $\sum_i g_i = 1$ bo'lgani uchun

$$\mu_a = \sum_i r_i \mu_i. \quad (42)'$$

Yuqorida keltirilganlarga muvofiq har bir komponent uchun R_a quyidagiga teng bo'ladi

$$R_a = \frac{1}{\sum_i \frac{r_i}{\mu_i}} \quad (42)''$$

MASALALAR

1-masala. Yoqilg'i yoqilganida hajm birligiga mos 11,5 % karbonat anhidrid, 8,5 % kislorod, 0,35 % is gazi, 79,65 % azot oksidi hosil bo'lgan. Yonish mahsulotidagi moddalarning massa ulushlarini, o'rtacha molyar massasini va universal gaz doimiysini aniqlang.

Yechimi. Keltirilgan (42)' ifodadan foydalanib μ_a hisoblanadi:

$$\mu_a = 0,115 \cdot 44 + 0,085 \cdot 32 + 0,0035 \cdot 28 + 0,7965 \cdot 28 = 30,18.$$

Normal sharoit uchun aralashmaning zichligi:

$$\rho_a = \frac{\mu_a}{22,4} = \frac{30,18}{22,4} = 1,3473 \text{ kg/m}^3.$$

Yonish mahsuloti tarkibidagi komponentlar ulushlari massalarini aniqlashda (40—42) ifodalardan foydalanamiz:

$$g_i = r_i \frac{\mu_i}{\mu_a} = r_i \frac{\rho_i}{\rho_a} = r_i \frac{R_i}{R_a}$$

$$g_{CO_2} = r_i \frac{\mu_i}{\mu_a} = 0,115 \frac{44}{30,18} = 0,167; \quad g_{CO} = 0,0035 \frac{28}{30,18} = 0,00325;$$

$$g_{O_2} = 0,085 \frac{32}{30,18} = 0,0901; \quad g_{N_2} = 0,7965 \frac{28}{30,18} = 0,739.$$

$$R_a = \frac{8314,4}{30,18} = 275,5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}.$$

2-masala. Tarkibi 19% karbonat anhidrid, 69,5% azot oksidi, 13% kisloroddan tashkil topgan gazlar aralashmasi 300 K temperaturada 1,8 m³ hajmni egallashi uchun bu aralashma bosimini qanday qiymatgacha orttirish kerak bo'ladi? Aralashma massasi 4,7 kg.

Javobi: $R_a \approx 0,26 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$; $P \approx 183 \text{ kPa}$.

Nazorat savollari

?

1. Ideal gaz qonunlari deyilganda nimani tushunasiz va u real gaz qonunlaridan nima bilan farq qiladi?
2. Gaz qonunlariga qanday qonunlar mansub? Ularning tenglamalarini yozing va grafiklarini chizing.
3. Dalton va Amaga qonunlarining fizik ma'nosini ayting.

II BOB. TERMODINAMIKA QONUNLARI

2.1. Termodinamikaning birinchi qonuni va uning tenglamalari

Termodinamik sistemaning ish bajarishi uchun unga ma'lum miqdordagi issiqlik energiyasi kerak bo'ladi. Ma'lumki, termodinamik jarayonda qatnashayotgan energiya bir turdan ikkinchisiga aylanishi ish bilan tavsiflanadi. Sistema ish bajarishi uchun uning ichki energiyasi o'zgarishi shart. Ichki energiya o'zgarishi tashqi muhit ta'siriga, unga uzatilgan issiqlik miqdori Δq ga bog'liq, ya'ni

$$\Delta q = \Delta u + \Delta A + \Delta A', \quad (43)$$

bunda Δq — moddaga berilgan (yoki undan chiqarilgan) issiqlik miqdori, J;

ΔA — sistema hajmining o'zgarishi hisobiga bajarilgan mexanik ish, J;

$\Delta A'$ — nomexanik ish, J.

(43) tenglamadagi nomexanik ish $\Delta A'$ ni hisobga olmagan holda sistema ichki energiyasi hamda solishtirma issiqlik sig'imi orqali termodinamikaning birinchi qonuni quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$\left. \begin{aligned} \Delta q &= \Delta u + \Delta A = \Delta u + P \Delta V \\ \Delta q &= c_v \Delta T + P \Delta V \end{aligned} \right\} \quad (44)$$

Kimyoviy reaksiyalar *ekzotermik* (yunon. *exo* — tashqariga va *therme* — issiqlik) va *endotermik* (yunon. *endon* — ichiga) bo'lishi mumkin. Shuning uchun kimyo texnologiyasi sohasida (43) tenglama yuqoridagi ko'rinishda qo'llaniladi.

Demak, termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha ta'riflash mumkin: *sistemaga uzatilgan issiqlik miqdori shu sistema ichki energiyasining o'zgarishiga va tashqi kuchlarga qarshi bajarilgan foydali ishga sarflanadi.*

Termodinamik sistemaga q issiqlik miqdori berilsa, bajarilgan ish ishorasi musbat, aksincha chiqarilsa — manfiy hisoblanadi. Termodinamik sistemaning muhit bilan o'zaro ta'sirlashish davrida tashqariga issiqlik miqdori chiqarishi (qabul qilishi) mumkin. Chizmalarda issiqlik oqimi yo'nalishi ichkariga musbat va tashqariga

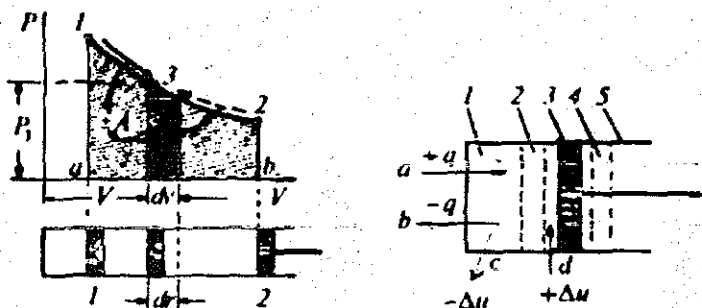
esa manfiy qilib belgilanadi. Masalan, ichki yonuv dvigateling porsheni quyi qo'zg'almas nuqtasi tomonga harakatlanganda, unda bajarilgan ish musbat ishorali, ya'ni $A > 0$, aksincha, porshen ish jismini siqayotganida esa — manfiy, ya'ni $A < 0$ bo'ladi.

Sistema ish bajarganda uning ichki energiyasi ortadi yoki kamayadi. Bunda ishning ishorasi sistemadagi q issiqlik miqdori yo'nalishiga bog'liq bo'ladi. Masalan, yonish mahsuloti o'z bosimi ta'sirida yonish kamerasida kengiyayapti. Yonish mahsuloti (sistema) ning ichki energiyasi kamayadi, chunki tashqi muhit (silindr devori) bilan issiqlik almashinadi. Aksincha, ish jismi (masalan, benzin bug'i bilan atmosfera havosi aralashmasi) porshen kallagi bilan chegaralangan, yonish kamerasida, mexanik kuch ta'sirida porshen yuqoriga ko'tirilib, aralashmani siqadi. Natijada uning ichki energiyasi ortadi va q ning ishorasi musbat bo'ladi.

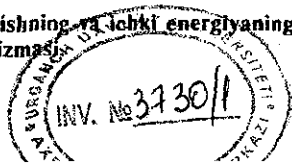
Sistemada sodir bo'ladigan termodinamik jarayon turiga qarab, termodinamikaning birinchi qonuni tenglamasidagi U va PV ning ishoralari ham o'zgaradi. Termodinamik jarayonda sistema holat parametrlari o'zgarishining o'zaro bog'lanishi P , V — koordinatasida diagramma ko'rinishida ifodalanadi (2.1-rasm).

Termodinamik jarayon sodir bo'layotgan sistemaning hajmi V_1 va V_2 ortganida, uning bosimi P_1 dan P_2 qadar kamayadi yoki aksincha bo'ladi. Bunda hajmning o'zgarishi $dV > 0$ bo'lgani uchun unda *kengayish jarayoni* sodir bo'ladi. Aksincha, ish jismi 2 dan 1 nuqtagacha siqilsa (2.1-rasm) ya'ni $dV < 0$ bo'lsa, *siqish jarayoni* deyiladi.

Bunda kengayish va siqish jarayonlarida bajarilgan ish ishorasi, mos ravishda, «musbat» va «manfiy» bo'ladi. Siqish jarayonida



2.1-rasm. Termodinamik jarayonda bajarilgan ishning va ichki energiya ning yo'nalishini aniqlash chizmasi



ishning ishorasi manfiy bo'lishiga sabab, tashqi kuch hisobiga ish moddasi siqiladi va bunda sistemaning ichki energiyasi ortadi.

Faraz qilaylik, silindrdagi 1 kg ish jismi hajmining ortishi hisobiga elementar ish bajarilsin, ya'ni:

$$\Delta A = P \Delta l, \quad (45)$$

bunda P — gaz(ish jismi)ning bosimi, Pa;

S — porshen kallagi yuzasi, m^2 ;

Δl — porshen yo'li, m.

Ma'lumki, $S \Delta l = \Delta V$ ga teng. Shuning uchun elementar ishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\Delta A = P \Delta V. \quad (46)$$

(46) formula muhit bosimi ish moddasi bosimiga teng bo'lgan muvozanatli jarayon uchun o'rinlidir.

Sistema bajargan ish kattaligi son qiymati jihatidan PV diagrammasidagi 1, 2, V_2 , V_1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng. Elementar bajarilgan ish esa elementar yuzaga teng bo'ladi (ikki marta chiziqlar tortilgan yuzacha).

Yuza noma'lum, bosim va hajm qiymatlari esa 1, 2 nuqtalar oralig'ida ma'lum bo'lganida, ish quyidagicha aniqlanadi:

$$A = P \Delta V = P(V_2 - V_1) \quad (47)$$

PV diagrammadan ishni topishda, real sharoitlarda sistemaga ish moddasi kiritish va undan ish bajarmagan qoldiq qismini chiqarish uchun sarf bo'ladigan isroflar e'tiborga olinmagan. Berk termodinamik jarayon uchun mazkur ish ifodasi to'g'ri bo'ladi. Ish ishorasi berk termodinamik jarayonda PV diagramma (2.1-rasm) bo'yicha 1, 2 yo'nalishda ΔV ning o'zgarishi musbat ishorali va, aksincha, 2, 1-yo'nalishda — manfiy ishorali bo'ladi. Shuning uchun berk sistemada bajarilgan ish nolga teng.

Bajarilgan ish SI o'lchov birligi sistemasida Joule (J) da va texnik sistemada esa kilogrammometr (kGm) da o'lchanadi.

Termodinamikaning qonunlari ko'plab olimlar tomonidan nazariy va amaliy jihatdan o'rganilgan va uni turlicha ta'riflaganlar. Termodinamika birinchi qonunining ayrim ta'riflarini keltiramiz:

a) Birinchi turdagi abadiy (perpetuum) dvigatelning (mobe) bo'lishi mumkin emas. Yo'qdan energiya hosil qiluvchi dvigatel birinchi turdagi perepetuum mobeli deb yuritiladi.

b) Energiya o'z-o'zidan paydo ham, yo'q bo'lishi ham mumkin emas.

v) Har qanday shakldagi harakat boshqa shakldagisiga aylana oladi. Bu ta'rif shuni tasdiqlaydiki, energiya yo'q bo'lmaydi, ammo boshqa turdagi energiyaga aylanishi mumkin.

g) Issiqlik va ish energiyani bir jismdan boshqalariga uzatishning yagona shaklidir. Termodinamik sistemaning muhit bilan issiqlik va ish almashinuvi hisobiga ichki energiyasi o'zgaradi.

d) Sistemaning ichki energiyasi bu jami tashqi ta'sirlar tufayli sistemada uyg'otilgan energiyalar yig'indisi. U biror yo'l bilan bir holatdan normal holatga o'tadi.

2.2. Termodinamikaning birinchi qonunining talqini

Ma'lumki, A. Eynshteyn qonuniga muvofiq ($E = mc^2$) har qanday energiya massaga mutanosib. Buni umumiyroq qilib *massa va energiyaning saqlanish va aylanish qonuni* deb yuritiladi.

Termodinamikaning birinchi qonuni massa va energiyaning saqlanish va aylanish qonunining issiqlik hodisalariga qo'llanilishini xususiy holidir. Chunki, energiya bordan yo'q bo'lmaydi, yo'qdan paydo bo'lmaydi, faqat bir turdan ikkinchi turga aylanadi.

Termodinamik sistemaning parametrlari sistemaga Δq issiqlik miqdori kiritilganida (chiqarilganida), yoki mexanik ta'sir hisobiga o'zgaradi, ya'ni sistema muvozanat holatidan chiqadi yoki muvozanat holatiga qaytadi. Masalan, birorta qattiq jism Δq issiqlik miqdorini yutgandan so'ng, uning parametrlaridan ayrimlari (hajmi, temperaturasi) o'zgaradi, ya'ni hajmi dV ga, temperaturasi ΔT ga ortadi. Agar qattiq jism o'rniga gaz yoki suyuqlik olinsa, termodinamik sistemaning uchala parametrlari, ya'ni bosim P , hajm V va temperatura T ham o'zgaradi.

Demak, sistemaning temperaturasi ΔT ga ortsa, uni tashkil etgan zarralarning kinetik energiyasi ham ortadi; hajmi ΔV ga kattalashganida zarralar orasidagi bog'lanish kuchlari kamaysada, potensial energiyasi ortadi. Chunki potensial energiya zarralar oralig'idagi masofaga bog'liq. Sistemada bunday holatning paydo bo'lishi uning ichki energiyasi Δu ni o'zgartiradi.

Sistema muvozanat holatiga qaytish jarayonida tashqi muhit bilan uzluksiz ta'sirlashadi va unga P bosim bilan ta'sir ko'rsatib, tashqi kuchlarga qarshi ish bajaradi.

Sistemada sodir bo'layotgan termodinamik jarayon turiga mos ravishda (46) ifodadagi uchala hadlarning qiymatlari musbat va manfiy ishorali hamda nolga teng bo'lishi mumkin.

2.3. Moddaning ichki energiyasi va issiqlik sig'imi

Termodinamik sistema muayyan ichki energiyaga ega bo'lgan ko'psonli atom va molekulalardan tashkil topadi va ular doimo o'zaro ta'sirlashadi. Demak, sistemaning ichki energiyasi bu atom hamda molekulalarning o'zaro ta'sirlashish va issiqlik harakati energiyalarining yig'indisidan iboratdir.

Sistema ish bajara olishi uchun uning energiyasi muvozanat holatidagi energiyadan katta bo'lgan ichki energiyaga ega bo'lishi shart. Ichki energiya sistemaga tashqaridan kiritiladigan qo'shimcha energiya yoki mexanik ta'sir hisobiga o'ttiriladi. Bu kiritilgan energiya hisobiga sistema tashqi kuchlarga qarshi dA ish bajarsa, uning ichki energiyasi ΔU ham o'zgaradi, ya'ni

$$\Delta U = \Delta U_2 - \Delta U_1 = \Delta q - \Delta A. \quad (48)$$

Agar sistema avvalgi holatiga qaytsa, uning ichki energiyasi o'zgarmaydi, ya'ni

$$\Delta q = \Delta A. \quad (49)$$

Siyraklashgan gaz molekulalari ideal gaz molekulalari singari juda ham kam ta'sirlashganligi sababli, ularning ichki energiyasi o'zgarishini kinetik energiyasining o'zgarishiga teng deb qabul qilish mumkin. Shuning uchun ΔU faqat temperaturaga bog'liq bo'ladi, ya'ni

$$\Delta U = c_v T, \quad (50)$$

bunda c_v — o'zgarmas hajmdagi gazning solishtirma issiqlik sig'imi.

Turli xil moddalarni bir xil temperaturagacha isitish uchun ularning har biriga turlicha miqdordagi issiqlik energiyasini uzatish zarur bo'ladi. Bu hol moddaning agregat holatiga va tuzilishiga ham bog'liq.

Modda hirtlik massasini 1 K isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori shu moddaning issiqlik sig'imi deyiladi. Bunda modda Δq issiqlik miqdorini yutishi natijasida uning temperaturasi T_1 dan T_2 gacha ortadi.

$$\Delta q = cm(T_2 - T_1)$$

Birlik moddaning *o'rtacha issiqlik sig'imi* quyidagicha ifodalanadi:

$$\bar{c} = \frac{\Delta q}{T_2 - T_1} \quad (51)$$

Aralashmaning massaviy solishtirma issiqlik sig'imi — bu aralashma temperaturasini 1 K isitishga kerak bo'lgan issiqlik miqdori bo'lgani uchun, uning kattaligi aralashma tarkibiga kiruvchi komponentlar issiqlik sig'imi yig'indisiga teng bo'ladi:

$$c_a = \sum_i c_i m_i \quad (51)'$$

Birlik moddani 1 K isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori *haqiqiy issiqlik sig'imi* deyiladi:

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta T} \quad (52)$$

Moddaning birlik massa temperaturasini bir gradus orttirish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori solishtirma issiqlik sig'imi deyiladi.

Solishtirma issiqlik sig'imi massa, hajm va boshqa o'lchov birliklarida ifodalanadi:

a) *massa solishtirma issiqlik sig'imi*:

$$c_m = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta q}{T_2 - T_1} \quad (53)$$

c_m SI o'lchov birligida J/kg · K da o'lchanadi.

b) o'zgarmas hajmdagi (1 m³) moddaga uzatilgan issiqlik miqdorining shu modda temperaturasini bir gradus o'zgarishiga nisbati bilan ifodalanadigan fizik kattalik *hajmiy solishtirma issiqlik sig'imi* deyiladi:

$$c_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta q}{T_2 - T_1} \quad (54)$$

c_v SI o'lchov birligida J/m³ · K bilan o'lchanadi.

v) Bir mo'l modda miqdorini isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori *mo'l solishtirma issiqlik sig'imi* deyiladi va u quyidagicha ifodalanadi:

$$c_{\mu} = \frac{\mu}{m} \cdot \left(\frac{\Delta q}{T_2 - T_1} \right) \quad (55)$$

c , SI o'lchov birligida J/kmo'l · K da o'lchanadi.

Moddaning issiqlik sig'imi shu moddaning qanday termodinamik jarayonda qatnashuviga ham bog'liq bo'ladi. Chunki modda temperaturasi o'zgarishi unga uzatilgan issiqlik miqdori o'zgarmas bo'lganida faqat termodinamik jarayon turiga bog'liq bo'ladi. Shuning uchun ham *moddaning issiqlik sig'imini termodinamik jarayon funksiyasi* deb qarash mumkin.

O'zgarmas hajmdagi birlik modda miqdoriga uzatilgan Δq issiqlik miqdorining shu modda temperaturasi o'zgarishiga nisbati bilan ifodalanadigan fizik kattalik *o'zgarmas hajmdagi moddaning solishtirma issiqlik sig'imi* deyiladi.

$$c_v = \frac{\Delta U}{T_2 - T_1} \quad (56)$$

O'zgarmas bosim ostidagi birlik modda miqdoriga uzatilgan Δq issiqlik miqdorining shu modda temperaturasi o'zgarishiga nisbati bilan ifodalanadigan fizik kattalik *o'zgarmas bosimdagi moddaning solishtirma issiqlik sig'imi* deyiladi.

$$c_p = \frac{\Delta q}{T_2 - T_1} \quad (57)$$

Demak, sistemaga keltirilgan Δq issiqlik miqdori uning ichki energiyasini o'rttiribgina qolmasdan, sistema parametrlari (P, V, T) ni ham o'zgartiradi va tashqi kuchlarga qarshi foydali ish bajaradi.

Massaviy, hajmiy va mo'l solishtirma issiqlik sig'implari orasi-da quyidagicha bog'lanish mavjud:

1. hajmiy bilan massa issiqlik sig'implari

$$c_v = c_m \rho; \quad (58)$$

2. massa bilan mo'l issiqlik sig'implari

$$c_m = c_{\mu} / \mu; \quad (59)$$

3. mo'l bilan hajmiy issiqlik sig'irlari

$$c_\mu = \mu c / \rho, \quad (60)$$

bunda μ va ρ — moddaning zichligi va molyar massasi.

R. Mayyer o'zgarmas hajm va bosim ostida moddada sodir bo'ladigan jarayonlarning solishtirma issiqlik sig'irlari bilan universal gaz doimiysi orasidagi bog'lanishni o'rganib, quyidagi tenglamani chiqargan:

$$c_p = c_v + R \quad \text{yoki} \quad (61)$$

$$R = c_p - c_v$$

Tenglamadan ko'rinadiki, har doim o'zgarmas bosim ostida kechadigan (izobarik) jarayonda izoxorik ($V = \text{const}$) jarayonga nisbatan ko'proq issiqlik miqdori sarflanadi. Izoxorik jarayonda sistemaning bajargan ishi nolga teng, chunki sistemaning ichki energiyasi faqat absolut temperaturaga bog'liq bo'lib, hajmga bog'liq emas. Chunki, $V = \text{const}$ holatida $V_2 - V_1 = 0$ bo'lgani sababli izoxorik jarayonda sistema ish bajarmaydi, aksincha, izobarik jarayonda sistema foydali ish bajaradi. Shuning uchun ham $c_p > c_v$.

Real gazlar uchun $c_p - c_v > R$, chunki $P = \text{const}$ bo'lgan izobarik jarayonda sistema faqat tashqi kuchlarga qarshi ish bajaribgina qolmasdan, molekulalararo mavjud bo'lgan o'zaro tutunish kuchlariga qarshi nomexanikaviy ish ham bajaradi.

Demak, $P = \text{const}$ va $V = \text{const}$ bo'lgan termodinamik jarayonlarda real gaz ish bajarishi va uning ichki energiyasini o'rtirish uchun ideal gazga nisbatan unga ko'proq issiqlik miqdori sarflanar ekan.

Ayrim moddalarning solishtirma issiqlik sig'irlarining $T = 273 \text{ K}$ dagi va ularning temperaturaga bog'liq bo'lgan qiymatlari (ideal gaz holatidagi) 2 va 3-jadvallarda keltirilgan.

Ayrim moddalarning 273,16 K dagi

issiqlik sig'implari

Gazning nomi (formulasi)	Erkinlik darajalari soni	Molyar issiqlik sig'imi, $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$	$k = \frac{c_p}{c_v}$
Geliy (He)	3	12,60	1,660
Argon (Ar)	3	12,48	1,660
Kislorod (O ₂)	5	20,96	1,397
Vodorod (H ₂)	5	20,30	1,410
Azot (N ₂)	5	20,80	1,400
Metan (CH ₄)	6	26,42	1,315
Ammiak (NH ₃)	6	26,67	1,313
Karbonat angidrid (CO ₂)	6	27,55	1,302

Hisoblashlarda quyidagi formuladan ham foydalaniladi:

$$q_1 = c_{m_0}^{t_1} (t_1 - 0) = c_{m_0}^{t_1} t_1,$$

$$q_2 = c_{m_0}^{t_2} (t_2 - 0) = c_{m_0}^{t_2} t_2, \quad (62)$$

bunda $c_{m_0}^{t_1}$ va $c_{m_0}^{t_2}$ — moddaning $(t_1 - 0)^\circ\text{C}$ va $(t_2 - 0)^\circ\text{C}$ temperaturalar oralig'idagi issiqlik sig'implari.

**O'zgarmas hosim ostidagi gazlarning o'rtacha solishtirma issiqlik
sig'imlarini temperaturaga bog'liqlik qiymatlari
(kilomol'da ifodalangan)**

T, K	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	SO ₂	Mutlaqo quruq havo
273	29,274	29,019	20,123	35,860	33,499	38,85	29,073
373	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
473	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
573	30,400	29,287	29,35173	41,755	34,575	43,88	29,521
673	30,878	29,500	29,789	43,250	35,090	45,22	29,789
773	31,334	29,764	30,099	44,573	35,630	46,39	30,095
873	31,761	30,044	30,425	45,753	36,195	47,35	30,505
973	32,150	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
1073	32,502	30,635	31,070	47,763	37,392	48,94	31,028
1173	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1273	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1373	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1473	33,633	31,832	32,192	50,740	39,825	51,08	32,109
1573	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	—	32,343
1673	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	—	32,565
1773	34,282	32,302	32,858	52,348	41,525	—	32,774
1873	34,474	32,565	33,051	52,800	42,056	—	32,967
1973	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	—	33,151
2073	34,834	32,917	33,402	53,604	43,070	—	33,319
2173	35,006	33,080	33,561	53,959	43,539	—	33,482
2273	35,169	33,231	33,708	54,290	43,995	—	33,641

Muhandislik hisoblarida moddalarning issiqlik sig'imlaridan foydalanish zarur bo'lganida ularning qiymatlari maxsus jadvallardan olinadi.

Ishlab chiqarishda odatda, asosan gazlar aralashmasidan foydalaniladi. Shunday holatlarda gaz aralashmasining issiqlik sig'imini aniqlash zarurati paydo bo'lsa, har bir komponentning issiqlik sig'imini alohida hisoblab butun aralashmaning issiqlik

sig'imi topiladi. Komponentlarning massa ulushiga to'g'ri keladigan issiqlik sig'implari topiladi va ularning yig'indisidan aralashma issiqlik sig'imi aniqlanadi. 1 kg gazlar aralashmasini 1 K isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdori massa issiqlik sig'imi bo'lib, uni aniqlash uchun har bir komponent issiqlik sig'implarining yig'indisi quyidagidan hisoblanadi:

$$C_{ar} = \sum_{i=1}^n c_n m_n, \quad (63)$$

bunda c_n va m_n — aralashma tarkibidagi n — komponentning issiqlik sig'imi va massa ulushi (konsentratsiyasi).

Yuqoridagi kabi *hajmiy* va *mo'l* issiqlik sig'implarini shu aralashma uchun quyidagicha ifodalash mumkin:

$$c_{var} = \sum_{i=1}^n c_{vn} r_{vn} \quad (64)$$

$$c_{\mu ar} = \sum_{i=1}^n c_{\mu n} r_{\mu n}. \quad (65)$$

MASALALAR

1-masala. Tarkibi 12% CO_2 , 6,5% O_2 , 6,5% H_2O va 75% N_2 dan iborat bo'lgan 2 kg gaz aralashmasi berilgan. Bu aralashmani 873 K dan 1573 K gacha qizdirish uchun unga qancha issiqlik miqdorini uzatish kerak?

Yechimi. Gazga uzatilgan issiqlik miqdori quyidagi formuladan topiladi:

$$q = M[c_{pm} T_2 - c_{pm} T_1].$$

Aralashmaning o'rtacha solishtirma issiqlik sig'imini 273 K dan 1500 K temperatura oralig'ida aniqlash uchun, avvalo aralashma komponentlarining solishtirma issiqlik sig'implari 273 K dan 873 K gacha oraliqdagi temperatura uchun topiladi, ya'ni

$$C_{m,\text{CO}_2} = \frac{45,753}{44} = 1,040 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,\text{O}_2} = \frac{31,76}{32} = 0,9925 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,N_2} = \frac{30,044}{28} = 1,073 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,H_2O} = \frac{36,195}{18} = 2,011 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Aralashmaning 273 K dan 1573 K gacha bo'lgan temperaturalar oralig'i uchun solishtirma issiqlik sig'imi hisoblanadi, ya'ni

$$C_{m,CO} = \frac{51,322}{44} = 1,166 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,O_2} = \frac{33,863}{32} = 1,058 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,N_2} = \frac{31,941}{28} = 1,140 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K};$$

$$C_{m,H_2O} = \frac{40,407}{18} = 2,244 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Demak, aralashmaning o'rtacha solishtirma issiqlik sig'imi

$$c_a = \sum_i c_i m_i$$

ifodadan foydalanib hisoblanadi, ya'ni

$$c_{pm2a} = 0,12 \cdot 1,04 + 0,065 \cdot 0,9925 + 0,75 \cdot 1,073 + \\ + 0,065 \cdot 2,011 \approx 1,125 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Xuddi yuqoridagidek uslubda 273 K dan 1573 K temperatura oralig'i uchun c_{pm2a} hisoblanadi, ya'ni

$$c_{pm2a} = 0,12 \cdot 1,166 + 0,065 \cdot 1,058 + 0,75 \cdot 1,14 + \\ + 0,065 \cdot 2,244 \approx 1,210 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Masala yechimida keltirilgan formulaga topilgan natijalarni qo'yib, issiqlik miqdorini hisoblab topamiz:

$$q = 2(1,210 \cdot 1573 - 1,125 \cdot 873) = 1,8424 \text{ MJ}.$$

2-masala. Tarkibi 0,4% CO, 12% CO₂, 6,0% O₂, 0,2% CO₂, 74,2% N₂ va 7,2% H₂O dan iborat bo'lgan 2,5 kg gaz aralashmasi berilgan. Bu aralashmani 573 K dan 1473 K gacha qizdirish uchun unga qancha issiqlik miqdorini uzatish kerakligini hisoblang.

?

1. Termodinamikaning birinchi qonuni ifodasini yozing, uni ta'riflang va tushuntiring.
2. Qaytar, qaytmas, muvozanat va nomuvozanat jarayonlar deb qanday issiqlik hodisalariga aytiladi?
3. Moddaning ichki energiyasi nima? Uning formulasini yozing hamda tushuntiring.
4. Termodinamik jarayonda bajarilgan ish nima hisobiga bajariladi?
5. Moddaning issiqlik sig'imi formulasini yozing va uni ta'riflang.
6. Moddalar issiqlik sig'implari nima uchun turlicha bo'ladi?
7. Gazning o'zgarmas bosim va hajmdagi solishtirma issiqlik sig'implari nima bilan farq qiladi?
8. Massa, hajmiy va mo'l solishtirma issiqlik sig'implari formulalarini yozing va ularning farqini tushuntiring.

2.4. Termodinamikaning ikkinchi qonuni

Issiqlik energiyasi o'z-o'zidan foydali ishga aylanib qolmasligi bizga ma'lum. Lekin issiqlik bilan ish oralig'idagi mashina-dvigatel bo'lishi shartligi masalasini ko'plab olim-u muhandislar uzoq yillar o'rganganlar. Bu masalaning ijobiy yechimini birinchilardan bo'lib S. Karno topgan, desak mubolag'a bo'lmaydi.

Termodinamikaning ikkinchi qonuni ikkinchi turdagi abadiy, ya'ni kiritilgan issiqlikni 100% ishga aylantirib, davriy ishlaydigan dvigatelni yaratib bo'lmazligi haqidagi nazariyani o'rganadi.

Bu nazariyani o'rganish davomida amaliyotda abadiy dvigatelni yaratish mumkin emasligi isbotlandi. Shuning uchun issiqlikni qanday qilib ishga aylantirish masalasi nazariy va amaliy tomondan o'rganildi. Natijada, termodinamikaning birinchi qonuni yordamida ish jismi ichki energiyasining o'zgarishi bilan issiqlik va ish miqdorlari orasidagi bog'lanishlar issiqlik energiyasining boshqa turdagi energiyalarga aylanish jarayoni tahlil qilindi. So'ngra issiqlikni ishga aylantirish oson emasligi, sistemaga uzatilgan issiqlik miqdori to'liq ishga aylanmasligi, uning ma'lum qismi foydali ishga aylanishi va qolgan qismi sovitkichga chiqarilishi shartligi nazariy va amaliy jihatdan isbotlandi.

Issiqlik energiyasi issiq jismdan sovuq jismga bevosita ish bajarmasdan ham o'tishi mumkinligi va, aksincha, sovuq jismdan issiqlik issiq jismga o'z-o'zidan ish sarflanmasa ham o'tmasligi tasdiqlandi.

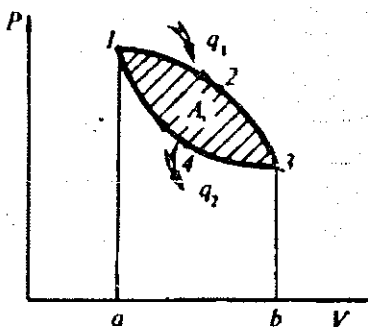
Termodinamikaning ikkinchi qonuni sistema ish bajarishi uchun unda harakatlantiruvchi kuch bo'lishi shartligini tushun-

tiradi. Harakatlantiruvchi kuch faqat ishchi moddaning oxirgi va boshlang'ich holatlari orasida temperaturalar farqi katta bo'lgandagina paydo bo'lishi shartligi nazariy va amaliy jihatdan isbotlandi. Harakatlantiruvchi kuch ish moddasi turiga mutlaqo bog'liq bo'lmasdan, faqat temperaturalar farqiga bog'liq bo'lishi aniqlandi. Bu temperaturalar farqi qancha katta bo'lsa, bajariladigan ish ham shuncha katta bo'ladi. Lekin har doim ham ishchi modda temperaturasi jarayon oxirida eng past va jarayon boshida eng yuqori qiymatga erisha olmasligi isbotlangandan so'ng, davriy ravishda kiritilib turiladigan issiqlik energiyasi va uning ishga aylanmasdan qolgan qismini sovitkichga chiqarib turadigan issiqlik mashinasini qurish mumkinligi amaliyotda tasdiqlanadi.

2.5. Aylanma sikl

Sistema ish bajarishi uchun unga davriy ravishda ma'lum miqdordagi issiqlik energiyasi yoki ish jismi uzatib turilishi zarur. Shundagina termodinamik jarayonlar sodir bo'ladi. Bu jarayonda issiqlik energiyasi mexanik energiyaga aylanadi. Ishga to'la aylanmasdan qolgan issiqlik miqdori esa sistemadan tashqariga (sovitkichga) uzatilishi shart. Shu talab bajarilsa, sikl davriy ravishda takrorlanadi. Ish jismi sifatida faqat bitta modda qo'llanilsa, u holda modda avval kengayadi va ma'lum miqdordagi ishni bajaradi, so'ngra yana siqiladi, keyin boshlang'ich muvozanat holatiga qaytadi. Sikl qaytadan takrorlanadi.

Termodinamik jarayonlar ketma-ket va davriy kechadigan issiqlik mashinasiga ichki yonuv dvigateli misol bo'la oladi. Bunday turdagi dvigatelga har doim yangi ish moddasi yoki issiqlik miqdori ketma-ket kiritib turiladi hamda issiqlikning ish bajarmagan qoldiq, ya'ni ishga aylanmagan qismi sovitkichga (atmosfera) chiqarib turiladi. Birorta ham mashina bir marta kiritilgan issiqlik yoki ish jismi bilan abadiy ishlaydigan issiqlik mashinasiga misol bo'la olmaydi. Bir marta kiritilgan ish jismi bilan uzluksiz (davriy) ishlaydigan mashina



2.6-rasm. Aylanma sikl.

yaratilgan emas va bunday mashinaning bo'lishi ham mumkin emas. Lekin unga yaqinroq bo'lgan qurilmalar mavjud bo'lib, ularda ish moddasini dastlabki muvozanat holatiga qaytarish uchun, kengayib ish bajarib bo'lgan ish moddasi, yana tashqi kuch (energiya) ta'sirida qo'shimcha ish sarflab siqiladi. Shunda modda dastlabki holatiga qaytadi. Bunday sikllar aylanma jarayonlarda kuzatiladi. Bunga magnitogidrodinamik (MGD) generatorining (berk sxemasi) ideal sikli misol bo'la oladi. Bunday siklda, albat-ta, moddani siqish uchun sarflangan ish miqdori uning kengayi-shida bajarilgan foydali ishdan ancha kichik bo'lishi kerak. Dav-riy takrorlanadigan aylanma jarayonning PV diagrammasi 2.6-rasmda tasvirlangan.

Ish moddasi q_1 issiqlik miqdorini olgandan so'ng 1, 2, 3 chiziq bo'ylab kengayib musbat, aksincha 3, 4, 1 egri chizig'i bo'yicha esa q_2 issiqlik miqdorini sistemadan sovitkichga chiqarish jarayonida manfiy ish bajaradi. Bu ishning miqdori a , 1, 2, 3, b , a nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Manfiy ishning miqdori, son qiymati jihatidan mos ravishda, a , 1, 4, 3, b , a nuqtalar hosil qilgan yuzaga teng bo'ladi. Demak, foydali ishning qiymati 1, 2, 3, 4, 1 nuqtalar hosil qilgan katakli may-doncha yuzasiga son qiymati jihatidan teng bo'ladi, ya'ni

$$q_1 = \Delta u + A_1; \quad -q_2 = \Delta u + A_2 \quad (66)$$

yoki tenglamalarni hadma-had qo'shib chiqsak, quyidagi hosil bo'ladi:

$$q_1 - q_2 = A_1 - A_2 = A, \quad (67)$$

bunda A — siklning bajargan ishi; q_1 va q_2 — sistemaga kiritil-gan va undan chiqarilgan issiqlik miqdorlari;
 A_1 va A_2 — foydali va befoyda ishlar.

Keltirilgan ifodalardan ko'rinadiki, aylanma jarayonda sistemaning ichki energiyasi o'zgarmasdan qolar ekan, ya'ni

$$\Delta U = U_1 - U_2 = 0$$

Bu ifodalar faqat nazariy jihatdangina to'g'ri. Muhandislik amaliyotida aylanma siklga yaqin sikllarda ishlaydigan issiqlik mashinalari mavjud. Ular to'g'risida ma'lumotlar bilan keyingi mavzularda tanishib borasiz.

2.6. Karno sikli va uning foydali ish koeffitsienti

Karno sikli mantiqan ustivor va mazmunan oddiy bo'lib, uning diagrammasi ikkita izoterma va ikkita adiabatadan tashkil topgan (2.7-rasm).

Sistemaga **isitkich** (*issiqlik manbayi*) dan q_1 issiqlik miqdori uzluksiz uzatilib turishi hisobiga uning T_1 temperaturasi o'zgarmas saqlanadi. Shunda sistemada kechadigan jarayon o'zgarmas ($T = \text{const}$) temperatura ostida sodir bo'ladi. Qoldiq (ish bajarmagan) issiqlik miqdori q_2 sistemadan uzluksiz ravishda **tashqi muhit** — **sovitkichga** $T_2 = \text{const}$ ostida chiqariladi. Shuning uchun q_1 ning ishorasi musbat, q_2 niki manfiy deb qabul qilinadi.

Fransuz muhandisi Karno Nikola Leonar Sadi 1824-yili «*Olovning harakatlantiruvchi kuchi haqida mulohazalar*» asarida issiqlik va ishning o'zaro bir-biriga aylanishi to'g'risidagi masala yechimini to'g'ri topgan. Hozirgi kunda ham bu yechim natijasi o'z kuchini yo'qotgan emas.

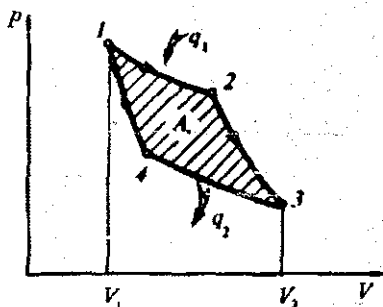
Karno siklining diagrammasidagi 1, 2 nuqtalar oralig'ida sistemaga keltirilgan issiqlik miqdori

$$q_1^* = \Delta q = \Delta U + P\Delta V = \Delta U + \Delta A \quad (68)$$

bo'lsa-da (sistema sifatida ideal gaz olinganida), uning izotermik jarayonda ichki energiyasining o'zgarishi $\Delta U = 0$ bo'lgani uchun gazning bajargan ishi quyidagicha ifodalanadi:

$$A_1 = P\Delta V = P(V_2 - V_1). \quad (69)$$

A_1 ishning kattaligi sistemaga kiritilgan issiqlik miqdoriga teng. Sikl diagrammasining 2, 3 nuqtalari oralig'ida ishchi gaz o'zining ichki energiyasining kamayishi hisobiga adiabatik kengayib, ya'ni tashqi muhit bilan issiqlik almashmasdan ish bajaradi (2.7-rasm). Jarayonning 3, 4 nuqtalari oralig'ida sistemadan issiqlik miqdori tashqi muhitga ($T_2 = \text{const}$) o'zgarmas temperaturada chiqariladi.



2.7-rasm. Karno sikli.

Shu davrda sekinlik bilan siqilish ham davom etadi. Bu holatda sistemaning bajargan ishining kattaligi sarflangan issiqlik miqdoriga teng bo'ladi, ya'ni

$$\bar{q}_2 = \Delta q = (q_1 - q_2) = A_2. \quad (70)$$

Bajarilgan ish ishoralarini aniqlash maqsadida siklning 4, 1 va 2, 3 nuqtalari oralig'ida kechadigan adiabatik jarayonlarni, ya'ni sharti uchun qarab chiqamiz.

Bu holat uchun termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha yozish mumkin:

$$c_v(T_2 - T_1) + P(V_2 - V_1) = 0 \quad (71)$$

Ish moddasi adiabatik siqilsa (4, 1 nuqtalar oralig'i), uning ichki energiyasi ortadi. Bu siqilish jarayonida gaz ustida ish bajarilsa, uning termodinamik parametrlari o'zgaradi. Shunda muayyan shart va talablar bajarilganida, sistemaga tashqaridan issiqlik kiritmasdan ham foydali ish bajarish mumkin bo'ladi.

Karno siklining PV diagrammasi *ikkita izoterma* (kengayish va siqilish) hamda *ikkita adiabata* (kengayish va siqilish) lardan tashkil topgan (2.7-rasm).

Issiqlik mashinasining asosiy ko'rsatkichi — bu uning bajargan ishi va foydali ish koeffitsienti hisoblanadi. Karno siklining aylanma jarayonga yaqinligini e'tirof etgan holda, sistemaga keltirilgan q_1 va undan sovitkichga chiqarilgan q_2 issiqlik miqdorlari hamda jarayon boshi va oxiridagi temperaturalar orqali siklning foydali ish koeffitsienti (η) ni quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$\eta = \frac{A_w}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}$$

yoki

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (72)$$

Bu (85) tenglama faqat qaytar sikllar uchun to'g'ri.

Aylanma siklda bajarilgan ish kattaligi sistemaga kiritilgan va undan sovitkichga chiqarilgan issiqlik miqdorlariga bog'liq bo'lsa, Karno siklida esa, ish moddasining boshlang'ich va oxirgi temperaturalari farqiga bog'liq bo'lar ekan. Shuning uchun Karno siklida ishchi modda temperaturasi ortib borgan sayin siklning η

kattalashadi. Masalan, ishchi gazning temperaturalar farqi 217 K dan 1217 K gacha ortganida, mos ravishda, issiqlik mashinasining *fik* 44% dan 81% gacha ortadi.

Ishchi modda ish bajarib bo'lgandan keyin uning temperaturasini nolgacha pasaytirish mumkin bo'lmaganligi kabi, boshlang'ich temperaturasini ham cheksizlikka $T = \infty$ yaqinlashtirib bo'lmaydi. Shuning uchun issiqlik mashinasining *fik* 100% ($\eta > 1$) bo'la olmaydi.

Karno siklining *fik* ini quyidagicha ta'riflash mumkin:

a) *Karno siklining termik fik ishlatilgan issiqlikning xossasiga bog'liq bo'lmasdan, faqat issiqlik manbalarining quyi va yuqori absolut temperaturalar qiymatlariga bog'liq;*

b) *Karno siklining termik fik ning qiymati temperaturalar farqi ortgan sayin kattalashadi;*

v) *Karno siklining termik fik har doim birdan kichik, ya'ni $\eta > 1$. Birorta ham issiqlik mashinasining fik 100% bo'la olmaydi.*

Amaliyotda imkoniyati boricha isitkichning temperaturasini eng yuqori va aksincha, sovutkichniki past temperaturalarda tutishga harakat qilinadi. Shunday sharoitda ishlaydigan bug' va gaz turbinalarining *fik* 80% dan yuqori bo'ladi.

2.7. Termodinamikaning ikkinchi qonuni asosida issiqlik mashinalari siklining tahlili

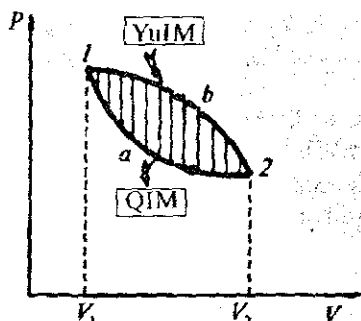
Issiqlik mashinalarining ishlashi uchun quyidagi ikkita shart albatta bajarilishi kerak:

Birinchi shart: *issiqlik mashinasi temperaturalar farqi bo'lgandagina ishlaydi.*

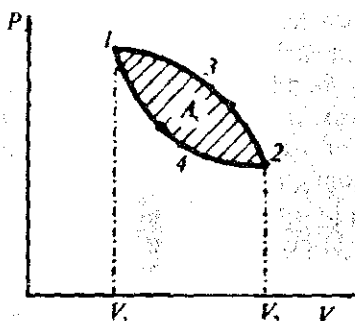
Demak, issiqlik mashinasi yuqori temperaturali manbadan issiqlik oladi va uning ma'lum qismini ish bajarishga sarflaydi, ishga aylanmagan qismini past temperaturali manbaga chiqaradi. Odatda, termodinamikada katta temperaturali issiqlik manbayini *yuqori* yoki *qizdirilgan* va, aksincha, past temperaturali manbani — *quyi* yoki *sovuq* manba deb yuritiladi.

Ikkinchi shart: *har qanday issiqlik mashinasi davriy ravishda (siklik) ishlashi kerak.*

Ish jismi sikida muayyan termodinamik jarayonlardan o'tib, yana boshlang'ich holatiga qaytishi shart. Bu jarayon issiqlik mashinasi ishlaganida davriy ravishda takrorlanib turishi kerak. Jarayonlar esa faqat bitta qurilmada bo'lmasdan uning turli



2.8-rasm. Issiqlik mashinasi ideal siklining PV diagrammasi.



2.9-rasm. Sovitkich mashinasi ideal siklining PV diagrammasi.

bo'linmalarida sodir bo'lishi mumkin. Masalan, issiqlik va sovitkich mashinalari berilgan bo'lsin va ular temperaturalar farqi hisobiga ishlayapti deb, faraz qilamiz.

Bu mashinalarning PV diagrammasidan ko'rinadiki, issiqlik mashinasining ish bajarishi uchun ish jismiga yuqori issiqlik manbayidan q_1 issiqlik miqdori kiritiladi. Shunda ish jismi 1, b, 2 nuqtalarini birlashtiruvchi egri chiziq bo'ylab kengayish vaqtida 1, V_1 , V_2 , 2, b, 1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng ish bajaradi (2.8-rasm). Ish jismi teskari yo'nalishda 2, a, 1 egri chiziq bo'ylab q_2 issiqlik miqdorini sovitkichga uzatib, muvozanat holatiga qaytishida V_2 , 2, b, 1, V_1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng ish sarflaydi.

Issiqlik mashinasi siqish taktida tashqi kuchlar hisobiga ish bajaradi. Unda kengayish va siqish taktlaridagi q_1 va q_2 issiqlik miqdorlarini termodinamikaning birinchi qonuniga muvofiq quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} q_1 &= \pm \Delta U + A_1 \\ -q_2 &= \pm \Delta U + A_2. \end{aligned} \quad (73)$$

Ish jismining ichki energiyasi siklda o'zgarmasdan qolganligi uchun $\pm \Delta U$ deb yozilgan. Unda, q_1 va $-q_2$ lar yig'indisi quyidagiga teng, ya'ni

$$\begin{aligned} q_1 - q_2 &= A_1 - A_2 \\ \text{yoki} \quad A_s &= A_1 - A_2 \end{aligned} \quad (74)$$

Diagrammadan ko'rinadiki, siklning bajargan foydali ishi son qiymati jihatidan 1a2b1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng

ekan. Unda issiqlik mashinasiga kiritilgan va sovitkichga chiqarilgan issiqlik miqdorlari asosida uning termik *fik* (72) formulaga muvofiq aniqlanadi.

Har doim $\eta_i < 1$ shart bajarilishi zarur. Chunki issiqlik mashinasiga kiritilgan q_1 issiqlik miqdori butunlayin (100%) foydali ishga sarflanmaydi. Uning ma'lum miqdori q_2 sovitkichga chiqariladi.

Demak, *tashqaridan q_1 issiqlik miqdorini issiqlik mashinasiga davriy ravishda kiritib va qoldiq q_2 qismini sovitkichga chiqarib turish bilan uzluksiz ishiyayigan issiqlik mashinasi — dvigatelni yaratish mumkin.*

Sovitish mashinalari sikli issiqlik mashinalarining sikliga teskari bo'ladi. Ular ma'lum hajmda yoki shu hajmdagi jism temperaturasini atrof-muhit temperaturasidan past bo'lgan temperaturani hosil qilishga mo'ljallanadi. Sovitish mashinasi hajmda joylashgan jism quyi issiqlik manbayi, atrof-muhit esa yuqori issiqlik manbayi hisoblanadi. Sovitish mashinalarining ishlash tartibi, moddalar siqilganda qizishi va, aksincha, keskin kengayganda sovishi qonuniyatiga asoslanadi.

Mashinaning sovitish siklida bajargan A_2 ishi 1, 4, 2 egri chizig'i bo'ylab ish jismining kengayish jarayonida bajargan ishi $V_1 142 V_2 V_1$ nuqtalari bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng hamda musbat ishorali bo'ladi (2.9-rasm).

Ish jismining kengayishida sovitkichdan q_2 issiqlik miqdori yuqori issiqlik manbayiga chiqarilib turiladi. Siklni dastlabki holatiga kamaytirishda ish jismi 2, 3, 1 nuqtalar bo'ylab siqilib son qiymati $V_2 231 V_1 V_2$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'lgan manfiy A_1 ish bajaradi. A_1 ishini bajarishda jismdan q_1 issiqlik miqdori chiqariladi va yuqori issiqlik manbayiga uzatiladi. Sovitish mashinasining sikli uchun termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha yozish mumkin:

$$q_1 = \pm \Delta U + A_2$$

$$-q = \pm \Delta U - A_1$$

$$\text{yoki} \quad q_2 - q = -(A_1 - A_2) = -A_s \quad (75)$$

$$q_1 = q_2 + A_s \quad (76)$$

Chunki, $A_1 > A_2$ va $A_s < 0$ bo'lgani sababli sovitish mashinasining uzluksiz ishlashini ta'minlash uchun albatta tashqi kuchlar hisobiga ish bajarilishi shart.

Sovitish mashinasining asosiy tavsiflaridan biri sovitish koeffitsienti sovitiluvchi jismdan sikl davomida chiqarilgan issiqlik miqdorining shu sikl ishiga nisbati bilan baholanadi, ya'ni

$$\varepsilon = \frac{q_2}{A_s}, \quad (77)$$

bunda $1 \leq \varepsilon \leq 1$ bo'la oladi.

Yuqoridagilar asosida termodinamikaning ikkinchi qonuni quyidagicha ta'riflanadi:

a) Mashina-dvigatel uchun:

1. Issiqlik mashinasi — dvigatel yordamida issiqlikni yuz foiz ishga aylantirib bo'lmaydi.

2. (Ostvald bo'yicha) Ikkinchi turdagi abadiy (perpetuum mobile) dvigatelning bo'lishi mumkin emas.

b) Sovitish mashinalari uchun:

1. Sovitish mashinasi yordamida jismni atrof-muhit temperaturasidan past temperaturagacha sovitish uchun albatta ish sarflanishi shart.

2. (Klauzius bo'yicha) Issiqlik o'z-o'zidan past temperaturali jismdan yuqori temperaturali jisimga o'tishi mumkin emas.

II tartibli perpetuum mobile — bu shunday dvigatelki, unga kiritilgan q issiqlik miqdorini 100% foydali ishga aylantira oladigan issiqlik mashinasidir.

Bunday issiqlik mashinasi hozircha yaratilmagan va bo'lishi ham mumkin emas.

2.8. Muvozanatli va nomuvozanat hodisalar

Issiqlik energiyasining sistemalarga uzluksiz kiritilishi yoki chiqarilishi hisobiga jism isishi yoki sovishi, gazning bosimi ortishi yoki pasayishi va boshqa shu kabi holatlar yuzaga kelishi mumkin. Shunga qarab, sistema muvozanat yoki nomuvozanat holatida, ya'ni sistemada kechayotgan jarayon, muvozanatli yoki nomuvozanat bo'ladi. Sistema ma'lum miqdordagi issiqlikni olib, uni ishga sarflab, qolganini tashqi muhitga chiqargandan keyin avvalgi birlamchi holatiga qaytishi yoki qaytmasligi mumkin. Faqat issiqlik energiyasi qatnashgan holatlardagi hodisalarni tushuntirish maqsadida bu hodisalarni ayrim holatlarda qaytar va qaytmas deb olamiz.

Sistema parametrlaridan loqal birortasi o'zgarishi uchun unga q_1 issiqlik kiritilishi yoki q_2 issiqlik chiqarilishi shart.

Jarayonning PV diagrammasidagi ΔV hajmning o'zgarishi uchun sistemaning P , V va T parametrlari o'zgarishi shart. PV diagrammaning 1, 2 chizig'i bo'ylab, har xil nuqtalarga turlicha bosim va temperatura to'g'ri keladi. Termodinamik parametrlar qiymatlarini o'lchab, ularning jarayon davomida o'zgarishini kuzatish va o'rganish mumkin. Siqish va kengayish jarayonlarida hajmning biror aniq nuqtasida, bosim va temperatura bir xil bo'lmaydi. Masalan, silindrdagi porshen kallagi ustidagi bosim va temperatura ish jismi kengayganida kamayib, aksincha, siqilganda kattalashib boradi. Natijada termodinamik sistema parametrlarining qiymatlari butun hajm bo'yicha har doim o'zgaruvchan bo'ladi. Bunday sistema va unda kechayotgan jarayon *nomuvozanat jarayon* bo'ladi va uni diagramma shaklida ifodalab bo'lmaydi.

Nomuvozanat sistemada sodir bo'ladigan jarayon tezligini o'ta pasaytirsak yoki oniy vaqtga to'xtatsak, unda sistemani tashkil etgan zarralar harakati butun hajm bo'ylab bir xil bo'ladi, deb qarash mumkin. Ammo amalda ularning parametri biror o'rta qiymatga juda yaqin bo'ladi (bir xil bo'la olmaydi). Lekin nazariy jihatdan hajmning istalgan nuqtasidagi bosim va temperatura qiymatlari bir xil bo'ladi. Shuning uchun uni *muvozanat holat* deb atash mumkin.

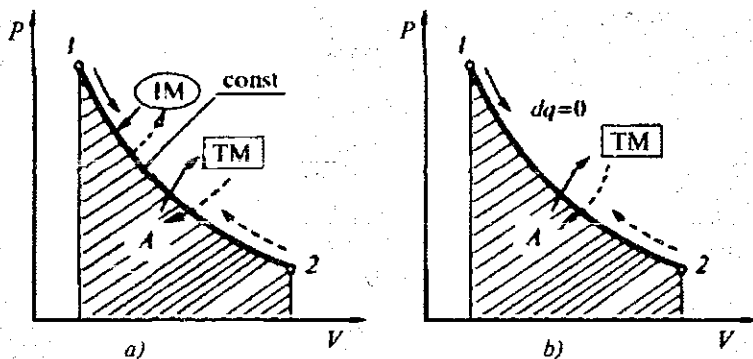
Muvozanatli termodinamik jarayon sodir bo'lishi uchun jarayonning borish tezligini pasaytirish kerak. Masalan, ichki yonuv dvigateli porshenini o'ta qisqa vaqtga to'xtatsak, to'liq muvozanatga erishiladi, ammo unda jarayon to'xtaydi. Bu qiyinchilikni yo'qotish uchun porshen yuqori va quyi qo'zg'almas nuqtalar (YuQH va QQH) oralig'ida harakatlanishi davomida bir necha bor o'ta qisqa vaqtga to'xtab-to'xtab o'tadi va natijada ko'p sonli muvozanat holatlarni hosil qiladi, deb faraz qilinadi va sodir bo'lgan jarayon esa *muvozanatli* deb qabul qilinadi. Amalda bunday holat uchramaydi. O'ta sekin sodir bo'ladigan jarayonlar muvozanatli bo'lgani uchun gaz zarrasining tezligi $\partial_1, \partial_2, \partial_3, \dots, \partial_n$ ham bir-biridan o'ta kichik qiymatlarga farq qiladi, xolos. Shunga ko'ra, gazning bosimi butun hajm bo'ylab o'zgarmas, ya'ni $P \cong \text{const}$ bo'ladi.

Demak, muvozanatli jarayon bu sistemaning termodinamik parametrlari P va T ning qiymatlari tashqi muhitnikidan farq qilmaydigan holatdir.

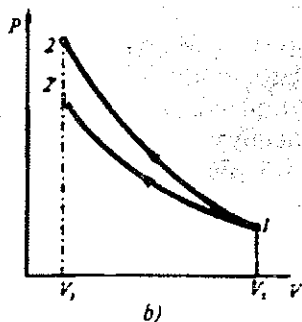
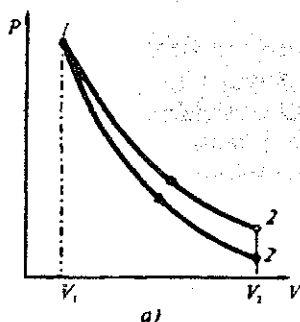
2.9. Qaytar va qaytmas jarayonlar

Sistema boshlang'ich holatidan oxirgi holatiga va yana boshlang'ich vaziyatiga teskari yo'nalishda ketma-ket holatlar orqali o'tishi mumkin bo'lgan fizik-kimyoviy hodisalar *qaytar jarayon* deyiladi. Jarayon qaytar bo'lishi uchun sistemada kechadigan fizik-kimyoviy hodisalar juda sekinlik bilan sodir bo'lishi hamda uning bosimi va absolut temperaturasi butun hajm bo'ylab o'zgarmas bo'lishi shart. Boshqacha aytganda, sistema kvazistatik yoki kvazimuvozanat (iot. *quasi* — *qandaydir*, *shunga o'xshash* va yunon. *statikos* — *to'xtovchi*, *muvozanatli* yoki *statos* — *qo'zg'almas*) holatida bo'ladi. Masalan, mexanikada ishqalanishsiz bo'ladigan har qanday harakat ham qaytar, kimyoda esa hamma turdagi qayta tiklanish reaksiyalari qaytar jarayondir. Ideal (Karno) sikl qaytar jarayonga misol bo'la oladi. Lekin bunday sikl amaliyotda uchramaydi. Real termodinamik jarayonda ish jismi tashqi muhit bilan issiqlik va ish almashadi hamda sistema dastlabki holatiga qaytmaydi.

Faraz qilaylik, termodinamik jarayonga qatnashayotgan ideal gaz avval 1, 2 nuqtalar oralig'ida kengaysin, so'ngra teskari yo'nalishda 2, 1 nuqtalar orqali boshlang'ich holatiga qaytsin (2.10-rasm). *PV* diagrammadagi 1, 2 yo'nalish bo'ylab gazning kengayishi kuzatiladi, aksincha 2, 1 yo'nalishda — siqiladi. Qaytar jarayon sodir bo'ladigan bo'lsa, sistema 1, 2 nuqtalar oralig'ida kengayib ish bajaradi va tashqaridan qo'shimcha ta'sirsiz o'zining oldingi holatiga 2, 1 yo'nalishda qaytadi. Lekin 2, 1 yo'nalishda gaz dastlabki holatiga o'z-o'zidan qaytmaydi. Uni dastlabki holatiga qay-



2.10-rasm. Qaytar jarayonning *PV* diagrammasi.



2.10-rasm. Qaytar va qaytmas jarayonlarda moddaning kengayishi (a) va siqilishining (b) PV diagrammalari.

tarish uchun gazga qo'shimcha ish yoki issiqlik kiritish (yoki undan chiqarish) kerak. Bunday qaytarilish uchun gazga manfiy ishorali ish sarflanadi. Gaz kengayganida dA ning ishorasi musbat, siqilganida esa dA ishning ishorasi manfiy bo'ladi. Shuning uchun qaytar jarayonda sistemaning bajargan ishi nolga teng bo'ladi.

Demak, qaytar jarayonda sistema tashqaridan qancha miqdorda issiqlik olgan bo'lsa, shunga teng miqdordagisini tashqariga chiqaradi. Bunda sistema ichki energiyasining o'zgarishi nolga teng bo'ladi.

Demak, ish moddasida va tashqi muhitda hech qanday o'zgarish sodir bo'lmaydi. Bunday muvozanatli jarayon *qaytar* bo'ladi. Qaytar jarayonda ish moddasi kengayish vaqtida qanday holatlardan o'tgan bo'lsa, siqilishda ham aynan shu holatlarni teskari yo'nalishda takrorlaydi. Agar yuqoridagi shartlardan birortasi bajarilmasa, jarayon *qaytmas* bo'ladi.

Qaytmas jarayon — bu sistema dastlabki holatiga qaytmaydigan faqat ma'lum yo'nalish bo'yicha o'z holicha kechadigan fizik hodisadir.

Qaytmas jarayonga issiqlik o'tkazuvchanlik, issiqlik diffuziyasi, gazning vakuumda kengayishi, tabiatda sodir bo'ladigan boshqa hodisalar misol bo'la oladi.

Termodinamik jarayonlar qaytmas jarayonlarga mansub. Issiq moddadagi issiqlik miqdori sovuq moddaga o'z-o'zidan ish bajarmasdan o'tishi natijasida moddalar termodinamik muvozanat holatiga intiladi. Bunda issiq modda zarralarining tezligi kamayib, sovuq moddaniki esa muvozanat holatigacha ortib boradi. Muvozanatdagi ikkita modda aralashtirilsa (ya'ni $T_1 = T_2$, $P_1 = P_2$),

ularda hech qanday o'zgarish sodir bo'lmaydi, ya'ni bu moddalarning biri isib, ikkinchisi sovimaydi.

Faraz qilaylik, silindrdagi gazni porshen siqishi natijasida uning ichki energiyasi ortadi va shu hisobiga u kengayadi. Jarayonning qaytmaslik shartiga muvofiq, tashqi muhit bosimi va absolut temperaturasi o'rtasida farq bo'lmaydi. Ish jismining bosimi P_1 va temperaturasi T_1 , tashqi muhitniki esa P_2 va T_2 bo'lganida yuqoridagi shartga muvofiq $P_1 = P_2$ va $T_1 = T_2$ bo'ladi. Shunda porshen kallagi ustidagi gaz 1 nuqtadan 2 nuqttagacha kengayib A_{qr} ish bajaradi (2.11-rasm). Bu ishning kattaligi $1V_1V_2$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng va ishorasi musbat bo'ladi. Bunda tashqi kuchlarga qarshi ish jismining kengayishi o'ta sekinlik bilan sodir bo'ladi va uning bajargan ishi tashqi muhitga to'liq uzatiladi.

PV diagrammadan ko'rinadiki, tashqi kuchlarning bajargan ishi V_112V_2 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng bo'lib, u qaytmas jarayon ishi A_{qs} ga mos keladi.

$$A_{qr} > A_{qs} \text{ yoki } V_1, 1, 2, V_2 > V_1, 1, 2', V_2$$

Qaytar jarayonda ish jismini siqishga sarflangan ish, modda qabul qilgan yoki tashqi kuchlarga sarflagan ish son qiymati jihatidan $V_1, 1, 2, V_2$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'ladi (2.12-rasm). Qaytmas jarayonda ish jismini siqishga sarflangan ish $V_1, 1, 2', V_2$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng. Unda qaytmas jarayonda tashqi kuchlar ichki kuchlardan katta bo'ladi. Shuning uchun siqish paytida qaytar jarayonga sarflangan ish qiymati qaytmas jarayonnikidan kichik bo'ladi, ya'ni

$$A_{qr} < A_{qs} \text{ yoki } V_112V_2 < V_112'V_2$$

Termodinamik hodisalar o'ta sekinlik bilan yuz beradigan izotermik va adiabatik jarayonlarni qaytar jarayon deb qabul qilish mumkin. Chunki, $T = \text{const}$ holatidagi jarayonda sistemaga qancha issiqlik miqdori keltirilgan bo'lsa, shunga teng issiqlik miqdori tashqi muhitga chiqariladi, ya'ni $dT = T_1 - T_2 = 0$.

Yuqorida $T = \text{const}$ va $dq = 0$ bo'lgan jarayonlarda tashqi muhit va ish jismi bir xil temperaturali hamda issiqlik almashmaydigan bo'lishi uchun jarayon muvozanatli bo'lishi va, shuningdek, o'ta sekin kechishi shart.

Hayotda bunday holatlar uchramaydi. Chunki issiqlik miqdori har qanday holatda ham isrof bo'ladi. Shuning uchun qaytar

jarayon o'rinli bo'lmaydi. Keltirilgan issiqlik miqdori q_1 muhitga chiqarilgan issiqlik miqdori q_2 ga teng bo'lmaydi. Unda, $q_1 \neq q_2$ shart uchun qaytar jarayonning bo'lishi mumkin emas.

2.10. Termodinamikaning ikkinchi qonunining talqini

Termodinamikaning birinchi qonuni ish jismiga uzatilgan issiqlik miqdori, bajarilgan ish va jism ichki energiyasi o'zgarishi o'rtasidagi miqdoriy nisbatlarni aniqlasada, sodir bo'ladigan jarayonlar yo'nalishini belgilamaydi. Shuning uchun termodinamikaning birinchi qonuniga muvofiq issiqlik shaklidagi energiya, nafaqat issiq jismdan sovuq jismga balki, hatto sovuq jismdan issiq jismga ham o'tishi mumkin. Lekin amalda sovuq jismdagi issiqlik issiq jismga o'z-o'zidan o'tmaydi.

Termodinamikaning ikkinchi qonuni issiqlik mashinalarining $\eta < 1$ bo'la olmasligini tushuntirib, davriy, yagona issiqlik manbayidan energiya olib ishlaydigan abadiy (II tartibli) dvigatelni yaratib bo'lmashligini isbotlaydi.

Termodinamikaning ikkinchi qonunining asosini Sadi Karno 1824-yili o'z tadqiqotlari natijalarida bayon etdi. R. Klauzius (1950-y.) termodinamikaning ikkinchi qonunini quyidagicha ta'rifladi: *issiqlik energiyasi ishga aylanish jarayonida to'laligicha ishga aylanmaydi va issiqlik sovuq jismdan issiq jismga o'z-o'zidan o'ta olmaydi.*

Temperatura issiqlikning uzatilishini ta'minlaydigan asosiy termodinamik parametr hisoblanadi. Shuning uchun harakatlantiruvchi asosiy kuch sifatida temperatura qabul qilinadi. Shu kuch faqat temperaturalar farqi bo'lgandagina paydo bo'ladi va bu farq qancha katta bo'lsa, kuch ham shuncha katta bo'ladi. Demak, bu qonunga muvofiq, ish bajaruvchi sistema temperaturasi sovitkichga nisbatan yuqori bo'lishi shart. Sistemadan sovitkichga chiqarilgan issiqlik miqdorini hech vaqt ishga aylantirib bo'lmaydi, chunki sovuq manbadagi issiqlik energiyasi issiq manbaga o'z-o'zidan o'tmaydi. Ishga aylanmagan qoldiq issiqlik energiyasidan qaytadan foydalanib bo'lmaydi, shuning uchun ham *issiqlik sovuq sistemadan issiq sistemaga o'z-o'zidan o'ta olmaydi.*

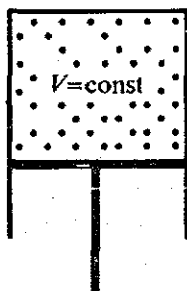
Xulosa qilib aytganda, termodinamikaning ikkinchi qonuniga muvofiq issiqlikning asosiy qismini ishga aylantirish uchun issiqlik mashinasi siklida hech bo'lmaganda bitta sovitkich bo'lishi shart ekan.

?

1. Termodinamikaning ikkinchi qonunini ta'riflang va issiqlik mashinalarining foydali ish koeffitsienti birdan katta bo'la olmasligini tushuntiring.
2. Issiqlik mashinasiga uzatilgan issiqlikni 100% foydali ishga aylanmaslik sabablarini tushuntiring.
3. Aylanma sikl nima? Aylanma siklga misollar keltiring va unga kiritilgan issiqlik miqdorining nimalarga sarf bo'lishini va siklning bajargan ishini hisoblash formulasi yozing.
4. Karno sikli deb qanday siklga aytiladi? Karno siklining diagrammasi qanday jarayonlardan tashkil topgan? Karno siklining η ni ifodalovchi formulani yozing va uni tushuntiring.
5. Karno sikliga teskari sikl qanday mashinalarga mansub? Sovitkich mashinalarining sovitish koeffitsienti nima va u qanday ifodalanadi?
6. Termodinamik izojarayonlar izoxora, izobara, izoterma va adiabatlar PV diagrammalarda qanday tasvirlanadi?
7. Birinchi va ikkinchi turdagi perpetuum-mobile deb qanday dvigatelga aytiladi va ularni qurish mumkinmi?
8. Sovuq jismdagi issiqlik miqdorini issiq jismga o'tkazish mumkinmi?
9. Qaytar, qaytmas, muvozanatli va nomuvozanat jarayonlar deb nimaga aytiladi va ularning diagrammalari qanday tasvirlanadi?

2.11. Termodinamik izojarayonlar

Tabiat va texnikadagi hodisalarda issiqlik energiya shaklida qatnashadi va bu issiqlik energiyasi biror siklning termodinamik jarayonlariga kiritilishi yoki chiqarilishi natijasida sistema ichki energiyasi o'zgarishi hisobiga ish bajariladi. Sarflangan issiqlik miqdorini aniqlashda sistema holat parametrlari orasidagi bog'lanishni ham bilish kerak bo'ladi. Bunda jarayonning fizik-kimyoviy va termodinamik mohiyati ochib beriladi.



2.12-rasm. O'zgarmas hajmdagi gaz.

Izoxorik jarayon. Sistemaning o'zgarmas solishtirma hajmida yuz beradigan termodinamik (fizik-kimyoviy) hodisalar majmuiga **izoxorik jarayon** deyiladi. Jarayonni tasavvur qilish va anglash maqsadida misol tariqasida o'zgarmas hajmli silindrga ideal gaz joylashtiramiz va uning boshlang'ich parametrlarini P_1, V_1, T_1 deb, unga q issiqlik kiritilgandan keyingi holatini esa P_2, V_2, T_2 deb belgilaymiz.

Bu holatlar uchun holat tenglamalarini tuzib, ularning nisbatidan Sharl qonuni ifodasini topamiz:

$$P_1 V_1 = RT_1 \quad \text{va} \quad P_2 V_2 = RT_2$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{yoki} \quad P_1 T_2 = P_2 T_1 \quad (78)$$

Izoxorik jarayon diagrammasi PV , TS koordinatalarida ifodalanadi (2.14-rasm, a , b). Termodinamikaning birinchi qonunidan ma'lumki, sistemaga uzatilgan issiqlik miqdori q shu sistema ichki energiyasining o'zgarishi ($u_2 - u_1$) ga va tashqi ish (A) ga sarf bo'ladi, ya'ni:

$$\Delta q = (u_2 - u_1) + A.$$

Izoxorik jarayonda gaz bajargan elementar ish quyidagiga teng, ya'ni:

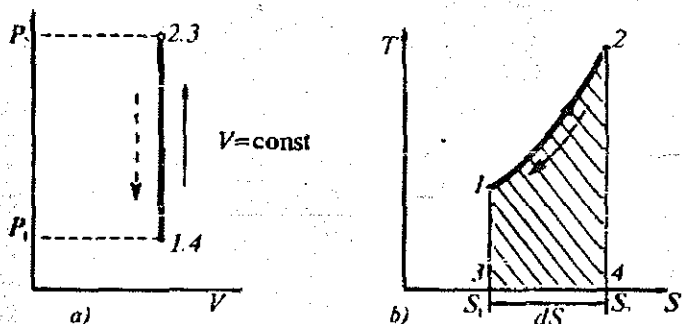
$$\Delta A = P \Delta V = 0. \quad (79)$$

Izoxorik jarayonda hajmning o'zgarishi $\Delta V = V_2 - V_1 = 0$ bo'lganligi uchun jarayonda bajarilgan ish nolga teng bo'ladi.

Demak, izoxorik jarayonda gazga keltirilgan issiqlik miqdori gazning ichki energiyasining o'zgarishiga sarflanar ekan.

$$\Delta q = \Delta u. \quad (80)$$

Izoxorik jarayondagi sistemaning ichki energiyasining o'zgarishini issiqlik sig'imi orqali ifodalash mumkin. Unda, bir kilomo'l modda massasini 1 K isitish uchun zarur bo'lgan issiqlik



2.13-rasm. Izoxorik jarayondagi moddaning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

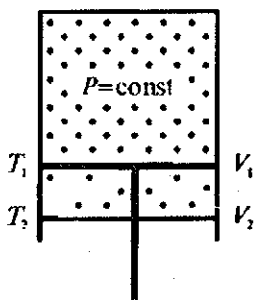
miqdori moddaning issiqlik sig'imga tengligi asosida (56) ni izoxorik jarayon uchun qayta yozamiz:

$$\Delta q = c_v \Delta T + P \Delta V = c_p \Delta T = \Delta U. \quad (81)$$

Izoxorik jarayonda $T_2 > T_1$ bo'lsa, issiqlik sistemaga uzatiladi va modda siqilganda ichki energiyasining ortishi hisobiga qiziydi, ya'ni $(+q)$, $T_2 < T_1$ bo'lganda esa issiqlik chiqadi (siqilgan modda silindr devorlari bilan kontaktlashib, muhitga issiqlik nurlaydi), ya'ni $(-q)$.

Izoxorik jarayonning PV va TS diagrammalarini qarab chiqamiz. Gazga keltirilgan issiqlik miqdori hisobiga gaz molekulalarining tezligi ortadi, ya'ni kinetik energiyasi kattalashadi. Natijada gaz molekulalari idish devorlariga kuchli uriladi. Buning hisobiga idish ichidagi bosim ortadi (2.13-rasm, a). Diagrammadan ko'rinib turibdiki, hajm o'zgarmas bo'lganida bosim va temperatura ortishi mumkin ekan. Yuqoridan ma'lumki, gazning entropiyasi ham bu jarayonda o'zgarar ekan (2.13-rasm, b).

Izobarik jarayon. O'zgarmas bosim ostida kechadigan termodinamik hodisalar majmuyiga *izobarik jarayon* deyiladi. Bu



2.14-rasm. $P = \text{const}$ ostidagi gaz.

termodinamik jarayonda $P = \text{const}$ bo'lib, gazning V , T parametrlari kiritilgan q issiqlik miqdori hisobiga o'zgaradi. Izoxorik jarayondagidek silindrga ish jismini kiritamiz va unga q issiqlik miqdorini uzatamiz. Gazning hajmi V_1 dan V_2 gacha, temperaturasi esa T_1 dan T_2 gacha o'zgarib, porshenni pastga qarab harakatlantiradi (2.14-rasm). Bu ikkala holat uchun jarayonning holat tenglamalarini tuzamiz va ularning nisbatidan Gey-Lyussak qonunining ifodasini topamiz:

$$P_1 V_1 = RT_1 \quad \text{va} \quad P_2 V_2 = RT_2,$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{yoki} \quad V_1 T_2 = V_2 T_1. \quad (82)$$

2.15-rasmda izobarik jarayonning PV va TS diagrammasi tasvirlangan. Silindrdagi ish moddasiga kiritilgan q issiqlik hisobiga aralashma muvozanatdan chiqadi. Natijada ish jismi o'z hajmini o'zgartirib mexanik ish bajaradi.

Termodinamikaning birinchi qonuni asosida bu ishning kattaligini quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta q = \Delta U + A = \Delta U + P\Delta V. \quad (83)$$

Izobarik jarayonda sistemaga uzatilgan issiqlik miqdorini solishtirma issiqlik sig'imi orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta q = c_p(T_2 - T_1) + P\Delta V \quad (84)$$

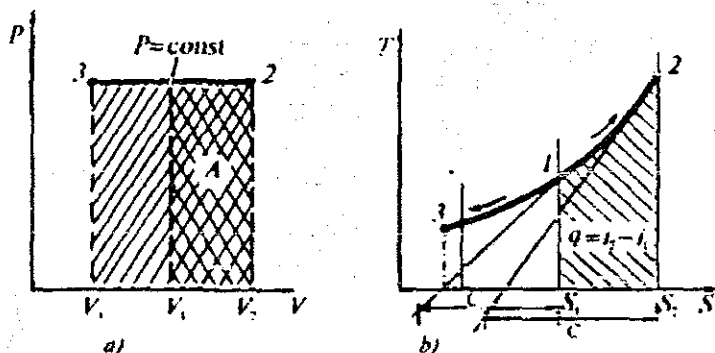
Demak, izobarik jarayonda gazga uzatilgan issiqlik miqdori gazning ichki energiyasining ortishiga va tashqi kuchlarga qarshi foydali ishga sarf bo'lar ekan.

Jarayon davomida ish gazi temperaturasi bir Kelvinga o'zgarganida, izobarik jarayonda termodinamik sistemaning bajargan ishi universal gaz doimiysi qiymatiga teng bo'ladi:

$$A = R. \quad (85)$$

Demak, izobarik jarayonda termodinamik sistemaga uzatilgan issiqlik miqdori asosan sistema ichki energiyasining ortishiga va tashqi mexanik ish bajarilishiga sarf bo'lar ekan. Bunday jarayon bug' mashinalarida, ichki yonuv dvigatellarida va bug' qozonlarining o'txonalarida uchraydi.

Izobarik jarayonning PV va TS diagrammalaridan (2.15-rasm) ko'rinadiki, porshen o'zining muvozanat holatidan chiqib, yuqori qo'zg'almas nuqtasidan pastki nuqtasi tomon harakatlanish jarayonida gazning hajmi kattalashsa-da, uning bosimi o'zgarmaydi



2.15-rasm. O'zgarmas bosim ostida sodir bo'ladigan jarayonning PV va TS diagrammalari.

(2.14-rasm). PV diagrammadagi 1 va 2 nuqtalar oralig'ida gaz kengayib, musbat ish bajaradi, 1 va 3 nuqtalar oralig'ida siqilib, energiya sarflaydi.

Izobarik jarayonda ham gazning entalpiyasi gaz kengayganida ortadi va, aksincha, siqilganida — kamayadi (2.15-rasm).

Izotermik jarayon. Ish moddasi sifatida gaz yoki yoqilg'i bug'i bilan atmosfera havosi aralashmasi olinganida, uning temperaturasi o'zgarmas saqlash uchun ortiqcha issiqlik miqdori bu ish moddasidan chiqarilib turisa, shunda moddaning bosimi va hajmi o'zgarishi hisobiga foydali ish bajariladi.

O'zgarmas ($T = \text{const}$) temperaturada sodir bo'ladigan termodinamik hodisaga izotermik jarayon deyiladi.

Sistemaga tashqaridan kiritilgan q issiqlik miqdori hisobiga uning holat parametrlari P_1, V_1, T_1 dan P_2, V_2, T_2 qiymatlargacha o'zgaradi. Bu o'zgarishlar uchun holat tenglamalarini tuzib, ularning nisbatlaridan quyidagini hosil qilamiz:

$$P_1 V_1 = RT_1 \text{ va } P_2 V_2 = RT_2,$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ yoki } P_1 V_1 = P_2 V_2 = \dots = P_n V_n = \text{const.} \quad (86)$$

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

Izotermik jarayondagi gazga uzatilgan issiqlik miqdori dq sistemaning R va V parametrlarini o'zgarishi hisobiga tashqi kuchlarga qarshi mexanik ish bajarishga sarflanadi:

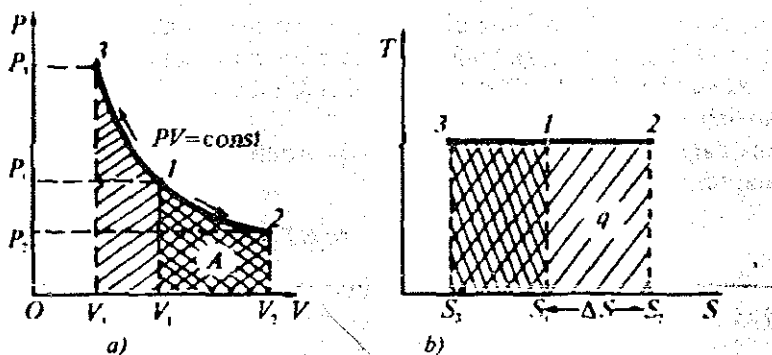
$$\Delta q = P \Delta V = \Delta A \quad (87)$$

Gazga uzatilgan issiqlik miqdori faqat ishga sarflanmasdan, gazning ichki energiyasini ham o'rttiradi (gaz qiziydi). Gazning issiqlik sig'imi orqali termodinamikaning birinchi qonunini izotermik jarayon uchun quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\Delta q = c_p \Delta T + P \Delta V = \Delta U + \Delta A. \quad (88)$$

Berilgan gaz sistemasining P va V parametrlarining o'zaro bog'liqligini nazarga olib, (87) tenglikni hajm va bosim orqali quyidagicha ifodalash mumkin:

$$A = RT \ln \frac{V_2}{V_1} \text{ va } A = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$



2.16-rasm. Izotermik jarayonning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

Izotermik jarayonning PV va TS koordinatalardagi diagrammasi giperboladan (2.16-rasm) iborat bo'ladi.

Diagrammadan ko'rinadiki, $T = \text{const}$ bo'lgan jarayonda gazga tashqaridan kiritilgan issiqlik miqdori uning bosimini orttiradi va aksincha, gazdan issiqlik chiqarilsa esa hajm kamayadi. Bosimning hajmga ko'paytmasi o'zgarmas kattalik bo'lib qoladi. Jarayonning TS diagrammasidan ko'rinadiki, gazdan issiqlik chiqarilganida va unga kiritilganida uning entropiyasi o'zgaruvchan bo'ladi (2.16-rasm).

Adiabatik jarayon. Tabiat va texnikada shunday jarayonlar mavjudki, tashqaridan issiqlik energiyasini olmaydi va sovitkichga issiqlik energiyasini chiqarmay turib, ishchi jism foydali ish bajaradi.

Ish moddasi tashqi muhit bilan issiqlik almashmagan holda sodir bo'ladigan termodinamik hodisalarga *adiabatik jarayon* deyiladi.

Jarayondagi ish moddasi kengayganda yoki siqilganda uning temperaturasining o'zgarishi faqat sistema ichki energiyasining o'zgarishi hisobiga paydo bo'ladi, chunki $\Delta q = 0$. Tez kechadigan jarayonlar muvozanatli bo'lgani uchun, adiabatik jarayonni ham muvozanatli deb qarash mumkin. Tashqaridan sistemaga kiritilgan issiqlik miqdori $\Delta q = 0$ bo'lganligi uchun, shu sistema entropiyasining o'zgarishi $\Delta S = 0$ bo'ladi.

Demak, sistemada kechadigan jarayon adiabatik bo'lsa, bunday termodinamik sistemaning entropiyasi o'zgarmasdir, ya'ni $S = \text{const}$. Adiabatik jarayonda termodinamik sistemaning uchala parametrlari P , V , T birdaniga o'zgarishi mumkin. Bizga berilgan silindrda 1 kg gaz siqilgan va tashqi muhitdan mutlaqo

izolatsiyalangan deb faraz qilaylik (2.14-rasm). Bunda gazning P bosimi tashqi kuch F ga teng bo'lsa, sistema muvozanatda bo'ladi.

Aksincha, $F \neq P$ bo'lganida, adiabatik jarayonda qatnashayotgan ish jismining boshlang'ich P_1, V_1, T_1 va oxirgi P_2, V_2, T_2 holatdagi parametrlari farqi hisobiga porshen pastga siljiydi va ish bajaradi, ya'ni:

$$c_p \Delta T + P \Delta V = 0 \text{ yoki } -c_p \Delta T = P \Delta V. \quad (89)$$

Tenglamadan ko'rinadiki, ish moddasi temperaturasining va ichki energiyasining o'zgarishi hisobiga foydali ish bajarilar ekan.

Gaz turi va uning issiqlik sig'imini ham e'tibordan chetda qoldirmasak, adiabatik jarayonda bajarilgan ishni quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$A = U_1 - U_2 = c_v(T_1 - T_2). \quad (90)$$

Chunki sistemaning boshlang'ich ichki energiyasi uning oxirgi holatdagi energiyasidan katta ($u_1 > u_2$) bo'ladi.

Moddaning solishtirma issiqlik sig'irlarining nisbati k solishtirma issiqlik sig'irlari bir-biridan necha marta kattaligini ko'rsatuvchi koeffitsient hisoblanadi. Shu bois hajm o'zgarishining boshlang'ich hajmga nisbatini adiabat ko'rsatkichiga ko'paytmasi bilan bosim o'zgarishining boshlang'ich bosimga nisbatining yig'indisi nolga tengligi asosida gaz parametrlari orasidagi bog'lanishni fransuz fizigi S. Puasson quyidagicha ifodalagan:

$$k \frac{\Delta V}{V} + \frac{\Delta P}{P} = 0 \quad (91)$$

$k = \text{const}$ sharti asosida (83) tenglikni quyidagi ko'rinishda

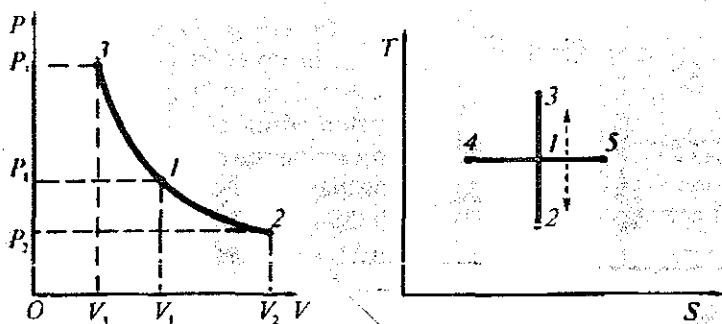
$$k \ln V^k + \ln P = \text{const} \quad (92)$$

ifodalab, undan adiabatik jarayon tenglamasi topiladi:

$$PV^k = \text{const}. \quad (93)$$

Adiabatik jarayonda bajarilgan ishni quyidagicha yozish mumkin:

$$A = \frac{R}{(k-1)} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{R}{(k-1)} (T_1 - T_2). \quad (94)$$



2.17-rasm. Adiabatik jarayonning PV va TS diagrammalari.

Demak, *adiabatik jarayonda gazning bajargan ishi ish moddasi sifatida olingan gaz turiga, uning boshlang'ich va oxirgi parametrlariga bog'liq ekan.*

Adiabatik jarayonning PV va TS diagrammalaridan (2.17-rasm) ko'rinadiki, gaz kengayganida (siqilganida) musbat (manfiy) ishorali ish bajaradi. Ish moddasining ichki energiyasining o'zgarishi hisobiga bosim (temperatura) ortadi va kengayganida bosim (temperatura) pasayadi (2.17-rasm).

Politropik jarayon. Termodinamik jarayonlarda sistemaning hamma parametrlari (bosimi, hajmi, temperaturasi, solishtirma issiqlik sig'imi va sh.k.) bir vaqtda o'zgarishi mumkin.

Sistemaning solishtirma issiqlik sig'imi ($s = \text{const}$) o'zgarmas bo'lgan termodinamik hodisa *politrop jarayon* deyiladi. Politrop (grek. *poli* — ko'p va *tropos* — yo'l) turli-tuman burilish, ko'p burilish degan ma'noni bildiradi. Sistemaning solishtirma issiqlik sig'imi o'zgarmasa-da, uning holat parametrlari o'zgaradi. Politrop jarayonning issiqlik sig'imi $c = \text{const}$ bo'lgandagi holat uchun termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha yozib, undan jarayon tenglamasini topamiz:

$$\begin{aligned}\Delta q &= c\Delta T = c\Delta T + P\Delta V \\ (c - c_v)\Delta T &= P\Delta V.\end{aligned}\quad (95)$$

Ideal gazning holat tenglamasidan foydalanib, politropik jarayonning turli xil tenglamalarini keltirib chiqarish mumkin.

Politrop jarayon tenglamasi quyidagicha ifodalanadi:

$$PV^n = \text{const}, \quad (96)$$

$$R = \frac{R_0}{\mu} = \frac{8,31}{32} \approx 0,26 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

$$c_v = c_p - R = 0,915 - 0,26 = 0,655 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Bir kilogramm gazning olgan issiqlik miqdori $q = c_v(T_2 - T_1)$ bo'yicha hisoblanadi va $q = 0,655 \cdot 30 = 19,65 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$. Ballondagi gaz bosimi ancha kichik bo'lganligi uchun uning massasini ideal gaz tenglamasidan topamiz, ya'ni

$$m = \frac{pV}{RT_1} = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 1,5}{0,26 \cdot 10^3 \cdot 263} = 13,16 \text{ kg}.$$

Unda gaz olgan issiqlik $q_1 = mq \approx 258,6 \text{ kJ}$ ga teng bo'ladi.

2-masala. 1-masalada keltirilgan shartga ko'ra propan gazi uchun bosim va issiqlikni hisoblang.

3-masala. Hajmi $0,4 \text{ m}^3$ bo'lgan silindrga normal sharoitdagi havo kiritildi va temperaturasi 1273 K gacha siqildi. Siqilish jarayonida havoga uzatilgan issiqlik miqdorini va havoning bajargan ishini toping.

Yechimi. Havoga uzatilgan issiqlik miqdori quyidagi formuladan hisoblanadi:

$$q = cm\Delta T = m(c_{p2}T_2 - c_{p1}T_1) = \mu \frac{pV}{R_0T} (c_{p2}T_2 - c_{p1}T_1).$$

Hisoblashlarni osonlashtirish uchun avval 273 K dan to 1273 K gacha bo'lgan oralqdagi o'rtacha issiqlik sig'irlarini, so'ngra massasini topamiz, ya'ni

$$c_p = \frac{\mu c_{pm}}{\mu}; \text{ Unda, } c_{p1} = 1,004 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}; c_{p2} = 1,0911 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

$$m = \mu \frac{pV}{R_0T} = 28,96 \frac{101325 \cdot 0,4}{8,31 \cdot 10^3 \cdot 273} = 0,517 \text{ kg}.$$

Hisoblangan natijalarni yuqorida keltirilgan formulaga qo'yib issiqlik miqdorini topamiz:

$$q_1 = 0,517 (1,0911 \cdot 1273 - 1,004 \cdot 273) \approx 1114,88 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}.$$

Gaz to'ldirgan oxirgi hajmni Gey-Lyussak qonunidan foydalanib topamiz:

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,4 \frac{1273}{273} = 1,86 \text{ m}^3.$$

Masala shartiga muvofiq, endi gaz kengayganda bajargan ishini hisoblaymiz:

$$A = mR(T_2 - T_1) = 0,517 \cdot \frac{8,31}{28,96} (1273 - 273) = 148,35 \text{ kJ.}$$

4-masala. Masala shartidagi qiymatlarni 3-masaladagidek qoldirib CO_2 va suv bug'ining boshlang'ich temperaturasi 773 K, oxirgi temperaturasi 573 K deb hisoblashlarni ham yuqoridagidek amalga oshiring.

5-masala. O'zgarmas temperatura ostidagi 4 kg is gazni hajmi 2 marta kamaytirilganida, uning bosimi 0,25 MPa va temperaturasi 293 K dan muayyan qiymatlarga o'zgardi. Gazni siqishga sarflangan ishini, unga keltirilgan issiqlik miqdorini va oxirgi bosimini aniqlang.

Yechimi. Izobarik jarayon tenglamasidan gazning siqilgandan keyingi bosimini topamiz:

$$P_2 = P_1 \cdot \frac{V_1}{V_2} = 0,25 \cdot 2 = 0,5 \text{ MPa.}$$

Mendeleyev-Klapeyron tenglamasini 1 kg gaz massasi uchun yozamiz va $R_n = \mu R$ dan R ni topamiz, ya'ni $R = R_n / \mu = 8,31 \cdot 10^3 / 28 = 296,8 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$. Keyin boshlang'ich hamda oxirgi hajmlarni hisoblaymiz:

$$V_1 = 4 \cdot 296 \cdot 8,293 / 0,25 \cdot 10^6 = 1,39 \text{ m}^3 \text{ va}$$

$$V_2 = V_1 / 2 = 1,39 / 2 = 0,695 \text{ m}^3.$$

Gazning siqilishda bajargan ishini hisoblashda natural va o'nli logarifmlar orasidagi bog'lanishni e'tiborga olib, quyidagilarni aniqlaymiz:

$$A = 2,3 \mu R T \lg(V_2 / V_1) = \\ = 2,3 \cdot 4 \cdot 0,2968 \cdot 293 \cdot \lg(0,695 / 1,39) = 800 \cdot \lg \frac{1}{2}$$

Hisobni oxiriga yetkazing

6-masala. 4 m³ hajmda 12 MPa o'zgarmas bosim ostidagi 10 kg suv bug'i kengayish jarayonida temperaturasi 773 K dan boshlab pasayish jarayonida ish bajardi. Bug'ning bajargan ishini, oxirgi temperaturasi va hajmini aniqlang.

7-masala. 300°C temperaturali 10 kg suv bug'ining adiabatik kengayish jarayonida temperaturasi 0,2 MPa gacha pasaydi. Bug'ning boshlang'ich hajmi 1,2 m³ bo'lsa, kengayish davomida bajargan ishini, oxirgi hajmini va temperaturasi hamda boshlang'ich bosimini aniqlang.

Yechimi. Mendeleyev-Klapeyron tenglamasini masala shartiga muvofiq yozib, undan bug'ning boshlang'ich hajmini topamiz:

$$P_1 = \frac{\mu RT}{V_1} = \frac{10 \cdot 8,31 \cdot 516}{29 \cdot 521 \cdot 1,2} = 1,21 \text{ MPa.}$$

Gaz hajmi bilan bosimi orasidagi teskari bog'lanishdan foydalanib quyidagini yozib, undan bug'ning oxirgi hajmini topish mumkin, ya'ni

$$V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 1,2 \left(\frac{1,21 \cdot 10^6}{0,2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 3,75 \text{ m}^3.$$

Bug'ning boshlang'ich va oxirgi holatlari uchun universal gaz doimiysi o'zgarmas kattalik ekanligi asosida quyidagini yozib, undan oxirgi temperaturani topamiz:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}; \quad T_2 = \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 V_1} = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 3,75 \cdot 573}{1,21 \cdot 10^6 \cdot 1,2} \approx 296 \text{ K.}$$

Bug'ning kengayishda bajargan ishi quyidagi ifodadan topiladi:

$$A = \frac{1}{(k-1)} (P_1 V_1 - P_2 V_2) =$$

$$= \frac{1}{(1,4-1)} (1,21 \cdot 10^6 \cdot 1,2 - 0,2 \cdot 10^6 \cdot 3,75) = 1,755 \text{ MJ}.$$

8 - masala. Hajmi $0,5 \text{ m}^3$, massasi 8 kg va temperaturasi 293 K bo'lgan karbonat angidrid gazi issiqlik almashinuvisiz kengayganida uning oxirgi bosimi $2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ga teng bo'lgan. Gazning kengayish jarayonida bajargan ishini, boshlang'ich bosimini, oxirgi temperaturasi va hajmini aniqlang.

Nazorat savollari

?

1. Termodinamik jarayon deb qanday fizik-kimyoviy hodisalarga aytiladi va ular necha xil bo'ladi?
2. Izoxorik, izobarik, izotermik va adiabatik jarayonlarning ta'rifini ayting va ularning asosiy tenglamalarini yozing.
3. Izojarayonlarning PV va TS diagrammalarida izoxora, izobara, izoterma, adiabata va politrop chiziqlarining joylashuvini tushuntiring.
4. Adiabata va politrop ko'rsatkichlarini ma'nosini tushuntiring.
5. Izojarayonlarga keltirilgan issiqlik miqdori nimalarga sarflanishini izohlab bering.

2.12. Termodinamik muvozanatning tushuncha va ta'riflari

«Dinamik (harakatdagi) muvozanat» tushunchasi issiqlik harakati bilan bog'liq jarayonlarni o'rganishda katta ahamiyatga ega. Chunki, issiqlik doim harakatdagi energiyadir. Harakatdagi sistemalarga **komponent**, **faza**, **gomogen** (yunon. *homogenes* — *teng, bir jinsli*) va **geterogen** (yunon. *heterogenes* — *har xil jinsli*) sistemalar mansub.

Sistema komponenti (tarkibiy qismi) sifatida moddani tashkil etuvchi har qanday uzviy bog'lanmagan, mustaqil mavjud bo'la oladigan, uning bir qismidan ikkinchi qismiga o'ta oladigan hamda kimyoviy jihatdan farqlanadigan modda qabul qilinadi.

Masalan, osh tuzining suvdagi eritmasi ikki komponentli sistema, uni H_2O va $NaCl$ ga ajratish mumkin va ular alohida holatda ham mavjud bo'la oladi. Bu komponentlarning (H_2O va $NaCl$) miqdorlarini istalgan nisbatlarda olish mumkin. Lekin, osh tuzini tashkil etuvchi Na va Cl nisbatlari 1:1 ekanligini hamda eritma dissotsilanishini hisobga olinsa, elektrolitlardagi Na va Cl ionlari o'zaro bog'langan holatda bo'ladi. Shuning uchun eritma to'rt komponentli bo'lishi mumkin. Unda, bu eritma tarkibidagi Na va Cl miqdorini orttirsak, u holda sistema uch komponentli (H_2O , $NaCl$, Cl) holatga o'tadi va erkin Cl miqdori $NaCl$ ga bog'liq bo'lmaydi.

Faza. Termodinamik sistemaning bir jinsli qismi bo'lib, uning qolgan qismlaridan sirtlari bilan chegaralanadigan va tashqi kuch bo'lmaganda barcha nuqtalarida bir xil fizik xossalari bilan tavsiflanadigan bir jinsli moddaning holati. Bu bir jinsli moddani sistemaning qolgan qismlaridan osongina ajratib olish mumkin. Chunki ularning agregat holatlari hamda fizik-mexanik xossalari turlicha bo'ladi. Masalan, eriyotgan muz ikki fazali sistema, ya'ni suv va muzdan iborat. Suv eriyotgan muzdan osongina ajratiladi. Xuddi shunday, to'yinmagan natriy xlorning suvdagi eritmasi — bir fazali bo'lsa, uning to'yingan eritmasida erimagan tuz kristallari bo'lsa, ikki fazali sistema hisoblanadi. Kristallar qattiq fazada bo'lgani uchun ular suyuq fazadan osongina ajraladi.

Gomogen sistema. Moddani tashkil etgan qismlarning hammasi bir xil agregat holatida bo'lsa, bunday modda *gomogen sistema* deyiladi.

Gomogen sistema bir yoki bir necha qismlardan iborat bo'lsa-da, ularning fazalari bir xil bo'lishi shart.

Masalan, bir necha turdagi metallarni domna pechida eritsak, ular ma'lum temperaturada bir xil fazali, ya'ni gomogen suyuq metalga aylanadi. Kimyoviy elementlarning ayrim birikmalarini kislotalarda eritsak, ular erib, bir xil fazali, ya'ni gomogen eritma hosil qiladi.

Geterogen sistema. Bir va undan ortiq fazali moddani *geterogen sistema* deyiladi. Geterogen sistema bir yoki bir necha komponentdan tashkil topadi.

Masalan, muz va suv aralashmasini ikki komponentli, geterogen sistema deb qarash mumkin. Suv — suyuq fazada, muz qattiq fazada, ya'ni ikki fazali geterogen eritma hosil bo'ladi.

2.13. Sistemaning dinamik muvozanati

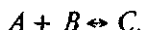
Jarayonlar oddiy yoki murakkab bo'ladi. Kimyoviy reaksiya natijasida ish jismining tabiati yoki agregat holati o'zgaraydigan jarayonlar *oddiy jarayonlar* deb ataladi. Kimyoviy reaksiya davomida unda qatnashayotgan moddalardan birortasi erisa, boshqasi esa bug'lansa yoki bir modda o'rniga boshqa turdagi modda hosil bo'lsa, bunday jarayon *murakkab* hisoblanadi. Murakkab sistema oxirgi holatining muvozanati *dinamik* (ya'ni harakatdagi) *muvozanat* bo'ladi.

Izolyatsiyalangan sistema, ya'ni silindrda suv va suv bug'i joylashtirilgan bo'lsin. Silindrdagi porshenga tashqaridan F kuch tik yo'nalishda uzatilganligi tufayli silindrda $P = \text{const}$ bo'ladi. Bosimni o'rttirsak, suyuqlik ustidagi bug' hamda suyuqlik temperaturasi ham o'zgaradi. Muayyan temperaturada bug'ning to'yinishi va suyuqlikning qaynashi kuzatiladi. Bu temperaturani, mos ravishda, *to'yinish* va *qaynash temperaturasi* deyiladi. Muhitdan absolut izolyatsiyalangan sistemada to'yinish temperaturasi o'zgarmas bo'ladi. Tashqaridan kuzatilganida bu jarayonda birorta o'zgarish kuzatilmaydi, ammo suv bilan bug' miqdori o'zgarmasa-da, suvdan ajralib gaz holatiga o'tayotgan suv molekulalari miqdori, bug'dagi suv molekulalarining o'zaro birikib suvga aylangan miqdoriga teng bo'ladi, ya'ni qancha suv molekulasi bug'ga aylangan bo'lsa, shuncha bug' molekulasi suvga aylanadi. Suv bug'i yuqoriga, suvga aylangan bug' esa pastga qarab uzluksiz ravishda harakatlanadi, ya'ni bug' bilan suv o'zaro *harakatdagi (dinamik) muvozanatda* bo'ladi. Dinamik muvozanat faqat $P = \text{const}$ va $T = \text{const}$ holatlari uchun o'rinli bo'ladi.

Masalan, Yer yuzida bo'ladigan yog'in-sochin bug'ga aylangan suv miqdoriga (bir yildagi yog'in-sochin $0,52 \cdot 10^6 \text{ km}^3$ bo'lsa, bug'langan suv $0,52 \cdot 10^6 \text{ km}^3$) teng bo'ladi. Demak, Yer yuzidagi suv va bug' ham o'zaro dinamik muvozanatda bo'ladi.

Suyuqlik miqdori to'liq bug'lansa, aksincha, bug' to'liq kondensatga aylansa, shunda suv-bug' sistemasi dinamik muvozanat holatidan chiqadi va statik(turg'un) holat paydo bo'ladi.

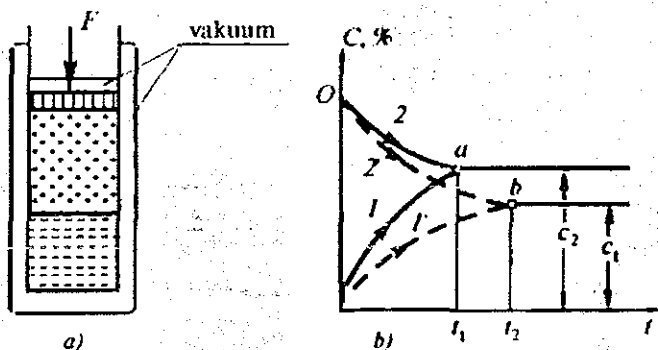
Kimyoviy reaksiya jarayoni ham muvozanatli bo'lishi mumkin, masalan



Sxemadan ko'rinadiki, A va B moddalarining o'zaro kimyoviy reaksiyaga kirishi natijasida C modda hosil bo'ladi. Shundan so'ng reaksiya jadalligi hamda A va B modda zarralarining o'zaro ta'sirlashuvi ham sekinlashadi.

Tashqi yoki ichki kuchlar ta'sirida C modda A va B moddalarga aylana boshlaydi, ya'ni dissotsiatsiya jarayoni o'rinli bo'ladi. Kimyoviy reaksiya boshlanishidan ma'lum vaqt o'tgach, muayyan o'zgarmas bosim va temperaturada to'g'ri va teskari reaksiya mahsulotlari o'zaro tenglashadi, ya'ni muvozanat holat paydo bo'ladi. Buni *kimyoviy reaksiyaning dinamik muvozanati* deyiladi.

Demak, kimyoviy reaksiya muvozanatli bo'lsa, moddalar sintezi va dissotsiatsiyasi bir xil tezlikda sodir bo'ladi. Bunda sintezlangan (o'zaro birikkan) modda miqdori (vaqt birligida) dissotsiatsiyalangan (bo'linib ketgan) modda miqdoriga absolut teng bo'ladi.



2.19-rasm. Muvozanatli holat jarayonlari: a) suv-bug' sistemasi; b) kimyoviy reaksiya jarayoni; 1 va $1'$ — to'g'ri hamda 2 va $2'$ teskari reaksiyalar.

Kimyoviy reaksiyani tasvirlovchi diagrammadan ko'rinadiki, P_1 va T_1 parametrlarga ega bo'lgan moddalar reaksiyaga kirishi natijasida t_1 vaqtda dinamik muvozanatga erishadi (2.19-rasm, a). Bunda P_1 va T_1 parametrlarga mos keluvchi C_1 modda to'g'ri yoki teskari reaksiyada t_1 vaqtda hosil bo'ladi. Kimyoviy reaksiya kechayotgan sharoitdagi bosim P_2 va temperatura T_2 o'zgarsa, albatta t_2 vaqtda C_2 modda hosil bo'ladi (2.19-rasm, b-nuqta).

Demak, kimyoviy reaksiyaga qatnashuvchi (hosil bo'luvchi) modda mutlaqo boshqa moddaga aylanib ulgurmasdan (to'g'ri va teskari jarayonlarda) avvalroq muvozanat holatiga o'tishi ham mumkin ekan. Natijada reaksiya tezroq yoki sekinroq kechishi hisobiga muvozanat nuqtasi albatta, o'ngga yoki chapga siljiydi. Kimyoviy reaksiyalardagi dinamik muvozanat holatlarini aniqlashda termodinamika qonunlaridan foydalaniladi.

2.14. Entropiya va uning fizik xususiyatlari

Entropiya qiymatlarini bir-biriga qo'shish teoremasiga muvofiq, teng temperaturali sistemaning issiqlik miqdori, uning har bir qismlaridagi issiqlik miqdorlari ($\Delta q_1, \Delta q_2, \dots, \Delta q_n$) ning yig'indisiga teng, ya'ni

$$\Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots + \Delta q_n = \Delta q \quad (97)$$

Ma'lumki, entropiya sistema issiqlik miqdorining o'zgarishini shu sistema absolut temperaturasi ga nisbatini ifodalaydi. U holda sistemaning entropiyasi uning qismlari entropiyalarining yig'indisiga teng bo'lladi:

$$\frac{\Delta q}{T} = \frac{\Delta q_1}{T} + \frac{\Delta q_2}{T} + \dots + \frac{\Delta q_n}{T} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \dots + \Delta S_n = \Delta S, \quad (98)$$

bunda $\Delta S_1, \Delta S_2, \dots, \Delta S_n$ — sistema qismlaridagi entropiya o'zgaruvchanligi; ΔS — butun sistema entropiyasining o'zgaruvchanligi.

Demak, sistema entropiyasining o'zgaruvchanligi sistema qismlari entropiyasi o'zgaruvchanligi yig'indisiga teng ekan. Bunda «entropiya yig'indisi» deyilganda algebraik yig'indi tushuniladi. Chunki sistema qismlari entropiyalari musbat yoki manfiy ishorali bo'lishi mumkin. Izolatsiyalangan sistema entropiyasi o'zgaruvchanligini aniqlash uchun uning har bir qismlaridagi entropiya

ishorasining o'zgarishini topib, so'ngra ularning algebraik yig'indisi olinadi. Buning uchun avval, quyidagilar:

- sikl uchun issiqlik manbayi, siklda qatnashuvchi ish jismi va sovuq manba entropiyasining o'zgaruvchanligini;
- jarayonda qatnashuvchi issiqlik manbayi va ish jismi entropiyalarining o'zgaruvchanligini;
- ikki jismning o'zaro issiqlik almashinuvidagi entropiya o'zgaruvchanligini aniqlash kerak.

Sistema qismlaridagi entropiya o'zgaruvchanligining algebraik yig'indisi qaytar va qaytmaz sikl va jarayonlar hamda ikki jismning o'zaro issiqlik almashinuvi uchun quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$\left(\frac{dq_1'}{T_1'} + \frac{dq_1''}{T_1''} + \dots + \frac{dq_1^n}{T_1^n} \right) - \left(\frac{dq_2'}{T_2'} + \frac{dq_2''}{T_2''} + \dots + \frac{dq_2^n}{T_2^n} \right) = 0 \quad (99)$$

$$\left(\frac{dq_1'}{T_1'} + \frac{dq_1''}{T_1''} + \dots + \frac{dq_1^n}{T_1^n} \right) - \left(\frac{dq_{2q.s}'}{T_2'} + \frac{dq_{2q.s}''}{T_2''} + \dots + \frac{dq_{2q.s}^n}{T_2^n} \right) < 0 \quad (100)$$

O'zgarishlar juda kichikligini va berk sistemada sodir bo'lishini e'tirof etsak, issiqlik o'tkazuvchanlik uchun quyidagilarni yozishimiz mumkin:

$$T_2 < T_1 \text{ bo'lganida } \Delta S = -\frac{dq_1}{T_1} + \frac{dq_2}{T_2} > 0 \quad (101)$$

Yuqorida keltirilgan tenglamalardan ko'rinadiki, berk izolatsiyalangan sistemada entropiya kamaymasdan ortadi.

Demak, *entropiya — bu shunday termodinamik kattalikki, uning o'zgarishi asosida real jarayonlar kechishining yo'nalishlari aniqlanadi. Haqiqatdan ham jarayon yo'nalishi bo'yicha entropiya ortib boradi, aksincha, entropiya kamayishi yo'nalishida jarayon sodir bo'lmaydi.*

Nemis fizigi R. Klauzius termodinamik hodisalarni o'rganib, «*olam energiyasi o'zgarmas, uning entropiyasi esa maksimumga intiladi*» degan. Olam muvozanatga intiladi. Bu muvozanatga intilish jarayonida sistema o'zining ichki energiyasini kamaytirish hisobiga muayyan ish bajaradi, ammo muvozanat holat energiyasidan pastga o'ta olmaydi.

Demak, fizika nuqtayi nazaridan, *entropiya hech qanday fizik ma'noga ega emas, u ideal gazdagi ayrim issiqlik hodisalarni tushuntirishni osonlashtirish maqsadida kiritilgan matematik tushunchadir.*

2.15. Termodinamikaning uchinchi qonuni

Termodinamikaning uchinchi qonunini nemis fizigi va kimyogari V. Nernst turli xil moddalarni o'ta past temperaturalarda o'rganib, erishilgan ilmiy tadqiqot natijalari asosida ta'riflab bergan. Bu qonunni *issiqlik teoremasi* yoki *Nernst prinsipi* (tamoyili) deb yuritiladi. Bu qonunni Nernst quyidagicha ta'riflagan: *absolut nol temperatura ostidagi istalgan izotermik jarayondagi sistema entropiyasining o'zgarishi nolga teng, ya'ni*

$$\Delta S_{T=0} = 0. \text{ bunda } S = S_0 = \text{const}$$

Demak, soddaroq qilib aytsek, absolut nol temperatura ostida sodir bo'ladigan *izotermik jarayonning o'zi izoentropikdir*. Bu qonuniyatni kvant fizikasining dahosi nemis fizigi Maks Plank statistik fizika qonunlari asosida o'rganib, absolut nol temperaturada sistema entropiyasi nolga tengligini tasdiqlagan.

Termodinamikaning uchinchi qonuniga muvofiq, izoterma — izoentropiya diagrammasi $T = 0$, $S = 0$ teng holati uchun TS koordinatasida tasvirlansa, uning grafigi koordinata boshidagi nuqtani beradi. Bunday diagrammadan biror yuzaga ega bo'lgan maydonchani topib bo'lmaydi, chunki nuqtaning yuzasi nolga teng. Jarayon, xuddi Karno siklinikiga o'xshash, ikkitadan izoterma va adiabatadan iborat bo'lganida va $T = 0$ holatida issiqlik chiqarilganida, uning grafigi TS koordinatasida T o'qiga parallel to'g'ri chiziqni beradi. Bu to'g'ri chiziq yuzaga ega emas, ya'ni uning yuzasi nolga teng.

Demak, *termodinamikaning uchinchi qonuni, uchinchi tur abadiy dvigatelni qurish mumkin emasligi* yana bir bor tasdiqlaydi. Uchinchi tur dvigateli bu shunday xayoliy dvigatelki, bir marta kiritilgan issiqlik hisobiga berk aylanma jarayonda ish bajarib ish moddasidan absolut nol temperatura ostida sovitgichga issiqlik chiqarib turadigan mashinadir.

Termodinamikaning uchinchi qonunidan shunday xulosa kelib chiqadiki, modda har qancha o'ta past temperaturagacha sovitilganida ham absolut nol temperaturaga erishib bo'lmastligini isbotlaydi. Lekin absolut nolga yaqinlashish ehtimolligining mavjudligini inkor etmaydi. Absolut nol temperaturada entropiya nolga teng bo'lishining sababi o'ta past temperaturalarda sodir bo'ladigan jarayon kvant xususiyatlarga egaligi bilan tushuntiriladi. Bunday o'ta past temperaturalarda haqiqiy muvozanat holatlari

ayrim sistemalarda o'rinli bo'ladi. Masalan, geliy-3 o'ta past temperaturada bir vaqtda uchta fazada bo'la oladi.

Nazorat savollari

?

1. Muvozanat nima? Dinamik muvozanatni ta'riflang.
2. Komponent, faza, gomogen va geterogen sistema deb nimaga aytiladi?
3. Termodinamikaning uchinchi qonunini ta'riflang va uning ma'nosini tushuntiring.
4. Termodinamikaning uchinchi qonunini kim birinchi bo'lib ta'riflagan va uni tushuntirgan?
5. Uchinchi turdagi abadiy dvigatel deb qanday dvigatelga aytiladi?
6. Moddani absolut temperaturagacha sovitish mumkinmi?

III BOB. GAZ SIKLLARI

3.1. Ichki yonuv dvigatellari haqida umumiy tushuncha va ularning tasnifi

Ish yoqilg'isi maxsus qurilma ichida yonadigan va yonish jarayonida ajralib chiqqan issiqlik miqdorining ma'lum qismini mexanik energiyaga aylantirib bera oladigan issiqlik mashinasiga **ichki yonuv dvigateli** (IYD) deyiladi. IYDlari konstruksiyasiga va ish aralashmasini yoqish usuliga ko'ra quyidagilarga bo'linadi:

1. Termodinamik jarayonlar sikl davomida silindrning ish hajmida ketma-ket va davriy ravishda kechadigan porshenli.

2. Ish jismi havo kompressorida siqiladigan, maxsus yonish kamerasida yoqiladigan va yonish mahsuloti gaz turbinasida kengayadigan gaz turbinali.

3. Yonish mahsuloti soploda kengayishidan reaktiv kuch vujudga keladigan reaktiv dvigatellar.

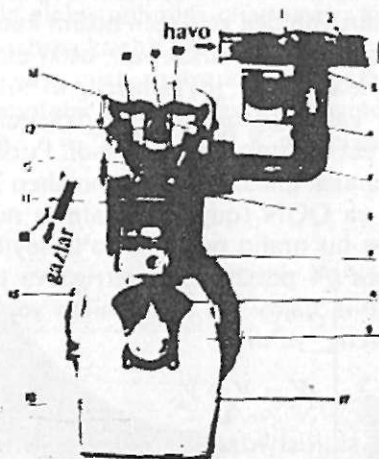
Ichki yonuv dvigatellari yoqilg'i turiga qarab, gaz (gaz dvigatellari), suyuq (benzin, solyar moyi, kerosin, ligroin va h.k) hamda binar (suyuq va gaz) yoqilg'ida ishlaydigan dvigatellarga bo'linadi. Ish sikliga qarab, ikki va to'rt taktili; yoqilg'ining kamerasiga kiritilishiga qarab, bosimli va bosimsiz; ish aralashmasining tayyorlanishiga ko'ra ish jismi tashqarida va ichkarida tayyorlanadigan dvigatellarga bo'linadi. Ish aralashmasini o't oldirish usuliga qarab, tashqi elektr manbayidan (elektr uchquni, o't oldirish shari —kalorizator) va silindrda siqilgan havoning qizishi (dizel dvigateli) hisobiga

yuritiladigan dvigatellar mavjud. IYDlari *avtomobil, aviatsiya, gaz turbinali va reaktiv dvigatellarga* bo'linadi.

Avtomobil uchun IYD larining yaratilishi XIX asrning 60-yillariga to'g'ri keildi. Bu davrda Lenuar (1860-y.) Fransiyada, N. Otto va E. Lengen (1867-y.) Germaniyada tadqiqotlar olib borgan. N. Ottoning to'rt taktli dvigateli (1867-y.) Bo-de-Rosha tomonidan (1862-y.) taklif etilgan sxema bo'yicha yaratiladi. XIX asrda neftni qayta ishlashda olingan benzin, kerosinni elektr uchquni yordamida yoqilishi IYD larining keng tarqalishiga sabab bo'ldi.

Rossiyada birinchi marta benzinda ishlaydigan IYD (Kostovich dvigateli) 1889-yil yaratilgan. Nemis muhandisi R. Dizel tomonidan ixtiro etilgan (1892-y. va 1897-y. patent olgan) siqilish hisobiga qizigan havoga purkalgan yoqilg'ining yonishi natijasida ishlaydigan IYD ning takomillashgan konstruksiyasi 1899-yil Peterburgda yasalgan. Keyinchalik kompressorsiz dizel dvigateli 1901-yil G. V. Trinkler va Ya. V. Mamin yaratdilar.

Dizel dvigatellarining nazariyasini to'laroq o'rganilib, uning konstruksiyalari takomillashib borishi natijasida yengil dvigatellar qurildi. Dizel dvigateli tejamlil bo'lganligi uchun u keng tarqala boshladi.



3.1-rasm. Porshenli ichki yonuv dvigateliining prinsipial sxemasi:

1 va 2 — atmosfera havosining kamerasi va filtri; 3 va 4 — havo va ish aralashmasi (ish jismi) drossellari; 5 — ish aralashmasi; 6 — o't oldirish svechasi; 7 — porshen; 8 — shatun; 9 va 13 — tirsak va taqsimlash vallari; 10 — tutun gazlarini chiqarish quvuri; 11 — silindr; 12 — klapani yo'naltiruvchi vtulka; 14 — suxariklar tutqichining boshi; 15 — maxovik; 16 — karterdagi sovitkich moyi — avtol; 17 — karter; 18 va 19 — kiritish va chiqarish klapanlari; 20 — kulochoklar.



Dizel Rudolf

Dizel dvigatelinining solishtirma yoqilg'i sarfi taxminan $190 \text{ g/kW} \cdot \text{soat}$, boshqa turdagi dvigatellar uchun esa o'rtacha $270 \text{ g/kW} \cdot \text{soat}$ ni tashkil etadi. Dizel dvigatellarida yoqilg'i sarfining FIK $31-44\%$ bo'lsa, karburatorli dvigatellarda odatda, $25-30\%$ dan oshmaydi. Gaz yoqilg'isida ishlaydigan gazodizel va karburatorli dvigatellari ham mavjud.

Porshenli dvigatellar tejamliligi, kam metall sarflanganligi, ishga tushirish osonligi, ishonchli ishlashi, mustahkamligi hamda uzoq muddat ishlashi, ixchamligi tufayli transportda keng qo'llaniladi. Bundan tashqari u kichik va katta quvvatli elektr stansiyalarida (20 kW dan 20 MW gacha) ham ishlatiladi.

IYDning prinsipial sxemasi 3.1-rasmda keltirilgan. Porshenli IYD ning asosini silindr 11 va unga kiritilgan porshen 7 tashkil etadi. Porshen krivoship-shatun mexanizmi orqali tirsak valiga yonish mahsuloti gazlari vujudga keltirgan bosim kuchini uzatadi. Silindrlar blokining ostki qismiga tirsak vali, ustki qismiga kiritish 18 va chiqarish 19 klapanlari joylashtirilgan silindr kallagi o'rnatiladi. Silindrlar kallagiga karburatorli dvigatellarda svecha 6, dizel dvigatellarida esa forsunkalar o'rnatiladi. Porshen silindrda ilgariylanma-qaytma harakat qiladi. Silindrda porshen YQN (yuqori qo'zg'almas nuqtasi) va QQN (quyi qo'zg'almas nuqtasi) oraliqda harakatlanadi va bu oraliq porshen yo'li deyiladi. Silindrning ish hajmi $V_s = \pi d^2 l / 4$ porshen diametriga va uning yo'liga bog'liq. Silindrning to'la hajmi ish hajmi bilan yonish kamerasi hajmlari yig'indisiga teng, ya'ni

$$V_s = V_u + V_k.$$

Ish yoqilg'isining siqilish darajasi porshenning silindrdagi holatiga bog'liq va quyidagicha ifodalanadi:

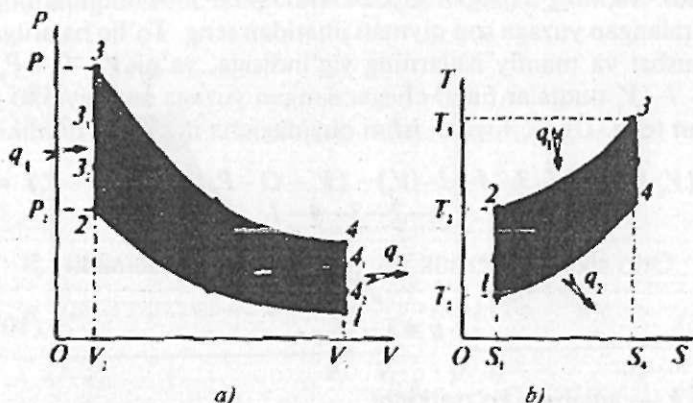
$$\varepsilon = V_s \left(1 - \frac{V_u}{V_k} \right). \quad (102)$$

Ichki yonuv dvigatellarida ish jismini siqish darajasi qancha yuqori bo'lsa, dvigatel shuncha turg'un va tejamliligi ishlaydi.

3.2. Ichki yonuv dvigatellari siklida kechadigan termodinamik jarayonlar

IYoD larining ideal (Otto) sikli. To'rt taktli IYD ning sikli kiritish (yoqilg'i bilan havo aralashmasining yonish kamerasiga kiritilishi), siqish (ish aralashmasining siqilishi), kengayish (yonish mahsulotlarining kengayishi) va chiqarish (kengayib bo'lgan yonish mahsulotining siqib chiqarilishi) taktlaridan iborat. Soddaroq qilib ularni birinchi (kiritish), ikkinchi (siqish), uchinchi (kengayish) va to'rtinchi (chiqarish) taktleri deb yuritiladi.

Karburatorli to'rt taktli IYD nazariy siklidagi termodinamik jarayonlarni qarab chiqamiz. Siklga $V = \text{const}$ bo'lganda issiqlik kiritilishi (Otto sikli) jarayonida ish jismi parametrlari o'zgaradi. Porshen (3.2-rasm. 1, 2 nuqtalar oralig'ida) silindrga kiritilgan ish aralashmasini adiabatik siqish jarayonida, ish aralashma parametrlari (P, V, T) o'zgaradi. Ish aralashma hajmining kamayib borishi natijasida uning temperaturasi aralashma ichki energiyasi hisobiga ortadi (isiydi). Ish aralashmasi to'la siqilgandan so'ng, unga tashqaridan q_1 issiqlik miqdori kiritiladi, ya'ni svecha kontaktlari oralig'ida elektr uchquni chaqnaydi. Kiritilgan q_1 issiqlik hisobiga ish aralashma kuchli kimyoviy reaksiyaga kirishadi (ya'ni portlab yonadi) va yonish mahsulotining parametrlari (P va T) (3.2-rasm. 2, 3 nuqtalar oralig'i) keskin o'zgaradi, ya'ni $P = (25 - 30) \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ga, $T = 2200 - 2300 \text{ K}$ ga yetadi. IYD da benzol,



3.2-rasm. Ichki yonuv dvigatelining termodinamik sikliga $V = \text{const}$ ostida issiqlik kiritiladigan jarayonning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

benzin, kerosin ishlatilganda siqish takti oxiridagi bosim $(5 - 10) \cdot 10^5$ Pa, gaz qo'llanilganda $(9 - 11) \cdot 10^5$ Pa ga etadi.

Yonish jarayonining oxirida porshen YQN dan QQN tomon yonish mahsulotining bosim kuchi ta'sirida harakatlanadi. Shunda termodinamik sistema adiabatik, ya'ni $dq = 0$ (3.2-rasm. 3, 4 nuqtalar oralig'i) kengayadi. Shunda ish aralashmasi parametrlari (P, V, T) ning o'zgarishi hisobiga ish bajariladi. Porshen QQN ga yetishi oldidan chiqarish klapani ochiladi va foydali ishga aylanmasdan qolgan issiqlik miqdori q_1 yonish mahsuloti gazlari, yonmasdan qolgan yoqilg'i va reaksiyaga kirishmagan havo bilan tashqariga (sovitkichga) chiqariladi (4—1 nuqtalar oralig'i).

Siklning PV diagrammasidan ko'rinadiki, 1—2 va 3—4 nuqtalar oralig'idagi jarayonlar adiabatik, 2—3 va 4—1 nuqtalari oralig'ida esa izoxorik bo'ladi.

Demak, issiqlik termodinamik sistemaga $V = \text{const}$ bo'lgan holatda kiritilgandan so'ng yonish jarayoni sodir bo'ladigan siklning PV diagrammasi ikkita adiabatadan va ikkita izoxoradan tashkil topar ekan. Siklning TS diagrammasidan ko'rinib turibdiki, sistemaga issiqlik kiritilganida yoki undan chiqarilganda sistema entropiyasi o'zgaruvchan bo'lar ekan. Lekin sistemaning absolut temperaturasi izoxorik jarayonda keskin ortadi, adiabatik jarayonda esa tekis kamayadi.

Demak, kiritilgan q_1 issiqlik miqdori ish aralashmasining to'liq yonishiga ijobiy ta'sir ko'rsatishi bilan siklning foydali ishini orttiradi. Siklning bajargan foydali ishi 1—2—3—4 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng. To'liq bajarilgan ish musbat va manfiy ishlarning yig'indisiga, ya'ni $V_1-O-P_3-3-4-1-V_1$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Unda, foydali ishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$A = (V_1-O-P_3-3-4-1-V_1) - (V_1-O-P_2-3-2-1-V_1) = 1-2-3-4-1.$$

Otto siklning termik *fik* quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}, \quad (103)$$

bunda k — adiabata ko'rsatkichi.

Dizel sikli. Issiqlik $P = \text{const}$ bo'lganda kiritiladigan sikl *Dizel sikli* deb yuritiladi.

Faraz qilaylik, porshen QQN dan YQN tomon harakatlani-
shida ish aralashmani 1—2 nuqtalar oralig'ida adiabatik ($dq = 0$)
siqsin. Ana shunda sodir bo'ladigan siklni qarab chiqamiz. Bunda
aralashmaning ichki energiyasi o'zgaradi va aralashma parametrlari
boshqa qiymatlarni qabul qiladi. Dizel dvigatellarining siqish
taktini oxiridagi bosimi 3,0 – 3,5 MPa, karburatorli dvigatellari-
ning oxiridagi bosim $P_2 = 0,9 - 1,5$ MPa va ish aralashmasining
temperaturasi $T_3 = 550 - 750$ K ga yetadi.

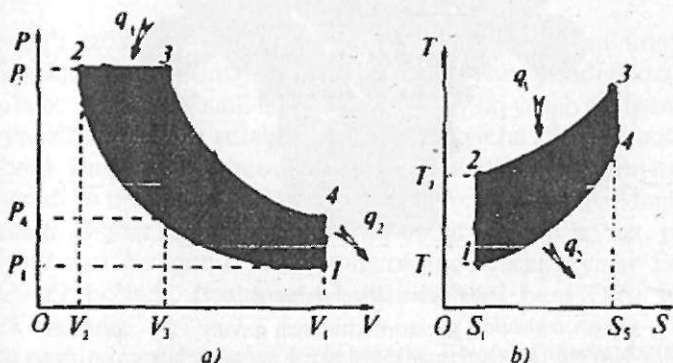
PV diagrammadagi nuqtalarga mos ravishda (3.2 va 3.3-ras-
mlar) 3 nuqtadagi P_3 va T_3 qiymatlar quyidagi tenglamalardan
foydalanib hisoblanishi mumkin:

$$P_3 = P_1 \cdot \epsilon^n$$

$$T_3 = T_1 \cdot \epsilon^{n-1} \quad (104)$$

bunda $P_1 = 0,09$ MPa; $T_1 = 323$ K; $n_1 = 1,40$.

Porshen YQN yetkazish davrida havo temperaturasi yoqilg'i-
ning o'z-o'zidan yonish temperaturasidan yuqori bo'lgan
 $T = 1000 - 1200$ K ga yetkaziladi. Bu issiqlik tashqaridan kiritil-
gan q_1 issiqlik miqdori hisoblanadi. Shunda aralashma portlab
yonadi yoki undan pastroq temperaturada elektr uchquni hisobiga
ishchi aralashma yondiriladi. Porshen QQN tomon o'ta ozgina
harakatlanishi hisobiga V_2 o'zgarsa-da, bosim $P = \text{const}$ holatda
saqlanadi (3.3-rasm, 2—3 nuqta lar oralig'i). Shunda yonish
mahsulotining absolut temperaturasi ozgina ortadi (3.3-rasm. TS

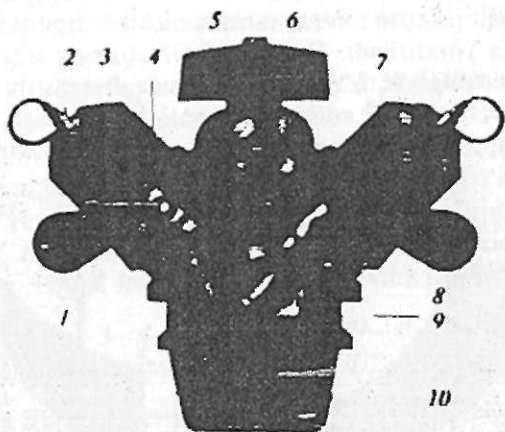


3.3-rasm. Ichki yonuv dvigateli sikliga issiqlik $P = \text{const}$ bo'lganda
kiritiladigan jarayonning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

diagramma, 2—3 nuqtalar oralig'i). Ish aralashmasi to'liq yonib bo'lgandan so'ng, adiabatik kengayayotgan yonish mahsulotining bosimi ta'sirida porshen YQN dan QQN ga tomon harakatlanadi (3—4 nuqtalar oralig'i). Bu kengayish jarayonida yonish mahsuloti ish bajaradi. Yonish mahsulotidagi qoldiq issiqlik energiyasi q_2 tutun gazlari bilan tashqariga chiqariladi (4—1 nuqtalar oralig'i). Sikl yana takrorlanadi.

Siklning bajargan to'la ishi $V_1-O-P_2-3-4-V_1$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Siklida ishtirok etgan ish jismi ustida bajarilgan manfiy, ya'ni siqish taktining ishi $V_1-O-P_2-2-1-V_1$ nuqtalar hosil qilgan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Siklning bajargan foydali ishi esa yuqorida keltirilgan to'la yuzadan manfiy ish yuzasining ayirmasi 1—2—3—4—1 ga teng bo'ladi. Siklning TS diagrammasidan ko'rinib turibdiki, entropiyaning o'zgarishi $dS = S_4 - S_1$, $V = \text{const}$ bo'lgan holatida siklga issiqlik kiritiladigan jarayonga nisbatan kuchsizroq o'zgarar ekan.

Sikl ikkita adiabat va bittadan izobara hamda izoxoralardan tashkil topadi. Dvigatelning ishi ish aralashmasining siqilish, kengayish, bosimning o'zgarish, yonish mahsulotining kengayish darajalariga bog'liq bo'ladi.



3.4-rasm. Dizel dvigateli:

- 1 — yonish mahsuloti gazlarini chiqarish quvuri; 2 — forsunka;
 3 — sovitkich modda (suv); 4 — porshen siqish xalqalari bilan; 5 — havo filtri;
 6 — havoni so'rish-haydash mexanizmi; 7 — silindr; 8 — shatun;
 9 — tirsak vali; 10 — karter.

Siklning termik foydali ish koeffitsientini adiabatik siqish va kengayish jarayonlaridagi adiabata ko'rsatkichi hamda koeffitsientlar ϵ va ρ orqali quyidagicha yoziladi:

$$\eta_r = 1 - \frac{(\rho^k - 1)}{k(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\epsilon^{k-1}}. \quad (105)$$

bunda $\rho = \frac{V_1}{V_2}$, $\rho^k = \frac{V_2}{V_3}$, $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$.

Demak, $P = \text{const}$ bo'lgan holatda ish aralashmasiga tashqaridan issiqlik miqdori q_1 kiritilganida termik *fik* siqish, bosim, hajmning o'zgarish darajalariga va adiabata ko'rsatkichiga ko'proq bog'liq bo'lar ekan.

Trinkler-Sabate sikli. Issiqlik $V = \text{const}$ va $P = \text{const}$ bo'lganda ketma-ket kiritiladigan sikl Trinkler-Sabate sikli deb yuritiladi. Bu sikl Otto va Dizel sikllarining birlashtirilgani bo'lib, ish aralashmasining ma'lum qismi $V = \text{const}$ bo'lganda yonsa, qolgan qismi $P = \text{const}$ bo'lganda yonadi.

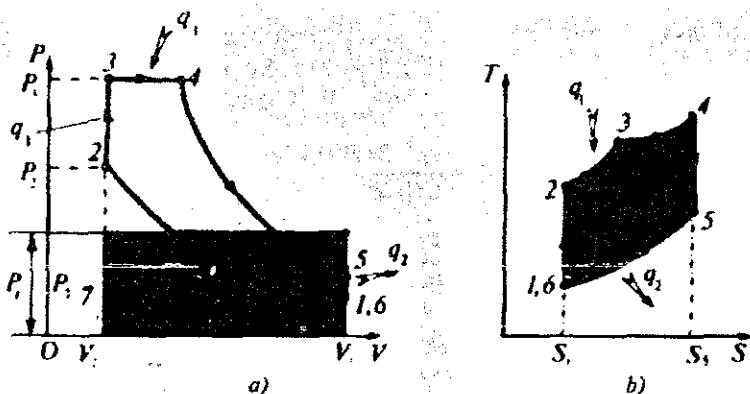
Silindrga kiritilgan yoqilg'i bilan havo aralashmasi siqish taktida o'z parametrlarini 1 nuqtadan 2 nuqtagacha adiabata bo'yicha o'zgartirib boradi (3.5-rasm).

Siqish takti oxirida q_1 issiqlik kiritilishi bilan ish aralashmasi $V = \text{const}$ bo'lganda yonadi, uning bosimi va temperaturasi 3 nuqta holatiga yetadi. Bunda qabul qilingan issiqlik miqdori q_1 ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q_1 = mc_p(T_3 - T_2). \quad (106)$$

Yoqilg'i izoxora bo'yicha to'liq yonib ulgurmasdan unga q_1 issiqlik miqdori $P = \text{const}$ ostida kiritiladi va yondiriladi. Porshen YQN da bo'lganligi sababli ish aralashmasi to'liq yonib bo'lgandan so'ng yonish mahsuloti adiabata ($dq = 0$) bo'yicha (4 va 5 nuqtalar oralig'ida) kengayib porsheni QQN ga harakatlantirish jarayonida ish bajaradi va uning qiymati yuqorida qarab chiqilgan usuldagiday aniqlanadi. Siqish darajasi xuddi Otto siklidagi kabi bo'lsa, jarayon $P = \text{const}$ bo'lganda hajmning oldindan kengayishi Dizel siklidagidek bo'ladi. Bosimning ortish darajasi ham Otto siklidagidek bo'ladi.

Sistemaning temperaturasi bir tekis o'zgarmasdan sakrab-sakrab o'zgaradi, entropiyasining o'zgaruvchanligi $V = \text{const}$ va $P = \text{const}$ bo'lgan sikllardagiday qoladi.



3.5-rasm. $V=\text{const}$ va $P=\text{const}$ bo'lganda siklga issiqlik kiritiladigan jarayonning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

Yuqoridagi fikrlar asosida siklning termik *fik* ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda_t^k - 1}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho - 1)} \frac{1}{\epsilon^{k-1}}, \quad (107)$$

bunda $\lambda_p^k = \frac{p_1^a}{p_2^a}$ — adiabatik jarayonda bosimning o'zgarishi;

$\lambda = \frac{p_1}{p_2}$ — bosimning o'zgarishi

3.3. Ichki yonuv dvigatelining indikator ishi, quvvati va foydali ish koeffitsienti

Yuqorida biz tanishib chiqqan sikllar ideal sikllar bo'lib, ularda turli xil qarshilik, isroflar hisobga olinmagan. Real dvigatellarning ish siklini tahlil qilish yo'li bilan ularning ishini, quvvatini, foydali ish koeffitsientini aniqlash maqsadida dvigatelning indikator diagrammasi (silindrdagi bosimning porshen kallagi ustidagi hajmga bog'liqligi) indikator asbobi yordamida PV koordinatasida quriladi va undan dvigatelning indikator ishi A_i aniqlanadi. Ishning qiymati $a-a'-f-k-z_1-e-b_1-a$ nuqtalar bilan chegaralangan (3.5-rasm) yuzaga son qiymati jihatidan teng. Har qanday IYD da yonish mahsuloti — tutun gazlari hosil bo'ladi. Agar gazlarning

hosil bo'lishiga sarflangan ish ham hisobga olinsa, to'rt taktli karburatorli dvigatelning to'la indikator ishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$A_{\text{to'la}} = A_i - A_{\text{mech}} \quad (108)$$

Ish A_i miqdori turli-tuman detallar orasidagi ishqalanishni kamaytiradi va ularni mexanik isroflar A_m deyiladi. Mexanik isroflarga yana moy, yoqilg'i nasoslarini yuritishga sarflangan quvvat ham qo'shiladi. Unda, iste'molchi dvigatelning validan oladigan effektiv (samarali) ish quyidagicha ifodalanadi:

$$A_{\text{ef}} = A_i - A_m \quad (109)$$

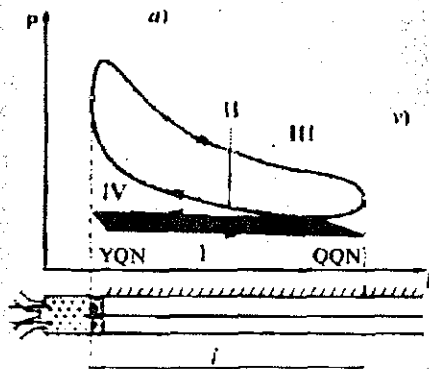
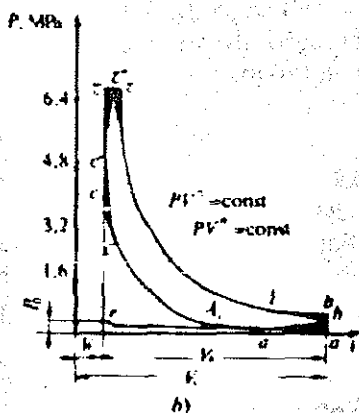
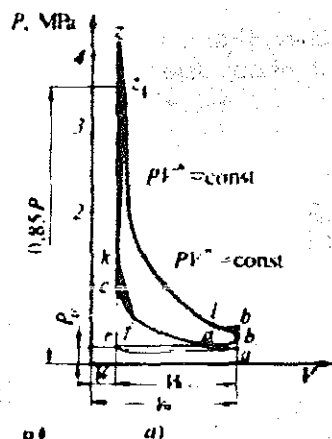
To'rt taktli IYD larida $A_{\text{to'la}}$ ga mexanik isroflarni hisobga oluvchi A_m ham qo'shilib ketadi. IYDning indikator diagrammasini ideal sikl diagrammasiga solishtirganda, unda bir jarayondan ikkinchisiga ravon o'tiladi. Real ishlaydigan dvigateldagi jarayonlarning boshlanish va oxirgi nuqtalari aniq bo'lganda, ya'ni ularning chegaralari bir-biriga qo'shilib ketmaganda dvigatel ravon ishlay olmasdi. Indikator diagrammalardan ko'rinib turibdiki, $a-c-z-b-a$ (3.6-rasm, *a*) va $a-c-z-z-b-a$ (3.6-rasm, *b*) chegaralangan yuzalar nazariy hisoblangan indikator ishi A_m ga teng. Haqiqiy ish esa $a-a'-f-k-z_1-l-b_1-a$ (3.6-rasm, *a*) va $c'-c''-z'_1-l-b'-a$ (3.6-rasm, *b*) nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatdan teng bo'ladi.

Diagrammalardan ko'rinib turibdiki, $f-c-k-z-z_1-k-f$ va $z'-c'-c''-z'-z'$ hamda $(z'-k-z-z') + (l'-b-a-a'-b-l)$ nuqtalar bilan belgilangan shtrixlangan yuzalar qiymatiga teng bo'lgan kattalikka dvigatelning nazariy hisoblangan indikator ishi A_i farq qilar ekan. Dizel dvigatelining indikator diagrammasi (3.6-rasm, *b*) $V = \text{const}$ va $P = \text{const}$ bo'lganda sistemaga tashqaridan issiqlik uzatilgan holatga mos keladi. Bu indikator diagrammasi asosida dizel dvigatelining bajargan ishini quyidagicha yozish mumkin:

$$A_i = A_{z'-z} - A_{a'-a} \quad (110)$$

$z' - z$ nuqtalari oralig'ida (3.6-rasm, *b*) bosim o'zgarmas, ya'ni $P = \text{const}$ bo'lgan holatda dvigatelning bajargan ishini quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$A_{z'-z} = P_2 V_c \text{ yoki } A_{z'-z} = P_2 V_c (\rho - 1) = \lambda P V_c (\rho - 1). \quad (111)$$



3.6-rasm. Ichki yonuv dvigatelinining indikator diagrammasi:

- a) karbyuratorli;
- b) dizel dvigatellari;
- v) o'rtacha indikator bosim aniqlanadigan PV diagrammasi.

Yonish mahsuloti adiabatik kengayish jarayonida sistemaning bir necha parametrlari o'zgarishi mumkinligi asosida $z - b$ nuqtalar oralig'ida bajarilgan ishni politropik kengayishdagi ish orqali ifodalab,

$$\rho = \frac{V_2}{V_1}; \delta = \frac{V_h}{V_1}; \lambda = \frac{P_2}{P_1}$$

ekanligini e'tiborga olib ishni murakkabroq matematik ko'rishlarda yoziladi.

IYDning indikator quvvati — bu silindr ichida erishiladigan indikator diagrammasidan hisoblab topiladigan quvvat. Indikator quvvat silindrdagi o'rtacha bosimga va siqish takti hajmiga, silindrlar soniga, sikldagi porshen yo'lining soniga bog'liq, ya'ni

$$N_s = \frac{2\pi}{\tau} P_i V_h = \frac{2\pi}{\tau} A_i, \quad (112)$$

bunda $2\pi/\tau$ — dvigatelning 1 sekunddagi ish sikli soni;

n — tirsak valining aylanishlar chastotasi, ayl/s;

τ — sikldagi porshen yo'lining soni;

$A_i = P_i V_h$ — dvigatelning indikator ishi (bunda, P_i — o'rtacha indikator bosim, Pa; $V_h = \pi d^2 l / 4$ va d — silindrning ish hajmi va diametri; l — porshen yo'li, m).

IYD ning indikator *fik* — haqiqiy sikldagi issiqlik miqdoridan foydalanish darajasini ko'rsatadigan kattalik bo'lib, siklning bajarigan to'la ishi A_i ni shu siklda yoqilgan ish aralashmasi ajratgan jami issiqlik miqdori q_i ga nisbati bilan ifodalanadi:

$$\eta_i = \frac{A_i}{q_i} \quad (113)$$

Yoqilg'ining birlik massasi yonganda ajralgan issiqlik hisobiga siklda bajarilgan indikator ish orqali IYD ning indikator *fik* ni quyidagicha yozish mumkin.

$$\eta_i = \frac{A_i}{q_q}, \quad (114)$$

bunda q_q — yoqilg'i ajratgan quyi issiqlik miqdori.

Real dvigatelning indikator diagrammasi (3.6-rasm, b) elektropnevmatik indikator (masalan, MAI-2) yoki katodli inersion bo'lmagan ossillograf (kvars datchikli) yordamida yozib olinadi va diagramma konturi hosil qilgan yuza P_i aniqlanadi:

$$P_i = \frac{S}{l P_m}, \quad (115)$$

bunda l — porshen yo'li uzunligiga mos keluvchi (millimetrdagi ifodalanagan) uzunlik; P_m — masshtabning har bir millimetriga mos keladigan bosim, mm/MPa; S — yuza, m^2 .

Agar dvigatelning quvvati N_i va vaqt birligi (soat) davomida sarflangan yoqilg'i miqdori aniq bo'lsa, u holda yoqilg'ining solishtirma sarfi (g/kW · soat) quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$g_i = \frac{M_n}{N_i} \cdot 10^3, \quad (116)$$

bunda M_n — dvigatelning aniq tartibdagi (ya'ni $N_i = \text{const}$; $n = \text{const}$; $P_i = \text{const}$) ishi.

Unda, yuqoridagi tenglamalar asosida IYD indikator fik quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_i = \frac{1}{q_q' \cdot g_i} \quad (117)$$

bunda q_q' ning o'lchov birligi J/kg; g_i niki — kg/J.

Amaliy hisoblashlarda q_q' ni MJ/kg va g_i ni g/kW · soat o'lchab, η_i quyidagi ifodadan topiladi:

$$\eta_i = \frac{3.6 \cdot 10^3}{q_q' \cdot g_i} \quad (118)$$

Gaz dvigatellarida yoqilg'i sarfi m^3 da o'lchanib η_i yuqoridagilardan foydalanib yoziladi, ya'ni:

$$\eta_i = \frac{1}{q_q' \cdot V_i} \quad (119)$$

bunda q_q' va V_i larning o'lchov birligi, mos ravishda, J/m³ va m³/J da ifodalanadi. q_q' va V_i amaliy hisoblashlarda, mos ravishda, MJ/m³ va m³/kW · soatda ifodalanganligi uchun η_i ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_i = \frac{3.6}{q_q' \cdot V_i} \quad (120)$$

3.4. Ichki yonuv dvigatelining issiqlik balansi

Dvigatelning yonish kamerasiga kiritilgan ish aralashmasining ajratgan issiqligi to'liq foydali ishga aylanmaydi, faqat dvigatelning effektiv ishiga jami issiqlik miqdorining bir qismi sarflanadi, xolos. Sovitish sistemasini hisoblash uchun kiritilgan yoqilg'idan qanday darajada foydalanish mumkinligini bilish maqsadida ishga aylanmasdan qolgan issiqlik miqdori nimalarga sarflanishini bilish zarur. Shu sababli issiqlik balansi tenglamasi tuziladi:

$$q_g = q_{ekv} + q + q_r + q_{i,yo} + q_{may} + q_{qol} \quad (121)$$

bunda q_u — dvigatelga ma'lum ish tartibida kiritilgan yoqilg'ining umumiy issiqlik miqdori;

q_{ekv} — dvigatelning effektiv ishiga ekvivalent bo'lgan issiqlik miqdori;

q_i — sovutuvchi muhitga uzatilgan issiqlik miqdori;

q_r — tutunning dvigateldan olib chiqqan issiqlik miqdori;

$q_{i,yo}$ — to'la yonmagan yoqilg'i hisobiga isrof bo'lgan issiqlik miqdori;

q_{moy} — surkov moylari olgan issiqlik miqdori;

q_{qol} — issiqlik balansida hisobga olinmay qolgan issiqlik miqdori.

IYD ga kiritilgan to'la issiqlik miqdoriga nisbatan uning tashkil etuvchilarini foizlarda ifodalash mumkin:

$$Q_{ekv} = \frac{q_{ekv}}{q_u \cdot 100}; \quad Q_i = \frac{q_i}{q_u \cdot 100}; \quad Q_r = \frac{q_r}{q_u \cdot 100}$$

$$Q_{i,yo} = \frac{q_{i,yo}}{q_u \cdot 100}; \quad Q_{moy} = \frac{q_{moy}}{q_u \cdot 100}; \quad Q_{qol} = \frac{q_{qol}}{q_u \cdot 100} \quad (122)$$

Unda,

$$Q_{ekv} + Q_i + Q_r + Q_{i,yo} + Q_{moy} + Q_{qol} = 100\% \quad (123)$$

U holda M_{yo} ni kg/s, q_u ni J/kg da ifodalasak, 1 s da sarf bo'lgan issiqlik miqdorining ifodasi quyidagi ko'rinishda bo'ladi:

$$q_u = q_v M_{yo} \quad (124)$$

bunda M_{yo} — sarf bo'lgan yoqilg'i massasi.

Dvigatelning effektiv quvvatiga teng bo'lgan issiqlik miqdori quyidagiga teng, ya'ni

$$q_{ekv} = N_d \quad (125)$$

IYD ning silindri, silindrlar blokining kallagi, porshen va uning halqalari devorlari orqali suyuqlikka uzatiladigan issiqlik miqdori quyidagicha ifodalanadi:

$$q_i = M C_i (T_{chq} - T_{kv}), \quad (126)$$

bunda M — dvigatel orqali o'tadigan sovutuvchi modda (suyuqlik) miqdori, kg/s; C_i — sovitkichning solishtirma issiqlik sig'imi (masalan, suv uchun $C_i = 4186$ J/kg);

T_{chiq} va T_{kr} — sovitkichning dvigateldan chiqishidagi va kirishidagi temperaturalari, K.

Tutunning dvigateldan tashqariga olib chiqqan issiqlik miqdori quyidagi formuladan foydalanib aniqlanadi:

$$q_r = M_{yo} (m_2 \mu C_p' T_g - m_1 \mu C_p T_0), \quad (127)$$

bunda $M_{yo} m_2 \mu C_p' T_g$ — ish bajarib bo'lgan gazlarning silindrdan tashqariga chiqargan issiqlik miqdori, J/s;

$M_{yo} m_1 \mu C_p T_0$ — yangi yoqilg'i bilan silindrga kiritilgan issiqlik miqdori, J/s;

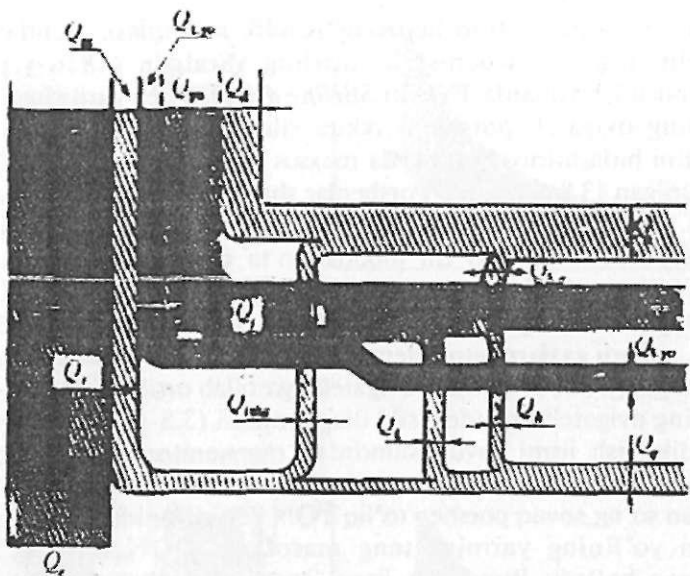
μC_p va $\mu C_p'$ — yonish mahsuloti va yangi ish aralashmasining o'zgarmas bosim ($P = \text{const}$) ostidagi molyar issiqlik sig'implari, J/kmo'l·s; T_g — gazlarning ish bajargandan keyin chiqib ketadigan quvur ortidagi temperaturasi, K; T_0 — silindrga kiritiladigan yangi ish yoqilg'isining temperaturasi, K.

4-jadval

Ichki yonuv dvigateli issiqlik balansining tarkihiy qismi, %

Dvigatel turi	$q_{ekv} = \eta_{ekv}$	q_s	q_g	$q_{t.yo.}$	q_{qol}
Elektr uchqunli	21—28	12—27	33—55	0—45	3—10
Dizel dvigateli:					
a) puflanadigan	29—42	15—35	20—45	0—5	2—5
b) puflanmaydigan	35—45	10—25	25—40	0—5	2—5

IYD ning issiqlik balansi tenglamasi asosida hisoblangan va amaliyotda aniqlangan issiqlik energiyasining taqsimoti (taqribiy) 4-jadvalda berilgan. Jadvaldan ko'rinadiki, dvigatelga kiritilgan ish aralashmasidan hosil bo'lgan issiqlik miqdorining 21—45% zi foydali ishga sarflansa, uning 12—35% zi sovitkichga chiqariladi.



3.7-rasm. Ichki yonuv dvigatelining ichki issiqlik balansi sxemasi.

q_u — dvigatelga ma'lum ish tartibida kiritilgan yoqilg'ining yonishida ajralgan issiqlik miqdori; q — dvigatelning indikator ishiga ekvivalent bo'lgan issiqlik miqdori; q_{ef} — dvigatelning effektiv ishiga ekvivalent bo'lgan issiqlik miqdori; q_c — dvigatel silindrini ichki devorlariga uzatilgan issiqlik miqdori; q_g — tutun gazlarini dvigateldan olib chiqqan issiqlik miqdori; q_m — dvigateldagi ishqalanishni engish va yordamchi mexanizmlarni yuritish ishiga ekvivalent bo'lgan issiqlik miqdori; q_s — sovitkichga uzatilgan issiqlik miqdori; q_{shq} — dvigatel' porsheni va porshen xalqalarini silindr devoriga ishqalanishida sovitkichga uzatgan issiqlik miqdori; q_{yo} — to'la yonmagan yoqilg'i hisobiga isrof bo'lgan issiqlik miqdori; q_{yom} — yonish maqsuloti gazlarini kinetik energiyasiga ekvivalent bo'lgan issiqlik miqdori; q_n — dvigatelning nurlashidan isrof bo'lgan issiqlik miqdori; q_k — tutun gazlarini kalta chiqarish quvurida sovitkich sistemaga uzatgan issiqlik miqdori; q_o — ish bajarib bo'lgan yonish mahsuloti gazlaridagi umumiy issiqlik miqdori. q_{out} — issiqlik balansida hisobga olinmay qolgan issiqlik miqdori.

3.5. Tashqi yonuv dvigatellari

Tashqi yonuv dvigatellarida ish yoqilg'isi dvigatel tashqarisida yoqilib, hosil bo'lgan issiqlik uning ish bajaruvchi qismiga yo'naltiriladi. Tashqi yonuv dvigateli (TYD) — tashqaridan kiritiladigan va regeneratsiyalanadigan issiqlik energiyasini foydali

mexanik ishga aylan tirib beruvchi issiqlik mashinasi. Bunday dvigatelni ingliz ixtirochisi R. Stirling yaratgan (1816-y.). Ko'pchilik adabiyotlarda TYD ni *Stirling dvigateli* deb yuritishadi.

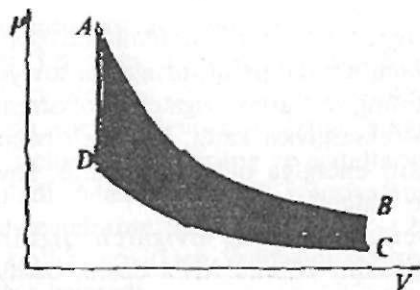
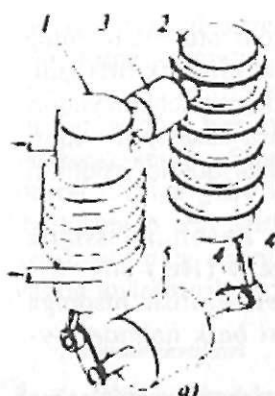
Stirling dvigateli porshenli ikkita silindrdan iborat bo'lib, silindrlarni birlashtiruvchi quvurda maxsus moslama (regenerator) joylashtirilgan (3.8-rasm, a). Porshenlar shatun orqali tirsak valiga ulangan. Bu ulanish o'ta yuksak mahorat va aniqlik bilan bajarilgan. Birinchi porshen ustidagi ish moddasi o'ta qizdiriladi, ikkinchi porshen — sovuq holatida, sovitkich hisobiga saqlanadi.

Ekologik talablarga (turli xil yoqilg'ida shovqinsiz, mustaqil ishlashi, zaharli gazlarni atmosferaga kam chiqarishi) javob berishi tufayli bugungi kunda bunday dvigatellarga talab ortib bormoqda.

Stirling dvigatelining ideal sikl diagrammasi (3.8-rasm, b) dan ko'rinadiki, ish jismi sovuq silindrdan regenerator orqali issiq silindrga o'tadi ($D-A$ nuqtalar oralig'i). Ish jismi issiqlikni qabul qilgandan so'ng, sovuq porshen to'liq YQN keltirilganida esa, issiq porshen yo'lining yarmiga teng masofaga, QQN tomonga chiqarilgan bo'ladi. Bunda ish jismi izotermik siqiladi. Siqilish jarayonida paydo bo'lgan issiqlik regenerator orqali tashqariga chiqariladi. Shunda sovuq porshen yuksak mahorat bilan yasalgan mexanizm yordamida tinch holatida saqlanadi, issiq porshen esa YQN dan QQN tomonga harakatlanadi, ya'ni ish jismi kengayishi hisobiga tirsak vali aylanadi. Demak, ish bajariladi (PV diagrammadagi AB nuqtalar oralig'i). Issiq porshen (B nuqta) YQN tomonga, sovuq porshen QQN tomonga harakatlanadi. Bunda $V = \text{const}$ saqlanadi (PV diagrammadagi BS nuqtalar oralig'i). Shundan so'ng, yana yuksak mahorat bilan yasalgan mexanizm issiq porshenni tinch holatida tutib turadi. Sovuq porshen YQN tomonga harakatlanib ish jismini siqadi. Ammo ish jismining uzluksiz sovutilishi natijasida u ismaydi, ya'ni $T = \text{const}$ saqlanadi. Shunda issiqlik isitkichdan sovitkichga to'liq o'tadi. So'ngra issiq porshen QQN tomoniga, sovuq porshen esa YQN ga qarab harakatlanadi. Bu jarayon $V = \text{const}$ bo'lganda sodir bo'ladi.

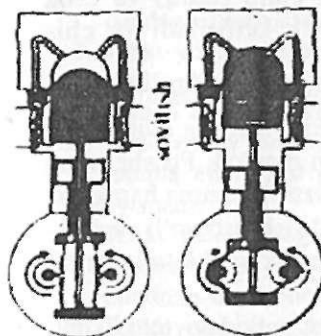
Ish jismi sovuq silindrdan regenerator orqali issiq silindrga o'tadi (PV diagrammadagi $D-A$ nuqtalar oralig'i). Shunda ish

* Robert Stirling (Shotlandiyalik ruhoniylar) XIX asr boshida yashagan bo'lib, kam xarajatli dvigatel konstruksiyasini yaratgan.

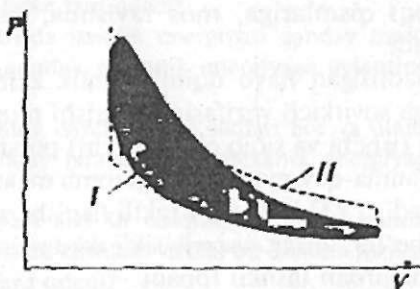


b)

Issiq yonish mahsulotlari



v)



g)

3.8-rasm. Stirlingning ideal dvigateli (a) va uning indikator diagrammasi (b). Real ishlab turgan Stirling dvigatelining sxematik tasviri (v) va uning PV koordinatasidagi indikator diagrammasi (g):

1 — uzluksiz tarzda tashqaridan kiritilib turiladigan issiq suv (gaz) oqimi yoki geliokonsentratyor yordamida Quyosh nuri energiyasi uzatilishi hisobiga doim issiq holatida saqlanadigan chap silindr; 2 — uzluksiz sovuq agent (sovuq suv, freon, geliy) oqimi hisobiga sovitilib turiladigan o'ng silindr; 3 — regenerator; 4 — krivoship-shatun mexanizmi; 4' — shatun; 5 — tirsak validagi maxsus moslama; AV va SD — issiq va sovuq izotermalar; DA va VS — izoxoralar; I — issiq silindr; 2-sovuq silindr; 3 — regenerator; 4 — krivoship-shatun mexanizmi (ularni birlashtiruvchi moslama sxemada ko'rsatilmagan); I va II — real va ideal sikl diagrammalari.

jismi regeneratordagi issiqlikni olib isiydi, regenerator esa o'zining boshlang'ich temperaturasiigacha soviydi. Sikl yana takrorlanadi.

Stirling va Karno dvigatellari o'xshash bo'lib, isitkichdan yuqori sifatli (eksergiyasi katta, ya'ni ish bajara olish xususiyati yuqori bo'lgan) energiya olib, ish bajarib, sovitkichga qoldiq issiqlikni uzatib ishlaydi.

Demak, Stirling dvigateli qizdirilgan havoning issiqlik energiyasini 10—20 MPa bosim ostidagi geliy (He_4) yoki vodorod (H_2) ga regeneratsiyalash yo'li bilan uzatish hisobiga ishlaydi. Bu dvigatelning asosiy ish jismlari berk hajmda joylashgan.

Geliy yoki vodorod berk hajmda (atmosfera havosi o'rniga geliy yoki vodorod to'ldirilgan hajm) bo'ladi. Bu berk hajmni regenerator ikkiga ajratib turadi. Uning chap (issiq) va o'ng (sovuq) qismlariga, mos ravishda, issiqlik keltiriladi va chiqariladi.

Qizdirilgan havo oqimi issiqlik keltiruvchi vazifasini, sovuq suv esa sovitkich vazifasini bajarishi mumkin. Stirling dvigatelida ikkita (ishchi va siqib chiqaruvchi) porshen mavjud. Porshenning ilgarilanma-qaytma harakatini romb mexanizmi aylanma harakatga keltiradi. TYD ham to'rt taktli (siqish, qizdirish, ish yo'li va sovish) bo'lib, uning nazariy sikli ikkita izotermik va ikkita izoxorik jarayonlardan tashkil topadi.

TYD ning fik xuddi Karno siklinikidek quyidagi tenglikdan aniqlanadi:

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2}, \quad (128)$$

bunda T_1 va T_2 — sovitkich va isitkich temperaturalari.

Faqat Karno siklining PV diagrammasidagi ishga teng yuza Stirling dvigatelinikiga nisbatan kichik bo'ladi.

Demak, Stirling dvigateli sikl davomida ko'proq issiqlik ishlatish hisobiga katta ish bajaradi. Stirling dvigateli istalgan yoqilg'ida va Quyosh energiyasida ishlay oladi. Faqat issiqlik energiyasini kiritish va chiqarish usulini bilish kifoyadir.

Muhandis, ixtirochilar, mohir ustalarning mohirona mehnatlari natijasida Stirling dvigatelining real ishlaydigan namunalari yaratilgan. Hozirgi kunda quvvati 5000 ot kuchi (3,5 MW) ga teng Stirling dvigatellari ishlamoqda.

Real Stirling dvigatelinining indikator diagrammasi 3.8-rasm, g da va uning sxematik tasviri 3.8-rasm, v da keltirilgan. Ko'p hollarda asosiy ish jismi sifatida vodorod gazi ishlatiladi. Ammo vodorod yuqori bosim ostida metall devorlari sirtiga singib (diffuziya) ketadi. Shuning uchun real Stirling dvigatellarida vodorod o'rniga geliy ishlatiladi. Masalan, kosmik stansiyalarda ishlatilayotgan real Stirling dvigatelinining issiqlik manbayi — bu Quyosh nurining energiyasi bo'lsa, sovitkich vazifasini stansiya soyasida joylashtirilgan radiator bajaradi.

Nazorat savollari

?

1. Ichki yonuv dvigateli deb qanday mashinaga aytiladi? Birinchi ichki yonuv dvigatelinini kim va qachon yaratgan?
2. Ichki yonuv dvigatellari necha turga bo'linadi va ular bir-biridan qanday ko'rsatkichlari bilan farq qiladi?
3. Ichki yonuv dvigatellarida issiqlik energiyasi qanday ushda hosil qilinadi va uni qanday mexanik energiyaga aylantirib, foydali ish bajariladi?
4. Ichki yonuv dvigatelinining qanday ideal sikllari bor va ularda issiqlik energiyasi qanday jarayonlarda mexanik energiyaga aylanadi?
5. Ichki yonuv dvigatellari siklida issiqlik energiyasi qanday termodinamik jarayonlarda kiritiladi va ular bir-biridan tuzilishi jihatidan nima bilan farq qiladi?
6. Ichki yonuv dvigatellari siklidagi termodinamik jarayonlarning PV va TS diagrammalaridan bajarilgan ish qanday aniqlanadi?
7. Ichki yonuv dvigatelinining indikator diagrammasi qanday diagramma va u nega quriladi?
8. Ichki yonuv dvigatelinining ishi, quvvati, foydali ish koeffitsienti qanday aniqlanadi?
9. Tashqi yonuv dvigatelinini kim va qachon loyihalagan hamda ichki yonuv dvigatellaridan qanday afzalliklari bilan farq qiladi?
10. Ichki yonuv dvigatellari atmosferaga chiqaradigan yonish mahsulotlari tarkibidagi zaharli gazlar qanday aniqlanadi?

3.6. Gaz turbinasining tasnifi, tuzilishi va ishlash tartibi

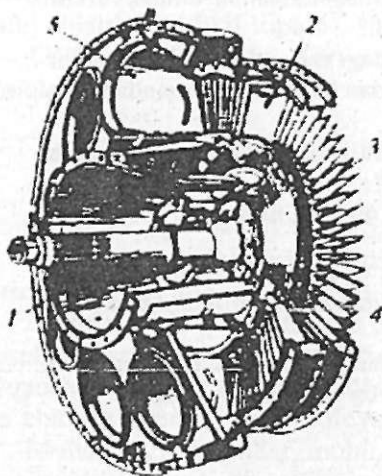
Yuqori bosim va temperatura ostidagi yonish mahsuloti energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi issiqlik mashinasini *gaz turbinasi* deyiladi. Gaz turbinolari aktiv va reaktiv turlarga bo'linadi. Gaz turbinolari gaz dvigatellariga mansub bo'lib, ish moddasining yoqilish uslubiga ko'ra, $V = \text{const}$, $P = \text{const}$ va aralash hamda bosqichli bo'ladi.

Gaz turbinasi soplo apparatining ketma-ket joylashgan qo'zg'almas (yo'naltiruvchi) kurak tojlari va uning oqim kesimini hosil qiladigan ish g'ildiragining tojlaridan tashkil topgan (3.9-rasm).

Gaz turbinasi val 1, statorda joylashgan soplo apparati 5 ning yo'naltiruvchi kuraklari 2, turbina diski (lappak) 3 hamda rotorning ish kuraklari 4 dan tashkil topgan. Soplo apparatining yo'naltiruvchi kuraklari bilan rotorga o'rnatilgan ish kuraklari turbina bosqichini tashkil qiladi. Odatda, gaz turbinolari ko'p bosqichli bo'lib, quvvati 100 MW dan katta bo'ladi.

GTQ (gaz turbinali qurilmalari) ning asosini gaz turbinasi tashkil etadi va issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantirishda keng qo'llaniladi. Gaz turbinolari ham bug' turbinolari kabi bo'lib, faqat ularda bug' o'rniga yonish mahsuloti — tutun gazlari asosiy ish

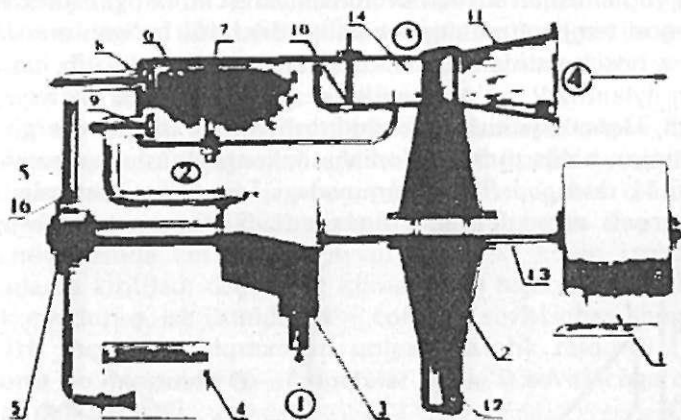
jismi hisoblanadi. Gaz turbinasida gaz zarralarining kinetik energiyasi mexanik energiyaga (harakat miqdorining saqlanish qonuniga muvofiq) aylanadi. Tutun gazlari bosimining potensial energiyasi soploda zarralarning kinetik energiyasini ortishiga olib keladi. Bu kinetik energiya turbina rotorining mexanik energiyasiga aylanadi. Gaz turbinasi rotorining mexanik energiyasini kattaligi turbinaga oqib kirayotgan gaz zarralari oqimining potensial bosimiga hamda turbinadan uchib chiqayotgan zarralar tezligiga bog'liq bo'ladi.



3.9-rasm. Bir bosqichli gaz turbinasi.

3.7. Gaz turbinali qurilmalar va ularning ish siklidagi termodinamik jarayonlar

Gaz turbinali qurilmaning tarkibiy qismi yonish kamerasi 6, yonish mahsuloti oqimidagi issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi gaz turbinasi 2, atmosfera havosini so'rib va siqib uzatuvchi kompressor 3, yoqilg'i nasosi 5 va baki 4, elektr generatori 1, soplo 11 va boshqa yordamchi qismlardan tashkil topgan (3.10-rasm). Tuzilishi va yoqilg'ining yoqilish uslubiga ko'ra, gaz turbinali qurilma tarkibiga elektr svecha, ish moddasi (havo va yoqilg'i bug'i aralashmasi)ni yonish kamerasiga kiritish hamda yonish mahsulotini kameradan chiqarish klapanlari, ayrim konstruksiyalarda regeneratsiya bo'lmasi, birlamchi va ikkilamchi bosqichli yonish kameralari hamda turbinalari, shuningdek, ikkilamchi kompressor kiradi. GTQ lari ish moddasi yoqish uslubiga ko'ra, $V = \text{const}$, $P = \text{const}$, aralash va bosqichli bo'ladi. GTQ larda yoqilg'i sifatida tabiiy gaz, tozalangan koks gazi, domna va generator gazlari, maxsus dizel va solyar moylari ishlatiladi. GTQ ning ayrimlarini qarab chiqamiz.

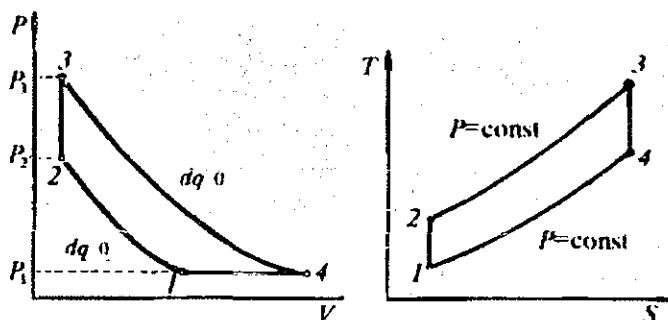


3.10-rasm. Issiqlik $V = \text{const}$ bo'lganda kiritiladigan GTQ ning sxematik tasviri:

1 — elektr generatori; 2 — gaz turbinasi; 3 — havo kompressori; 4 va 5 — yoqilg'i baki va nasosi; 6 — yonish kamerasi; 7 — svecha; 8 va 9 — yoqilg'i va havoni kiritish klapanlari; 10 — chiqarish klapani; 11 — soplo; 12 — gaz turbinasi kuraklari; 13 — val; 14 — yonish mahsulotini yo'naltiruvchi apparat; 15 va 16 — yoqilg'i va havoni uzatuvchi quvurlar.

Eslatma: Doiraga olingan raqamlar ish jismining parametrlari o'lchana-digan nuqtalar.

Ish aralashmasi o'zgarmas hajmda yoqiladigan gaz turbinali qurilma. Bu qurilmadagi turbina, elektr generatori, havo kompressori va yoqilg'i nasosi yagona umumiy valdan mexanik energiya oladi. Ish yoqilg'isining $V = \text{const}$ da yonadigan GTQ quyidagicha ishlaydi: atmosfera havosi kompressor 3 ga so'rilib, unda siqiladi (3.11-rasm, *a* dagi PV diagrammada 1 va 2 nuqtalar oralig'i) va aniq parametrlarga (P, V, T) ega bo'lgandan so'ng, avval havoni kiritish, keyin yoqilg'ini kiritish klapanlari ochilib, yonish kamerasiga avval siqilgan havo keyin yoqilg'i purkaladi. Hosil bo'lgan ish aralashmasiga tashqaridan q_1 issiqlik miqdori kiritiladi (ya'ni svecha kontaktlari orasida elektr uchquni chaqnaydi) va u yonadi. Bu yonish natijasida yonish kamerasidagi bosim keskin ortadi (3.11-rasm *a* dagi PV diagrammadagi 2 va 3 nuqtalar oralig'i). Ish yoqilg'isi to'la (kamida 95%) yongandan so'ng, uning temperaturasi 2300 K gacha ko'tariladi, shunda yonish kamerasidagi bosim eng yuqori qiymatga yetadi. Ana shundagina yonish mahsulotini gaz turbinasi kuraklariga yo'naltiruvchi kanalda joylashgan chiqarish klapani ochiladi. Keyin yonish mahsulotining temperaturasini 1000—1400 K gacha pasaytirish maqsadida unga maxsus yo'llar orqali sovuq havo qo'shiladi (chunki, gaz turbinasi o'ta yuqori temperaturalariga chidamaydi) hosil bo'lgan aralashma katta bosim ostida turbina kuraklariga ta'sir ko'rsatib, uning rotorini aylantiradi, ya'ni issiqlik energiyasi mexanik energiyaga aylanadi. Demak, yonish mahsuloti tashqaridan issiqlik energiyasini olmagan holda turbinada adiabatik kengayib ish bajargandan so'ng (3.11-rasm, *a*, PV diagrammadagi 3 va 4 nuqtalar oralig'i), soplo orqali atmosferaga chiqariladi. Sistema atmosferaga



3.11-rasm. Issiqlik $V = \text{const}$ holatda kiritiladigan GTQ siklidagi termodinamik jarayonlarning PV (*a*) va TS (*b*) diagrammalari.

chiqarilgan yonish mahsulotidagi qoldiq issiqlik miqdorini uzatib bo'lgandan so'ng, muvozanat holatiga qaytadi (PV diagrammadagi 4 va 1 nuqtalar oralig'i). Sikl yana takrorlanadi.

GTQ sidagi ish aralashmasiga issiqlik $V = \text{const}$ ostida kiritilganida, uning sikli ikkita adiabatik (1—2 va 3—4 nuqtalar oralig'i), bitta izoxorik (2—3 nuqtalar oralig'i) hamda bitta izobarik (4—1 nuqtalar oralig'i) jarayonlardan tashkil topadi.

Siklning bajargan foydali ishi 1—2—3—4—1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng bo'ladi.

Siklning TS diagrammasidan ko'rinadiki, sistemaga tashqaridan issiqlik miqdori q_1 kiritiladi va undan issiqlik miqdori q_2 sovitkichga chiqariladi. Shu bois uning entropiyasi ish aralashma o'zgarmas hajmda yonganda va o'zgarmas bosimda to'la kengayganda o'zgaruvchan bo'ladi.

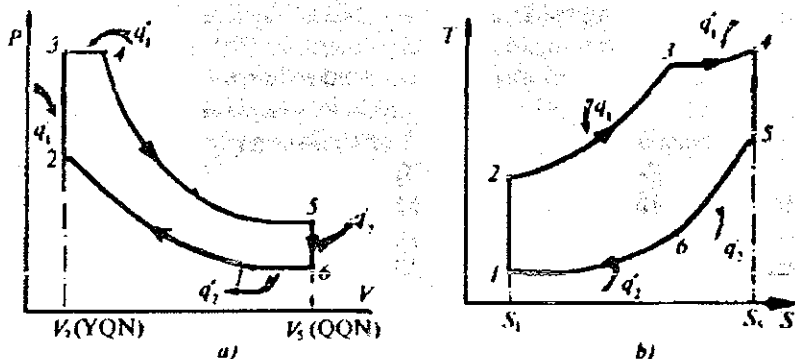
GTQ keltirilgan to'la issiqlik miqdorini ishga aylantirish murakkab fizik-kimyoviy, gazodinamik va termodinamik jarayonlarda kechadigan hodisalarga bog'liq bo'lib, ularning hammasini hisobga olish juda qiyin va shuning uchun aniq tajribalar natijalarini e'tiborga olish zarur bo'ladi. Bularni hisobga olish maqsadida jarayonlarni va ish jismini ideallashtirib qabul qilinadi. Issiqlik mashinalari sikli tahlil qilinsa, ularda kechadigan jarayonlar shartli sikl qismlaridan tashkil topadi va ularning diagrammalari PV va TS koordinatalarda tasvirlanadi.

Siklning termik η ni aniqlashda *umumlashtirilgan sikl* diagrammalaridan foydalaniladi. Masalan, ish jismining siqilishi va kengayishini adiabatik jarayon ($dq = 0$) deb qabul qilinadi. Ish jismiga q_1 va q_2 issiqlik miqdorlari $V = \text{const}$ va $P = \text{const}$ bo'lganda hamda ketma-ket, avval izoxorik, keyin izobarik jarayonlarda kiritiladi deb, faraz qilinadi. Ish bajarmagan qoldiq issiqlik miqdori q_2 ish jismidan $V = \text{const}$ da sovitkichga chiqariladi. Ish jismidan chiqmasdan qolgan issiqlik miqdori (q_2) $P = \text{const}$ bo'lmaganda (6—1 nuqtalar oralig'i) sovitkichga chiqariladi deb qaraladi.

Umumlashgan sikl parametrlari tavsifi quyidigicha belgilab olinadi (3.12-rasm):

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad \text{— siqish darajasi;}$$

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} \quad \text{— bosimning ortish darajasi;}$$



3.12-rasm. Issiqlik kuch qurilmalarining umumlashgan termodinamik siklining PV (a) va TS (b) diagrammalari.

$\rho = \frac{V_4}{V_2}$ — hajmning dastlabki kengayish darajasi;

$\lambda_p = \frac{p_3}{p_6}$ — bosimning pasayish darajasi;

$\epsilon_v = \frac{V_6}{V_1}$ — hajmning qisqarish darajasi.

$q_1 = q'_1 + q''_1$ — umumlashgan sikldagi 1 kg ish jismiga keltirilgan issiqlik miqdori;

$q_2 = q'_2 + q''_2$ — umumlashgan sikldagi 1 kg ish jismining sovitkichga uzatgan issiqlik miqdori.

Sikldagi ish moddasining issiqlik sig'imi va temperaturalarini orqali issiqlik miqdorlarini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) + c_p(T_4 - T_3)$$

$$q_2 = c_v(T_5 - T_6) + c_p(T_6 - T_1) \quad (129)$$

Siklga keltirilgan va undan chiqarilgan issiqlik miqdorlarini sikl parametrlari orqali hisoblashda odatda, albatta sikl holatlariga mos keluvchi hamma nuqtalar temperaturalarini biror tayanch nuqta temperaturasi bilan ifodalash zarur bo'ladi. Masalan, siqish taktida $dq = 0$ bo'lsa, jarayon adiabatik bo'ladi. PV diagrammada (3.12-rasm) — bu 1—2 nuqtalarga mos keladi.

Demak, jarayonni uning holat parametrlari orqali ifodalash mumkin ekan, ya'ni

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}$$

yoki
$$T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1} \quad (130)$$

$V = \text{const}$ jarayoni uchun quyidagini yozish mumkin:

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \lambda,$$

bundan
$$T_3 = \lambda T_2. \quad (131)$$

(130) dagi T_2 qiymatini (131) ga quysak,

$$T_3 = T_1 \lambda \varepsilon^{k-1} \quad (132)$$

hosil bo'ladi.

Izobarik jarayon parametrlari (3.12-rasm)dagi 3—4 nuqtalar holatlari orqali ifodalanadi, ya'ni

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{V_4}{V_3} = \rho$$

yoki
$$T_4 = \rho T_3 \quad (133)$$

T_4 qiymatini yuqorida keltirilgan formuladan olib (133) ga qo'ysak, quyidagi hosil bo'ladi:

$$T_1 = \rho \lambda T_1 \varepsilon^{k-1}. \quad (134)$$

Termodinamik sistemada ish bajarmasdan qolgan qoldiq issiqlik miqdori $V = \text{const}$ bo'lganda sovitkichga chiqariladi, uning tenglamasini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\frac{T_5}{T_6} = \frac{P_5}{P_6} = \lambda_p,$$

bundan
$$T_5 = \lambda T_6. \quad (135)$$

Issiqlik miqdorining qoldiq qismini ulushi 6—7 nuqtalarga mos keluvchi holat parametrlari orqali, jarayon izobarik bo'lganligi uchun, quyidagicha ifodalanadi:

$$\frac{T_6}{T_1} = \frac{p_6}{p_1} = \varepsilon_v.$$

bundan
$$T_6 = \varepsilon_v T_1. \quad (136)$$

Yuqoridagi tenglamalardagi T_6 qiymatini (135) tenglamaga qo'ysak, quyidagi hosil bo'ladi:

$$T_5 = \lambda_p \varepsilon_v T_1. \quad (137)$$

Siklning ma'lum nuqtalariga mos keluvchi (130), (131) va (134) tenglamalardan foydalanib, issiqlik miqdorlari q_1 va q_2 ni quyidagicha ifodalaymiz:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_v (T_1 \lambda \varepsilon^{k-1} - T_1 \varepsilon^{k-1}) + c_p (\rho \lambda T_1 \varepsilon^{k-1} - T_1 \lambda \varepsilon^{k-1}) = \\ &= c_v T_1 \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1) + c_p T_1 \lambda \varepsilon^{k-1} (\rho - 1) = \\ &= T_1 \varepsilon^{k-1} [c_v (\lambda - 1) + c_p \lambda (\rho - 1)] \end{aligned} \quad (138)$$

$k = c_p / c_v$ bo'lganligi asosida (138) tenglamani qayta yozamiz:

$$q_1 = T_1 \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)]. \quad (139)$$

Shu uslubda sovitkichga chiqarilgan q_2 issiqlik miqdorining ifodasi topiladi, ya'ni

$$q_2 = c_v T_1 [\varepsilon_v (\lambda_p - 1) + k (\varepsilon_v - 1)]. \quad (140)$$

Siklga keltirilgan q va undan sovitkichga chiqarilgan issiqlik miqdorlarini topishning ahamiyati shundan iboratki, ular yordamida siklning bajargan ishini va termik foydali ish koeffitsientini aniqlash mumkin.

Siklning *fik* termodinamikaning ikkinchi qonuni ifodasidan aniqlanadi, ya'ni

$$\eta_{fi} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Bu ifodadagi q_1 va q_2 o'rniga umumlashgan siklda topilgan qiymatlarini qo'yib yozamiz:

$$\eta_{fi} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\varepsilon_v (\lambda_p - 1) + k (\varepsilon_v - 1)}{[(\lambda - 1) + k \lambda (\rho - 1)]}. \quad (141)$$

Umumlashgan siklning bajargan ishi q_1 va q_2 ayirmasidan topiladi, ya'ni

$$A = q_1 - q_2 = c_v T_1 \varepsilon^{k-1} \left[(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1) - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon^{k-1}} (\lambda_p - 1) - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} (\varepsilon_v - 1) \right] \quad (142)$$

yoki

$$A = \eta_r q_1 = \eta_r c_v T_1 \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]. \quad (143)$$

Demak, yuqorida keltirilgan umumlashgan sikl tenglamalarini aniq siklga tatbiq etib, shu o'rganilayotgan sikldagi η_r va A ni aniqlash mumkin bo'lar ekan.

GTQ siklidagi termodinamik jarayonlar uchun xuddi shunday tenglamalarni tuzib, ularni yechib, soddalashtirib, issiqlik miqdorlari q_1 va q_2 aniqlanadi va ular asosida GTQ ning *fik* topiladi. Masalan, bosqichli siqish, yonish va regeneratsiyali GTQ *fik* ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_r = 1 - \frac{k}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda^{\frac{1}{\lambda}} - 1}{\lambda - 1}, \quad (144)$$

bunda $\lambda = P_3/P_2$ — bosimning ortish darajasi;

$$\varepsilon = \pi = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_1}{V_2} \text{ — siqish darajasi.}$$

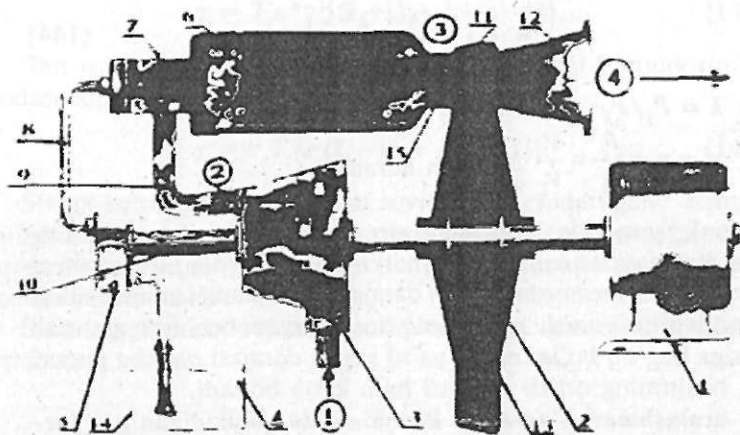
Demak, yuqorida keltirilgan gaz turbinali qurilma siklining *TS* diagrammasidan ko'rinib turibdiki, uning termik *fik* atmosfera havosining kompressorda siqilish darajasiga va yonish kamerasidagi ish moddaning yonish mahsuloti hosil qilgan bosimning ortish darajasiga bog'liq bo'lar ekan, ya'ni siqish darajasi qancha yuqori bo'lsa, bosimning ortish darajasi ham katta bo'ladi.

Ish aralashmasi o'zgarmas bosim ostida yoqiladigan gaz turbinali qurilma. Gaz turbinali qurilma siklida ish yoqilg'isi o'zgarmas bosim ostida yoqilganda siklga tashqaridan issiqlik miqdori keltirilmaydi. Yonish kamerasidagi yuqori temperaturali siqilgan havoga yoqilg'i forsunka yordamida purkaladi (3.13-rasm) yonish $P = \text{const}$ ostida kechadigan GTQ siklining *PV* diagrammasi ikkita *adiabata* (1—2 va 3—4 nuqtalar oraliqlari) hamda ikkita *izobara* (2—3 va 4—1 nuqtalari oraliqlari)dan tashkil topadi (3.14-rasm).

GTQ ning termik *fik* ni bir xil qiymatda saqlash uchun albatta, yonish kamerasidagi bosim o'zgarmas bo'lishini ta'minlash kerak. Buni amalga oshirish uchun, *birinchidan*, kompressordan uzatiladigan siqilgan havoning miqdori va parametrlarini bir xil saqlanadi; *ikkinchidan*, yoqilg'i nasosi uzatadigan yoqilg'i miqdori ham havo miqdoriga mos ravishda rostlanadi.

Demak, bir xil miqdordagi va bosimli yonish mahsuloti oqimi turbina kuraklariga ta'sir qiladi hamda burovchi momentni hosil qiladi. Shu yo'l bilan issiqlik energiyasining mexanik energiyaga aylanish samaradorligiga erishiladi.

Siklning *PV* va *TS* diagrammalaridan ko'rinadiki (3.14-rasm), ish jismi avval kompressorda adiabatik siqiladi (shu jarayon yoqilg'i nasosida ham sodir bo'ladi), so'ngra unga q_1 issiqlik miqdori $P = \text{const}$ ostida keltiriladi. Kiritilgan issiqlik ish jismining siqilishidagi ichki energiyasi hisobiga paydo bo'ladi, ya'ni kompressorda siqilgan havo qizib, uning temperaturasi yoqilg'ining yonish temperaturasidan katta bo'ladi. Bunda yonish o'zgarmas bosim ostida yuz beradi. Shundan so'ng hosil bo'lgan yonish



3.13-rasm. Yoqilg'i $P = \text{const}$ bo'lganda yonadigan GTQ ning sxemasi:

- 1 — elektr generatori; 2 — gaz turbinasi; 3 — kompressor; 4 — yoqilg'i;
5 va 14 — yoqilg'i nasosi va baki; 7 — forsunka; 8 va 9 — yoqilg'i va havo
quvurlari; 10 — val; 11 — ish kuraklari; 12 — soplo; 13 — turbina diski;
15 — yo'naltiruvchi apparat;

Eslatma: Doira ichidagi raqamlar jarayon parametrlari o'lchanadigan nuqtalar.

mahsuloti turbina kuraklari bilan ta'sirlashadi va unda adiabatik kengayib (3—4 nuqtalar oralig'i, PV diagramma) ish bajaradi. Siklning bajargan foydali ishi 1—2—3—4—1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng (3.14-rasm) bo'ladi.

Yonish mahsuloti adiabatik kengayishida ish jismi tashqi muhit bilan issiqlik almashmaydi, deb faraz qilinadi. Ish jismidagi ishga aylanmasdan qolgan qoldiq issiqlik miqdori q_1 atrof-muhitga chiqariladi.

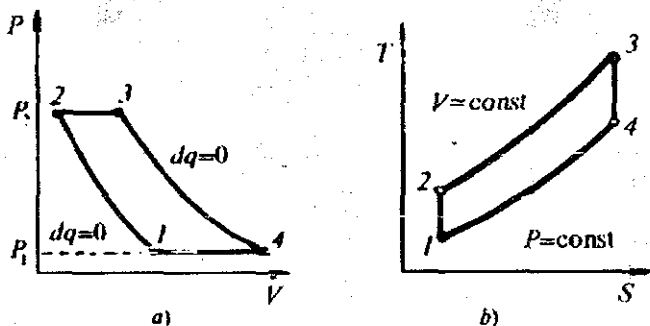
Termodinamik siklda yoqilg'i $P = \text{const}$ ostida yonganligi, ya'ni q_1 kiritilganligini va qoldiq issiqlik q_2 sovitkichga chiqarilganligi hisobga olinsa, bosimning ortish darajasi λ hamda pasayish darajasi λ_2 o'zaro teng bo'ladi, ya'ni $\lambda = \lambda_2 = 1$, chunki PV diagrammada 2—3 va 4—1 nuqtalar oralig'ida $P = \text{const}$ bo'ladi.

q_1 siklga $P = \text{const}$ ostida kiritilsa, ishchi aralashma entropiyasi 2—3 va 4—1 nuqtalar oralig'ida o'zgaruvchan, qolgan holatlarda $S = \text{const}$ bo'ladi.

Demak, GTQ da ish aralashma $P = \text{const}$ ostida yonganida siklning termik *fik* asosan kompressorda atmosfera havosining siqilish darajasiga, ya'ni sistema ichki energiasining o'zgarishiga, bog'liq bo'lar ekan. Shu sababli umumlashgan sikl uchun yozilgan *fik* tenglamasini to'g'ridan-to'g'ri qo'llab bo'lmaydi, chunki $\lambda = \lambda_2 = 1$.

Demak, yoqilg'i $P = \text{const}$ ostida yoqiladigan sikl uchun *fik* ni quyidagicha yozish mumkin:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\lambda_2 + 1}} \cdot \frac{\epsilon_1 - 1}{\rho - 1} \quad (145)$$



3.14-rasm. Issiqlik $P = \text{const}$ bo'lganda GTQ sikliga kiritiladigan jarayonlarning PV (a) va TS (b) diagrammalari.

Bu siklda dastlabki kengayish darajasi ε_v va hajmning kamayish darajasi ρ nisbatlari o'zaro bog'liq bo'lganligi uchun yuqorida keltirilgan tenglikni shu siklga tatbiq etib quyidagini yoza olamiz:

$$\varepsilon_v = \frac{V_5}{V_1} = \frac{V_4}{V_1} \quad (145)$$

Shuning uchun ayrim o'zgartirishlarni amalga oshirib, dastlabki kengayish ifodasini quyidagi ko'rinishda yozamiz:

$$\varepsilon_v = \frac{V_5}{V_1} \cdot \frac{V_3}{V_3} = \left(\frac{P_4}{P_3} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{V_4}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_3}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_5} \right)^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{V_4}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1},$$

bunda

$$\frac{V_4}{V_2} = \rho; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\varepsilon}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \varepsilon; \quad \frac{P_4}{P_2} = \lambda = 1$$

tengligi asosida quyidagilarni yozish mumkin, ya'ni

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \varepsilon^k, \quad \varepsilon_v = \rho. \quad (147)$$

Demak, yuqorida keltirilgan tengliklarni e'tiborga olib, termik *fk* tenglamasini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (148)$$

Haqiqatdan ham, GTQ siklining *fk* kattaligi havoni kompresorda siqilish darajasiga bog'liq bo'lar ekan.

3.8. Regeneratsiyali gaz turbinali qurilma siklidagi termodinamik jarayonlar

Regeneratsiya usulining asosiy mazmuni ish bajarib bo'lgan yonish mahsuloti tarkibidagi qoldiq issiqlik miqdorini atmosferaga (sovitkichga) chiqarmasdan undan samarali foydalanib, qurilma *fk* orttirishdan iborat. Regeneratsiya uslubiga ega bo'lgan GTQ ning sxematik tasviri 3.15-rasmda keltirilgan. Regeneratsiya

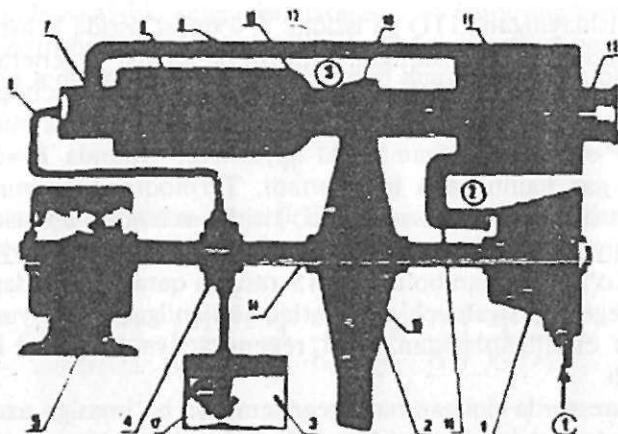
uslubida ishlaydigan GTQ ga issiqlik $P = \text{const}$ ostida keltiriladi. Faqat, kompressorda siqilgan atmosfera havosi regeneratsiya bo'lmasi (bloki)dan o'tish vaqtida unga atmosferaga chiqarilib yuborilayotgan yonish mahsuloti tarkibidagi qoldiq issiqlik miqdori qisman $P = \text{const}$ saqlagan holda qaytariladi. Shunda $P = \text{const}$ saqlagan gaz hajmi yana ham ortadi. Termodinamika nuqtayi nazaridan sistemaning parametrlari, kiritilgan issiqlik dq hisobiga boshqa qiymatlarni qabul qiladi (2 va 3' nuqtalar oralig'ida V hamda S o'zgaruvchan bo'ladi (3.15-rasmga qarang). Sikldagi issiqlikni regeneratsiyalovchi apparatlar qo'llanilgan GTQ yuqorida qarab chiqilganlaridan faqat regeneratsiya bo'lmasi bilan farqlanadi.

Kompressorda siqilgan havo regeneratsiya bo'lmasisiga uzatiladi va unda yutilgan issiqlik miqdori hisobiga yana ma'lum darajagacha qiziydi (3.16-rasm, a . PV diagrammadagi 2—3 nuqtalar oralig'i). Avval regeneratsiya bo'lmasisida qizdirilgan havo yonish kamerasiga yuqori temperatura va o'zgarmas bosim ostida uzatiladi. So'ngra unga parallel nasos 4 yordamida yoqilg'i haydalib, forsunka 7 orqali purkaladi. Shunda havo va yoqilg'i o'rtasida kuchli kimyoviy reaksiya sodir bo'ladi. Bunda ish jismining (yonish mahsuloti) parametrlari V va T $P = \text{const}$ ostida o'zgaradi (PV va TS diagrammalardagi 3' va 3 nuqtalar oralig'i). Regeneratsiyali GTQ sikliga tashqaridan q_1 issiqlik kiritilmasa ham ish yoqilg'isi o'zining ichki energiyasi hisobiga yonadi.

Amalda kompressorga so'rilgan atmosfera havosi unda siqilishi natijasida qizib ketadi. Bu qizigan havo regeneratsiya bo'lmasisida yana qo'shimcha qizdiriladi. Shu issiqliklar hisobiga ish aralashmasi yonadi hamda yuqori temperaturali va bosimli yonish mahsuloti hosil bo'ladi.

Bu tutun gazining bosimi bilan tashqi bosim farqi hamda yonish kamerasining chiqish qismini torayishi hisobiga zarralar tezligi ortadi, ya'ni zarralarining kinetik energiyasi kattalashadi. Katta impulsli tutun gazlari gaz turbinasi kuraklari bilan ta'sirlashib, adiabatik kengayish davrida issiqlik energiyasini rotorning mexanik energiyasiga aylantiradi. Rotor validagi bu mexanik energiya iste'molchi—elektr generatoriga uzatiladi va unda elektr energiyasiga aylanadi.

Demak, tutun gazlari adiabatik kengayish jarayonida turbina kuraklari bilan ta'sirlashib foydali ish bajaradi. So'ngra regeneratsiya bo'lmasisidagi issiqlik almashtiruvchi apparatlar «qovurg'alar»i

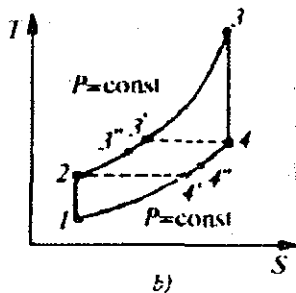
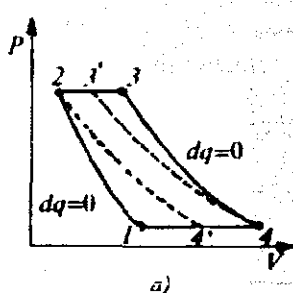


3.15-rasm. Issiqlik $P = \text{const}$ ostidagi ish jismiga kiritiladigan regeneratsiyali GTQning sxematik tasviri:

1 — kompressor; 2 — gaz turbinasi; 3 — yoqilg'i; 4 va 17 — yoqilg'i nasosi va baki; 5 — elektr generatori; 6 — yonish kamerasi; 7 — forsunka; 8 va 10 — yoqilg'i va havo quvurlari; 11 — regeneratsiya bo'limasi; 12 va 9 — regeneratsiyalangan havo va uni uzatish quvuri; 13 — soplo; 14 — val; 15 — turbina diski; 16 — ish kuraklari; 18 — yo'naltiruvchi kuraklar.

orasidan o'tishida kompressordan uzatilayotgan atmosfera havosini qo'shimcha isitib, o'zi sovitkichga chiqariladi. Sikl takrorlanadi.

Regeneratsiyali GTQ siklining bajargan foydali ishi 1—2—3'—3—4—4'—1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng bo'ladi (3.16-rasm, PV diagramma). Regeneratsiya uslubiga ega bo'lgan siklning bajargan ishi yoqilg'i $V = \text{const}$ va $P = \text{const}$ da yongan oddiy sikllarnikiga nisbatan katta bo'ladi. Bunga asosiy sabab siklga regeneratsiya bo'limasida qo'shimcha issiqlik miqdorining ish moddasiga kiritilishidir. Regeneratsiya bo'limasida tutun gazlaridagi issiqlik albatta to'liqligicha kompressordan haydalgan yangi havo oqimiga uzatilmaydi. Agarda shu havoga jami issiqlik regeneratsiya yo'li bilan o'tkazilsa, ya'ni to'liq regeneratsiya o'rinli bo'lsa, $T_4 = T_2$ va $T_4 = T_3$ bo'ladi (izotermadagi uzlukli chiziq). Shuning uchun ham jarayonning temperaturalar $T_4 - T_4 = T_3 - T_2$ bo'ladi (TS diagrammaga qarang). Unda, faqat regeneratsiya yo'li bilan ish jismiga o'tkazilgan va tashqi muhitga chiqarilgan issiqlik miqdorlarini quyidagicha ifodalash mumkin:



3.16-rasm. Issiqlik $P = \text{const}$ bo'lganda ish jismiga kiritiladigan va regeneratsiyali GTQ siklining PV (a) va TS (b) diagrammalari.

$$q_1' = c_p(T_2 - T_3) \text{ va } q_2' = c_p(T_4 - T_4'). \quad (149)$$

Demak, yonish kamerasidagi ish jismiga keltirilgan q_1 va sovitkichga chiqarilgan q_2 issiqlik miqdorlari quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_p(T_3 - T_3') \\ q_2 &= c_p(T_4 - T_4') \end{aligned} \quad (150)$$

Unda, to'liq regeneratsiya bo'lgan siklning termik fik ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_3'} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \quad (151)$$

Yuqoridan ma'lumki, $T_2 = T_1 \epsilon^{k-1}$; $T_3 = T_1 \lambda \rho \epsilon^{k-1}$; $T_4 = T_1 \lambda \epsilon_v$ va $\lambda_p = \lambda = 1$; $\epsilon_v = \rho$ tengligi asosida (174) tenglikni quyidagicha yozish mumkin:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\rho} = 1 - \frac{T_1}{T_4}. \quad (152)$$

To'liq regeneratsiya o'rinli bo'lgandagina (152) tenglik o'rinli hisoblanadi. Issiqlik mashinasidagi issiqlik sovitkichga, issiqlik almashinuvi jarayonida, to'liq uzatilmaydi, ya'ni $T_{4'} = T_4$. Regeneratsiya bo'lmasida havo T_3 gacha qizdirilishi davrida T_4 gacha soviydi. Regeneratsiyali siklning termik fik ni, yuqoridagilarga asosan boshqacharoq ko'rinishda ifodalash ham mumkin. Buning uchun, regeneratsiya darajasini bilish kerak bo'ladi, ya'ni

$$\delta = \frac{T_3 - T_2}{T_3 - T_2} \quad (153)$$

Agar regeneratsiya darajasini e'tiborga oladigan bo'lsak, u holda q_1 va q_2 ni quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} q_1 &= c_p [T_3 - T_2 - \sigma(T_3 - T_2)] \\ q_2 &= c_p [T_4 - T_1 - \sigma(T_3 - T_2)] \end{aligned} \quad (154)$$

Unda regeneratsiyali GTQ siklining *fik* quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_r = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1 - \sigma(T_3 - T_2)}{T_3 - T_2 - \sigma(T_3 - T_2)} \quad (155)$$

Ish jismiga issiqlik o'zgarmas bosim ostida berilganda, havo bosqichma-bosqich siqiladigan va bosqichli regeneratsiya usuli qo'llaniladigan GTQlari ham mavjud. Ular tuzilishi jihatidan ancha murakkab qurilma hisoblanadi. Bunday murakkab qurilmalarning qo'llashdan asosiy maqsad birlamchi kameraga kiritilgan ish aralashmasining yonmasdan qolgan qismidan to'liq foydalanib qurilmaning *fik* ni orttirishdan iborat. Bunday bosqichli siqish, yonish va regeneratsiyali gaz turbinali qurilmalarining *fik* Karno siklining *fik* ga yaqinlashib boradi.

3.9. Gaz turbinali qurilmalarning tatbiqi

XX asrning 70-yillaridan keyin GTQ xususan, transport va energetikada keng qo'llanila boshladi. Energetikada qo'llaniladigan GTQ lari elektr energiyasi yetishmasdan qolganida, energetik sistemada buzilishlar, iste'molchilarning elektr energiyaga bo'lgan talabi ortgan vaqtlarda asosan uzlukli ishlatiladi. Uzlukli ishlaydigan energetik GTQ lar quvvati 1—100 MW oralig'ida bo'lib, bir yilda 1500 soatdan ortiq ishlatilmaydi.

Dengiz kemalaridagi energetik GTQ lari asosiy energiya manbai hisoblanadi va ularning quvvati 30 kW dan 10 MW gacha bo'ladi. Kimyoviy, neftni qayta ishlash, metallurgiya, atom energetikasi va sh. k. ishlab chiqarish sohalarida keng qo'llaniladi. Neftni haydashda, gaz magistralida turli xil kompressorlarni ishlatishda, aviatsiya transportidagi turboreaktiv, turbovintli reaktiv samolyotning asosiy va forsaj (*frans forcep* — *jadallashtirmoq*) dvigatellarida hamda dengiz kemalarida, temir yo'l transportidagi

lokomotiv (lot. *locomoveo* — joyidan qo'zg'ataman) larda ham GTQ keng tatbiq etilgan.

Zamonaviy turboreaktiv, turbovintli reaktiv samalyotlarni, uzoq safarda bo'ladigan dengiz kemalarini, temiryo'l transportini katta quvvatdagi gaz turbinalarisiz tasavvur etish qiyin. Kelajakda albatta katta quvvatlar olinadigan gaz turbinalarigina emas, past quvvatlilari ham ishlab chiqariladi.

Nazorat savollari

- ?
1. Gaz turbinasi qanday turdagi mashina, ichki yonuv dvigateli-dan tuzilishi va ishlash tartibi jihatidan nima bilan farqlanadi?
 2. Gaz turbinali kuch qurilmasi qanday issiqlik kuch qurilmasi va u nima maqsadlarda ishlatiladi?
 3. Gaz turbinali kuch qurilmasi sikllari necha xil bo'ladi, ular qanday nomlanadi?
 4. Gaz turbinali kuch qurilmasi sikllariga issiqlik energiyasi o'zgarmas hajm, bosim, temperatura va aralash kiritilgan jarayonlarda bajarilgan ish kattaligi qanday termodinamik parametrlarga bog'liq?
 5. Regeneratsiyali gaz turbinali qurilma siklidagi termodinamik jarayonlar boshqa turdagilaridan qanday farq qiladi?
 6. Gaz turbinali kuchi qurilmasining *fik* nimalarga bog'liq va u qanday formula bilan hisoblanadi?
 7. Gaz turbinali kuch qurilmalari nima maqsadlarda va qayerlar-da qo'llaniladi?

3.10 Gazlarni siqish jarayonlari

Gazlar hajmini kamaytirish usuli siqish, ya'ni kompressiyalash (lot. *compressio* — *siqish*) deyiladi. Gazni kompressiyalashda albatta siqiluvchi gazga tashqi kuch ta'sir qiladi. Natijada gaz hajmi kamayadi, bosimi va temperaturasi esa ichki energiyasi-ning ortishi hisobiga kattalashadi.

Havo yoki gazni 0,015 MPa dan kichik bo'lmagan va undan ortiq bosimlarga siqadigan hamda ularni bosim ostida uzatadigan mashina *kompressor* deyiladi. Kompressorlar havo (gazlar aralashmasi) yoki muayyan turdagi gazni past (0,3—1 MPa), o'rta (to 10 MPa) va yuqori (10 MPa dan yuqori) bosimlarga siqa oladi. Shunga ko'ra ular past, o'rta va yuqori bosimli turlarga bo'linadi. Kompressorlar tuzilishiga ko'ra hajmiy (porshenli va

rotatsion — berik hajm kichrayishi hisobiga ishlaydi), kurakli (markazdan qochma va o'q bo'ylab gazga ta'sir etuvchi kuchli aylanuvchi kuraklar hisobiga siqiladi) bo'ladi.

Katta hajmdagi siqilgan gaz tayyorlab beruvchi mashinalar majmuasini *kompressor stansiyasi* deyiladi. Kompressor stansiyalari uzatish xususiyatiga ko'ra shartli ravishda, kichik ($to\ 100\ m^3 \cdot min$), o'rta ($100-500\ m^3 \cdot min$) va yuqori ($500\ m^3 \cdot min$ ortiq) turlarga bo'linadi.

Porshenli kompressor krivoshipli mexanizm, silindr, porshen, klapanlar va filtrlardan tashkil topadi (3.17-rasm).

Kompressor ish tartibiga ko'ra, bir yoki ko'p bosqichli turlarga bo'linadi. Kompressorlarning ishlash tartibini va ularda sodir bo'ladigan termodinamik jarayonlar bilan qisqacha tanishib chiqamiz.

3.10.1. Bir bosqichli kompressor siklidagi termodinamik jarayonlar

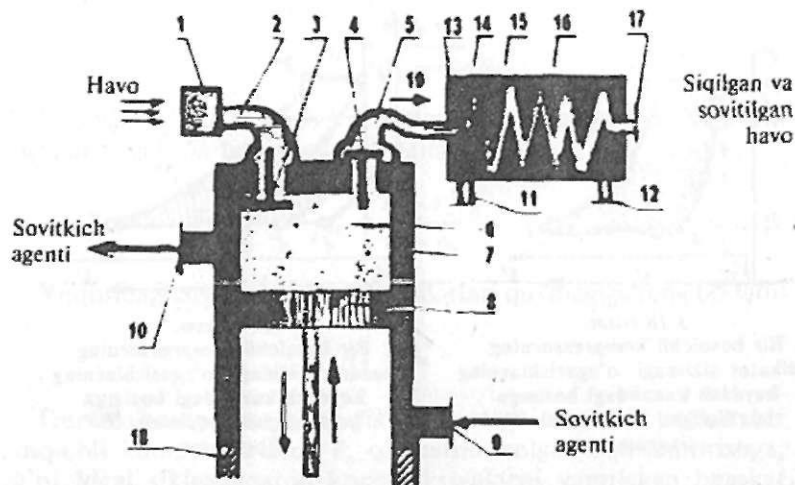
Bir bosqichli kompressor tuzilishi jihatidan porshenli ichki yonuv dvigatellariga o'xshaydi. Kompressor silindr 18 ga kiritilgan porshen 8 ni ilgari lanma-qaytma harakatga keltiruvchi krivoship mexanizmi hamda kiritish va haydash klapanlaridan tashkil topgan bo'ladi. Havo siqilganda ichki energiyaning ortishi hisobiga isiydi. Kompressorning to'xtovsiz tekis ishlashi uchun ortiqcha issiqlik tashqi muhitga uzluksiz chiqarilib turishi shart. So'rilayotgan gaz tarkibidagi qattiq zararlarni tutish uchun filtr 1 kompressorning kiritish kalta quvuri 2 ga o'rnatiladi (3.17-rasm).

Porshen YQN (yuqori qo'zg'almas nuqta) va QQN (quyi qo'zg'almas nuqta) lar oralig'ida, porshen yo'li uzunligiga teng masofada ilgari lanma-qaytma harakat qiladi. Porshen kallagi yuzasi S , yo'li uzunligi l bo'lsa, unda kompressor silindrining ish hajmi quyidagiga teng bo'ladi:

$$V_h = Sl.$$

Har qanday porshenli mashinaning porsheni silindr tubigacha yetmasdan (YQN) to'xtaydi, ya'ni $\vartheta_0 = (4 - 10) \cdot 10^{-2} V_h$ ga teng hajm qoladi va u kompressordagi *zararli fazo* deyiladi.

Zararli fazoni kamaytirish uchun kompressorni qurishdan avval uning loyihasi mukammal ishlanadi va qurish texnologiyasi har

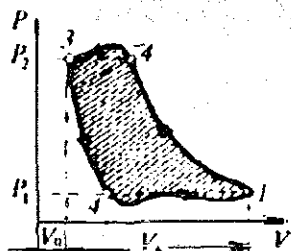


3.17-rasm. Bir bosqichli kompressor sxemasi:

1 — havo filtri; 2 — kiritish kalta quvuri; 3 va 4 — kiritish va haydash klapanlari; 5 — haydash kalta quvuri; 6 va 16 — siqilayotgan va siqilgan hamda sovutilayotgan havo; 7 va 15 — sovitkich modda; 8 — porshen; 9, 10, 11, 12 — sovitkich agentining kompressoriga hamda sovitkich asbobiga kiritish va chiqarish kanallari; 13 — sovitkich apparati; 14 — ilonizisimon quvur; 17 — siqilgan va sovutilgan havoni iste'molchiga uzatuvchi kalta quvur; 18 — kompressor silindri; 19 — siqilgan havo yo'nalishi.

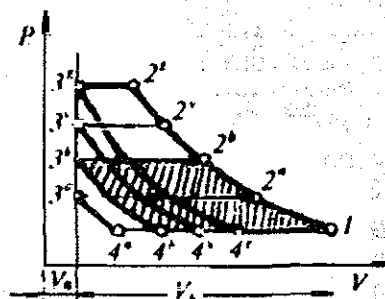
tomonlama tahlil qilinadi. Porshen QQN dan to YQN gacha harakatlanish jarayonida silindrning ish hajmiga kiritilgan havoni 1 nuqtadan 2 nuqtagacha adiabatik siqadi (3.18-rasm). Siqish taktining oxiridagi siqilgan havo bosimi P_2 haydash kalta quvuridagi bosimga teng bo'lgani uchun haydash klapanining ochilishi uchun bosim ma'lum miqdorga orttiriladi. Shunda chiqarish klapani 4 ochiladi.

Aslida, resiverdagi bosim kalta quvurdagi siqilgan havo bosimiga teng bo'lgunga qadar haydash klapani ochilmaydi. Siqilgan havo 2 nuqtadan 3 nuqtagacha ($P_2 = \text{const}$) ostida izobarik kengayadi (sikl ideal bo'lgani uchun bu mantiq to'g'ri). 3 va 4 nuqtaar oralig'ida avval klapan 4 yopiladi (ya'ni tashqi bosim ichki bosimdan katta bo'ladi), so'ngra porshen tashqi kuchlar hisobiga YQN dan QQN ga tomon harakatlanishi natijasida silindrning ish hajmidagi bosim P_1 qiymatgacha adiabatik kengayib tushadi. Bu jarayonda kengayish tashqi kuchlar va kichik hajm θ_0 da



3.18-rasm.

Bir bosqichli kompressorning indikator siklidagi o'zgarishlarning haydash kanalidagi bosimga bog'liqligini ifodalovchi PV diagramma.



319-rasm.

Bir bosqichli kompressorning nazariy siklidagi o'zgarishlarning haydash kanalidagi bosimga bog'liqligini ifodalovchi PV diagramma.

qolgan havoni kengayishi hisobiga sodir bo'ladi. Bunda P_1 bosim atrof-muhit (atmosfera) bosimidan kichik bo'lgandagina (silindr hajmidagi havo siyraklashgandagina) kiritish klapani 5 ochiladi va havo silindrga oqib kiradi. Bu jarayon ideal bo'lgani uchun 4—1 nuqtalar oralig'ida izobara (uzlukli to'g'ri chiziq, 3.18-rasm, PV diagramma) bo'ylab sodir bo'ladi deb, qabul qilinadi. Amalda esa egri chiziq bo'ylab (4—1 nuqtalar oralig'ida) sodir bo'ladi. Sikl qaytadan boshlanadi.

Demak, porshenli bir bosqichli kompressorning ideal siklining PV diagrammasi ikkita adiabata va ikkita izobaradan tashkil topar ekan. Real siklining (indikator) diagrammasidagi siqish va kengayish jarayonlari ideal siklga mos tushadi. Kompressorlarning siklini o'rganishda jarayon ideallashtiriladi. Shunda so'rish klapani P_1 bosimda ochilib, muayyan P_2 bosimda yopiladi. Shu kabi haydash klapani esa P_2 bosimda ochiladi va siqilgan gaz haydalib bo'lgandan so'ng P_1 bosimda yopiladi. Bunda klapanlar go'yoki bu jarayonga o'z ta'sirini ko'rsatmaydi deb, olinadi. Amalda klapanlar ta'siri hisobga zararli hajm ϑ_0 dagi qoldiq havo kengayishini hisobga olish maqsadida «kompressorning fik» tushunchasi kiritiladi, ya'ni:

$$\eta_k = \frac{V_1 - V_4}{V_1 - V_h} \quad (156)$$

Silindrdagi P_2 ortsa η_k qiymati ham o'zgarishi mumkin. Unda, P_2^0 bosim ostidagi haydash jarayoni uchun η_k^0 quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_k^0 = \frac{V_1 - V_4^0}{V_1 - v_0}$$

Shunda P_{2k}^b , P_{2k}^v va sh.k. haydash bosimlariga mos keluvchi hajmlar orqali *fik* quyidagicha yoziladi:

$$\eta_k^b = \frac{V_1 - V_4^0}{V_1 - v_0}$$

Yuqoridagilarga muvofiq, *fik* nisbatlari quyidagiga teng bo'ladi:

$$\eta_k^b < \eta_k^a.$$

Demak, kompressorning *fik* qiymatini o'ttirish uchun bir bosqichli kompressorlarda v_0 qiymatini nolga yaqinlashtirishga, ya'ni ideal siklga xosroq konstruksiyalarni yaratishga harakat qilinadi. Chunki, yuqori bosimgacha siqilgan havo temperaturasi 2300 K dan yuqori bo'lishi mumkin. Bunday temperaturalarda ishlaydigan kompressorni sovitish o'ta murakkab bo'ladi va ular tez-tez ishdan chiqib turadi. Shuning uchun bir bosqichli kompressorlarning haydash kanalidagi bosim 0,8–1,0 MPa atrofida tanlanadi. Yuqori bosim hosil qilishda ko'p bosqichli kompressorlar keng qo'llaniladi. Kompressorda 1 kg havoni siqishga sarflangan ish kattaligi quyidagicha ifodalanadi:

$$\begin{aligned} A_k &= A_2 + A_{1,2} + A_1, \\ A_1 &= P_1 V_1; \quad A_2 = P_2 V_2, \end{aligned} \quad (157)$$

bunda $A_{1,2}$ — politropik jarayonning 1 va 2 nuqtalari oralig'i dagi ish kattaligi, politropik jarayon tenglamasidan topiladi.

Agar jarayonlar adiabatik yoki izotermik bo'lganida, mos ravishda shu jarayonlardagi ish yuqoridagi formulalardan aniqlanadi. Bir bosqichli kompressorning ishini aniqlash uchun (157) tenglamaga politropik jarayon va adiabatik yoki izotermik jarayonlarda bajarilgan ish ifodalarini qo'yib, uni yechib, ish ifodasini politropik A_k^n , adiabatik A_k^a va izotermik A_k^T siqish jarayonlari uchun quyidagicha yoziladi:

$$A_k^n = \frac{n}{n-1} \cdot P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]; \quad (158)$$

$$A_k^a = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]; \quad (159)$$

$$A_k^T = P_1 V_1 \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (160)$$

Havoni kompressorda adiabatik siqish jarayonidagi ish kattaligi (87) ifodadan foydalanib topiladi va u temperatura orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$A_k^a = \frac{k}{k-1} \cdot (P_2 V_2 - P_1 V_1); \quad (161)$$

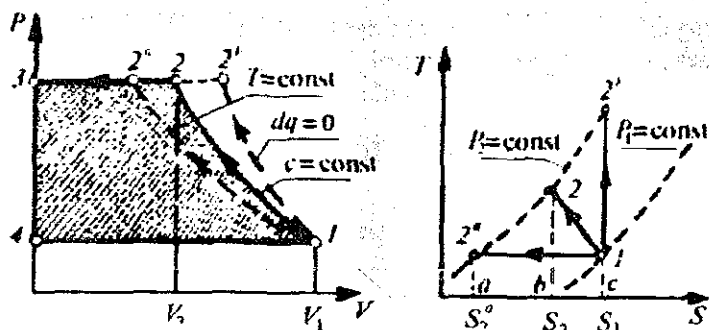
$$A_k^a = \frac{kR}{k-1} \cdot (T_2 - T_1). \quad (161)$$

Jarayonning adiabata ko'rsatkichi va R. Mayyer tenglamasidan foydalanib ishni entalpiya o'rtirmasi orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$A_k^a = c_p (T_2 - T_1) = i_2 - i_1. \quad (163)$$

Demak, kompressorda havo adiabatik siqilganda sarf bo'lgan ish kattaligi havoni siqish taktining boshlang'ich va oxirgi nuqtalari oralig'idagi temperatura o'zgarishiga va siqilgan gazning solishtirma issiqlik sig'imiga yoki diagramma asosida esa 1 va 2 nuqtalar entalpiyalari ayirmasiga bog'liq ekan.

Bir bosqichli kompressorda $\Delta q = 0$, $c = \text{const}$ va $T = \text{const}$ bo'lganda havoni siqish PV diagrammasidan (3.20-rasm) ko'rinadiki, kompressordagi siqilgan havodan uzluksiz ravishda jadallik bilan Δq issiqligi siqish jarayonida muhitga (suv yordamida) chiqariladi, ya'ni sovitiladi. Lekin havoning ichki energiyasi hisobiga paydo bo'lgan bu issiqlikning hammasini sovitkichga o'tkazib bo'lmaydi. Shunga qaramasdan, bir bosqichli kompressorning PV diagrammasidan (3.20-rasm) ko'rinadiki, havo sovitilganida uni siqish uchun sarf bo'lgan ish miqdorini kamaytirish mumkin ekan. Siqish jarayoni politropik bo'lganligi uchun ($k > n > 1$), siqilgan havodan sovitkichga o'tgan q issiqlik miqdorini $c = \text{const}$ va $T = \text{const}$ holatlari uchun quyidagicha yozish mumkin:



3.20-rasm. Bir bosqichli kompressorda gazni siqish jarayonining PV va TS diagrammalari.

$$q'' = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1); \quad (164)$$

$$q^T = RT \ln \frac{P_1}{P_2}. \quad (165)$$

Termodinamikaning birinchi qonunini entalpiya va eksbergiya (imkonij bo'lgan ish) ifodasi $\Delta q = \Delta i + \Delta A_0$ ga ko'ra, $\Delta q = 0$ jarayon sodir bo'lgan bir bosqichli kompressor ishi eksbergiya (A_0) kattaligiga teng bo'ladi, ya'ni:

$$A_k^a = A_0. \quad (166)$$

Shuning uchun bir bosqichli kompressorda siqilgan havodan sovitkichga $q = 0$ jarayonda chiqarilgan issiqlik miqdori quyidagi ko'rinishda ifodalanadi:

$$q = \Delta i + A_k^a, \quad (167)$$

bunda q — siqilgan havodan sovitkichga issiqlik almashinish yo'li bilan o'tgan issiqlik miqdori;

Δi — siqilish jarayonida havo entalpiyasining o'zgarishi;

A_k^a — 1 kg gazni adiabatik siqishga sarflangan ish.

Bir bosqichli kompressorning TS diagrammasidan ko'rinadiki (3.20-rasm), adiabatik jarayonda havo siqilsa, ($q = 0$ bo'lgani uchun) 1 va 2^b nuqtalar pastidagi yuza ham nolga teng bo'ladi. Unda sarflangan ish A_k^a siqilgan gaz entalpiyasini kamaytirar ekan.

Termodinamikaning birinchi qonuniga asosan, kompressorning gazni siqishga sarflagan ishini gaz temperaturasi va entropiya orttirmasi orqali quyidagicha ifodalash mumkin:

$$A_k \cong \frac{T_2 + T_1}{2} (S_1 - S_2^a). \quad (168)$$

Unda, entalpiya o'zgarishini (izotermik jarayon bo'yicha gaz siqilganida) $\Delta i = 0$ asosida quyidagicha yozish mumkin:

$$A_k = T(S_1 - S_2^a). \quad (169)$$

Demak, yuqorida keltirilgan TS diagramma va formulalardan foydalanib porshenli bir bosqichli kompressorda gazlarni siqish jarayonlarini hisoblash mumkin ekan. Porshenli bir bosqichli kompressorlar o'rniga bir bosqichli turbokompressor (markazdan qochma kompressor) ham keng qo'llaniladi. Ularda porshenlar o'rniga kuraklar oralig'idagi qanotchalar aylanishi hisobiga siqiladigan gaz ish g'ildiragi o'qidan radius yo'nalishi bo'ylab haydaladi va shunda siqilish hodisasi o'rinli bo'ladi. Turbokompressorga so'rilgan gaz oqimi zarralariga juda katta energiya uzatilishi natijasida kompressorning haydash kanallaridagi zarralar kinetik energiyasi juda katta bo'ladi. Kompressordagi energiyaning asosiy qismi haydash kanalidagi oqim zichligini ortishiga sarflanadi. Shuning uchun so'rish va haydash kanallaridagi kinetik energiyaning farqi juda ham kichik bo'ladi.

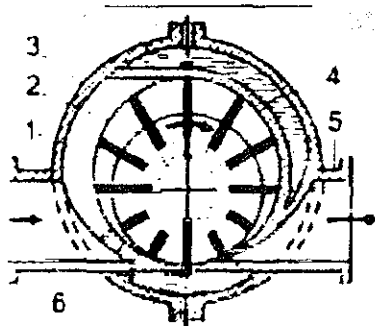
Turbokompressorda gazni siqish ishining kattaligi siqilgan gaz entalpiyasini o'zgarishi bilan gaz oqimining kinetik energiyasi yig'indisiga teng bo'ladi:

$$\Delta A_k = \Delta i + \Delta \left(\frac{\theta^2}{2} \right). \quad (170)$$

Bunda $\Delta \left(\frac{\theta^2}{2} \right) \cong 0$ bo'lganligi uchun ish kattaligi porshenli bir bosqichli kompressornikiga teng bo'ladi, ya'ni

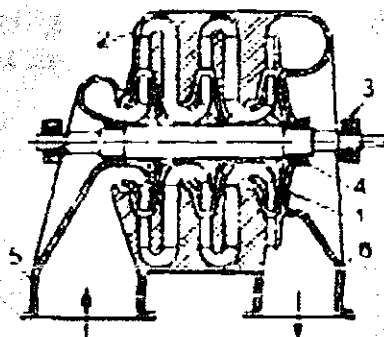
$$\Delta A_k = \Delta i = i_2 - i_1 \quad (171)$$

Hozirgi zamon gaz sanoatida ikki tomonlarni so'rish va haydash imkoniyatiga ega bo'lgan porshenli kompressorlar ko'p ishlatiladi. Shu bilan bir qatorda rotatsion (3.21-rasm), markazdan qochma



3.21-rasm. Plastinkali rotatsion kompressor:

1 — rotor; 2 — silindr; 3 — tana;
4 — plastina; 5 va 6 — haydash
va so'rish kalta quvurlari.

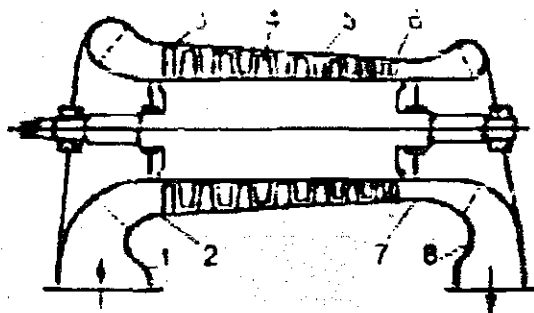


3.22-rasm. Markazdan qochma kompressor:

1 — ishchi g'ildirak; 2 — yo'naltiruvchi apparat;
3 — podshipnik; 4 — labirintli jipslagich; 5 va 6 — so'rish va haydash kalta quvurlari.

(3.22-rasm), o'q bo'ylab siquvchi (3.23-rasm) kompressorlar ham ishlatiladi.

Xususan, hozirgi zamon gaz sanoatini ko'p bosqichli kompressorlarsiz tasavvur etish qiyin. Shuning uchun o'rta va yuqori bosimli havo, kislorod, vodorod yoki propan oqimini hosil qilishda ko'p bosqichli kompressorlar gaz magistrallarida va texnologik jarayonlarni boshqarishda keng qo'llaniladi.



3.23-rasm. O'q bo'ylab siquvchi kompressor kesimi:

1 — so'ruvchi kalta quvur; 2 — konfuzor; 3 — yo'naltiruvchi apparat;
4 — ish kuraklari; 5 — yo'naltiruvchi kuraklar; 6 — rostlovchi apparat;
7 — xalqasimon diffuzor; 8 — haydash kalta quvuri.

3.10.2. Kompessorning ish unumdorligi, quvvati va foydali ish koeffitsienti

Siqilgan gaz tayyorlab berish imkoniyati, quvvati va foydali ish koeffitsienti kompressorning asosiy texnik ko'rsatkichlari hisoblanadi. Porshenli kompressorning ish unumdorligi ish porshenining diametri, yo'li, kompressor valining aylanishlar chastotasi hamda uzatish koeffitsienti orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$V_k = \eta_v n S h,$$

bunda S va h — porshen kallagining yuzasi va porshen yo'li;
 n — porshen valining aylanishlar chastotasi;
 $\eta_v = V / V_n$ — kompressorning uzatish koeffitsienti (amaldagi uzatishning nazariy uzatishga nisbati).

Kompressorning iste'mol qilgan quvvati indikator diagrammasidan aniqlanadigan o'rta bosim qiymatidan foydalanib topiladi:

$$p_i = \frac{S_i}{l_m}, \quad (172)$$

bunda S_i — indikator diagrammasining yuzasi, m^2 ;
 l_m — diagramma uzunligi, m ;
 m — bosim masshtabi, m/Pa .

Sodda kompressor quvvati kilovatlarda quyidagicha hisoblanadi:

$$N_i = \frac{p_i n S h}{1000}. \quad (173)$$

Ideal izolatsiyalangan izotermik sharoitda gazni siqishga sarflangan quvvatning real sarflangan quvvatga nisbatidan izotermik jarayon uchun indikator foydali ish koeffitsienti topiladi:

$$\eta_T^i = \frac{N_T}{N_i}. \quad (174)$$

Sovitilmaydigan (adiabatik) kompressorning indikator fik quyidagi ifodalan hisoblanadi:

$$\eta_T^i = \frac{N_a}{N_i}. \quad (175)$$

Gazni siqish jarayonidagi mexanik isroflar quyidagicha hisoblanadi:

$$\eta_m = \frac{N_i}{N_{k.v.}} \quad (176)$$

$N_{k.v.}$ — kompressor validagi quvvat.

To'la izotermik va adiabatik η_k ni (kompressor nazariy quvvatining uning validagi quvvatiga nisbati) quyidagi shaklda yozish mumkin:

$$\eta_T = \frac{N_T}{N_{k.v.}} = \eta_T^i \cdot \eta_m \quad \text{va} \quad \eta_a = \frac{N_a}{N_{k.v.}} = \eta_a^i \cdot \eta_m. \quad (177)$$

Porshenli kompressorlarning o'rtacha η_k izotermik siqish qo'llanilganida 65—75% bo'lsa, adiabatik siqishda esa 75—85% atrofida bo'ladi.

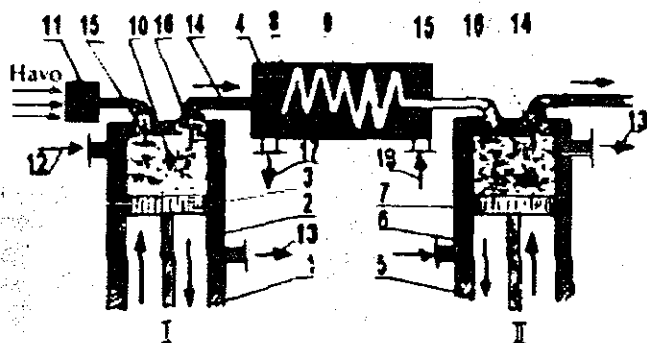
3.10.3. Ko'p bosqichli kompressor siklidagi termodinamik jarayonlar

O'rta yoki yuqori bosimli gaz oqimini hosil qilishda ko'p bosqichli kompressorlar qo'llaniladi. Ko'p bosqichli kompressor tuzilishi jihatidan bir necha bir bosqichli kompressorlar tizimidan tashkil topadi. Birinchi kompressorning so'rish kanalidagi bosimi atmosfera bosimi bo'lsa, uning haydash kanalidagi bosimi esa ikkinchi bosqich — keyingi kompressorning so'rish kanalidagi bosimi hisoblanadi. Birinchi kompressorning haydash kanali ikkinchisini so'rish kanali bilan sovitkich sistemasi orqali germetik ulanadi. Birinchi bosqichda qizigan gaz oqimi avval sovitkichda sovitiladi, so'ngra ikkinchi bosqichga uzatiladi. O'z navbatida, ikkinchi bosqichning haydash kanali bilan uchinchi bosqichni so'rish kanali oralig'iga ikkinchi sovitkich joylashtiriladi va sh.k. ketma-ketlik takrorlanadi. Demak, 1-kompressordan keyin 1-sovitkich, 2-kompressor, 2-sovitkich va sh. k. ketma-ketlik davom etadi.

Ko'p bosqichli kompressorga misol sifatida 3.24-rasmda ikki bosqichli kompressorning sxematik tasviri keltirilgan. Ko'p bosqichli kompressorda gazni siqish jarayoni (bir bosqichliga qisman o'xshasada), ko'p pog'onali ketma-ket siqish-haydash jarayonlari bilan farqlanadi. Gaz oqimi havo filtri orqali so'rish kalta quvurining kiritish klapani 15 ochilganidan so'ng, silindr 1

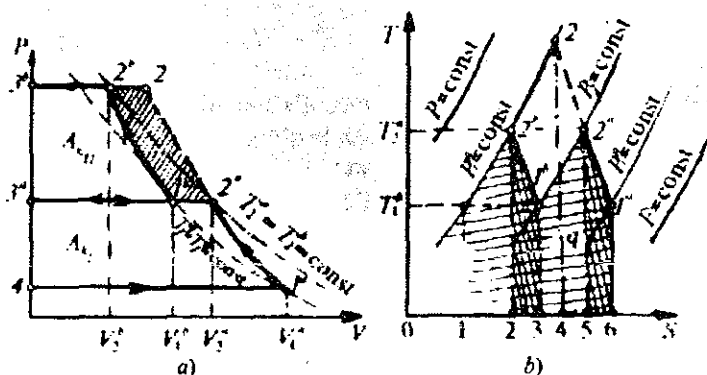
dagi porshen 3 va 7 ustidagi ish hajmi QQN yetguncha so'riladi. Porshen YQN tomonga harakatlana boshlaganida kiritish 15 va haydash 16 klapanlari yopiladi. Keyin, porshen YQN gacha harakatlanib, silindrdagi gazni adiabatik siqadi. Siqilgan gaz hamma bosqichlarda, siqilish jarayoni davomida uzluksiz sovitiladi. Siqilgan havo bosimi ma'lum qiymatga (haydash klapani prujinasi kuchidan bosim kuchi katta bo'lganida) yetganda haydash klapani ochiladi va siqilgan havo haydash kalta quvuri 14 orqali sovitish moddasi 8 joylashgan idish 4 ichidagi ilonizisimon quvur 9 ga haydaladi va unda qizigan gaz 10 issiqlik almashinib soviydi, so'ngra kompressorning ikkinchi bosqichiga uzatiladi. Ikkinchi bosqichda yana siqilgan gaz (3.15-rasm, a ga qarang) uchinchi bosqichga uzatiladi. Gazning 2b nuqtadagi P^b_3 bosimi 1b nuqtadagi P^a bosimidan katta, ya'ni $P^b_3 > P^a$ bo'ladi. Bu jarayon uzluksiz va ketma-ket kelgusi bosqichlarda davom etadi.

Jarayonning PV diagrammasidan (3.25-rasm) ko'rinadiki, o'zgarmas bosim ostida havo 4—1^a nuqtalar oralig'ida kompressorga kiritiladi (so'riladi). So'rilgan havo 1^a—2^a nuqtalar oralig'ida politropik siqiladi va uning bosimi P^a qiymatgacha ko'tariladi. So'ngra siqilgan havo sovitish uchun sovitkichga haydaladi (2^a—3^a



3.24-rasm. Ikki bosqichli kompressorning sxematik tasviri:

1 va 5 — kompressorlar silindrlari; 2 va 6 — sovitkich modda; 3 va 7 — birinchi va ikkinchi kompressorning porshenlari; 4 — birinchi bosqich kompressorining sovitkichi; 8 — sovitkich modda; 9 — ilonizisimon quvur; 10 — siqilayotgan havo (gaz); 11 — havo filtri; 12 va 13 — birinchi va ikkinchi bosqichlarning sovitkich moddasi; 14 — haydash kalta quvuri; 15 va 16 — kiritish va chiqarish klapanlari; 17 va 18 — birinchi bosqich sovitkich modda idishining chiqarish va kiritish kalta quvurlari; 19 — I va II kompressorlarning kiritish kalta quvurlari.



3.25-rasm. Ikki bosqichli kompressorda gazni siqish jarayonining PV (a) va TS (b) diagrammalari.

nuqtalar oralig'i). Sovitkichda issiqlik almashinuvi natijasida siqilgan havo 1^a-2^a nuqtalariga mos keluvchi boshlang'ich temperaturagacha soviydi. Bunda $P_2 = \text{const}$ saqlanadi (3.25-rasm, b, TS diagramma). Sovitilgan havoning temperaturasi tushirmagan holda uning solishtirma hajmi V_{2^a} dan V_{2^b} gacha kamayadi. Shundan so'ng, siqilgan va sovitilgan P_2 bosimli havo kompressorning ikkinchi bosqichiga kiritiladi va u yerda 1^b nuqtadan 2^b nuqtagacha (3.25-rasm, b dagi TS diagramma) siqiladi. Ikkinchi bosqich oxirida temperaturasi ortgan va bosimi P_{2^b} ga teng bo'lgan siqilgan havo yo resiverga uzatiladi (2^b-3^b nuqtalar oralig'i) yoki ikkinchi bosqichdan so'ng sovitiladi. Sovitilgan havo kelgusi bosqichga yoki iste'molchiga uzatiladi. Diagrammadan ko'rinadiki, sovitilish jarayonida siqilgan havodan sovitgichga chiqarilgan issiqlik miqdori q son qiymati jihatidan $2^a-1^b-3-5-2^a$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng va uni quyidagi ifodadan aniqlash mumkin:

$$q = c_p(T_2^a - T_1^b). \quad (178)$$

(178) ning o'ng tomonidagi hadi siqilgan havoning entalpiyasini beradi. Unda, (178) ifodani gazning 2^a va 1^b nuqtalaridagi entalpiyalari ayirmasiga teng bo'ladi, ya'ni

$$q = i_2^a - i_1^b. \quad (179)$$

Siqish va sovitish jarayonlarining TS diagrammasidan foydalanib (178, 179), ifodalarni taxminan quyidagicha yozish mumkin:

$$q = \frac{T_2^a - T_1^b}{2} (S_1^b - S_2^a). \quad (180)$$

Ko'p bosqichli kompressorning PV va TS diagrammalari 3.25-rasm, a, b larda tasvirlangandek boshlanib, m ta bosqichdan (zinapoya va cho'qqilar) iborat bo'ladi. Ko'p bosqichli kompressorda havoni siqishga sarf bo'lgan umumiy ish har bir bosqich ishlarining yig'indisiga yoki bosqichlar sonining bir bosqich uchun sarf bo'lgan ishi kattaligining ko'paytmasiga teng, ya'ni

$$A_{\Sigma} = mA_k.$$

Kompressorlar ko'p bosqichli kompressorning har bir bosqichiga sarf bo'lgan ishni va siqilgan havodan sovitkichga chiqarilgan issiqlik miqdorini bir xil saqlagan holda loyihalanadi va quriladi.

Bugungi kunda keng tarmoqli mashinasozlik va energetika sohasini kompressorlarsiz tasavvur etish qiyin.



Nazorat savollari

1. Kompressor deb qanday mashinaga aytiladi, ular qanday ishlaydi? Kompressorlar nomlarini ayting va chizmalardan qismlarini ko'rsating.
2. Kompressorning tuzilishi nasoslardan nima bilan farq qiladi?
3. Kompressorning sovitish bo'lmasida sovitkich agenti sifatida qanday moddalar ishlatiladi va kompressor nima uchun sovitiishi sababini tushuntiring.
4. Bir va ikki bosqichli hamda rotatsion, markazdan qochma, o'q bo'ylab siquvchi kompressorlar tuzilishiga ko'ra nima bilan farq qiladi?
5. Kompressor siklida gazni siqish jarayonlarining PV va TS diagrammalari bosqichlarga bog'liqligi? Diagrammalardan foydalanib kompressorning bajargan ishi qanday aniqlanadi?
6. Kompressorlar ishining unumdorligi, quvvati va foydali ish koeffitsienti deb nimaga aytiladi va ular qanday formulalar bilan aniqlanadi?
7. Ko'p bosqichli kompressor siklidagi termodinamik jarayonlarning PV va TS diagrammalarini tushuntiring.
9. Ko'p bosqichli kompressor siklidan tashqi muhitga chiqarilgan issiqlik miqdorini va siklda bajarilgan ishni topish formulalarini yozing va ularni tushuntiring.

Tabiatda mavjud bo'lgan yoki sun'iy usul bilan olinadigan, molekulalari orasidagi tortishish va itarish kuchlari elektromagnit va kvant tabiatiga ega bo'lgan gaz *real gaz* deb ataladi.

Real gazlarga atmosfera havosi va uning tarkibidagi vodorod, kislorod, azot, uglerod, oltingugurt, inert gazlari va ularning oksid hamda birikmalari, suv bug'i va sun'iy yo'l bilan olinadigan gazlar kiradi. Ideal va real gazlarda sodir bo'ladigan termodinamik jarayonlar ayrim xossalari bo'yicha o'zaro o'xshash bo'lsa-da, ammo ular bir-biridan farq qiladi.

4.1. Ideal va real gazlarning xususiyatlari

Gazlarning asosiy xususiyatlaridan biri ularning siqiluvchanligi bo'lib, ishlab chiqarishda, muhandislik hisob-kitoblarida undan keng foydalaniladi. Ma'lumki, gazning holat tenglamasiga muvofiq ideal gazning *siqiluvchanlik koeffitsienti* quyidagicha ifodalanadi:

$$Z = \frac{PV}{RT} = 1, \quad (181)$$

bunda Z — o'lchamsiz siqiluvchanlik koeffitsienti;

P va V — ideal gaz bosimi va hajmi;

$R = kN_A = 8,31451 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ — universal gaz doimiysi;

T — ideal gazning absolut temperaturasi;

$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ — Avogadro soni.

1 kg ideal gaz uchun (181) ni Klapeyron tenglamasi ko'rinishida quyidagicha yoziladi, ya'ni

$$PV = RT. \quad (182)$$

Hisob-kitoblarda ixtiyoriy M massali ideal gaz uchun (182) ni quyidagicha yozish mumkin:

$$PV = MRT. \quad (183)$$

Gaz molekulalari orasidagi tutunish kuchlari hisobiga ichki bosimni paydo bo'lishi gazlarda qo'shimcha siqiluvchanlikni vujudga keltiradi. Siqiluvchanlik bu gaz o'z hajmini tashqi ta'sir kuchlari hisobiga oldingi holatiga nisbatan qancha kamaytirganligini ifodalovchi tushunchadir. Siqiluvchanlikni aniqlash

uchun uning koeffitsienti kiritiladi. Siqiluvchanlik — bu bosim o'zgarishi bilan gaz hajmining nisbiy o'zgarishi orasidagi mutanosiblikni tavsiflovchi koeffitsient bo'lib, uni $T = \text{const}$ holati uchun quyidagicha yoziladi:

$$Z = -\frac{1}{V_0} \left(\frac{\Delta V}{\Delta P} \right)_T \quad (184)$$

Ideal gazlar uchun $Z = 1/P$ ga teng. Ideal va real gazlarga ta'sir etuvchi tashqi bosim bir xil, deb qabul qilinganida, katta hajmdagi real gaz ideal gazga nisbatan ko'proq siqiluvchanlikka ega bo'ladi. Bunga asosiy sabab gaz molekulalari markazlari orasidagi itarish kuchlarining mavjudligidir. Demak, real gaz to'ldirgan hajm katta bo'lsa, ko'proq, aksincha kichik bo'lganida esa kamroq siqiluvchanlikka ega bo'ladi. Xuddi shunday sharoitda ideal gaz hamma holatlarda bir xil siqiladi. Lekin muayyan parametrlar (hajm, bosim, temperatura) da real va ideal gazni siqilish darajasi bir xil bo'lishi mumkin.

Real gaz molekulalari markazlari orasidagi tortishishni paydo qiluvchi Van-der-Vaals kuchlari (ta'sir radiusi taqriban 10^{-9} m) hisobiga, ideal gazga nisbatan ayrim holatlarda, real gaz kamroq, aksincha holatlarda ko'proq siqiladi.

Real gazlarni biror bosim ostida sekin-asta siqib borilsa, qiziydi. Qizigan gazdan issiqlik sovitkichga chiqarilib turilsa, muayyan bosim va temperaturada gazlarni suyultirish mumkin. Real gaz har xil temperaturalarda siqilganida uning suyuqlanishi turlicha kattalikdagi bosim va hajmlarga mos keladi. Har bir turdagi gaz aniq biror bosim va temperaturada suyuq holatiga o'ta boshlaydi. Bunday bosim va temperatura qiymatlarini *kritik T_{kp} temperatura* va *kritik P_{kp} bosim* deb yuritiladi.

Demak, real gaz bosimini yoki temperaturasini orttirib borilsa, shundan so'ng ma'lum bosim (yoki temperatura)da gaz boshqa siqilmaydi, ya'ni siqiluvchanlik birga teng bo'ladi. Bu nuqtadagi hajm, bosim va temperaturani *kritik (V_{kp} , P_{kp} va T_{kp})* deyiladi. Kritik bosim va temperaturadan yuqori bo'lgan bosim va temperaturalarda real gazni suyultirib bo'lmaydi.

Demak, har qanday turdagi real gazni kritik temperaturadan past temperaturalarda siqilsa, ular tomchi — suyuqlik holatiga o'tadi.

4.2. Van-der-Vaals tenglamasi

Golland fizigi Van-der-Vaals 1873-yili real gazlar qonuniyatlarini nazariy jihatdan o'rganib, real gaz molekullari bir-biriga zich joylashmasligini va ular o'rtasida itarish hamda tortishish kuchlari mavjudligi asosida ideal gazning holat tenglamasini real gazlar uchun quyidagi shaklda berdi:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \quad (185)$$

bunda a va b — Klapeyron tenglamasi uchun tuzatma koeffitsientlari;

$\frac{a}{V^2}$ — real gazlarning o'zaro tortishish kuchiga teng bo'lgan tuzatma kattalik.

Bosim ostidagi real gazlar ustida o'tkazilgan ko'p sonli tajribalar natijalaridan shunday xulosa qilinadiki, o'zgarmas ($T = \text{const}$) temperaturadagi real gazlar uchun P va V ning ko'paytmasi PV o'zgarmas bo'la olmaydi. Ideal gazlar uchun $PV = \text{const}$ bo'la oladi. Real gaz bosimining o'zgarishi natijasida P ning V ga ko'paytmasi ham o'zgaradi. Past bosimlarda real gaz yaxshi, qarshiliksiz, osongina ideal gazga nisbatan ko'proq siqilsa, aksincha yuqori bosim ostida esa siqilishiga qarshilik ko'rsatib ideal gazga qaraganda kamroq siqilishi aniqlangan.

Demak, zichligi kam bo'lgan gazga o'zaro tortishish kuchlari yordamlashadi va katta zichlikli gaz molekullariga o'zaro itarish kuchlari, o'z ta'sirini ko'rsatadi. Haqiqatdan ham, tajriba tadqiqotlari natijasi nazariyani tasdiqlaydi. Van-der-Vaals bu natijalar tahliliga tayanib ideal va real gaz qonunlarini to'liq o'rgangan.

Haqiqatdan ham, ideal gaz tenglamasida gaz molekullari markazlari orasidagi masofa kattalashganida o'zaro tortishish va, aksincha, qisqarganida (ya'ni molekullar o'zaro yaqinlashganida) itarish kuchlari ta'siri hisobga olinmagan. Har bir molekula egallagan xususiy hajmiga boshqa molekulaning kirishiga to'sqinlik qiluvchi itarish kuchlari mavjud. Shu kuch hisobiga hajmcha kattaligi har xil bo'lishi mumkin. Itarish kuchini molekula egallagan foydali hajm bilan tavsiflanadi deyish mumkin.

Demak, *molekullar markazlari orasidagi masofa, nisbatan uncha katta bo'lmaganida, ular o'rtasida o'zaro tortishish kuchlari*



Van-der-Vaals

paydo bo'ladi. Buni Van-der-Vaals kuchi deyiladi. Faraz qilaylik, molekulalarning egallagan jami foydali hajmi gaz massasiga mutanosib, ya'ni mb' bo'lsin. Unda, molekulalar egallagan hajmni hisoblash yoki molekulalar orasidagi itarish kuchini e'tiborga olish shunga olib keladiki, ideal gazning jami hajmini o'zgartirmasdan faqat unga tuzatma kiritish zarur ekan, ya'ni V o'rniga $V - mb'$ deb yozish kerak. Tortishish, ya'ni Van-der-Vaals kuchi molekulalar o'rtasida mavjudligi hisobiga, qo'shimcha ichki a/v^2 bosim paydo bo'ladi.

Idish bilan o'zaro kontaktlashib turgan gaz molekulasida idish zarralaridan tashqari gaz hajmining ichkarisida joylashgan molekulalar bilan ham tortishadi. Natijada chegaraviy sirtning yuza birligiga mos keladigan gaz zarralari soniga va chegarada joylashgan molekulalarning o'zaro ta'sirlashish kuchiga mutanosib bo'lgan qo'shimcha bosim vujudga keladi. Bu kuch zarralar soniga mutanosibligidan zarralar soni ham ularning konsentratsiyasiga (hajm birligidagi zarralar soni) mutanosib ekanligi kelib chiqadi. Shuning uchun tortishish kuchlari u'yg'otgan qo'shimcha bosim zarralar konsentratsiasi kvadrati n_0^2 ga mutanosib, ya'ni solishtirma hajmi kvadratiga teskari mutanosib, ya'ni m^2/V^2 bo'ladi.

Yuqorida keltirilgan tuzatmalarni ideal gaz tenglamasiga kiritib, berilgan real gaz massasi uchun, Van-der-Vaals o'z tenglamasini quyidagi ko'rinishda ifodalagan:

$$\left(P + \frac{m^2 a'}{V^2} \right) (V - mb') = \frac{m}{\mu} RT, \quad (186)$$

bunda a' va b' — Van-der-Vaals tuzatmasi (molekulaning ta'sirlashish kuchi va hajmi) bo'lib, u har xil gazlar uchun turlicha qiymatlarni qabul qiladi.

(186)ni ikki tomonini m ga bo'lamiz va soddalashtirib yoza-miz:

$$\left(P + \frac{a'}{v^2} \right) (v - b') = R_0 T, \quad (187)$$

bunda $\vartheta = V/m$ — solishtirma hajm;

$R_0 = R/\mu$ — solishtirma gaz doimiysi bo'lib, u molyar gaz doimiysining molyar gaz massasini nisbatiga teng.

Ko'pchilik holatlarda a' va b' o'rniga $a = a'/\mu^2$ va $b = b'/\mu$ ishlatiladi. Shuning uchun modda miqdori $v = m/\mu$ asosida (186) ni qayta yozish mumkin:

$$\left(P + \frac{v^2 a}{V^2} \right) (V - vb) = v RT, \quad (188)$$

bunda $a \neq a'$ va $b \neq b'$ — Van-der-Vaals tuzatmasi.

Ko'pchilik hisoblashlarda solishtirma hajmdan foydalaniladi. Agarda $V_m = V/v$ bo'lsa, u holda (188) qaytadan yozish mumkin:

$$\left(P + \frac{a}{V_m^2} \right) (V_m - b) = RT. \quad (189)$$

Van-der-Vaals tenglamasi (189)ga umumiylikni kiritish maqsadida V_m o'rniga V qo'yilib, quyidagi shaklda yoziladi, ya'ni

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT. \quad (190)$$

bunda a/V^2 — nisbati gazning ichki bosimi;

$(P + a/V^2)$ — gazning tashqi va ichki bosimlari yig'indisi;

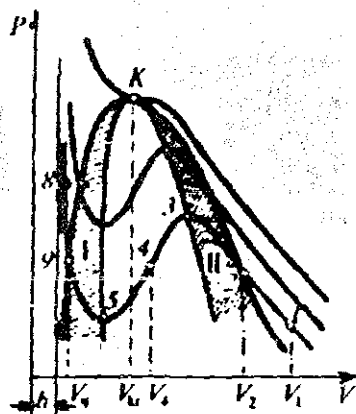
$(V - b)$ — gaz molekulasini harakatlana oladigan, ya'ni egalagan hajmi bo'lib, molekula xususiy hajmining to'rt barobariga teng;

b — molekulaning xususiy hajmi bo'lib, uni kovolyum yoki kohajm ham deb yuritiladi. Uning qiymati quyidagidan topiladi, ya'ni

$$b = \frac{2}{3} \pi d^3 N_A,$$

bunda N_A — Avogadro soni; d — molekula diametri.

Van-der-Vaals tenglamasi real gaz xossalarini, ya'ni moddaning gaz holatidan tomchi — suyuqlik holatiga o'tish xususiyatini hisobga oladi. a va b o'zgarmas kattaliklari, mos ravishda, melekulalarning o'zaro ta'sirlashish kuchini va o'lchamini ifodalaydi.



4.1-rasm. Van-der-Vaals tenglamasining grafigi.

Van-der-Vaals tenglamasining grafik shaklidagi tasvirining PV diagrammasidagi 1—2—3—4—5—9—8 nuqtalarini birlashtirib, hosil qilingan izotermadagi (4.1-rasm) 1 nuqtada modda gaz holatida (o'ta qizdirilgan bug'), 8 nuqtada esa suyuq holatda bo'ladi. Diagrammadan ko'rinadiki, gazni suyuqlikka aylantirish jarayoni Van-der-Vaals tenglamasi bo'yicha uzluksiz davom etishi taqriban 2—3—4—5—9 nuqtalar oralig'ida, go'yoki tebranish qonuniyati bo'yicha, hech qanday o'zgarishsiz tekis sodir bo'ladi,

ya'ni gaz isiydi, ortiqcha issiqlikni chiqaradi, yana isiydi va sh.k.

Demak, $T = \text{const}$ bo'lganida P bosimning har xil qiymatlariga V hajmni bitta yoki uchta haqiqiy qiymati mos kelar ekan. Bundan shunday fikrni aytish mumkinki, Van-der-Vaals tenglamasining izotermasi (PV tekisligida) birorta bosimi $P = \text{const}$ bo'lgan izobara chizig'ini faqat yagona kritik K nuqtasidan yoki uning uchta nuqtasidan (2, 4 va 9 nuqtalari) kesib o'tadi (4.1-rasmga qarang). Ma'lumki, real gazlarning izotermasidagi birorta nuqtada $P = \text{const}$ bo'lganida siqilgan gaz suyuqlikka aylanadi (4.1-rasmdagi 7 va 6 nuqtalar oralig'ida), ya'ni kondensatsiyalana boshlaydi va ikki fazali xossasini to'g'ri gaz fazasi butunlay tugamaguncha o'zgarmas bosimda saqlaydi, so'ngra suyuq fazada gaz qonuniyatlari bajariladi. Afsuski, Van-der-Vaals tenglamasi bunday xususiyatga ega emas. Real gazlarning siqilish qonuniyatini past temperaturalarda, boshlang'ich (1 va 2 nuqtalar oralig'ida) va oxirgi (9 va 8 nuqtalar oralig'i) holatlarini Van-der-Vaals tenglamasi ham to'liq qoniqtiradi. Lekin real gaz izotermasining o'rta qismida (4.1-rasm), tadqiqot natijalariga muvofiq, gazni kondensatsiyalanishi 2 va 9 nuqtalarini birlashtiruvchi to'g'ri chiziq bo'ylab sodir bo'ladi, ammo Van-der-Vaals tenglamasiga muvofiq jarayon 2—3—4—5—9 nuqtalarni birlashtiruvchi egri chiziq bo'yicha kechadi.

Demak, Van-der-Vaals tenglamasining izotermasini 2 va 3 hamda 5 va 9 nuqtalari oralig'i uchun $(\Delta P / \Delta V) < 0$, ya'ni ayrim ta'sirlar hisobiga gazni *metaturg'un* holatdan *turg'un* holatga

o'tkazish mumkin. 5—4—3 nuqtalar oralig'ida moddaning bosimi ortgan sayin hajmi ham ortishi, ya'ni $(\Delta P / \Delta V) > 0$ bilan tavsiflanadi. Demak, modda 5—3 nuqtalar oralig'idagi birorta ham nuqtada muvozanat holatida bo'la olmaydi, ya'ni o'ta kichik ta'sir ham gazni muvozanatdan chiqara oladi. Gaz siqilishi natijasida suyuqlikka aylana boshlaydi. Lekin 2 va 3 chiziq bo'ylab gazning siqilishi davom ettirilsa, gaz *o'ta sovutilgan bug** holatiga o'tadi. Bunda $P = f(T)$ munosabati o'rinli bo'lishi uchun o'ta to'yingan bug bosimi oddiy holatga nisbatan juda katta bo'ladi. Shunday holatdagi bug'ga kondensatsialanish markazlari vazifasini bajaruvchi biror modda qo'shilsa, darhol suyuqlik paydo bo'ladi va izotermadagi 2—3 chiziq 5—9 chiziqqa tushadi. Bu turdagi tashqi ta'sir hisobiga o'tish *turg'unmas (metastabil) o'tish* deyiladi. O'ta qizdirilgan suyuqlik faqat tashqi ta'sirlar kattaligi nolga teng bo'lganida turg'un bo'la oladi. Mazkur izotermaning 9—5 nuqtalari oralig'ida ham $P = f(T)$ bog'lanish o'rinli hisoblanadi. *O'ta qizdirilgan suyuqlikka*** ozgina tashqi ta'sir (masalan, idishning sezilarsiz qimirlashi) bo'lsa, u darhol qaynaydi va 2—3 chizig'i holatiga o'tadi. O'ta qizdirilgan suyuqlik ham metastabil (metaturg'un) holatda bo'ladi.

Demak, o'ta to'yingan bug' va o'ta qizdirilgan suyuqlik holatidagi modda metastabil yoki nostabil holatlarida bo'lganligi sababli ularni tashqi ta'sir hisobiga turg'un (stabil) (suyuqlik-gaz, ya'ni ikki fazali modda) holatiga o'tkazish mumkin ekan.

Sistemaning metastabil (turg'unmas) holatlarini tavsiflashda PV diagrammada ularni qiya chiziqli yuzalar ko'rinishida tasvirlanadi. Van-der-Valls tenglamasi shaklidagi tenglamalar faqat aniq turdagi real gazlar uchun to'g'ri bo'lib, universallik xususiyatiga ega emas. Bu kamchilikdan qutulish maqsadida o'Ichamsiz keltirilgan gaz parametrlaridan foydalanib *Van-der-Vaalsning keltirilgan tenglamasi* chiqariladi. Ma'lumki, real gazning kritik nuqtasida Van-der-Vaals tenglamasining uchala ildizi o'zaro teng, ya'ni $V_9 = V_4 = V_2 = V_{kr}$ bo'lgani uchun bu bog'lanishni quyidagicha yozish mumkin:

$$(V - V_{kr})^3 = 0$$

* — moddaning shunday holatiki, modda o'z parametrlari bo'yicha suyuqlik holatida, ammo xossalari bo'yicha esa gaz holatida bo'lish hodisasidir.

** — moddaning shunday holatiki, modda o'z parametrlari bo'yicha gaz holatida, ammo xossalari bo'yicha esa suyuqlik holatida bo'lish hodisasidir.

yoki

$$V^3 - 3V^2V_{kr} + 3VV_{kr}^2 - V_{kr}^3 = 0. \quad (191)$$

Unda, izotermadagi kritik nuqta quyidagi shartni qanoatlantirishi mumkin:

$$V_m - \left[b + \frac{RT_{kr}}{P_{kr}} \right] V_m^2 + \frac{a}{P_{kr}} (V_m - b) = 0 \quad (192)$$

(191) bilan (192) tenglamalar hadlari o'zaro taqqoslanganda, ayrim hadlarning o'zaro tengligi aniqlanadi, ya'ni

$$V^1 = V_m^1; \quad V^2 = V_m^2; \quad V = V_m.$$

$$3V_{kr} = \left[b + \frac{RT_{kr}}{P_{kr}} \right]; \quad 3V_{kr}^2 = \frac{a}{P_{kr}}; \quad V_{kr}^3 = \frac{ab}{P_{kr}}.$$

Bu tengliklar uchta tenglamalar sistemasi bo'lib, unda V_{kr} , P_{kr} va T_{kr} noma'lum kritik parametrlar hisoblanadi. Noma'lum kritik parametrlarni aniqlashda bu uchta tenglamalar sistemasi o'zaro yechiladi va V_{kr} , P_{kr} hamda T_{kr} topiladi, ya'ni

$$V_{kr} = 3b; \quad P_{kr} = a / 27b^2; \quad T_{kr} = 8a / 27bR. \quad (193)$$

Moddaning kritik holat parametrlari Van-der-Vaals tenglamasidagi o'zgarmas a va b kattaliklari bilan ifodalanadi. Shunday qilib, Van-der-Vaals tenglamasini ikkita o'zgarmas kattaliklari uchun uchta tenglamalar sistemasi hosil qilinadi, so'ngra ulardan a va b hamda R larni topish mumkin, ya'ni

$$a = 3P_{kr}V_{kr}^2; \quad b = V_{kr}/3; \quad R = 8P_{kr}V_{kr}/3T_{kr}.$$

Van-der-Vaalsning keltirilgan o'lcamsiz tenglamasini topish uchun (190) dagi modda parametrlarini, mos ravishda, V_{kr} , P_{kr} va T_{kr} larga bo'lamiz va real gaz molekullari egallagan hajmining uchdan bir qismigacha siqilishi mumkinligini e'tirof etsak, unda $a = 3$; $b = 1/3$ va $R = 8/3 = 26,7$ teng bo'lish asosida tenglamani qayta yozish mumkin:

$$\left[\frac{P}{P_{kr}} + \frac{3}{(V/V_{kr})^3} \right] \left(\frac{V}{V_{kr}} - \frac{1}{3} \right) = \frac{8T}{3T_{kr}}. \quad (194)$$

(194)ni soddaroq shaklga keltirish maqsadida nisbatlarni $\pi = P/P_{kr}$, $w = V/V_{kr}$, $\tau = T/T_{kr}$ — o'lcamsiz keltirilgan parametrlar shaklida ifodalab quyidagicha yoziladi:

$$(\pi + 3/w^3)(3w - 1) = 8\tau. \quad (195)$$

Keltirilgan o'lcamsiz parametrlar o'zaro $\pi = w = \tau = 1$ teng.

Abssissa o'qi bo'ylab asimptoto kattaligi $w = 1/3$, bu real gaz molekulalari egallagan hajmning $1/3$ qismigacha siqilishini bildiradi:

$$V = b = V_{kr}/3$$

yoki keltirilgan ko'rinishda

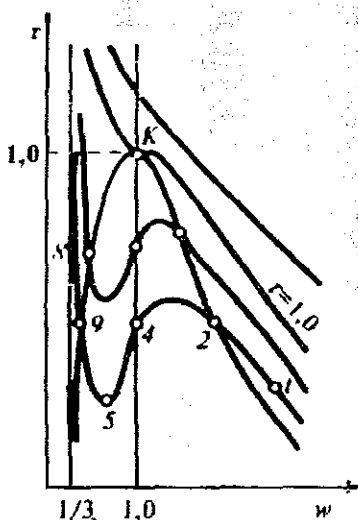
$$w = b/V_{kr} = 1/3.$$

Turli xil gazlarning keltirilgan parametrlari bir xil bo'lsa, ularning holatini tavsiflovchi kattaliklari ham o'zaro mos bo'ladi.

Unda, ularning holatlari *mos holatlar*, parametrlari esa *mos parametrlar* deb ataladi. Chunki ularning hammasini keltirilgan xususiyatlari o'zaro teng bo'ladi.

Demak, *bir xil xususiyatga ega bo'lgan moddaning keltirilgan holatlarini nuqtalari ham mos ravishda ustma-ust tushadi va o'zaro teng qiymatli bo'ladi.*

Ularni τw diagrammasi (4.2-rasm) da bir xil nuqtada joylashtiriladi va ayrim mos parametrlari noma'lum bo'lgan modda parametrini o'xshashliklar kriteriysi kabi usul bilan aniqlanadi. Masalan, hamma moddalar uchun keltirilgan qaynash temperaturasi $\tau \approx 0,6$ ga teng.



4.2-rasm. Van-der-Vaals tenglamasining τw diagrammasi.

Ayrim gazlarning kritik parametrlari

Gaz nomi, formulasi	P_{kr} , MPa	$V_{kr} \cdot 10^{-3}$, m^3/kg	T_{kr} , K	$\frac{RT_{kr}}{P_{kr}V_{kr}}$	R , real gaz
Geliy, He	0,222	2,078	5,35	3,59	0,31
Vodorod, H ₂	1,329	32,26	33,25	2,66	3,43
Azot, N ₂	3,393	3,22	126,0	2,65	0,23
Uglerod oksidi, CO	3,40	3,55	134,15	2,67	0,24
Kislorod, O ₂	5,034	2,52	154,35	2,68	0,22
Karbonat angidrid, CO ₂	7,16	7,65	304,5	2,67	0,48
Suv bug'i, H ₂ O	22,053	2,53	647,3	2,67	0,23
Xlor, Cl	7,708	1,75	417,1	2,66	0,086

Atmosfera bosimi ostidagi 1 mo'l moddani bug'lanishidagi entropiya o'rtirtirasi $\Delta i \approx 21 \text{ J/mo'l} \cdot \text{grad}$ ga (Truton qoidasiga qarang) teng.

Keltirilgan misoldagi natijalar hamma moddalar uchun ham to'g'ri emas, faqat ma'lum umumiylikka ega bo'lganlariga mos keladi. Moddalar uchun kritik koeffitsientlarni aniqlash mumkin (5-jadvalga qarang). Ular ko'pchilik holatda $\approx 2,67$ atrofida bo'ladi.

Demak, qarab chiqilgan Van-der-Vaals tenglamasi (turli xil shakllarda) real gazlarning sifat xossalari, ya'ni turg'unmas holatning, kritik koeffitsientining va mos holatlarning o'rinli ekanligini to'laroq tushuntira oladi. Ammo miqdoriy bog'lanishlarni aniqlashda tenglama nisbiyroqdir, ya'ni aniq natijalarni bera olmaydi.

Nazorat savollari

?

1. Ideal va real gazlar deb nimaga aytiladi? Gazlarning siqiluvchanligi va siqiluvchanlik koeffitsientining ma'nosi nima va u qanday formula bilan hisoblanadi?
2. Real gazning siqilishi ideal gaznikidan nima bilan farq qiladi va nima uchun bunday hodisa sodir bo'ladi?
3. Real gaz qonunlarini kim o'rgangan?
4. Van-der-Vaals kuchi deb nimaga aytiladi va u qanday masofaga-cha ta'sir qila oladi?

5. Van-der-Vaals tenglamasidagi a va b tuzatmalarning ma'nosi nimadan iborat?
6. Molekulaning xususiy hajmi va kovolyum nima? Molekula harakatlana oladigan hajm deb qanday hajmga aytiladi?
7. Van-der-Vaalsning keltirilgan tenglamasini yozing va uning ma'nosini tushuntiring.
8. Van-der-Vaalsning keltirilgan tenglamasidagi kritik parametrlar qanday topiladi va u qanday hisoblarda qo'llaniladi?
9. Nima uchun real gazlarning universal gaz doimiysi har xil qiymatlarni qabul qiladi?

4.3. Suv bug'ining hosil bo'lishidagi ayrim fizik hodisalar

Suv bug'i — suvning gaz agregat holatidagi holi bo'lib, issiqlik energetikasining asosiy ish jismi bo'lgani uchun undan ishlab chiqarishda keng foydalaniladi. Suv muayyan sharoitda **gaz** holatiga osongina o'tadi. Suyuqliklar tabiatda ko'p va ularning xususiyatlari ham turlicha. Suyuqlikning tashqi ta'sir (isitilishi, hajmining keskin kengayishi va sh.k.) natijasida gaz holatiga o'tish hodisasi **bug'lanish** deyiladi. Suvning bug' holatiga o'tishi uchun uning sirtidagi bosimni o'zgarmas yoki o'zgaruvchan holatda saqlab, unga ma'lum miqdordagi issiqlikni kiritish kerak. Shunda suv molekullari orasidagi tutunish kuchlari kamayadi va molekullarning xotik harakati jadallashib, uning kinetik energiyasi ortadi. Suyuqlik molekulasining muvozanat holatidagi kinetik energiyasi uning q issiqlik miqdori yutgandan keyingi kinetik energiyasidan kichik bo'lsa, suyuqlik gaz holatiga o'ta boshlaydi, ya'ni bug'lanadi. Aksincha bo'lganda kondensatsiya (bug'ning suyuqlikka aylanishi) hodisasi kuzatiladi. Yutilgan issiqlik ta'sirida suyuqlik sirtidan qancha molekula uzilib chiqib gaz holatiga o'tsa va xuddi shuncha molekula kondensatsialanib suyuqlik holatiga qaytsa, bunday hodisani **to'yinish holati** deb qabul qilingan, ya'ni bug' bilan suv o'zaro **dinamik muvozanatda** bo'ladi. Suyuqlik bilan dinamik muvozanatdagi bug' **to'yingan bug'** deyiladi. Suyuqlikning erkin sirti ustidagi bo'shliqni to'yintiradigan bug' qismi **nam bug'** deyiladi. To'yingan nam bug'da mayda suv tomchilari bo'ladi.

Suyuqlikka uzatiladigan issiqlik miqdori ortib borishi bilan uning temperaturasi ham ko'tariladi va suyuqlikda erigan gaz molekullarining suyuqlikdan ajralishi jadallashadi. Bunda bug' pufakchalari idish devorlaridagi yoriqlarda va suyuqlik hajmida

paydo bo'lib, kattalashib suyuqlik sirtiga qalqib chiqib yoriladi. Bunday hodisa *qaynash* deyiladi.

Qaynash suyuqlik sirtidagi bosimga bog'liq, ya'ni bosim ortsa, qaynash temperaturasi ham ortadi va aksincha.

Hosil qilingan nam bug'ga yana qo'shimcha issiqlik miqdori uzatilsa, uning tarkibidagi juda mayda suv tomchilari bug'lanib to'yingan quruq bug' hosil bo'ladi. Bug'ning quruqlik va namlik darajasi to'yingan quruq bug' tarkibidagi bug' va suv tomchilari miqdori bilan baholanadi. Bug'ning quruqlik darajasi qancha katta bo'lsa, uni ishlatish ham shuncha qulay bo'ladi. Suv va to'yingan bug' parametrlari temperaturaga qarab o'zgaradi (6-jadval). To'yingan quruq bug'ni yana qizdirsak, u o'ta qizdirilgan bug' holatiga o'tadi, ya'ni bug' zarrasi molekula darajasigacha parchalanib boradi.

Suv bug'ining *PV* diagrammasini qarab chiqamiz (4.3-rasm). Diagrammadan ko'rinadiki, suvga tashqaridan *q* issiqlik miqdori uzatilganida uning temperaturasi ortib boradi: avval hajmi ortadi, so'ngra jadal bug'lanish darajasiga yetadi (*TV* koordinatalarida *a*–*b* nuqtalar oralig'i; *PV* koordinatalarida, *a* – *b* nuqtalar oralig'i).

6-jadval

Suv va uning to'yingan bug'i kattaliklarini
temperaturaga bog'liqligi.

Suv		To'yingan bug'		Solishtirma bug' hosil bo'lish issiqligi, $r \cdot 10^4, \text{J/kg.}$
tempera- turasi T, K	zichligi $\rho, \text{kg/m}^3$	bosimi $P \cdot 10^5, \text{Pa}$	zichligi $\rho, \text{kg/m}^3$	
273	1000	0,023	0,017	24,3
373	960	1,02	0,597	22,6
423	920	4,75	2,54	21,1
473	860	15,5	7,84	19,5
573	700	85,7	46,9	13,8
643	440	210	208	4,12
717	320	220	320	0,0

Tashqaridan beriladigan issiqlik miqdori q ortib borgan sayin, suv jadal bug'ga aylanadi va nam bug' paydo bo'ladi ($b-d$ va $b'-d'$ nuqtalar oralig'i). Natijada hajmdagi hamma suv miqdori d va b' nuqtalar oralig'ida to'la gaz holatiga o'tadi, ya'ni to'yingan quruq bug' hosil bo'ladi.

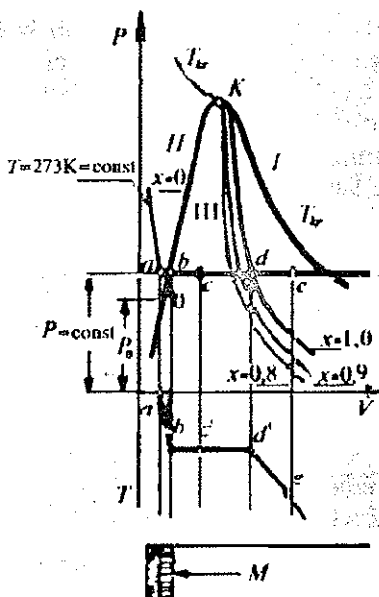
Jadal bug'lanish o'zgarmas bosim ostida sodir bo'lganda jarayon izobarik, ham izotermik bo'ladi ($b-d$ va $b'-d'$ nuqtalar oralig'i).

To'yingan quruq bug'ga q issiqlik miqdori kiritilsa, uning parametrlari o'zgaradi, ya'ni T va V ortadi, chunki jarayon $P = \text{const}$ da sodir bo'ladi. To'yingan bug' d va d' nuqtalaridan o'ng tomonda o'ta qizdirilgan bug' holatiga o'tadi. Suv sirti ustidagi bosim P bir xilda tutilmasa, $b-a-d$ nuqtalar asta-sekin bir-biriga yaqinlashib, K (kritik) nuqtada ma'lum bosim P va V hajmda ustma-ust tushadi. Kritik nuqtadan chap tomonda suv bug'i tarkibida mayda suv tomchilari bo'lgan o'ta qizigan bug' holatida bo'ladi. Shu K nuqtadan o'ng tomonda suv bug'i tarkibida suv tomchilari yo'q darajada, ya'ni ideal gazga yaqin bo'ladi. Suv bug'ining kritik K nuqtasidagi parametrlari quyidagicha:

$$P_{kr} = 221,29 \text{ bar} = 22,129 \text{ MPa};$$

$$V_{kr} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}; T_{kr} = 647,31 \text{ K}.$$

Issiqlik energetikasida suv bug'i keng qo'llaniladi. Suv ma'lum (tashqi bosimga nisbatan 273 K dan boshlab va undan yuqori) temperaturada gazsimon holatga o'tadi. Bunday hodisadan mashinasozlik va energetikada suv bug'i bug' qozonlarida hosil qilinadi va aniq parametrlri to'yingan, qizdirilgan, o'ta qizdirilgan bug' darajasiga yetkaziladi hamda bug' quvurlari orqali iste'molchiga uzatiladi. Qozonda tayyorlangan bug' bosimi, tem-



4.3-rasm. Suv bug'ining PV diagrammasi.

peraturasi va miqdori imkoni boricha o'zgarmas saqlanadi. Suv bug'i hamma issiqlik elektr stansiyalari va markazlarida asosiy ish moddasi hisoblanadi. Chunki suv bug'ini hosil qilish oson, arzon va ekologik jihatdan toza. Shuning uchun issiqlik elektr stansiyalarining hamma turlarida, regenerativ issiqlik almashinuvida va shu kabi inshoot hamda qurilmalarda yoqilg'i yoqilib, asosan suv bug'i hosil qilinadi, so'ngra bug' yana qizdiriladi, uning parametrlari ish bajara oladigan darajagacha yetkaziladi. Hosil qilingan suv bug'i ishlab chiqarishning turli-tuman sohalarida va issiqlik ta'minoti tarmoqlarida issiqlik manbayi sifatida keng qo'llaniladi.

4.4. Suv va suv bug'ining asosiy tavsifiy parametrlari

Issiqlik energiyasi ta'minoti bilan bog'liq masalalar yechimini topishda texnik-muhandislar suv va suv bug'ining termodinamik parametrlari keltirilgan turli-tuman jadval hamda diagrammalardan foydalanadilar.

Ma'lumki, termodinamik parametrlarga solishtirma hajm, bosim, temperatura mansub bo'lsa-da, amaliyotdagi hisoblash ishlarida solishtirma entalpiya va entropiya hamda ichki energiyadan foydalanishga to'g'ri keladi. Bu parametrlar o'zaro bog'langan bo'lib, ish jismining bu parametrlarini bilmasdan turib muhandislik hisoblash ishlarini amalga oshirib bo'lmaydi. Shuning uchun suv va suv bug'ining ayrim parametrlari orasidagi bog'lanishlarni qarab chiqamiz.

Har qanday moddaga tashqaridan ma'lum miqdordagi issiqlik keltirilsa, modda o'z hajmini orttiradi. Suv va uping bug'iga ham issiqlik kiritilganida ularning solishtirma hajmlari kattalashadi. Bunda qaynayotgan suvning solishtirma hajmi tashqi bosimga bog'liq bo'ladi. Bunday holatlarni o'rganishda suv bug'ining *PV* diagrammasidan (4.3-rasm) foydalanamiz.*

Istalgan massali, masalan, 1 kg suvni o'zgarmas bosim ostida qaynatish uchun unga kiritilishi zarur bo'lgan q' issiqlik miqdori quyidagi formuladan topiladi:

* — *PV* diagrammasidagi $x=1$ va $x=0$ chizig'ining yuqori va pastki qismlarida joylashgan suv bug' parametrlarini osonroq ajratish maqsadida parametr belgilarining ustiga bir va ikki chizg'ilar qo'yib yozamiz.

$$q' = c_p m (T - 273), \quad (196)$$

bunda c_p — o'zgarish bosim ostidagi va 273 K dan T gacha bo'lgan temperatura oralig'idagi suvning o'rtacha solishtirma issiqlik sig'imi; $m = 1$ kg — suv bug'ining massasi.

Termodinamikaning birinchi qonunidan ma'lumki, sistemaga kiritilgan issiqlik miqdori shu sistema ichki energiyasining o'zgarishiga va ishga sarflanadi. O'rganilayotgan suv bug'i uchun ham xuddi shunday holat o'rinli bo'ladi. Unda, suv bug'iga kiritilgan issiqlik miqdori hisobiga uning parametrlari o'zgarishini e'tiborga olib, termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha yozish mumkin:

$$q' = (U'_2 - U'_1) + P(V'_2 - V'_1), \quad (197)$$

bunda $(U'_2 - U'_1)$ — diagrammaning yuqori qismida joylashgan suv bug'i ichki energiyasining o'zgarishi;

$P(V'_2 - V'_1)$ — diagramma yuqorisidagi suv bug'i hajmining o'zgarishi hisobiga bajarilgan ish.

Suvning 273 K dagi ichki energiyasi $U'_1 = 0$ va $\Delta V' = V'_2 - V'_1$ hajm juda kichik bo'lgani uchun suvga kiritilgan q' issiqlik miqdorini quyidagicha yozish mumkin, ya'ni

$$q' = U'_2 \quad \text{va} \quad q' = U' \quad (198)$$

Qaynayotgan suv entalpiyasi quyidagi formuladan hisoblanadi, ya'ni

$$i' = U'_2 + PV'_2. \quad (199)$$

Formula (199) dagi $P = 10 - 20$ MPa bo'lganida $U'_1 \gg PV'_1$ bo'lishiga muvofiq (198) va (199) asosida ushbu tenglamani yozish mumkin:

$$i' = q' = U'_2. \quad (200)$$

Suv temperaturasi $T_1 = 273$ K dan $T_2 = 373$ K gacha $P = \text{const}$ ostida ko'tarishda (qaynagunicha) entropiya o'zgarishi quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = c_p (T_2 - T_1). \quad (201)$$

Suv bug'ining PV diagrammasidagi 273 K temperaturadagi asosiy parametrlari $P_0 = 6,106 \cdot 10^{-3} \text{ bar} = 6,108 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$,

$V_0 = 100,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$, $U_0 = -6,11 \cdot 10^{-4} \text{ kJ/kg}$ jadvallardan topiladi va ularga ko'ra diagrammadagi 273 K ga mos keluvchi ichki energiyani ham nolga teng deb qabul qilinadi.

Suv bug'ining PV va TV diagrammasi. Diagrammadagi «0» nuqta. Har bir nuqtaga mos keluvchi parametrlar, entropiya, entalpiya va ichki energiya orasidagi bog'lanishlarni bilish uchun ham diagramma quriladi.

Diagrammadagi «0» nuqta suvning 273,16 K temperaturadagi uchlama nuqtasiga mos tushuvchi nuqta bo'lib, bir vaqtning o'zida suv izotermasidagi 273,16 K temperaturaga va 273,16 K da qaynovchi suvning chegaraviy nuqtasiga mos keladi. Suv bug'ining xossalarni o'rganishda nol nuqtani entalpiya hisobining boshi va undagi entalpiya qiymatini nolga teng deb olinadi, ya'ni

$$i'_0 = 0. \quad (202)$$

Suvning 273,16 K temperaturadagi holati uchun entalpiya ifodasini yozib, undan entalpiya diagrammadagi «0» nuqta uchun quyidagini yozamiz:

$$U'_0 = i'_0 - P_0 V'_0. \quad (203)$$

Suvning 273,16 K da entalpiyasi nolga tengligini hisobga olib (203) ni qayta yozamiz:

$$U'_0 = -P_0 V'_0. \quad (204)$$

Suvning istalgan bosim va 273,16 K temperaturada solishtirma hajmi $V_0 = 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ bo'lsa, uning solishtirma entalpiyasi va entropiyasini nolga teng qilib olinadi.

Diagrammadagi «a» nuqta. Bu nuqta P bosim va 273 K da qaynamayotgan suv nuqtasiga mos keladi. Diagrammadan ko'rindiki, «a» va «0» nuqtalarda $V_a < V_0$, $T_a = T_0$ bo'lsa-da, qaynayotgan suvning ichki energiyasi uning potensial energiyasi orqali aniqlanadi. Unda, a nuqtaning ichki energiyasi U_a bo'lsa, qaynamayotgan suvning shu nuqtadagi entalpiyasi quyidagicha ifodalanadi:

$$U_a = i_a - PV_a. \quad (205)$$

bunda i_a va V_a — qaynamayotgan suvning a nuqtadagi entalpiyasi va hajmi bo'lib, ularning qiymatlari maxsus jadvallardan topiladi. i_a va V_a qiymatlari asosida U_a hisoblanadi.

Diagrammadagi «b» nuqta P bosim ostida qaynayotgan suv nuqtasiga mos keladi. Suvga issiqlik miqdori kiritilganida yoki undan chiqarilganida, boshqa moddalar kabi, o'z hajmini o'zgartiradi. Bu o'zgarishda albatta, suvning parametrlari o'zgaradi. Suv bug'i diagrammasidagi b , d , c va e nuqtalarni suv tashqaridan issiqlik olgandagi holat parametrlariga mos keladi deb hisoblaymiz.

Qaynayotgan suvning bug'ga aylanish jarayonidagi parametrlari o'zgarmas bosim ostida sodir bo'layotganligi uchun unga uzatilgan q issiqlik miqdori termodinamikaning birinchi qonunidan aniqlanadi, ya'ni

$$q = U_2 - U_1 + P(V_2 - V_1) = (U_2 - PV_2) - (U_1 - PV_1) = i_2 - i_1. \quad (206)$$

Bosim bilan temperatura o'zaro bog'liqligini e'tiborga olsak, diagrammadagi $b - d$ nuqtalari oralig'ida b nuqtani bosim yoki temperatura yordamida tavsiflash mumkin. Chunki $b - d$ nuqtalar oralig'ida sodir bo'lgan jarayonga sarf bo'lgan issiqlik miqdori b nuqtaning entalpiyalari ayirmasiga, ya'ni

$$q = i' - i = U' - U + P(V' - V)$$

tengligi asosida suv bug'i diagrammasining $b - d$ chizig'idan yuqoridagi holat uchun i' ni quyidagicha yozish mumkin:

$$i' = i - (U + PV) + U' + PV' = U' - PV'. \quad (207)$$

Keltirilgan (207) ifoda suv bug'ining ichki energiyasini aniqlashda qo'llaniladi va maxsus jadvallarda keltirilgan i' va V ning qiymatlaridan foydalanib hisoblanadi.

Diagrammadagi «d» nuqta P bosim ostidagi quruq to'yingan suv bug'ining holatiga mos keluvchi *bug' hosil bo'lish issiqligi nuqtasidir*. Termodinamikaning birinchi qonunini diagrammadagi $b - d$ nuqtalar oralig'ida sodir bo'layotgan jarayonga tatbiq etib, to'yingan suv bug'i bosimi yoki to'yinish temperaturasi bilan tavsiflanishiga asosan jarayondagi issiqlik miqdori orqali *bug' hosil bo'lish issiqligini* quyidagicha yozish mumkin:

$$r = U'' - U' + P(V'' - V') = i'' - i'. \quad (208)$$

To'yingan suv bug'i chizig'idagi d nuqtadan yuqori va pastdagi suv bug'ining ichki energiyalari farqini hamda ishini mos ravishda, $\varphi = U'' - U'$ va $\psi = P(V'' - V')$ ko'rinishda belgilab, (208) ni qayta yozamiz:

$$r = \varphi + \psi, \quad (209)$$

bunda φ — bug' hosil bo'lishning ichki issiqligi bo'lib, uning ta'sirida ichki energiyaning potentsial qismi ortadi;

ψ — bug' hosil bo'lishining tashqi issiqligi bo'lib, uning qiymati tashqi bosimga qarshi bajarilgan ish qiymatiga teng.

Yuqoridagi (208) va (209) hamda entalpiya formulasidan foydalanib d nuqtadan pastda joylashgan suv bug'ining entalpiyasi va ichki energiyasini quyidagicha yozish mumkin, ya'ni

$$i'' = i' + r, \quad (210)$$

$$U'' = U' + \varphi, \quad (211)$$

$$U'' = i' - PV'', \quad (212)$$

Suv bug'ining to'yinish sohasidagi V'', i'', r, i', V' qiymatlari maxsus jadvallarda keltiriladi. Ulardan foydalanib suv bug'ining parametrlari hisoblanadi.

Diagrammadagi «c» nuqta. Bu nuqta suvning nam bug' holatiga mos keluvchi nuqta hisoblanadi. Suyuqlikning erkin sirti ustidagi bo'shliqni to'yintiradigan bug' *nam bug'* deyiladi. Nam bug' tugallanmagan bug' hosil bo'lish jarayonida paydo bo'ladigan muayyan bosim ostida qaynayotgan suv bilan quruq to'yingan bug'ning mexanik aralashmasi hisoblanadi. Shuning uchun 1 kg nam bug'da x kg quruq bug' va $(1 - x)$ kg qaynayotgan suv bo'ladi. Unda, hosil bo'layotgan 1 kg nam bug' $x + (1 - x)$ kg ga teng bo'ladi.

Bunda x kattalik to'yingan nam bug'ning asosiy parametrlaridan biri bo'lib, uni *namlik miqdori* yoki *bug'ning quruqlik darajasi*, $(1 - x)$ ni esa *nam bug'ning namligi* deyiladi. Bu ikkita kattaliklar miqdori foizlarda yoki massa ulushlarida ifodalanadi.

Nam bug' holatini uning bosimi yoki shu bosim ostidagi to'yinish temperaturasi va nam bug'ning namligi orqali tavsiflash mumkin. Nam bug'ning solishtirma hajmi V_x ni aniqlashda quyidagicha tenglama tuzib, undan aniqlanadi:

$$V_x = xV'' + (1 - x)V', \quad (213)$$

bunda x — nam bug' hajmidagi quruq bug' massasi, kg;
 $(1 - x)$ — qaynayotgan suv massasi, kg.

Quruq bug' asosiy hajmini to'ldirganda uning zichligi hamda bosimi ortib boradi. Bunday holatlarda, ya'ni $x \geq 0,5$ bo'lganda

keltirilgan (213) formulaning ikkinchi hadi juda kichik bo'lgani uchun uni e'tiborga olmasa ham bo'ladi. Unda, (213) ni qayta yozamiz:

$$V_1 \approx xV'' \quad (214)$$

Demak, nam bug' tarkibidagi quruq bug'ning birlik massasi zichligini quyidagicha ifodalash mumkin, ya'ni

$$\rho_x = \frac{1}{V''} \quad (215)$$

Nam bug'ning quruqlik darajasi, ya'ni namlik miqdorini topish uchun (213) formulaning ikkala hadlaridan V' ni ayirib, ayrim soddalashtirishlardan so'ng quyidagi hosil qilinadi:

$$x = \frac{V_x - V'}{V'' - V'} \quad (216)$$

Suv bug'ining PV diagrammasidagi kesmalar nisbatlaridan foydalanib suv bug'ining quruqlik darajasi va nam bug'ning namligini topish mumkin, ya'ni

$$x = \frac{bc}{bd} \quad (217)$$

$$1 - x = 1 - \frac{bc}{bd} = \frac{cd}{bd} \quad (218)$$

$x = 1,0$ va $x = 0$ nuqta suv bug'ining yuqori va quyi chegaraviy egri chizig'i deyiladi. Bu chegaraviy egri chizig'i oralig'ida bug'ning parametrlarini qoniqtiruvchi ayrim qiymatlar yotadi. Masalan, $x = 0,8$ yoki $x = 0,9$ suv bug'i tarkibidagi quruq bug' miqdorini ifodalaydi.

Suv bug'ining ichki energiyasi yoki entropiyasini yuqoridagilar asosida yozish mumkin, ya'ni

$$i_x = xi'' + (1-x)i' \quad (219)$$

$$U_x = xU'' + (1-x)U' \quad (220)$$

(219—220) larga muvofiq nam bug'ning entalpiyasi va ichki energiyasini hisoblash uchun quyidagi ifodalardan foydalanish mumkin:

$$i_x = U_x + PV_x \text{ va } U_x = i_x - PV_x \quad (221)$$

Yuqorida keltirilgan formulalardagi termodinamik parametrlarning qiymatlari suv bug'ining maxsus jadvallarida berilgan bo'ladi. Muhandislik amaliyotida shu jadvallardan foydalaniladi.

Diagrammadagi «e» nuqta. Bu nuqta P bosim va T temperaturali suv bug'ining o'ta qizdirilgan sohasida yotadi. Suv bug'ining bu holati o'zaro bog'lanmagan parametrlar bosim va temperatura bilan aniqlanadi. O'ta qizdirilgan suv bug'ini hosil qilish oson bo'lmasa-da, ular asosan bug' qozonlarining tutun yo'llarida joylashgan ilonizisimon bug' qizdirgichlarida tayyorlanadi va so'ngra iste'molchilarga uzatiladi.

Suv bug'i tashqaridan ma'lum miqdordagi issiqlik miqdorini olgandan so'ng uning zichligi kamayadi, temperaturasi, solishtirma hajmi va entalpiyasi ortadi. Demak, suv bug'ining termodinamik parametrlari o'zgaradi.

Suv bug'iga uzatilgan issiqlik miqdorini uning parametrlari orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$q = U - U'' + P(V - V'') = i - i''. \quad (222)$$

Entalpiya va ish ifodalaridan foydalanib, o'ta qizdirilgan bug' uchun ichki energiyani quyidagicha yozish mumkin:

$$U = i - PV. \quad (223)$$

Nazorat savollari



1. Bug'lanish deb nimaga aytiladi? Nima uchun va qanday holatlarda suyuqliklar bug'lanadi? Suyuqlikning bug'lanishi temperatura va bosimga bog'liqmi?
2. To'yingan va nam bug' deb qanday bug'ga aytiladi va ular qanday hosil qilinadi hamda qayerlarda qo'llaniladi?
3. Suyuqlikning qaynashi deb qanday hodisaga aytiladi va u qanday termodinamik parametrlarga bog'liq?
4. Suv va uning bug'ini zichligi, bosimi, solishtirma bug' hosil bo'lish issiqligi qanday kattaliklarga bog'liq?
5. Suv bug'ining PV diagrammasi qanday quriladi va unda joylashgan nuqtalar qanday nomlanadi?
6. Suv bug'ining kritik bosim va hajmlari qanday qiymatlarni qabul qiladi va ularning ma'nosini tushuntiring.
7. Suv bug'i uchun termodinamikaning birinchi qonunini hajm, bosim, ichki energiya, issiqlik sig'imi, entalpiya va entropiyalar uchun yozing.
8. Nam bug'ning quruqlik darajasi nima va u qanday formula bilan aniqlanadi?
9. Suv bug'i qayerlarda hosil qilinadi va qo'llaniladi?

V BOB. GAZLAR OQIMI. GAZNING SOPLO VA DIFFUZORDAN OQIB CHIQISHI

Gaz oqimini hosil qilishda turli xil issiqlik apparatlari va moslamalaridan foydalaniladi. Issiqlik mashinalarining ishlashi albatta gaz oqimi harakati bilan uzviy bog'langan. Gaz oqimining oqib kirish va chiqish hodisasi qonuniyatlari hamma turdagi issiqlik mashinalarida o'z tatbiqini topgan. Bunga ichki yonuv dvigatelida yangi ish aralashmasining yonish kamerasiga so'rilishi va yonish mahsulotining siqib chiqarilishi misol bo'la oladi. Bunday holat kompressorlar, gaz va bug' turbinalari, reaktiv dvigatellarda ko'p uchraydi. Bu mashinalarning yonish kamerasi, issiqlik almashinuvi asboblari, diffuzor, ejektorlar kabi qurilmalarda gazning oqib kirish va chiqish hodisasi keng qo'llaniladi.

5.1. Gaz oqimining termodinamik parametrlari

Gaz oqimining holati uning termodinamik parametrlari yordamida tavsiflanadi. Oqim parametrlari deyilganda: gaz oqimining bosimi, temperaturasi, solishtirma hajmi (yoki zichligi) va oqim tezligi tushuniladi.

Oqimdagi zarralar har xil tezlikda va turli xil harakat turlarida qatnashadi. Oqim o'z yo'lida har xil o'lcham va geometrik shakldagi tabiiy va sun'iy to'siqlar bilan to'qnashadi. Natijada oqimning birlik massasiga to'g'ri keladigan kinetik energiyasi o'zgaradi. Kuchli to'siq bilan oqim yo'li to'silganida uning tezligi nolgacha pasayadi. Shunda oqimning kinetik energiyasi uning ichki energiyasiga aylanadi, ya'ni gaz oqimi isiydi. Aynan shu vaqtda gaz oqimining temperaturasi va entalpiyasi ortadi. Unda, oqim bosimi va zichligi ham kattalashadi. Gaz oqimining yo'li to'sib tormozlanganidagi gaz parametrlari *tormozlangan oqim parametrlari* deb yuritiladi. Bu parametrlar orqali gaz oqimi entalpiyasining o'zgarishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$i' = i + \frac{m\vartheta^2}{2}, \quad (224)$$

bunda i' va i — gaz oqimi tormozlangandan keyingi va ungacha bo'lgan oqim entalpiyalari;

$$\frac{m\vartheta^2}{2} = \frac{\vartheta^2}{2} — \text{gaz oqimidagi birlik massaning kinetik energiyasi } (m=1 \text{ kg}).$$

Entalpiya o'zgaruvchanligi oqim kinetik energiyasiga tengligi, oqimdagi gazning solishtirma issiqlik sig'imi c_p va temperaturasi T ga bog'liqligi asosida (224) tenglikni quyidagicha yozish mumkin:

$$c_p T' = c_p T + \frac{\partial^2}{2}, \quad (225)$$

bundan gaz oqimining oxirgi entalpiyasiga mos keluvchi temperaturasini topish mumkin, ya'ni

$$T' = T + \frac{\partial^2}{2c_p}. \quad (226)$$

Oqim harakati tufayli gaz kinetik energiyasining o'zgarishi tashqaridan issiqlik olmasdan sodir bo'lganligi sababli jarayonni adiabatik deb hisoblanadi. Unda gaz oqimining oxirgi holatidagi bosimi, zichligi va solishtirma hajmini adiabatik jarayon uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$P' = P \left(\frac{T'}{T} \right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad \rho' = \rho \left(\frac{T'}{T} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad \text{va} \quad V' = V \left(\frac{T'}{T} \right)^{\frac{1}{k-1}}. \quad (227)$$

Demak, gaz oqimi tezligi o'zgarishi bilan uning parametrlaridan bosim, temperatura va zichlik kamaysa-da, solishtirma hajmi ortadi. Bunga asosiy sabab gaz oqimi zarralari orasidagi masofa kattalashganligi uchun ularning o'zaro ta'sirlashishining kamayishidir. Bunday oqimning istalgan kesimidagi bosim, temperatura va zichlik o'zgarishi kuzatilsa-da, entalpiyasining o'zgaruvchanligi bir xil saqlanadi. Entalpiya o'zgaruvchanligi oqimning kinetik energiyasiga teng bo'lganligi uchun ham shu o'rganilayotgan kesimlarda kinetik energiya o'zgarmas bo'ladi. Bu parametrlarni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin bo'ladi, ya'ni

$$\begin{aligned} T'_1 = T'_2 = \dots = T'_n = idem; \quad P'_1 = P'_2 = \dots = P'_n = idem; \\ \rho'_1 = \rho'_2 = \dots = \rho'_n = idem; \quad i'_1 = i'_2 = \dots = i'_n = idem \quad \text{va} \\ E'_{k1} = E'_{k2} = \dots = E'_{kn} = idem. \end{aligned} \quad (228)$$

Turg'un (statsionar) oqim kesimidagi gaz parametrlari vaqtga bog'liq bo'lmaydi va oqimning uzluksizligi xuddi suyuqlikniki kabi bo'ladi. Shunda oqimning istalgan kesimidagi massa sarfi o'zgarmas

bo'lib qoladi. Gaz oqimidagi massa sarfi gaz oqimi zichligi ρ , oqim tezligi ϑ va oqimning ko'ndalang kesimi S ga bog'liq bo'ladi, ya'ni

$$G = \vartheta \rho S = \vartheta S / V = \text{const}, \quad (229)$$

bunda $m=1$.

5.2. Gaz oqimi uchun termodinamikaning birinchi qonuni

Gaz oqimi atrof-muhit bilan issiqlik va mexanik energiya almashibgina qolmasdan, massa ham almashadi deb qabul qilamiz va shu asosida gaz oqimi uchun termodinamikaning birinchi qonunini qarab chiqamiz.

Faraz qilaylik, tabiiy gaz oqimi berilgan bo'lib, u yuqori bosimli sohadan past bosimli sohaga oqib o'tayotgan bo'lsin. Bu oqimning boshlang'ich tor kesimidan va keng kesimli chiqish qismidan ixtiyoriy kesimlarni ajratib olib, ularni $I-I'$ va $II-II'$ deb belgilaymiz (5.1-rasm). Ma'lumki, gaz oqimi bu ajratilgan sohalar oralig'ida bosimlar farqi hisobiga gazning uzluksiz oqimi harakatga keladi. Unda, bu $I-I'$ va $II-II'$ kesimlar oralig'idagi hajmni to'ldirgan gazning Δm massasi biror Δt vaqt davomida, uzluksizlik qonuniga muvofiq, tashqi bosim kuchi ta'sirida I' dan II' gacha siljib ko'chadi. Shunda ajratilgan $I-I'$ va $II-II'$ kesimlarga ta'sir qiluvchi bosim kuchlari $F_1 = P_1 S_1$ va $F_2 = P_2 S_2$ gazni harakatga keltirish vaqti Δt da muayyan ish bajaradi. Bu ishlarning kattaligini quyidagicha ifodalash mumkin, ya'ni

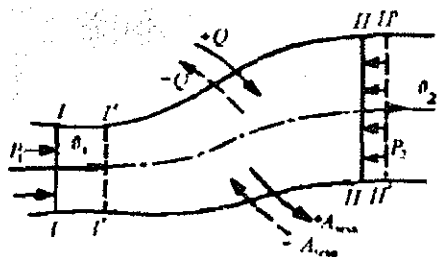
$$P_1 S_1 \vartheta_1 \Delta t = P_1 \Delta V_1 = P_1 V_1 \Delta m, \quad (230)$$

$$-P_2 S_2 \vartheta_2 \Delta t = -P_2 \Delta V_2 = -P_2 V_2 \Delta m, \quad (231)$$

bunda ΔV_1 va ΔV_2 — ajratilgan $I-I'$ va $II-II'$ kesimlardagi gaz oqimi hajmlari.

Bu kesimlardagi gaz albatta bosim kuchlari ta'sirida I kesimdan II kesimga ko'chadi. Bu ko'chish jarayonida gaz massasini itarib ko'chiruvchi kuchga teng ish bajariladi. Gazni itarib ko'chirishda bajarilgan ishni quyidagicha ifodalash mumkin, ya'ni

$$\Delta A_{it} = (P_1 V_1 - P_2 V_2) \Delta m. \quad (232)$$



5.1-rasm. O'zgaruvchan kesimli quvurda gaz oqimining harakati.

Demak, gaz oqimining muayyan kesimlari oralig'idagi hajmchani to'ldirgan gaz massasini ko'chirishda bosim kuchlari ish bajarar ekan. Ish bajarilishi uchun ma'lum miqdordagi energiya sarf bo'lishi kerak. Gaz oqimi ish bajarishi uchun kesimlar oralig'idagi oqim harakati tufayli uning

ichki va kinetik energiyalari o'zgaradi. Kesim o'zgarib borsa-da, kesimlar oralig'ini to'ldirgan gaz massasi o'zgarmaganligi bois, muvozanatli oqimda faqat massalar energiyalari farqi paydo bo'ladi. I—I' va II—II' kesimlarning kirishi va chiqishida energiyalar farqi paydo bo'lishi hisobiga ish bajariladi. Bu energiyalar o'zgarishlarini quyidagicha yozish mumkin:

$$\Delta W = (U_2 - U_1)\Delta m \quad \text{va} \quad \left[\frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{2} \right] \Delta m = \Delta E_k \quad (233)$$

Gaz oqimi tashqi muhit bilan energiya va massa almashinuvi natijasida, issiqlik miqdori kiritilganida yoki chiqarilganida uning parametrlari o'zgarishi hisobiga muayyan miqdordagi texnikaviy ish bajariladi. Masalan, gaz oqimiga kiritilgan issiqlik hisobiga uning termodinamik parametrlaridan bosimi, solishtirma hajmi va sh.k. o'zgaradi. Bunday o'zgarishlar bug' va gaz turbinolari kirishi va chiqishida sodir bo'ladi va shu hisobiga turbina rotori aylanib texnikaviy ish bajaradi. Bu texnikaviy ish kattaligini termodinamikaning birinchi qonuni asosida quyidagicha ifodalash mumkin:

$$Q + (P_1 V_1 - P_2 V_2)\Delta m = (U_2 - U_1)\Delta m + \frac{(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{2} \Delta m + A_{\text{texn}}. \quad (234)$$

Tenglama (234)ni soddalashtirish maqsadida uni Δm ga bo'lamiz va undan 1 kg gaz massasiga mos keluvchi issiqlik miqdorini topamiz:

$$q = (U_2 - U_1) + (P_2 V_2 - P_1 V_1) + \frac{(\sigma_2^2 - \sigma_1^2)}{2} + A_{\text{texn}}. \quad (235)$$

Gaz oqimi entalpiyasi o'zgaruvchanligi $i = U + PV$ tengligi asosida (235) ni qayta yozamiz:

$$q = (i_2 - i_1) + \frac{(\theta_2^2 - \theta_1^2)}{2} + A_{\text{texn}}. \quad (236)$$

(236) tenglama gaz oqimi uchun termodinamikaning birinchi qonuni bo'lib, uni quyidagicha ta'riflash mumkin: *gaz oqimiga keltirilgan issiqlik miqdori gaz entalpiyasi va kinetik energiyasining o'zgarishiga hamda texnikaviy ishga sarflanadi.*

Demak, real gaz oqimidagi elementar ΔV hajmdagi gaz massasiga uzatilgan Δq issiqlik miqdori uning entalpiyasi va kinetik energiyasining ortishiga sarflanadi. Kinetik energiyani o'zgarishi hisobiga gaz oqimining umumiy impulsi (ta'sir kuchi) ortishi natijasida gaz va bug' turbinalari hamda reaktiv dvigatellarda mexanikaviy ish bajariladi. Gazning oqib o'tishi va chiqishi issiqlik almashinuvisiz, ya'ni adiabatik bo'lsa, unda kinetik energiyani o'zgarishi gaz oqimining ikkita ixtiyoriy chekka nuqtalaridagi zarralar entalpiyasini kamayishiga sarflanadi, ya'ni

$$\frac{\theta_2^2}{2} - \frac{\theta_1^2}{2} = i_1 - i_2. \quad (237)$$

Gaz oqimi entalpiyasining orttirishini kattalashtirish, ya'ni gazning ish bajara olish imkoniyatini oshirish maqsadida soplosimon (yoki boshqa turdagi) quvurlar ishlatiladi. Shuning uchun gaz va bug' turbinalarining uzatuvchi quvurlari va reaktiv dvigatellarning soplolari maxsus geometrik shaklda yasaladi, natijada bug' turbinasi rotorining burovchi momenti va reaktiv dvigatellar soplosidan chiqadigan oqim impulsi ortadi. Shu hisobiga texnikaviy ish A_{texn} kattalashadi va uni e'tiborga olsak, gaz oqimi entalpiyasi orttirishini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned} i_1 - i_2 &= A_{\text{texn}} + \left(\frac{\theta_2^2 - \theta_1^2}{2} \right) \\ \Delta i &= A_{\text{texn}} + \Delta \left(\frac{\theta^2}{2} \right) \end{aligned} \quad (238)$$

Demak, real gaz soplosimon quvurdan oqib o'tishi va chiqishida gaz oqimining entalpiyasi o'zgarar ekan. Bu entalpiya o'zgarishining kattaligi gazni bajargan mexanik (texnik) ishi bilan oqim kinetik energiyasining o'zgarishi yig'indisiga teng bo'lar ekan.

Yuqoridagi xulosalar asosida muhandislik va tadqiqot ishlari amalga oshiriladi.

5.3. Soplo va diffuzordan gazning oqib chiqishi

Oqim tezligini orttirishga va bosimini pasaytirishga mo'ljallangan o'zgaruvchan kesimli kalta quvur *soplo* deyiladi. Oqim tezligini kamaytirish va bosimini oshirishga mo'ljallangan kalta quvur *diffuzor* deyiladi. Soplo va diffuzor texnikaning turli sohalarida (masalan, reaktiv dvigatellar, bug' va gaz turbinalari, aerodinamik qurilmalar, magnitogidrodinamik generator, o'lchov asboblari) keng qo'llaniladi.

Gazning soplosimon quvurdan oqib o'tish qonuniyatini o'rganish muhim nazariy va amaliy ahamiyatga ega. Chunki, gaz turbinalari va reaktiv dvigatellar soplolaridan yoki o'zgaruvchan kesimli quvurlardan gazning oqib o'tishi va chiqishini o'rganmasdan turib ayrim uchish va statsionar apparatlarni yaratib bo'lmaydi. Gazning oqib o'tishi va chiqishini o'rganishda ko'pchilik holatlarda:

a) soploning old qismidagi gaz parametrlari o'zgarmas;

b) qolgan holatlarda parametrlar vaqtga bog'liq (ya'ni vaqt funksiyasi) deb olinadi. Bu ikki holat ($P = \text{const}$, $V = \text{const}$, $T = \text{const}$ va $\vartheta \neq \text{const}$)larni cheklanmagan ($V = \infty$) hamda cheklangan ($V = \text{const}$) hajmlardan gazning oqib o'tish va chiqish jarayoni uchun ko'rib chiqamiz.

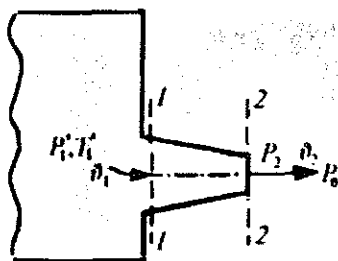
Gaz oqimi *barqaror*, *nobarqaror*, *bir* va *ikki o'lchovli* bo'lishi mumkin. Oqimning istalgan kesimidagi gaz parametrlari va uning massa miqdori o'zgarmas hamda vaqtga bog'liq bo'lmagan oqim *barqaror oqim* deyiladi. Barqaror oqimning parametri faqat soplosimon quvur uzunligi bo'ylab o'zgarishi mumkin bo'lganligi uchun *bir o'lchovli* deb olinadi. Amalda real gaz oqimining tezligi soplosimon quvurning har xil kesimlarida turlicha bo'lib, oqim o'qidan quvur devorigacha, ya'ni ko'ndalang kesim radiusi bo'ylab o'zgaradi. Shuning uchun real gaz oqimi *ikki o'lchovli* bo'la oladi. Ikki o'lchovli real gazni termodinamik qonunlar asosida tadqiq etishda o'zgaruvchi parametrlarning o'rtacha qiymatidan foydalaniladi.

Demak, bir o'lchovli oqimdagi noma'lum bog'lanishni funksiya, ya'ni $P=f(x)$, $\rho=f(x)$ va sh.k. ko'rinishda ifodalash mumkin. Oqim yo'nalishi x o'qiga mos tushadi. Unda, biror aniq soplosimon

quvur uchun x koordinatasiga va bosha parametrlarga bog'liq bo'lgan oqim tezligi ϑ tanlanadi.

Nobarqaror oqimdagi gaz parametrlari o'zgaruvchan bo'lib, uni o'rganish ancha murakkab hisoblanadi.

O'zgaruvchan diametrli quvur bo'ylab gaz oqimi harakatlanish davrida o'z tezligini o'zgartirib boradi. Natijada oqim tovush tezligigacha, tovush tezligida va tovush tezligidan katta tezliklarda harakatlanishi mumkin. Bunday holat soplo va diffurorda kuzatiladi.



5.2-rasm. Katta hajmli idishdan gazning soplo orqali oqib chiqishi.

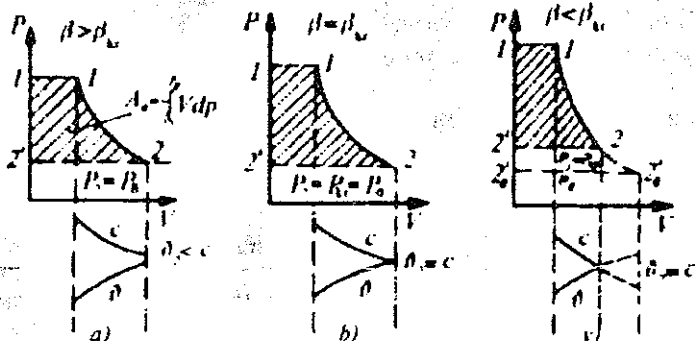
Faraz qilaylik, katta hajmli idishga ulangan soplo orqali gaz adiabatik holatda oqib chiqayotgan bo'lsin (5.2-rasm). Katta hajmli idishdagi bosimning o'zgarishi sezilsiz deb olinadi. Undagi va soploning chiqishidagi shuningdek, tashqi muhit parametrlari, mos ravishda, $P_1, V_1, T_1, \rho_1, \vartheta_1$ va $P_2, V_2, T_2, \rho_2, \vartheta_2$ hamda $P_0, V_0, T_0, \rho_0, \vartheta_0$ bo'lsin. Tashqi muhit bosimi P_0 ning idish ichidagi bosimga nisbatini $\beta = P_0/P_1$ deb belgilab, bu bog'lanishdan quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin:

$\beta < \beta_{kr}$ — kritik holatgacha, $\beta = \beta_{kr}$ — kritik holatda va $\beta > \beta_{kr}$ — kritik holatdan o'ta yuqori bo'lganda gaz oqib chiqadi.

Gaz oqimi parametrlari orasida quyidagi bog'lanishlar mavjud:

a) gazning kritik holatgacha bo'lgan tezliklarida soplodan oqib chiqayotgan gaz to'la kengayib ulguradi va uning bosimi P_1 dan P_0 gacha pasayadi. Bosim gaz oqimining yo'nalish o'qi bo'ylab soplo kesimida $P_2 = P_0$ bo'lganligi uchun oqim tezligi tovush tezligidan kichik bo'ladi (5.3-rasm, a). Soplodan gazning oqib chiqish jarayoning PV diagrammasidagi $1'122'1'$ nuqtalar bilan chegaralangan sohada ish oqimining kinetik energiyasini o'zgarishiga sarf bo'ladi;

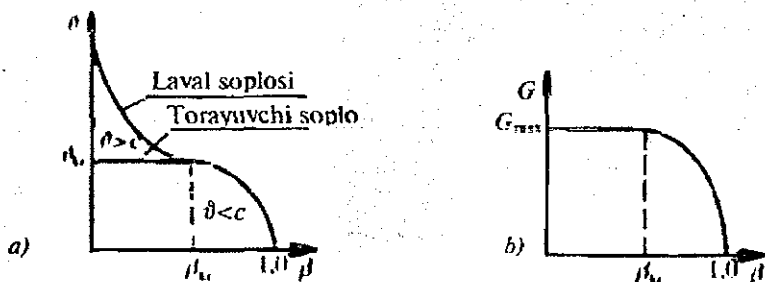
b) gaz kritik holatdagi tezlikda soplodan oqib chiqishida soplo uzunligi bo'ylab to'la kengayadi va uning bosimi $P_2 = P_{kr} = P_1 \beta_{kr} = P_0$ gacha tushadi. Oqimning soplodan chiqishdagi tezligi tovushning kritik tezligiga teng bo'ladi (5.3-rasm, b). Gazning soplodan oqib chiqish jarayonini PV diagrammasidan ko'rinadiki, $1'122'1'$ nuqtalar bilan chegaralangan sohada oqimning kinetik energiyasi o'zgarishiga sarf bo'ladi;



5.3-rasm. Gaz oqimining soplodan oqib chiqish jarayonining PV diagrammasi va tovush hamda gaz oqimining oqib chiqish tezliklarining o'zgarish grafiklari.

v) gaz kritik holatdan yuqori ish tartibidagi tezliklarda soplodan oqib chiqqanida soplo uzunligi bo'ylab to'la kengayishga ulgurmaydi va uning bosimi kritik bosimgacha pasayadi, xolos. Gaz oqimining yo'nalish o'qi bo'ylab soplo kesimidagi bosimi $P_2 = P_k = P_1 \beta_{kr} > P_n$ bo'lganligi uchun oqim tezligi tovushning kritik tezligiga teng bo'ladi (5.3-rasm, v). Oqim kengayishi natijasida bosimning P gacha tushishi soplodan tashqarida ham davom etadi.

Jarayonning PV diagrammasidagi $1'12_02'1'$ nuqtalar bilan chegaralangan sohada to'la ishning faqat $1'12_02'1'$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng qismigina oqim kinetik energiyasi o'zgarishiga sarf bo'ladi. Uning qolgan $2'2_02_02'$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'lgan ishi soplarda foydalanilmasdan qoladi.



5.4-rasm. Gazning oqib chiqish tezligi (a) va sarfining (b) torayuvchi va de-Laval soplosidagi bosimlar nisbatini $\beta = P/P_1$ ga bog'liq holda o'zgarish grafiklari.

Yuqorida ko'rib chiqilgan uchta holatlarda gazning soplodan oqib chiqishi gaz parametrlari orasidagi bog'lanishni ifodalabgina qolmasdan, soploning tuzilishiga ham bog'liqligini tushuntirishga yordam beradi.

Dastlab, tajribada A. Sen-Venan (1839 y.) bu qonuniyatlarni o'rganib ayrim natijalarni bergan (5.5-rasm).

Demak, kesim yuzi avval eng kichik kesimgacha torayib boradigan va so'ngra kengayadigan, o'zgaruvchan kesimli kalta quvur De-Laval soplosi deyiladi.

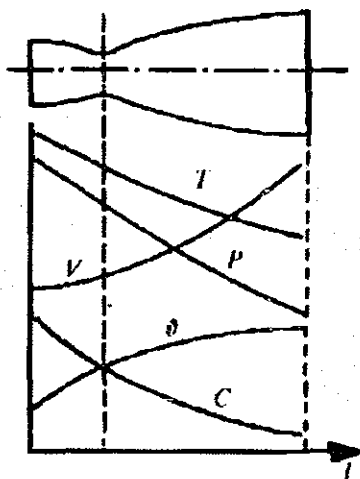
Birinchi marta shved muhandisi K. G. Laval (1845—1913) XIX asrning 80-yillarida soplo nazariyasini o'rgangan va uni amalda bug'ning tovushdan katta tezliklarini olisha g'o'llagan. De-Laval soplosi bilan tanishib chiqamiz.

Faraz qilaylik, gaz oqimining asosiy parametrlari (P, ρ, V, T, θ) ni $S_{\min}$ kesimidagi qiymatlari kritik ($P_{kr}, \rho_{kr}, V_{kr}, T_{kr}, \theta_{kr}$) bo'lsin (5.5-rasm).

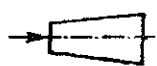
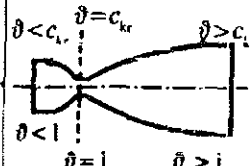
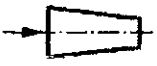
Gaz oqimining torayib boruvchi yoki bir xil kesimli quvurlaridan tovush tezligidan past va undan o'ta yuqori tezlikkacha oqib o'tishini tashqi ta'sirlarsiz amalga oshirish mumkin emas. Chunki bunday quvur uchun gaz oqimining oqib chiqishidagi tezligi tovush tezligidan yuqori bo'la olmaydi.

Gaz oqimi tovush tezligidan yuqori tezlikka faqat Laval soplosida erisha oladi. Shu sababli oddiy soplolarda gaz oqimining bosimi P_{kr} kritik qiymatdan past bo'lishi mumkin emas. Tezlikning ortishi va bosimning P_{kr} dan past bo'lishi gaz oqimi bilan ishlaydigan apparatni tezda ishdan chiqaradi. Turli tartibda ishlovchi soplo va diffuzorlar 5.6-rasmida keltirilgan.

Amalda gaz oqimining tezligini tovush tezligidan o'ta yuqori tezlikkacha oshirish uchun De-Laval soplosi qo'llanilsa, aksincha holatda, ya'ni tovush tezligidan yuqori bo'lgan tezlikdan tovushdan past tezlikkacha pasaytirishda maxsus diffuzorlar ishlatiladi.



5.5-rasm. De-Laval soplosining uzunligi bo'ylab gaz oqimi parametrlarining o'zgarishi.

	Soplo $d\vartheta > 0; dp < 0$ $dT > 0; dV < 0$	Diffuzor $d\vartheta < 0; dp > 0$ $dT < 0; dV > 0$	Laval soplosi
$\vartheta > c_{kr}$ ($\vartheta < 1$)			
$\vartheta > c_{kr}$ ($\vartheta > 1$)			

5.6-rasm. Gazning turli xil ish tartibidagi harakatiga mos keluvchi soplo va diffuzorlar sxemasi.

Bunday o'zgaruvchan kesimli kalta quvur *o'ta yuqori tovushdan tez diffuzor* deyiladi.

Soploda imkoniyati bo'lgan to'la ishdan maksimal foydalanish mumkinligini K. G. Laval isbotlagan. Bunda gaz oqimining bosimi soplodan chiqishda tashqi muhit bosimigacha pasayadi. Soploning bo'yin qismidagi bosim kritik bosimga va oqim tezligi esa tovush tezligiga tenglashadi, ya'ni $\vartheta_{kr} = c_{kr}$. Soplo kesimida $P_2 = P_0$ va oqim tezligi tovush tezligidan katta bo'ladi, ya'ni $\vartheta_2 > c_2$.

De-Laval soplosi uzunligi bo'ylab gaz oqimi parametrlarining o'zgarishi 5.5-rasmda tasvirlangan. Soploning tor bo'yinchasidagi gaz oqimining tezligi quyidagi ifodadan foydalanib hisoblanadi:

$$\vartheta_{kr} = c_{kr} = \sqrt{\frac{2k}{k+1}} RT_1', \quad (239)$$

bunda k — adiabata ko'rsatkichi; T_1' — katta hajm (yonish kamerasi) dagi gaz temperaturasi; R — gaz doimiysi.

Avstriya fizigi (filosof-idealist) Ernst Maks o'z izlanishlari natijasida gaz oqimi tezligi bilan tovush tezligi orasidagi bog'lanishni o'rgangan.

Gaz oqimi tezligining tovush tezligiga nisbati *Max soni* deyiladi va uni *Max* deb belgilanadi, ya'ni

$$\vartheta/\omega = \text{Max}, \quad (240)$$

Max sonining fizik ma'nosi — harakatdagi gaz oqimining siqilishiga ta'sir o'lchovini ifodalaydi.

Gaz oqimi amalda tovush tezligigacha, unga teng va undan katta tezliklarda harakatlanadi. Shu holatlar uchun Max sonini qo'llab undan quyidagi xulosalarni chiqarish mumkin:

$M \ll 1$ siqilmaydigan gaz; $M < 1$ — tovush tezligigacha tezlikda harakatlanadigan gaz; $M > 1$ — tovush tezligidan katta tezlikda harakatlanadigan gaz oqimlari bo'lishi mumkin.

Demak, gaz soplosimon quvurdan oqib o'tishi yoki chiqishida o'z tezligini o'zgartiradi, ya'ni tezlanish bilan harakatlanishi mumkin ekan. Unda gaz tezligining o'zgarishi musbat va bosimning o'zgarishi esa manfiy tomonga ortib boradi. Bunday holatda Max soni $1 < M > 1$ shartni qanoatlantirishi mumkin:

1) $M < 1$, ya'ni gaz oqimining tezligi tovush tezligidan kichik bo'lganida, Δs ishorasi manfiy va oqim kesimining yuzi S tezlikni ortishi va bosimni kamayishi yo'nalishi bo'ylab kichrayib *konfuzor* shakliga kiradi;

2) $M = 1$, ya'ni oqim kesimi va tezligi o'zgarmaydi;

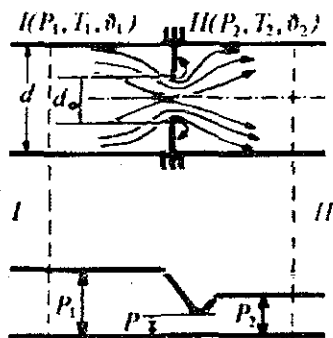
3) $M > 1$, ya'ni gaz oqimining tezligi tovush tezligidan katta bo'lganida, oqim kesimining yuzi S oqim tezligining ortishi va bosimning uzluksiz kamayib borishi yo'nalishida kattalashib boradi. Bunday holat faqat gaz oqimining tezligi tovush tezligidan past va undan o'ta yuqori tezliklarda, ya'ni kesimi o'zgaruvchan murakkab quvurda harakatlanganida kuzatiladi.

$M < 1$, $M = 1$ va $M > 1$ shartlari o'rinli bo'lishi uchun quvur kesimining yuzi ma'lum uzunlikkacha torayib, so'ngra asta-sekin kengayib borishi lozim. Shunda kesimlarning o'zaro munosabati quyidagi shartni qanoatlantiradi, ya'ni $S_1 > S_{\min} < S_2$.

Bunday ($M > 1$, $M = 1$ va $M < 1$) shart uchish apparatlarining diffuzorlarida bajariladi. Demak, tovushdan yuqori tezlikdan past tezlikkacha tushishda gaz oqimining ko'ndalang kesimini yuzi avval torayadi, so'ngra kengayadi. Uchish apparatlarida bunday jarayonni amalga oshirish uchun soplolar kesimining yuzi o'zgaruvchan (murakkab) qilib tayyorlanadi. Ular uchishda qo'lda yoki avtomatik boshqaruv sistemalari orqali o'zgartiriladi.

5.4. Gazning drossellanishi

Drossel (nem. Drossel — *rostlagich*) — bu gaz, bug' yoki suyuqlik oqimini rostlovchi qurilma. Drosselning gidravlik, pnevmatik yoki elektr turlari bor. Konstruksiya jihatidan quvur o'qiga o'rnatilgan disk bo'lib, tashqi kuch (uzatma) ta'sirida oqim



5.7-rasm. Diafragmali quvurda gaz oqimining drossellanishi.

kesimi o'zgartiriladi. Drossel o'rtasi teshik (shayba shaklidagi) disk ham bo'lishi mumkin.

Maxsus mexanik, elektr yoki magnet maydoni ta'sirida oqim kesimini o'zgartirib, gaz, bug', suyuqlikni tor teshikdan adiabatik o'tishida uning bosimini kamayish hodisasi *drossellash* deyiladi.

Oqimning drosselgacha va undan o'tgandan keyingi kesimlari *I—I* va *II—II* deb belgilansa, unda shu oqim parametrlarini aniqlash mumkin bo'ladi. Lekin drossel diafragmasi

(yoki teshigi)gacha va undan o'ng va chap tomonlaridagi ma'lum masofada oqim parametrlari o'zgaraydi, deb faraz qilinadi. Diafragma (yoki teshik)ning o'ng va chap tomonlaridagi oqim parametrlari, mos ravishda, V_1, P_1, T_1 va V_2, P_2, T_2 deb hamda drossellanish jarayonini esa adiabatik, ya'ni issiqlik almashinuvisiz sodir bo'ladi, deb faraz qilinadi.

Unda, $\Delta m = \rho \Delta V$ massali gaz oqimining uzluksiz harakati vaqtida — drossellanishida bosimining pasayishi va issiqlik sarfi uzluksizlik tenglamasiga muvofiq (gaz oqimining kinetik energiyasi va entalpiyasi orqali) quyidagicha ifodalanadi:

$$-\Delta P = \rho v \Delta v = \rho \Delta \frac{v^2}{2},$$

$$\Delta q = \Delta i + \Delta \frac{v^2}{2}, \quad (241)$$

bunda Δq — gaz oqimining drossellanish jarayonidagi issiqlik miqdori; Δi — gaz oqimi entalpiyasining o'zgaruvchanligi; $\Delta \frac{v^2}{2}$ — gaz oqimining kinetik energiyasi.

Agar $\Delta q = 0$ bo'lsa, unda (241) ni qayta yozib, drossellanish jarayonidagi entalpiya o'zgaruvchanligi topiladi:

$$\Delta \frac{v^2}{2} = -\Delta i,$$

$$\frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} = i_1 - i_2.$$

Drossellanish jarayonida gaz oqimining tezligi $I—I$ va $II—II$ kesimlarda o'zgarishiga muvofiq kinetik energiya o'zgarishi nolga teng bo'ladi. Unda, drosselgacha va undan keyingi oqimlar entalpiyalari o'zaro teng bo'ladi, ya'ni

$$i_1 = i_2. \quad (242)$$

Demak, gaz, bug', suyuqliklar drossellanganida ularning entalpiyalari o'zgarmaydi ($i = \text{const}$).

Suyuqlik oqimining uzluksizligi tenglamasidan ma'lumki, oqim kesimi kichrayganida uning tezligi ortadi va aksincha. $P_x < P_1$ bo'lgani uchun diafragma (yoki teshik)da oqim tezligi ortadi, chunki $I—I$ oqim kesimi $II—II$ kesimga nisbatan katta, ya'ni $d_1 > d_0$ bo'ladi (chizmaga qarang).

Gaz oqimi diafragmadan o'tganidan keyin uning ϑ_1 tezligi ϑ_2 gacha kamayib boradi, chunki $d_0 < d_2 = d_1$. Nazariy jihatidan $P_1 = P_2$ teng bo'lishi kerak, lekin amalda $P_1 > P_2 > P_x$ bo'ladi. Buni quyidagicha tushuntirish mumkin: diafragmadan gaz oqimi o'tishidagi va undan keyingi kesimidagi kinetik energiyalari ayirmasining bir qismi gaz oqimi entalpiyasi o'zgarishiga (temperaturasini ortishiga) sarflanadi. Bu issiqlik miqdori juda kichik bo'lganligidan gaz zarralarining yuza birligiga bergan ta'sir kuchi sezilarsiz bo'lib qoladi. Natijada gaz oqimining diafragmadan keyingi bosimi $P_2 \leq P_1$ bo'ladi.

Demak, har doim gaz, bug', suyuqliklarning drossellanishida oqim bosimining pasayishi o'rinni bo'ladi. Shuning uchun $I—I$ va $II—II$ kesimida (5.7-rasm) sodir bo'lgan *drossellanish hodisasi qaytmas termodinamik jarayondir*.

5.5. Drossel effekti

Drossellanish jarayonida gaz (bug') oqimi temperaturasining o'zgarishini ingliz fiziklari Joule va Tomson (1852-y.) tajribada aniqlagan. Shuning uchun uni *Joule-Tomsonning drossel effekti* yoki *drossel effekti* deb yuritiladi. Drossel effekti mahalliy qarshiliklarni, ya'ni bug' oqib o'tadigan quvurga o'rnatilgan surilma qopqoq (zadviyka), ventil, kran (jo'mrak), diafragma, shayba, g'ovak to'siq, kapillyar nay va sh.k. larning qarshiligini yengib o'tishda bug' oqimining bosimi va temperaturasi texnikaviy ish bajarmasdan o'zgaradi. Bunda jarayon davomida bug' entropiyasi ortib boradi.



Tomson (Kelvin)
Vilyam

Drossel effekt ikki xil: *differensial* va *integral* ko'rinishda bo'ladi.

1) drossellanish jarayonida entalpiyasi o'zgarmaydigan gaz oqimi temperaturasi o'zgarish tezligi uning bosim o'zgarishiga bog'liqligi bilan tavsiflanadigan hodisaga *differensial drossel* effekti deb aytiladi: $a = (dT / dP)$.

Termodinamikaning birinchi va ikkinchi qonunlaridan foydalanib differensial drossel-effekt kattaligi aniqlanadi.

Drossellanish jarayonida bosim pasayadi, ya'ni drossel effektining ishorasi manfiy bo'ladi. Jarayonda bosimning o'zgina o'zgarishi ham drossel-effektni hosil qiladi, ya'ni $P + \Delta P$ o'rinli bo'lganida, drossel-effekt kuzatiladi.

Demak, *drossellanuvchi gaz jarayon davomida qizishi, sovishi va temperaturasi o'zgarmasdan qolishi mumkin.*



Joul Jeyms Preskott

Drossellanish jarayonidagi gaz oqimi drossel effektining ishorasi musbat, manfiy va nol, ya'ni gaz hajmi ortishi, kamayishi va o'zgarmas bo'lishi mumkin ekan.

Drossel-effekt gaz oqimining boshlang'ich T_1 va P_1 hamda c_p bilan P uzviy bog'langan. Gaz oqimi drossellansa, uning bosimi pasayadi, ya'ni $P_2 = -P$ bo'ladi.

Muayyan P_1 bosim uchun differensial drossel-effekt qiymatini muayyan P bosim uchun hisoblashda solishtirma hajm qiymatlari orqali temperaturalar topiladi:

$$T = (PV + a/V - ab/V^2 - bP) / R \quad (246)$$

So'ngra V va T qiymatlarini Van-der-Vaalsning keltirilgan tenglamasidan topib drossel-effekt hisoblanadi:

$$a_{11} = \frac{RT - PV + \frac{a}{V} - \frac{2ab}{V^2}}{c_p \left(P - \frac{a}{V^2} + \frac{2ab}{V^3} \right)} \quad (247)$$

Masalan, havoning drossellanish jarayonidagi differensial drossel effekti turli xil bosim ostidagi T_1 temperaturaga bog'liq. Havoning kritik parametrlar qiymatlari $T_{kr} = 132,46 K$, $P_{kr} = 3,7 MPa$, $c_p = 1015 J/kg \cdot K$ va gaz doimiysi $R = 287 J/kg \cdot K$ hamda Van-der-Vaals tenglamasidagi tuzatma koeffitsientlari $a = 164,78 N \cdot m^4/kg$ va $b = 1,28 \cdot 10^{-3} m^3/kg$ deb olinadi. (246) va (247) tenglamaga qo'yib, hisoblangan natijalar asosida havoning drossellanishidagi differensial drossel effekti temperaturaga bog'liqlik grafigi quriladi.

Demak, drossellanish jarayonida real gaz uchun muayyan temperatura mavjud bo'lib, gaz temperaturasi drosseldan oldin va undan gaz oqimi o'tgandan keyingi kesimlarda o'zgarmaydi.

2) Integral drossel effekti differensial drossel-effekt tenglamasidan foydalanib topiladi:

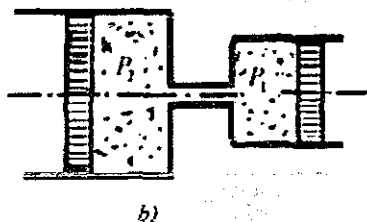
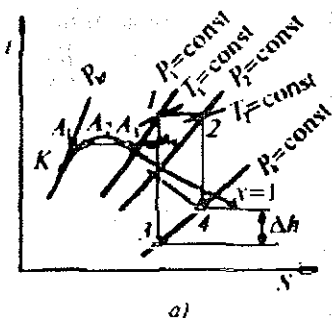
$$T_2 - T_1 = \Delta T_i$$

Drossellanish jarayonida gaz oqimining bosimi pasayadi, ya'ni $P_1 > P_2$. Shuning uchun ΔP ning ishorasi manfiy bo'ladi. Gaz oqimining drosseldan keyingisiga nisbatan boshlang'ich temperatura kattaligidan $\Delta T_i = T_2 - T_1$ bo'lsa, manfiy ishorali, ya'ni gaz soviydi.

5.6. Suv bug'ining drossellanishi

Tashqi ta'sir hisobiga suv bug'ining parametrlari o'zgaradi. Harakatlanishi davomida suv bug'iga mahalliy qarshiliklar, ya'ni quvurning torayishi, keskin kengayishi, yarim ochiq ventillar, zad-vijka (surilma qopqoq), keskin burilishlar, kalta quvurlar va sh.k. ta'sir ko'rsatadi. Natijada uning parametrlari o'zgaradi, ya'ni drossellanadi. Suv bug'ining iS diagrammasidan foydalanib, drossellanish jarayoni o'rganiladi. Suv bug'ining va real gazning drossellanish jarayoni $i = \text{const}$ ostida sodir bo'ladi (5.8-rasm, a). Drossellanish jarayonida suv bug'ining (yoki real gaz) temperaturasi pasayadi, ya'ni drossel-effekt ishorasi musbat bo'ladi.

Suv bug'ining inversiya temperaturasi $T = 4370 K$ va u faqat musbat bo'ladi. Shuning uchun suv bug'i ish jismi sifatida qo'llaniladigan bug' turbinasi, bug' mashinasi va shu kabi qurilmalarda bug'ning drossellanishi natijasida bug'ning ish bajarish imkoniyati susayadi. Bug' turbinasiga yo'naltirilgan bug' $P_1 = \text{const}$ va uning entalpiyasini i_1 (bu I nuqta qiymatiga mos



5.8-rasm. Suv bug'ining drossellanishi:

a) suv bug'ining iS diagrammasi; b) drossellanish jarayoni.

kelsin) deb iS diagrammasi olingan. Bug' turbinasidan ish bajarib chiqqan bug'ning 3 nuqtadagi entalpiyasi i_3 bo'lsa, 1 kg bug'ning adiabatik kengayishida bajargan ishi $A_1 = h_1 = i_1 - i_3$ ga teng bo'ladi. Biror sababga ko'ra, bug' turbinasigacha quvurga surilma qopqoq o'rnatilganida, suv bug'ining parametri turbinaga yetib borguncha o'zgarar edi, chunki surilma qopqoqda bug' drossellanadi. Shuning uchun 1 va 2 nuqtadagi bug' parametrlari $P_1 \neq P_2$ bo'lmaydi. Demak, surilma qopqoqdan keyin bug' turbinasiga ish bajarish uchun yo'naltirilgan bug' bosimi $P_2 = \text{const}$ bo'lganida bug' entalpiyasi, mos ravishda, $i_1 > i_2$ bo'ladi. Unda, turbinada bug'ning bajargan ishi $A_2 = h_2 = i_2 - i_4$ teng bo'ladi. Yuqorida qarab chiqilgan ikkala holatlarda bug' turbinasining bajargan ishi bir-biridan Δh ga farq qiladi. Bu farq suv bug'ining drossellanish jarayonida yo'qotgan «ish bajarish xususiyati» bo'lib, u 4 va 3 nuqtalar entalpiyalari ayirmasi bilan ifodalanadi, ya'ni

$$\Delta h = i_4 - i_3.$$

Demak, suv bug'i har qanday turdagi mahalliy qarshiligi bo'lgan quvurdan o'tish jarayonida o'zining ish bajarish xususiyatini bosimning tushishi, ya'ni entalpiyasining ortishi hisobiga pasaytirar ekan.

5.7. Drossel-effektning fizik ma'nosi

Real gaz ish bajarmasdan, tashqi muhit bilan issiqlik almashmasdan drossellanganida uning temperaturasi o'zgaradi. Mazkur hodisani 1852-yili J. P. Joule va U. Tomson tajribada isbotlaganlar.

Real gaz tashqi kuch ta'sirida siqilsa yoki kengaysa, uning parametrlari o'zgaradi. Masalan, gazning boshlang'ich bosimi P_1 oxirigisi P_2 bo'lganida, mos ravishda, uning boshlang'ich hajmi V_1 va oxirigisi V_2 ga teng bo'ladi, ya'ni $P_1 V_1 = P_2 V_2$. Agar gaz siqilgan bo'lsa, u kengayib $P_1 V_1$ ga teng ish bajaradi. Bu siqilish jarayonida gazni temperaturasi ortadi, aksincha kengayganida pasayadi. Bunday hodisa ham drossellanish jarayonida sodir bo'ladi.

Faraz qilaylik, kichik diametrli kalta quvur orqali ikkita har xil diametrli silindrlar o'zaro birlashtirilgan bo'lsin (58-rasm, b ga qarang). Katta va kichik diametrli silindrlardagi bosimlarning o'zaro tengligi $P_1 = P_2$ porshenlar harakati hisobiga ta'minlanadi. Gazning katta yoki kichik diametrli silindrlarining biridan ikkinchisiga oqib o'tishidagi drossellanishni adiabatik deb qabul qilinadi. Shunda har bir massa birligiga teng gazga porshenlar, mos ravishda, $P_1 V_1$ va $P_2 V_2$ ish miqdorini uzatadi. Bunda gaz zarralarining kinetik va ichki energiyalari o'zgaradi, ya'ni gaz temperaturasi ortadi (yoki pasayadi). Jarayonni ideallashtirilsa, ya'ni gaz atrof-muhit bilan issiqlik almashmaydi deb qabul qilinganida, termodinamikaning birinchi qonuniga muvofiq gaz energiyasining o'zgarishi hamma tashqi ta'sirlar yig'indisiga teng bo'lishi kerak. Shunda gazning ichki va kinetik energiyalari o'zgaradi. Bu o'zgarish ikkala porshenlar gazga uzatgan ishlari ayirmasiga teng bo'lgani uchun termodinamikaning birinchi qonunini quyidagicha yozish mumkin:

$$u_2 - u_1 + \frac{\partial_2^2}{2} - \frac{\partial_1^2}{2} = P_1 V_1 - P_2 V_2. \quad (250)$$

Kalta va kichik diametrli quvurdan gazni siqib o'tkazishda mahalliy qarshilik kuchini yengish uchun ma'lum miqdordagi ish sarflanadi. Bu ish $P_1 V_1 - P_2 V_2 = \Delta(PV)$ ga teng bo'lib, gazning ichki energiyasi hisobiga bajariladi. Demak, gaz zarralarining tezligi va temperaturasi o'zgaradi, ya'ni $\partial_1 > \partial_2$, chunki gaz drosseldan keyin ma'lum darajada soviydi. Drossellanish jarayoni oxirida gazning kinetik energiyasi kamayadi, ichki energiyasi esa $\Delta u = u_2 - u_1$ ga ortadi.

Agar tashqaridan gazga uzatilgan hamma turdagi energiyalar gazning kinetik energiyasini o'zgarishi bilan unga sarf bo'lgan ish yig'indisiga teng bo'lsa, unda (250) ni qayta yozish mumkin, ya'ni

$$\Delta E = \Delta \frac{\partial^2}{2} + \Delta(PV), \quad (251)$$

yoki

$$\Delta E = \Delta u. \quad (252)$$

Ichki energiya, moddani tashkil etgan zarralarning kinetik va potensial energiyalari yig'indisiga tengligidan ma'lumki, temperatura ortgan sayin gaz zarralarining tezligi ham ortadi, o'z navbatida, gaz egallagan hajm kattalashadi.

Demak, moddaning ichki kinetik (zarralarning kinetik) energiyasi uning temperaturasi, potensial energiyasiga, gaz egallagan hajmga mutanosib ekan. Unda, sistemaning ichki va to'la energiyalari orttirishni kinetik va potensial energiyalar orqali quyidagicha yozamiz:

$$\begin{aligned} \Delta u &= \Delta K + \Delta P, \\ -\Delta E &= \Delta K + \Delta P \end{aligned} \quad (253)$$

(252) tengligi asosida drossel-effekt bo'yicha ayrim fizik xulosalarni chiqarish mumkin:

1. Drossellanish jarayoniga sarflangan tashqi energiya ($-\Delta E$) jarayonda qatnashuvchi moddaning ichki potensial energiyasi orttirishi (ΔP) dan katta, kichik va unga teng bo'lishi mumkin:

a) agar $-\Delta E > \Delta P$ bo'lsa, tashqi energiyaning ortiqchasi

($-\Delta E + \Delta P = \Delta W$) moddani tashkil etgan zarralarning kinetik energiyasi (ΔK) ning va drossellanish jarayonida qatnashuvchi modda temperaturasi (ΔT) ning ortishiga sarflanadi;

b) agar $-\Delta E < \Delta P$ bo'lsa, ΔP ni ortiqchasi zarralar kinetik energiyasining kamayishi hisobiga moddaning ichki potensial energiyasini va temperaturasi pasaytiradi;

b) $-\Delta E = \Delta P$ bo'lsa, $\Delta K = 0$ bo'ladi, ya'ni modda temperaturasi $T = \text{const}$ bo'ladi. Moddani tashkil etgan zarralar kinetik energiyasining orttirishi nolgacha teng bo'ladi.

Demak, yuqoridagilar asosida quyidagi fizikaviy xulosani chiqarish mumkin: *drossel-effekt o'rinli bo'lganida modda temperaturasi ortishi (modda isiydi), kamayishi (modda soviydi) va o'zgarmas ($T = \text{const}$ $\Delta T = T_1 - T_2 = 0$) bo'lishi mumkin. Demak, drossel-effekt ishorasi manfiy (a), musbat (b) va nolgacha (v) teng bo'lishi mumkin ekan.*

1-masala. Suv bug'i atmosferaga torayib boruvchi soplodan oqib chiqqunga qadar uning bosimi 21 MPa va temperaturasi 643 K bo'lgan. Bug' oqib chiqqanda uning bosimi 123 kPa, tezligi 570 m/s va temperaturasi 293 K gacha pasaygan. Bug'ning oqib chiqishidagi kesimi 15 sm² bo'lsa, bir sekundda oqib chiqqan bug' sarfi, kinetik energiyasining o'zgarishi topilsin.

Yechimi. Suv bug'i bosimining o'zgarishi uchun uzluksizlik tenglamasini yozib, undan oqib chiqqan bug' massasini topamiz:

$$-\Delta P = \rho \vartheta \Delta \vartheta = \rho \Delta \frac{\vartheta^2}{2}.$$

Bug'ning zichligini temperaturaga mos keluvchi qiymatini jadvaldan topamiz va formulaga qo'yib hisoblaymiz:

$$G = \rho \vartheta S = \frac{\rho S}{V_2}; \quad V_2 = V_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}}$$

$$G = \frac{S}{V_1} \cdot \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{8.55} \left(\frac{123 \cdot 10^3}{21 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{1.3}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{8.55} (5.857)^{0.769} = 6.03 \text{ kg/s.}$$

$$\text{Bug'ning kinetik energiyasi } E = \frac{P_1 - P_2}{\rho} = \frac{123 \cdot 10^3 - 21 \cdot 10^6}{208} = 100 \text{ kJ.}$$

2-masala. Yonish mahsuloti torayib boruvchi soplodan oqib chiqqunga qadar bosimi 12 MPa va temperaturasi 843 K bo'lgan. Yonish mahsuloti atmosferaga oqib chiqqandan keyin uning parametrlari normal bosimdagi qiymatlarni olgan. Bunda gaz zarralarining tezligi 590 m/s gacha pasaygan deb, qabul qilgan holda yonish mahsulotining sarfini hisoblang. Soploning chiqish kesimining radiusi 17 sm bo'lsa, oqib chiqqan gazning kinetik energiyasining o'zgarishi nimaga teng bo'ladi?

Nazorat savollari



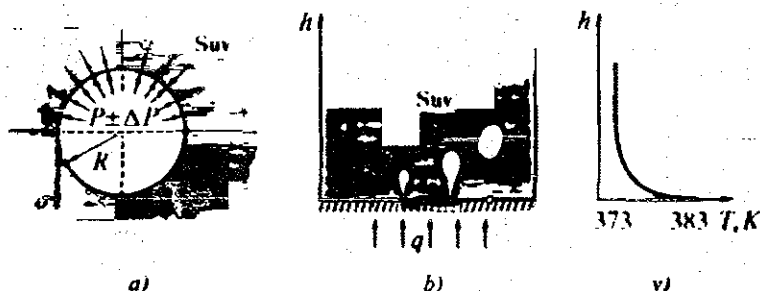
1. Issiqlik va sovitch mashinalarida nima uchun gaz oqimining oqib kirishi va chiqishidagi kesimlari o'zgartiriladi?
2. Gaz yoki bug' oqimi zarralarining qanday parametrlari oqib chiqishda o'zgaradi?
3. Bosim kuchlari gaz oqimidagi biror massa miqdorini ko'chirishda ish bajaradimi va u qanday formula bilan hisoblanadi?
4. Gaz oqimiga uzatilgan issiqlik miqdorini termodinamika qonuni asosida yozing va uni tushuntiring.
5. Soplo va diffuzor hamda komfuzor deb nimaga aytiladi? De-Laval soplosi deb qanday asbobja aytiladi?

6. Soplo diffuzordan qanday parametrlari bilan farq qiladi?
7. De-Laval soplosi uzunligi bo'ylab gaz oqimining qaysi parametrlari o'zgaradi?
8. Max soni nima, uning fizik ma'nosini, formulasini yozib, tushuntiring.
9. Drossellanish jarayoni qanday termodinamik hodisaga mansub va bu jarayonda oqim parametrlaridan nimalar o'zgaradi?
10. Drossel effekti nima? Bu effektlar formulalarini yozing, ma'nosini ayting.

VI BOB. SUV BUG'INING TERMODINAMIK XUSUSIYATLARI

6.1. Suv agregat holatining o'zgarishidagi issiqlik hodisalari

Bug' qozonidagi suvga q issiqlik miqdori uzatilsa, suv bug'lanadi, ya'ni uning agregat holati o'zgaradi. Temperatura ko'tarilgan sayin suv miqdori kamayib, bug' esa ortib boradi. Suvning qaynash temperaturasi to'yingan bug' temperaturasiga teng, ya'ni $T = T_{\text{th}}$ bo'lganda, suvda bug' bo'lmaydi. Bunda issiqlik tabiiy konveksiya bo'yicha uzatilmaydi. Chunki suyuqlik hajmidagi suv bug'i pufakchasi ichidagi bosim P , pufakcha sirtiga ta'sir qilayotgan suv bosimi P va sirt taranglik kuchi yig'indisiga teng bo'ladi. Ma'lumki, $P_{\text{v}} > P_{\text{b}}$ bo'lsa, $T_{\text{v}} > T_{\text{b}}$ sharti bajarilganda, hech bo'lmaganda $T_{\text{v}} = T_{\text{b}}$ bo'ladi. Suvning qaynashi uchun $T > T_{\text{b}}$ shart bajarilishi kerak. Shunda sirt taranglik kuchi asosiy omil bo'lib,



6.1-rasm. Qaynayotgan suv ichidagi pufakchaga ta'sir etuvchi kuchlar (a), qizdirilayotgan idish sirtidagi mikroyoriqlarda suv bug'i pufakchalarining paydo bo'lishi (b) va qaynayotgan suv qalinligi bo'yicha temperatura taqsimoti (v).

qaynash pufakcha bosimining orttirmasiga bog'liq bo'ladi, ya'ni ΔP qancha katta bo'lsa, suv shuncha tez qaynaydi. Bunday holatda $\Delta T = T_s - T_{\text{b}}$ ham musbat va katta bo'ladi. 5.9-rasmdan ko'rinib turibdiki, bug' pufakchasi kesimining perimetri bo'ylab sirt taranglik kuchi ta'sir etyapti. Uning kattaligi bosim kuchining vertikal yo'nalishdagi proyeksiyasiga teng, ya'ni

$$2\pi R\sigma = (P_c + \Delta P)\pi R^2 - P_c\pi R^2 \quad (254)$$

(292)ni ixchamlab, undan besim orttirmasi ΔP topiladi:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}, \quad (255)$$

bunda σ — sirt tarangligi kuchi; R — pufakchani ichki radiusi, m.

Demak, bug' pufakchasining radiusi qancha kichraytirilishidan qat'iy nazar, ma'lum R_k (kritik radius)da pufakcha ichidagi $P_c + \Delta P$ bosimlar yig'indisi biror $T_s = T_{\text{b}} + \Delta T_s$ temperaturada P_{b} bosimga tenglashadi. Shunda $P_c > P_{\text{b}} + \Delta P$ bo'lganligidan pufakcha radiusi ortib boradi, ya'ni u shishadi va suvning erkin yuzasiga qalqib chiqadi. Aksincha $R_k > R$ bo'lganda pufaklar sirt taranglik kuchi hisobiga suyuqlik bilan qo'shilib ketadi. Xulosa qilib aytganda, *pufaklar radiusi noldan boshlanganda, suyuqlik hech qachon qaynamaydi.*

Suvning qaynashi bu, albatta, suv gazlarining ajralishi, ya'ni bug' pufaklarining paydo bo'lishidan boshlanadi. Suv bug'i uchun R_k mavjud emas. Chunki suv bug'i pufakchasi hosil bo'lganidan so'ng unga tashqaridan issiqlik uzatilishi natijasida uning radiusi ortib boradi hamda ma'lum vaqtdan keyin idish devoridan ajralib chiqib suv hajmi bo'ylab suzadi va yuqoriga, ya'ni suv sirtiga qalqib chiqib yoriladi. Suv to'ldirilgan idishning issiqlik uzatadigan sirtidagi mikroyoriqlar, g'adir-budurlar gaz pufakchalarining paydo bo'lish markazlari hisoblanadi. Issiq sirtida paydo bo'lgan gaz pufakchalari issiqlikni yutishi hisobiga tezda kattalashib sirtidan uziladi, so'ngra suyuqlik bo'ylab yuqoriga ko'tariladi va issiqlik almashinuvini jadallashtiradi. Sirtidan ajralmasdan qolgan gaz pufakchalari, o'z navbatida, yangi pufakchalarni hosil bo'lishida birlamchi manba vazifasini bajaradi.

Sirtga beriladigan issiqlik miqdori ortib borganida gaz pufakchalarining hosil bo'lishi jadallashadi va ma'lum temperaturada suyuqlik hamda issiqlik o'tasida bug' pardasi paydo bo'ladi. Shunday holat o'rinli bo'lganda issiq sirt bilan suyuqlik

o'rtasida bug' pufakchalari orqali issiqlik almashinuvi va bug' hosil bo'lishi jadallashadi. Lekin, bug' pufakchalarining issiqlik o'tkazuvchanligi yomon bo'lganligidan bug' pardasi issiqlik almashinuviga to'sqinlik qiladi. Issiq sirt temperaturasi juda ko'tarilib (1273 K) kerishi oqibatida apparatlar ishdan chiqishi mumkin. Shuning uchun bug' pardasi hosil bo'lishiga yo'l qo'yilmaydi. Qozonga uzatiladigan issiqlik miqdorini keskin kamaytirish yo'li bilan bug' pardasi hosil bo'lishini oldi olinadi. Bu hodisa o'rinli bo'lganda esa qozon agregatiga zo'r keladi. Shuning uchun **pufakchali qaynash** jarayonida, maxsus tajribada aniqlangan empirik formulalardan foydalanib, issiqlik uzatishning α — koeffitsienti hisoblanadi va unga amal qilinadi.

Masalan, suv bug'ining bosimi 0,1—0,3 MPa oralig'ida bo'lganda issiqlik uzatish koeffitsientini quyidagi formuladan hisoblash mumkin:

$$\alpha = 0,38 q^{0.667} p^{0.2}.$$

Suv bug'idagi q issiqlik miqdori boshqa muhitga o'tganida bug' soviydi, natijada kondensatsiya hodisasi (bug'ning suvga aylanishi) ustivor bo'ladi. Kondensatsiya hodisasi suv bug'ining temperaturasi nisbatan issiqlik almashtirgichning sirt temperaturasi kichik bo'lganda ($T_{1b} > T_{1s}$) sodir bo'ladi. Kondensatsiya ikki xil **tomchisimon va pardasimon** bo'ladi.

Simob bug'i yoki idish devorini ho'llamaydigan suyuqliklarda tomchisimon kondensatsiya, idish devorini ho'llaydigan suyuqliklarda pardasimon kondensatsiya kuzatiladi. Pardasimon kondensatsiya amalda ko'proq uchraydi. Kondensatsiyalovchi sirt temperaturasi qancha past bo'lsa, kondensatning hosil bo'lishi shuncha tezlashadi va aksincha.

Suv bug'ining issiqlik almashinuvi bilan suyuqlikka aylanish jarayonidagi issiqlik uzatish koeffitsienti $\alpha = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ atrofida bo'ladi. Idish devorining yuqorisidan quyi qismi tomon kondensat (hosil bo'lgan suv) qalinligi ortib boradi. Ammo **pardasimon kondensatsiya** o'rinli bo'lganda esa idish devorining yuqori qismida issiqlik uzatilishi yaxshi bo'lsa, pastki qismida yomonlashadi. Pardasimon qatlam qalinlashib issiqlik almashinuvi sekin-asta pasayib boradi. Pardasimon qatlam issiqlikni yomon o'tkazadi.

6.2. Suv bug'ining termodinamik jarayonlari

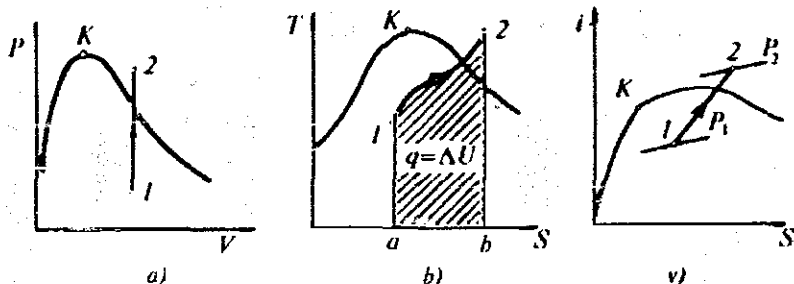
Suv va uning bug'ida sodir bo'ladigan termodinamik jarayonlarga izojarayonlardan izoxorik, izobarik, izotermik, adiabatik jarayonlar mansubdir. Bu jarayonlar suv bug'i ish moddasi sifatida qo'llaniladigan bug'-kuch qurilmalari siklida sodir bo'ladi.

Izoxorik jarayon. O'zgarmas hajmda ($V=\text{const}$) joylashgan suv bug'iga q issiqlik miqdori uzatib, uni to'yingan quruq va o'ta qizdirilgan bug'ga aylantirish mumkin. Ish bajarib bo'lgan har qanday temperaturadagi bug'ni sovitganimizda kondensatsiylanish davrida suyuq faza miqdori ortib borsa-da, lekin bug' 100% suyuqlikka aylanmaydi. Suyuqlik ustida ma'lum miqdorda kondensatsiylanmagan bug' qoladi. Shuning uchun izoxorik jarayonning PV diagrammasi koordinata boshi noldan boshlanmaydi (5.10-rasm, 1 va 2 nuqtalar oralig'i). Har qanday past bosimda ham suyuqlik ustida muayyan miqdordagi to'yingan bug' bo'ladi.

Termodinamikaning birinchi qonuniga muvofiq $V=\text{const}$ bo'lganda suv bug'i ish bajarmaydi, ya'ni $A=0$. Bug'ga uzatilgan q issiqlik miqdori uning ichki energiyasining ortishiga sarf bo'ladi:

$$q = U_2 - U_1 = (i - PV)_2 - (i - PV)_1. \quad (256)$$

Suv bug'ining TS diagrammasidan ko'rinib turibdiki, bug'ga uzatilgan issiqlik miqdori $a/2b$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Suv bug'ining $V=\text{const}$ bo'lgan jarayondagi P , T parametrlari o'zgarganda, uning entropiyasi va entalpiyasi o'zgaruvchan bo'ladi (5.10-rasm, iS diagramma).

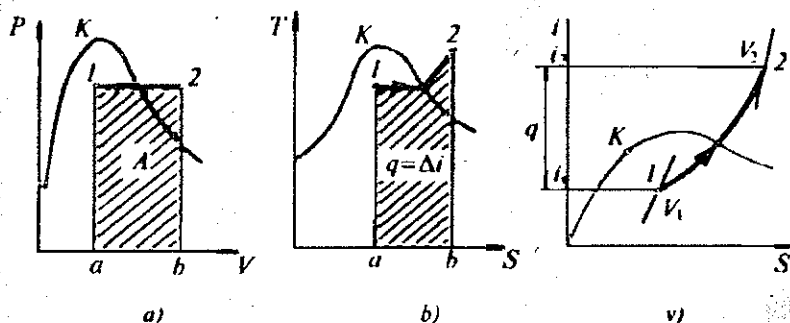


6.2-rasm. Suv bug'ining izoxorik jarayondagi PV (a), TS (b) va iS (v) diagrammalari.

Izobarik jarayon. O'zgarmas bosim ostidagi bug'ga q issiqlik kiritilsa, uning parametrlaridan V , T o'zgarishi hisobiga bug' foydali ish bajaradi.

Bug'ga keltirilgan q issiqlik miqdori va bajarilgan ish $a12b$ nuqtalari hosil qilgan yuzaga son qiymati jihatidan teng bo'ladi (5.11-rasm, a , b). q issiqlik miqdori foydali ishga sarf bo'libgina qolmasdan, yana bug'ning ichki energiyasini o'rttiradi. Bug'ga keltirilgan issiqlik miqdori kengayish jarayonidagi bug' entalpiyasi ayirmasiga teng:

$$q = i_2 - i_1. \quad (257)$$



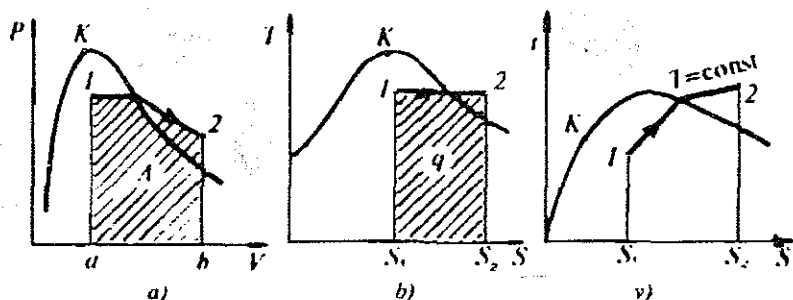
6.3-rasm. Suv bug'ining izobarik jarayondagi PV (a), TS (b) va iS (v) diagrammalari.

(257) ifodani 1—2 nuqtalardagi (5.11-rasm, b) entalpiya va ish ayirmalarining ayirmasi ko'rinishida (256) yoziladi. Unda, bug'ga keltirilgan issiqlik miqdori bug'ning bajargan ishiga teng bo'ladi, ya'ni

$$A = P(V_2 - V_1). \quad (258)$$

Izotermik jarayon. Suv bug'ining temperaturasi o'zgarmas $T = \text{const}$ saqlash uchun unga issiqlik uzluksiz kiritilib va ortiqchasi chiqarib turiladi. Kiritilgan q issiqlik ta'sirida suv bug'i parametrlaridan P , V o'zgaradi. Bug' hajmining o'zgaruvchanligi tufayli bosimni bir xil saqlab bo'lmaydi. Bu ikkala parametrlarning o'zgarishi hisobiga suv bug'i ish bajaradi, ya'ni

$$A = q - (U_1 - U_2). \quad (259)$$



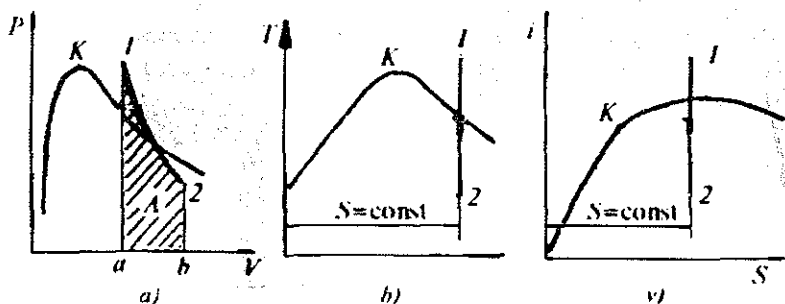
6.4-rasm. Suv bug'ining izotermik jarayondagi PV (a), TS (b) va iS (v) diagrammalari.

Bu ishning son qiymati PV diagrammadagi $a12ba$ nuqtalar hosil qilgan yuzaga teng. q issiqlik miqdori esa S_112S_2 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng (5.12-rasm) bo'ladi. Keltirilgan issiqlik miqdori bug'ning parametrlaridan P , V ni o'zgartiradi, natijada uning entalpiya va entropiyasi ham o'zgaruvchan bo'ladi (5.12-rasm, v dagi, iS diagramma). Suv bug'ini $T = \text{const}$ saqlash jarayonida unga uzatilgan q issiqlik miqdori bug' entropiyasining o'zgarishiga sarflanadi:

$$q = T(S_2 - S_1) = (t + 273,16)(S_2 - S_1) \quad (260)$$

Adiabatik jarayon. Suv bug'iga tashqaridan issiqlik keltirilmagan holda uni kengaytirganimizda bug'ning ichki energiyasi kamayishi hisobiga bug' soviydi, natijada uning temperaturasi va bosimi pasayadi.

Ma'lumki, ideal gazning issiqlik sig'irlarining nisbati ($k_G = c_p/c_v$) suv bug'ining issiqlik sig'irlari nisbati ($k = c_p/c_v$)ga matematik jihatidan teng bo'lsa-da, amalda ular teng emas. Jarayon tenglamasi ($PV^k = \text{const}$) qo'llanilsa, adiabatga ko'rsatkichi k har xil qiymatlarni qabul qiladi. Masalan, o'ta qizdirilgan bug' sohasida c_p/c_v ning o'rtacha qiymati $k = 1,3$ bo'lsa, nam bug' sohasidagi qiymati $k = 1,035 - 0,1x$ ko'rinishida bo'ladi. Bunda, x — bug'ning quruqlik darajasini bildiradi. Bug'ning kengayishi boshlanishida yoki siqilishi oxirida, ya'ni adiabataning eng yuqori nuqtasida $x = 1,0$ bo'lsa, nam bug' sohasida uning qiymati $x = 1,135$ teng bo'ladi. Shu sababli, adiabatik kengayish past bosimda sodir bo'layotgan bo'lsa, $PV^k = \text{const}$ tenglamani taxminiy hisoblashlarda qo'llanilishi mumkin.



6.5-rasm. Suv bug'ining adiabatik jarayondagi PV (a), TS (b) va iS (v) diagrammalari.

6.5-rasmda suv bug'ining PV (a), TS (b) va iS (v) diagrammalari keltirilgan. Bug'ning adiabatik kengayishida bajaragan ishi $a/2b$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng (5.13-rasm, a). Ish qiymati termodinamikaning birinchi qonunidan foydalanib aniqlanishi mumkin. Suv va uning bug'i kengayganda ichki energiyalarining kamayishi qonuniyatidan foydalanib bug'ning bajaragan ishining kattaligini aniqlash mumkin.

Demak, adiabatik jarayonda suv bug'i ichki energiyasining kamayishi hisobiga foydali ish bajariladi. Bu ishning kattaligi termodinamikaning birinchi qonuni bilan ifodalanadi:

$$dA = -du$$

yoki

$$A = u_1 - u_2 = (i - PV)_1 - (i - PV)_2 \quad (261)$$

$S = \text{const}$ bo'lgani uchun bug' kengayganda uning absolut temperaturasi va entalpiyasi adiabatik jarayonning TS va iS diagrammalarida pasayib boruvchi vertikal chiziqlardan iborat bo'ladi (5.13-rasm, b, v lardagi 1—2 nuqtalar).

Zamonaviy qozon agregatlari asosan tabiiy yoki sun'iy gazda, mazutda, changsimon ko'mirda ishlaydi. Ular asosan, baraban, ekran, suv isitkich, havo isitkichdan, o'txona va sh.k. tashkil topgan. Ular ishlab chiqaradigan bug'ning sarfi 400—450 t/soat, bosimi 25,5 MPa gacha, temperaturasi 700—850 K ga yetadi. Zamonaviy qozon agregatlari kam metall sarflangan holda, boshqarish yetarli darajada mexanizatsiyalashtirilgan va avtomatlashtirilgan, ekologik nuqtayi nazardan atrof-muhitga zaharli gazlarni imkoniyati boricha kamroq chiqaradigan qilib barpo etilmoqda.

Gaz-mazutda ishlaydigan bug' qozonlarida soatiga 25—30 tonna mazut yoki 30 ming m³ tabiiy gaz yoqiladi. Qozonga uzatiladigan suv temperaturasi 500 K dan kam, ishlatilgan yonish mahsuloti gazlarining atmosferaga chiqarilayotgan qismining temperaturasi esa 390—410 K dan past bo'lmaydi. Bu turdagi qozonlarning *fik* 90—92% atrofida bo'ladi.

6.3. Suv bug'ining *iS* diagrammasi

Issiqlik mashinalarini loyihalash va tadbiiq etishdagi muhandislik hisob-kitoblarini amalga oshirishda suv bug'ining *iS* diagrammasidan foydalaniladi. Suv bug'ining *iS* diagrammasini birinchi marta 1904-yili fransuz fizigi **J. Molye** taklif etgan va uni to $20 \cdot 10^5$ Pa bosimli bug' uchun qurgan. Unga qadar, *iS* diagramma o'rniga suv bug'iga uzatilgan yoki undan chiqarilgan issiqlik miqdori *TS* diagrammasidagi egri chiziq ostida joylashgan yuzani hisoblash yo'li bilan aniqlangan. Hisoblashlarni almashtirish va ishni osonlashtirish maqsadida *TS* diagramma o'rniga *iS* diagramma quriladi, ya'ni diagrammadagi temperatura o'rniga entalpiya qiymatlari qo'yiladi. Shunda *iS* diagrammada $S=\text{const}$ bo'lgandagi ish va $P=\text{const}$ bo'lgandagi issiqlik miqdori yuzalar bilan emas, chiziq kesmalari yordamida hisoblab topiladi. Natijada bug' jarayonlari va sikllaridagi issiqlik harakatini tekshirish usuli soddalashadi. Hamdo'slik mamlakatlarida hozirgi kunda bosimi 0,01 dan to $3 \cdot 10^7$ Pa va temperaturasi 303 K dan to 973 K gacha bo'lgan suv bug'i uchun professor M. P. Vukalovich tuzgan *iS* diagrammasidan foydalaniladi. *iS* diagrammasini qurish uchun suv bug'ining namlikka to'yingan bug' va o'ta qizigan bug' sohalaridagi entalpiyasi va entropiyasi qiymatlari suv bug'ining maxsus termodinamik jadvallaridan olinadi. So'ngra muayyan mashtabda entalpiya va entropiya kattaliklariga mos keluvchi natijalarning son qiymatlarining o'rnini (nuqtalari) topiladi. Bu nuqtalarni birlashtirib har xil bosimlarga mos keluvchi izobara chiziqlari quriladi.

Ma'lumki, $T=273,16$ K da entalpiya va entropiya, shartli ravishda, nolga tenglashtiriladi. Shuning uchun izobaralar *iS* diagrammasining boshidan boshlanadi.

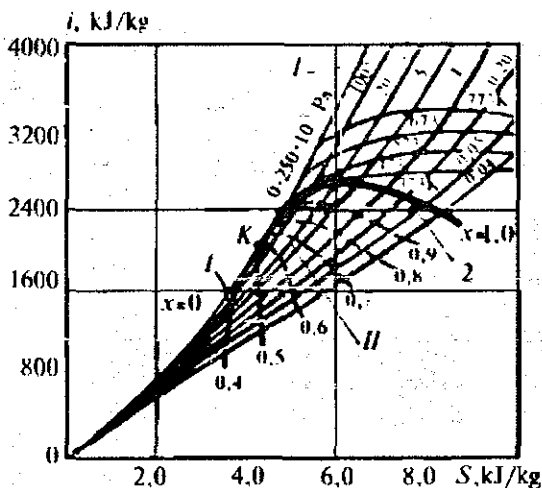
Namlikka to'yingan bug' sohasi bilan o'ta qizigan bug' sohasi chegaralarini birlashtiruvchi nuqta **kritik *K* nuqta** deb olinadi. Bu *K* nuqtadan yuqorida joylashgan nuqtalarga mos keluvchi entalpiya

va entropiyani i' va S' , ya'ni *yuqori chegaraviy egri chiziq*, 2 deb belgilanadi. Xuddi shunday, K nuqtadan pastda joylashgan nuqталarga mos keluvchi entalpiya va entropiyani i' va S' , *quyi chegaraviy egri chiziq* 1 deb belgilanadi. Natijada iS diagrammadagi chegaraviy chiziq *yuqori va quyi*, ya'ni *o'ta qizigan bug' sohasi va namga to'yingan bug' sohasi* deb yuritiluvchi sohalarga ajraladi.

Soha kritik K nuqtadan yuqorida bo'lsa, *yuqori* va undan pastda joylashsa *quyi* deb yuritiladi. iS diagrammadagi namlikka to'yingan bug' izobaralari koordinata boshidan boshlanuvchi va tarmoqlanuvchi to'g'ri chiziqlar tutamidan iborat bo'lib, o'ta qizigan bug' sohasiga o'tgandan keyin esa bu chiziqlar izobara va izoterma (ikkita chiziq)larga ajraladi. Bunda izobara chizig'i o'z yo'nalishida qoladi, izoterma esa o'ng tomonga $x = 1$ chegaraviy chiziqqa urinma bo'lib og'adi. Bug' bosimi qancha katta bo'lsa, izobara chizig'i entalpiya o'qiga yaqinlashib, tikligi ortib boradi va o'ta qizigan bug' sohasida logarifmik egri chiziq ko'rinishiga o'tadi (5.14-rasm. iS diagramma).

Izotermalar chegaraviy egri chizigidan yuqorida asimptotik entropiyaning gorizontaal chizig'igacha pasayib tushadi. Chunki, o'ta qizigan bug' sohasida bug' to'yinish sohasidan uzoqlashgan sayin ideal gaz xossalriga yaqinlashadi.

iS diagrammadan bug'-kuch qurilmalari, bug' turbinalari, yuqori bosimli bug' qozoni nasoslari, bug' akkumulyatorlari va sh.k. issiqlik



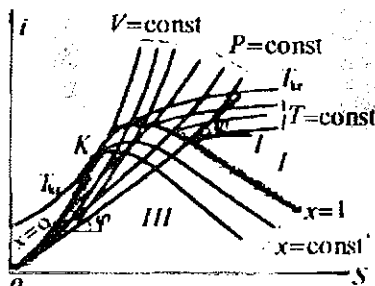
6.6-rasm. Suv bug'ining iS diagrammasi.

mashinalari hamda uskunalar ishini o'rganish, rostdash va tahlil qilishda foydalaniladi.

iS diagrammaning namlikka to'yingan bug' sohasidagi bug' saqlami uzlukli chiziqlar (0,2—0,9) bilan ko'rsatilgan. Bu chiziqlar bug'ning quruqlik darajasini bildiradi.

Bug' bilan ishlaydigan zamonaviy qurilmalarda odatda, namligi kichik bo'lgan (0,7—0,75) bug' ish moddasi sifatida qo'llaniladi. Ayrim holatlarda iS

diagrammada $V=\text{const}$, $P=\text{const}$, $T=\text{const}$ va $x=\text{const}$ egri chiziqlari chiziladi (5.15-rasm). Izoxora ($V=\text{const}$) chizig'i izobara ($P=\text{const}$)ga nisbatan tikroq bo'ladi. $x=\text{const}$ chizig'i $x=1$ chizig'idan quyida joylashadi. iS diagrammaning ish sohasi deyilganda kritik K nuqtasidan o'ng tomonda joylashgan yuqori chegaraviy egri chiziqlarning yuqori qismi tushuniladi. Bunda chegara egri chiziqdan quyi tomoni e'tiborga olinmaydi va zarur bo'lganida chegara egri chiziqlarning yuqori qismi kattalashtirib chiziladi.



6.7-rasm. Suv bug'ining $V=\text{const}$, $P=\text{const}$, $T=\text{const}$ va $x=\text{const}$ chiziqlari ko'rsatilgan iS diagrammasi.

MASALALAR

1 - masala. Suv bug'ining boshlang'ich parametrlari quyidagicha: $P_1 = 980 \text{ kPa}$, $x=0,7$. Suv bug'ining iS diagrammasidan (5.16-rasm) foydalanib, o'zgarmas hajmdagi bug'ning temperaturasi $T=573 \text{ K}$ bo'lishi uchun unga tashqaridan qancha issiqlik miqdori keltirish kerakligini aniqlang.

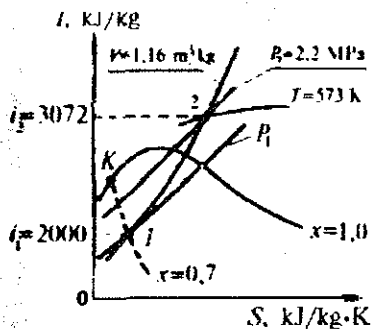
$V=\text{const}$ bo'lganida bug'ga keltirilgan issiqlik miqdori quyidagiga teng, ya'ni

$$q = U_2 - U_1 = (i_2 - P_2 V_2) - (i_1 - P_1 V_1). \quad (1.1)$$

Jarayon izoxorik bo'lganligi uchun $V_2 = V_1 = V$ tengligi sababli issiqlik miqdori quyidagidan topiladi:

$$q = (i_2 - i_1) + (P_1 - P_2)V. \quad (1.2)$$

R_1 bosimga mos keluvchi izobara chizig'i bilan K kritik nuqtadan boshlangan va quruqligi 0,7 bo'lgan chiziqlarning o'zaro kesishgan nuqtasining ordinata o'qiga proyeksiyalab, entalpiya qiymati $i_1 = 2000 \text{ kJ/}$

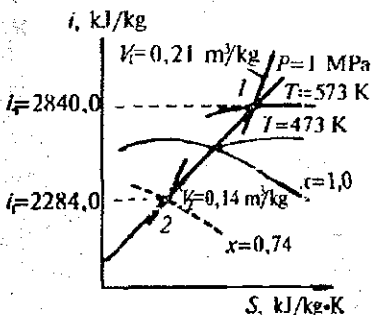


6.8-rasm.

ifodasiga qo'yib issiqlik miqdori hisoblanadi:

$$q = (3072 - 2000) + (9.8 - 22) \cdot 10^2 \cdot 1.16 = 1058 \text{ kJ.}$$

2-masala. Ixtiyoriy 1 kg gazning o'zgarmas bosim $P = 1 \text{ MPa}$ ostida solishtirma hajmini $V_1 = 0.21 \text{ m}^3/\text{kg}$ dan $V_2 = 0.14 \text{ m}^3/\text{kg}$ gacha kamaytirish uchun sarf bo'lgan ish kattaligi va gazning ichki energiyasi o'zgarishi hamda undan chiqarilgan issiqlik miqdori topilsin.



6.9-rasm.

qiymatlarini termodinamikaning birinchi qonuni ifodasiga qo'yib, bajarilgan ish va chiqarilgan issiqlik miqdori hamda gaz ichki energiyasining o'zgarishi hisoblab topiladi:

$$q = i_2 - i_1 = 2248 - 2840 = -592 \text{ kJ/kg.}$$

$$A = P(V_2 - V_1) = 1000(0.14 - 0.21) = -70 \text{ kJ.}$$

$$\Delta U = q - A = -592 - (-70) = -522 \text{ kJ/kg.}$$

kg topiladi. Topilgan nuqta orqali solishtirma hajmi $V = 1.16 \text{ m}^3/\text{kg}$ bo'lgan izoxora chizig'i kesib o'tadi. Bu izoxora temperaturasi 573 K li izoterma bilan kesishguncha davom ettiriladi va kesishgan nuqtani ordinata o'qiga proyeksiyalab entalpiya $i_2 = 3072 \text{ kJ/kg}$ topiladi. Aniqlangan izoxora va izobara kesishgan nuqtadan bosimi $P_2 = 2.2 \text{ MPa}$ bo'lgan izobara chizig'i o'tadi. Topilgan natijalarning son qiymatlarini (1.2)

Izobarik jarayondagi issiqlik miqdori gaz entalpiyasi o'zgaruvchanligiga teng bo'lgani uchun gaz holatlariga mos keluvchi entalpiya qiymatini aniqlash maqsadida izobara bilan izoxoralar $V = 0.21 \text{ m}^3/\text{kg}$ va $V_2 = 0.14 \text{ m}^3/\text{kg}$ kesishgan nuqtalari topiladi, so'ngra nuqtalarni ordinata o'qiga proyeksiyalanadi va mos holda entalpiya qiymatlari $i_1 = 2840 \text{ kJ/kg}$ va $i_2 = 2248 \text{ kJ/kg}$ aniqlanadi (5.17-rasm). Topilgan natijalarning son

3-masala. Boshlang'ich parametrlari $P_1=1,2$ MPa va quruqlik darajasi $x=0,95$ hamda hajmi $V_1=1$ m³ bo'lgan suv bug'i izotermik tarzda $P_2=0,1$ MPa bosimgacha kengayishi uchun bug'ga uzatilgan issiqlik miqdori, uning bu kengayishida bajargan ishi va ichki energiyasining o'zgarishi topilsin.

Bug'ga uzatilgan issiqlik miqdori quyidagidan topiladi:

$$q=mT(S_2-S_1). \quad (3.1)$$

$P_1=1,2$ MPa va $P_2=0,1$ MPa bosimlarga mos keluvchi izobaralar bilan bug'ning quruqlik darajasini ko'rsatuvchi va temperaturasi 460 K izoterma chiziqlari o'zaro kesishgan nuqtalarini ordinata o'qiga proyeksiyalab entropiya qiymatlari $S_1=6,38$ kJ/kg.K va $S_2=7,79$ kJ/kg.K aniqlanadi. Bosimlarga mos keluvchi bug' egallagan hajmlardagi uning massasi quyidagidan topiladi: $m=\rho V$.

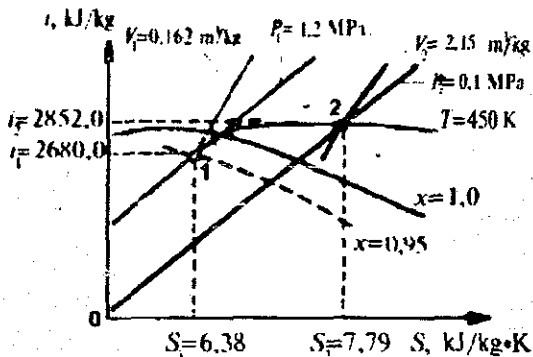
Temperaturasi 460 K bo'lgan izoterma bilan izoxoraning o'zaro kesishgan 1 va 2 nuqtalariga $V_1=0,162$ m³/kg va $V_2=2,15$ m³/kg mos keladi. Unda, $m=6,17$ kg.

Bug' ichki energiyasining o'zgarishi quyidagi ifodadan hisoblanadi:

$$\Delta U=U_2-U_1=m(i_2-i_1-P_2V_2+P_1V_1). \quad (3.2)$$

Bu tenglamadagi entalpiya o'zgaruvchanligini topish uchun bug'ning 1 va 2 nuqtalariga (5.18-rasm) mos keluvchi entalpiya qiymatlari shu nuqtalarni ordinata o'qiga proyeksiyalab $i_1=2680$ kJ/kg va $i_2=2852$ kJ/kg topiladi:

$$\Delta i=i_2-i_1=2852-2680=172 \text{ kJ/kg.}$$



6.10-rasm.

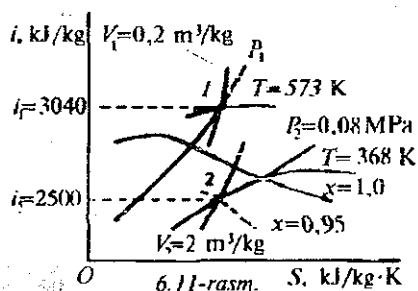
Topilgan natijalardan foydalanib quyidagilarni hisoblaymiz:

$$q = 6,17 \cdot 460 (7,79 - 6,38) = 4000 \text{ kJ},$$

$$\Delta U = 6,17 (172 + 1200 \cdot 0,162 - 100 \cdot 2,15) = 994 \text{ kJ},$$

$$A = q - \Delta U = 4000 - 994 = 3006 \text{ kJ}.$$

4-masala. Boshlang'ich parametrlari $P=1,27 \text{ MPa}$ va $T_1=573 \text{ K}$ bo'lgan suv bug'i oxirgi temperaturasi $T_2=368 \text{ K}$ gacha adiabatik kengaygandan keyingi bug' parametrlari va kengayishdagi ishini aniqlang.



Bug'ning boshlang'ich parametrlariga mos keluvchi izobara va izotermalarning o'zaro kesishgan nuqtasi 1 dan izoxora chizig'i ham o'tadi. Bu izoxoraga $V_1=0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$ to'g'ri keladi.

Bug'ning oxirgi hajmini topish uchun, jarayonda entropiya o'zgarmasligini e'tirof qilgan holda, 1 nuqtadan tik chiziqni entropiya o'qi tomonidagi bug'ning to'yinish soha-

sida yotgan $T_2=368 \text{ K}$ mos keluvchi izoterma chizig'i bilan kesishguncha davom ettirib 2 nuqta topiladi. Bu 2 nuqta hosimi $P_2=0,08 \text{ MPa}$ izobaraga va solishtirma hajmi $V_2=2 \text{ m}^3/\text{kg}$ bo'lgan izoxoraga ham mos keladi (5.19-rasm).

Termodinamikaning birinchi qonunini bug'ning adiabatik kengayishiga tatbiq qilinsa, unda bug' holatlariga to'g'ri keluvchi ichki energiyani bug' entalpiyasi va bajargan ishi orqali quyidagicha yozish mumkin:

$$A = U_1 - U_2 = (i_1 - P_1 V_1) - (i_2 - P_2 V_2). \quad (4.1)$$

Yuqoridagi masalalardagi usuldan foydalanib, 1 va 2 nuqtalarni ordinata o'qiga proyeksiyalab entalpiya qiymatlari $i_1=3040 \text{ kJ/kg}$ va $i_2=2500 \text{ kJ/kg}$ topiladi, keyin bug'ning bajargan ishi (4.1) bo'yicha hisoblanadi, ya'ni

$$A = 2786 - 2340 = 446 \text{ kJ/kg}.$$

Yuqorida keltirilgan masalalar yechimini o'rganish orqali bug'da sodir bo'ladigan jarayonlar va sikllarni tahlil qilishda suv bug'ining iS

diagrammasidan foydalanishni yaxshi bilish muhandislik hisob-kitoblarini osonlashtiradi. Shunga o'xshash masalalarni mustaqil tuzib ularni yechishni mashq qiling.

Nazorat savollari

- ?
1. Suv pufakchalari noldan boshlansa, unda qanday hodisa sodir bo'lmazligi mumkin?
 2. Suv pufakchalari manbayi vazifasini nimalar bajara oladi?
 3. Sirt taranglik kuchi nima va suv pufakchasiga qanday ta'sir qiladi? Sirt taranglik kuchi formulasini yozing va tushuntiring.
 4. Suv bug'ida sodir bo'ladigan izoxorik, izobarik, izotermik va adiabatik jarayonlarning PV va TS diagrammalarini chizib ularni tushuntiring.
 5. Suv bug'ining iS diagrammasi nima maqsadda va qanday quriladi?

Ikkinchi qism

VII BOB. ISSIQLIK KUCH QURILMALARI

Energetikaning birlamchi boyliklari *tabiiy va sun'iy yoqilg'ilar*, *suv, shamol va boshqalardan foydalanib mexanik energiya hosil qila oladigan dvigatellar va yordamchi uskunalar majmuasi kuch qurilmalari deyiladi*. Foydalaniladigan energiya turiga ko'ra issiqlik, gidravlik, gidrodinamik, atom va sh.k. kuch qurilmalari bo'ladi. Issiqlik kuch qurilmalari maxsus energetik inshoot bo'lib, u qozon qurilmasi (yoki atom reaktori), nasoslar, kondensatorlar, bug' (yoki gaz) turbinalari, elektr generatorlari, quvurlar va shunga o'xshash asosiy uskunalaridan tashkil topgan. Bug' kuch qurilmalari bug' va gaz turbinalari, reaktiv dvigatellar va boshqa katta quvvatli issiqlik mashinalaridan tashkil topadi. Issiqlik mashinasi issiqlik energiyasini mexanik energiyaga aylantirib beruvchi qurilma bo'lib, uning ish sikli ketma-ket sodir bo'ladigan termodinamik jarayonlardan iborat. Eng avvalo bu siklga issiqlik kiritiladi, uning ma'lum miqdori foydali ishga sarflanadi, so'ng qoldiq issiqlik miqdori sovitkichga chiqariladi. Siklga kiritilgan issiqlik miqdori q_1 albatta chiqarilgan issiqlik q_2 dan katta bo'lgandagina ma'lum miqdordagi foydali ish bajarilishi mumkin.

Bug' mashinasi, bug' turbinasi, IYDlar issiqlik dvigatellari hisoblanadi. Raketa (nem. Rakete, ital. Rocchetta rocca — urchuq) dvigatellari ham IYD lari hisoblanadi. Raketa dvigatellariga kimyoviy raketa dvigateli (KRD), yadro raketa dvigateli (YARD), elektrodinamik raketa dvigateli (ERD), suyuq yoqilg'ili raketa dvigateli (SYRD), qattiq yonilg'ili raketa dvigatellari (QYRD) kiradi.

Eng birinchilardan bo'lib Jeyms Uatt 1784-yili suv bug'idan foydalanib ishga yaroqli bug' mashinasini yaratdi va unga patent oldi. J. Uatt mashinasi yuz yilcha dastgohlarni, parovozlarni, kemalarni harakatlantirishda asosiy kuch manbayi bo'lib kelgan bo'lsa, bugungi kunda ham issiqlik mashinalarida ekologik jihatdan toza hisoblangan suv va uning bug'i keng qo'llaniladi. Shuning uchun suv bug'i bilan ishlaydigan ayrim kuch qurilmalari sikllarini to'laroq o'rganish maqsadga muvofiqdir.

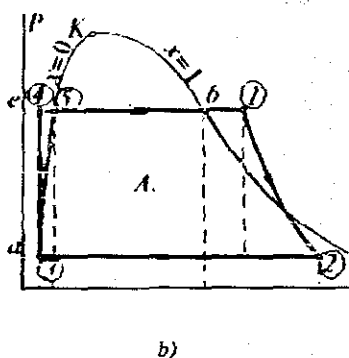
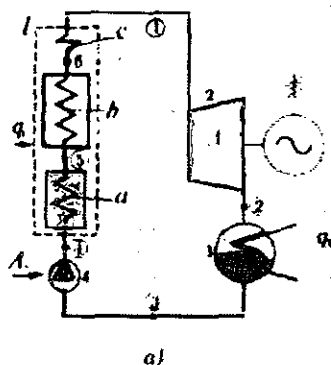
7.1. Bug' kuch qurilmasining nazariy sikli

Bug' kuch qurilmalari qozon agregati, bug' turbinasi, kondensator, nasos, elektr generatori va boshqa yordamchi uskunalardan tashkil topgan. Qozon agregati, o'z navbatida o'choq, bug'latkich sirlari, bug' qizdirgichlar (o'ta qizdirgich), ekonomayzer, havo isitkich, mo'ri, turli xil ventilyatorlar va yordamchi uskunalaridan tashkil topgan (7.1-rasm, a).

Bug' kuch qurilmalarida ishlatiladigan *ish jismi* — suv bug'i parametrlarining o'zgarishidagi ideal holatlarni o'rganadigan nazariy sikl **Renkin sikli** deb yuritiladi.

Nazariy siklning sxematik tasviri va jarayonning *PV* diagrammasi 7.1-rasm a, b da keltirilgan.

Renkin sikli quyidagicha kechadi: qozon agregati 1 dan yuqori bosim va temperaturali qizdirilgan suv bug'i bug' turbinasi 2 ga uzatiladi. Bug' tashqaridan ortiqcha issiqlik miqdorini olmasdan bug' turbinasida kengayish jarayonida foydali ish bajaradi (7.1-rasm, b *PV* diagrammadagi 1 va 2 nuqtalar oralig'i). Turbinada



7.1-rasm. Bug' kuch qurilmasining ideal (Renkin) siklining sxemasi (a) va jarayonning *PV* diagrammasi (b):

a — ekonomayzer; b — bug' qozoni (generatori); c — bug' qizdirgich;
 A_s — kondensat nasosiga sarflangan ish; A_c — siklning foydali ishi; A_t — bug' turbinasini bajargan ishi; 1 — qozon agregati; 2 — bug' turbinasi;
 3 — kondensator; 4 — nasos.

Eslatma: doira ichiga olingan raqamlar sikldagi ish jismi parametrlari o'lchanadigan nuqtalarning o'rni.

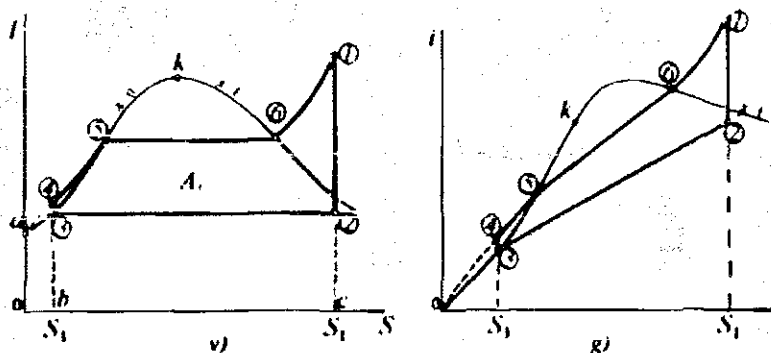
ish bajarib bo'lgan suv bug'i o'zidagi qoldiq issiqlik energiyasini kondensator 3 dan (2 va 3 nuqtalar oralig'ida) sovitkichga uzatadi. Bug'ning ichki energiyasi kamayishi hisobiga u kondensatsiyalanib, suvga aylanadi.

Tashqi kuch (elektr energiyasi) ta'sirida nasos 4 ishga tushadi va kondensat (hosil bo'lgan suv) qozon agregatiga uzatiladi. Nasosning haydash kanaliidagi bosimi uning so'rish qisminikidan katta bo'lgani uchun diagrammada 3 va 4 nuqtalar oralig'ida bosim ortadi, hajm esa o'zgarmas bo'ladi.

Suv bug'i ish bajarib bo'lgandan so'ng (1—2 nuqtalar oralig'ida), o'zidagi qoldiq issiqlik energiyasini sovitkichga chiqarib (2 va 3 nuqtalar oralig'i), izobarik jarayon orqali o'zining muvozanat holatiga qaytadi.

Real qurilmalarda, nasosdan o'tgan suv albatta ekonomayzer (a) dan o'tib, so'ngra qozon agregatiga quyiladi. Qozon agregati o'txonalarida yoqilgan yoqilg'ining yonish mahsuloti tashqariga olib chiqib ketayotgan, foydalanilmagan qoldiq issiqlik miqdoridan samarali foydalanish maqsadida, tutun yo'llariga ekonomayzer o'rnatiladi. Tutun o'zidagi qoldiq issiqlikni ekonomayzer orqali o'tayotgan kondensatga beradi va shu qoldiq issiqlik (tutundagi) yana qozon agregatiga qaytariladi. Shunda suv qoldiq issiqlik hisobiga o'z hajmini va temperaturasini o'zgarmas bosim ostida o'zgartiradi (7.1-rasm, v, g; 4 va 5 nuqtalar oralig'i).

Qozon agregatining o'txonasida yongan yoqilg'i ajratgan issiqlik miqdori qozonga qo'yilgan suvga beriladi. Bu suv avval qozongacha ekonomayzer orqali o'tish jarayonida ma'lum darajada isiydi (7.1-



7.1-rasm, v, g. Renkin siklining TS va TS diagrammalari.

rasm, v, g; 4—5 nuqtalar oralig'i). Asosiy issiqlik miqdori bug' generatoriga (5—6 nuqtalar oralig'i) kiritiladi va suv o'zining agregat holatini tezda o'zgartiradi, ya'ni bug'lanadi. Suvning bug'lanishi o'zgarmas bosim ostida kechadi, yutilgan q issiqlik hisobiga bug' o'z hajmini oltiradi. Bu qizdirilgan bug'ning parametrlarini ish bajaradigan darajagacha yetkazish uchun qo'shimcha issiqlik miqdori qozon agregatining bug' qizdirgich qismi (c) ga kiritiladi (diagrammadagi 6—1 nuqtalar oralig'i). Bunda bug'ning temperaturasi, entalpiyasi va entropiyasi o'zgaradi. Natijada qizigan bug' o'ta qizdirilgan bug' holatiga o'tadi (7.1-rasm, b, v, g; 6—1 nuqtalar oralig'i). Sikl qaytadan takrorlanadi.

Renkin siklida suv bug'ining bajargan ishi son qiymati jihatidan 1—2—3—4—5—6—1 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'ladi. Suv bug'ining TS diagrammasida bug'ning absolut temperaturasi va entalpiyasi bilan uning entropiyasi orasidagi bog'lanish ifodalangan (7.1-rasm, b). Jarayonning TS diagrammasidan ko'rinib turibdiki, 1 kg bug' bajargan foydali ishning kattaligi Renkin siklining bajargan ishiga teng ekan. Bu foydali ishning qiymati PV diagrammasidagidek, TS diagrammasidagi yuzalar ayirmasidan aniqlanadi, ya'ni $A = 0a45612S10 - 0a32S10 = 356123$. Bunda $0a561S10$ yuza esa bug'ning kengaya boshlagan holatini, ya'ni 1 nuqta entalpiyasiga tengligini tavsiflaydi. Xuddi shunday $0a32S10$ yuza esa bug'ning kengayib bo'lgandan keyingi holatini, ya'ni 2 nuqta entalpiyasiga tengligini ifodalaydi. Shuning uchun 1 va 2 nuqtalar entalpiyalarining ayirmasi siklning bajargan ishiga teng (7.1-rasm, g) bo'ladi:

$$A_j = i_1 - i_2. \quad (262)$$

Demak, entalpiyaning o'zgarishi uchun 3 va 4 nuqtalar oralig'ida suvning hajmi o'zgarmasdan bosimi ortadi. Bu bosimning ortishiga sarf bo'lgan ish $d34ed$ nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'ladi. Bu ishni bosimlar ayirmasi orqali ifodalash mumkin:

$$A'_s = V_3(P_4 - P_3) \approx 0. \quad (263)$$

Ish A'_s ning qiymati asosiy ishga nisbatan juda kichik bo'lganligidan uni nolga tenglashtirish mumkin. Chunki $V_3 \approx 0$, ya'ni suv siqilganda o'z hajmini o'zgartirmaydi.

Shunday qilib, qozon qurilmasiga qaytarilgan kondensatga yangi issiqlik miqdori yana tashqaridan kiritiladi va suv shu issiqlik

hisobiga bug'ga aylanadi, so'ngra qizdirilgan va o'ta qizdirilgan bug'ga aylantirilib, bug' turbinasiga uzatiladi (4 va 1 nuqtalar oralig'i, 7.1-rasm, a). Bu nuqtalar oralig'ida bosim o'zgarmas, hajm esa o'zgaruvchan bo'ladi. Sikl bajargan ish ifodasi yuqorida keltirilgan bo'lib, u musbat va manfiy ishlarning algebraik yig'indisiga teng. Lekin bunday ideal sikl amalda bo'lmaydi.

Renkin siklining (ideal sikl) termik *fik* sikl bajargan ishni shu siklga kiritilgan issiqlik miqdoriga nisbatiga teng:

$$\eta_t = \frac{A_1}{q_1}. \quad (264)$$

Siklga keltirilgan issiqlik miqdori q_1 son qiymati jihatidan *TS* diagrammasidagi $S_2, 3, 4, 5, 1, S_1$ nuqtalar hosil qilgan yuzaga teng (7.1-rasm).

Kondensat (bug'-suv aralashmasi)ning qozon agregatiga kirishiga qadar uning entalpiyasi i_3 son qiymati jihatidan $0,03S, 0$ nuqtalar hosil qilgan yuzaga teng bo'ladi. Unda, suv bug'ini hosil qilish uchun sarf bo'lgan issiqlik miqdori 1 va 3 nuqtalar entalpiyalarining ayirmasiga teng bo'ladi, ya'ni

$$q_1 = i_1 - i_3. \quad (265)$$

Demak, siklning *fik* ni entalpiyalar ayirmalari nisbatlari ko'rinishida yozish mumkin:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3}. \quad (266)$$

Termodinamik jarayon 2 va 3 nuqtalar oralig'ida izobarik-izotermik bo'lganligi sababli shu nuqtalar temperaturalar, ya'ni $T_2 = T_3 = T_k$ kondensat temperaturasi tengligi va suvning issiqlik sig'imi $4,1868 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ekanligi asosida η_t ni quyidagicha yozish mumkin:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - 4,1868 T_k}. \quad (267)$$

Renkin siklida ish bajarib bo'lgan bug'da qolgan qoldiq issiqlik miqdorining 60—70% sovitkichga uzatiladi. Unda, qoldiq issiqlik miqdorining sovitkichga uzatishdagi *fik* 30—40% ga yaqin bo'ladi. Ma'lumki, siklida ishlaydigan qurilmalar va asbob-uskunalariga issiqlik sarflanadi. Takomillashgan zamonaviy bug' kuch qurilmalari o'ta murakkab bo'lishiga qaramasdan ularning *fik* 90—98% ga yetkazilgan.

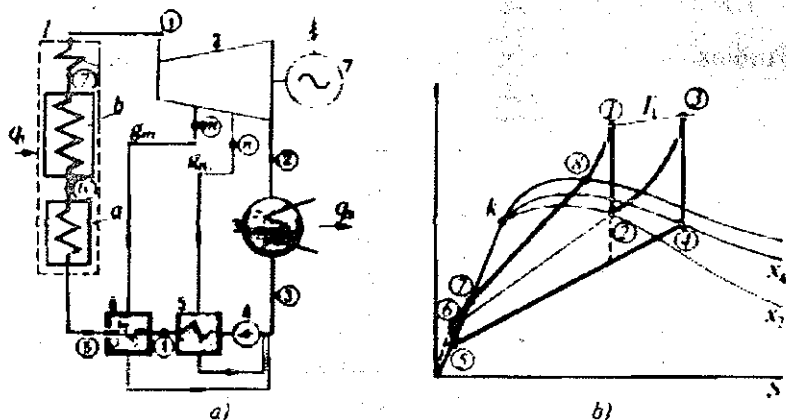
Bug' kuch qurilmalarida qo'llaniladigan turbinalar bug' issiqligidan o'z bosqichlarida foydalanish darajasiga qarab, bug'dagi ishga aylanmasdan qolgan issiqlik miqdoridan to'laroq foydalanish maqsadida regeneratsiya bo'lmasiga ega bo'lgan qurilmalar ham qo'llaniladi.

Bunday qurilmalarda suv bug'i turbinada ish bajarib bo'lgandan so'ng bug'ning ma'lum qismi turbinaning biror bosqichidan ajratib olinadi va qozon agregatiga uzatilayotgan sovuq suvni qizdirishda qo'llaniladi. Bunga **regeneratsiya usuli** deyiladi. Regeneratsiya (lot. *Regeneratio* — tiklash) — sovitkichga chiqib ketayotgan issiqlik miqdorini qaytadan yangi kiritilayotgan ish moddasiga (suv, bug'-suv aralashmasi, gaz yoki havo oqimi, yoqilg'i va yoqilg'i bilan havo aralashmasi) kiritishdan iborat bo'lgan usuldir (7.2-rasm).

Qurilmaning qismlarida kechadigan termodinamik jarayonlar Renkin siklidan mutlaqo farq qiladi. Shuning uchun regeneratsiyali bug'-kuch qurilmasi regeneratsiya siklining termik *fik* Renkin siklinikidan katta bo'ladi, ya'ni

$$\eta_{tr}'' > \eta_{tr}'$$

Demak, sovitkichga chiqariladigan issiqlik miqdoridan samaraliroq foydalaniluvchi regeneratsiyali bug' kuch qurilmasi-



7.2-rasm. Regeneratsiyali bug' kuch qurilmasi (a) va uning iS diagrammasi (b):

1 — qozon qurilmasi; 2 — bug' turbinasi; 3 — kondensator; 5 va 6 — regeneratsiya qurilmalari; 7 — elektr generatori; 4 — kondensat nasosi; a — ekonomayzer; b — bug' generatori; c — bug' qizdirgich.

Eslatma: doira ichidagi raqamlar — sikldagi ish jismi parametrlari o'lchangan nuqtalarning o'ri.

ning *fik* katta bo'ladi. Regeneratsiyali kuch qurilmasining *iS* diagrammasidagi (7.2-rasm, *b*) 1 va 2 nuqtalar oralig'iga mos keluvchi suv bug'i ish bajarganligi sababli uning entalpiyasi o'zgaruvchan va aksincha entropiyasi o'zgarib bo'ladi. Bajirilgan ish kattaligi son qiymati jihatidan 23456712 nuqtalar bilan chegaralangan yuzaga teng bo'ladi. Bu oraliqda ish moddasi (suv bug'i — termodinamik sistema) holati, entropiyasi va entalpiyasi o'zgaruvchan bo'ladi. Bunga asosiy sabab sistemaga (suv, bug'-suv kondensati, bug', qizdirilgan bug') tashqaridan ma'lum miqdordagi yuborilgan bug') tashqaridan ma'lum miqdordagi q_1' issiqlik miqdori kiritiladi va undan q_2' chiqariladi.

Demak, regeneratsiyali bug' kuch qurilmasining termik *fik* ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\eta'_i = \frac{A'_s}{q_1'} \quad (268)$$

bunda A'_s — siklning to'la bajargan ishi;

$q_1' = i_1 - 4,1868T_5$ — sistemaga kiritilgan issiqlik miqdori bo'lib, u entalpiyaning o'zgarishiga teng.

7.2. Oraliq bug' qizdirgichli bug' kuch qurilmasi

Turbina bosqichlarida bug' ish bajarib bo'lgandan so'ng uning namligi ortib ketadi. Bunda bug' parametrlarini ko'rsatkichlari pasayadi, ya'ni ish bajara olish xususiyati susayadi, uni rostlash hamda tiklash maqsadida, oraliq bug' qizdirgichlari qo'llaniladi. Bug' namligining ortib ketishi turbinaning yomon ishlashiga va uning qismlarini tezroq zanglab ishdan chiqishiga olib keladi. Bu kamchilikni tuzatish maqsadida birinchi turbinada ish bajarib namligi ortgan bug' qaytadan qozon agregatida joylashgan bug' qizdirgichga yo'naltiriladi va unda qizdirilib, quruqlik darajasi o'ttiriladi. Bu usulda ishlaydigan bug'-kuch qurilmasi (7.3-rasm, *a*) bitta o'qda joylashgan ikkita bug' turbinalar kaskadi hamda ikkilamchi bug' qizdirgich bilan boshqa turdagi bug' kuch qurilmalaridan farq qiladi.

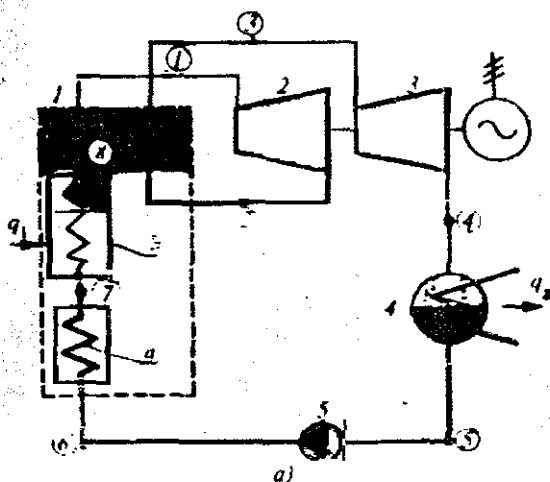
Bug'ni qaytadan qizdirib, uni takroran ishlatadigan bug'-kuch qurilmasining *PV* va *TS* diagrammalari yuqorida qarab chiqilgan sikllarnikiga o'xshash bo'lsa-da, ayrim o'zgarishlarga ega. Oraliq bug' qizdirgichli bug' kuch qurilmasi siklida sodir bo'ladigan termodinamik jarayonlarining *TS* diagrammasi 7.3-rasmda, *b* da keltirilgan. Siklning

TS diagrammasidan ko'rinadiki, 1 va 2, 3 va 4 hamda 5 va 6 nuqtalar oralig'ida, ya'ni birinchi va ikkinchi turbinalarda va nasosda, bug'ning entropiyasi o'zgarmas bo'ladi. Chunki siklning shu nuqtalariga mos keluvchi holatlarida sistemaga issiqlik keltirilmaydi. Diagramma tahlilidan shuni aytish mumkinki, 4 va 5, 5 va 1, 2 va 3 nuqtalar oralig'ida sodir bo'ladigan jarayonlarda termodinamik sistemaning entropiyasi va entalpiyasi o'zgaruvchan bo'ladi. Chunki sistemada ish bajarmasdan qolgan issiqlik miqdori sovittkichga chiqariladi (4–5 nuqtalar oralig'i) hamda sistemaga tashqaridan issiqlik miqdori (2 va 3 hamda 6 va 1 nuqtalar oralig'i) keltiriladi.

Bunday uslubda kechadigan siklning termik *fik* quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_t' = \frac{A_s'}{q_1'}, \quad (269)$$

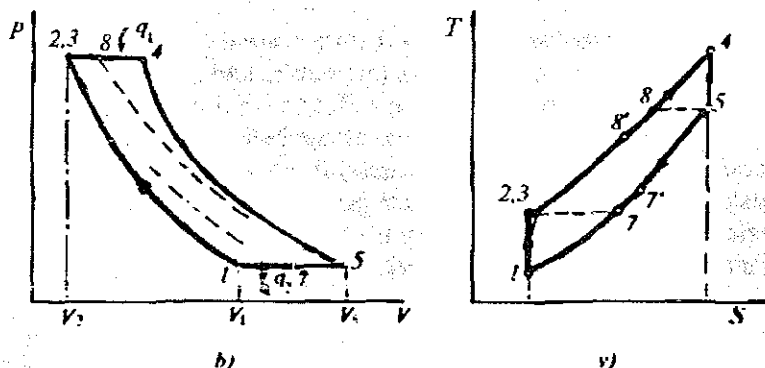
bunda $q_1' = (i_1 - i_5) + (i_3 - i_2)$ — ikkinchi marta bir kg bug' olish uchun bug'ni qizdirish davrida unga sarflangan issiqlik miqdori;
 $A_s' = (i_1 - i_2) + (i_3 - i_4)$ — siklning bajargan ishi.



7.3-rasm. Oralik bug' qizdirgichli bug' kuch qurilmasining sxemasi:

1 — qozon agregati; 2 va 3 — bug' turbinalari; 4 — bug' kondensatori;
 5 — nasos; a — ekonomayzer; b — bug' generatori; c — birinchi bug' qizdirgich;
 d — ikkinchi bug' qizdirgich.

Eslatma: doira ichidagi raqamlar — sikldagi ish jismi parametrlari o'lchanadigan nuqtalarning o'ri.



7.3-rasm. Oraliq bug' qizdirgichli bug'-kuch qurilmasi siklining PV (b) va TS (v) diagrammalari.

Bunday turdagi bug' kuch qurilmasining ishi oddiy siklnikiga nisbatan katta bo'ladi, ya'ni $\eta_i > \eta_r$.

Diagrammadan ko'rinib turibdiki, bug' adiabatik kengayganda (1—2 va 3—4 nuqtalar oralig'i) va kondensat siqilganda (5 va 6 nuqtalar oralig'i) sistemaga tashqaridan issiqlik miqdori keltirilmagan bo'lsa ham turbinalarda musbat, nasosda manfiy ishorali ish bajarilar ekan. Shuning uchun ikkala turbinada adiabatik kengayib o'tgan bug' entalpiyalari o'zgarishlarining yig'indisi nasosdan o'tadigan kondensat entalpiyalari o'zgarishidan katta bo'ladi. To'la foydali ishni 1—2 va 3—4 nuqtalar oralig'ida bug'ning kengayishida bajargan ishga tenglashtirish mumkin va bu ish oddiy siklda 1 va 2 nuqtalar (7.1-rasm, b) dagi PV diagramma) oralig'idagi ishdan katta. Shuning uchun oraliq bug' qizdirish uslubiga ega bo'lgan bug' kuch qurilmalari energetikada keng qo'llaniladi.

7.3. Binar siklli bug' kuch qurilmasi

Ish jismi sifatida ikkita mutlaqo bir-biriga aralashmaydigan moddadan foydalaniladigan va mustaqil sikllarga ega bo'lgan issiqlik-kuch qurilmasi *binar* (lot. *binarus*-qo'sh) *siklli kuch qurilmasi* deyiladi. Bunga simob-suv binar kuch qurilmasi misol bo'la oladi (7.4-rasm, a). Qurilmaning birlamchi berk konturida ish jismi sifatida simob olingan, maxsus konstruksiyadagi qozon, turbina va kondensator qo'llanilgan.

Simob zaharli modda.uning kritik nuqtasining temperaturasi $T=1673,16\text{ K}$, shu nuqtadagi bosim $P=980 \cdot 10^5\text{ Pa}$. Issiqlik almashtirgichda (kondensator) simob yuqori temperaturada ham to'yinish holatiga ($T=498,36\text{ K}$) o'ta oladi. Suv bunday xossaga $T=306,04\text{ K}$ da o'tadi. Cuv bug'ining qaytadan qizdirish temperaturasi $T=873,16\text{ K}$, bunday yuqori temperaturalargacha qizdirishga o'tga chidamli materiallar ham bardosh bera olmaydi. Oqibatda, suv bug'ining yuqori temperaturalaridan foydalanib bo'lmaydi. Bu kamchilikni yo'qotish maqsadida binar siklli kuch qurilmalaridan foydalaniladi. Sxemadan ko'rinadiki (7.4-rasm, a), issiqlik hirlamchi berk konturdan (ish jismi — simob) ikkilamchisiga (ish jismi — suv bug'i) maxsus qurilma — simob kondensatorida regenerativ issiqlik almashinuvi orqali keltiriladi. Bunda simob kondensatori to'yingan suv bug'ining qozoni vazifasini bajaradi. To'yingan suv bug'i simobli kondensatorda hosil bo'lgandan so'ng, yana qo'shimcha simobli turbina konturidagi qozon qurilmasining bug' qizdirgichida qizdirilib, bosimi va temperaturasi ish bajaradigan qiymatlargacha yetkaziladi, keyin ikkinchi berk konturdagi bug' turbinasiga uzatiladi. Turbinada, bug' kengayib ish bajarish jarayonida, issiqlik almashinuvi hisobiga suyuqlikka aylanadi. Hosil bo'lgan suv, ya'ni kondensat, suv nasosi yordamida simobli kondensatorga haydaladi. Unda, bug'lanib bo'lgandan so'ng bug' qizdirgich orqali bug' turbinasiga uzatiladi. Sikl takrorlanadi.

Binar siklli kuch qurilmasining TS diagrammasi (7.4-rasm, b) dan ko'rinadiki, birinchi berk konturning bajargan ishi 12341 nuqtalar hosil qilgan yuzaga son qiymati jihatidan teng. Simobning termodinamik parametrlari suv bug'inikiga nisbatan yuqori, masalan, nuqta 3 ning absolut temperaturasi 3' nuqtanikidan katta, ya'ni $T_3 > T_{3'}$ bo'ladi. Siklda simob bug'i $T_1 - T_3$ temperaturalar, suv bug'i esa 1'—2' nuqtalar oralig'ida ish bajaradi. Xuddi shunday 1 kg suv bug'ining bajargan ishi son qiymati jihatidan 3'4'5'1'2' nuqtalar hosil qilgan yuzaga teng. Masalan, Karno sikli nuqtayi nazaridan qaralsa, simob bug'i shu temperaturalar o'zgarishida bajarilgan ish son qiymati jihatidan 3, 4, 1, 2 nuqtalar hosil qilgan to'rtburchak yuzaga teng bo'lar ekan. Renkin sikllining Karno sikliga yaqinlashuvini bilish uchun goho shu sikllarda bajarilgan ishlarning nisbatlari aniqlanadi. Bu nisbatlarni siklning **karnolashtirish koeffitsienti** deyiladi:

$$\alpha = A_s / A_s^k, \quad (270)$$

bunda A_s va A^k — Renkin va Karno sikllarining ishlari.

1 kg suv bug'ini simob qozonining bug' qizdirgichi VII da qizdirish uchun sarf bo'lgan issiqlik miqdori simob-suv binar kuch qurilmasidagi ish moddalarining 1—3 (simob) hamda 1'—5' (suv) nuqtalardagi entalpiyalarining ayirmalari yig'indisi ko'rinishida ifodalanadi:

$$q_i^{bin} = m(i_1 - i_3) + (i_1' - i_5'). \quad (271)$$

Binar siklda bajarilgan ishni simob va bug' turbinalarida ish jismlarining adiabatik kengayishidagi entalpiyalari o'zgarishlarining yig'indisi shaklida ifodalash mumkin:

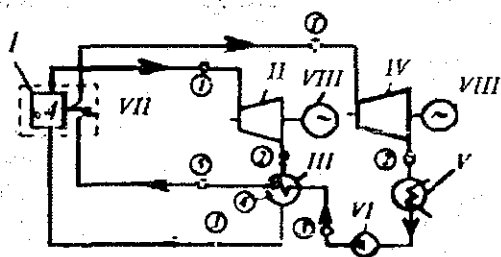
$$A_s^{bin} = m(i_1 - i_2) + (i_1' - i_2'). \quad (272)$$

Binar siklning termik *fik* quyidagiga teng, ya'ni

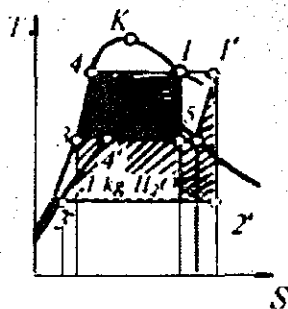
$$\eta_t^{bin} = \frac{A_s^{bin}}{q_i^{bin}}. \quad (273)$$

Binar siklning termik *fik* boshqa sikllarnikidan katta bo'ladi.

$$\eta_t^{bin} > \eta_t.$$



a)



b)

7.4-rasm. Binar (simob-suv) bug' kuch qurilmasi (a) va siklining TS diagrammasi (b);

I — qozon qurilmasi; II va III — simob turbinalari va kondensatori;
IV — bug' turbinalari; V — kondensator; VI — kondensat nasosi;
VII — bug' o'ta qizdirgichi; VIII — elektr generatori.

?

1. Bug' kuch qurilmalari qanday inshoot va uning tarkibiga nimalar kiradi?
2. Bug' kuch qurilmalarining ideal sikli deyilganda qanday sikl tushuniladi? Ideal siklning PV va TS diagrammalari qanday termodinamik izojarayonlardan tashkil topadi?
3. Ideal siklning PV va TS diagrammalari qanday quriladi va ulardan siklning bajargan ishi qanday topiladi?
4. Renkin siklining fik ni hisoblash formulasini yozing.
5. Bug' kuch qurilmalari bir-biridan nimalari bilan farq qiladi?
6. Binar siklli kuch qurilmasining birinchi berk konturida ish moddasi sifatida qanday suyuqlik ishlatilgan va nima uchun bu usul tanlangan?
7. Binar siklli kuch qurilmasining fik ideal siklli bug' kuch qurilmasinikidan nima bilan farq qiladi va ularning PV va TS diagrammalarining qanday o'xshashliklari bor?
8. Karnolashtirish koeffitsienti nima?

7.4. Issiqlik elektr stansiyalari

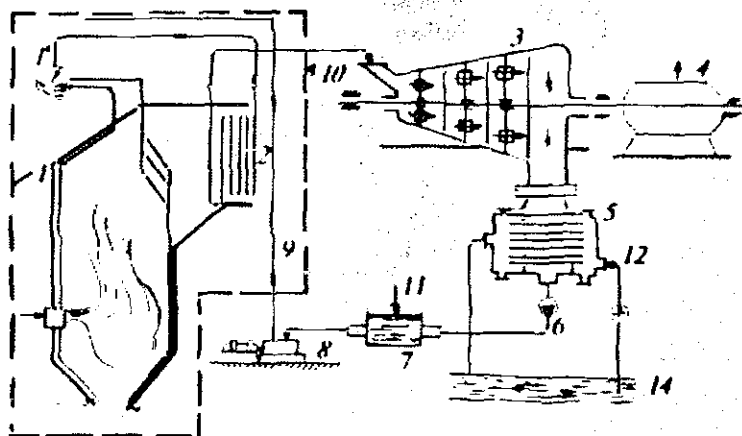
Organik yoqilg'i yonganda ajraladigan issiqlik energiyasini o'zgartirish yo'li bilan elektr va issiqlik energiyasini ishlab chiqaradigan inshootni *issiqlik elektr stansiyasi* deyiladi. Issiqlik elektr stansiya (IES)si ish yoqilg'isining turiga ko'ra: qattiq, suyuq, gazsimon va aralash yoqilg'ilarda ishlaydigan stansiyalarga; issiqlik dvigatellarining turiga ko'ra: bug' turbinali va ichki yonuv (dizel) dvigatelli stansiyalarga; iste'molchiga uzatadigan energiyasi turiga qarab: kondensatsiyali elektr stansiyalari va issiqlik elektr markazlariga; quvvat berish uslubiga muvofiq: asosiy ta'minlovchi (yil davomida uzluksiz ishlaydigan) va tig'iz (energiya iste'moli ortganda keskin ishlaydigan) stansiyalarga bo'linadi. IES lariga atom, gelio, geotermik (yerning ichki issiqligidan foydalanadigan) elektr stansiyalarni ham shartli ravishda kiritish mumkin.

Mamlakatni elektrlashtirishda IES lar asosiy elektr manbayi hisoblanadi va ular aholi zich yashaydigan, og'ir va yengil sanoat, metallurgiya kombinatlari joylashgan joylarda ko'proq quriladi. Hozir quvvati 2,4—3,6 GW dan yuqori bo'lgan IES lar qurilmoqda. IESlarga dunyoda ishlab chiqariladigan elektr energiyasining taqriban 80% to'g'ri keladi. O'zbekistondagi 7 ta IES (Sirdaryo — 3000 MW, Yangi Ohangaron — 2100 MW, Eski Ohangaron — 600 MW, Toshkent — 1950 MW, Navoiy—1250 MW, Taxiatosh — 1250 MW, Tolimarjon — 3200 MW hamda 2 ta IEM (Farg'ona — 400 MW va Muborak — 120 MW) mamlakatning jami elektr energiyasining 85 % ishlab chiqariladi.

7.4.1. Kondensatsiyali elektr stansiyasi

Elektr stansiyasi faqat elektr energiyasini ishlab chiqarishga mo'ljallangan bo'lsa uni *kondensatsiyali elektr stansiyasi* deb yuritiladi. KES iste'molchi bilan faqat elektr energiyasi orqali bog'langanligi tufayli, aholi zich yashaydigan joylar, sanoat markazlari va yoqilg'i qazib olinadigan konlar yaqinida quriladi. Tuman uchun mo'ljallangan KES odatda GRES (davlat rayon elektr stansiyasi) deb yuritiladi. GRES lar ko'plab qurilgan bo'lib, hozirgi kunda IES ishlab chiqaradigan elektr energiyasining 65—70% ularga to'g'ri keladi. GRESlarning quvvati juda (1 GW dan ortiq) katta bo'lib, ular asosan elektr energiyasini ishlab chiqaradi. GRES hozirgi kunda mamlakatdagi va mamlakatlararo elektr halqasidagi elektr stansiyalari bilan birgalikda ishlaydigan KESdir.

GRESlar o'z ehtiyojlari uchun va ayrim holatlarda aholiga issiqlik energiyasini uzatadi. GRES lar bug'ining bosimi kritik (22 MPa) bosimdan yuqori bo'ladi. Quvvati 250—300 MW bo'lgan turbinalar kritik bosimdan yuqori bo'lgan bosimlar (24 MPa) da ishlaydi. Bug'ning boshlang'ich bosimi 13—14 MPa, temperaturasi



7.5-rasm. KES ning sxematik tasviri:

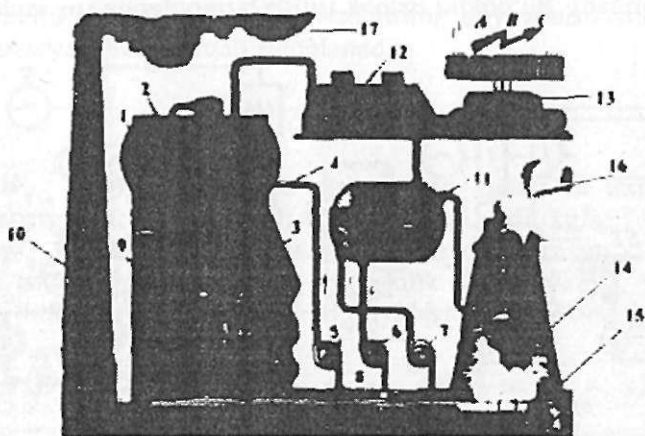
1 — qozon agregati; 1' — bug' qozoni; 2 — bug' qizdingich; 3 — bug' turbinasi; 4 — elektr generatori; 5 — kondensator; 6 — kondensat nasosi; 7 — suv idishi; 8 — suv nasosi; 9 — suv quvurlari; 10 — elektr stansiyasidagi bug' va energiya isrofi; 11 — isrof bo'lgan suv o'rnini to'ldiruvchi suv quvuri; 12 — kondensatorga uzatiladigan sovuq suv quvuri; 13 — markaziy nasos; 14 — suv havzasi.

$T=830-850\text{ K}$ bo'ladi. Takomillashgan KESlarda bug'ning parametrlari $P=16-25\text{ MPa}$, $T=800-900\text{ K}$ ga yetadi. GRES lar asosan blokli bo'ladi, ya'ni bug' generatori va turbinasi elektr generatori bilan birgalikda **energiya bloki** deb yuritiladi (7.5 va 7.6-rasmlar). KESlar issiqlik elektr markazlariga nisbatan ancha sodda va iqtisodiy jihatdan samaralidir. KESning o'ziga sarflanadigan (elektr dvigatellar, nasoslar va sh.k. yordamchi asbob-uskunalarni yuritishga) energiyani hisobga olmagandagi **brutto** fik quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_{br} = \frac{W_e}{q_c} = \frac{W_e}{G q_{q,yo}^{yo}} \quad (274)$$

bunda W_e — vaqt birligida elektr generatori ishlab chiqargan energiya, kJ/s; q_c — vaqt birligida stansiya o'ziga sarflagan issiqlik miqdori, kJ/s; G — vaqt birligidagi yoqilg'i sarfi, kg/s; $q_{q,yo}^{yo}$ — yoqilg'ining quyi yonish issiqligi, kJ/kg.

Amalda, ishlab chiqilgan elektr energiyasi kW. soatlarda o'lchanishi (1 kW. soat = 3600 kJ) e'tirof etilgan holda η_{br} ni quyidagicha ifodalash mumkin:



7.6-rasm. Kondensatsiyali issiqlik elektr stansiyasining sxematik tasviri:

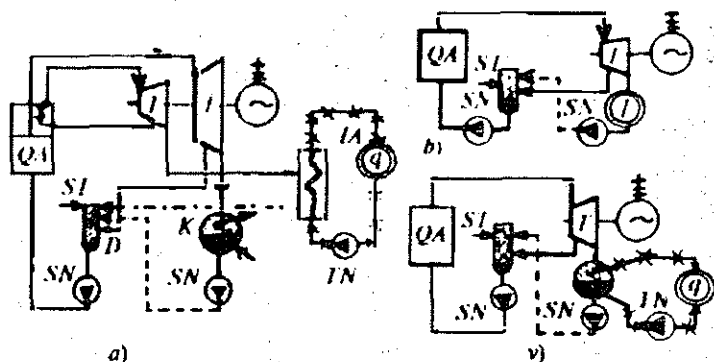
1 — qozon agregati; 2 — o'ta bug' qizdirgich ekran-quvur; 3 — o'txona ekran-quvurlar dastasi; 4 — kondensatni uzatuvchi (qozonni suv bilan ta'minlovchi) quvur; 5, 6 va 7 — kondensat uzatuvchi, qabul qiluvchi va sovitkich suv haydovchi nasoslari; 8 — tutun gazlari; 9 — mo'ri; 10 — kondensator; 11 — bug' turbinasi; 12 — elektr generatori; 13 — sharshara-suv sovitkich (gardinya); 14 — sovituvchi suv; 15 — suv bug'i; 16 — tozalangan tutun gazlari.

$$\eta_{br} = \frac{16(M)}{q_c} \cdot W_e. \quad (275)$$

Zamonaviy KESlarning *fik* 30% atrofida bo'lib, juda ko'p energiya kondensatordan sovitkichga (daryo, hovuz, dengiz va boshqa suv havzasiga) chiqariladi. Ayrim KESlarda isrof bo'ladigan issiqlikni regeneratsiya bo'lmasiga o'tkazish yo'li bilan undan samarali foydalaniladi, ya'ni regeneratsiyalangan issiqlik aholiga, sanoatga va boshqa iste'molchilarga uzatiladi.

7.4.2. Issiqlik elektr markazi

Issiqlik elektr markazi (IEM) bir vaqtning o'zida issiqlik va elektr energiyalarini ishlab chiqaradigan stansiyalar bo'lib, ular katta sanoat markazlarida va shaharlarda quriladi (7.7-rasm). IEMlarida yoqiladigan yoqilg'i issiqligidan ikki xil (issiqlik va elektr) energiya ishlab chiqarish yo'li bilan ulardan samarali foydalaniladi. Bug' turbinasida ish bajarib bo'lgan bug'dagi qoldiq issiqlik miqdoridan issiqlik almashinuvi yoki ma'lum issiqlik miqdorini qozon agregatiga qaytarish hamda regeneratsiyalash orqali undan to'laroq foydalaniladi. Bu qoldiq issiqlik isitish tarmoqlarida suv va havo-



7.7-rasm. Issiqlik elektr markazlarining sxemalari:

a) tarmoqdagi suvni isitish uchun turbinaning bug'idan foydalanadigan; b) qarama-qarshi bosimli turbinaga qo'llanadigan; v) turbinasi kuchsiz vakuum hosil qiluvchi.

QA — qozon agregati; T — bug' turbinasi; K — kondensator; D — deaerator isitkich; q — issiqlik iste'molchisi; I — texnologik bug' iste'molchisi; TN va SN — tarmoq va suyuqlik nasosi; ST — suv ta'minoti; ~ — o'zgaruvchan tok generatori; IA — issiqlik almashtirgich; — — kondensat; - - - - iste'moldagi bug' va suv; * * * — tarmoq suvi.

ni isitishga sarflanadi. Ayrim hollarda kondensatorni issiqlik almashtirgich apparati sifatida qo'llanilishi orqali isitish tarmoqlaridagi suv qizdiriladi. Kondensatorda issiqlik almashinuvi orqali qizdirilgan suvning temperaturasi 350—360 K ga yetadi. Bunday holatlarda bug' turbinasida sezilarli darajada vakuum hosil bo'lmaydi. Issiq suvga va bug'ga iste'molchilarda talab katta bo'lganida kondensator sovitkich sifatida ishlatilmaydi.

Turli xildagi issiqlik almashish asbob (suv isitkich, kalorifer, bug'latgich, avtoklav)lari kondensator vazifasini bajaradi va ularda hosil bo'lgan kondensat imkoniyati boricha IEM ga qaytariladi. Iste'molchilarning issiqlikka bo'lgan talabining 90% IEM zimmasiga tushadi. Shuning uchun ular sanoat markazlari va aholi zich joylashgan manzillarda quriladi Markazlashtirilgan issiqlik va elektr energiyasi bilan ta'minlash *issiqlik ta'minoti (teplofikatsiya)* deyiladi.

IESlarda ishlab chiqariladigan issiqlik va elektr energiyaning 30% dan ortig'ini IEM lari beradi.

Katta sanoat markazlaridagi va metallurgiya kombinatlaridagi umumiy issiqlik energiyasining taxminan 90% ni IEMlari beradi. IEM ning *fik* ishlab chiqarilgan elektr va issiqlik energiyalari yig'indisining yoqilg'i sarfini shu yoqilg'ining quyi yonish issiqligi ko'paytmasiga nisbati orqali ifodalanadi:

$$\eta_i^{iem} = \frac{W_{i, ch} + q_{i, ch}}{G^{yo} \cdot q_{q, i, b}^{yo}},$$

bunda $W_{u, ch}$ va $q_{u, ch}$ — ishlab chiqarilgan elektr va issiqlik energiyalari miqdori, kJ; G^{yo} — yoqilg'i sarfi, kg/s; $q_{q, i, b}^{yo}$ — yoqilg'ining quyi issiqlik berish xususiyati.

IEM ishlab chiqargan elektr va issiqlik energiyalariga, mos ravishda, uning brutto η_i^e va η_i^t ni quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_i^e = \frac{W_{i, ch}^y - q}{G_{e, ch}^y \cdot q_{q, i, b}^{yo}}; \quad \eta_i^t = \frac{W_{i, ch}^y - q}{G_{t, ch}^y \cdot q_{q, i, b}^{yo}}, \quad (276)$$

bunda $W_{u, ch}^y$ — yillik ishlab chiqarilgan elektr energiyasi miqdori, kJ; G_e^y va G_t^y — yil davomida elektr va issiqlik energiyalarini ishlab chiqarishga sarflangan yoqilg'i miqdorlari.

$G^y - G_i^y = G_e^y$ — IEM ishlatgan yillik yoqilg'i miqdoridan issiqlik ishlab chiqarishga sarflagan qismining ayirmasi bir yilda ishlab chiqarilgan elektr energiyasiga sarflangan yoqilg'i miqdorini

heradi. Bunda qozon agregatiga keltirilgan yoqilg'i hosil qilgan issiqlik to'raligicha foydalanilgan, deb faraz qilinadi.

IEMning *netto fik* ni aniqlashda, stansiyaning issiqlik va elektr energiyalari bilan ta'minlash uchun zarur bo'lgan energiya ham hisobga olinadi.

Zamonaviy IEMlari 1kW·soat energiya ishlab chiqarishga ~350 g yoqilg'i sarflaydi. Shuning uchun ishlab chiqariladigan 1 kW·soat elektr energiyasining tannarxi mamlakat iqtisodiyoti va rivojlanish darajasiga qaraib turlicha bo'lishi mumkin.

Xulosa qilib aytganda, IESlar mamlakatni elektrlashtirishda yoqilg'idan to'g'ri foydalanib elektr va issiqlik energiyalarini ishlab chiqarishda asosiy manba bo'lib qoladi.

IESlardan chiqayotgan chiqindilar tabiatga ma'lum darajada zarar ham keltiradi. Tutun gazlari tarkibidagi zaharli kimyoviy birikmalar atmosfera havosini ifloslantiradi. Bugungi kunda tejamli, ekologik jihatdan toza, takomillashgan qurilmalar loyihalanib qurilmoqda.

Nazorat savollari

?

1. Issiqlik elektr stansiyasi qanday turdagi stansiyalarga mansub va energiya ishlab chiqarish bo'yicha qanday turlarga bo'linadi?
2. Kondensatsiyali va issiqlik elektr markazi turlaridagi issiqlik elektr stansiyalari bir-biridan nimalar bilan farq qiladi?
3. IESlarining turbinalari qanday bosim va temperaturali bug'dan foydalanib ishlaydi? Issiqlik ta'minoti nima?
4. Issiqlik elektr markazi necha turga bo'linadi? IEM ning *fik* qanday ko'rsatkichlarga bog'liq va u qanday formula bilan hisoblanadi?
5. Brutto va netto *fik* qanday hisoblanadi?
6. O'zbekistonda ishlayotgan IESlarining soni qancha va ular umumiy elektr energiya-ning necha foizini ishlab chiqaradi?

7.5. Magnitogidrodinamik generator

Magnitogidrodinamik (MGD) generator issiqlik energiyasini bevosita (aylanuvchi qismlarsiz to'g'ridan to'g'ri) elektr energiyasiga aylantiruvchi qurilma. MGD generatori (7.8-rasm) quyidagi qismlardan tuzilgan: diffuzor, soplo, elektrodlar, magnit maydoni hosil qiluvchi tashqi induktiv g'altaklar va ish jismi (elektrolit, suyuq metall, mutlaqo ionlashgan gaz oqimi — plazma). MGD generatorining ishlash tartibi ish jismining o'zgarmas magnit maydoni kuch chiziqlariga ko'ndalang harakatlanishi natijasida

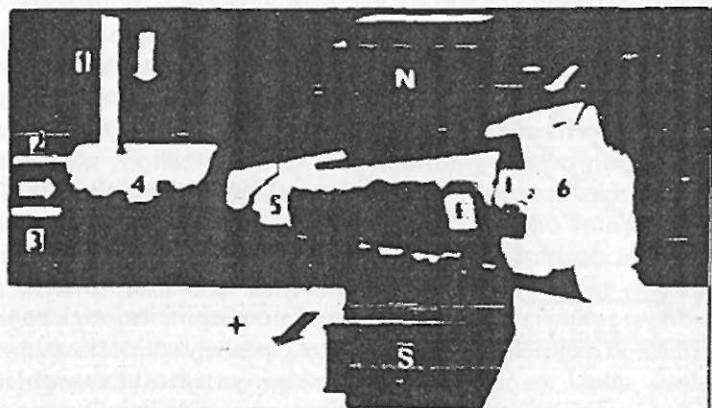
plazma ipida e. y. k. ning induksiyalanishi elektromagnit induksiya qonuniga va plazma zarralarining shu maydonda og'ishi hamda elektrod'larga o'z zaryadini berishi hisobiga shu elektrodlar orasida potensiallar ayirmasi hosil bo'lishiga asoslagan. Bunday qurilmani birinchi marta 1832-yili Maykl Faradey (1791—1867) ishga tushirishga harakat qilgan. Faradey Temza daryosiga (London shahridagi Vaterloo ko'prigi yaqinida) ikkita elektrod tushiradi va daryoning sho'rroq suvidagi ionlar hisobiga elektrodlar orasida elektr yurituvchi kuch hosil qilishga harakat qiladi. Ammo tajriba natijasiz tugaydi. Bu muammo bilan ko'pgina olimlar, muhandislar shug'ullanishgan.



Maykl Faradey

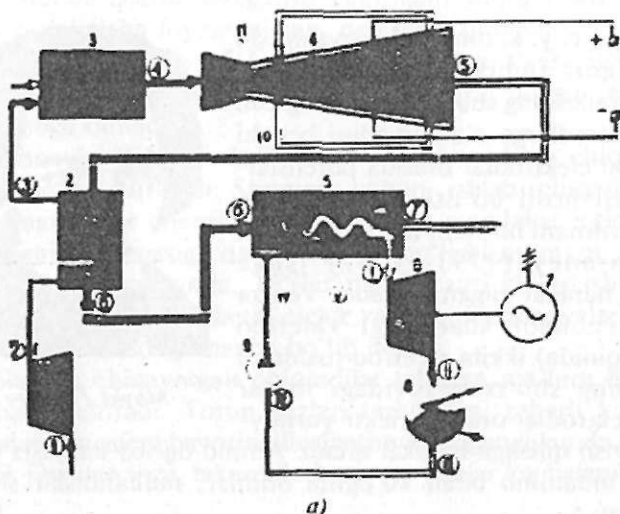
Issqlik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantirish ikki yo'nalishda bormoqda:

a) yuqori temperaturali ish jismining issqlik energiyasini elektr energiyasiga (qozon qurilmasi, elektr generatori ishlatmasdan) aylantirish;



7.8-rasm. MGD generator qurilmasining tasviri:

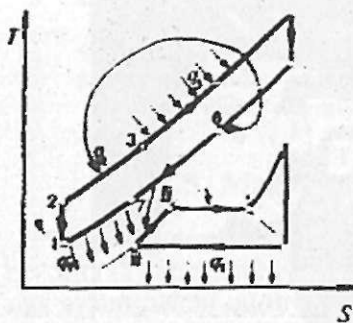
1 — issiq havo oqimi; 2 — metall bug'ini purkash kanali; 3 — yonuvchi gaz yoki ish yoqilg'isi; 4 — yonish kamerasi; 5 — plazma; 6 — chiqarish kanali; E_1 va E_2 — elektrodlar; N , S — elektromagnit qutblari.



7.9-rasm, a. MGD generator qurilmasining ochiq sxemasi:

1 — havo kompressor; 2 — issiqlik almashtirgich; 3 — yonish kamerasi; 4 — MGD generator; 5 va 6 — bug' generatori va turbinasi; 7 — elektr generatori; 8 — kondensator; 9 — kondensat nasosi; 10 — magnit maydoni hosil qiluvchi cho'lg'am; 11 — elektrodlar.

Eslatma: doira ichidagi raqamlar ish jismining jarayonlardagi parametrlari o'lchanadigan nuqtalari o'tni.



7.9-rasm, b. MGD generator qurilmasi(ochiq sxemasi) siklidagi jarayonning TS diagrammasi.

b) ish jismining issiqlik, kimyoviy, yadro, termoyadro, yorug'lik energiyalarini fizika qonunlari asosida elektr energiyasiga aylantirish.

Termojuftlar, elektrolitli akkumulator, boshqariladigan termoyadro sintez reaksiyasi amalga oshiriladigan qurilma, fotoelementlar, fotoqarshiliklar, elektron lampalar, muayyan o'tkazuvchanlikdagi yarimo'tkazgichli quyosh batareyalarida issiqlik energiyasi bevosita elektr energiyasiga aylantiriladi. Issiqlik energiyasini elektr energiyasiga mashinasiz aylantirishda hamma holatlarda

ham yuqori temperaturali issiqlik manbayi zarur bo'lmasa-da, lekin sovitkich mavjud bo'lishi shart.

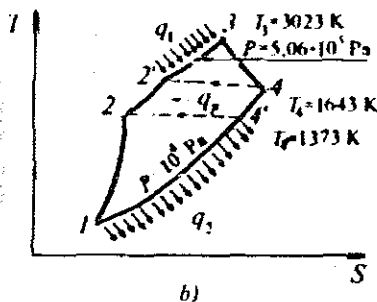
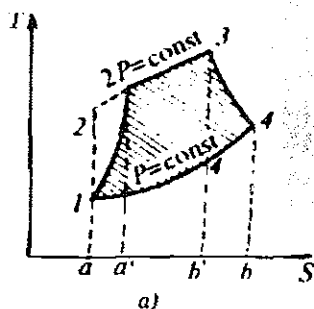
Ma'lumki, mashina yordamida (elektr generatori) elektr energiyasini hosil qilishda o'zgarmas magnit maydonida magnit kuch chiziqlariga perpendikular ravishda induktivlik g'altagi (rotor cho'lg'amlari) aylanma harakatlanadi.

Mashina ishtirokisiz elektr tokini hosil qilishda aylanadigan induktivlik g'altagi qo'llanilmaydi, uning o'rniga to'g'ri oqimli ish moddasi (ionlashgan gaz — plazma) magnit maydonidan o'tkaziladi (7.9-rasm, a).

MGD generator qurilmasida ishlatiladigan ish moddasi va generatorning qurilishiga ko'ra, ular ochiq va berk sxemali bo'ladi (7.9 va 7.11-rasmlar).

Ochiq sxemali MGD generator qurilmasi (7.9-rasm, a) havo kompressori 1, issiqlik almashtirgich-regenerator 2, yonish kamerasi 3, MGD generator 4, bug' generatori 5, bug' turbinasi 6, kondensator 8, kondensat nasosi 9, elektr generatori 7, elektromagnit cho'lg'amlari 10 va hoshqa yordamchi qismlardan tashkil topgan.

MGD generator qurilmasi(ochiq sxemasi)ning ish siklidagi termodinamik jarayonlarni qarab chiqamiz. KompRESSORga so'rilgan atmosfera havosi unda adiabatik siqiladi. Termodinamikaning birinchi qonuniga muvofiq, kompressorda siqilgan havo ichki energiyasining o'zgarishi hisobiga uning parametrlari P , V , T o'zgaradi. Bu isigan havo issiqlik almashtirgichda yanada qizdirilib yonish kamerasiga uzatiladi. Bu qizdirilgan havoga yoqilg'i purlaladi va kuchli portlab yonish sodir bo'ladi. Ionlar oqimini hosil qilish uchun ish yoqilg'isi o'ta yuqori temperaturali maxsus yonish kamerasida yoqiladi. Yonish mahsulotining temperaturasi 2000—2300 K ga yetadi. Bu temperaturadagi yonish mahsuloti tarkibida ionlashgan zarralar miqdori uncha ko'p bo'lmaydi. Ionlar konsentratsiyasini oshirish maqsadida unga osonroq ionlashadigan qo'shimchalardan kaliy yoki seziiy tuzi (1—2%) qo'shiladi. Natijada yuqori temperatura ostidagi yonish mahsuloti tarkibidagi neytral gaz zarralari jadalroq ionlashadi. Bu ionlashgan oqim MGD generator diffuzoriga yo'naltiriladi (7.9-rasm, a). Unda, ionlashgan oqim zarralarining harakati tashqi magnit maydoni ta'sirida tezlashadi va elektrod'larga og'ib zaryadini berib, tezda adiabatik kengayadi. Zaryadli zarralar (ionlar) oqimi ta'sirida elektrod'larda paydo bo'lgan tok elektrodlar qisqichlari orqali foydalanuvchiga



7.10-rasm. Ochiq (a) va berk (b) sxemali MGD generator qurilmasining real sikllarining TS diagrammalari.

uzatiladi. Hosil bo'lgan elektr tokining kattaligi plazma (yunon. — *plasma* — *yasalgan, shakllangan*) oqimidagi zaryadli zarralar soniga, ular zaryadining qiymatiga, tezligiga, tashqi magnit maydoni induksiyasi vektori kattaligiga bog'liq bo'ladi.

MGD generator kanalida plazma oqimining kengayishi adiabatik bo'lsa-da, ish jismi kuchli elektr o'tkazuvchanligiga egaligi bilan bug'ning kengayishidan farqlanadi. Plazmaning elektr o'tkazuvchanligi oqimdagi ionlar soni orishi bilan orib boradi, masalan, $\alpha = 10^{-3}$ bo'lganda elektr o'tkazuvchanlik to'la o'tkazuvchanlikning yarmiga teng bo'ladi va $\alpha = 10^{-2}$ da bu qiymat 90% ga yaqinlashadi.

MGD generator qurilmasi siklidagi jarayonlar diagrammasidan ko'rinadiki (7.9-rasm, b), sikl ikkitadan adiabat (1—2 va 4—5 nuqtalar oralig'i) va izobaralardan (2—3—4 va 5—6—7—1 nuqtalar oralig'i) tashkil topgan bo'lib, siklga tashqaridan issiqlik miqdori kiritilmasdan avval, ish moddasi ichki energiyasining o'zgarishi (siqilish) hisobiga yonish amalga oshadi.

q_2 yonish mahsuloti tarkibidagi tashqariga chiqarilayotgan qoldiq issiqlik miqdorining bir qismi bo'lib, u regeneratsiya usuli bilan yana ishchi moddaga (yangi siqilgan havo) qisman qaytariladi va uning holat parametrlarini o'zgartiradi (7.9-rasm, b. 5—6 nuqtalar oralig'idan 2—3 nuqtalar oralig'iga issiqlik o'tkaziladi). Shunda ish moddasining hajmi $P = \text{const}$ ostida ortadi. Siqilishda ma'lum darajada qizigan va regeneratorda qo'shimcha qizdirilgan havo yonish kamerasiga uzatiladi va shu paytda kameraga yoqilg'i purkaladi. Yonish kamerasida o'zgarmas bosim ostida kuchli kimyoviy reaksiya yuz beradi (ya'ni q_2 kiritiladi) va yonish mahsuloti yetarli darajada ionlashgan gaz oqimiga aylanadi. Bosim $P = \text{const}$ da yuqori tem-

peraturali gaz oqimi MGD generator kanali orqali o'tayotganda adiabatik kengayadi (4—5 — nuqtalar oralig'i) va tarkibidagi zaryadli zarralar (ionlar) magnit maydoni qutblari tomonida joylashgan elektrod'larga og'ib, ularga o'z zaryadlarini berishi hisobiga elektrod'larda zaryad to'planadi. Natijada elektrod'lar oralig'ida potentsiallar ayirmasi hosil bo'ladi.



Nernst Valter

Ionlashgan gaz-plazma ish bajarib bo'lgandan so'ng yonish mahsulotining neytral oqimiga aylanadi. Ammo uning tarkibidagi zarralarning kinetik energiyasi, ya'ni temperaturasi juda yuqori bo'ladi, chunki ular faqat zaryadini berish vaqtida o'z temperaturasini ozroq pasaytiradi, xalos. Siklning *fik* ni o'rttirish uchun shu issiqlik miqdoridan samarali foydalanish zarur. Buning uchun issiq gaz oqimi avval regeneratordan, so'ngra bug' generatoridan o'tish jarayonida, qoldiq issiqlik miqdorining ma'lum qismini issiqlik almashinish yo'li bilan siqilgan havoga va bug' kuch qurilmasi sikliga o'tkazadi. Shunda ish jismi aralashmasining temperaturasini yana ham o'rttiradi va berk siklli bug' kuch qurilmasida qo'shimcha elektr va issiqlik energiyasi ishlab chiqaradi. Bu esa, MGD generator qurilmasining umumiy *fik* ni o'rttiradi. Faqat MGD generatorning *fik* 10—20% ni tashkil etadi. Masalan, Ryazan (Rossiya)da ishlayotgan MGD generatorining quvvati 250 MW, uning faqat bug' kuch qurilmasining *fik* 30—40% ni tashkil etadi. MGD generator qurilmasining jami *fik* 50—60% ni tashkil etadi. Birinchi tajriba MGD generatori (1959-y) AQSHda ishga tushirilgan bo'lib uning quvvati 11,5 kW bo'lgan. Rossiyada 1965-y. MGD generatori sinovlardan muvaffaqiyatli o'tgach, (1971-y) quvvati 25 MW bo'lgan tajriba-ishlab chiqarish qurilmasi ishga tushgan.

Termodinamika qonunlari asosida jarayonlar tahlil qilinsa, ish bajarib bo'lgan issiq gaz oqimidagi qoldiq issiqlik miqdori hisobiga qo'shimcha ish bajarish mumkin. Chunki bu gaz oqimi to'la kengayib o'z issiqligini uzatib ulgurmaydi. Demak, yonish mahsuloti MGD generatorida adiabatik kengaygandan so'ng, qoldiq issiqlik miqdori avval regeneratorda, keyin bug' generatorida va nihoyat atmosfera havosi bilan issiqlik almashib muvozanat

holatga qaytadi (4, 5, 6, 7, 1 nuqtalar oralig'i). Sikl yana takrorlanadi.

MGD generator qurilmasi siklining TS diagrammasidan ko'rinadiki, siqilgan atmosfera havosiga regeneratsiya usuli bilan issiqlik keltirilganda, ish yoqilg'isi kimyoviy reaksiya hisobiga qiziganda, regeneratsiya bo'lmashida yonish mahsulotidagi qoldiq issiqlik miqdori to'la almashinib ulgurmagan qismi bug' generatoridan o'tganda va atmosferaga chiqarilganda entropiya o'zgaruvchan (7.9-rasm, b. 2, 3, 4 va 5, 6, 7, 1 nuqtalar oralig'i) bo'ladi. MGD generator qurilmasining bug' turbinali issiqlik kuch qurilmasi siklining TS diagrammasi, yuqorida suv bug'i uchun qo'llanilgan qurilmalar siklinikiga o'xshash. MGD generatorning bajargan ishi ionlashgan gaz (plazma) oqimining MGD generator kanali kirishidagi va undan chiqishidagi entalpiyalari ayirmasidan topiladi:

$$A = \Delta H = H_k - H_{ch}. \quad (277)$$

Plazma nazariyasidan kelib chiqqan holda, bu tadqiqotlar natijalarini amaliyotda qo'llab H_k va H_{ch} aniqlanadi.

Plazma oqimi ikki, uch va ko'p komponent (tarkibiy qism)lardan tuzilgan bo'lishi mumkin. Shuning uchun plazma parametrlarini aniqlashda har bir komponent ulushlarining yig'indisi olinadi.

Agar plazma oqimi muvozanatlashgan, deb qabul qilinsa, uning entropiyasi MGD generatorning kirishida va chiqishida o'zaro teng bo'ladi, ya'ni $S_k = S_{ch}$. Unda, plazma parametrlaridan P va T ning o'zgarishi ehtimolligi mavjud bo'ladi. Lekin MGD generator kanalidagi plazma oqimining bosimi o'zgarmas, chunki jarayon izobarik. Shu sababli MGD generatoriga uchib kirayotgan va undan chiqayotgan oqim temperaturalarini ayirmasidan entalpiyaning o'zgaruvchanligini aniqlash mumkin:

$$\Delta H = c_p (T_k - T_{ch}), \quad (278)$$

bunda $c_p \equiv \left(\frac{\Delta H}{\Delta T} \right)_p$ — plazma oqimining T_k va T_{ch} oralig'idagi o'rtacha issiqlik sig'imi.

Yuqorida ta'kidlaganimizdek, MGD generatordan o'tayotgan plazma oqimi adiabatik kengayadi, u holda temperaturalar nisbatini shu jarayon uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$\frac{T_{ch}}{T_k} = \left(\frac{P_{ch}}{P_k} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Unda, MGD generator ishi quyidagicha ifodalanadi:

$$A = \Delta H = \frac{\kappa}{k-1} RT_{ch} \left[\left(\frac{P_k}{P_{ch}} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (279)$$

MGD generator qurilmasi siklining *fik* ni aniqlashda, albatta uning har bir qismlarida kechadigan jarayonlarga kiritilgan (yoki ularda hosil bo'lgan) va undan chiqarilgan issiqlik miqdorlarini hisobga olish shart. Chunki kompressorda havo siqilganda, yonish kamerasidagi kimyoviy reaksiyaning borishida, MGD generator kanalidagi ionlashgan gazning elektr o'tkazuvchanligi hisobiga va tashqi muhitga issiqlikning chiqishida hamda regeneratsiya (issiqlik almashinuvi)da paydo bo'lgan va chiqarilgan issiqlik miqdorlari hisobga olinsa, MGD generator qurilmasi siklining *fik* quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta_r = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) - (q_5 + q_6)}{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)}, \quad (280)$$

bunda $q_1 = c_p(T_{ch} - T_k)(1 - \eta_k)$ — kompressorda siqilgan atmosfera havosining qizishida paydo bo'lgan issiqlik miqdori; T_k va T_{ch} — havoning kompressorga kirishi va chiqishidagi temperaturalar; η_k — kompressorning *fik*; $q_2 = s_r(T_3 - T_2)$ — regeneratsiya vaqtida siqilgan havoga uzatilgan issiqlik miqdori; $T_2 = T_k$ — regeneratsiya bo'lmasining kirishidagi siqilgan havo temperaturasi; T_3 — regeneratsiyadan chiqqan, siqilgan va qizdirilgan yonish kamerasiga uzatilayotgan havo temperaturasi; $q_3 = c_p(T_4 - T_3)$ — yonish kamerasidagi kimyoviy reaksiya hisobiga paydo bo'lgan issiqlik miqdori; T_4 — yonish mahsulotining yonish kamerasi chiqishidagi temperaturasi; $q_4 = c_p(T_4 - T_3)$ — MGD generator kanalidagi plazma oqimining elektr o'tkazuvchanligi hisobiga paydo bo'lgan issiqlik; T_1 va T_3 — MGD generator kanaliga kirayotgan va undan chiqayotgan ionlashgan gaz oqimining temperaturalar; η_e — MGD generatorning elektr energiyasini ishlab chiqarish *fik*;

$q_5 = c_p(T_4 - T_3) \frac{1 - (\eta_e - \xi)}{\eta_e - \xi}$ — MGD generator kanalidagi ionlashgan gaz oqimining tashqi muhit bilan issiqlik almashinu-

vida isrof bo'lgan issiqlik miqdori; ξ — ionlashgan gaz (plazma)ning issiqlik almashinuvida paydo bo'lgan isroflarni hisobga oluvchi koeffitsient; $q_6 = c_p (T_5 - T_1)$ — issiqlik almashinuvida (regeneratsiya va bug' generatori bo'lmalarida hamda atmosferada) muhitga chiqarilgan issiqlik miqdori; T_5 va T_1 — muhitning (regeneratsiya bo'lmalariga kirayotgan siqilgan havoning, bug' generatoridagi bug'ning yoki atmosfera havosining) boshlang'ich va oxirgi temperaturalar. MGD generator qurilmasi siklining aniq nuqtalaridagi temperaturalar orqali uning *fik* ifodalanganda, $\eta_k = \eta_e = 1$ va $\eta = 0$ shart qabul qilinib, $q_1 = q_6$ qiymatini (280) tenglamaga qo'yib, so'ngra ixchamlab, quyidagi hosil qilinadi:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_4 - T_2}. \quad (281)$$

Real sikllarning *PV* va *TS* diagrammalari keltirilgan sikllar diagrammalariga nisbatan ma'lum darajada farq qiladi. MGD generator qurilmasi siklining *fik* ish modda entalpiyasining o'zgaruvchanligi orqali ifodalansa, uni quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$\eta_i = \frac{m[(H_4 - H_5) - (H_2 - H_1)] + (H_I - H_{II})}{(H_4 - H_3)}, \quad (282)$$

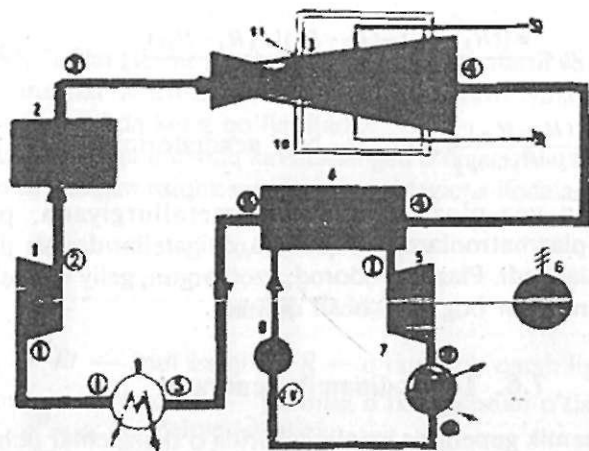
bunda $m = \frac{(H_I - H_{II})}{(H_6 - H_7) \cdot \eta_{b.g.}}$; $\eta_{b.g.}$ — bug' generatorining *fik*.

Berk sxemali MGD generator qurilmasining siklida sodir bo'ladigan jarayonlar ochiq sxemaga qaraganda ancha murakkab bo'lib, tuzilishi jihatdan atom reaktori va maxsus sovitkichi bilan farq qiladi (7.8-rasm), ya'ni ishlatiladigan yoqilg'i turi va uning berk konturi bo'ylab aylanishi bilan ajralib turadi. Kechadigan termodinamik jarayonlar ochiq sxemali MGD generatornikiga o'xshash bo'lsa-da, siklga uzatiladigan q_1 issiqlik miqdori atom reaktordan olinadi.

Ionlashgan gaz (geliy) temperaturasi 2480 K ga yetadi. Ish bajarib bo'lgan ionlashgan gaz tarkibidagi qoldiq q_1 issiqlik avval bug' generatoriga, so'ngra sovitkich 9 ga chiqariladi.

Real sikllarning *PV* va *TS* diagrammalari keltirilgan sikllar diagrammalariga nisbatan ma'lum darajada farq qiladi (7.11-rasm).

MGD generator qurilmasi siklining *TS* diagrammasidan ko'rinadiki, sikl ikkita adiabatik va ikkita izobarik jarayonlardan tashkil topgan. Qoldiq issiqlik miqdori ionlashgan gazdan ketma-



v)

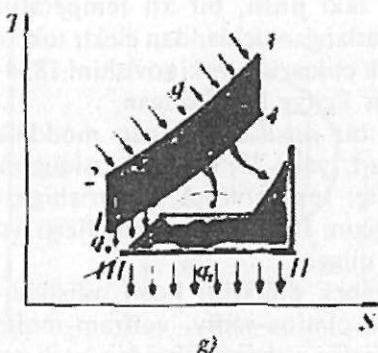
7.11-rasm, v. Berk sxemali MGD generator qurilmasining sxemasi:

- 1 — havo kompressori; 2 — atom reaktori; 3 — MGD generator;
4 — issiqlik almashtirgich; 5 va 6 — bug' turbinasi va elektr generatori;
7 — kondensator; 8 — kondensat nasosi; 9 — sovitkich; 10 — magnit
maydoni hosil qiluvchi cho'lg'am; 11 — elektrodlar.

Eslatma: doira ichidagi raqamlar — jarayonlar parametrlari o'lchanadigan nuqtalar.

ket bug' kuch qurilmasiga va sovitkich 9 ga chiqariladi (7.11-rasm, g) *TS* diagramma, 4—5 va 5—1 nuqtalar oralig'i). Shuning uchun berk konturli MGD generator qurilmasi siklining *fik* ni hisoblashda bug' kuch qurilmasiga MGD generator siklidan uzatilgan issiqlik miqdori bajargan ish ham hisobga olinadi.

Berk sxemali MGD generator qurilmasining *fik* jarayonlardagi entalpiyaning o'zgaruvchanligi orqali ifodalanadi, ya'ni



7.11-rasm, g.

Berk sxemali MGD generatorning *TS* diagrammasi.

$$\eta_t = \frac{m[(H_3 - H_4) - (H_2 - H_1)] + (H_I - H_{II})}{(H_3 - H_2)}, \quad (283)$$

bunda $m = \frac{(H_I - H_{II})}{(H_4 - H_3) \eta_{b, \kappa}}$; $\eta_{b, \kappa}$ — bug' generatorining fik.

Ionlashgan gaz-plazma oqimidan metallurgiyada, payvandlashda, plazmatronlarda va plazma dvigatellarida ish jismi sifatida foydalaniladi. Plazma vodorod, azot, argon, geliy va boshqa kimyoviy elementlar bug'idan hosil qilinadi.

7.6. Termodinamik generator

Termodinamik generator issiqlik ta'sirida o'tkazgichlar uchlari oralig'ida e. y. k. hosil bo'lishiga asoslangan fizik hodisalarga muvofiq ishlaydi. Termodinamik generator nazariyasini Zeebek, Peltze va Tomsonlar yaratganlar va sodir bo'ladigan fizik jarayonlarni esa shu olimlar nomi bilan yuritiladigan effektlar deyiladi. Shu effektlar asosida ishlaydigan generator **termodinamik generator** deyiladi.

a) bir jinsli bo'lmagan turli xil ikkita o'tkazgichning uchlari temperaturalar farqi mavjud bo'lganda, shu o'tkazgichlarning sovuq uchlari oralig'ida e. y. k. paydo bo'lishini nemis fizigi Tomas logann Zeebek 1821-yili kashf qilgan;

b) ikki jinsli, bir xil temperaturali o'tkazgichlarning birga kavsharlangan uchlari elektr toki o'tganda shu nuqtalar muhitga issiqlik chiqarishi yoki sovishini 1834-yilda fransuz fizigi Jan Sharl Atanas Peltze kashf qilgan.

v) bir jinsli bo'lmagan moddalar o'zidan Joul issiqligidan tashqari, yana U. Tomson issiqligini ham chiqarishini va uning kattaligi temperatura o'zgarishiga hamda tok kuchiga mutanosibligini 1856-yilda ingliz fizigi Tomson (lord-Kelvin) Uilyam kashf qilgan.

Zeebek effektini hosil qilishda konstant-mis, vismut-mis, platina-platina-radiy, volfram-molibden va shu kabi kimyoviy elementlar o'tkazgichlaridan berk zanjir tuziladi.

Bunda hosil bo'lgan e. y. k. kattaligi quyidagiga teng bo'ladi, ya'ni

$$\Delta E = \alpha \Delta T \quad (284)$$

Termojuftlar (termopara) yuqori temperaturalarini va eng kichik temperaturalar ayirmasini o'lashda laboratoriyalarda hamda ishlab chiqarishda keng qo'llaniladi.

Peltje effektiga muvofiq kavsharlangan o'tkazgichlar uchida ajraladigan va yutilgan issiqlik miqdorini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\begin{aligned} q_1 &= I^2 R t - q'; \\ q_2 &= I^2 R t + q'', \end{aligned} \quad (285)$$

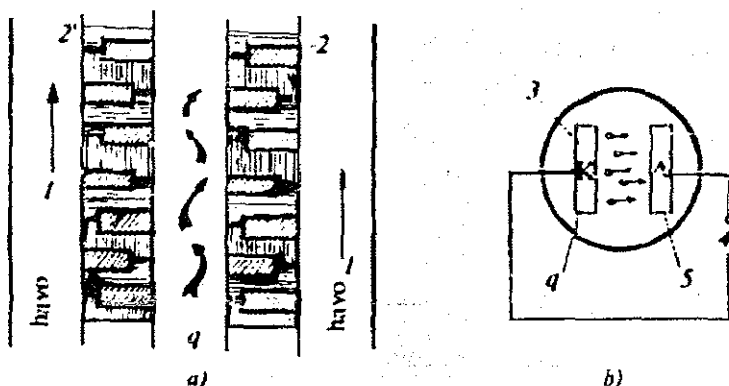
bunda $I^2 R t$ — Joule issiqligi; R — o'tkazgich qarshiligi;

I — tok kuchi; t — tokning o'tkazgichdan o'tish vaqti;

$q_1 = q_2$ — Peltje issiqligi.

$Pq = PIt$ tengligiga ko'ra o'tkazgichdan elektr toki o'tganda ajraladigan yoki yutiladigan issiqlik miqdori, eng avvalo, o'tadigan tok miqdori va uning yo'nalishiga bog'liq ekan. Peltje koeffitsienti 10^{-2} — 10^{-3} V oralig'ida bo'lib, uning qiymati material xususiyatlariga bog'liq. Bu effekt asosida yaratilgan yarim o'tkazgichli qizdirgich va sovitkich asboblari kosmonavtikada keng qo'llaniladi (7.12-rasm).

Tomson effektiga muvofiq elektr toki o'tkazgich bo'ylab o'tganida Joule-Lens qonuniga muvofiq ajraladigan issiqlikdan tashqari, tem-



7.12-rasm. a. Issiqlik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantiruvchi qurilmalarning sxematik tasviri;

- a) yarim o'tkazgichli; b) ionli issiqlik elektr generatorlari. 1 — sovitkich; 2 — izolator; 3 — katod; 4 — tashqi elektr zanjiri; 5 — anod; q — keltirilgan issiqlik miqdori.

peraturalar farqi hisobiga qo'shimcha issiqlik ajraladi (tok yo'nali-shiga qarab) yoki yutiladi. Bu ajralgan issiqlik ko'pincha *Tomson issiqligi* deyiladi va soddaroq shaklda quyidagicha ifodalanadi:

$$q = \tau(T_2 - T_1)It, \quad (286)$$

bunda $T_2 - T_1$ — temperaturalar farqi; I — o'tkazgichdan o'ta-yotgan tok kuchi; τ — Tomson koeffitsienti; t — tokning o'tish vaqti.

Tosmon effekti termoelektr (issiqlikni bevosita elektr tokiga aylantirish) hodisalarida qo'llaniladi.

Yuqorida ta'riflangan uchala effektlar, o'tkazgich uchlari oralig'ida temperaturalar farqi mavjud bo'lganda o'rinli bo'la oladi.

Yuqorida keltirilgan effektlar asosida yasalgan issiqlik elektr generatorlarining o'lchami juda kichik bo'lib, (og'irligi bir necha 10 g atrofida), ularning quvvati 100—150 Vt, kuchlanishi 1—3 V, *fik* 7—20% ni tashkil etadi va zamonaviy texnikaning avtomatik boshqarish sistemalarida keng tatbiq etiladi.

7.7. Termoemission generator

Issiqlik energiyasi ta'sirida metallar sirtidan elektronlarning uchib chiqish hodisasiga asoslanib elektr tokini hosil qiluvchi generator termoemission generator deyiladi.

Termoemissiya (therme — issiqlik, emmition — chiqarmoq) hodisasi ingliz fizigi Ouen Vilyams Richardson effektiga, ya'ni issiqlik ta'sirida emission tokning hosil bo'lishiga asoslangan bo'lib, u issiqlik energiyasini bevosita elektr energiyasiga aylantirish-da qo'llaniladi. Eng sodda elektron issiqlik o'zgartgich bir-biriga juda yaqin joylashtirilgan ikkita metall sirtlardan iborat bo'lib, ularning biri elektronlar oqimini (qizdirilgan sirt) hosil qilsa, ikkinchisi shu elektronlarni qabul qiladi. Tuzilishi jihatidan diod lampaga o'xshash (7.12-rasm, b) bo'ladi.

Sirti qizdirilgan metallni *katod* va undan uchib chiqqan elektronlarni qabul qiluvchi sirt esa *anod* deyiladi. Katod qizdirilganda ma'lum temperaturagacha uning sirtidan uchib chiqadigan elektronlar soni ortib borib, so'ngra elektronlar soni ortmaydi. Natijada zanjirdagi tokning o'sishi ham to'xtaydi, ya'ni zanjirda to'yinish toki hosil bo'ladi.

Hosil bo'lgan emissiya tokining to'yinish qiymatini hisoblashda Richardson-Dyoshmon tenglamasidan foydalaniladi, ya'ni

$$j_s = \frac{I}{S} = \bar{D} B T^2 e^{\frac{A}{kT}}, \quad (287)$$

bunda I — tok kuchi; S — elektronlar chiqaruvchi metall sirtning birlik yuzasi; V — nazariy hisoblab aniqlanadigan ($1,2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \cdot \text{grad}^2$) ko'paytuvchi (emissiya doimiysi); A — elektronning o'rganilayotgan metaldan chiqish ishi; k — Boltsman doimiysi; T — katodning absolut temperaturasi; D — metall-vakuum chegarasidagi elektron to'liqini uchun mo'ljallangan potensial to'siq (baryer)ning o'rtacha shaffofligi.

Zanjirdagi tok zichligini (absolut vakuumda) o'ttirish uchun albatta katod temperaturasini 1800—2000 K gacha ko'tarish zarur bo'ladi. Shunda zanjirdagi tok zichligi $j = 1000 \text{ amper/m}^2$, chiqish ishi potentsiali esa 3—3,5 V ga yetadi.

Termoelektron generatorlardagi tok zichligining katod temperaturasiga va anod-katod oralig'idagi masofaga bog'liqligi quyidagicha ifodalanadi:

$$i = \frac{7,73 \cdot 10^{-12} T^{3/2}}{d^2}. \quad (288)$$

d ning qiymati (anod-katod orasidagi masofa) ortgan sayin, tok zichligi kamayadi. Shuning uchun ham hozirgi kunda foydalanilayotgan generatorlarning anod va katodi orasidagi masofa 10 mikrondan katta emas. Termoemission generatorlarning *fik* zanjirga bergan quvvat va katod issiqligi orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$\eta = N/q_k, \quad (289)$$

bunda $N \approx IU_R$; U_R — qarshiliklarda kuchlanishning tushishi;

$$q_k = I\varphi_k + I(U_{nr} + \varphi_a + U_R - \varphi_k) + W_k + q_{isrof};$$

φ_k va φ_a — katod va anodning chiqarish potentsiallari;

U_{nr} — anod-katod oralig'idagi tirqishda potentsialning tushishi;

q_{isrof} — issiqlik isrofi; W_k — elektronlarning kinetik energiyasi.

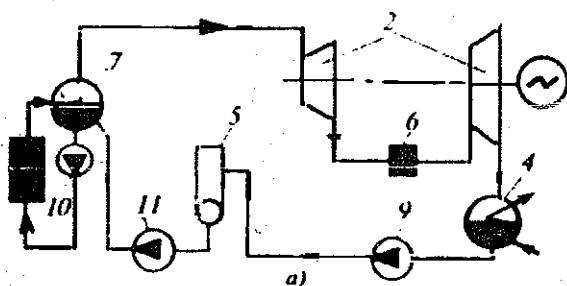
Issiqlik elektr generatorining *fik* 10% atrofida bo'lsa-da, ular yuqori temperaturalarda ishlaydi. Shu bois ular yuqori temperaturali kamera, o'txona va issiqlik mashinalarida keng qo'llaniladi.



1. Magnitogidrodinamik (MGD) generator qanday qurilma va elektr generatorlaridan tuzilishi hamda ishlashi jihatidan qanday farq qiladi?
2. MGD generatorda asosiy ish jismi sifatida qanday modda ishlatiladi va u qanday nomlanadi?
3. MGD generator tuzilishi jihatidan necha turga bo'linadi va ular bir-biridan nima bilan farq qiladi hamda qanday maqsadlarda quriladi?
4. MGD generator siklida qanday termodinamik jarayonlar sodir bo'ladi va jarayonlarning *TS* diagrammalaridan siklida bajarilgan ish qanday aniqlanadi?
5. MGD generator siklining *fik* hisoblash formulasini yozing.
6. Termodinamik va termoemission generatorlar qanday fizik hodisalar asosida ishlaydi va ular qayerlarda ishlatiladi? Bu generatorlarning *fik* necha foizlargacha bo'ladi?
7. Zeebek, Peltze va Tomson effektlarini ta'riflang va ularning formulalarini yozing hamda ma'nosini tushuntiring.

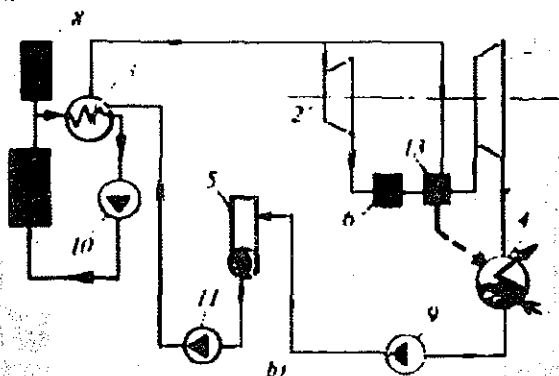
7.8. Atom elektr stansiyasi

Bugungi kunda neft va gazning jahon energetikasidagi ulushi 50% atrofida, ko'mirmiki 35% ni tashkil etadi, qolgan 15% energiya gidro, atom va boshqa elektr stansiyalarga to'g'ri keladi. Atom elektr stansiyasi (AES) atom energiyasini elektr energiyasiga aylantiruvchi yuksak darajada avtomatlashtirilgan ulkan inshoot bo'lib, u atom reaktori, past va yuqori bosimli bug' regeneratori, bug' turbinalaridan, kondensator, elektr generator va yordamchi uskunalar, avtomatik nazorat-o'lchov asboblari hamda boshqaruv sistemasidan tashkil topgan (7.13-rasm, *a*, *b*, *v*).

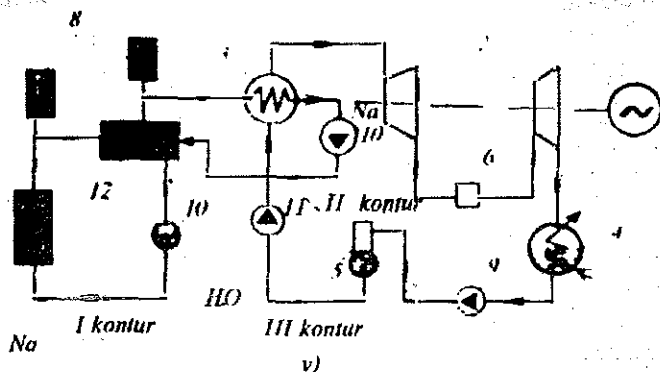


7.13-rasm, *a* — bir konturli AES sxemasi.

Dunyoda birinchi marta *boshqariladigan zanjirli yadro reaksiyasi amalga oshiriladigan qurilma* — *atom reaktorini* italiyalik buyuk fizik Enriko Fermi AQSH da 1942-yili ishga tushirgan bo'lsa, Rossiyada I. V. Kurchatov boshchiligida birinchi AES 1954-yili ishga tushirildi. Hozir dunyoda 400 ga yaqin boshqariladigan zanjirli yadro reaksiyasiga asoslangan AES ishlab turibdi. Bunga Voronej, Beloyarsk, Sankt-Peterburg, Shevchenko, Kolsk, Kursk AES larini, atom muzyorar kemalari («Savanna», «Bobkok-Vilkoks», Keldish, Kurchatov, Kursk va sh.k.) misol bo'la oladi.



7.13-rasm, b. Ikki konturli AES sxemasi.



7.13-rasm, v. Uch konturli AES sxemasi:

1 — atom reaktori; 2 — bug' turbinasi; 3 — bug' generatori; 4 — kondensator; 5 — deaerator; 6 — seperator; 7 — bug' to'planuvchi idish; 8 — hajmini to'ldirgich; 9, 10 va 11 — kondensat, sovitkich va ta'minlovchi nasoslar; 12 va 13 — oraliq issiqlik almashtirgich va bug' qizdirgich.



Enriko Fermi

Tabiatda Uran — 235 izotopining miqdori 0,712%, Uran — 238 niki 99,282%, Uran — 234 niki esa 0,006% tashkil qiladi. AESlardagi atom reaktorida kechadigan boshqariladigan zanjirli yadro reaksiyasi asosan Uran — 233, Uran — 235, Plutoni — 239 atomlari yadrolarining parchalanish vaqtida issiqlik energiyasi ajraladi. Yadro reaksiyasida ajralgan issiqlik miqdori birinchi konturidagi issiqlik tashuvchi (geliy, og'ir suv, suyuq natriy)ga uzatiladi.

Sovitkich agenti birinchi berk konturda, ya'ni reaktor va tashqi issiqlik almashtirgich oraliq'ida nasos yordamida majburiy harakatlanadi.

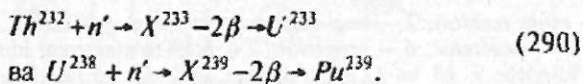
Atom elektr stansiyalarining suv-suv energetik reaktori (S-SER) va suyuq metalli energetik reaktori (SMER) mavjud (7.14-rasm, a, b) bo'lib, ular og'ir suv, suyuq metall va suyultirilgan gazlar bilan sovitiladi. AES ning ikkinchi yoki uchinchi konturidagi jarayonlar IESlaridagi jarayonlardagidek sodir bo'ladi.

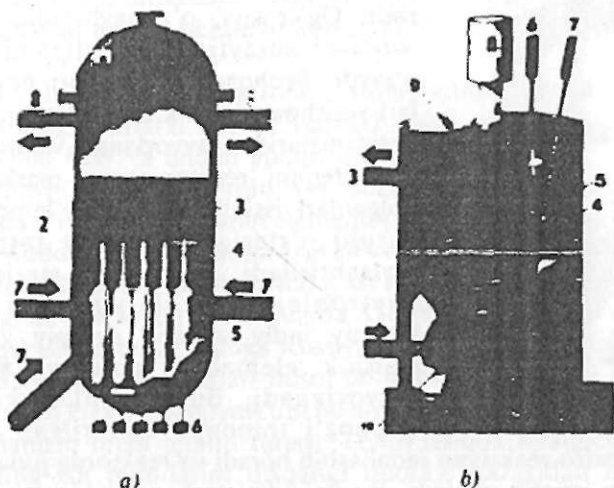
Energetikada, transportda va kosmonavtikada (Topaz) issiqlik energiyasining manbai sifatida har xil quvvatdagi atom reaktorlari qo'llaniladi (7.14-rasm).

Atom reaktorlari neytronlarning spektriga ko'ra tezkor, issiqlik va oraliq, ya'ni tez neytronlar (100 keV), issiqlik harakati energiyasi (0,025 eV) ga teng bo'lgan neytronlar va energiyasi 1 eV dan hir necha keV gacha bo'lgan neytronlar ta'sirida zanjirli yadro reaksiyasi boradigan turlarga bo'linadi.

Atom reaktorlarining ish moddasi yadro yoqilg'isi bo'lib, ularga zanjirli reaksiya vaqtida parchalanadigan tabiiy U-235(issiqlik neytronlarida parchalanadi) va sun'iy U-233, Pu-239 (tez neytronlarda parchalanadi (7.14-rasm, b) kiradi.

Toriy-232 va uran-238 sun'iy yadro-yoqilg'isining xomashyosi hisoblanadi. Chunki, Th-232 va U-238 bittadan neytron yutadi va ikkitadan beta zarrasini chiqarib U-233 va Pu-239 ga aylanadi, ya'ni





7.14-rasm. Qaynayotgan suvli (a) va suyuq natriyli (b) atom reaktorlari:

1 — yuqori bosimli reaktor qozoni; 2 va 10 — yuqori temperaturali ($T=559\text{ K}$ va $T_{\text{Na}}=723\text{ K}$) va bosimli ($P=7.2\text{ MPa}$ va $P_{\text{Na}}=1\text{ MPa}$) suv ko'ylagi va suyuq natriy; 3 va 5 — issiqlik ajratkich elementlari; 4 va 9 — boshqarish sterjenlari; 6 va 8 — boshqarish sterjenlarini yo'naltiruvchi mexanizmlar; 7 va 2 — suv va suyuq natriyni kiritish quvurlari; 8 va 3 — suv bug'ini va yuqori temperaturali suyuq natriyni chiqarish quvurlari.

Yadro kuch qurilmalarining asosini atom reaktori tashkil etishiga qaramasdan, bunday qurilmalar elektr energiyasini ishlab chiqarishda (AES), muzyorar hamda suvosti kemalarida, samolyotlarda, lokomotivlarda, yadro reaktiv dvigatellarida qo'llaniladi.

AES larda asosan elektr va issiqlik energiyalari ishlab chiqariladi. Ular tuzilishi jihatidan issiqlik kuch qurilmalariga o'xshash bo'lib, uning birinchi konturi atom yadro reaktori bilan farq qiladi.

Atom reaktori — bu boshqariladigan zanjirli yadro reaksiyasi kechadigan va reaksiyani bir me'yorda saqlab tura oladigan qurilma.

Atom reaktori kastrul'kasimon zanglamaydigan, mexanik jihatdan mustahkam, katta hajmdagi idish bo'lib, uning ichki qismiga issiqlik ajratuvchi elementlar, boshqarish sterjenlari, sovitkich modda hamda neytronlarni qaytargich ma'lum tartib-qoida bo'yicha joylashtiriladi. Issiqlik ajratuvchi elementlar shaxmat tartibida, neytronlarni qaytargichlar (grafit) reaktorning ichki devori va sirti bo'ylab joylashtiriladi. Sovitkich vazifasini og'ir suv, suyuq metall va suyultirilgan gaz (vodorod, geliy) baje-



I. B. Kurchatov

radi. Og'ir suv, o'z navbatida, neytronlarni susaytirgich vazifasini ham o'taydi. Boshqarish sterjenlari neytronlari yetishmaydigan kimyoviy elementlar qotishmalaridan tayyorlanadi va ularning bosh sterjeni reaktor qozoni markaziga, qolganlari issiqlik ajratgich elementlari guruhi o'rtasiga shaxmat tartibida joylashtiriladi. Boshqarish sterjenlari neytronlarni kuchli yutuvchi bor, kadmiy, indiy, samariy, evropiy, golmiy va sh.k. elementlar qotishmalaridan tayyorlanadi. Bu sterjenlar reaktor qopqog'i tomonga ko'tarilgan sayin

zanjirli yadro reaksiyasi jadallashib boradi va reaktorda juda ko'p miqdorda issiqlik ajraladi. Bu issiqlikni tashqariga birinchi berk konturdan majburiy ravishda nasos 10 yordamida haydaladigan sovitkich (og'ir suv, suyuq metall, suyultirilgan gaz) chiqaradi. Sovitkichga o'tgan issiqlik miqdori yuqori temperaturali (550 K dan yuqori) bo'lganligidan u to'g'ri bug' generatori 3 ga uzatiladi. Bug' generatorida hosil qilingan quruq qizdirilgan va yuqori bosimli bug', o'z navbatida, bug' turbinasiga yo'naltiriladi. Ish bajargan va ma'lum bir darajada bosimi, temperaturasi pasaygan suv bug'i turbinaning chiqish kanalidan separator va bug' qizdirgich orqali ko'p bosqichli past bosimli bug' turbinasiga yo'naltiriladi. Umuman olganda, AESning oxirgi berk konturida kechadigan jarayonlar IES larniki kabi.

Birinchi berk konturdagi sovitkichning temperaturasi reaktordan chiqqanda 560 K atrofida, bug' generatoridan keyin esa reaktor turiga qarab, 360—460 K atrofida bo'ladi.

AESlar bir, ikki va uch konturli bo'ladi: bir konturlida suv bug'i atom reaktorida hosil qilinadi va unda radioaktiv moddalar bo'lishi ehtimolligi mavjud. Birinchi berk konturdagi radioaktiv moddalarning ikkinchi konturga o'tish ehtimoli yo'q. Birinchi berk konturdagi sovitkich ikkinchi berk kontur uchun issiqlik manbai vazifasini bajaradi. Ko'pchilik ikki konturli AES larning birinchi konturida issiqlik tashuvchi vazifasini og'ir suv (7.14-rasm, b) issiqlik neytronlarida zanjirli yadro reaksiyasi boradigan va suyuq natriy (7.14-rasm, v) tez neytronlarda zanjirli yadro reaksiya boradigan) bajaradi; uch konturli AES da birinchi va

ikkinchi berk konturlardagi issiqlik almashtirgich (sovitkich) vazifasini suyuq natriy, uchinchi konturda esa oddiy suv bajaradi (7.14-rasm, v).

AES larning *f i k* 40% atrofida, ishlab chiqariladigan elektr energiyasining tannarxi esa IESlarniki kabi, ularning har bir agregati 1000 MW va undan yuqori quvvat beradi.

Zamonaviy AES larda 1 mln. kW - soat elektr energiyasi ishlab chiqarishda o'rtacha 200 g. uran elementi (yadro reaksiyasi vaqtida) yoqiladi. Xuddi shuncha miqdordagi elektr energiyasini IES larida ishlab chiqarish uchun taqriban 400 t. ko'mir yoqish kerak bo'ladi.

Hozirgi davrda sovuq mintaqalarda AIEM (Atom issiqlik elektr markazlari) ishlamoqda. Bunga Rossiya territoriyasida joylashgan Chukotka, Bilinsk stansiyalari misol bo'la oladi. AES lari ishlab chiqarayotgan elektr energiyasi uncha arzon bo'lmasa-da, yoqilg'i kam sarflanishi bilan ajralib turadi. Lekin issiqlik ajratgich elementlarning ish muddatini qisqaligi nuqtayi nazaridan uncha samarali emas. Shuning uchun issiqlik ajratgich elementlarni ma'lum muddatdan so'ng, albatta almashtirish kerak bo'ladi. Bu issiqlik ajratgich elementlari radioaktiv moddalardan tashkil topganligi sababli ular biror radioaktiv moddalar qabrstonida uzoq yillar (1 mln. yil va undan ortiq) germetik holatda saqlanishi kerak. Bu masala bugungi kunda radioaktiv moddalarni saqlash muammosi sifatida uzil-kesil yechilgan emas.

Ekologiya nuqtayi nazardan qaralganda, AES lardan mutlaqo foydalanish kerak emas. Ammo, yuksak texnologiya asosida qurilgan AES larni energetikada ishlatish mumkin. Masalan, Fransiya(1989-y)da 80% elektr energiyasini AESlar ishlab chiqargan va chiqarmoqda.

Hozirgi kunda dunyoda 400 ga yaqin AES lari bo'lib, ularning quvvati $205 \cdot 10^3$ MW, umumiy elektr energiyaning 16% ni ishlab chiqaradi. Hozirgi kunda Fransiyada — 70%, Belgiyada — 66%, Janubiy Koreyada — 53%, Shvetsiyada — 50%, Vengriyada — 39%, Finlyandiyada — 53%, Shveysariyada — 35%, Yaponiyada — 30%, Angliyada — 18%, AQSHda — 18% va MHDda — 11% energiya AES larda ishlab chiqariladi.

Turli mamlakatlarda atom reaktorlaridan har xil sabablarga ko'ra radioaktiv moddalar chiqib (Chernobil, Tri-Mayl-Aylend AES laridagi avariya va sh.k.), tabiatga va odamlarga katta zarar yetkazipti. Radioaktiv chiqindilar to'planib qolmoqda. Bu muammo ham o'z yechimini uzil-kesil va to'laigicha topgani yo'q.

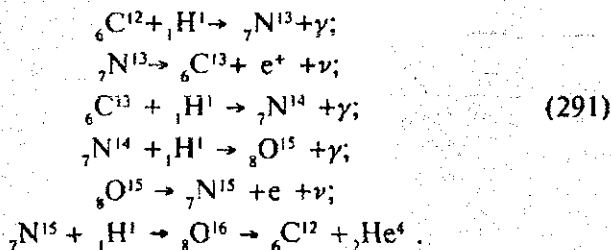


1. Atom reaktori deb qanday fizik qurilmaga aytiladi? Atom reaktorlarida ishlatiladigan ish jismi va zanjirli yadro reaksiyasining borishiga hamda ishlatilish sohasiga ko'ra qanday turlarga bo'linadi?
2. Atom reaktorlarida sovitkich va boshqarish sterjenlari sifatida qanday moddalar qo'llaniladi?
3. Atom reaktorlari necha konturli bo'ladi va har bir kontur qanday vazifalarni bajaradi?
4. Atom reaktorlarida kechadigan termodinamik jarayonlarni tavsiflang.
5. Atom reaktorlarining soni dunyo bo'yicha nechta va ular qayerlarda qurilgan hamda elektr energiyasini ishlab chiqarishdagi ulushlari necha foizni tashkil etadi?
6. O'zbekistonda atom reaktori va AES bormi?
7. Atom reaktorlarida sodir bo'ladigan zanjirli yadro reaksiyasi vaqtida chiqadigan radioaktiv nurlanishdan himoyalashda qanday modda va materiallardan foydalanish mumkin?
8. Atom energetikasining istiqbollari haqida qanday fikrdasiz?

7.9. Termoyadro sintez reaksiyasi va uning energetikadagi istiqbollari

Tabiatda organik yoqilg'i zaxirasi kamayib borayotganligi, atom elektr stansiyalarining ekologik jihatdan qisman talabga javob berishi, gelio va geotermal stansiyalar fik ning pastligi hisobga olinganda, ekologiya nuqtayi nazaridan toza energiya manbayini yaratish muammosi o'z yechimini kutmoqda.

Bu muammoning yechimi termoyadro sintez reaksiyasiga asoslangan energetika tizimidir. Termoyadro sintez reaksiyasi 1930-yillarda aniqlangan bo'lib, u quyosh va yulduzlarda vodorod va geliy yadrolarining qo'shilishi natijasida sodir bo'ladi. Quyoshda sodir bo'ladigan termoyadro sintez reaksiyasini Xans Albrect Bete taklif etgan sikl bo'yicha quyidagicha yozish mumkin:



Demak, yuqorida keltirilgan yadro reaksiyalaridan ko'rinib turibdiki, bu siklda to'rtta proton reaksiyaga ketma-ket kirishishi natijasida bitta geliy atomi hosil bo'ladi va massa defektiga mos keluvchi energiya miqdori ajralib chiqar ekan. Quyoshdagi vodorod (miqdori 80%) keltirilgan yadro reaksiyalaridan iborat sikl bo'yicha to'liq geliyga aylanib ulgurishi uchun olimlarning hisobiga ko'ra olti mld. yil kerak bo'ladi. Quyosh bu reaksiyalar hisobiga har sekunda 4 mln. tonnadan ortiq massasini yo'qotib borish jarayonida $4 \cdot 10^{20}$ MW energiya nurlaydi. Shu energiyaning taqriban $3,2 \cdot 10^{15}$ J/s qismi Yer atmosferasigacha yetib keladi va uning 40% ga yaqini atmosferadan qaytib ketadi. Qolgan qismining 16% atmosferada yutiladi va 40—44% Yer sirtiga tushadi. Bu energiya Yerdagi hayot va inson faoliyati uchun yetarlidir. Biz esa undan samarali foydalana olmayapmiz.

Yerda termoyadro sintez reaksiyasini amalga oshirish uchun eng zarur element bu vodoroddur. Dunyo okeanlaridagi vodorod va deyteriy zaxirasi 0,015% ni tashkil qiladi. Shundan deyteriy miqdori $\sim 4 \cdot 10^{16}$ kg bo'lib, uning yillik energiyasi $\sim 4 \cdot 10^{17}$ MW. energiyasiga ekvivalentdir. Bu zaxira uzoq yillarga yetadi. Chunki Erdagi energiyaga bo'lgan yillik talab $\sim 10^7$ MW ni tashkil etadi. Masalan, 1 kg termoyadro yoqilg'isi 1 kg toshko'mir energiyasiga nisbatan $5 \cdot 10^7$ marta ko'proq energiya beradi yoki ichimlik suvi-ning bir litridan ajratilgan deyteriyini yoqishdan hosil bo'lgan issiqlik energiyasining miqdori 300 litr oliy navli benzinni yoqqanda ajralgan issiqlik miqdoriga teng.

Boshqariladigan termoyadro sintez reaksiyasi yengil kimyoviy element — vodorod izotoplarini, ya'ni deyteriy va tritiyni, bir-biriga qo'shish (sintez qilish) natijasida radioaktivlikdan ozod bo'lgan energiyani olishdan iborat.

Termoyadro sintez reaksiyasi ekzotermik bo'lganligi uchun reaksiya vaqtida katta miqdordagi issiqlik energiyasi ajraladi. Sintez reaksiyasini amalga oshirish uchun qo'shilishi kerak bo'lgan kimyoviy elementlar yadrolarini bir-biriga yadro kuchlari ta'sir etadigan darajadagi masofagacha, ya'ni $r_m \approx 1,5 \cdot 10^{-15}$ m yaqinlashtirish kerak.

Yadrolar musbat zaryadli bo'lganligi uchun ular o'rtasida bir-birini itaruvchi kulon kuchi mavjud bo'ladi. Yadrolarni sintezlanuvchi $r_m \approx 10^{-15}$ m masofagacha yaqinlashtirish uchun albatta bu kulon kuchining potensial to'sig'ini yenga oladigan energiyani sintezlanuvchi izotoplar yadrolari tashqaridan olishi shart. Bunday energiya issiqlik energiyasi hisoblanadi.



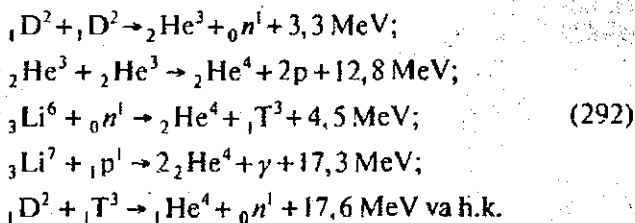
L. Spitzer

Insoniyat Yerda boshqariladigan zanjirli yadro reaksiyasini amalga oshirgandan so'ng, atom va vodorod bombalarini ketma-ket portlatib hamda lazer nurini kashf etib, bir necha million gradus temperaturani olish mumkinligini amalda isbotladi. Gaz razryadi yoki lazer nuri energiyasi yordamida sintezlovchi energiyani hosil qilish mumkinligini o'rgandi. Bu energiya yordamida zarralar o'ta katta tezliklarga tezlatiladi va o'ta yuqori temperatura hosil qilinadi.

Yengil elementlar izotoplari yadrolarining temperaturasi $\sim 77-100$ mln. K. (10 keV)*

va undan yuqori bo'lgandagina sintez reaksiyasini amalga oshirish mumkin. Bunday yuqori temperaturani hosil qilish muammosi XX asrning o'rtalarida yuzaga keldi. Olimlarning olib borgan izlanishlari natijalariga ko'ra, temperatura ortib borgan sayin yadrolarning qo'shilish (sintez) reaksiyasi jadallashib boradi va qo'shilishlar soni ortadi, keyin esa susayadi.

Yengil kimyoviy elementlar izotoplarining sintez reaksiyalarini quyidagicha yozish mumkin:



Plazmaning ichki energiyasi E dan termoyadro sintez reaksiyasi energiyasi E_0 katta, ya'ni $E > E_0$ bo'lishi uchun plazma temperaturasi kamida 10 keV va bir santimetr kub (1 sm^3) plazma hajmida 10^{14} ta sintez reaksiyasi yuz berishi kerak. Bunday shart termoyadro reaksiyasining *fizikaviy kriteriyasining chegarasi*, ya'ni *Louson kriteriyasi* deyiladi. Plazmani tutib turish va sintez reaksiyasining uzluksizligini ta'minlash masalasi bo'yicha, bugungi kunda uch yo'nalishda tadqiqotlar davom etmoqda:

a) plazma ipini magnit maydoni yordamida toroid kamerasida tutib turish;

b) plazmadan elektr tokini o'tkazish yo'li bilan plazma ipi atrofida kuchli magnit maydoni hosil qilish va bu maydon plazma ipini siqishi, uning temperaturasini bir necha 10 mln. K.ga yetkazishdan iborat.

Magnit maydoni yordamida yuqori temperaturali plazma ipini tutib turish va uni issiqlikdan izolatsiyalash usulini A. D. Saxarov va I. E. Tamm hamda L. Spitzer (AQSH) 1950—51-y. taklif qilgan va asoslab bergan.

Amalda magnit maydoni yordamida plazmani toroidal kamerada tutib turish va uni termoizolatsiyalashning fizik asosini akademiklardan L. A. Arsimovich va M. A. Leontovichlar yaratganlar.

Ma'lumki, XX asrning 60-yillarida, birinchi marta (I. V. Kurchatov nomidagi Atom energiyasi institutida) termoyadro sintez reaksiyasi «ТОКАМАК» (ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками) qurilmasi (7.15-rasm)da amalga oshirilgan bo'lib, uning uzluksiz boshqarish vaqti sekundning ulushlarini tashkil qilgan edi.

v) lazer nuri yordamida termoyadro sintez reaksiyasini boshqarish yo'nalishini 1960-yili akademik N. G. Basov va prof. O. N. Kroxinlar taklif qilgan edilar.

Lazer yordamida termoyadro sintez reaksiyasini amalga oshirishda lazer nuri impulsi deyteriy tritiy «tabletka»siga yo'naltiriladi. Shunda, o'ta qisqa vaqtda (ya'ni 10^{-8} s.da) bu tabletkaning yuqori qatlami temperaturasi bir necha o'n million gradusga yetadi. Natijada, tabletka qatlamida termoyadro mikroportlashlari sodir bo'ladi va katta miqdordagi issiqlik miqdori ajraladi.

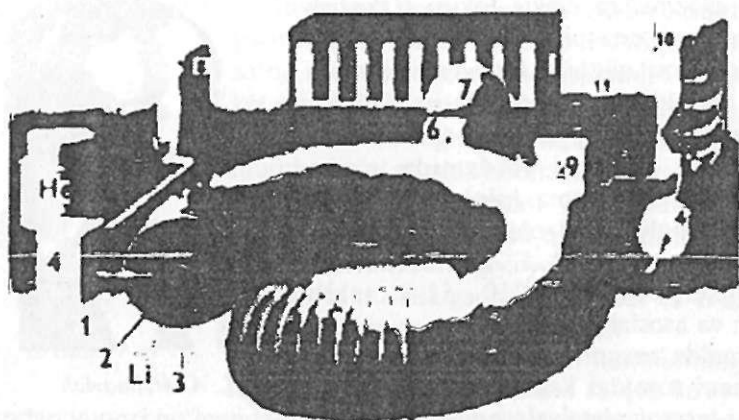
Termoyadro mikroportlashlarda ajralgan issiqlik shu qadar katta bo'ladiki, termoyadro sintez reaksiyasini amalga oshiriladigan reaktor devorlari va uskunolari bunday issiqlikka chidamaydi. Bu qiyinchilikdan chiqish uchun plazma ipini tutib turish va uni



L. A. Arsimovich



I. E. Tamm



7.15-rasm. Termoyadro sintez reaktorining sxemasi:

- 1 — plazma ipi; 2 — toroidsimon kameraning vakuum qismi; 3 — plazmani neytron va gamma nuridan himoyalovchi ekran, ya'ni toroidsimon kameraning g'ilofi; 4 — vakuum nasoslari; 5 — yadro yoqilg'isi aylanadigan kontur; 6 — yadro yoqilg'isining injektori; 7 — yadro yoqilg'isining ombori; 8 — gaz bo'luvchi qurilma; 9 — tritiy to'plagich; 10 — issiqlik almashtirgich; 11 — kaliy aylanadigan kontur; 12 — elektr stansiyasi; 13 — toroid ichida magnit maydoni hosil qiluvchi chulg'am. He — geliy gazini o'lgachig; LiK — litiyning sirkulatsiya konturi; Li — litiy sohasi.



N. G. Basov

termoyadro reaktori devoridan izolatsiyalashda kuchli magnit maydonidan foydalaniladi.

Hosil qilingan mikroportlash termoyadro sintez reaksiyasining yondirilishi hisoblanadi. Bu reaksiya vaqtida yengil elementlar yadrolarining qo'shilishi (sintezi) sodir bo'ladi. Natijada bu portlashlarda o'ta katta bosim ta'sirida tabletka siriidagi zarralar juda ham katta tezlikka erishib termoyadro yoqilg'isini (deyteriy, tritiy tabletkasi) siqadi va kuchli qizdiradi. Shunda mikroportlashlar davriy sodir bo'lishi (yo'naltirilgan

lazer impulsiga, mos ravishda), e'tiborga olinsa, u xuddi ichki yonuv dvigateli siklidagi termodinamik jarayonlarga o'xshash

bo'ladi. Shunda «issiqlik energiyasi takrorlanadigan mikroportlashlarda ajraladi», deb olinadi.

To'qqiz kanalli lazer ($E=1,3$ kJ; impulsi 0,1 mikrosekund) qo'llanilgan qurilmaning quvvati 10^{12} Vt bo'lib, u 1970-yilda P. N. Lebedev nomidagi Fizika institutida (Rossiya) ishga tushgan edi. Bunday qurilmalar Fransiya, AQSH va boshqa mamlakatlarda ham ishlatilmoqda.

Ammo boshqariladigan termoyadro sintez reaksiyasiga sarflanadigan energiya miqdori, sintez vaqtida ajralgan energiyadan katta, ya'ni iqtisodiy jihatdan zararga ishlamoqda. Chunki yadrolar o'rtasidagi o'zaro itarish kuchlarini yengish amaliy tadqiqotlarda oson bo'lmayapti.

Yadrolarni sintez qilishning yana bir yo'nalishi — *sovuq yadro sintez reaksiyasini* past temperaturalarda (291—293 K) amalga oshirish mumkinligini akademik A. G. Saxarov 1948-yili «Mezomolekulalar DDM va DTM hosil qilinganda yengil yadrolar sintezi sodir bo'ladi» deb aytgan edi.

1989-yili amerikalik olimlar Fleyshman va Pons hamda tadqiqotchilar guruhi (Jouns) elektroliz vaqtida yengil elementlar sintezi sodir bo'lishini e'lon qiladi. Og'ir suvni elektroliz qilish vaqtida ossillogrammadagi shovqin tabiiy paydo bo'ladigan neytron oqimining shovqiniga nisbatan katta, ya'ni asboblari yordamida qayd etilgan neytronlar soni ko'proq bo'lishi kuzatilgan. Bunday natijalarni tadqiqot tajribalarida Fleyshman, Pons, Jouns (AQSH, Yuta shtati), R. N. Kuzmin va B. N. Shvilkin (Rossiya, MDU) kuzatganlar.

Sovuq yadro sintez reaksiyasining fizik mexanizmi to'liqigicha yaratilgan emas. Faqat bu olimlarning ayrimlari vodorod atomlarini qabul qilishi (yutishi) yuqori bo'lgan palladiy, titan, tantal, sirkoniy, yerda kam uchraydigan ele-

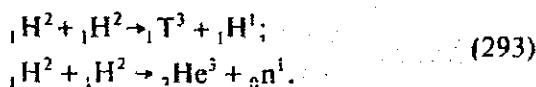


A. M. Proxorov



Ch. X. Tauns

mentlar, vanadiy qotishmasidan yasalgan katod hamda platinali anoddan foydalanganida yuqoridagilar kuzatilgan. Palladiyli elektrodga deyteriyning musbat ionlari elektroliz vaqtida elektrolitdan ($\text{LiOD } 0,1 \text{ mol/l}$) $\sim 1,6 \text{ mA/sm}^2$ tok o'tganda kiritilgan. Shunda D^+ ionlari quyidagi reaksiyaga kirishishi mumkin, deb hisoblangan, ya'ni



Reaksiyalardan ko'rinadiki, vodorod izotoplarining qo'shilishi natijasida T^3 va He^3 hosil bo'ladi hamda proton va neytron uchib chiqadi. Hosil bo'lgan neytronlar sovuq yadro sintezi vaqtida ajraladi deb hisoblanganlar.

Nazorat savollari

?

1. Termoyadro sintez reaksiyasi qanday sodir bo'ladi? Bu reaksiya qanday temperaturada sodir bo'ladi va bu temperatura qanday usullar bilan hosil qilinadi? Ish jismi sifatida qanday kimyoviy elementlar sintez yoqilg'isi sifatida ishlatiladi?
2. Termoyadro sintez reaksiya reaktori qanday qismlardan tashkil topgan va uning ishlashini tushuntiring.
3. Termoyadro sintez reaksiyasida ajralgan issiqlik qanday usul bilan mashina ishtirokisiz elektr energiyasiga aylantiriladi?
4. Plazma ipi qanday turdagi maydon bilan siqiladi va tutib turiladi? Bu usulni qaysi olimlar taklif qilgan va asoslagan?
5. Termoyadro sintez reaksiyasi necha xil yo'nalishda amalga oshirilishi mumkin?
6. Termoyadro sintez reaksiyasi ekzotermikmi yoki endotermik? Qanday kimyoviy elementlarning termoyadro sintez reaksiyasi vaqtida ko'proq issiqlik ajraladi?
7. Termoyadro sintez reaksiyalarini yozing va ularni tavsiflang.

8.1. Issiqlikning uzatilishi va almashinuvi

Hayotimizda har kuni issiq va sovuq jismlar bilan ish ko'ramiz. Jismlarni issiq yoki sovuq ekanligini tez aniqlay olamiz. Jismlardagi issiqlik qanday paydo bo'lgani va uning o'z-o'zidan qanday «yo'qolib» qolganiga go'ho e'tibor ham bermaymiz. Albatta issiqlik yo'qolib qolmaydi, faqat atrofdagi jismlarga o'tib ketadi. Chunki hamma jismlar doimo issiqlik energiyasining muvozanat holatida bo'lishiga intiladi. Jismlar muvozanat holatiga o'tish davomida o'zlaridagi ortiqcha issiqlik energiyasini atrofdagi jismlarga (muhitga) uzatadi. Issiqlikning uzatilishi o'z-o'zidan sodir bo'ladigan hodisadir.

Temperaturasi yuqori bo'lgan jism sirtidan temperaturasi pastroq bo'lgan jism sirtiga issiqlik energiyasining jism zarrachalariaro o'tish hodisasi issiqlikning uzatilishi deyiladi.

Issiqlik energiyasining ko'chish jarayoni termodinamikada qaytmas jarayonga mansub, chunki Klauzius qoidasiga muvofiq issiqlik sovuq jismdan issiq jismga o'z-o'zidan o'tmaydi. Issiqlikning ko'chish jarayoni mexanizmini moddaning ichida sodir bo'ladigan fizika-kimyoviy o'zgarishlarga e'tibor bermagan holda, ya'ni fenomenologik (o'ta nodir ichki hodisalar mohiyatiga e'tibor bermasdan) qonunlar asosida o'rganiladi.

Termodinamikaning ikkinchi qonuniga muvofiq issiqlik o'tkazuvchanlik hodisasi o'z-o'zidan sodir bo'ladi, ya'ni issiqlik issiqroq jismdan sovuqroq jismga o'z-o'zidan ko'chadi. Bunda issiqlik oqimi zichligining vektori T_2 dan T_1 ga, ya'ni temperaturaning pasayish tomoniga yo'nalgan bo'ladi, chunki $T_2 > T_1$. Issiq jism muhitga, o'zining temperaturasi shu jismni tashkil etgan zarralarning issiqlik harakati energiyasi qiymatiga teng bo'lgan temperaturaga ($E=0,025$ eV) qadar, o'zidan issiqlikni chiqaradi. Issiqlik hamma turdagi muhitda (suyuq, qattiq, gaz, vakuum) tarqaladi. Natijada issiq jism soviydi, sovuq jism isiydi. So'ngra temperatura muvozanatlashadi. Issiqlikning bunday o'tish hodisasini *issiqlik almashinuvi* deyiladi.

Demak, hamma jismlarda issiqlik energiya shaklida, jismni tashkil etgan zarralar harakati hisobiga paydo bo'ladi. Turli temperaturali jismning sirtlari, qismlari, zarralari o'zaro tekkanda issiqlik energiyasining o'tish jarayoni sodir bo'ladi. Bu jarayonni *issiqlik o'tkazuvchanlik* deyiladi. Bunda zarralar harakati har doim

past temperatura tomonga yo'nalgan bo'ladi. Jismlarning turiga, agregat holatiga qarab, issiqlik energiyasini tashuvchi zarralar ham turlicha bo'lishi mumkin. Masalan, gazlarda-molekulalarning tartibsiz harakati, metallarda — erkin elektronlar, dielektrlkrlarda — kristall panjara tugunlaridagi atomlarning tebranma harakati, suyuqliklarda — zarralar harakati bilan birgalikda makroskopik hajmlar harakati, vakuumda — elektromagnit maydon hisobiga issiqlik o'tkazuvchanlik sodir bo'ladi.

Demak, issiqlikni zarralar, ularning bir guruhi yoki elektromagnit maydoni tashir ekan. Issiqlik energiyasi uch xil usulda almashinadi.

8.2 Issiqlik o'tkazuvchanlik

Issiqlik o'tkazuvchanlik hodisasi jismlar o'rtasida temperaturalar farqi bo'lganda uzluksiz muhitda sodir bo'ladi. Bunday issiqlik o'tkazuvchanlikda issiqlikni zarralar va molekulalar tashiydi, deb qaraladi. Issiqlik tashuvchi agent jism ichida, uning qismlari orasida, o'zaro tegib turgan issiq va sovuq jismlar orasida harakatlanadi, deb faraz qilinadi.

Issiqlik energiyasining o'z-o'zidan issiq jismdan sovuqroq jismga ish bajarmasdan o'tish hodisasi issiqlik o'tkazuvchanlik deyiladi.

Uzatiladigan issiqlik miqdori tegib turgan sirt kattaligiga va issiqlikning o'tish vaqtiga bog'liq bo'ladi. Termodinamikada bu kattalik issiqlik oqimining quvvati deyiladi va SI o'lchovlar birligi sistemasida J/s, ya'ni W da o'lchanadi.

Jismning hamma nuqtalarida temperaturasi bir xil ($T=\text{const}$) bo'lgan sirt *izotermik* (yunoncha isos — *teng*, *birdek*, *o'xshash* va therme — *issiqlik*) sirt deyiladi. Temperatura maydonining vektori izotermik sirtga tik yo'nalgan bo'ladi. Temperaturaning eng katta o'zgarishi normal (tik) yo'nalishda kuzatiladi.

Izotermik sirtga tik tushirilgan normal bo'yicha temperatura o'zgarishining Δn masofaga nisbati *temperatura gradiyenti* deyiladi.

$$\lim \left(\frac{\Delta T}{\Delta n} \right)_{\Delta n \rightarrow 0} = \text{grad} T. \quad (294)$$

1822-yili fransuz olimi Jan Batist Jozef Furye (1768—1830) energiya (modda) ni ko'chish jarayoni qonuniyatini o'rganib is-

siqlik o'tkazuvchanlik bo'yicha uzatilgan issiqlik oqimi zichligining vektori temperatura gradiyentiga mutanosih ekanligini isbotladi va quyidagi formulani yaratdi:

$$q = -\lambda \text{grad } T, \quad (295)$$

bunda λ — jismning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti, $\text{Wt/m}\cdot\text{K}$; Bu koeffitsient moddalarning issiqlik o'tkazuvchanlik xossasini ifodalaydi. Tenglamadagi «minus» ishorasi issiqlik oqimi bilan temperatura gradiyenti vektorlarining yo'nalishlari qarama-qarshi ekanligini bildiradi, ya'ni temperaturaning eng katta pasayishi tomoniga yo'nalganligini ko'rsatadi. Issiqlik oqimining tik yo'nalishdagi zichligi q_n istalgan biror yo'nalishdagi q vektori bilan normal o'rtasidagi burchak ko'paytmasiga teng, ya'ni

$$q_n = q \cos \alpha = -\lambda \text{grad } T \cdot \cos \varphi. \quad (296)$$

Moddalarning issiqlik o'tkazuvchanligi turlicha va ularning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti keng oraliqdagi ($6 \cdot 10^{-3} \text{ W/m}\cdot\text{K}$ dan to $410 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ gacha) qiymatlarni qabul qiladi (6-jadval). Barcha metallar uchun issiqlik o'tkazuvchanlikning elektr o'tkazuvchanlikka nisbati o'zgarmas kattalikdir (Videman-Frans qonuni), ya'ni

$$\lambda_T = \lambda_i / \lambda_e.$$

Masalan, misning issiqlik o'tkazuvchanligi $385 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$, suvniki esa $0,63 \text{ J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}$. Suyuq Geliy-II ning $T=2,19 \text{ K}$ dan past temperaturada issiqlik o'tkazuvchanligi 3 mln. marta ortadi (V. Keezom-D. Landau effekti). Bu holatni, ya'ni Geliy-II ning issiqlik o'tkazuvchanligi uzluksiz muhitga ham, konvektiv harakatga ham bog'liq bo'lmagan kvant suyuqligining xususiyatlaridan biri ekanligini nazariy jihatdan D. Landau tushuntirgan.

Jismlarning issiqlik o'tkazuvchanligi ularning fizik xossalariga bog'liq. Agar $\lambda < 0,2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ bo'lsa, bunday materiallar issiqlik izolatori deyiladi. Bularga havo, yengil g'ovaksimon materiallar, ya'ni penoplast, shisha tolasi va ko'pchilik elektr izolatorlar kiradi (7-jadval).



Furye Jan Batist Jozef

Ayrim materiallarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti.

Materiallar nomi	Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti, λ , W/m K	Materiallar nomi	Issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti, λ , W/m K
Metallar:		Issiqlik izolyatsiyasi materiallari	
Kumush	410	Asbest	0,1—0,2
Mis	385	Qizil giltuproq	$(6—10) \cdot 10^{-3}$
Sof temir	70	Kigiz, po'kak, torf plitasi	$(4—2) \cdot 10^{-2}$
Legirlangan po'lat	17—45	Yog'och qipig'i	0,07
Uglerodli po'lat va cho'yan	45—60	Turli xil qattiq materiallar:	
Aluminiy	200—230	Suv qozoni qasmog'i	0,7—2,3
Q'urilish materiallari:		Ko'mir	0,12—0,2
Beton	1,3	Qozon shlaki	0,3
Pishiq g'isht	0,25	Qor:	
Oddiy shisha	0,75	yangi yoqqani	0,1
Shomot g'ishti	0,14—0,18	zichlashgani	0,5
Suvoq materiallari:	0,7—0,9	Karbonat angidrid	$2 \cdot 10^{-2}$
Daryo qumi (quruq)	0,3—0,4	Havo	$2,5 \cdot 10^{-2}$
Yog'och (tola bo'y-lab qirgimi)	0,35—0,7	Vodorod	0,2
		Suv	0,63

Furye formulasini yassi (8.1-rasm, a) va silindrik (8.1-rasm, v) devor uchun quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$q = -\lambda \frac{T_1 - T_2}{l} \cdot S, \quad (297)$$

bunda λ — devor qalinligi, m;

S — yassi devor yuzasi, m²;

l — vaqt, s.

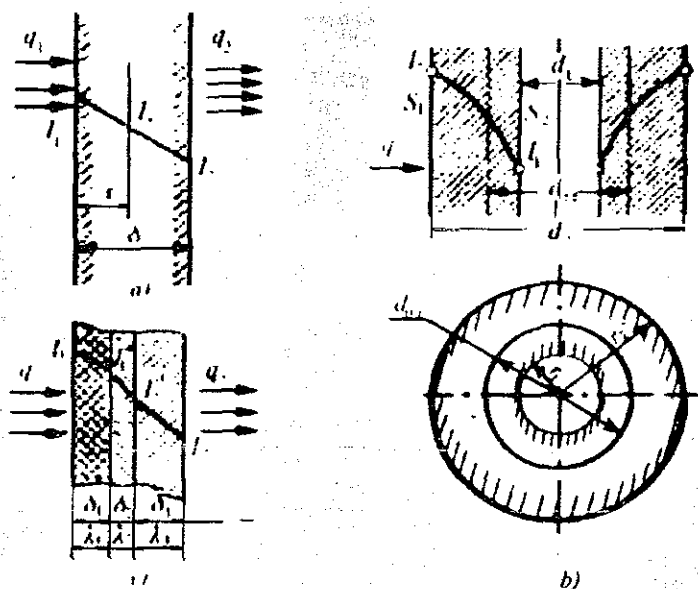
Bir jinsli silindrik (8.1-rasm, v) quvurning l uzunlikdagi devori orqali uzatilgan issiqlik miqdorini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q = \frac{2\pi l(T_2 - T_1)}{\ln(d_2/d_1)} = \frac{0,87\pi l(T_2 - T_1)}{\lg(d_2/d_1)}, \quad (298)$$

bunda l — quvur uzunligi, m; d_1 va d_2 — quvurning ichki va tashqi diametri, m; λ — issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti.

Issiqlik isrofini kamaytirish maqsadida ko'p qatlamli issiqlik izolatsiyasi materiallaridan foydalaniladi. Masalan, isitish tarmog'ida quvurlar shisha paxtasi, turli xil qoplamalar bilan o'raladi va qoplanadi. Shu yo'l bilan issiqlikning tashqariga befoйда chiqib ketishining oldi olinadi. Uzoq muddatgacha ishlatiladigan issiqlik eltuvchi bug' va suv quvurlarining ichki devorlarida qasmoq hosil bo'ladi. Bu qasmoq issiqlikning quvur orqali muhitga tarqalishiga to'sqinlik qiladi. Natijada issiqlik isrofi ortib ketadi.

Faraz qilaylik, qatlamlarining qalinliklari $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ va issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientlari $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ bo'lgan uch qatlamli quvurga o'zgarmas oqim vaqt birligida q issiqlik miqdorini elta-yotgan bo'lsin (8.1-rasm, v). Ikki chekka qatlamlarning tashqi sirtlaridagi temperaturalarini, mos ravishda, T_1 va T_2 hamda o'rta



8.1-rasm. Turli xil devorlar orqali issiqlikning uzatilishi:

a) yassi devor; v) silindrik devor; b) ko'p qatlamli devor orqali issiqlikning uzatilishi.

qatlam sirtlaridagi temperaturalarini T_1 va T_2 , deb olsak, ko'p qatlamli quvurning har bir qatlamini uchun issiqlik miqdorini quyidagicha yozish mumkin:

$$q = \lambda_1 S \frac{(T_1 - T_1')}{\delta_1}; \quad q = \lambda_2 S \frac{(T_1' - T_2')}{\delta_2}; \quad q = \lambda_3 S \frac{(T_2' - T_2)}{\delta_3}. \quad (299)$$

(299) tenglamadan qatlamlar sirtlari orasidagi temperaturalar farqini topamiz:

$$T_1 - T_1' = \frac{q\delta_1}{\lambda_1 S}; \quad T_1' - T_2' = \frac{q\delta_2}{\lambda_2 S}; \quad T_2' - T_2 = \frac{q\delta_3}{\lambda_3 S}. \quad (300)$$

Temperaturalar farqi keltirilgan (300) tenglamalarning chap va o'ng tomonlari yig'indisini olib, uni ixchamlab, ko'p qatlamli quvur chekkalari orasidagi temperaturalar farqi topiladi, so'ngra undan ko'p qatlamli quvurga uzatilgan issiqlik miqdori q quyidagicha yoziladi, ya'ni

$$T_1 - T_2 = \frac{q}{S} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)$$

bundan

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right)} S. \quad (301)$$

Demak, uch qatlamli quvur uchun yozilgan (301) va (298) ifodalardan foydalanib, ixtiyoriy n ta qatlamli quvur uchun issiqlik miqdorini quyidagicha yozish mumkin:

$$\begin{aligned} q &= \frac{2\pi l \Delta T}{\sum \psi} = \frac{2\pi l (T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \ln \frac{d_{n+1}}{d_n} \right)} = \\ &= \frac{0,87\pi l (T_1 - T_2)}{\left(\frac{1}{\lambda_1} \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \lg \frac{d_3}{d_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \lg \frac{d_{n+1}}{d_n} \right)}. \end{aligned}$$

Demak, issiqlik o'tkazuvchanlik usuli, ya'ni jismlar sirtlari o'zaro tegib turganida issiqlikning uzatilishi birgina jismlarning xossalriga bog'liq bo'lmasdan, ularning o'zaro tegib turgan sirtlarining kattaligiga va qatlamlar soniga ham bog'liq bo'lar ekan.

8.3. Konvektiv issiqlik almashinuvi

Suyuq, gazsimon yoki sochiluvchan moddalar makroskopik qismlarining harakati vaqtida zarralarining o'zaro aralashuvi natijasida issiqlik energiyasining uzatilish hodisasi konvektiv issiqlik almashinuvi deyiladi. Konveksiya (lot. convectio — keltirish) sochiluvchan, suyuq va gazsimon moddalar qatlamlari zarralarining tartibsiz harakati vaqtida paydo bo'ladi. Temperaturasi yuqori bo'lgan suyuqlik (gaz) massasi har doim temperaturasi pastroq bo'lgan tomonga uzluksiz va tartibsiz harakatlanadi hamda o'zi bilan issiqlikni eltadi.

Gaz va suyuqlikning konvektiv harakati vaqtida qattiq, suyuq va gazsimon moddalarga issiqlik energiyasini berish hodisasi issiqlikning konvektiv uzatilishi deyiladi.

Nyuton va Rixman qonuniga muvofiq issiqlik oqimining kattaligi issiqlik almashinuvchi qattiq jism sirtining yuzasi bilan suyuqlik sirtlaridagi temperaturalar ayirmasining ko'paytmasiga mutanosib, ya'ni

$$q = \alpha S(T_q - T_s), \quad (302)$$

bunda T_q va T_s — qattiq va suyuq jismlar temperaturasi (absolut qiymatlari olinadi va ularning ayirmasi musbat deb qabul qilinadi, ya'ni katta sonidan kichigi ayriladi); α — issiqlik berish koeffitsienti, $W/m^2 \cdot K$.

Issiqlik berish koeffitsienti α ning fizik ma'nosi issiqlikning berilish jadalligini bildiradi. Uning son qiymati qattiq jism sirti bilan suyuqlik temperaturalari farqi bir Kelvin bo'lganda birlik yuzadagi almashinuvchi issiqlik oqimiga teng. Issiqlik berish koeffitsienti konvektiv harakatdagi oqim turiga va boshqa ta'sirlarga bog'liq.

Konvektiv issiqlik almashinuvidagi issiqlik eltuvchi moddaning (suyuqlik, gaz) harakati tabiiy va sun'iy bo'lishi mumkin. Tabiiy konveksiya hodisasi faqat suyuqlik yoki gaz massasining issiqlik manbayi bilan issiqlik almashinuvi natijasida issiq sirt yaqinida o'z hajmini o'zgartirib (ya'ni zichligini kamayishi) yuqoriga harakatlanishi hisobiga paydo bo'ladi. Issiqlik beruvchi sirt yaqinidagi suyuqlik molekulalarining tempera-



G. V. Rixman

turasi yuqori bo'lib, issiqlik manbayidan uzoqlashgan sayin ularning temperaturasi pasayib boradi.

Ma'lumki, zichligi kichik bo'lgan gaz va suyuqlik har doim o'zidan zichligi katta bo'lgan moddaga nisbatan yuqori qatlamda joylashadi. Bir jinsli suyuqlik yoki gazsimon modda qizdirilganda issiqlik manbayiga yaqin bo'lgan qismning elementar hajmchalaridagi modda, yutilgan issiqlik energiyasi hisobiga o'z hajmini orttiradi va natijada zichligi kamayadi. Shuning uchun bu kichik hajmdagi suyuq modda yuqori qatlamlarga qarab ko'tariladi.

Demak, zichliklar farqi paydo bo'lganligi sababli suyuqlik yoki gaz hajmchasidagi moddaga ko'tarish kuchi F_k ta'sir etadi. Bu kuchning kattaligi Arximed va og'irlik kuchlarining algebratik yig'indisiga teng bo'ladi, ya'ni

$$F_k = \rho_c g h S - mg = \rho_c g V - \rho g V = g V (\rho_c - \rho). \quad (303)$$

bunda ρ va ρ_c — sovuq va issiq suyuqlik hajmlaridagi suyuqlik (gaz) zichliklari; V — suyuqlikning hajmchasi; g — erkin tushish tezlanishi.

Hajm birligidagi suyuqlik massasi olinganligi uchun ($V=1 \text{ m}^3$) ko'tarish kuchi ifodasini quyidagicha yozish mumkin:

$$F_k = g(\rho_c - \rho). \quad (304)$$

Ideal gazlar uchun hajmiy kengayish koeffitsientining temperaturaga bog'liqligi quyidagicha yoziladi:

$$\beta = \frac{1}{T}.$$

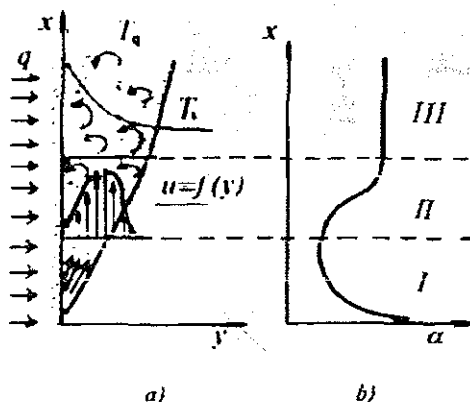
Shuning uchun suyuqliklarda bu koeffitsient kichikligini e'tiborga olinsa, hajmiy kengayish koeffitsientini past temperaturalarga mos keluvchi hajmlar yoki zichliklar ayirmasi ko'rinishida yozish mumkin, ya'ni

$$\beta = \frac{1}{V} \left[\frac{V - V_c}{T - T_c} \right] \text{ yoki } \beta = \frac{\rho_c - \rho}{\rho_c (T - T_c)}. \quad (305)$$

Bu tenglikdan zichliklar ayirmasini topamiz, ya'ni

$$\beta \rho_c (T - T_c) = \rho_c - \rho. \quad (306)$$

bunda T va T_c — issiq va sovuq suyuqliklar temperaturalari.



8.2-rasm. Tabiiy konvektiv issiqlik almashinuvi:

a) tabiiy konveksiyada issiqlik eltuvchining tezliklar va temperatura bo'yicha laminar va turbulent harakatidagi taqsimoti; b) issiqlik berish koeffitsientining laminar (I) va turbulent (III) hamda aralash (II) oqimlarda o'zgarishi.

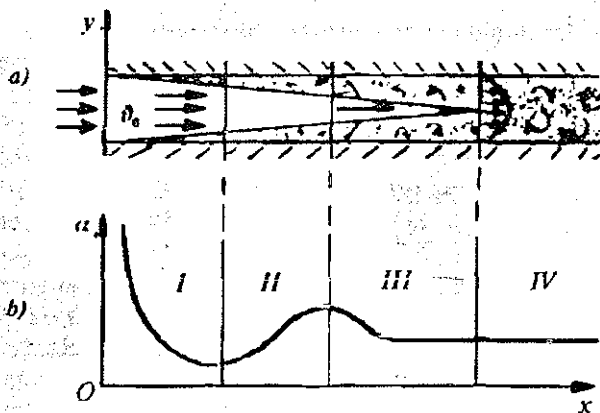
Isigan suyuqlik massasini yuqoriga ko'tarish kuchi F_k zarralarni quyi qatlamdan yuqoriga ko'taradi. Bunda tashqi kuch ishtirok etmaydi, ya'ni suyuqlikning yuqori temperaturali qismi o'z-o'zidan tabiiy ravishda ko'tariladi.

8.2-rasm, a dan ko'rinadiki, suyuqlik massasini tashkil etgan zarralar qizdirilish sohasida (I) laminar harakat qiladi. O'tish sohasida (II) ularning laminar va turbulent harakati kuzatiladi. Oxirgi sohada (III) zarralar harakati turbulent bo'ladi.

Issiqlikni berish koeffitsienti α ning qiymati konvektiv issiqlik almashinuvi jarayonining laminar sohasida sekin-asta pasayib boradi, so'ngra o'tish sohasining chegarasidan hoshlab, turbulent sohasigacha ortib boradi, so'ngra turg'unlashadi. 8.2-rasm, b bunday holat keltirilgan.

Demak, laminar oqimda issiqlik oqimi vektori aralashish yo'nalishiga perpendikular bo'lganligi uchun uning qiymati katta bo'lmaydi. Turbulent oqimda esa suyuqlik uyurmali harakatlanadi va yaxshi aralashadi hamda issiqlikni tez uzatadi.

Suyuqlik massasi past temperaturali hajmdan mashina yordamida so'rib chiqarilib isitkichga yo'naltirilsa, ya'ni harakat majburiy (ochiq yoki berk kontur bo'yicha) hosil qilinsa, bunday hodisa **majburiy konveksiya** deyiladi.



8.3-rasm. Majburiy konveksiyada issiqlik eltuvchining harakati (a) va uning issiqlik uzatish koeffitsientini oqim turiga bog'liqligi (b):
I, II, III va IV — laminar, o'tish, turbulent va turg'un zonalar.

Tashqi ta'sir hisobiga suyuqlik zarralari bir tekis harakatlanmasdan uyurmaviy harakat turiga o'tadi.

Suyuqlik to'liq aralashishi jarayonida o'zaro va devor (quvur, panjara va h.k.) bilan ta'sirlashish vaqtida issiqlik almashadi. Majburiy konveksiyada issiqlikning uzatilishi, asosan issiqlik energiyasi eltuvchi zarralarning muhitga tekkan vaqtida, issiqlik o'tkazuvchanlik qonuniyati bo'yicha sodir bo'ladi.

Faraz qilaylik, issiqlik quvur devori orqali undagi suyuqlikka uzatilayotgan bo'lsin. Unda, suyuqlik oqimining chegaraviy qismida, ya'ni quvur ichki devori bilan suyuqlik oralig'ida yupqa parda qatlami hosil bo'ladi. Bu qatlamning harakatlanish tezligi taqriban nolga teng. Chegaraviy qatlam suyuqlikning qo'shni yon qatlamlariga ishqalanib, ularning ham tezligini kamaytiradi. Suyuqlikning bunday oqimi markazida (quvur o'qida) tezlik eng katta bo'ladi va u $\bar{v}=f(r)$ radius funksiyasidir, ya'ni quvur o'qidan uning devorigacha tezlik kamayib boradi (8.3-rasm, a). Oqimning chegaraviy qatlamdagi harakati *laminar* va undagi zarralarning temperaturasi quvur devori temperaturasiga taqriban teng bo'ladi. Devordan boshlab quvur shaklidagi oqim markazigacha suyuqlik temperaturasi pasayib boradi.

**Tabiiy va majburiy konveksiyada issiqlik uzatish
koeffitsientining qiymatlari**

Konvektiv issiqlik uzatish turlari va unda qo'llanilgan moddalar	Issiqlik uzatish koeffitsienti, α , $W/m^2 \cdot K$
Gazlardagi tabiiy konveksiya	5,8—34,7
Gaz quvurda yoki ular oralig'ida harakatlanganda	11,6—116
Suv bug'ining quvurdagi harakati	116—2320
Suvning tabiiy konveksiyasi	116—1160
Suvning q'uvurdagi harakati	575—11600
Suvning qaynashi	2320—11600
Suv bug'ining kondensatsiyasi	4650—17500

Oqimning chegaraviy qatlamida issiqlik almashinuvi amalga oshadi. Bu qatlamda issiqlik almashinuvi issiqlik o'tkazuvchanlik qonuniyati bo'yicha kechadi va issiqlik oqimining harakatiga qarshilik ko'rsatadi. Natijada, bu qatlamda temperatura isrofi katta bo'ladi.

Issiqlik almashinuvida qo'llaniladigan asbob-uskunalar turiga, konstruksiyasiga, materialiga ko'ra har xil issiqlik almashinuv jarayonlarida qo'llaniladi. Masalan, ichki yonuv dvigatelining sovitish sistemasida majburiy konvektiv issiqlik almashinuvi usuli qo'llaniladi. Sovitish agenti (suv, antifriz) silindrlar blokidagi ortiqcha issiqlik miqdorini o'zining majburiy harakati davomida sovitkichga chiqaradi.

Issiqlik almashinuvi jarayonida qo'llaniladigan yuqori va past temperaturali suyuqlik oqimi, yo'nalishiga qarab to'g'ri, teskari va kesishgan oqimli bo'ladi. Bunday oqimlar kondensatorda, ekonomayzerda, regeneratorda va turli xil issiqlik almashtirgich asboblarda keng qo'llaniladi.

Issiqlik uzatish koeffitsientining qiymati issiqlik eltuvchi va qabul qiluvchining fizik xossalariga qarab furlicha bo'ladi (8-jadvalga qarang).

Gazlarda tabiiy konveksiyada issiqlik uzatish koeffitsientining qiymati $6-35 W/m^2 \cdot K$ bo'lsa, suv bug'ining kondensatsiyasida bu qiymat 17,5 ming $W/m^2 \cdot K$ gacha yetadi. Jadvaldan ko'rinadiki, moddalar va ularning harakat turiga qarab issiqlik uzatish koeffitsienti o'zgarar ekan.

8.4. Nurli issiqlik almashinuvi

Issiqlikning bir jismdan ikkinchisiga nur orqali uzatilish jarayonini *nurli (radiatsiya) issiqlik almashinuvi* deyiladi. Issiqlikning nur shaklida tarqalishi bu jism ichki energiyasining elektromagnit to'liqin energiyasiga aylanishidir. Nur energiyasi muayyan to'liqin uzunligiga va chastotaga ega bo'lib, vakuumda yorug'lik ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s) tezligida tarqaladi. Jism temperaturasi absolut noldan farqli bo'lganda nurlaydi. Bu nur energiyasining jadalligi hamma jismlarda bir xil emas. Nur jismlar bilan ta'sirlashish jarayonida uning ma'lum qismi jismda yutiladi, bir qismi qaytadi va qolganini o'tib ketadi. Nur energiyasi muhit bilan ta'sirlashib, unda yutilsa, shu muhitning ichki energiyasi ortadi, aksincha jism nur tarqatsa, uning ichki energiyasi kamayadi, ya'ni jism soviydi. Nur energiyasi jismlar bilan $5 \cdot 10^{-14}$ m dan 10^3 m gacha bo'lgan to'liqin uzunligi oralig'ida ta'sirlashadi (9-jadvalga qarang).

Nur energiyasini tashuvchi zarrachani *foton* deyiladi. Foton (yunon. *phos (photos)* — yorug'lik) harakatlanayotgan vaqtda ma'lum massaga ega, tinch holatda uning massasi nolga teng bo'ladi.

Nurlar orasida *ko'zga ko'rinadigan va infraqizil nurlar* ko'p miqdorda issiqlik energiyasini eltganligi uchun *issiqlik nurlari* deyiladi.

Sfera markazida joylashgan issiq jism hamma yo'nalishda bir xil nur tarqatadi va temperaturasi ko'tarilgan sayin nur tarqatish jadalligi ortadi va aksincha.

Nur energiyasining kamayishi masofaning kvadratiga teskari mutanosiblik qonuniyatiga bo'ysunadi. Nur manbayidan jism qancha uzoqda joylashsa, shuncha kamroq energiyani yutadi va ichki energiyasi kamroq o'zgaradi.

9-jadval

Nurlarning to'liqin uzunligi

Nurlanish turi	To'liqin uzunligi, λ , m
Kosmik nurlanish	$5 \cdot 10^{-14}$
Gamma nurlari	$5 \cdot 10^{-11}$ dan $1 \cdot 10^{-13}$ gacha
Rentgen nurlari	$1 \cdot 10^{-12}$ dan $2 \cdot 10^{-8}$ gacha
Ultrabinafsha nurlar	$2 \cdot 10^{-7}$ dan $4 \cdot 10^{-7}$ gacha
Ko'zga ko'rinadigan nurlar	$4 \cdot 10^{-7}$ dan $8 \cdot 10^{-7}$ gacha
Infraqizil nurlar	$8 \cdot 10^{-7}$ dan $1 \cdot 10^{-4}$ gacha
Radioto'liqlar	10^{-2} dan $n \cdot 10^3$ gacha

Aniq temperaturadagi jismning nur tarqatish xususiyati jism birlik yuzasidan vaqt birligida tarqatilgan barcha chastotalardagi to'liqlar energiyasi bilan bog'lanishi quyidagicha ifodalanadi:

$$q = \frac{E}{S \cdot t},$$

Demak, jism sirtiga tushgan nur energiyasi yutilgan, qaytgan va o'tgan nurlarning yig'indisiga teng bo'lar ekan, ya'ni

$$E_T = E_A + E_R + E_D, \quad (307)$$

bunda E_T , E_A , E_R va E_D — mos ravishda, jismga tushgan, unda yutilgan, undan qaytgan va o'tib ketgan nur energiyalaridir. Soddashtirish va tenglama mohiyatini ochish maqsadida (307) tenglamani hadma-had E_T ga bo'lamiz va bu nisbatlarni mos ravishda yutilish (A), qaytarish (R) va o'tkazish (D) koeffitsientlari orqali ifodalab, balans tenglamasini hosil qilamiz:

$$\frac{E_A}{E_T} + \frac{E_R}{E_T} + \frac{E_D}{E_T} = \frac{E_T}{E_T},$$

$$A + R + D = 1. \quad (308)$$

Mazkur tenglamani nurli issiqlik almashinuvining balans tenglamasi deyiladi. Tenglamadagi koeffitsientlar qiymatlarini o'zgartirib ayrim fizik hodisalar mohiyatini ochish mumkin:

a) faraz qilaylik, $R=D=0$ bo'lsin. Unda $A=1$, ya'ni jism sirtiga tushgan hamma chastotadagi nur energiyasi mutlaqo yutiladi. Bunday xossaga ega bo'lgan jism **absolut qora jism** deyiladi.

Absolut qora jism ko'zga ko'rinmaydi, chunki u hamma chastotadagi nurlarni mutlaqo yutadi. Jismdan nur qaytmasa, u ko'zga ko'rinmaydi. Absolut qora jism tabiatda yo'q. Ammo unga ayrim xossalari jihatidan yaqinroqlari mavjud. Masalan, qurum uchun nur yutish koeffitsienti $A=0,9-0,96$. Tabiatda shunday jismlar borki, ular issiqlik nurini yutadi, ammo ko'zga ko'rinadigan nurni o'zidan yaxshi o'tkazadi va qaytaradi. Bunga



Plank Maks Karl Ernst
Lyudvig

misol qilib muzni, qorni va shishani keltirish mumkin. Muz va qorning nurni yutish koeffitsienti $A=0,95-0,98$, shishaniki esa $A=0,94$ ga teng;

b) agar $A=D=0$ shart, ya'ni $R=1$ bajarilsa, jism sirtiga tushgan barcha chastotadagi nurlarning hammasi sochilib qaytadi. Nurni diffuzion (sochib) (lot. *diffusio* — *tarqalish, oqish*) qaytaradigan jism *oq jism* deyiladi.

Jism sirtiga tushgan nurning tushish burchagi uning qaytish burchagiga teng bo'lgan jism *ko'zgu* deyiladi.

Har qanday jism o'z sirtiga tushayotgan nurni qaytarish bilan birga, yutilgan nur energiyasi hisobiga, o'zidan nur chiqarishi mumkin. Jism sirtidan qaytgan va jism tarqatgan nur energiyalarining yig'indisi *effektiv nurlanish* deyiladi va u quyidagicha ifodalanadi, ya'ni

$$E_{\text{eff}} = RE_T + E; \quad (309)$$

v) agar $A=R=0$ shart, ya'ni $D=1$ bajarilsa, jism sirtiga tushgan barcha chastotadagi nur undan o'tib ketadi. Bunday xossaga ega jism *absolut shaffof jism* deyiladi. Shaffof jismlar *diatermik* (yunoncha *dia therme*, *dia* — orqali, *therme* — *issiqlik*), ya'ni *issiqlik nurlarini yutmaydigan* jismlar deyiladi.

Bir va ikki atomli gazlar diatermik hisoblanadi. Ko'p atomli gazlar esa issiqlik energiyasini nur shaklida chiqaradi va yutadi.

Yuqorida bayon qilingan fikr va mulohazalardan ma'lumki, tabiatda *mutlaqo qora, oq va shaffof* jismlar bo'lmasdan, faqat ularga yaqinroqlari mavjud.

Nurii issiqlik almashishi asosan M. Plank, V. Vinn, Stefan-Bolsman, Kirxgof qonunlari yordamida batafsil tushuntiriladi.

Muayyan temperaturadagi absolut qora jismning birlik sirti yuzasining vaqt birligidagi nur tarqatish xususiyatini Stefan-Bolsman qonuni bilan ifodalanadi:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4, \quad (310)$$

bunda $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ — absolut qora jismning nur tarqatish doimiysi.

Demak, *absolut qora jismning birlik yuzasidan vaqt birligida barcha chastotalardagi nur tarqatish xususiyati absolut temperaturaning to'rtinchi darajasiga mutanosib ekan*. Bu qonuniyatni 1879-yili avstriyalik fiziklar I. Stefan tajriba yo'li bilan topgan va 1884-yili A. Bolsman esa nazariy jihatdan isbotlab bergan.

Jism temperaturasi kattalashgan sayin, uning nur tarqatish jadalligining maksimumi qisqa to'liqin uzunligi tomonga siljishini nemis fizigi Vilgelm Vinn (1893-y.) kashf etgan va uning matematik ifodasini bergan:

$$\lambda_{\max} = 0,0028989 / T$$

yoki

$$T\lambda_{\max} = b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m.K. } (311)$$



Vilgelm Vinn

Bu V. Vinning *siljish qonuni* deyiladi. Siljish qonuniga muvofiq, jismlar tarqatadigan nur to'liqin uzunligi har xil temperaturada turlicha bo'ladi. Masalan, elektr isitkich temperaturasi $T=1100 \text{ K}$ bo'lganda, u $\lambda_{\max}=3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ bo'lgan uzunlikdagi to'liqinni nurlaydi, uning spektri tarkibi asosan infraqizil nurdan tashkil topadi. Quyosh $T=5500 \text{ K}$ da chiqargan nurini olsak, bu nur asosan ko'zga ko'rinadigan $\lambda_{\max}=5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ to'liqin uzunligidagi nurga to'g'ri keladi va sh.k.

Texnik masalalar yechimini topishdagi hisoblashlarda Stefan-Bolsman qonuni quyidagi ko'rinishda yoziladi:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

bunda $S_0 = \sigma_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ — absolut qora jismning nur tarqatish xususiyati.

Stefan-Bolsman qonunini absolut qora jismning issiqlikni nurlash koeffitsienti $\epsilon = E / E_0$ orqali real kulrang jismlar uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$E = \epsilon E_0 = \epsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (312)$$

bunda S — kulrang jismning nurlash xususiyati.

Absolut qora va kulrang jismlarning issiqlik nurlarini yutish va tarqatish xossalari orasidagi bog'lanishni nemis fizigi G. Kirxgof 1882-yili o'rganib, quyidagi qonuniyatni ochgan:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0(T), \quad (313)$$



Bolsman Ludvig

bunda $\frac{\epsilon_1}{A_1} = E_0$ — absolut qora jismning nur tarqatish xususiyati.

Jismning nurlash xususiyatining nur yutish xususiyatiga nisbati jism tabiatiga bog'liq emas va barcha jismlar uchun temperatura funksiyasidir; jismning nur chiqarish xususiyati absolut qora jismning shu temperaturadagi nur chiqarish xususiyatiga teng.

Demak, jismning biror temperaturada tarqatgan nur energiyasining nurni yutilish ko'effitsientiga nisbati jism tabiatiga bog'liq bo'lmaydi va u absolut qora jismning shu temperaturada chiqargan nur energiyasiga teng bo'lar ekan. Jism o'zidan qancha ko'p nur chiqarsa, shunchasini yutadi, ya'ni yutgan va chiqargan nurning to'liq uzunliklari bir xil bo'ladi:

$$\epsilon_k = A_k. \quad (314)$$

Kulrang jismning nur yutishi issiqlik manbayiga va o'zining temperaturasi bog'liq bo'lmaydi.

Yuqorida keltirilgan $\epsilon = E / E_0$ nisbatdan ko'rinadiki, jismning qoralik darajasi, ya'ni absolut qora jismga boshqa jismning nur yutish va chiqarish qobiliyati jihatidan yaqinlashuvini termodinamika nuqtayi nazaridan baholash mumkin. Shuning uchun kulrang jismlar uchun Stefan-Bolsman tenglamasi qozon qurilmalari o'txonalarining nur tarqatish xususiyatlarini hisoblashda qo'llaniladi. O'txona devorlari ham nur tarqatgani va nurni yutgani uchun ular termodinamik muvozanatda bo'la olmaydi. Shu sababli o'txonadagi nur energiyasidan nur vositasida issiqlik almashinuvida to'laroq foydalanilmaydi. O'txonadagi o'zaro parallel sirtlarning nurli issiqlik almashinuvinu issiqlik energiyasi miqdorini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q = SC_0 \epsilon_k \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (315)$$

bunda $\epsilon_k = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ — issiqlik almashinuvida qatnashuvchi jismlar sistemasining keltirilgan nur chiqarish ko'effitsienti; S — nur chiqaruvchi sirt yuzasi; T_1 va T_2 — birinchi va ikkinchi sirtlarning temperaturalar.

8.5. Nurli issiqlik almashinuvida ekranlarning qo'llanilishi

Nur energiyasining issiqlik oqimini jadalligi yuqori bo'lganida isitkich va sovutkichlar o'rtasiga nur energiyasini kamaytirish maqsadida turli xil geometrik shakllardagi to'siqlar (ekranlar) qo'yiladi. Bu bilan issiqlik texnikasi asbob-uskunolari himoyalanaadi va ularning yaxshi hamda uzoq muddat ishlashi ta'minlanadi. Yorug'lik nurini oq rangli jilvirlangan ekran eng yaxshi qaytaradi. Shuning uchun nur issiqligi energiyasidan issiqlik texnikasi asbob-uskunalarini himoya qilishda issiqlik izolatsiyasi sifatida jilvirlangan metall plastinkalar va metall pardalar issiqlik texnikasida va turmushda keng qo'llaniladi. Masalan, aluminiy va uning qotishmalaridan tayyorlangan pardalar, aluminiy upasi issiqlik texnikasida keng qo'llaniladi. Bunga asosiy sabab, aluminiy upasidan tayyorlangan pardalar issiqlik nurlarini yuqori darajada qaytaradi va yutadi, ya'ni ham isitkichdan, ham tashqaridan kelayotgan issiqlik nurlarini yutadi hamda qaytaradi. Texnologik jarayonda bunday plastinka va pardalarni tayyorlash oson va arzon. Kulrang jismlarning qoralik darajasi $K_{ke} = \sigma / \sigma_0$ (absolut kulrang jism nur tarqatish koeffitsienti σ ning absolut qora jism nur tarqatish koeffitsienti σ_0 ga nisbati) $5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$ atrofida bo'ladi. Bunday pardasimon materiallar issiqlik trassalarida, qozon qurilmalarida, issiqlik izolatorlari va qaytargichlarida keng qo'llaniladi (10-jadval).

Jilvirlangan plastinka yoki pardalar ekran sifatida qo'llanilganda, ularning sirtiga tushgan issiqlik nurlari qisman yutiladi va qaytadi. Yutilgan issiqlik energiyasi ekran sirtidan atrof-muhitga ham tarqaladi.

10-jadval

Materiallarning qoralik darajasi.

Material nomi	T, K	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$	Material nomi	T, K	$\varepsilon \cdot 10^{-2}$
G'adur-budur alu- mini	293—323	6—7	Moy bo'yoq	373	95
Suv	273—373	95—96	Oksid po'lat	473—873	74—80
Qizil g'isht	293	88—98	Ko'mir	373—873	81—79
Shamol g'isht	1373	59	Shuvoq	283—363	91

Demak, birlamchi issiqlik nurlari ekranda yutilib, uning ichki energiyasini orttirgandan so'ng, ekran muhitga o'z sirtidan ikkilamchi issiqlik nurini chiqaradi, ya'ni *ekran orqali issiqlik almashinuvi* deb ataladigan jarayon sodir bo'ladi.

Faraz qilaylik, nur tarqatuvchi va nurni yutuvchi jismlar sirtlarining qoralik darajasi koeffitsientlari jismning issiqlikni nurlash koeffitsientiga va o'z navbatida ekranning qoralik darajasi koeffitsientiga teng, ya'ni $E_1 = E_2 = \varepsilon_{q.e.} = \varepsilon$ bo'lsin. Unda, albatta $T_1 > T_2$ bo'ladi. Issiq va sovuq sirtlar oralig'idagi ekranning pardasimonligini e'tiborga olsak, u holda ekranning ikkala sirtidagi temperaturalar bir xil bo'ladi, ya'ni $T_{e_1} = T_{e_2} = T_e$.

Shu shart bajarilsa, ekranning *termik qarshiligi* $R_H = c^{-1}$ (nur tarqatish koeffitsientiga teskari bo'lgan kattalik) eng kichik qiymatga erishadi, ya'ni jismning qarshiligi issiqlikning o'tishiga nisbatan kichik bo'ladi. Bunday holatda *birinchi devor* — *ekran va ekran* — *ikkinchi devor* oralig'larida issiqlik almashinuvining bir xilligi asosida ular sirtlarining qoralik darajalari $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ bo'ladi (8.4-rasm). Shuning uchun keltirilgan nur tarqatish koeffitsientini devor I $\rightarrow$ *ekran* $\rightarrow$ devor II yo'nalishidagi issiqlik harakati uchun quyidagicha yozish mumkin:

$$\varepsilon_k = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^{-1} = \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon}. \quad (316)$$

Shu shart bajarilsa, issiq devorning birlik yuzasidan ekranning birlik yuzasiga Kirxgof qonuniga muvofiq quyidagi issiqlik miqdori uzatiladi:

$$q_{1,e} = \varepsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right]. \quad (317)$$

Ekrandan ikkinchi devorga uzatilgan issiqlik miqdori quyidagicha ifodalanadi:

$$q_{e,2} = \varepsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_e}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (318)$$

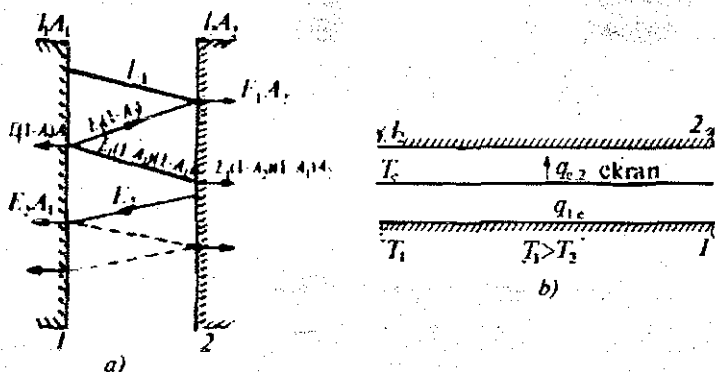
Issiqlik almashinuvi turg'un, ya'ni sirtlar temperaturallari o'zgarmas bo'lganda $q_{1,e} = q_{e,2}$ bo'ladi. Unda (317), (318) tenglamalar asosida quyidagini yozish mumkin:

$$\left(\frac{T_e}{100}\right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 + \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]. \quad (319)$$

Ekran temperaturasi ifodasini yuqoridagi tenglamalarga qo'yib, issiqlik almashinuvchi devorlar o'rtasida ekran bo'lgan holat uchun birinchi devordan ikkinchi devorga ekran orqali o'tgan nur issiqligi miqdori ifodasi hosil qilinadi:

$$q_{12}^e = q_{1,e} = q_{e,2} = \frac{1}{2} \left\{ \epsilon_1 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right] \right\}. \quad (320)$$

Devorlar o'rtasida ekran bo'lganda issiqlik almashinuvi ikki marta kamroq bo'ladi, ya'ni $q_{1,e}/q_{e,2} = 0,5$. Ekranlar sonini o'ttirish usuli bilan nur issiqlik almashinuvini bir necha o'n martalab kamaytirish mumkin. Nur issiqlik almashinuvi ekran materialiga va sirtning mexanik holatiga bog'liq. Masalan, oksidlangan yupqa temir taxtasi ekran sifatida qo'llanilsa, bu ekran nur issiqligi miqdorini 13 marta, uning uchasi qo'yilsa 39 marta kamaytiradi. Shuning uchun nur issiqligi miqdorining isrofini kamaytirish maqsadida turli-tuman materiallardan ekran sifatida foydalaniladi.



8.4-rasm. Ikki ta o'zaro parallel sirtlarning ekransiz (a) va ekran orqali (b) nur vositasida issiqlik almashinuvi:

A_1 va A_2 — sirtlarning qoraliq darajasi; T_1 , T_2 va T_e — birinchi, ikkinchi va ekran temperaturalari; E_1 , E_2 , ..., E_n — issiq sirtlar energiyalari; $q_{1,e}$ — birinchi devordan ekranga va $q_{e,2}$ — ekrandan ikkinchi devorga o'tgan issiqlik.

8.6. Gazlarning issiqlikni nurlashi

Issiqlik mashinalarining yonish kameralarida, qozon qurilmasi o'txonalarida va turli xil tuzilishdagi o'choq hamda kameralarda ish aralashmasini yoqishda atmosfera havosidan oksidlovchi modda sifatida keng foydalaniladi. Atmosfera havosining issiqlik nurlarini tarqatishi keng spektrga ega. Bir va ikki atomli gazlar issiqlik nurlari uchun shaffofdir. Faqat ko'p atomli gazlar (karbonat angidrid — CO_2 , sulfid angidrid — SO_2 , suv bug'i H_2O , ammiak — NH_3 va sh.k.) issiqlik nurlarini tarqatadi va yutadi. Yoqilg'i tarkibida suv (namlik) va CO , ning ko'pligi yoki yonish jarayonida ularning hosil bo'lishi natijasida ish aralashmasi to'la yonmaydi. Suv bug'i va karbonat angidrid yoqilg'ining yonishidan hosil bo'lishi ma'lum miqdorda to'la yonishni susaytiradi. Gazlarning aksariyati muayyan to'lqin uzunlikdagi nurlarni chiqaradi. Gazlar tarqatgan nur spektrining tor oralikka mos keluvchi to'lqin energiyasini yutadi va chiqaradi. Tarqalgan nur spektrining ko'zga ko'rinadigan qismida karbonat angidrid gazi va suv bug'i nur chiqarmaydi va yutmaydi. Bu gazlar spektrining uzun to'lqin qismida qisqa to'lqin qismiga nisbatan ancha jadalroq nur chiqadi va yutiladi.

Atmosfera tarkibidagi CO_2 miqdori yil sayin ko'payib borayotganligi bugungi kunda sir emas. Bunga asosiy sabab inson texnikadan, sanoat korxonalaridan to'g'ri foydalana olmayapti, ya'ni yoqilg'ining to'la yonishi ta'minlanmayapti. Atmosferadagi CO_2 qisqa to'lqinli nurlarni yomon va uzun to'lqinlisini yaxshi yutadi. Bunday hodisa iqlimning iliq bo'lishi va «parnik» effektining paydo bo'lishiga olib keladi.

Gazlarning temperaturasi o'rtingilganda, ularning nur tarqatish koeffitsienti kamayadi va ko'proq qisqa to'lqindagi nurlarni chiqaradi. Nur tarqatish jadalligi gazning zichligiga, bosimiga, temperaturasiga ham bog'liq.

Gaz o'zini o'rab turgan muhitga chiqargan nur oqimining zichligini yuqorida qarab chiqilgan nur tarqatish jarayonlariga xosligi asosida, (317)ni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q_{i.m.} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right], \quad (321)$$

bunda $\epsilon_k = \frac{\epsilon_g \epsilon_m}{\epsilon_m + \epsilon_g (1 - \epsilon_m)}$ — issiqlik almashinuvida qatnashuvchi gaz komponentlari tarqatgan nur koeffitsienti;

ϵ_g va ϵ_m — gaz va muhitning qoralik darajasini belgilovchi koeffitsientlar; T_g va T_m — gaz va muhitning temperaturasi.

8.7. Issiqlik almashinuvida foydalaniladigan asbob-uskunalar va ularning tasnifi

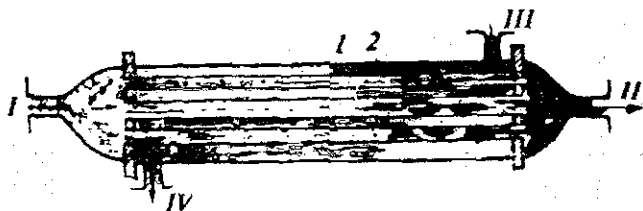
Issiqlikni eltuvchi sifatida suv, bug', havo, antifriz, turli xil moylar va sh.k. moddalar isitish yoki sovitish qurilmalarida ish moddasi sifatida ishlatiladi. Bu turdagi asboblarga radiator (lot. *radio* — *nur tarqataman*), kondensator (lot. *condenso* — *zichlayman, suyuqlantiraman*), har xil quvurlar to'plami va sh.k. misol bo'la o'ladi. Issiqlik eltuvchida qo'llanilgan issiqlik almashinuv asboblari devori yoki issiq moddaning sovuq moddaga aralashishi jarayonida issiqlik boshqa modda (sovitkich)ga uzatiladi. Bu jarayonda issiqlik eltuvchining temperaturasi pasayadi, issiqlik oluvchi (sovitkich)ning temperaturasi esa ortadi.

Issiqlikning moddalararo almashinuv usuliga qarab issiqlik almashinuv asboblari quyidagi: aralashtirgichli, rekuperativli (lot. *recuperator* — *qayta olinadigan*), regenerativli (lot. *regeneratio* — *tiklanish*) va oraliq issiqlik tashuvchi turlarga bo'linadi. Aralashtirgichli issiqlik almashinuvi jarayonida issiqlik eltuvchi modda temperaturasi pastroq modda bilan aralashtiriladi.

Masalan, qozon qurilmasidan chiqadigan yuqori temperaturali bug' sovuq yoki iliq suv bilan aralashtiriladi, so'ngra iste'molchilarga uzatiladi.

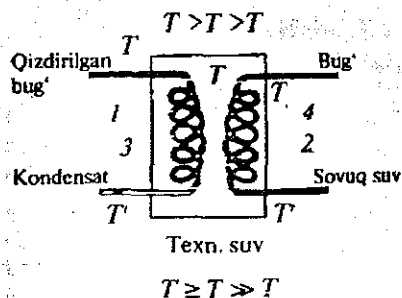
Aralashtirgichli issiqlik almashinuvida asosiy agent (issiqlik eltuvchi) sifatida ko'pchilik holatlarda bir-biriga aralashmaydigan modda va materiallar juftligi ishlatiladi: *bug'-suv, gaz-qattiq material, suv — moy* va h.k.

Rekuperativ issiqlik almashtirgich asboblari yordamida atmosferaga chiqib ketayotgan ish bajarib bo'lgan gazlardagi qoldiq issiqlik yangi kiritilayotgan ish moddasiga oraliq yupqa qattiq



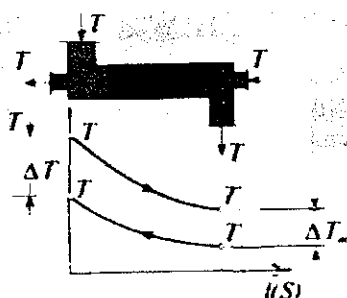
8.5-rasm. Quvur g'illofli rekuperativ issiqlik almashtirgich:

I — suv bug'i; *II* — iliq suv (kondensat); *III* — isitiladigan modda;
IV — isigan modda; *1* — quvur g'illofi; *2* — ichki quvurlar dastasi.



8.6-rasm. Issiqlikning oraliq modda yordamida regenerativ almashtirgich asbobida uzatilish sxemasi:

T_1 va T_2 — qizdirilgan bug' va suv temperaturalar; T' va T'' — kondensat va sovuq suv temperaturalar; 1 va 2 — ilonizisimon issiqlik eltuvchi va chiqaruvchi quvurlar; 3 — oraliq modda (texnik suv); 4 — berk idish.



8.7-rasm. Issiqlik eltuvchining issiqlik almashinuvi asbobidagi qarama-qarshi oqimli harakat sxemasi:

T_1 va T_2 — issiqlik eltuvchi moddaning issiqlik almashtirgichni kirishi va chiqishidagi temperaturalar; T_3 va T_4 — issiqlik oluvchi moddaning issiqlik almashtirgichni ichki quvurining kirishi va chiqishidagi temperaturalar.

devor orqali uzatiladi. Bu usulda ishga aylanmagan qoldiq (past temperaturali $T < 1000$ K) issiqlik miqdori isitiluvchi moddaga uzatib bo'lgandan so'ng atmosferaga chiqariladi. Rekuperativ issiqlik almashtirgich asboblardagi issiqlik eltuvchi va sovitkich harakati yo'nalishiga qarab rekuperatorlar to'g'ri, teskari, kesishgan, aralash oqimli va sirtlarning geometrik shakliga ko'ra yassi, yumaloq, qovurg'ali bo'ladi.

Regenerativ issiqlik almashinuvi usuli yonish mahsuloti tarkibidagi qoldiq issiqlik miqdorini sovitkichga chiqarishdan yangi kiritilayotgan gaz, bug', suv, yoqilg'i, yonilg'i va havo aralashmasiga o'trazishdan iborat. Shu maqsadda ishlatiladigan asbobni *regenerator* deyiladi. Regeneratorlar devorining sirtidagi temperatura yuqori ($T > 550-700$ K) va oraliq issiqlik o'tkazuvchi material qalin devorli bo'ladi. Oraliq devor sifatida qalin metall listlari, o'tga chidamli g'isht, shlak, shag'aldan foydalaniladi. Metall listlar old qismiga issiqbardosh (shamot, magnezit) g'ishtlar terib chiqiladi. Issiq gaz oqimi avval issiqbardosh g'ishtlarga asosiy issiqlik miqdorini beradi, so'ngra atmosferaga yoki boshqa issiqlik almashtirgichga yo'naltiriladi. O'z navbatida, g'ishtdagi issiqlik metall listga, u esa suyuqlikka issiqlikni uzatadi. Regenerator sirti vaqt-vaqti bilan goh qaynoq, goho esa sovuq modda bilan yuvib turiladi.

Oraliq issiqlik eltuvchi qattiq devor, suyuqlik yoki bug' bo'lishi mumkin. Masalan, *suv-suv atom reaktorining* birinchi berk konturida issiqlikni tashuvchi modda sifatida og'ir suv ishlatiladi (8.6-rasm), uning aktiv zonasidagi issiqlik shu suv yordamida reaktordan tashqaridagi issiqlik almashtirgichga chiqariladi. Kontur berk bo'lganligi sababli, tashqi issiqlik almashtirgich rezervuari-dagi suvga issiqlikning asosiy qismi spiralsimon quvur devorlari orqali uzatiladi. O'z navbatida, issiqlik issiqlik almashtirgich rezervuarlaridagi oddiy suvga og'ir suvning berk konturi devoridan o'tadi. Bu o'tgan T_2 issiqlik miqdori ikkinchi spiralsimon quvur devorlari orqali shu quvurdagi suvga uzatiladi. Demak, og'ir suv — qattiq devor (I), oddiy suv-qattiq devor (II) — suv ketma-ketligidagi regenerativ issiqlik almashadi. Bunda $\Delta T_x > T_{cp}$ bo'ladi.

Rekuperator va regeneratlarning ishlash tartibi bir-biriga juda o'xshash. Rekuperator sirtining temperaturasi past ($T < 450-550$ K) va isituvchi bilan isuvchi moddalar o'rtasida yupqa qattiq devor bo'ladi. Rekuperatorga avtomobil va traktor radiatorini, spiralsimon quvurni, bir-birining ichiga joylashtiriladigan quvur g'ilofli naylar dastasini misol qilib ko'rsatish mumkin.

Oraliq qattiq devor yoki suyuqlik orqali issiqlik uzatilayotgan-da issiqlik tashuvchining agregat holati o'zgarishi mumkin. Masalan, suv bug'i issiqlik almashinuvi jarayonida kondensatga aylanadi. Bu turdagi issiqlik almashinuvi ishlab chiqarishning turli tarmoqlarida keng qo'llaniladi.

Issiqlik almashinuv asboblari yaratishdan avval ularning geometrik shakli tanlanadi va nur tarqatuvchi sirtlarining yuzalari hisob-kitob qilinadi. Bunday hisob-kitoblarda energiyaning saqlanish qonuniga rioya qilish lozim, ya'ni sistemaga keltirilgan energiya miqdori undan chiqarilgan va isrof bo'lgan energiyalar yig'indisiga teng bo'lishi kerak.

Issiqlik almashinuvi asboblari hisoblashda issiqlik balansi teng-lamasi asosida ish moddasi entalpiyasining o'zgarishi orqali sistemaga keltirilgan q_1 issiqlik miqdorini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$q_1 = i_1 - i_2 = m_1(c'_{p1} T_1 - c''_{p1} T_2), \quad (322)$$

bunda q_1 — sistemaga keltirilgan to'liq issiqlik miqdori;

m_1 — issiqlik eltuvchi massasining sarfi;

c'_{p1} va c''_{p1} — o'zgarmas bosim ostidagi issiqlik eltuvchi moddaning, mos ravishda, T_1 va T_2 temperaturalardagi is-siqlik sig'implari.

Issiqlik isrofi e'tiborga olinganda asbobga keltirilgan issiqlik miqdori uning ikkinchi qismiga o'tgan ulushini shu asbobning *f i k* orqali ifodalash mumkin:

$$q_2 = \eta q_1, \quad (323)$$

bunda η — asbobning *f i k*.

Sovitkich qabul qilgan issiqlik miqdorini ish moddasi entalpiyasining ayirmasi shaklida yozish mumkin:

$$q_2 = i_3 - i_4 = m_2 (c'_{p1} T_3 - c'_{p2} T_4)$$

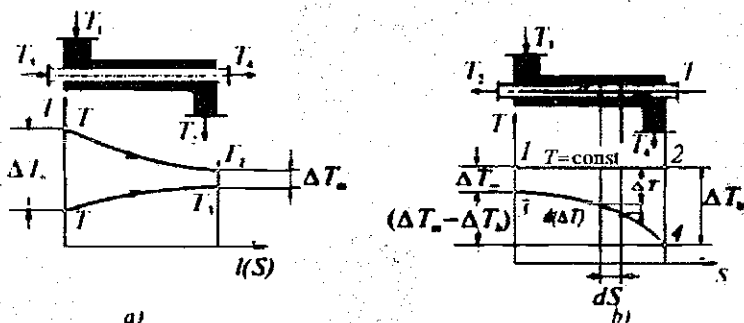
yoki

$$q_2 = \eta q_1 = \eta (i_1 - i_2) = \eta m_1 (c'_p T_1 - c'_p T_2), \quad (324)$$

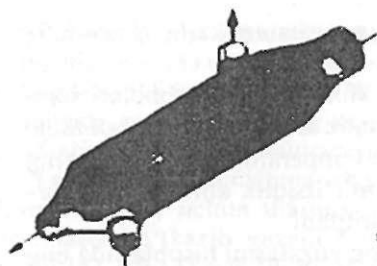
bunda T_1 va T_2 — issiqlik eltuvchi moddaning issiqlik almashtirgichning kirishidagi va chiqishidagi temperaturalar; T_3 va T_4 — issiqlik qabul qiluvchi moddaning issiqlik almashtirgich kirishidagi va chiqishidagi temperaturalar.

Issiqlik eltuvchining temperaturasi issiqlik almashtirgichni chiqishigacha pasayib borsa, aksincha, issiqlik yutuvchining temperaturasi uning chiqishigacha ko'tarilib boradi. Issiqlik eltuvchi bilan issiqlik yutuvchi moddalar oqimlari parallel bo'lganda, mos ravishda, issiqlik birida kamaysa, ikkinchisida ortadi (8.8—8.9-rasmlar).

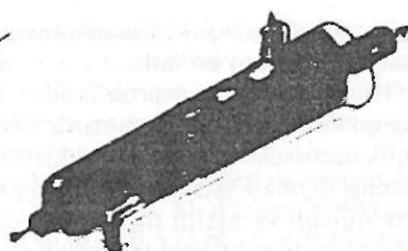
Rekuperativ issiqlik almashtirgich asbobining yupqa devori orqali issiq moddaning sovuq moddaga uzatgan issiqlik miqdorini taqriban quyidagicha ifodalash mumkin:



8.8-rasm. Issiqlik eltuvchining quvur g'ilofli issiqlik almashtirgich asbobidagi to'g'ri (a) va qarama-qarshi (b) harakati sxemasi hamda tT diagrammasi.



a)



b)

8.9-rasm. Issiqlik eltuvchining quvur g'ilofli rekuperativ issiqlik almashtirgich asbobidagi harakati:

a) qarama-qarshi oqimli; b) to'g'ri oqimli.

$$q_2 = kS(T_1 - T_2) = kS\Delta T, \quad (325)$$

bunda $k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$ — issiqlik uzatish koeffitsienti;

α_1 va α_2 — issiq va sovuq suyuqlik oqimlarining issiqlik berish koeffitsientlari; λ — issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti; d — yupqa devor qalinligi; s — yupqa devor sirtining yuzasi; T_1 va T_2 — yupqa devorning ichki va tashqi sirtlaridagi temperaturalar.

Issiqlik eltuvchining T_1 va issiqlik yutuvchining T_2 temperaturalarini o'zgarmas saqlash ancha murakkab bo'lganligidan muhandislik hisob-kitoblarida shu temperaturalar ayirmasining o'rtacha qiymatidan foydalangan ma'qul, ya'ni

$$q_2 = kS\bar{\Delta T} = 0,5kS(\Delta T_b - \Delta T_m), \quad (326)$$

bunda $\Delta T_b = T_1 - T_4$; $\Delta T_m = T_2 - T_3$ (teskari oqimli holat),

$\Delta T_b = T_1 - T_3$; $\Delta T_m = T_2 - T_4$ (to'g'ri oqimli holat);

$\Delta T_b = T_1 - T_4$; $\Delta T_m = T_2 - T_3$ (issiqlik eltuvchi temperaturasi $T_1 = T_2 = \text{const}$ bo'lgan holat) uchun to'g'ri bo'ladi (8.8-rasm, a, b larga qarang).

$(\Delta T_b / \Delta T_m) < 2$ bo'lganda yuqoridagi (326) tenglama o'rinli bo'ladi, chunki bu shart bajarilganida hisoblash xatoligi 4% dan oshmaydi.

Issiqlik uzatuvchi va issiqlik oluvchi moddalar oqimlarining yo'nalishiga qarab ΔT_b va ΔT_m qiymatlari o'zgaradi. Issiqlik almashtirgich asboblardan qarama-qarshi oqimlilari ko'proq ishlatiladi. Bunda taqribiy hisob osonlashadi, chunki $\bar{\Delta T}$ har doim

to'g'ri oqimli issiqlik almashinuviga nisbatan katta (8.7—8.9-rasmlarga qarang) bo'ladi.

O'zaro kesishgan oqimli issiqlik almashtirgich asboblari ham keng qo'llaniladi. Bunday holatda issiqlik almashtirgich asbobidagi issiqlik uzatuvchi va oluvchi moddalar temperaturalari ayirmasining o'rtacha qiymati qarama-qarshi oqimli issiqlik almashtirgichdagidek olinadi va ayrim tuzatishlar kiritiladi.

Issiqlik almashtirgichlar sirtlarining yuzalarini hisoblashda eng avval q_1 aniqlanadi. So'ngra issiqlik eituvchi oqimining tezligi $\hat{\theta}$, muayyan diametrdagi quvur uchun hisoblanadi. Issiqlik eltich uchun issiqlik berish α va uzatish k koeffitsient qiymatlari hisoblanadi. ΔT qiymati keltirilgan tenglikdan topilgandan so'ng, issiqlik almashtirgichning S yuzasi hisoblanadi. Zarur bo'lganda issiqlik almashtirgich quvurining uzunligi ham topiladi. Issiqlik almashtirgich asbob yuzalarini topishda, ayrim parametrlar aniq bo'lishi kerak. Hech bo'lmaganda issiqlik uzatuvchi yoki issiqlikni oluvchi moddalarning temperaturasi issiqlik almashtirgichni chiqishida i aniq bo'lishi shart.

MASALALAR

1-masala. Qozon qurilmasi o'txonasining qoplamasi qalinligi 400 mm shamot va 250 mm qizil g'ishtlardan iborat. O'txona ichki va tashqi devorlari sirtlaridagi temperaturalari mos ravishda 1073 K va 373 K. Qoplama sirtining 1 m^2 yuzasidan atrof muhitga isrof bo'lib chiqayotgan issiqlik miqdorini aniqlang.

Yechimi. Ayrim materiallarning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientlari keltirilgan 6-jadvaldan λ qiymatini topib, (353) formula-dan foydalanib quyidagilarni topamiz:

$$q = \frac{\Delta T}{\psi} S = \frac{1073-373}{3,5} \cdot 1 = 200 \text{ W.}$$

$$\psi = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} = \frac{0,4}{0,16} + \frac{0,25}{0,25} = 3,5.$$

2-masala. Temirchilik ustaxonasi o'choq'i o'tga chidamli shamot g'ishtidan va qumshuvoqdan qurilgan. O'choq devorlarining ichki sirtidagi temperatura 873 K, shamot g'ishtidan keyin qoplangan qumshuvoqning tashqi sirtidagi temperatura 70°C. Sirti $0,5\text{ m}^2$ bo'lgan o'choqining atmosferaga befoyda chiqarilgan energiyasini toping. G'ishtning qalinligini 4 sm, qumshuvoq qalinligi 2 sm deb oling.

3-masala. Suv bug'ini turbinaga uzatuvchi po'lat quvur ichidagi bug' temperaturasi 723 K, quvurning tashqi devori ustidagi 7 sm asbest

va 3 sm namat qoplamasi sirtidagi temperatura 323 K. Bug' quvurining tashqi diametri 153 mm, ichki diametri esa 123 mm bo'lib, uning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsienti 58 W/m.K. Bug' quvurining har bir metr uzunligida yo'qotgan issiqlik miqdorini va izolatsiyalovchi material sirtidagi eng katta temperaturani aniqlang.

Yechimi. Quvur ichma-ich joylashgan po'lat, asbest va namatdan iborat bo'lgani uchun ularning diametrlarini SI o'lchov birliklari sistemasiga o'tkazib yozamiz, ya'ni $d_1 = 0,153$ m; $d_2 = 0,123$ m; $d_3 = 0,153 + 0,123 = 0,276$ m; $d_4 = 0,276 + 0,05 = 0,281$ m.

Bug' uzatuvchi quvur ko'p qatlamlilikini e'tiborga olib, yuqorida keltirilgan (350) formulani uch qatlamli quvur uchun qayta yozamiz va undan foydalanib, hisoblashlarni amalga oshiramiz.

$$q = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\sum \Psi} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot (723 - 323)}{0,05 + 5,62 + 3,69} = 268 \text{ W.}$$

$$\Psi_1 = \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = \frac{1}{58} \ln \frac{0,153}{0,123} = 0,05;$$

$$\Psi_2 = \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = \frac{1}{0,105} \ln \frac{0,276}{0,153} = 5,62;$$

$$\Psi_3 = \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3} = \frac{1}{0,046} \ln \frac{0,281}{0,276} = 3,69.$$

Berilgan jadvallardan avval issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientlari qiymatlarini topamiz va ularni formulaga qo'yib q ni hisoblaymiz.

$$\lambda_1 = 58 \text{ W/m} \cdot \text{K}; \lambda_2 = 0,105 \text{ W/m} \cdot \text{K}; \lambda_3 = 0,046 \text{ W/m} \cdot \text{K}.$$

Turg'un (statsionar) oqimni uzatuvchi quvur ustidagi izolatsiyaning yuqori qatlamidagi issiqlik miqdori quyidagicha ifodalanadi va undan izolatsiya yuqori qatlamining temperaturasi topiladi:

$$q = \frac{2\pi\lambda_3(T_3 - T_4)}{\ln(d_4/d_3)}; T_3 = T_4 + \frac{q \ln(d_4/d_3)}{2\pi\lambda_3} = 323 + \frac{269 \cdot 0,124}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,046} \approx 438 \text{ K.}$$

4 - masala. Tashqi diametri 253 mm va ichki diametri 248 mm li po'lat quvur usti 50 mm li shisha paxtasi hamda 10 mm li qumshuvoq bilan qoplangan bo'lib, undan temperaturasi 473 K qaynoq suv isitish sistemasiga uzatilmogda. Po'lat quvur ustidagi temperatura 150°C bo'lgan holat uchun po'latning issiqlik o'tkazuvchanlik koeffitsientini 60 W/m.K deb olib, quvurning har bir metrda isrof bo'lgan issiqlik miqdorini va izolatsiyaning ustki sirtidagi temperaturani hisoblab toping.

5 - masala. Bug' qozoni o'txonasidagi temperaturasi 900°C g'ishtning 1 m² sirti temperaturasi 500 K bo'lgan ekran (po'lat quvurlar) bilan 1,5 soat davomida qancha issiqlik almashganligini hisoblang.

Yechimi. Konvektiv issiqlik almashinuvida parallel sirtlarning qoralik (issiqlik nurlashi nuqtayi nazaridan) darajasi temperaturalarga mos holda turlicha bo'lishini e'tiborga olish kerak. Shuning uchun (371) formulani masala shartiga mos holda yozamiz va unga 10-jadvaldan o'tga chidamli g'isht va oksidlangan po'lat quvurning qoralik darajasi qiymatlari $\varepsilon_1 = 0,6$ va $\varepsilon_2 = 0,8$ ni nurlanishning keltirilgan koeffitsienti formulasiga qo'yib σ_k ni hisoblaymiz, so'ngra q ni topamiz:

$$q = S \cdot \sigma_k \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \sigma_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} \cdot S \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right];$$

$$\sigma_k = \sigma_0 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1} = 5,67 \left(\frac{1}{0,58} + \frac{1}{0,78} - 1 \right)^{-1} = 2,83 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K};$$

$$q = 3600 \cdot 2,83 \left[\left(\frac{1173}{100} \right)^4 - \left(\frac{500}{100} \right)^4 \right] = 186,51 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{K}.$$

6-masala. Bug' qozoni o'txonasidagi temperaturasi 1273 K bo'lgan shamot g'ishti bilan temperaturasi 573 K va yuzasi 1,5 m² bo'lgan po'lat quvurlar dastasi o'rtasiga yuzasi 2 m² li po'latdan tayyorlangan issiqlik ekranini joylashtirilgan. Shamot g'ishti sirtidan 1,5 soat davomida ekran orqali quvur sirtiga nurli issiqlik almashinuvi hisobiga qancha issiqlik miqdori o'tadi?

Yechimi. Masalani yechishda nurlanishning keltirilgan issiqlik koeffitsienti quyidagidan topiladi:

$$\sigma_k = \sigma_0 \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1}$$

Masalaning qolgan yechimlari 5-masaladagidek hisoblanadi.

7-masala. Parallel oqimli rekuperativ issiqlik almashtirgich asbobidan har soatda zichligi 1100 kg/m³, temperaturasi 123°C va issiqlik sig'imi $c = 2,93 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ bo'lgan 800 dm³ sho'r suv oqib o'tmoqda. Isitilayotgan suvning boshlang'ich temperaturasi 293 K bo'lganida issiqlik almashtirgich asbobining chiqishidagi temperaturasini 43°C ga pasayishi uchun ikkinchi konturdan oqib o'tayotgan suvning isitish asbobidan chiqishidagi temperaturasi va isituvchi sirt yuzasi qancha bo'lishi kerak? Ikkinchi konturdagi suvning har soatdagi sarfi 0,8 m³. Issiqlik almashtirgich asbobining issiqlik uzatish koeffitsienti $k = 1,04 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$.

Yechimi. Issiqlik almashinuvi asbobi uchun issiqlik balansi tenglamasini yozamiz va undan isitish asbobidan chiqayotgan suv temperaturasini topamiz:

$$V \rho c (T_2 - T_1) = V_1 \rho_1 c_1 (T_4 - T_3).$$

$$T_4 = T_3 + \frac{V \rho c (T_2 - T_1)}{V_1 \rho_1 c_1} = 293 + \frac{0,8 \cdot 1100 \cdot 2,93 \cdot (396 - 316)}{0,8 \cdot 1000 \cdot 4,2} = 334,39 \text{ K}.$$

Ikkinchi konturdagi suvga sirt orqali qaynoq suvdan bir sekunda o'tgan issiqlik miqdorini quyidagidan aniqlaymiz:

$$q = V \rho c (T_2 - T_1) / 3600 = 0,8 \cdot 1100 \cdot 2,93 \cdot 80 / 3600 = 57,3 \text{ kJ/s}.$$

Issiqlik almashinuvchi sirt kattaligini (381—382) formulalar asosida quyidagicha yoziladi va undan yuza topiladi:

$$q_2 = k S \Delta T_{\text{or.}}$$

$$S = \frac{q_2}{k \Delta T_{\text{ehn}}} = \frac{q_2}{k [T_1 - T_3 - (T_2 - T_4)]} \ln \frac{(T_1 - T_3)}{(T_2 - T_4)} =$$

$$= \frac{57,3}{1,04 [396 - 293 - (353 - 334,4)]} \ln \frac{(396 - 293)}{(353 - 334,4)} = 1,11 \text{ m}^2$$

Nazorat savollari

?

1. Issiqlik nima va u jismlardan qanday o'tadi? Issiqlik o'tkazuvchanlik deb nimaga aytiladi va u necha turga bo'linadi?
2. Issiqlik almashinuvi deb qanday hodisaga aytiladi va issiqlik qanday usullar bilan bir muhitdan ikkinchisiga o'tadi?
3. Issiqlik almashinish qonunini ta'riflang, formulasini yozing.
4. Yassi, silindrik sirtlar uchun issiqlik o'tkazuvchanlik formulasini yozing va uni tushuntiring.
5. Issiqlik izolatori sifatida qanday materiallar qo'llaniladi?
6. Parallel joylashgan devorlar orqali issiqlik almashinuvi qanday sodir bo'ladi?
7. Issiqlik almashtirgich asboblari tuzilishiga, ulardagi oqim harakatining yo'nalishiga ko'ra necha turga bo'linadi?
8. Rekuperativ va regenerativ issiqlik almashtirgich asboblari bir-biridan nima bilan farq qiladi va ular qayerlarda qo'llaniladi?
9. Issiqlik almashtirgich asboblarning *fik* lari qanday formula yordamida hisoblanadi?

Inson faoliyat ko'rsatayotgan sohalarda hamma turdagi energiya turlaridan foydalaniladi. Elektr, issiqlik, elektromagnit energiyalaridan foydalanib harakat turlari paydo qilinadi, ishlab chiqarish avtomatlashtiriladi, maishiy xizmat vositalari ishga tushiriladi.

Mamlakat energetika tizimiga kiruvchi gidro, issiqlik, atom elektr stansiyalari yordamida elektr va issiqlik energiyalari ishlab chiqariladi. Bular mamlakatlarning asosiy energiya manbalari hisoblanadi. Bu energetik manbalarida ishlab chiqarilayotgan energiyalar miqdori bugungi kun talabiga javob bermayapti. Shuning uchun tabiatdagi bor bo'lgan va turli xil fizik hodisalarda paydo bo'ladigan energiya turlaridan foydalanib elektr energiyasini ishlab chiqarish davri yetib keldi. Chunki Yerdagi organik moddalarni yoqib olinadigan jami energiya ~8% atrofida, qolgan energiya turlari ~92% ni tashkil qiladi.

Yerda insoniyat o'zining antropogenik faoliyatini organik moddalar energiyalari hisobiga uzoq vaqt davom ettira olmaydi. Shuning uchun muqobil energetika manbalaridan foydalangan holda elektr va issiqlik energiyalarini ishlab chiqarish uskuna va qurilmalaridan to'g'ri foydalanish hamda yangi mukammallashgan, foydali ish koeffitsientlari yuqori bo'lgan qurilmalarni yaratishi zarur.

Muqobil energetika manbalariga gelio, geo, shamol, dengiz to'liqini, dengiz suvi ko'tarilishi va pasayishi, suv havzalarining issiqlik energiyasi, past damli suv eiqimi va sh.k. energiyalarni kiritish mumkin. Bu energiya turlaridan foydalanib elektr energiyasini ishlab chiqarish bugungi kunda dolzarb masala hisoblanadi.

9.1. Gelioenergetika

Gelio (yunon. *helios* — *Quyosh*) energetika Yer sirtiga tushadigan Quyosh nuri energiyasini elektr enegriyasiga aylantiruvchi gelioqurilmalar asosida paydo bo'lgan. *Quyosh nurining energiyasini bevosita elektr enegriyasiga aylantiruvchi inshootni gelioelektr stansiyasi deyiladi.* Gelioelektr stansiyalarda elektr energiyasini ishlab chiqarish, uzatish, taqsimlash majmuasi *gelioenergetika* deb yuritiladi.

Quyosh insoniyatning energetik talabidan 30 ming marta ko'proq energiya beradi. Bunday ekologik toza energiyadan

foydalanishning samarali usullarini yaratmoq lozim. Chunki Yer taxirasidagi organik energiya turlari kundan-kunga kamayib bormoqda.

Quyosh energiyasidan foydalanib elektr energiyasi ishlab chiqarish quyidagi yo'nalishlarda amalga oshirilmoqda:

a) quyosh energiyasidan foydalanib maxsus qozonlarda suv bug'ini hosil qilish va so'ngra bug' turbinasi hamda elektr generatori yordamida elektr energiyasini ishlab chiqarish;

b) fotobatareyalar yordamida bevosita Quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish;

b) termoelektr generatorlari yordamida Quyosh energiyasini elektr energiyasiga aylantirish;

g) yassi kollektorli gelioelektr stansiyalari bilan elektr energiyasini ishlab chiqarish.

Gelioelektr stansiyalari minorali, yassi kollektorli, fotoelementli, termoelektr generatorli va sh.k. turlarga bo'linadi.

Minorali gelioelektr stansiyalari minorasining balandligi 35 m, ayyorlanadigan suv bug'ining bosimi $P=0,35-12,4$ MPa, temperaturasi $T=500-800$ K bo'lib, tarmoqqa $W=1,2-100$ MW quvvat bera oladi.

Bugungi kunda bunday gelioelektr stansiyalari Rossiya, AQSH, Fransiya, Germaniya, Yaponiya va boshqa davlatlarda ishlamoqda.

GelioESlarining issiqlik sikli geliostat (yassi ko'zgu) yoki geliokonsentrator — bug' qozoni bug'-dvigateli ketma-ketligidan borat bo'lishi mumkin.

Quyosh nurini to'plashda geliostat yoki geliokonsentratordan teng foydalaniladi. To'plangan nur juda katta (3900 K) temperaturani hosil qila oladi. Ular yordamida erish temperaturasi yuqori bo'lgan metallarni ham eritish mumkin. Masalan, O'zbekiston Fanlar akademiyasining "Fizika-Quyosh" ilmiy ishlab chiqarish birlashmasidagi *Katta Geliosandoni* 3873 K temperaturani hosil qila oladi va unda bugungi kunda yuqori temperaturalarda qiyin eriydigan o'ta toza metallar qotishmalari olinadi (9.1-rasm).

2001-yili O'zbekiston Respublikasida yoshlar o'rtasida (Jizzax sh.) o'tkazilgan "Barkamol avlod" sport o'yinlari mash'alasi



U. O. Orifov

Markaziy Osiyoda birinchi marta (O'zbekiston, Parkent) geliokon-sentrator yordamida yoqildi.

Dunyoda birinchi gelioelektr stansiyasi 1912-yili Misrda (Qohira yaqinida) qurilgan bo'lib, uning quvvati 45 kW tashkil qilgan. Hozirgi zamonoviy gelioelektr stansiyalaridan biri Qrim Quyosh elektr stansiyasi bo'lib uning quvvati 5 MW.

Quyosh energiyasidan samarali foydalanilsa, 1 m² Yer yuzasi-ga(ekvator atrofida) tushadigan nurdan 1,36 kW, kosmosda juda yuqori 35800 km balandlikda joylashtirilgan geoturg'un sun'iy stansiyalarda esa 1,395 kW elektr energiyasini hosil qilish mumkin. Kelajakda kosmosdagi geoturg'un QESlari (9.2-rasm, v) o'z energiyalarini Yerga o'ta yuqori chastotali to'lqinda uzatadi yoki yer sirtida kuchli gelioelektr stansiyalari quriladi. Chunki, Yerga Quyoshdan $1,57 \cdot 10^{18}$ kW·soat energiya kelib tushadi. Masalan,



S. A. Azimov

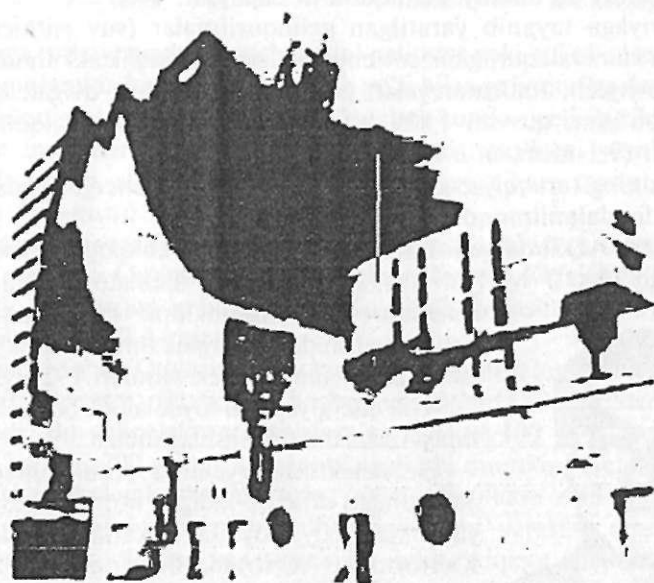
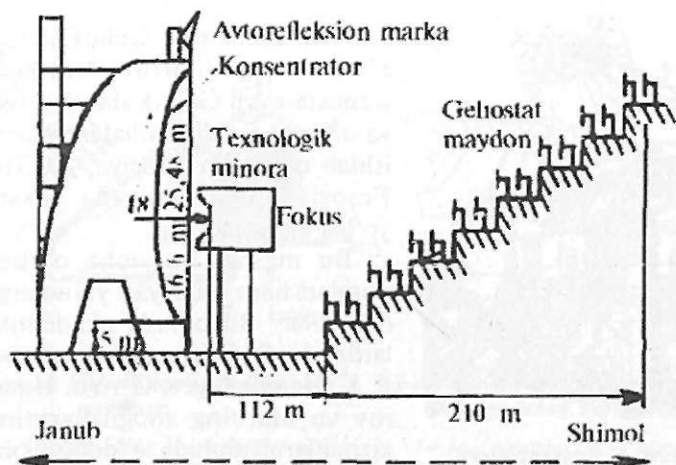
Quyoshdan O'zbekistonning shimoliy geo-grafik kengliklarining har kvadrat metr yer sirtiga bir yilda o'rtacha 587 MJ/m² (140 kkal/sm²), uning janubiy mintaqalari esa 670 MJ/m² (160 kkal/sm²) issiqlik energiyasi tushadi. Bu tushgan Quyosh radiatsiyasining 65—70% tik tushgan is-siqlik nurlarini tashkil etadi. Bu radiatsiya xususan, yozda Quyoshning gorizontga nisbatan (iyun—iyul oylari) balandligi 72° (Toshkent) — 76° (Termiz) bo'lganida 4—5 marta ortadi.



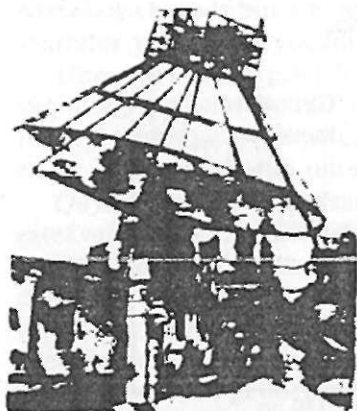
G. Yo. Umarov

Hozirgi kunda Quyoshdan keladigan yorug'lik nuri energiyasini elektr ener-giyasiga aylantiruvchi asbob-uskunalarining *fik* ancha past (10—34% kremniy kristali). Quyosh nurini elektr energiyasiga aylan-tirishda, asosan yarim o'tkazgichlardan ol-tingugurt-talliy, kremniy kristali (*p* — *n*-o'tkazuvchanlik, *fik* 6%), amorf kremniy, gallyiy arsenidi (*fik* 3—34%) va sh.k. foy-dalaniladi.

Kremniy kristalining temperaturasi ortganida uning *fik* kamayadi. Masalan, $T=291-293$ K da *fik* 28—30% atrofida bo'lsa, 373 K da esa 12—15% dan oshmaydi.



9.1-rasm, a. Katta Quyosh sandonining optik sxemasi va ko'rinishi.



9.1-rasm, b. Konsentratorli paraboloid gelioqurilmasi.

XIX asr oxirida GelioESlariga e'tibor ancha ortdi. Natijada fotobatareyali GelioESlarni qurish va ularga kerakli fotobatareyalarni ishlab chiqarish Rossiya, AQSH, Fransiya, Germaniyada yaxshi yo'lga qo'yilgan.

Bu masala bo'yicha o'zbek olimlari ham muayyan yutuqlarga erishdilar. Bu borada akademiklardan U. O. Orifov, S. A. Azimov, P. K. Habibullayev, G. Yo. Umarov va ularning shogirdlarining xizmatlarini alohida ta'kidlash joiz. Ular geliotexnika nazariyasining asosiy masalalari yechimi bo'yicha

salmuqli ilmiy va amaliy tadqiqotlarni bajargan.

Nazariyaga tayanib yaratilgan gelioqurilmalar (suv isitkich, radiatsion kamerali quritgich, suv chuchuklatkich, issiqlik akkumulyatori va sovutgich, fotobatareyalar, geliosandon, Stirling dvigateliga mansub bo'lgan, quvvati 1 kW gelioldvigatel va sh.k.) tadqiqotlar mahsulidir (9.1-rasm, a, b va 9.2-rasm, a).

Dunyoning taraqqiy etgan mamlakatlarida gelioenergetikadan samarali foydalanilmoqda.

Masalan, AQShda gelioESlar 2000-yili ishlab chiqargan elektr energiyasi $20 \cdot 10^3$ MW ni tashkil qilgan. O'zbekistonda ham

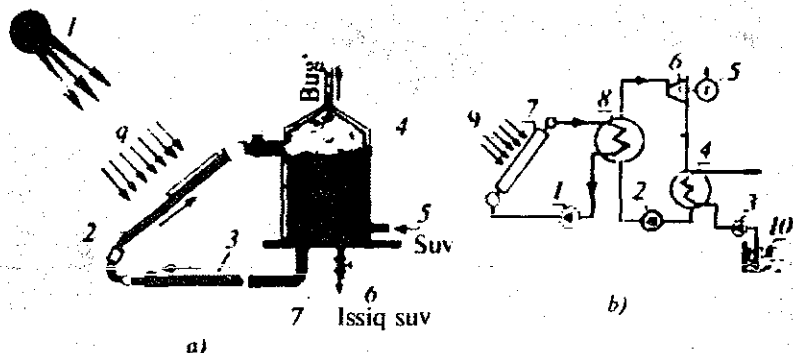
fotobatareya va fotobloklarni ishlab chiqarish yo'nalishida anchagina ilmiy va amaliy ishlar bajarilgan. O'zbek olimlari 1925-yili Quyosh energiyasidan foydalanish bo'yicha ilmiy izlanishlarni boshlaganlar.

Gelioelektr stansiyalari quyoshli kunlari 300 kundan ortiq bo'ladigan mintaqalarda, ya'ni Markaziy Osiyoda, Ekvator atrofida, Kaliforniya (AQSh)da, shuningdek O'zbekistonda qurish ham katta samara beradi.

Agar gelioelektr stansiya qurilmalarining *fi*k 10% atrofida bo'lsa, ular katta maydonni egallamaydi.



P. Q. Habibullayev



9.2-rasm, a. Quyosh suv isitkichining sxemasi:

1 — Quyosh nuri; 2 — isitkich (kollektor) bo'lmasi; 3 — suv aylanuvchi berk kontur quvuri; 4 — issiq suv; 5 — sovuq suv; 6 — taglik; 7 — ventily.

9.2-rasm, b. Kollektorli gelioelektr stansiyasining sxemasi:

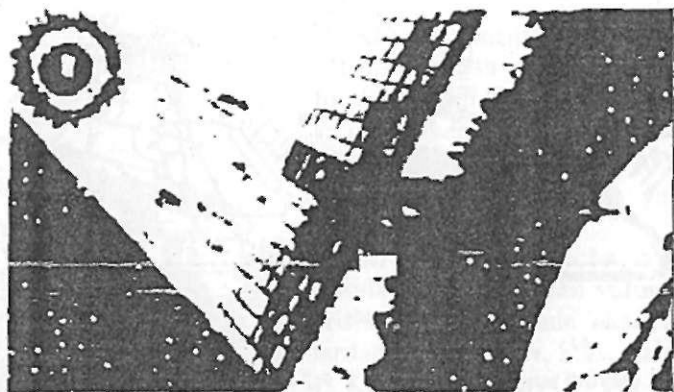
1—3 — nasoslar; 4 — kondensator; 5 — elektr generatori; 6 — bug' turbinasi; 7 — kollektor; 8 — bug'latgich; 9 — quyosh nurlari; 10 — suv havzasi.

Yerga tushayotgan Quyosh nurini geliostat yoki geliokonsentratlar yordamida bir nuqtaga to'plash yo'li bilan gelioqurilmalarning samaradorligini o'rttirish mumkin. Hozirgi kunda gelioqurilmalar nafaqat imoratlarni isitishda, kichik quvvatli nasoslarni yuritishda ishlatilmasdan, shuningdek, elektr tarmog'lariga ham quvvat bermoqda (9.2-rasm).

Kosmik apparatlarning (Mir, Voeyndjer, Xabbl va sh.k.) asosiy elektr manbai Quyosh batareyalari hisoblanadi. Kelajakda katta quvvatli geoturg'un gelioESlarini Koinotda joylashtirish loyihalashtirilmoqda (9.2-rasm, b).

O'zbekistonda Quyosh elektr stansiyasini yaratish loyihasi asosida kelajakda Xorazm, Buxoro va boshqa viloyatlarda GelioESlar qad ko'taradi. Bu gelioelektr stansiyalarning quvvati 100 MW atrofida bo'lib, har biri 200 gektar maydonni egallashi mumkin. Gelioelektr stansiyalari ekologik jihatdan toza, tabiatga mutlaqo zarar yetkazmaydi. Hozirgi kunda gelioelektromobillarni yaratish masalasi bo'yicha dunyo olimlari va ixtirochilari ilmiy-tadqiqot izlanishlarini olib bormoqdalar (Yaponiya, AQSh, Fransiya, Germaniya, O'zbekiston va sh.k.).

Kelajakda, insoniyat albatta, o'zi yaratgan mukammal gelioqurilmalar energiyalari hisobiga hamma sohada ekologik toza hayot tarzini yaratadi.



v)

9.2-rasm, v. Geoturg'un gelicqurilma (xayoliy loyiha).

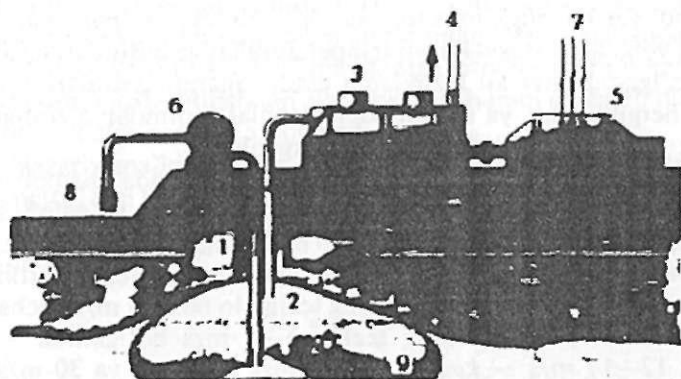
9.2. Geothermal energetika

Yer qobig'idagi issiqlikdan samarali foydalanish yo'li bilan elektr energiyasini ishlab chiqaruvchi inshoot *geotermal elektr stansiyasi* deyiladi. Bu usul bilan elektr va issiqlik energiyalarini ishlab chiqarish hamda uzatish sohasi *geotermal energetika* deb yuritiladi.

Geotermal (yunon.ge — *yer*, therme — *issiqlik*) «Yer issiqligi» degan ma'noni beradi. Yer issiqligidan foydalanib elektr energiyasini ishlab chiqaradigan elektr stansiyalarining asosiy ish jismi bu qaynar issiq buloqlar — geyzerlardan chiqadigan yuqori temperaturali issiq suvdur. Yer mantiyasiga yaqin qatlamlargacha burg'ulab, shu chuqurlikda sun'iy hajm hosil qilinadi va unga sovuq suv haydalib, ikkinchi quvurdan issiq suv yoki bug' olinadi (9.3-rasm).

Yer sirtidan uning mantiyasiga yaqinlashgan sayin qatlam temperaturasi ortib boradi. Yer yuzidan 2000—3000 m chuqurlikdagi jismlar temperaturasi 370—380 K dan yuqori bo'ladi. Yer osti suvlari turli xil yo'llar bilan bu issiq qatlamlarga tushib, unda bug'ga yoki issiq suvga aylanib, Yer yuzasida issiq buloqlar hosil qiladi. Bunday buloqlar aksariyat holatlarida vulqonlar atrofida paydo bo'ladi. Masalan, Kuril-Kamchatka tizmasi (Rossiya)da bunday qaynoq buloqlar juda ko'p.

Zamonaviy geotermal stansiyalari Dog'istonda (Izberbash shahri), Kamchatkadagi Paujetsk daryosi vodiysida ishlab turibdi.



9.3-rasm. Geotermal elektr stansiyasining sxematik tasviri:

1 — sovuq suv; 2 — bug'; 3 — bug' turbinasi; 4 — ish bajarib bo'lgan bug';
5 — elektr generatori; 6 — suv nasosi; 7 — ishlab chiqilgan elektr energiyasi;
8 — suv havzasi; 9 — Yerning yuqori temperaturali qatlamidagi sun'iy havza.

Dog'istondagi geotermal issiqlik stansiyasi bir sutkada 10000 m³ issiq suv (333—343 K) beradi. Paujetks daryosi vodiysidagi geotermal elektr stansiyasining quvvati 5 MW, quyi Koshelsk GeolESdan olinadigan quvvat 94 MW.

Temperaturasi uncha yuqori (313—333 K) bo'lmagan shifobaxsh buloqlar Markaziy Osiyoda ham juda ko'p joylarda uchraydi. Bu issiq buloqlarning issiqlik energiyasidan turli xil sohalarda foydalanish mumkin.

9.3. Shamol energetikasi

Shamol energetikasi — bu shamolning mexanik energiyasidan foydalanishning nazariy asoslari, usullari hamda uskunalarini tadqiq etuvchi va ular yordamida mexanik, issiqlik va elektr energiyasini hosil qilishni, uni xalq xo'jaligiga tadbiq etishni o'rganadigan fan va texnika tarmog'idir.

Shamol — *bu atmosfera massasining yer sirtiga nisbatan gorizontol ko'chishi yuz beradigan tabiat hodisasidir.* Quyoshning Yerni notekis qizdirishi natijasida atmosfera bosimlari farqi hisobiga shamol paydo bo'ladi hamda yer sirti bo'ylab, qutblaridan ekvatorga, aksincha uning yuqori qatlamlarida esa, ekvatoridan qutblari tomon havo oqimi harakatlanadi.

Shamol yer relyefiga mos tog' va tog' oldi tekislik, past tekislik, cho'l vohalari o'rtasida havo temperaturallari va bosimlari farqi paydo bo'lganida har xil tezliklarda esadi. Shamol zarralarining kinetik energiyasidan, ya'ni oqimidan insonlar qadimdan o'zining kundalik turmush ehtiyojlarida foydalanganlar.

Qit'alarining ayrim voha va geografik kengliklarida shamollar uzluksiz bo'ladigan «*shamol yo'llari*» mavjud. Muayyan yo'nalishga ega bo'lgan shamol tezligi 3 m/s dan to 70 m/s gacha bo'lishi mumkin.

Toposferadan yuqoriga ko'tarilgan sayin shamol tezligi ortib boradi va 8—10 km balandlikda uning tezligi to 60—70 m/s gacha yetadi. Shamol yo'nalishining tezligi 5—8 m/s bo'lganida — *o'rtacha*, 12—14 m/s — *kuchli*, 20—25 m/s — *dovul*, va 30 m/s — *bo'ron* deb yuritiladi. Shamol tezligi ayrim holatlarda 100 m/s gacha yetishi mumkin. Masalan. O'zbekistonda kuchli shamol yo'li Tojikistonning Asht tog'laridan boshlanib, Qo'qon dasht va cho'llari orqali o'tib, Xo'jand-Bekobod-Xovost-Yangiye'r yo'nalishida esadigan «*Bekobod yoki Qo'qon shamoli*» nomi bilan yuritiladigan shamoldir. Uning tezligi goho 22 m/s gacha yetadi. Sharqdan Baxmal-Bulung'ur-Samarqand yo'nalishida Zarafshon tog' tizmasi tekisliklari va dashtlari orqali esadigan «*Ilono'tti*» nomi bilan yuritiladigan shamol goho to 10—15 m/s tezlik bilan harakatlanadi. O'zbekistonning janubida kuchli «*Afg'on shamoli*», Orol qirg'oqlari atrofida, Amu daryoning quyi oqimi sohilida esadi. O'zbekistonda vaqti-vaqti bilan esadigan shamollarning o'rtacha tezligi 3,5—5,5 m/s atrofida bo'lib, ular kichik shamol elektr stansiyalarini ishga tushira oladi.

Bunday shamolli o'lka, vodiylar, tekislik va cho'llar Yer yuzida juda ko'p (AQSh, Rossiya, Fransiya, Qozoqiston va sh.k.).

Shamolning bunday beminnat energiyasidan foydalanib qadimda odamlar «*Shamol tegirmoni*» ni qurganlar. Dengizlarda kema va yelkanli qayiqlarda suzganlar.

Shamol oqimi energiyasidan foydalanib elektr energiyasini ishlab chiqarish uchun katta hajmdagi energetik inshoot qurish shart bo'lmaydi. Minorasini e'tiborga olmaganida, uncha katta bo'lmagan qurilmalar yordamida kichik quvvatli shamol ESlarini shamol yo'llarida qurib, elektr energiyasini ishlab chiqarish mumkin. Minorali shamol ES lari o'rniga aerodinamik quvvatli shamol ES larini qurish maqsadga muvofiq bo'ladi.

Shamol elektr stansiyasi — bu shamolning kinetik energiyasini bilvosita elektr energiyasiga aylantiruvchi qurilma. Shamolning

muhim ko'rsatkichlaridan biri — uning energiya zaxirasi hisoblanadi va u Quyosh radiatsiyasi bilan uzviy bog'langan.

Shamol yo'lining 1 km^2 maydoniga qancha shamol energetik qurilmasini joylashtirishdan avval har bir shamol dvigateli diametri hisob-kitoblar asosida aniqlanadi.

Nazariy ma'lumotlarga ko'ra, 1 km^2 maydonga dvigatelining diametri 18 m bo'lgan 16 ta shamol ESlarini joylashtirish mumkin.

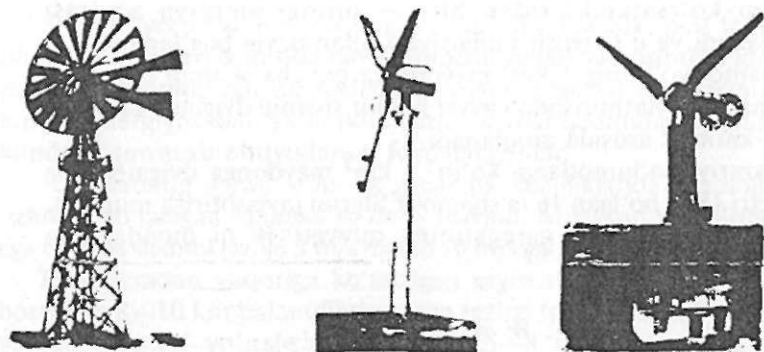
Shamol energetik agregatining quvvati W ni quyidagidan aniqlash mumkin:

$$W = G \frac{\rho \vartheta^3}{2} S, \quad (327)$$

bunda ρ — shamol oqimi massasining zichligi, kg/m^3 ; ϑ — shamol tezligi, m/s ; G — shamol agregatining konstruksiyasi, uning aerodinamik tavsifi hamda tezligiga bog'liq bo'lgan shamol quvvatidan foydalanish koeffitsienti; S — shamol oqimi ta'sirlashadigan turbina kuraklarining umumiy yuzasi, m^2 .

Shamolning o'rtacha tezligi 5 m/s atrofida bo'lsa, shamol energetik agregati bir yilda $50 \text{ MW} \cdot \text{soat}$ elektr energiyasini berishi mumkin. Unda har kv.km.dan $8 \cdot 10^5 \text{ kW}$ energiya olish mumkin bo'ladi. Bu esa 400 tonna shartli yoqilg'ini tejash demakdir. Chunki $1 \text{ kW} \cdot \text{soat}$ elektr energiyasi $0,5 \text{ kg}$ shartli yoqilg'iga mutanosib.

O'zbekiston sharoitida, Qo'qon-Bekobod shamoli 30 km kenglikda esayotganida, bu oraliqdagi maydondan esib o'tuvchi shamoldan yarim yilda $4,8 \text{ GW}$ energiyani olish mumkin bo'ladi. Albatta, shamol yo'lida turli-tuman ekin maydonlari, zavod, fabrika, uy-joylar maydonlari olib tashlansa, unda kamida shu energiyaning $0,5\text{--}1,0 \text{ GW}$ ni ishlab chiqaradi. Bu esa o'rtacha $350 \cdot 10^6$ tonna shartli yoqilg'ini tejash demakdir. Shamol ESlari shamol dvigateli, elektr generatori, turli xil avtomatlashtirilgan mexanik hamda elektr tizimi va binodan tashkil topadi (9.4-rasm). Shamol dvigateli — bu kuchli havo oqimining kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantiruvchi dvigateldir. Shamol dvigatellarining ishlash tartibi bir xil: shamol bosimi ta'sirida parrakli shamol g'ildiragi aylanadi va valda paydo bo'lgan burovchi momentni uzatmalar yordamida elektr generatori yoki nasosga uzatadi. Shamol g'ildiragining diametri qancha katta bo'lsa, shuncha shamol oqimini ko'proq qamrab oladi hamda katta quvvatni hosil qiladi. Shamol dvigatellari konstruksiyasiga ko'ra parrakli, rotorli va barabanli bo'ladi. Shamol agregatlarining turlari 9.5-rasmda

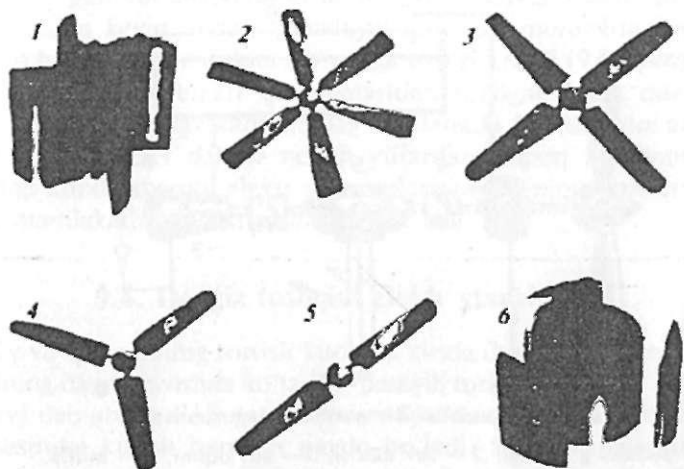


9.4-rasm. Shamol elektr stansiyalari.

keltirilgan bo'lib, ular gorizontal o'qda aylanuvchi qanotlilar (2—5) va vertikal o'qda aylanuvchi rotorli (Darye konstruksiyasiga mansub: qanotli — 1 va ortogonal — 6) bo'ladi. Qanotli shamol dvigatellari bir-biridan kuraklar soni bilan farqlanadi. Qanotli shamol dvigatellarining aylanish tezligi qanotlar soniga teskari mutanosibligi tufayli uchtadan ortiq qanotlilar amalda ko'p qo'llanilmaydi. Shamol oqimi muayyan yo'nalishga ega bo'lmagan joylarda karuselli (rotorli) shamol dvigatellari katta samara beradi. Hozirgi kunda bu sohada AQSH, Yaponiya, Buyuk Britaniya, Germaniya, Kanada, Argentina olimlari ijobiy natijalarni qo'lga kiritdilar.

Shamol dvigatellarining qanoti 60 m atrofida bo'lganida, sodda uskunalarini qo'llab, 7 MW gacha quvvat olish mumkinligini AQSh olimlari isbotlashgan. Ortogonal agregatlarda shamol tezligi 5 m/s dan boshlab quvvat beracladi va tezlik 14—16 m/s da nominal qiymatga erishadi. Nazariy tadqiqotlardan ma'lumki, shamol agregatlaridan 50 dan $20 \cdot 10^3$ kW gacha quvvat olish mumkin. Quvvati $2 \cdot 10^3$ kW ShESlari ishlamoqda. Bunday shamol ES si dvigateli g'ildiragining diametri 80 m gacha bo'ladi.

Shamolning kinetik energiyasini mexanik energiyaga aylantirishda shamol dvigatellarining fik turlicha: rotorli(lariniki — 15%, qanotlilariniki — 48%). Shamol dvigatellari shamol ES larining asosiy kuch sistemasida mexanik energiya manbayi hisoblanadi. Shamol dvigatellari bilan nazariy jihatdan 0,042—151,1 kW gacha energiya olish mumkin. Shamol ES sini qurishdan avval, albatta shamol tezligi va oqim quvvati o'lchanadi.



9.5-rasm. Shamol dvigatellari:

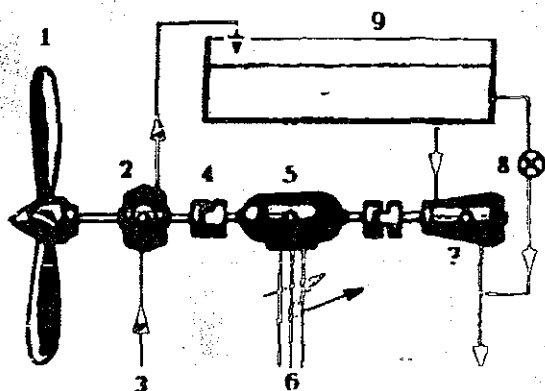
1 va 6 — vertikal o'qda aylanuvchi qanotli va ortogonal karusel (rotor)li (Darye konstruksiyasiga mansub) dvigatellar; 2—5 — gorizontall o'qda aylanuvchi qanotli dvigatellar.

Shamolning tezligi m/s yoki km/soatda o'lchanadi. Shamol tezligini *flyuger*, *vimpel* va *shamol* konusi bilan o'lchanadi. Shamol kuchi *Bofort shkalasi* bo'yicha **uzellar**, **ballar** hisobida baholanadi.

Dunyoda birinchi marta shamol ES (1929—30-y.) Kurskda (Rossiya) qurilgan bo'lib, uning quvvati 8 kW bo'lgan. (1950-y.) har birining quvvati 30 kW bo'lgan, jami quvvati 400 kW kas-kadli shamol ES si Qozoqistonda qurilgan. Bugungi kunda dunyoda quvvati 100 W dan to 1 MW gacha bo'lgan 70 mingdan ortiq shamol ESlari ishlamoqda. Masalan, shamol ES sining quvvati AQSh da — 1794 MW, Germaniyada — 1567 MW, Hindistonda — 820 MW, Daniyada — 785 MW, Fransiya — 640 kW bo'lsa, Niderlandiya, Angliya, Ispaniya, Shvetsiya, Italiya va Xitoyda — 305—57 MW quvvat energiyani ishlab chiqarmoqda (9.6-rasm).

Hamdo'stlik mamlakatlari hududida esadigan shamol energiyasi $10,8 \cdot 10^{12}$ W bo'lib, 1800 ta Krasnoyarsk GESning energiyasi (6000 MW) ga teng quvvatni shamol oqimidan olish mumkin.

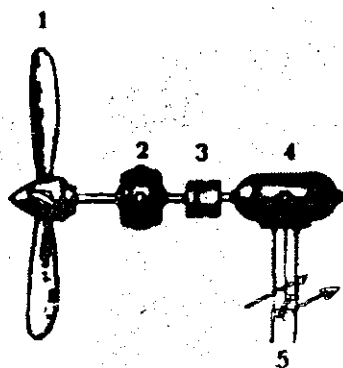
Shamol energiyasi tabiat bergan beminnat energiya manbayi bo'lib, undan foydalanib elektr energiyasini ishlab chiqarish barcha turdagi energiyalardan arzonga tushadi. Masalan, Kolsk yarim



9.6-rasm. Shamol elektr qurilmasining sxemasi:

- 1 — shamol g'ildiragi; 2 — suv nasosi; 3 — suv oqimi; 4 — mufta;
5 — elektr generatori; 6 — ishlab chiqilgan elektr energiyasi;
7 — gidroturbina; 8 — ventilyoki shlyuz; 9 — suv rezurvuari.

orolida (Rossiya) qurilishga mo'ljallanayotgan shamol elektr stansiyalari kaskadi 1100 km uzunlikda joylashgan 238 ta stansiyalardan tashkil topadi. Bu shamol ESlarining har biri elektr halqasiga kamida 1000 MW quvvat beradi.



9.7-rasm. Minishamol elektr stansiyasi:

- 1 — shamol g'ildiragi; 2 — reduktor; 3 — mufta; 4 — elektr generatori.

Shamol ESlarida qo'llaniladigan «shamol g'ildiragi» ning nazariyasini va uning foydali ish koeffitsienti taqriban 60% gacha bo'lishi mumkinligini rus olimi N. E. Jukovskiy XX asr boshlarida isbotlab bergan edi. Ammo hozirgi shamol dvigatellarining *fik* 35—45% dan oshmaydi. Shamol ESlarining shamol yo'nalishiga, mos ravishda, ishlashini ta'minlash maqsadida shamol g'ildiragi flyuger (metall plastinkadan yasalgan yassi dum) yordamida avtomatik burib turiladi.

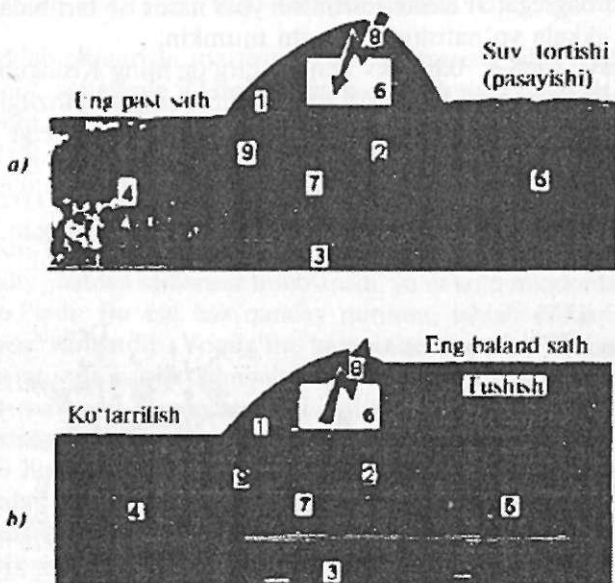
Shamol ESlarining yana ham soddalashtirilgan konstruksiyalari qo'llanilsa, ishlab chiqiladigan elektr energiyasi arzonlashadi. Bunda 9.6-

rasm dagi gidroturbina keraksiz bo'lib qoladi. Unda, albatta shamol g'ildiragidan keyin undan olinadigan burovchi momentni isrofsiz uzatuvchi mufta va reduktor qo'yishga to'g'ri keladi (9.7-rasm).

Sodda shamol elektr qurilmalaridan tuzilgan katta quvvatli stansiyalarni qurishga kam mablag' sarflanadi. Minishamol elektr stansiyalar AQSH da bir necha yillardan buyon ishlamoqda. Hozirgi kunda shamol elektr stansiyalarining miniqurilmalaridan ko'p mamlakatlarda foydalanilmoqda.

9.4. Dengiz toshqini elektr stansiyasi

Oy va Quyoshning tortish kuchi ta'sirida dengiz va okean suvi sathining davriy ravishda ko'tarilib-pasayib turish hodisasini *toshqin* (priliv) deb atashadi. Suv toshqini natijasida dengiz va okean suv massasining kuchli harakati paydo bo'ladi. Bu suv massasining

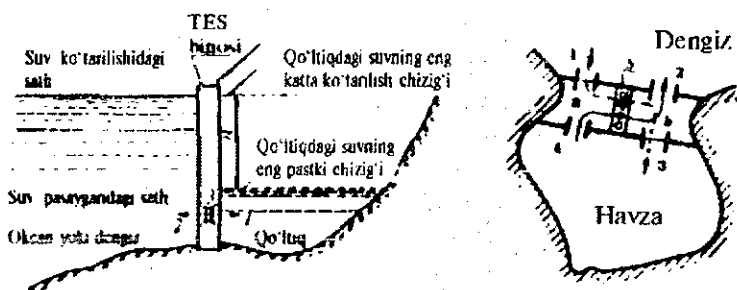


9.8-rasm. To'g'ri oqimli generator (a) va nasos (b) ish tartibida ishlayotgan suv toshqinli elektr stansiyasining kesimi:

1 — to'g'on; 2 — generator (nasos); 3 — to'g'on tagi; 4 va 5 — dengizning past va yuqori sathli tomonlari; 6 — podstansiya; 7 — oqimni boshqarish moslamasi; 8 — elektr energiyasi; 9 — suv oqimi yo'nalishi.

harakati natijasida dengiz va okean suvining sathi har 12 soat 13 minutda ko'tariladi, xuddi shuncha vaqt davomida pasayadi. Suv sathining ko'tarilish — pasayish davri 24 soat 26 minutga teng. Bunday jarayonda suv sathi ayrim joylarda 16 m gacha ko'tariladi. Masalan, Kanadaning sharqidagi Fundi qo'ltig'ida to 16 m, Oxota dengizining Penjin ko'rfazida (Rossiya) — 13 m, Murmansk (Rossiya)da — 6 m, Kola yarim oroli qo'ltig'ida — 8 m va sh.k. joylarda suv sathining kuchli ko'tarilish-pasayish hodisasi kuzatiladi. Suvning bunday harakati hisobiga paydo bo'lgan energiyani mexanik energiyaga va uni elektr generatori yordamida elektr energiyasiga aylantiruvchi inshoot *suv toshqini* (suvning ko'tarilish-pasayish) *elektr stansiyasi* deyiladi (9.8-rasm). Okean va dengizlardan bu energiyani olish uchun maxsus toshqin gidroelektr stansiyasi quriladi (9.9-rasm). Buning uchun qirg'oqda suv to'planadigan katta hajmdagi to'g'onli havza hosil qilinadi va to'g'onga gidroagregatlar, xuddi gidroelektr stansiyalaridagiday, o'rnatiladi. Gidroagregatlar elektr generatori yoki nasos ish tartibida suv oqimining ikkala yo'nalishida ishlashi mumkin.

Birinchi marta 1968-y. Barensev dengizi qirg'og'ining Kislogub ko'rfazi (Rossiya)da quvvati 400 kW li toshqin ES qurilgan. Hozirgi kunda bu stansiya 1,2 MW quvvat bilan ishlamoqda. Toshqin energiyasidan foydalanish maqsadida Oq dengiz havzasidagi Mezenda 6—14 GW, Oxota dengizidagi Penjinda — 35 GW va Tugurda — 9 GW, Kolsk yarim orolida quvvati 320 MW li elektr stansiyalari qurilgan. Bu toshqin ES lari energetika tarmog'iga katta energiya beriyapti.



9.9-rasm. Suv toshqini elektr stansiyasining kesimlari:

1—2 va 4—2 yo'nalishda — dengiz sathi pasayish jarayonida suv havzasi-dan dengizga gidroturbina orqali oqib o'tadi; 2—1 va 1—3 yo'nalishda — dengiz sathi ko'tarilish jarayonida suv qo'ltiq (havza) tomonga gidroturbina orqali oqib o'tadi.



1. Gelio va geoenergetika deganda nimani tushunasiz? Quyosh nurining energiyasi qanday fizik qonuniyat asosida bevosita elektr energiyasiga aylantiriladi? Gelio elektr stansiyasi qanday qismlardan tashkil topgan? Gelio ES sxemasini chizib ko'rsating.
2. Quyoshdan Yerga va O'zbekiston vohalariga o'racha necha Joule energiya tushadi? O'zbekistonda va boshqa mam'lakatlarda Quyosh energiyasidan qanday maqsadlarda foydalanilmoqda? Bu soha bo'yicha ishlagan o'zbek olimlaridan kimlarni bilasiz?
3. Katta Quyosh sandoni qayerda qurilgan, undagi temperatura necha gradus Kelvinga teng va u qanday maqsadlarda ishlatilmoqda?
4. Yer qo'ridagi issiqlik qanday usul bilan elektr energiyasiga aylantiriladi? GeoESlar qayerlarda ishlatilmoqda?
5. Suv toshqini ES lari qanday ishlaydi va ular qayerlarda qurilgan?

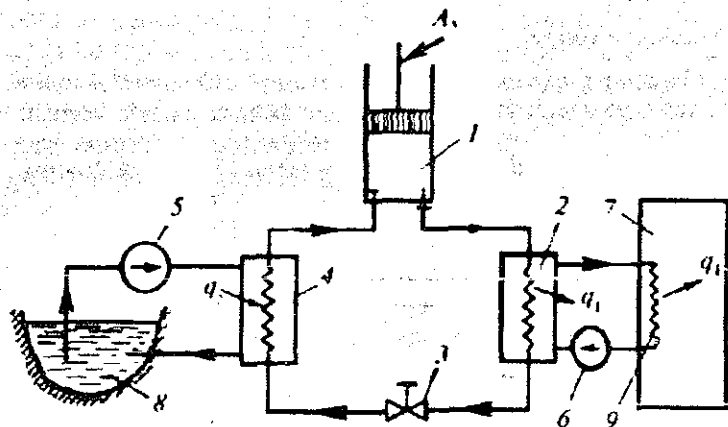
9.5. Issiqlik nasosi

Ishlab chiqarish, maishiy xizmat ko'rsatish, tibbiyotda va ko'p tarmoqli sohalarda yil bo'yi issiq suv, suv bug'i, havo sh.k. issiqlik eltuvchi (yoki chiqaruvchi) moddalar sifatida qo'llaniladi.

Uzatiladigan issiqlik, ko'pchilik holatlarda, asosan organik yoqilg'ini yoqish hisobiga olinadi. Yonish jarayonidagi temperatura 1500—2200 K atrofida bo'lganligidan asbob-uskunalarining tez ishdan chiqishi va issiqlik isrofining kattaligi hisobga olinsa, bu qurilmalar iqtisodiy jihatdan samarasiz hisoblanadi, ya'ni ko'p miqdordagi yoqilg'i sarf bo'ladi. Bu esa har qanday qurilma, ishlab chiqarish uchun befoyda xarajatdir. Yoqilg'ini kamaytirish uchun tabiatdagi past temperaturali issiqlik manbalaridan samarali foydalanish zarur.

Demak past temperaturali issiqlik oqimi bilan issiqlik eltuvchi o'rtasidagi issiqlik almashinuvini qaytar jarayonga yaqinlashtirish orqali hamda issiqlik manbai bilan eltuvchi o'rtasidagi temperaturalar farqini kamaytirish yo'li bilan tabiatdan issiqlik oluvchi qurilmaning iqtisodiy samaradorligi o'rnatiladi. Bunda ishlatiladigan issiqlik eltuvchilarning temperaturasi $T=320-450$ K atrofida olinadi. Bu issiqlik energiyasi iste'molchilarga moddaning ichki energiyasi hisobida uzatiladi. Tabiatdan energiyani olishda issiqlik nasoslaridan foydalaniladi.

Energiya sarflash hisobiga past temperaturali issiqlik manbayidan yuqori temperaturali issiqlik qabul qiluvchiga issiqlikni uzatadigan qurilmani issiqlik nasosi deyiladi. Issiqlik nasosidagi jarayonlar ham



9.10-rasm. Issiqlik nasosining sxemasi:

1 — kompressor; 2 — kondensator; 3 — rostlanuvchi ventily; 4 — bug'latgich;
5, 6 — nasoslar; 7 — isitiluvchi bino; 8 — suv havzas; 9 — isitkich elementlari.

sovitish mashinalarinikiga o'xshash bo'lib, issiqlikni qabul qiluvchi issiqlik nurllovchidan olgan energiyadan tashqari qurilmaga sarf bo'lgan energiyaga teng energiyani atrof-muhitdan olgani uchun samaraliroqdir.

Demak, issiqlik nasosi yordamida yoqilg'i ishlatmasdan atrof-muhit issiqligidan foydalanish imkoniyatini yaratish mumkin.

Faraz qilaylik, biror binoni isitish kerak bo'lsin. Unda atrof-muhitdan olingan q , issiqligi sistemaga uzatiladi va issiqlik almashinuvidan so'ng istilayotgan bino ichkarisiga q_1 issiqlik miqdori energiya sifatida haydaladi.

Issiqlik nasosini kompressor 1, kondensator 2, rostlanuvchi ventily 3, bug'latgich 4, suyuqlik nasoslari 5 va 6 hamda isitiladigan bino 7 dan tashkil topadi (9.10-rasm).

Issiqlik nasosini ishlatish uchun eng avvalo, suv havzasidagi suv nasos 5 yordamida bug'latgichning berk konturi bo'ylab haydaladi. Atrof-muhitdagi q , issiqlikni bug'latgich 4 dagi moddaga uzatadi. Shunda q , ta'sirida bug'latgichda (bunda kompressiyalovchi — siquvchi sovitish qurilmasi, issiqlik nasosi qurilmasida, bug'latgich vazifasini bajaradi) sovitish agenti bug'lanadi. Tashqi kuch ta'sirida ishlaydigan kompressor bug'latgichdagi bug'ni so'radi, so'ngra siqadi va kondensatorga haydaydi. Kompressorga so'rilgan sovitish agentining bug'i yana ham kengayib soviydi. Sovigan bug'

kompressorda siqilib qiziydi. Shu qizigan sovitish agentining bug'i kompressordagi haydash klapani ochilgandan so'ng, kondensatorga haydaladi. Kondensatordan o'tayotgan sovitish agentining issiq bug'idagi q_1 issiqligi berk isitish konturida majburiy harakatlanayotgan suvga qattiq devor orqali issiqlik almashinuvi yo'li bilan o'tadi. Natijada sovitish agenti sovib kondensatga aylanadi. Berk isitish konturiga sovitish agentidan o'tgan q_1 issiqlik hisobiga suv temperaturasi ortadi va bino xonalaridagi isitish asboblari (batareyalar) issiqlik nuriydi, xonalar isiydi. Rostlanadigan ventildan kondensat o'tish jarayonida o'z hajmini orttirish hisobiga sovib bug'latgichga o'tadi. Sikl yana qaytadan takrorlanadi.

Faraz qilaylik, vaqt birligida bug'latgichda 1 kg sovitish agentini bug'latish uchun atrof-muhit (suv havzasi)dan q_2 issiqlik miqdori olinsin hamda kompressorga so'rilgan, unda siqilgan va undan haydalgan 1 kg sovitish agentiga A_1 kattalikdagi ish tashqi kuchlar hisobiga sarflansin. Shunda ikkinchi berk konturdagi siqilgan sovitish agentining ichki energiyasi kondensatsiyalanish jarayonida kamayishi hisobiga q_1 issiqlikni uchinchi konturdagi suvga kondensator 2 dan o'tishi davomida uzatadi.

Demak, sikldan chiqarilgan q_1 issiqlik miqdorini qurilmaning sovitish koeffitsienti ϵ , siklga atrof-muhitdan kiritilgan issiqlik q_2 va kompressorni yuritishga sarf bo'lgan A_1 ish orqali ifodalab, undan sistemaga keltirilgan issiqlik miqdori topiladi:

$$\epsilon = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_1 - A_2}{A_1} = \frac{q_1}{A_2} - 1,$$

$$q_1 = A_2(1 + \epsilon).$$
(328)

Issiqlik nasosining muhim tavsiflaridan biri *o'zgartirish koeffitsienti* ω ni A_1 va q_1 orqali ifodalab, (328) asosida qurilmaning sovitish koeffitsientini hisobga olgan holda yozish mumkin:

$$\omega = \frac{q_1}{A_1} = \frac{q_2 + A_1}{A_1} > 1$$

yoki

$$\omega = 1 + \epsilon$$
(329)

Bu isitish uskunalarini boshqa turdagilari bilan o'zaro taqqoslansa, masalan, elektr qizdirgich uchun $q_1 = A_1$, o'zgartirish koeffitsienti $\epsilon = 1,0$ teng bo'ladi. Chunki, elektr energiyasi butunlayin ishga aylanadi.

Sovitish ko'effitsientining qiymati har doim birdan katta va u sovitish mashinasining ishlash sharoitidagi T ga bog'liq bo'ladi. 9.10-rasmdan ko'rinadiki, suv havzasining temperaturasi qancha yuqori, aksincha isitish sistemasining temperaturasi qancha past bo'lsa, qurilmaning sovitish va o'zgartirish (issiqlikning transformatsiyasi) ko'effitsientlari shuncha katta bo'ladi. O'rta holatlarda ishlaydigan hunday qurilmalarda $\varepsilon = 3 \div 5$ atrofida bo'ladi. Issiqlik nasoslari texnologik maqsadlarda, issitishda va havoni sovitishda keng qo'llaniladi.

9.6. Kimyoviy issiqlik transformatorlari

Eritmalar fizika-kimyoviy xossalari jihatidan bir-biridan farq qiladi. Issiqlik energiyasini kimyoviy usul bilan o'zgartirish *kimyoviy issiqlik transformatsiyasi* (lot.*transform-o'zgartiraman*) deyiladi.

Kimyoviy issiqlik (termokimyoviy) transformatorining ishlashi eritma xossalariga asoslanadi. Shuning uchun issiqlikni kimyoviy usul bilan o'zgartirishda asosiy erituvchi modda sifatida suv olinadi. Suvda eruvchi sifatida o'yuvchi kaliy yoki natriy (KON va NaON) tanlanadi. Hosil bo'lgan eritma tarkibidagi suv eng oson bug'lanuvchi komponent bo'lib, u normal sharoitda, ya'ni $P = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, $T = 372,80 \text{ K}$ qaynaydi. Eritma, masalan, 90% KON shu hosimda 643 K atrofida qaynaydi (9.12-rasm).

T_g — diagrammadan ko'rinadiki, o'yuvchi kaliyning suvdagi bir xil konsentratsiyali eritmasi tashqi bosim ortganida (yoki kamayganida) mos ravishda uning qaynash temperaturasi ortadi (yoki tushadi). Eritma konsentratsiyasi katta (yoki kichik) bo'lganida qaynash temperaturasi koordinata boshidan o'ng tomonga (chap tomonga) siljiydi.

Kimyoviy issiqlik transformatorlari ikki xil, ya'ni *orttirish va parchalash* (oqimlarga ajratish) sxemalari bo'yicha ishlaydi:

a) **orttirish sxemasi** — temperatura potensialini yuqori darajalargacha orttiradi;

b) **parchalash sxemasi** — o'rta issiqlik potensialini yuqori va past issiqlik energiyasigacha o'zgartiradi (transformatsiyalaydi).

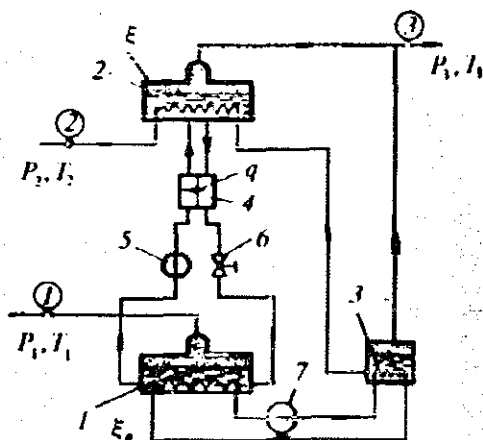
Soddaroq qilib, bug' bosimi yoki temperaturasi orqali bu sxemalarni mazmunini quyidagicha tavsiflash mumkin:

a) *past bosimli bug' bosimini yuqori bosimli bug'ga aylantirish;*

b) *muayyan bosimli bug'ni yuqori va past bosimli bug' oqimlariga ajratish.*

Bu sxemalar bilan tanishib chiqamiz. Ma'lumki, yuqorida qarab chiqqanimizdek, eritmaning konsentratsiyasiga mos ravishda, uning tarkibidagi yengil modda tezroq (bir xil bosimda) bug'lanadi va qaynaydi.

Kimyoviy issiqlik transformatorining issiqlikni orttirish (kuchaytirish) qurilmasi 9.11-rasmda sxematik tarzda tasvirlangan. Qurilma absorber 1, bug'latgich 2, bug' generatori 3, sirt orqali issiqlik almashtirgich 4, reduktorli ventill 6, eritma nasoslari 5 va 7 dan tashkil topgan. Bu transformator quyidagicha ishlaydi: absorber 1 dagi ammiak eritmasining temperaturasi T_3 , bosimi P_1 (9.13-rasmdagi, a nuqta), quyuqlanishi ξ bo'lgan eritma ustidagi bug' fazosiga T_1 temperaturali, P_1 past bosimli ammiak bug'i kiritiladi. Shunda $T_3 > T_1$ bo'ladi. Bunday sharoit o'rinli bo'lsa, absorberga kiritilgan bug'ni ammiak eritmasi yutadi. Bu yutilish jarayoni ekzotermik bo'lganligidan ma'lum miqdordagi issiqlik ajraladi. Natijada sof ammiakning temperaturasi ortadi. Bu ortiqcha issiqlikni absorberdan chiqarilmasa, issiqlik muvozanati buziladi. Shuning uchun ortiqcha issiqlik nasos 7 yordamida bug' generatori 3 ga haydalgan berk konturda harakatlanuvchi suyuqlik bilan chiqariladi. Bu issiqlik hisobiga bug' generatori 3 dagi suv qaynaydi. Absorber 1 dagi kuchsiz (suyuqlashgan), ya'ni past konsentratsiyali eritma nasos 5 yordamida qaynatgich 2 ga



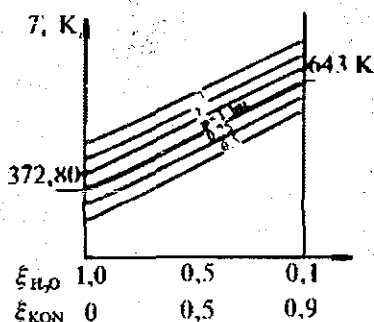
9.11-rasm. Kuchaytiruvchi kimyoviy issiqlik transformator sxemasi:

1 — absorber; 2 — bug'latgich; 3 — bug' generatori; 4 — issiqlik almashtirgich; 5 va 7 — nasoslar; 6 — ventill.

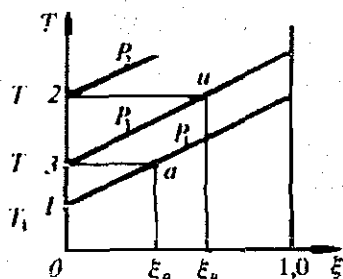
haydaladi, undan teskari yo'nalishda reduktorli ventil 6 orqali quyuqlashgan eritma yana absorberga haydaladi.

Demak, absorberdagi eritma quyuqligining bir xilligini ta'minlash maqsadida uning bir tomonidan kuchsiz eritma kiritilsa, ikkinchi kanaldan quyuqlashgan eritma chiqadi va shu bilan absorberda mo'tadil ish jarayoni yaratiladi.

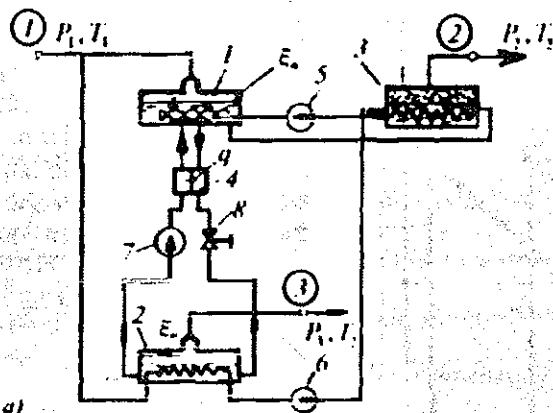
Absorberdan nasos 5, issiqlik almashtirgich 4, reduktorli klapan 6 va absorber 1 bo'yicha berk konturda harakatlanayotgan eritma albatta issiqlik almashtirgich 4 dan o'tayotganda bug'latgich 2 dan absorberga yo'naltirilgan eritma temperaturasi yuqori bo'lganligidan, undagi issiqlikning ma'lum q miqdori absorberdan bug'latgichga haydalayotgan temperaturasi past, kuchsiz eritmaga qattiq devor sirti orqali issiqlik almashinuvi bo'yicha o'tadi. Bosimi P_3 va temperaturasi T_1 bo'lgan bug', generator 3 dagi hug'ning temperaturasi absorberdagi eritma temperaturasiga teng bo'ladi (9.13-rasm, u nuqta). Eritmadagi suvni bug'latish maqsadida P_3 va quyuqligi ξ_u bo'lgan eritmاني bug'latish uchun tashqaridan kiritilayotgan P_1 bosimli va T_1 temperaturali suv bug'i ilonizisimon quvur orqali bug'latgichdan o'tgandan va bunda hosil bo'lgan kondensat bug' generatoriga qo'yiladi. Bug'latgich va generatoridagi bug' bosimlari o'zaro teng ($P_3 = P_{bg}$) bo'lgani uchun ularni qo'shib P_3 bosimli va T_1 temperaturali bug' foydalanuvchiga uzatiladi. Shu usul bilan past va yuqori bosimli bug'larni o'rtacha bosimli bug'ga aylantiriladi. Bunda reaksiya ekzotermik bo'lgani hisobiga issiqlik energiyasining transformatsiyasi amalga oshiriladi.



9.12-rasm. O'yuvchi kaliyning suvdagi eritmasi qaynashining $T\xi$ diagrammasi.



9.13-rasm. Kimyoviy issiqlik transformatoridagi ertirish jarayonining $T\xi$ diagrammasi.



9.14-rasm, a. Oqimlarga ajratuvchi kimyoviy issiqlik transformator sxemasi:

1 — absorber; 2 — bug'latgich; 3 — bug' generatori; 4 — issiqlik almashtirgich; 5, 6 va 7 — nasoslar; 8 — reduktorli klapan.

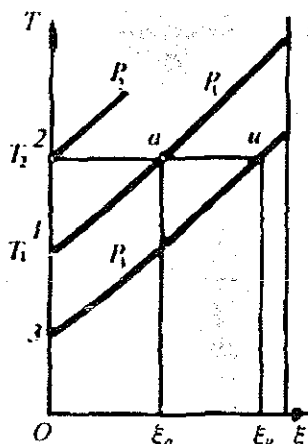
Parchalash sxemasini o'rganish maqsadida kimyoviy issiqlik transformatorining yana bir turini qarab chiqamiz.

Parchalash qurilmasi (9.14-rasmda keltirilgan) absorber 1, bug'latgich 2, bug' generatori 3, issiqlik almashtirgich 4, nasoslar 5, 6, 7, reduktorli klapan 8 dan tuzilgan.

Qurilma sxemasidan ko'rinadiki, kiritilayotgan o'rta P_1 bosimli bug' ikki oqimga (yuqori va past bosimli bug'larga) ajratiladi, so'ngra fizika-kimyoviy jarayonlar sodir bo'ladi.

Kiritilgan bug' bosimi P_1 bug' generatoridan chiqadigan P_2 yuqori bosimli bug'nikidan kichik bo'ladi, ya'ni $P_2 > P_1$ (9.14-rasm, b, 2 nuqta). Ikkinchi yo'nalishdagi P_1 past bosimli bug' bosimi, qurilmaga kiritilayotgan P_1 o'rta bosimli bug' bosimidan kichik bo'ladi, ya'ni $P_1 < P_1$ (9.14-rasm, b dagi 3 nuqta). Parallel ravishda P_1 bosimli va T_1 temperaturali bug' oqimi yuqori va past bosimli bug'larga ajralgandan so'ng yuqori bosimli bug' oqimi absorberga va past bosimli esa bug'latgichga kiritiladi. Shuning uchun absorberdagi bosim birlamchi bug' oqimining bosimi P_1 ga teng bo'lsa-da, ularning temperaturalari bir-biridan farqli, ya'ni $T_1 < T_2$ bo'ladi.

Ammo absorberdagi bosimni va eritma konsentratsiyasini bir xil saqlash, ya'ni $\xi > \xi_1$ ta'minlash uchun yuqoridagi usuldan foydalaniladi. Kuchsiz eritma nasos 7 bilan haydaladi va uning quyuvlashgan qismi reduktorli klapan 8 orqali qaynatgich 2 ga o'tkaziladi.



b)

9.14-rasm. b. Oqimlarga ajratuvchi kimyoviy issiqlik transformatoridagi jarayonning TS diagrammasi

Absorberdagi eritma temperaturasi yuqori bo'lganligidan unga kiritilgan bug' eritmada yutiladi. Bu yutilish ekzotermik jarayon bo'lganligidan q issiqlik miqdori paydo bo'ladi, eritma yana ham isiydi va bu issiqlik bug' generatoriga ilonizisimon quvurdagi suyuqlik orqali uzatiladi. Natijada bug' generatorida kuchli bug'lanish sodir bo'ladi. Qaynoqroq eritma absorberdan nasos bilan haydalishi natijasida absorber va bug' generatorining yaxshi ishlashi ta'minlanadi. Qaynoq eritma bilan bug' generatoridagi suvning kuchli issiqlik almashinuvi natijasida P_2 bosimli va T_2 temperaturali suv bug'i hosil bo'ladi. Generatoridagi bug' bosimi qurilmaga kiritilayotgan birlamchi bug'ning bosimidan katta, ya'ni $P_2 > P_1$ bo'ladi.

Birlamchi bug'ning past bosimli oqimi bug'latgich 2 da issiqlik almashinuvi natijasida kondensatga aylanadi va bu kondensat nasos 6 yordamida bug' generatoriga haydaladi. Bug'latgichga kondensatdan o'tgan issiqlik miqdori ta'sirida eritma bug'lanadi va P_3 bosimli va T_2 temperaturali bug' hosil bo'ladi. Bug' generatoridan va bug'latgichdan chiqqan P_2 , T_2 , va P_3 , T_2 parametrlari bug' oqimlari iste'molchiga uzatiladi. Bug'latgich va absorberning o'zaro eritma almashinuvi hisobiga quyruqlanishning $\xi = \text{const}$ bo'lishi ta'minlanadi.

Yuqorida qarab chiqilgan kimyoviy issiqlik transformatorlaridagi massalar muvozanatini, sxemalarga mos ravishda, quyidagicha yozish mumkin (turli xil isroflar bunda e'tiborga olinmagan):

$$\left. \begin{aligned} m_3 &= m_1 + m_2 \\ m_1 &= m_2 + m_3 \end{aligned} \right\} \quad (330)$$

bunda m_3 va m_1 — o'rta P_3 va past P_1 bosimli bug' massalari miqdorlari; $m_1 = m_2$ — past P_1 va yuqori P_2 bosimli bug' massalari miqdorlarining yig'indisi.

Demak, o'rta bosimli bug' oqimini kimyoviy issiqlik transformatorlaridan foydalanib, yuqori va past bosimli bug' oqimlarini hosil qilishda keng qo'llash mumkin.

Nazorat savollari

?

1. Qanday qurilmaga issiqlik transformatori deyiladi va u qanday ishlaydi hamda nima maqsadlarga ishlatiladi?
2. Issiqlik transformatori turlarini sanab o'ting va ularning farqini tushuntiring.
3. O'zgartirish va sovitish koefitsientlarining formulalarini yozing va ularning ma'nosini tushuntiring.
4. Kimyoviy issiqlik transformatori qanday qismlardan tashkil topgan va u qanday ishlaydi?
5. Kuchaytiruvchi va orttirish kimyoviy issiqlik transformatorlari bir-biridan nimalari bilan farq qiladi?
6. Issiqlik nasosi va kimyoviy issiqlik transformatorlarining diagrammalarini chizing va ularni tushuntiring.
7. Absorber, bug'fatgich, bug' generatorlari qanday ishlaydi?
8. Issiqlik nasosi va kimyoviy transformatorlarda asosiy ish jismi sifatida qanday moddalar ishlatiladi?

X BOB. HAVO

10.1. Atmosfera havosi, uning tarkibi va ayrim xususiyatlari

Havo — gazlar, ularning birikmalari va uchuvchi mayda zarralar aralashmasidan tashkil topgan murakkab tarkibli modda. *Yerning amosfera havosi* muayyan balandlikkacha joylashgan gazlar, ularning birikmalari, chang zarralari, suyuqliklar bug'i va tomchisi hamda kristallari aralashmasidan tashkil topgan murakkab tarkibli modda.

Atmosfera zichligi balandlikka qarab, har xil geografik kengliklarda turlicha o'zgarishi mumkin. Masalan, Yer atmosferasini oisak, u ham o'zgarib turadi. Yer atmocerfasining pastki qatlami — *troposfera* 14 km balandlikkacha bo'lib, uning tarkibiy qismi o'ta murakkab gaz-chang holatidagi mexanik aralashmadan tashkil topgan bo'lib, ular gazsimon, suyuq va qattiq holatda bo'lishi mumkin.

Havo, undagi namlik miqdoriga qarab, quruq yoki nam bo'lishi mumkin. Havoning namligi yoki quruqligiuning tarkibidagi suv bug'i miqdori bilan tavsiflanadi.

Suv atmosferada uch xil agregat holatda uchraydi: gazsimon, suyuq va qattiq. Suv yer troposferasining quyi qatlamida suyuq va bug', o'rta qatlamda bug' va yuqori qatlamda muz shaklida bo'ladi. Chunki yer sirtidan yuqori qatlamlargacha atmosfera havosining temperaturasi pasayib boradi. Yer atmosferasining asosiy qismi (99,95%) kislorod, azot va argondan tashkil topgan. Qolgan qismi turg'un birikma hosil qilmaydigan inert (Ar, Ne, Xe, Kr) gazlari va Rodon, uchuvchi gazlar birikmalari hamda chang zarralaridan iborat. Yer atmosferasining balandligi 2000 km balandlikdan ortiqroq bo'lib, uning zichroq qismi 35 km dan oshmaydi. Atmosfera havosidagi gazlar miqdori turlicha (II-jadval) bo'lib, yer sirtida ob-havo va iqlimning shakllanishida, ya'ni issiqlik energiyasining taqsimotida, yerdagi tirik organizmni himoyalashda, Quyoshdan kelgan ko'k-zangori nurning atmosferada diffuzion sinishi (sochilishi) dan ko'm-ko'k osmon va yoruq olamni paydo bo'lishida, sun'iy issiqlik energiyasini hosil qilish uchun yoqilg'ilarni yoqishda, turli-tuman endo va ekzotermik reaksiyalarning borishida havo asosiy komponent hisoblanadi. Atmosfera Yerdagi iqlimni shakllantiradi, issiqlik energiyasini saqlashda uning izolatori vazifasini bajaradi. Yerda atmosfera bo'lmaganida uning o'rtacha yillik temperaturasi 250 K (-23°C) tashkil etardi. Atmosfera hisobiga yerning o'rtacha yillik temperaturasi 287,95 K ($+14,8^{\circ}\text{C}$) ga teng bo'ladi. Aksincha, atmosfera havosi bo'lmasa, Yer sirtining ayrim joylaridagi temperatura minus 100°C dan ham past bo'lishi mumkin edi.

Atmosfera havosida, yuqorida sanab o'tilgan gazlardan tashqari, oz miqdorda vodorod, uglerod oksidlari, ammiak, metan, sulfid angidrid hamda suv bug'i bo'ladi. Ko'pchilik kimyoviy elementlar atmosfera qatlami balandligi ortgan sayin kamayib boradi. Masalan, kislorod yer sirtidan 18 km balandlikkacha kuchli o'zgarmasa-da, 29 km balandlikda uning miqdori 6% ga kamayadi. Havodagi kislorodning parsial bosimi (dengiz sathida) 21331,5 Pa, uning ayrim holatlarda bosimi to 18665,1 Pa gacha kamayishi odamlarda kislorod yetishmovchiligiga olib keladi. Bu bosim 14615,4 Pa ga kamaganida gipoksiya kasalligi, 6666,6—7999,3 Pa da hayotga xavf paydo bo'ladi.

Yer atmosfera havosining tarkibi

Gazlar nomi, belgisi		Molekular og'irligi	Miqdori, % (1 m ³)	Parsial bosimi, Pa
Azot	N ₂	28,016	78,09	593,4
Kislorod	O ₂	32,0	20,95	159,2
Argon	Ar	39,944	0,93	7,07
Karbonat angidrid	CO ₂	44,0	0,0275	0,23
Neon	Ne	20,183	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
Geliy	He	4,003	$5,24 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Kripton	Kr	83,80	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$8,4 \cdot 10^{-4}$
Vodorod	H ₂	2,016	$5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Ksenon	Xe	131,3	$8 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$
Ozon	O ₃	48,0	$1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Suv bug'i	H ₂ O	18,0	0,129	3,88
Ammiak	NH ₃	17,0	$6 \cdot 10^{-6}$	—
Radioaktiv chang	—	—	$6 \cdot 10^{-18}$	—

Yer atmosferasidagi namlik(suv bug'i, tomchisi, muz kristallari)da aniqlangan ilmiy ma'lumotlarga ko'ra, o'rtaacha (13—15)10³ km³ ga yaqin suv bor. Bu namlik Yer sirtini (70,8%) egallagan okean, dengiz, ko'l, daryo va boshqa suv havzalaridan va tuproq qismidan bug'lanib atmosferaga ko'tariladi.

Texnologik jarayonlarni boshqarishda suyuq, nam va quruq havo ishlatiladi. Shuning uchun ularni olishda atmosfera havosiga ma'lum talablarga mos ishlov beriladi. Masalan, suyuq havo olish uchun atmosfera havosi normal bosim ostida to 81 K gacha sovutiladi. Suyuq havo ko'pchilik holatlarda qalin devorli po'lat ballonlarda yuqori bosim (15 MPa) ostida tashiladi. Inson faoliyat ko'rsatayotgan ishlab chiqarish joylarida, ya'ni yoqilg'ini yoqishda, nosoz texnikadan foydalanishda, issiqlik va elektr energiyasini ishlab chiqarishda va sh.k. jarayonlarda atmosferaga uchuvchi sulfid angidrid, vodorod sulfid, azot oksidlari, galogenlar va ularning birikmalari hamda zarralar (chang) chiqarish bilan uni ifloslantirmoqda. Ekologik talablarga muvofiq sanoat markazlari chiqarayotgan tutun gazlari maxsus filtrlardan o'tkazilib atmosferaga chiqariladi. Shunday bo'lsa-da, bugungi kunda havodagi zararli

gazlar va uchuvchi zarralar miqdori 0,2% dan ortiq. Natijada bu uchuvchi moddalarning Quyosh nurini yutishi, qaytarishi hisobiga bugungi kunda katta shaharlar va og'ir sanoat markazlari ustiga tushadigan nur miqdori to 40% gacha kamaygan. Bu ham, o'z navbatida, bir muammo bo'lib shakllanmoqda.

10.2. Havoning fizik xossalari

Havoning fizik xossalari inson faoliyatiga ijobiy va salbiy ta'sir ko'rsatuvchi omillardan biridir. Shuning uchun havoning namligi, issiqlik o'tkazuvchanligi, bosimi va sh.k fizik kattaliklari (12-jadval) maxsus ilmiy-tekshirish institutlari hamda stansiyalari tomonidan uzluksiz tekshiriladi va nazorat qilinadi. Atmosfera havosining tarkibidagi zararli moddalar Davlat va Xalqaro tashkilotlar nazorati ostida bo'ladi.

12-jadval

Atmosfera havosining fizik xossalari

Zichlik, ρ , kg/m ³ $\cdot 10^{-3}$	Normal bosim P , Pa	Kritik $\frac{P_k}{T_k}$ Pa/K $\cdot 10^6$	Ken- gayish koef. $\alpha \cdot 10^{-4}$	Issiq. o'tkazuv- chanlik koef. λ , W/m ² ·K, $\cdot 10^{-3}$	Issiq. si- g'irlari nisbati c_p/c_v , $\cdot 10^3$	Suvda eruvchan- ligi, l/sm ³ (273 K)
1,2928	101325	3,7/132,4	36,7	24,276	8,4/10	29,18

10.2.1. Havoni quritish jarayoni

Havo tarkibidagi namlikni fizika-kimyoviy jarayonlarda ajratish usuli *havoni quritish* deyiladi. Havoning fizik xossalarini o'zgartirish yo'li bilan uning texnologik va shifobaxshlik xossalari yaxshilanadi.

Havoni quritishda absorbsiya, adsorbsiya va fizik usullar qo'llaniladi. Ma'lumki, absorbsiya usulida havodagi suv bug'i suyuq moddada yutiladi. Bu usulda namlikni yutuvchi modda sifatida 35—40% kalsiy xlorid, 85% glitserin, 85—97 % dietilenglikol, trietilenglikol, 94—96 % sulfat kislotasi va sh.k. moddalar eritmaları adsorbent sifatida keng qo'llaniladi.

Adsorbsiya usuli bilan havoni quritishda namlikni yutuvchi qattiq adsorbentlar (CaCl_2 , NaOH , KOH , MgO , P_2O_5 , boksitlar, slikagel, alumogel va sh.k. moddalar) ishlatiladi.

Bu usulda absorbsiya usuliga nisbatan ko'proq (to 10% gacha) namlik yutiladi.

Fizik usulda esa nam havo issiqlik almashtirgich asboblardan o'tish jarayonida issiqlik yutuvchi sovutkich agentlari bilan sovutiladi, siqiladi va keyin birdaniga keskin kengaytiriladi.

10.2.2. Havoning namligi

Havodagi suv bug'i miqdori bilan tavsiflanadigan fizik kattalik havoning namligi deyiladi. Havoning namligi *gigrometr* va *psixrometr* asboblari bilan o'lchanadi. Bulardan tashqari, ishlab chiqarishning turli sohalarida qattiq jism va suyuq moddalarning namligini o'lchashda hajmiy, konduktometrik, radioizotopli asboblari ishlatiladi.

Havoning namligi ob-havo va iqlimning asosiy xossalariidan biri bo'lib, texnologik, ishlab chiqarish, tabobat jarayonlarini tashkil etish, ish unumdorligini oshirishda muhim omillardan hisoblanadi. Shu bilan birga kitoblarni, san'at obidalarini saqlashda ham katta ahamiyatga ega.

Havo namligi quyidagi ko'rsatkichlar bilan tavsiflanadi:

a) havoda bo'lgan suv bug'i elastikligi (e), ya'ni parsial bosimi;

Havodagi suv bug'i elastikligi deyilganda havodagi suv bug'ining *parsial bosimi* tushuniladi va P_a da o'lchanadi.

Suv bug'ining elastikligi quyi (e) va yuqori (E) bo'ladi. Muayyan biror temperaturali havo tarkibidagi suv bug'ining *eng yuqori elastikligi* deyilganida E tushuniladi. Agarda $e = E$ bo'lsa, havo suv bug'iga to'yingan bo'ladi.

b) nam havodagi suv bug'i massasining hajm birligidagi miqdori — *absolut namlik* (ρ) deyiladi. Absolut namlik kg/m^3 da o'lchanadi. Nam havo murakkab tarkibli gazlar aralashmasi bo'lgani uchun, suv bug'ining hajmi shu gazlar aralashmasi hajmiga tengligi asosida, muayyan temperatura va parsial bosimdagi, absolut namlik bilan aralashmadagi suv bug'i zichligi orasidagi bog'lanishni quyidagicha ifodalash mumkin:

$$\rho = \left[\frac{M_b}{M_a} \right] = \left[\frac{M_b}{M_{ar}} \right]. \quad (331)$$

Absolut namlik (ρ) bilan havodagi suv bug'ining elastikligi (e) quyidagicha bog'langan, ya'ni

$$\rho = \frac{0,8e}{1 + \alpha t}, \quad (332)$$

bunda e — havodagi suv bug'ining elastikligi;

t — havo temperaturasi, °C;

$\alpha = 1/273$ — havoning issiqlikdan kengayish koeffitsienti.

v) *Nisbiy namlik* (r) — havo tarkibidagi suv bug'i elastikligining aynan shu temperaturadagi to'yingan suv bug'i elastikligiga nisbati bilan ifodalanadigan kattalik (foizlarda o'rihanadi), ya'ni

$$r = \frac{e}{E} 100\%. \quad (333)$$

Nisbiy namlikni havoning absolut namligi (a) bilan uning imkoni bo'lgan to'yingan suv bug'i namligining eng katta qiymatining nisbati ko'rinishda ifodalash mumkin, ya'ni

$$r = \frac{\rho}{\rho_{\max}}, \quad (334)$$

bunda $\rho_{\max} = \rho_{t,b}$ bo'ladi.

Shu ifodani, yuqoridagi bosimlar nisbatlari orqali, ideal gaz uchun quyidagicha ifodalash mumkin:

$$r = \frac{P_{p,b}}{P_{\max}},$$

bunda $P_{p,b}$ va $P_{\max}$ — nam havodagi suv bug'ining parsial va imkoni bo'lgan eng katta bosimlari.

Nisbiy namlik temperaturaga teskari mutanosib, ya'ni

$$r = \frac{1}{(t + 273)} = \frac{e}{E}, \quad (335)$$

bo'lgani uchun

$$e = \frac{E}{(t + 273)}.$$

Demak, yuqoridagilar asosida nam havoning uchta asosiy holatlari quyidagicha tavsiflanadi:

1. $\rho_{p,b} < \rho_{t,b}$ — havo namlikka to'yinmagan, bunda $P_{p,b} < P_{t,b}$ va suv bug'i o'ta qizdirilgan;

2. $\rho_{p,b} = \rho_{t,b}$ — havo namlikka to'yingan, bunda $P_{p,b} = P_{t,b}$ va suv bug'i quruq;

3. $\rho_{p,b} > \rho_{t,b}$ — havo suv bug'iga o'ta to'yingan, bunda $P_{p,b} > P_{t,b}$ va suv bug'i nam holatda.

Yuqorida keltirilgan formulalar asosida havoning absolut namligini va parsial bosimini yozish mumkin, ya'ni

$$\begin{aligned} \rho &= r \rho_{p,b}; \\ P_{p,b} &= r P_{\max} \end{aligned} \quad (336)$$

Hisob-kitoblarda, zarur bo'lganida, $\rho_{\max}$ va $P_{\max}$ suv bug'ining jadvalidan temperaturalarga mos keluvchi qiymatlari topiladi.

g) *namlikning yerishmovchiligi* (d) — muayyan temperaturadagi suv bug'i elastikligi (E) dan havo tarkibidagi suv bug'i elastikligi (e) ning ayirmasi qabul qilingan, ya'ni

$$d = E - e; \quad (337)$$

d) *shudring nuqtasi* — o'zgarmas bosimda havo tarkibidagi suv bug'ini to'yinuncha sovitish uchun zarur bo'lgan temperatura;

e) *havodagi namlik miqdori va uning to'yinish darajasi*. Nam havodagi suv bug'i massasining quruq havo massasiga nisbatini nam havodagi namlik miqdori deyiladi. Bunda massa miqdori kg olinadi.

$$d = \frac{M_{s,b}}{M_{q,h}} = \frac{\rho_{p,b}}{\rho_{q,h}}. \quad (338)$$

Ayrim hisoblashlarda *mo'l* o'lchov birligidan foydalaniladi. *Molyar namlik miqdori* deyilganida *nam havodagi suv bug'i mo'l soni* miqdorining *quruq havo mo'l soni* miqdoriga nisbati tushuniladi va uni quyidagicha ifodalashadi:

$$g = \left(\frac{M_{s,b}}{\mu_{s,b}} \right) / \left(\frac{M_{q,h}}{\mu_{q,h}} \right), \quad (339)$$

hunda $M_{s,b}$ va $M_{q,h}$ — mos ravishda, nam havodagi suv bug'i va quruq havo massalari; $\mu_{s,b}$ va $\mu_{q,h}$ — suv bug'i va quruq havoning molyar massalari ($\mu_{s,b} = 18,016$ va $\mu_{q,h} = 28,95$).

Yuqoridagi formulalardan foydalanib, g va d qiymatlari orasidagi bog'lanish quyidagicha yoziladi:

$$g = 1,61d; \quad d = 0,622g. \quad (340)$$

g va d qiymatlarini suv bug'ining parsial bosimini quruq havo parsial bosimiga nisbati shaklida ifodalash mumkin, ya'ni

$$g = \frac{P_{s.b.p.}}{(P_{nh} - P_{s.b.p.})}; \quad (341)$$

$$d = \frac{0,622 P_{s.b.p.}}{(P_{nh} - P_{s.b.p.})} = \frac{0,622 P_{s.b.p.}}{P_{qh}}, \quad (342)$$

bunda $P_{s.b.p.}$ — suv bug'ining parsial bosimi;

P_{nh} — nam havo bosimi;

$P_{nh} - P_{s.b.p.} = P_{qh}$ — quruq havoning parsial bosimi.

Suv bug'i va quruq havoning parsial bosimlari (341) va (342) dan topiladi, ya'ni

$$P_{s.b.p.} = \frac{P_{qh} d}{0,622} = \frac{P_{nh} d}{(0,622 + d)}; \quad (343)$$

$$P_{qh} = \frac{0,622 P_{s.b.p.}}{d} = \frac{0,622 P_{nh}}{(0,622 + d)}. \quad (344)$$

Muayyan temperaturadagi to'yingan suv bug'ining bosimi $P_{t.b.}$ uning parsial bosimiga teng bo'lganida to'yinish darajasidagi 1 kg quruq *havodagi namlik va molyar namlik miqdorlari* quyidagicha ifodalanadi:

$$d = \frac{0,622 P_{t.b.}}{(P_{nh} - P_{t.b.})}, \quad (345)$$

$$g = \frac{P_{t.b.}}{(P_{nh} - P_{t.b.})}, \quad (346)$$

bunda $P_{t.b.}$ — to'yingan suv bug'ining parsial bosimi bo'lib, uning qiymati muayyan temperaturadagi to'yingan suv bug'i jadvalidan topiladi; $(P_{nh} - P_{t.b.})$ — quruq havodagi to'yingan suv bug'ining parsial bosimi.

$P_{t.b.} \rightarrow P_{nh}$ holat o'rinli bo'lganida, ya'ni to'yingan suv bug'i bosimi nam havo bosimiga tenglashayotganida, havodagi namlik miqdori cheksizlikka ($d \rightarrow \infty$) intiladi.

$d = \infty$ bo'lganida esa faqat suv bug'i bosimiga mos keladi, aksincha, $d = 0$ bo'lganida, quruq havo bosimiga mos tushadi.

10.2.3. Nam havoning zichligi, universal gaz doimiysi, o'rtacha molekular massasi

Nam havoning zichligini aniqlash ishlab chiqarishda va muhandislik masalalari yechimini topishda muhim ahamiyatga ega. Nam havoning zichligi $\rho_{n.h.}$, quruq havo zichligi $\rho_{q.h.}$ bilan suv bug'i zichligi $\rho_{s.b.}$ ning yiqindisiga teng, ya'ni

$$\rho_{n.h.} = \rho_{q.h.} + \rho_{s.b.} \quad (347)$$

Quruq havo va suv bug'ining parsial bosimlariga hamda nam havo temperaturasi mos keluvchi $\rho_{q.h.}$ va $\rho_{s.b.}$ qiymatlar tanlanadi. Gazning solishtirma hajmi bilan zichligi orasidagi bog'lanish ($V = 1/\rho$) ni e'tiborga olib, $\rho_{q.h.}$ va $\rho_{s.b.}$ ni quyidagicha yozish mumkin:

$$\rho_{q.h.} = \frac{P_{q.h.}}{R_{q.h.} T_{n.h.}}; \rho_{s.b.} = \frac{P_{s.b.}}{R_{s.b.} T_{n.h.}} \quad (348)$$

Unda, (347) ni (348) yig'indilarini yozib, unga $R_{q.h.} \approx 287 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ va $R_{s.b.} \approx 462 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ qiymatlarini qo'yib, hisoblab, quyidagi ko'rinishga keltiriladi:

$$\rho_{n.h.} = \frac{P_{n.h.}}{R_{n.h.} T_{n.h.}} - \frac{132 \cdot 10^{-5} P_{s.b.}}{T_{n.h.}}, \quad (349)$$

bunda $P_{q.h.}$ va $P_{s.b.}$ — quruq havo va suv bug'ining parsial bosimlari; $R_{q.h.}$ va $R_{s.b.}$ hamda $T_{n.h.}$ — quruq havo va suv bug'i uchun universal gaz doimiysi hamda nam havoning absolut temperaturasi.

(349) ifodaga nisbiy namlik va to'yingan suv bug'i qiymatlarini kiritib, uni quyidagicha yozish mumkin:

$$\rho_{n.h.} = \frac{P_{n.h.}}{R_{q.h.}} - \varphi \frac{132 \cdot 10^{-5} P_{s.b.}}{T_{n.h.}} \quad (350)$$

Nam havo zichligi $\rho_{n.h.}$ bilan havodagi namlik miqdori d ning bog'lanishini topish uchun (341) va (347) ni birgalikda yechib, quyidagi ifoda hosil qilinadi:

$$\rho_{n.h.} = \frac{\rho_{s.b.}(1+d)}{d} \quad (351)$$

Nam havo uchun universal gaz doimiysi quyidagi ifodadan topiladi:

$$R_{n.h} = \frac{8314.4}{(\mu_{q.h} r_{q.h} - \mu_{s.b} r_{s.b})} \quad (352)$$

bunda $r_{q.h} = \frac{(P_{n.h} - P_{s.b.})}{P_{n.h.}}$ va $r_{s.b} = \frac{P_{s.b.}}{P_{n.h.}}$ — quruq va nam havo ulushlarining parsial bosimlarga bog'liqlik koeffitsientlari.

$\mu_{q.h}$ va $\mu_{s.b}$ qiymatlari maxsus jadvallardan olinadi.

Unda, (352) ni qayta yozish mumkin, ya'ni

$$R_{n.h} = \frac{8314.4}{[28,95 - (10,93 P_{s.b.} / P_{n.h})]}$$

yoki

$$R_{n.h} = \frac{8314.4}{[28,95 - (10,93 P_{t.b.} \varphi / P_{n.h})]} \quad (353)$$

Absolut quruq havoning nisbiy namligi $\varphi = 0$ bo'lganligi uchun (353) quyidagiga teng bo'ladi:

$$R_{n.h} = \frac{8314.4}{28,95} \cong 287 \text{ J/kg.K.} \quad (354)$$

Demak, nam havo uchun universal gaz doimiysi har doim absolut quruq havonikidan katta ($R_{n.h} > R_{q.h}$) bo'lar ekan.

Mendeleyev-Klapeyron tenglamasidan foydalanib, nam havo uchun *universal gaz doimiysini* aniqlash mumkin:

$$R_{n.h} = \frac{P_{n.h.}}{\rho_{n.h} P_{n.h.}} \quad (355)$$

bunda $P_{n.h.}$, $\rho_{n.h}$ va $T_{n.h}$ — nam havoning bosimi, zichligi va temperaturasi.

Nam havoning o'rtacha molekular massasi $\left(\mu_{n.h} = \frac{8314.4}{R_a} \right)$ formuladan aniqlanishini hisobga olib, uning molar massasi (353) asosida quyidagi ko'rinishga keltiriladi, ya'ni

$$\mu_{n.h} = 28,95 - 10,93 \varphi \frac{T_{t.b.}}{P_{n.h.}} \quad (356)$$

Demak, (356)dan ko'rinadiki, *bir xil bosim va temperaturadagi nam havo quruq havodan yengil* bo'lar ekan.

10.2.4. Nam havoning issiqlik sig'imi va entalpiyasi

O'zgarmas bosim ostidagi nam havoning issiqlik sig'imi c_p deyilganida, odatda, 1 kg quruq havo va d kg bug'ning issiqlik sig'implari yiqindisi tushuniladi, ya'ni

$$c_p = c_{p,q,h} + d \cdot c_{p,s,b}, \quad (357)$$

bunda $c_{p,q,h}$ va $c_{p,s,b}$ — o'zgarmas bosim ostidagi quruq havo va suv bug'ining solishtirma issiqlik sig'implari.

Suv bug'i bilan bog'liq bo'lgan muhandislik hisoblashlarida $c_{p,q,h}$ va $c_{p,s,b}$ qiymatlarini taqriban $c_{p,q,h} \approx 1 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K} = \text{const}$, $c_{p,s,b} \approx 1,96 \cdot 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K} = \text{const}$ deb qabul qilinsa, unda $P = \text{const}$ holatidagi nam havo uchun $c_{p,q,h}$ quyidagiga teng bo'ladi, ya'ni

$$c_{p,q,h} = (1 + 1,96d) \cdot 10^3. \quad (358)$$

Nam havo entalpiyasi deyilganida, 1 kg absolut quruq havo va d kg suv bug'i aralashmasining entalpiyasi tushuniladi, ya'ni

$$H_{nh} = i_{qh} + i_{sh}d \quad (359)$$

1 kg quruq havo uchun entalpiya kJ/kg.K.da quyidagi ifodadan hisoblanadi:

$$i_{qh} = c_{p,q,h} t \approx 1 \cdot t \approx (T - 273). \quad (360)$$

Qizdirilgan nam havo tarkibidagi suv bug'ining entalpiyasini kJ/kg.K.da ushbu tenglamadan hisoblanadi:

$$\begin{aligned} i_{sh} &= c_{p,s} t_{sh} + r + c_{p,s,b} (t - t_{sh}) = \\ &= c_{p,s} (T_{nh} - 273) + r + c_{p,s,b} (T_{nh} - T_{sh}), \end{aligned}$$

bunda $c_{p,s}$ — o'zgarmas bosim ostidagi suv bug'ining solishtirma issiqlik sig'imi; T_{sh} — parsial bosim ostidagi aralashma tarkibidagi suv bug'ining to'yinish temperaturasi; r — aralashmadagi parsial bosimli suv bug'i bug'lanishining yashirin issiqligi; T_{nh} — nam havoning absolut temperaturasi.

Bug'lanishning yashirin issiqligini to'yingan bug'ning 273—373 K temperaturalari oralig'i uchun kJ/kg.K.da quyidagi formuladan aniqlanadi:

$$r = (2500 - 2,3t_{sh}) = 3128 - 2,3 T_{sh}.$$

Ma'lumki, o'zgarmas bosim ostidagi suv va suv bug'i uchun solishtirma issiqlik sig'irlarining taqribiy qiymatlari $c_{p,s} \approx 4,19 \text{ kJ/kg.K}$ va $c_{p,s,b} \approx 1,96 \text{ J/kg.K}$ ga teng bo'lganida, suv bug'i entalpiyasi kJ/kg.K da quyidagicha ifodalanadi:

$$i_{s,b} = (2500 + 1,96t) = 1965 + 1,96 T_{n,h}. \quad (361)$$

Endi, (360) va (361) ni (358) ga qo'yib nam havo entalpiyasini quyidagicha yozish mumkin:

$$H_{n,h} \approx t + (2500 + 1,96 t) d$$

yoki

$$H_{n,h} = T_{n,h} - 273 + d(1965 + 1,96 T_{n,h}). \quad (362)$$

Nisbiy namlik $P_{\text{max}} = P_{i,b}$ shartni qanoatlantirganda, namlik miqdori ifodalari asosida nam havodagi namlik miqdori quyidagicha ifodalanadi:

$$d = \varphi \frac{0,62 P_{T,b}}{(P_{q,h} - \varphi P_{T,b})}.$$

Unda, nam havo entalpiyasini quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$H_{n,h} = t + \frac{(1556 + 1,22t) \cdot \varphi \cdot P_{T,b}}{(P_{q,h} - \varphi P_{T,b})}$$

yoki

$$H_{n,h} = (T_{n,h} - 273) + \frac{(1223 + 1,22T) \varphi P_{T,b}}{(P_{q,h} - \varphi P_{T,b})}. \quad (363)$$

10.3. Ho'l termometr temperaturasi

Ishlab chiqarish korxonasida mahsulot sifatining doimiyligini ta'minlash asosiy masalalardan biri hisoblanadi. Bunga erishish uchun nam havo kerak bo'ladi, ya'ni havodagi namlik miqdorini ko'paytirish yoki kamaytirishga to'g'ri keladi. Buni amalga oshirishda nam havo oqimi suv sirtiga yo'naltiriladi. Nam havo oqimidagi suv bug'i temperaturasi idishdagi suvnikidan katta bo'lsa, havo suv sirtida kondensatsiyalanadi, aksincha holatda esa suv bug'lanadi. Shuning uchun suv sirtidagi havo doim suv bug'iga to'yingan bo'ladi. Suv temperaturasidagi nam havo tarkibidagi namlik miqdori suv bug'ining parsial bosimi orqali aniqlanadi.

Agar suv sirtida joylashgan havodagi namlik miqdori havo qatlamidagi namlikdan katta bo'lsa, namlik asosiy havo qatlamida diffuziyalanadi. Aksincha, suv sirti yaqinidagi havo qatlamidagi namlik miqdori uning ustida joylashgan havo tarkibidagi namlikdan kichik bo'lsa, unda suv sirtining yuqori qismidan pastkisiga o'tgan namlik suv sirti yaqinida kondensatsiyalanadi. Suv sirti yaqinidagi o'yingan havodagi namlik miqdori bilan undan uzoqda joylashgan havo o'rtasidagi bog'lanishga qarab havo massasining bug'lanishi yoki kondensatsiyalanishi kuzatiladi.

Havo oqimidagi namlik miqdori, suv sirtidagi havonikiga teng bo'lganda, havo oqimining temperaturasi suv temperaturasidan katta bo'ladi. Bu jarayonning boshlanishida suvning bug'lanishi yoki namlikning kondensatsiyalanishi kuzatilmaydi. Keyinchalik issiq havo oqimi suv sirtiga urilishi natijasida, suv sirti yaqinidagi havo qatlamida, suvning bug'lanishi hisobiga namlik miqdori ortadi.

Yuqori temperaturali havo oqimidagi issiqlik miqdori suv sirtiga uzatilishi vaqtida havo oqimi bilan suv ustidagi havo temperaturalari farqi o'zgarmasa-da, namliklar farqi ortadi. Shu hisobiga jadal bug'lanish jarayoni sodir bo'ladi. Havodan suvga uzatilayotgan issiqlik miqdori suvning bug'lanishi uchun zarur bo'lgan issiqlik miqdoriga teng bo'lganidan keyin suv temperaturasi o'zgarmaydi. Suvning bu temperaturasini *ho'l termometr temperaturasi* deyiladi.

Demak, *to'yingan havo oqimi uchun ho'l termometr temperaturasi har doim havo temperaturasidan kichik bo'lar ekan*. Ho'l termometr rezervuari joylashgan kichik hajmchadan tashkil topgan chegaralangan hajmga suv bug'i tashqaridan issiqlik olmagan holda kirib boradi va ma'lum muddatdan so'ng undagi havo suv bug'iga to'yinadi. Bu jarayon *havoning adiabatik to'yinishi* deyiladi.

Jarayon davomida havodan suvga o'tgan issiqlik miqdori bug'langan suv bilan yana havoga o'tadi. Havoning to'yinish temperaturasi holatidagi ho'l termometrning barqarorlashgan temperaturasi *havoning adiabatik to'yinish temperaturasi* deyiladi.

Nam havo temperaturasi bilan ho'l termometr temperaturasi va quruq havodagi namlik miqdori orasidagi bog'lanishlarni keltirib chiqarish mumkin. Unda, $d(d)$ kg suvni havo temperaturasigacha isitish va namlikning bug'lanishi uchun sarf bo'ladigan issiqlik miqdorini quyidagi ifodadan aniqlash mumkin:

$$Q = [r_{h.t.} + c_{p.s.b.} (T_{n.h} - T_{h.t})] d(d), \quad (364)$$

bunda $r_{h,1}$ — ho'l termometr temperaturasi bug' hosil bo'lish issiqligi; $c_{p,q,h}$ — suv bug'ining issiqlik sig'imi.

Ma'lumki, atrof-muhitdan 1 kg havo olgan issiqlik miqdori o'rganilayotgan havo temperaturasi ΔT ga o'zgartiradi, uning kattaligi quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$Q = c_p \Delta T = - (c_{p,q,h} + c_{p,s,b} d) \Delta T.$$

Havoning adiabatik kengayish jarayoni uchun quyidagini yozish mumkin:

$$[r_{h,1} + c_{p,q,h} (T_{n,h} - T_{h,1})] d(d) = - (c_{p,q,h} - c_{p,s,b} d) \Delta T \quad (365)$$

Bu ifodani havo temperaturasi T dan $T_{h,1}$ gacha va namlik miqdori d dan $d_{h,1}$ gacha bo'lgan oraliklarda o'zgarishi e'tiborga olinsa, ho'l termometr temperaturasi quyidagicha ifodalash mumkin:

$$T_{h,1} = T_{n,h} - \frac{r_{h,T} (d_{h,T} - d(d))}{(c_{p,q,h} - c_{p,s,b} d)}, \quad (366)$$

bunda $d_{h,1}$ — ho'l termometr temperaturasi $T_{h,1}$ da to'yingan havo tarkibidagi namlik miqdori.

Demak, havo to'liq to'yinganida ($d = d_{h,1}$), uning temperaturasi $T_{n,h}$ mos ravishda, ho'l termometr temperaturasi $T_{h,1}$ ga teng ($T_{n,h} = T_{h,1}$) bo'lganida ho'l termometr temperaturasi havo temperaturasi va havodagi namlik miqdori funksiyasi bo'lishi mumkin ekan.

10.4. Nam havoning $i d$ diagrammasi

Muhandislik amaliyotida ba'zan nam havo parametrlarini tezda aniqlash zarur bo'lib qoladi. Bunda yuqorida keltirilgan formulalardan foydalaniladi. Lekin hisoblash ishi ham anchagina vaqt talab etadi.

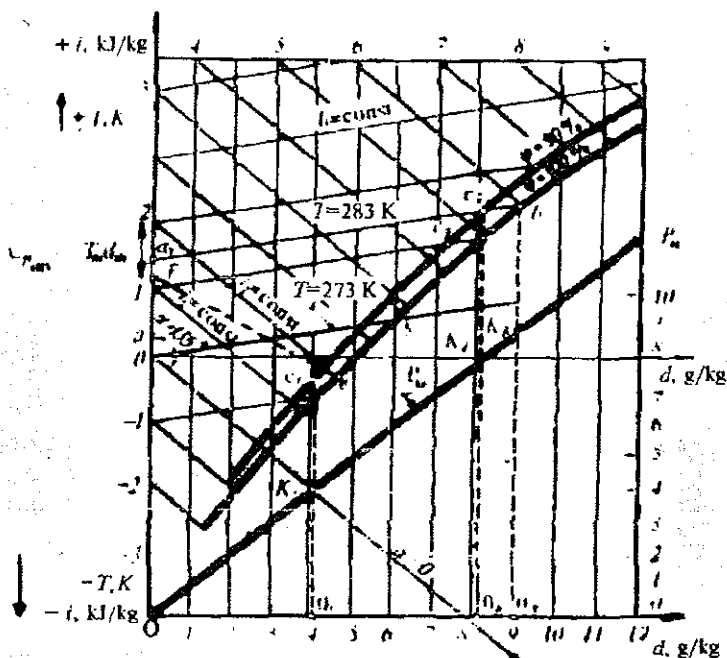
Ishni osonlashtirish va tezlatish maqsadida o'rganilayotgan jarayon parametrlariga mos keluvchi termodinamik parametrlar qiymatlari asosida nam havo entalpiyasining namlik miqdoriga bog'liqlik diagrammasi quriladi. Bu diagramma *nam havoning $i d$ diagrammasi* deyiladi. Bu diagrammadan foydalanib nam havo parametrlari oson va tez aniqlanadi.

$i d$ diagrammasidan havoni kondensirlash, xonalarni shamollatish, quritish va isitish sistemalarining hisob-kitoblarida keng foydalaniladi.

Nam havo parametrlarini $i-d$ diagrammadan aniqlashni birinchi marta 1918-y. L. K. Ramzin tomonidan taklif qilingan. Bu diagramma muayyan bosim ostidagi nam havo parametrlari orasidagi bog'lanishning grafik shaklidagi ifodasidir.

$i-d$ diagrammani qurish uchun absissa o'qida 1 kg quruq havo tarkibidagi namlik, ordinata o'qida esa nam havo entalpiyasi qiymatlari joylashtiriladi (10.1-rasm). Buning uchun o'zgarmas namlik miqdoriga mos keluvchi oraliqlari bir xil bo'lgan tik chiziqlar absissa o'qiga parallel qilib o'tkaziladi. Entalpiyaning musbat va manfiy ishorali qiymatlari ordinata o'qining boshi (nul nuqta)ga nisbatan olinadi va bir xil oraliqlarda kJ/kg joylashtiriladi. Bunda $t=0$ va $d=0$; $T=273\text{ K}$ bo'ladi. Muayyan temperaturaga mos keluvchi qiya chiziqlardagi temperatura o'zgarmas bo'ladi.

Namlik miqdori ($d=\text{const}$) o'zgarmas bo'lgan vertikal koordinata o'qi bilan $\alpha=135^\circ$ burchak hosil qiluvchi $i=\text{const}$ chiziqlari o'tkaziladi. $t=\text{const}$, $d=\text{const}$, $T=\text{const}$ chiziqlari o'tkazilgandan so'ng, $\varphi=\text{const}$ nuqtalarining o'rinlari topiladi va ularni o'zaro birlashtirib $\varphi=90\%$, $\varphi=100\%$ egri chiziqlari chiziladi.



10.1-rasm. Nam havoning $i-d$ diagrammasini qurish sxemasi.

$i d$ diagrammadagi izoterma chizig'i ordinata o'qi bilan taqriban $\alpha=60^\circ$ burchak ostidagi to'g'ri chiziq bo'ladi.

Bu (362) tenglama asosida aniqlanadi.

Demak, $i=0$ va $d=0$ hamda $T=273\text{K}$ bo'lgan holatda izoterma chizig'i koordinata boshidan o'tadi. (397) formuladan ko'rinadiki, $\varphi=100\%$ bo'lganida d_{1h} qiymati muayyan bosim ostidagi 1kg quruq havoning to'yingan holati uchun aniqlanadi. Entalpiya kattaligi havo temperaturasi $T=273\text{ K}$ va to'yingan havo tarkibidagi namlik miqdori d_{1h} (b nuqta) qiymati (363) dan topiladi. Ob to'g'ri chizig'i $T=273\text{ K}$ temperaturadagi izotermani beradi. $T\neq 273\text{ K}$ bo'lmagan holatlardagi izotermalar ham yuqoridagi usuldagidek aniqlanadi. Masalan, $T=273\text{ K}$ mos keluvchi a va b nuqtalaridan o'tuvchi izoterma chizig'ini hosil qilish uchun avval entalpiya va namlik miqdori (342) va (363) tenglamalar bilan hisoblanadi. Nisbiy namligi o'zaro teng bo'lgan b , b_1 va $\varphi=100\%$ nuqtalar birlashtirilsa, $\varphi=\text{const}$ egri chizig'i hosil bo'ladi. Bu egri chiziq ($\varphi=100\%$) da yotgan istalgan nuqta to'yingan havo holatini tavsiflaydi. Mos ravishda undan yuqorida yoki pastda yotgan nuqtalar esa to'yinmagan yoki to'yingan havoni tavsiflaydi. Bunday holatlarda suv bug'i, qizdirilgan va o'ta qizdirilgan (tuman) holatida bo'ladi.

Nisbiy namlik 100% dan kichik bo'lgan $\varphi=\text{const}$ egri chiziqni qurish uchun, avvalo, yuqorida keltirilgan tenglamalardan foydalanib har xil temperaturalarga mos keluvchi havo tarkibidagi namlik miqdori aniqlanadi. So'ngra d va T nuqtalarning qiymatlari va koordinatalari topiladi, keyin ularni birlashtirib $\varphi=\text{const}$ egri chizig'i hosil qilinadi (10.2-rasm). Masalan, biror c_1 , c_2 va c_3 nuqtalaridan o'tuvchi nisbiy namligi 90% mos keluvchi egri chiziq yuqorida bayon qilingan usulda qurilgan. $i d$ diagrammaning quyi qismidan (398) tenglamadan topilgan havodagi suv bug'ini parsial bosimi qiymatlariga mos keluvchi chiziqlar o'tkaziladi. Bu nuqtalar o'rnini aniqlash uchun $\varphi=100\%$ egri chizig'ini izoterma kesib o'tgan nuqtadan abssissa o'qiga tik chiziq (uzlukli) tushiriladi. $\varphi\neq 100\%$ egri chizig'i ustida kesishgan (ingichka) chiziqlar o'rinlari aniqlanishi shart bo'lgan nuqtalar hisoblanadi. Vertikal o'tkazilgan chiziqlar bo'ylab ma'lum masshtabda muayyan temperatura-dagi suv bug'ining to'yinish holatidagi parsial bosimiga mos keluvchi k_1 , k_2 , k_3 va sh.k. nuqtalar belgilanadi. (Suv bug'ining to'yinish holatidagi parsial bosimi qiymatlari suv bug'ining jadvalidan olinadi). Keyin esa shu nuqtalarni birlashtirib

$\alpha_1 k_1$, $\alpha_2 k_2$, $\alpha_3 k_3$ va sh.k. kesmalardan tashkil topgan $R_{sb} = f(d)$ bog'lanish grafigi hosil qilinadi. $i d$ diagramma ustida ho'l termometr izotermasi ($T = \text{const}$) quriladi. Uni qurish uchun $T_{h.t.}$, i va d kattaliklari orasidagi o'zaro analitik bog'lanish aniq bo'lishi kerak. Bu kattaliklarning bog'lanishini topish uchun (352) va (365) ifodalar i ga nisbatan birgalikda yechiladi.

$i d$ diagrammada $T = \text{const}$ to'g'ri chizig'i quyidagicha mulo-hazalardan kelib chiqqan holda chiziladi.

Faraz qilaylik, havoning adiabatik namlanganiga qadar undagi namlik miqdori nolga teng ($d=0$) va havoning entalpiya orttirmasi bug'langan suv entalpiyasi hisobiga paydo bo'lgan bo'lsin, ya'ni

$$i_2 - i_1 = c_{p.s.} T_{h.t.} d_{h.t.} \quad (367)$$

hamda $i d$ diagrammada to'yingan havo holatiga e nuqta mos kelsin.

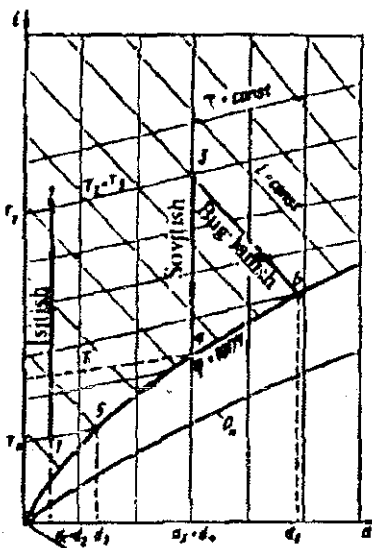
Boshlang'ich holatni ifodalovchi shunday nuqta topilsinki, unda $d=0$, $i_2 = i_1$ bo'lsin. (366) tenglamaga muvofiq entalpiya quyda-gi-ga teng bo'ladi, ya'ni

$$i_1 = i_2 - c_{p.s.} T_{h.t.} d_{h.t.} \quad (368)$$

Shunda e nuqtadan $i_2 = \text{const}$ chizig'ini ordinata o'qi bilan kesishguncha davom ettiriladi (10.1-rasm). So'ngra kesishgan nuqtadan pastda $f = c_{p.s.} T_{h.t.} d_{h.t.}$ ga mos keluvchi entalpiya qiymatidan, ya'ni i o'qidan f nuq-ta topiladi va e bilan f nuqta-larini birlashtiruvchi (uzlukli) chiziq chiziladi. Bu chiziqni ho'l termometrning izotermasi deyiladi.

$i d$ diagrammada $T = \text{const}$ chizig'i $i = \text{const}$ ning bir necha holatlarida bo'lishi mumkin.

Yuqorida qayd etilgan uz-lukli chiziq izoterma ($T = \text{const}$) ning I — holatiga mos tushadi. Diagrammadan ko'rinadiki, $T = 272,56 \text{ K}$



10.2-rasm. Nam havodagi jarayonlarning $i d$ diagrammadagi tasviri.

temperatura va $P=99325$ Pa bosim bug'ning to'yinish temperaturasi mos keladi. Aynan shu natijalar asosida $i d$ diagramma qurilgan. Undagi $\varphi = \text{const}$ chizig'i tikroq ko'tarilgan bo'lib, $\varphi = 5\%$ va $\varphi = 10\%$ ga mos keladi.

Odatda, bosimning boshqa qiymatlari olinganida, diagrammadan foydalanish imkoniyatini yaratish uchun, muayyan o'rta bosimga mos qilib $i d$ diagramma quriladi. Undan foydalanish uchun, albatta nam havoning asosiy parametrlari bilan bosim orasidagi bog'lanishlar aniqlanadi.

Nam havoni ma'lum shartlar bilan ideal gaz deb qabul qilinsa, unda entalpiya bosimga bog'liq bo'lmaydi va shu asosida muayyan bosim uchun to'yinmagan sohada joylashgan izotermalardan foydalanish mumkin. Amalda to'yinish egri chizig'i $\varphi = 100\%$ va boshqa ($\varphi < 100\%$) nisbiy namlik chiziqlari har xil bosimlarda turlicha bo'ladi. (352) formulaga muvofiq $d = f(p)$ bog'lanishidan kelib chiqadiki, turli xil bosimlardagi 1 kg havo tarkibidagi bug' miqdori ham har xil bo'lishi mumkin.

Muayyan bosim uchun qurilgan $i d$ diagramma bo'yicha boshqa bosimlardagi namlik orqali havo parametrlarini hisoblash mumkin. Unda, (352) ni qayta yozish mumkin:

$$d = \frac{0,622}{\frac{P}{\varphi} \frac{1}{P_H} - 1} \quad (369)$$

(369)dan ko'rinadiki, $i d$ diagrammadagi istalgan $\varphi = \text{const}$ chizig'i turli xil bosimdagi havo uchun qo'llanilishi mumkin. Bunda nisbiy namlik qiymati turlicha bo'ladi va uni p/φ nisbatdan aniqlanadi.

Faraz qilaylik, $P = 101325$ Pa bosimda $\varphi = 1$ holat uchun $i d$ diagramma qurilgan bo'lsin. Unda, $P = 50662,5$ Pa bosim uchun to'yinish chizig'i $\varphi = 0,5$ to'g'ri kelsa, $P = 81060$ Pa uchun $\varphi = 0,8$ va sh.k. mos keladi, chunki (369) ifodaga muvofiq nisbat $(P/\varphi) = \text{const}$ bo'ladi, ya'ni

$$\frac{P}{\varphi} = \frac{101325}{1} = \frac{50662,5}{0,5} = \frac{81060}{0,8} = \text{const.}$$

Issiqlik texnikasiga oid hisob-kitoblarda nam havoning $i d$ diagrammasi keng qo'llaniladi. Masalan, mahsulotlarni yoki boshqa turdagi jismlarni quritish jarayonida avval havo kalori-ferda qizdiriladi. Havo qizdirilganida undagi namlik miqdori o'zgarmas ($d_1 = \text{const}$) saqlanadi. Shuning uchun $i d$ diagrammada

(10.2-rasm) qizdirilish jarayoni vertikal chiziq shaklida (1—2 nuqtalar oralig'i) tasvirlanadi. Havoni sovish jarayonida $d_3 = \text{const}$ chizig'i ham vertikal (3—4 nuqtalar oralig'i) bo'ladi. Diagrammadan ko'rinadiki, 3 nuqtada to'yinmagan havo sovishi natijasida 4 nuqtada to'yingan ($\varphi = 100\%$) holatiga o'tadi. Bunda suv bug'i esa quruq to'yingan holatida bo'ladi. Havoni sovitish jarayoni davom ettirilsa, unda havodagi namlik kondensatsiyalanishi hisobiga nam havodagi namlik miqdori kamayadi. Kondensatsiyalanish jarayonini (4—5 nuqtalar oralig'i) shartli ravishda $\varphi = 100\%$ deb olinadi.

Kondensatsiyalanish jarayonida nam havo tarkibidagi namlik miqdori kamayishi hisobiga kondensatsiyalangan bug' miqdori Δd quyidagi ifodadan aniqlanadi:

$$\Delta d = d_3 - d_5.$$

Agar suv entalpiyasi $i_c = 0$ bo'lsa, u holda suvning bug'lanishida entalpiya o'zgarmaydi, ya'ni jarayon nam havo entalpiyasining o'zgarmas qiymatida (3—6 nuqtalar oralig'i) kechadi. Amalda, suv entalpiyasi nolga teng bo'lganida, suvni bug'latishga sarf bo'lgan havodagi issiqlik miqdori yana bug'langan suv bug'i bilan havoga qaytadi. Bug'lanish davrida nam havo entalpiyasi o'zgarmas kattalik bo'ladi. Shuning uchun keltirilgan $i-d$ diagrammada shudring nuqtasini topish masalasi qo'yilgan. Ma'lumki, *nisbiy namligi 100% bo'lgan nuqtadagi havo temperaturasi shudring nuqtasi deyiladi*. Shuning uchun $d = \text{const}$ holatidagi to'yinmagan nam havo temperaturasining pasayishi natijasida φ ning qiymati ortadi. $\varphi = 100\%$ bo'lganida esa to'yingan nam havoga ega bo'lamiz (10.2-rasm. 4 nuqta).

10.5. Nam havo oqimlarining aralashuvi

Nam havo oqimlarining aralashuviuning $i-d$ diagrammasidan foydalanib tahlil qilinadi. Buning uchun aralashtirgich kameraga aralashuvchi havo oqimlari yo'naltiriladi (10.3-rasm).

Faraz qilaylik, aralashtirgich kamerasiga, mos ravishda, M_1 va M_2 massali nam havo oqimlari kiritilgan. Aralashtirgich kamerasiga oqib kirayotgan oqimlardagi namlik miqdorlari d_1 va d_2 , temperaturalar T_1 va T_2 , entalpiyalari i_1 va i_2 hamda shu oqimlar aralashtirgich ichida $P = \text{const}$ ostida tashqi muhit bilan issiqlik almashmasdan aralashsin. Natijada aralashtirgich kamerasidan parametrlari d_a , T_a , i_a va M_a (kg/soat) massali aralashma oqimi

chiqadi. Bunday aralashish hodisalaridagi modda muvozanati umumiy holda quyidagicha ifodalanadi:

$$M_a = M_1 + M_2 + \dots + M_i \quad (370)$$

(370) ifodani ikki komponentli sistema, ya'ni havo va suv uchun kameradagi modda muvozanati sharti quyidagicha ifodalanadi:

$$\text{a) havo uchun} \quad M_a = M_1 + M_2; \quad (371)$$

$$\text{b) suv uchun} \quad M_a d_a = M_1 d_1 + M_2 d_2. \quad (372)$$

$$\text{Bundan} \quad d_a = \frac{(M_1 d_1 + M_2 d_2)}{M_a} = \frac{(M_1 d_1 + M_2 d_2)}{M_1 + M_2}. \quad (373)$$

Oqimlarning kameradagi aralashuvi tufayli ajralayotgan energiya tenglamasi quyidagi shaklda bo'ladi, ya'ni

$$M_a i_a = M_1 i_1 + M_2 i_2.$$

Unda

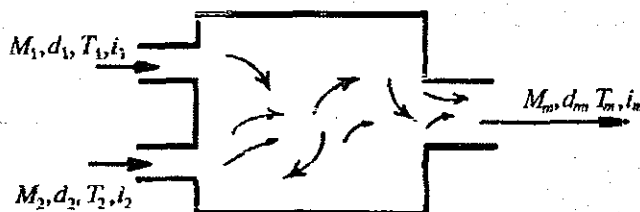
$$i_a = \frac{(M_1 i_1 + M_2 i_2)}{M_a} = \frac{(M_1 i_1 + M_2 i_2)}{M_1 + M_2}. \quad (374)$$

Aralashtirgich kamerasiga oqib kirayotgan nam (M_2) va quruq havo (M_1) massalari nisbatlari $m = \frac{M_2}{M_1}$ bo'lsa, u holda (373) ni quyidagi shaklga keltirish mumkin:

$$d_a = \frac{d_1 + m d_2}{1 + m}. \quad (375)$$

Unda, oqimlar nisbati m ni namlik miqdorlari orqali quyidagicha ifodalanadi:

$$m = \frac{(d_a + d_1)}{(d_2 - d_a)}. \quad (376)$$



10.3-rasm. Nam havo oqimlarining aralashishi.

Demak, aralashma entalpiyasini quyidagicha yozib,

$$i_a = \frac{(i_1 + m i_2)}{(1 + m)} \quad (377)$$

Massalar nisbatini entalpiya orqali ifodalaymiz, ya'ni

$$m = \frac{(i_g - i_1)}{i_2 - i_a} \quad (378)$$

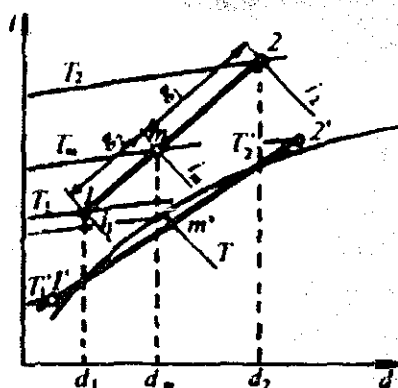
Demak, (376) va (378) ifodalarning chap tomonlarining o'zaro tengligi asosida aralashuvchi oqimlardagi namlik miqdorlarining algebraik yig'indisi aralashma namligi miqdoriga tengligidan ulardagi entalpiyalar ham aralashma entalpiyasiga, ya'ni oqimlardagi energiyalar nisbatlariga teng bo'ladi deyish mumkin, ya'ni

$$\frac{(d_a - d_1)}{(d_2 - d_1)} = \frac{(i_a - i_1)}{(i_2 - i_a)}$$

yoki

$$\frac{(i_2 - i_a)}{(d_2 - d_a)} = \frac{(i_a - i_1)}{(d_a - d_1)} \quad (379)$$

Aralashish jarayonining $i-d$ diagrammasidagi m nuqta nam havo oqimi bilan quruq havo oqimi aralashib bo'lgandan keyingi holatni tavsiflaydi. M_1 massali quruq va M_2 massali nam havo oqimlarining boshlang'ich nuqtalarini 1 va 2 deb belgilab, ularni o'zaro to'g'ri chiziq bilan birlashtirilganida shu chiziq o'rtasida m nuqta yotishi kerak (10.4-rasm). To'g'ri chiziqda yotgan m nuqta o'rmini aniqlash uchun aralashuvchi oqimlar massalarining ulushlari nisbatidan foydalanish mumkin, ya'ni



10.4-rasm. Aralashgan nam havo holatlari aniqlanadigan $i-d$ diagramma.

$$g_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2}$$

va

$$g_2 = \frac{M_2}{M_1 + M_2}. \quad (380)$$

Oqim massalari ulushlarining yig'indisi 100% bo'lishi shartligi asosida $g_1 + g_2 = 1$ teng bo'ladi. Unda, (375) asosida havo oqimlari massalari ulushlarini aralashma oqimlaridagi namlik miqdorlari orqali quyidagicha yoziladi:

$$\begin{aligned} g_1 &= \frac{(d_2 - d_a)}{(d_2 - d_1)}; \\ g_2 &= \frac{(d_a - d_1)}{(d_2 - d_1)}. \end{aligned} \quad (381)$$

Endi (381) ni entalpiya orqali ham ifodalash mumkin.

(381) ifodadan ko'rinadiki, nam va quruq havo oqimlari aralashmasida sodir bo'ladigan jarayonning i d diagrammasidagi m nuqta oqimlar nisbatlari, ya'ni g_1 / g_2 orqali aniqlanadi. Yuqoridagidek, ikkita to'yinmagan oqimlar olinganida esa ($1'$ va $2'$ nuqtalar) bu oqimlar aralashganidan so'ng tuman (m' nuqta) hosil bo'ladi.

10.6. Havo namligini psixrometr yordamida aniqlash

Muhandislik hisoblashlarida, ya'ni muayyan sharoitda ishlaydigan ishlab chiqarish binolarini shamollatish yoki isitish uchun havoning asosiy parametrlaridan biri hisoblangan nisbiy namlikni aniqlash shart bo'ladi.

Nisbiy namlik kimyoviy usul, shudring nuqtasi, soch tolali gigrometr va psixrometrdan foydalanib aniqlanadi. Kimyoviy usul, shudring nuqtasi va soch tolali gigrometrdan foydalanib nisbiy namlikni aniqlaydigan asboblار **gigrometr** deyiladi. Nisbiy namlikni tez aniqlashda eng soddа asbob psixrometrdan foydalaniladi. Psixrometr asbobi ikkita termometrdan iborat bo'lib, ular maxsus taxtachaga vertikal o'rnatiladi va ularning birini rezervuari (simob yig'iladigan hajmchasi) suvga botirilgan pilik yordamida uzluksiz namlanib turiladi. Shu termometrni ho'l termometr, ikkinchisini quruq termometr deb yuritiladi. Quruq termometr atmosfera havosining temperaturasi ko'rsatadi. Rezervuari uzluksiz namlanib turiladigan termometr temperaturasi ustidagi nam pilikdagi suvning uzluksiz bug'lanishi natijasida quruq

termometrnikiga nisbatan har doim past ko'rsatadi. Natijada ikkala termometrlar ko'rsatganlari o'rtasida farq paydo bo'ladi. Bu temperaturalar farqi *psixrometrik farq* deyiladi.

Ho'l termometrning ko'rsatgan temperaturasi amalda haqiqiy bo'lmaydi. Chunki ho'l termometr tashqi muhitdan (atmosfera havosi, xonadagi buyumlar va sh.k.) issiqlik uzatilishi hisobiga uning ko'rsatgani haqiqiydan farq qiladi, ya'ni $T_{ht} > T'_{ht}$.

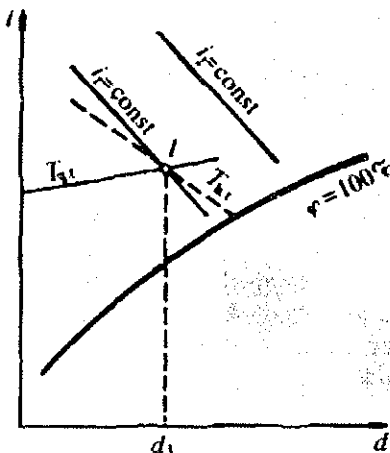
Bu kamchilikni tuzatish, ya'ni $T_{ht} = T'_{ht}$ bo'lishi uchun termometrlar tashqi ta'sirdan g'ilof bilan himoyalangan rezervuari mexanik yoki elektr yuritma orqali havo bilan shamollatiladi.

Shunday usullar qo'llanilganida $\Delta T = T_{ht} - T'_{ht}$ farqi kamayadi termometrlar ko'rsatganlari haqiqiyga yaqinroq bo'ladi.

Psixrometr ko'rsatganlaridan foydalanib, *i d* diagrammadan nam havoning nisbiy namligini va undagi namlik miqdorini aniqlash mumkin. Buning uchun albatta *i d* diagrammada ho'l T_{ht} va quruq T_{qt} termometrlar izotermalari o'zaro kesishuvchi 1 nuqta o'rni aniqlanadi (10.5-rasm).

i d diagrammadagi 1 nuqta temperaturasi o'lchanadigan hajmdagi havo parametrlariga mos keladi.

Zamonaviy ishlab chiqarish hajmlaridagi havo parametrlari avtomatik o'lchanadi va rostanadi. Zarur bo'lganida havoning nisbiy namligi va uning tarkibidagi namlik miqdori psixrometrik jadvallardan topiladi.



10.5-rasm. Psixrometr ashoi bilan havo holati aniqlanadigan *i d* diagramma.

10.7. Havoni tozalash, isitish, sovitish, suyultirish usullari va asbob-uskunolari

Texnologik, davolash, jamoat, ma'muriy, ishlab chiqarish, turar joy binolariga majburiy haydaladigan havo va binolardan atmosferaga chiqariladigan havo oqimi avval turli xil uchuvchi qattiq zarralar va zararli gazlardan maxsus filtrlar yordamida tozalanadi.

Texnik vositalar bilan gazlar oqimidagi zararli gazlar, chang zarralarini tutib qolish usuli gazlarni tozalash deyiladi.

Gazlar aralashmasini tozalashda shamollatgich va konditsirlash asbob-uskunolari, ko'pchilik holatda, birgalikda ishlatiladi. Suyuq kislorod, azot va sh.k.gazlarni olishdan avval, albatta atmosfera havosi maxsus filtrlardan o'tkaziladi, ya'ni tozalanadi. Binoga haydalayotgan atmosfera havosini va tashqariga chiqarilayotgan tutun gazlarini tozalashdan asosiy maqsad — inson salomatligini himoyalash yo'li bilan ish unumdorligini ko'tarish, ishlab chiqarish mahsuloti sifatligini ta'minlash, texnologik jarayonlardagi asbob-uskunalarining uzoq muddatlargacha buzilmasdan ishlashini yo'lga qo'yish, o'ta nodir asbobsozlikda chang zarralari ta'sirini kamaytirish hamda og'ir sanoat va energetik inshootlari tutun gazlaridagi zararli moddalarni tutib qolish yo'li bilan atmosferani ifloslantirmaslik, ya'ni ekologik muvozanatni ta'minlashdan iborat.

Albatta, yuqoridagilardan tashqari nodir san'at obidalarini himoyalash bilan bir qatorda ishlab chiqarishdagi havo yo'llarining zararli uchuvchi komponentlarga to'lib ifloslanmasligi, kompressorlar, havo puflagichlarning uzoq muddatlargacha ishlashi yo'lga qo'yiladi. Havoni tozalashda havo filtrlari, chang va gaz tutkichlar, chang cho'ktirgich kameralar, siklonlar, suv purkagichli kameralar va sh.k. qo'llaniladi. Havoni sovitishda konditsirlash (lot. conditio — sharoit) usulidan ko'proq foydalaniladi. Yopiq binolar, transport vositalari, kameralar va sh.k. ichiga konditsirlangan havoni haydash orqali havoning temperaturasi, nisbiy namligi, tozaligi, tarkibi, harakat tezligining o'zgarishligi ta'minlanadi. Shu joylarda faoliyat ko'rsatayotgan insonlar salomatligi va kayfiyatini yaxshilash, himoyalash, madaniyat va san'at durdonalarini yaxshi saqlanishiga erishiladi. Shu bilan asbobsozlikdagi nodir va nozik texnologik jarayon davomiyligini yo'lga qo'yish, o'ta aniq o'lchov asboblari yig'ishdagi temperaturani o'zgarish saqlash va h.k. uchun havo oqimi konditsirlanadi. Buni amalga oshirishda konditsirlash qurilmasi qo'llaniladi. Mazkur qurilma yuqorida qayd etilganlarnigina bajarib qolmasdan, sharoitga qarab, havo oqimini isitib va namlab (yoki quritib) shamollatgich yordamida xonalarga uzatib beradi.

Havoni konditsirlash usuli XIX asrda (AQSh, 1897-y.) to'qimachilik sanoatida qo'llanilgan bo'lsa, hozirgi kunda taqriban 60—70% ishlab chiqarish korxonalari va 40—50% xonadonlar bu usuldan foydalanadi. Havoni konditsirlash sanoatda materiallar

namligini bir tekis tutib turish, fizik-kimyoviy, biokimyoviy reaksiyalarning muayyan tezligini ta'minlash, namlik va temperaturani o'zgarmas saqlash maqsadida qo'llaniladi. Havoni konditsirlash texnologik qurilmalari, ko'pchilik holatlarda, gigroskopik materiallar tayyorlanadigan va ularga ishlov beriladigan binolarga o'rnatiladi. Chunki muayyan o'zgarmas temperatura va namlik saqlanmasa, ishlab chiqariladigan mahsulot, standart talablarga javob bermaydi. Bu ishlab chiqarishni inqiroz holatiga olib kelishi mumkin.

Imoratlar ichiga haydaladigan havo parametrlarini (changdan tozalash, quritish, isitish, sovitish va namlash) avtomatik rostlash, nazorat qilish va boshqarish vositalari majmui ***havoni konditsirlash sistemasi*** deyiladi. Bu amallarni bajaradigan qurilmani konditsioner apparati deyiladi. Konditsirlash apparati havo filtri, qizdirgich, sovitkich, shamollatgich (ventilyator)lar, tovush so'ndirgich, avtomatik rostlash va boshqarish asboblardan tuzilgan bo'ladi. Konditsionerlardan xonadonlar, teatrlar, ma'muriy binolar, san'at va sport saroylari, kompyuterlar o'rnatilgan katta binolar, vagonlar, kemalar va sh.k. joylarda foydalaniladi.

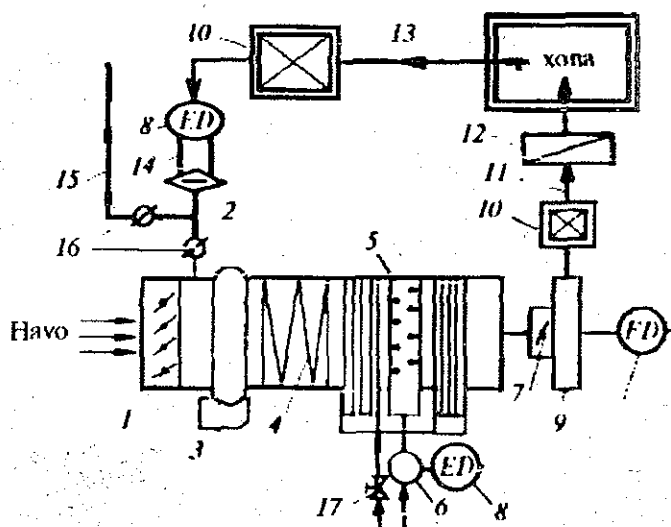
Havoni konditsirlash qurilmalari goho haydalayotgan havo oqimini sovitish yoki isitish bilan birga, uni odoratsiya deodoratsiyalaydi (havoga xushbuy hid taratadigan yoki badbo'y moddalarni ajratadi), ionlaydi, regeneratsiyalaydi hamda bakteriyalardan tozalaydi.

Konditsionerlarning avtonom va noavtonom turlari bo'ladi. Avtonomlari sovitish mashinalari va elektr qizdirgichlardan tashkil topadi. Noavtonomlari esa sovuq va issiq oqimlar tashqi manbalardan apparatga berk quvurlar orqali haydalib turiladi va regeneratsiya usuli bilan sovuq oqim issiq oqimga (yoki aksincha) aylantirib joylarga uzatiladi. Bunda konditsioner markaziy sovitish (isitish) stansiyasidan haydalgan havo oqimini uzatib beradi. Konditsionerlar o'rnatilishiga va konstruksiyasiga ko'ra vertikal, gorizontal, ejektorli turlarga bo'linadi. Ejektorli turlari ko'proq katta hajmli joylarni sovitishda ishlatiladi. Havoni konditsirlashning markaziy va mahalliy sistemalari mavjud.

Markaziy sistemasi bir necha binolarni, mahalliyysi bir yoki uning ma'lum qismini sovitish (isitish)da ishlatiladi. Markaziy havoni konditsirlash sistemasi tashqaridan issiq yoki sovuq beruvchilar (issiq suv, bug', elektr issiqlik ajratgich elementlari yoki sovuq suv, sovitish agentlari) bilan ta'minlanadi. Bu issiqlik (sovuq) eltuvchi moddalarni harakatlantirishda nasoslar, kompressorlar,

ventilatorlar elektr tarmog'idan energiya olib ish bajaradi. Ventilatorlar hosil qiladigan havo oqimi bosimiga ko'ra, past (to 10^1 Pa gacha), o'rta (to $3 \cdot 10^1$ Pa gacha) va yuqori (10^3 Pa dan katta) bo'ladi. Markaziy va mahalliy havoni konditsirlash sistemalari bir va ko'p kanalli bo'ladi. Bir kanalli, past bosimli havoni konditsirlash sistemasining oddiylashtirilgan sxemasi 10.6-rasmda keltirilgan.

Havoni konditsirlash qurilmalarining ayrimlarida regeneratsiya uslubi qo'llaniladi, ya'ni tashqariga chiqib ketayotgan issiq (yoki sovuq) oqim avval tozalanadi, dezodorizatsiyalanadi yoki regeneratsiyalanadi keyin, uning hammasi yoki bir qismi sistemaga qaytariladi.



10.6-rasm. Bir kanalli, past bosimli havoni konditsirlash qurilmasining sxemasi:

- 1 — havoni kiritish kanali; 2 — havoni qayta aylantirish kanali; 3 — havo filtri;
- 4 — havo isitkich; 5 — forsunkali kamera; 6 — markazdan qochma nasos;
- 7 — ventilator unumdorligini rostdash apparati; 8 — elektr dvigateli; 9 — markazdan qochma ventilator;
- 10 — shovqin so'ndirgich; 11 — sovuq havoni uzatish kanali; 12 — mahalliy havo isitkich;
- 13 — ishlatilib bo'lgan havoni haydash kanali; 14 — o'q bo'ylab haydovchi ventilator; 15 — ishlatilib bo'lgan havoni atmosferaga chiqarish shaktasi;
- 16 — havo ventilatori; 17 — sovutkich agentini uzatish quvurining ventili.

Eslatma: rasmda avtomatik boshqarish-rostdash, nazorat qilish asboblari ko'rsatilmagan.

Ikki kanalli havoni konditsirlash qurilma (stansiya)larining bir kanalidan sovuq, ikkinchisidan esa issiq havo oqimi aralashtirgichga haydaladi, unda aralashtirilib ma'muriy binolar, mehmonxonalar, kema xizmatchilarining ish joylari va kayutalarga uzatiladi. Vokzallar, aeroportlar, mehmonxonalar, ma'muriy binolar, avtobuslar, samolyotlarda asosan bir kanalli havoni konditsirlash qurilmalari ko'proq ishlatiladi.

Havoni konditsirlash orqali to'qimachilik, tamaki mahsulotlari ishlab chiqaradigan korxonalar, farmosevtika, aniq va nodir asbobsozlik sanoatida mehnat unumdorligi o'rttiriladi, mahsulot sifati yaxshilanadi, eng muhimi xizmatchilar salomatligi himo- yalanadi.

Havoni suyultirish uchun maxsus qurilmalar ishlatiladi. Suyultirish jarayoni Joul-Tomson effektiga muvofiq sodir bo'ladi. Gaz holatidagi modda bir vaqtda ham siqiladi, ham sovutiladi. Shunda gaz molekulalari orasidagi masofa bir me'yorda kamayib boradi, ya'ni gazning potensial va kinetik energiyalari summasi manfiy ishora tomonga yaqinlashadi.

Aslida modda gaz holatida bo'lganida uning potensial va kinetik energiyalari yig'indisi musbat ishorali bo'ladi. Gaz molekulalari tortishuvdagi potensial energiya esa manfiy ishorali bo'ladi. Kinetik energiyasi katta va musbat ishorali bo'lganligidan ularning umumiy energiyalari yig'indisi ham musbat bo'ladi. Bunda gaz molekulalari orasidagi tutunish kuchlarining kichikligi va itarish kuchlari ancha kattaligidan ular bir-biridan uzoqlashib, tarqalishga intiladi. Bu tarqatuvchi kuchni nolga yaqinlashtirish uchun gaz sovutiladi va siqiladi. Gaz siqilganida uning zichligi ortadi va molekulalar orasidagi o'rtacha masofa kamayadi.

Demak, gaz molekulasining potensial energiyasi kamayadi. Gazni siqish va sovutish davom ettirilsa, muayyan bir holatda sistemaning kinetik hamda potensial energiyalari yig'indisi manfiy ishorali bo'ladi va bu holatdagi modda molekulalari o'z-o'zidan tarqala olmaydi. Chunki bunday sistema zarrasining kinetik energiyasi uncha katta bo'lmagan musbat ishorali bo'lsa-da, butun sistema ishorasi manfiylikicha qoladi. Shunda molekulalarning bog'langan holati paydo bo'ladi. Molekulalar tarqalib keta olmaydigan holatda bo'lganligidan ular bir-birini tortib turadi oqibatda jipslashib suyuq holatga o'tadi.



1. Havo deb qanday moddaga aytiladi va uning tarkibi nimalardan iborat?
2. Yer atmosferasi qanday balandlikkacha yetadi? Uning tarkibiga qanday gazlar kiradi, ularning miqdorlari qancha?
3. Yerdagi atmosfera bosimi qancha va bosim o'zgarishiga qanday parametrlar ta'sir qiladi? Havo tarkibidagi gazlarning parsial bosimi deganda nima tushuniladi va u nimalarga bog'liq?
4. Yer atmosferasiga bir yilda Quyoshdan qancha miqdordagi energiya kelib tushadi? O'zbekistonning har bir metr kvadrat yeriga o'rtacha qancha energiya tushadi?
5. Yer atmosferasida o'rtacha qancha suv bor? Bir yilda qancha suv bug'lanadi va qancha yog'in-sochin bo'ladi? Havoning namligi yerning hamma joyida bir xil bo'lishi mumkinmi?
6. Namlik nima? Havoning namligi deb nimaga aytiladi.
7. Havo namlikka to'yingan, to'yinmagan va o'ta to'yingan deganda nima tushuniladi?
8. Havoni quritish va konditsirlash nima?
9. Nam havoning zichligi, universal gaz doimiysi, o'rtacha molekular massasi qanday ko'rsatkichlarga bog'liq bo'ladi?
10. Nam havoning $t-d$ diagrammasi nima uchun quriladi va undan qanday maqsadlarda foydalaniladi?
11. Havo namligini rostlash va havo oqimlarini aralashtirish jarayonlarida qanday turdagi asbob-uskunalaridan foydalaniladi?
12. Havoni tozalash, isitish, sovitish, suyultirish deb nimaga aytiladi?

XI BOB. ISSIQLIK ENERGIYASIDAN FOYDALANISHNING EKOLOGIK MUAMMOLARI

Inson hayoti tabiiy muhit bilan chambarchas bog'langan va shu hayotning bir bo'lagi bo'lgani uchun ham uni ko'z qorachig'iday asrab-avaylashi zarur. Chunki tabiat — hayot beshigi, odam yashaydigan tabiiy muhitdir. Insoniyat bu tabiiy muhitdan tashqarida yashay olmaydi. Mana shu olamning musoffoligini saqlash, uni kelajak avlodlarga ham sofligicha yetkazish muammosi yuzaga keldi. Bu muammoni hal etish masalasini o'rganuvchi fan «Ekologiya» deyiladi.

Ekologiya (yunon. *oikis* — joy, makon va *logos-fan*, ta'limot) tirik organizmlarning tevarak-atrofdagi muhitda yashash sharoiti va o'zlari yashab turgan muhit bilan murakkab munosabatlari hamda unda paydo bo'lgan qonunlar asosida hamma turdagi ta'sirlarni, ulardan himoyalalanish usullarini o'rganadigan biologik

fan. "Ekologiya" so'zini fanga kiritishni 1866-y. nemis zoologi Ernst Gekkel taklif etgan. Ekologiya XX asrda fundamental ilmiy fan bo'lib shakllandi.

Issqlik energiyasi XIX asrda ishlab chiqarishga jadal kirib kelishi davrida issiqlik texnikasi fan bo'lib shakllangan edi. Bugungi kunda inson faoliyat ko'rsatayotgan jabhalarning hammasida texnikaning ijobiy ta'sirlari bilan birgalikda uning salbiy tomonlari ham oddiy kuzatishlardan boshlab, ilmiy tadqiqotlar darajasigacha o'rganilmoqda. Issiqlik energiyasini ishlab chiqarish va undan to'liq foydalanib sanoat, transport, energetika va boshqa xalq xo'jaligi sohalarini tashkil qilishda atmosfera, biosfera, litosfera, gidrosferaga chiqarilayotgan yonish mahsuloti, turli-tuman sanoat chiqindilari ta'sirini zararsizlantirilmasa u insoniyat uchun katta talofatlarni keltirishi mumkinligi XX asr oxirlarida ekologik muammoga aylandi.

Bugungi kunda issiqlik texnikasi bilan bog'liq bo'lgan mashina, uskuna, qurilma, inshootlarda sodir bo'layotgan jarayonlar ekologik jihatdan toza, ya'ni atrof-muhitga salbiy ta'sirsiz bo'lishi talab etilmoqda. Lekin ekologik jihatidan mutlaqo toza mashina va texnologik jarayonlarni yaratish bu termodinamik qonunlarga zid bo'lgan intilishdir. Faqat salbiy ta'sirlari kam, iqtisodiy samaradorligi esa yuqoriroq issiqlik mashinalarini ishlatilishi va insonlarda ekologik ongning shakllanishi mazkur muammo yechimini yengillashtiradi. Shuning uchun issiqlik texnikasi bilan bog'liq bo'lgan ayrim ekologik masalalar bilan qisqacha tanishib chiqishni joiz, deb topdik.

11.1. Yonish mahsulotidagi zaharli moddalar

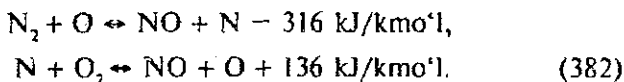
Issiqlik energiyasini ishlab chiqaradigan hamma turdagi issiqlik qurilma va inshootlari atmosferaga chiqaradigan yonish mahsuloti tarkibidagi zararli moddalar nafaqat yerdagi bioobyektga, balki, energetik qurilmalarga, atrof-muhitga va ularning ekologik ko'rsatkichlariga ham salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Ma'lumki, o'txona, metallurgiya, issiqlik kuch qurilmalari pechlari, ichki yonuv dvigatellari va sh.k. issiqlik energiyasini ishlab chiqaruvchi qurilmalar bo'lib, ular atmosferaga turli-tuman zararli tutun gazlarini chiqaradi. Yonish mahsuloti tarkibidagi zaharli gazlar, ularning birikmalari ham atmosferaga chiqadi.

Biosfera, litosfera, gidrosfera va atmosferadagi tirik organizmlarga, umuman tabiatga salbiy ta'sir ko'rsatadigan modda zaharli modda deyiladi. Zaharli moddalar qattiq, suyuq, gazsimon holatlarda bo'lishi mumkin.

Atmosferaga chiqariladigan asosiy zaharli moddalarga azot oksidlari (NO_x), uglerod oksidi (CO), uglerod birikmalari (CH), tarkibida qo'rg'oshin va oltingugurt bo'lgan tutun gazlari, yer sirtidan ko'tariladigan radioaktiv chang hamda simob bug'i kiradi. Bu zaharli moddalarning ayrimlari haqida to'xtalib o'tamiz.

Azot va uning oksidi. Atmosfera havosida azot miqdori 76% ni tashkil qiladi va u yonish jarayonida atmosfera havosidagi kislorod bilan birgalikda qatnashadi va jarayon davomida turli xil zararli birikmalar paydo bo'lishiga asosiy sababchilardan biri bo'ladi. O't-xonadagi temperatura ortishi bilan zaharli azot birikmalarining miqdori ortib boradi. Masalan, temperatura 1500 K ortgandan keyin azot kislorod bilan quydagicha reaksiyaga kirishadi:



Ekzotermik reaksiya ustivor bo'lganligidan, u atmosferadagi atomar kislorod miqdoriga bog'liq bo'ladi. Tutun gazlari atmosferaga chiqarilgandan keyin $\text{NO} + \text{O}$ reaksiya bo'yicha NO_2 hosil bo'ladi va u yoqilg'ining kimyoviy tarkibiga bog'liq bo'lmaydi.

NO_2 miqdorining atmosferada ortishi nafas olishni qiyinlashtiradi. Bu hadbo'y, bug'uvchi, gaz qizg'ish rangda tovlanadi, odam ko'z kosasi va asab sistemasiga salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Uglerod oksidi yoqilg'ining to'la yonishi uchun kameraga kiritiladigan atmosfera havosi miqdorining yetishmasligi, ya'ni ortiqcha havo koeffitsientining me'yoridan kichikligidan hamda karbonat angidridning dissotsiatsiyasi natijasida hosil bo'ladi. CO ning hosil bo'lishiga yonish kamerasining takomillashmaganligi, ortiqcha havo koeffitsientini rostlovchi mexanizmlarning to'g'ri rostanmaganligi, yoqilg'ida bu gazni hosil qiluvchi moddaning ko'pligi asosiy sabablardan biri hisoblanadi. CO rangsiz va hidsiz gaz bo'lib, odamning nafas yo'llari orqali organizmga kiradi va qondagi gemoglobin bilan kuchli birikadi. Natijada gemoglobinning organizmga kislorod yetkazib berish faoliyati susayadi, ya'ni zaharlanish boshlanadi. Uglerod oksidi bilan zaharlanishning asosiy belgilari (bosh og'rig'i, yurak urishining tezlashishi, nafas olishda havo yetishmasligi va qusish) paydo bo'ladi.

Uglevodorodlar CH yoqilg'i tarkibidagi yonmagan uglerod va vodorodning yonishga kirishmagan qismi hamda molekulalarning parchalanish reaksiyasidan keyin hosil bo'ladigan birikmadir. Masalan, uglevodorodlar birikmasi karbyuratorli ichki yonuv dvi-

gatellarida yonish kamerasining nisbatan sovuqroq devori yaqini-da yonish mahsulotining keskin so'nishi vaqtida, yonish mahsulotini haydash jarayonida, silindr va porshen hamda eng yuqoridagi siquvchi halqa ustidagi siqilgan hajmchalarda hosil bo'ladi.

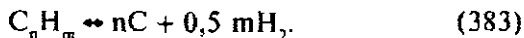
Dizel dvigatellarida esa CH birikmalari asosan ish aralashmasining yuqori konsentratsiyali sohasida yoqilg'i molekulalarining *piroliz* hodisasi vaqtida hosil bo'ladi. Agarda kengayish taktida shu sohaga yetarli miqdordagi kislorod havoda yetishmasa, unda hosil bo'lgan CH reaksiyaga kirisha olmay yonish mahsuloti tarkibiga aralashib atmosferaga chiqib ketadi.

Insoniyatga, tabiatga salbiy ta'sir qiladigan uglerodli birikmalar soni 200 dan ortiq bo'lib, ularning ko'pchiligi kuchsiz ta'sir ko'rsatuvchi moddalardir. Lekin avtotransport chiqargan gazlardagi CH konsentratsiyasi juda kichik bo'lsa-da, goho ular kuchli salbiy ta'sir qiluvchi birikmalarni hosil qilishi mumkin. Masalan, Quyosh nuri ta'sirida uglevodorodlar azot oksidi bilan ta'sirlashib biologik jihatdan salbiy ta'sirga ega bo'lgan, tumovga o'xshash holatni yuzaga keltiradi.

Benzol, toluol, yarim xushbuy uglevodorodlar chiqindilari orasida benzopiren birikmasi kuchli salbiy ta'sir etuvchi hisoblanadi. Bu zaharli moddalar yoqilg'ining yengil va o'rta fraksiyasi 600—700 K temperaturadagi piroliz vaqtida hosil bo'ladi. Yoqilg'ida benzol miqdori qancha ko'p bo'lsa, *kanserogen* modda hisoblanuvchi organizmdan chiqib ketmaydigan va oqibatda, *immunitet yetishmasligi* kasalligini paydo qiluvchi yarim xushbo'y uglevodorodlarning miqdori ortadi.

Qurum zarrachalari qattiq modda bo'lib, uning tarkibida 1—3 % vodorod, 99—97% uglerod bo'ladi. Qurum asosan $T=1500$ K dan yuqori temperaturalarda kislorod yetishmasligi natijasida piroliz reaksiyasi jarayonida hosil bo'ladi.

Odatda, piroliz reaksiyasi shartli ravishda quyidagicha ifodalanadi:



Qurumning hosil bo'lishi ortiqcha havo koeffitsienti ($\alpha=0,3-0,7$), gazlar bosimi va temperaturasi hamda yoqilg'i turiga bog'liq bo'ladi. Qurum hosil bo'lishiga moyillik jihatidan uglevodorod miqdori bir xil bo'lgan parafin, olefinlar, xushbo'y moddalar ketma-ketligi yotadi.

Yoqilg'i yonganda qop-qora tutun chiqishi uning tarkibida qurum borligidan dalolat beradi. Shuning uchun tutunga kirib qolgan

odam nafas yo'llarini himoyalashi kerak. Chunki qurum burun bo'shlig'i va nafas yo'llarini ifloslantiruvchi cho'kma hamda kanserogen moddalarni tashuvchi modda hisoblanadi. Yonish mahsuloti (tutun gazlari va uchuvchi moddalar) tarkibida qurumdan tashqari oltingugurt bilan qattiq birikma hosil qiluvchi moddalar, yoqilg'ining chala yonishi hisobiga paydo bo'ladigan moy *aerozoli* ham bo'lishi mumkin.

Gazlar filtrida tutib qolinadigan hamma turdagi birikmalar *uchuvchi zarralar* deb yuritiladi. Zarralar miqdori yoqilg'i turi, yoqish usuli hamda dvigateining sozlanganlik darajasiga bog'liq. Shuning uchun tutun gazlaridagi CO, CH va qurum, asosan yoqilg'ining to'la yonmaganligi hamda filtrlanmaganligi sababli atmosferaga chiqadi.

Qo'rg'oshin yoqilg'i tarkibiga kiruvchi modda hisoblanadi. Yoqilg'i tarkibidagi qo'rg'oshinning 50—70% yoqilg'i (benzin)-ning yonish jarayonida qo'rg'oshin tuzining $d < 10^{-6}$ m kristallari shaklida hosil bo'ladi va yonish mahsuloti bilan atmosferaga chiqadi. Qo'rg'oshin o'ta zaharli modda hisoblanadi va tirik organizmga teri va nafas yo'llari orqali kiradi. To'planish xossasiga ega bo'lganligi sababli ekologik jihatdan xavflidir. Odamning markaziy asab sistemasiga kuchli ta'siri hisobiga asabiy va psixologik buzulishlarga olib keladi.

Oltingugurt dizel yoqilg'isi, mazut, toshko'mir va sh.k. tarkibiga kiruvchi elementlardan biri hisoblanadi. Yoqilg'ilarni yoqish jarayonida SO₂ sulfid ikki oksidi shaklida hosil bo'ladi hamda tutun gazlari bilan atmosferaga chiqadi. Atmosferaga chiqqan SO₂ havodagi namlik bilan reaksiyaga kirishib "kislotali" bug' va miqdori ortib ketganida yomg'ir hosil qilishi mumkin. Albatta, "kislotali" bug' va yomg'ir tirik organizmga o'ta salbiy ta'sir ko'rsatadi.

Zaharli moddalar yonish mahsuloti bilan uchib chiqqandan so'ng atmosfera tarkibidagi moddalar bilan reaksiyaga kirishib turli xil salbiy ta'sir qiluvchi birikmalarni hosil qilishi mumkin. Masalan, Quyosh radiatsiyasidagi ultrabinafsha nuri ta'sirida azot, uglerod, uglevodород radikallarining turli-tuman reaksiyalari hisobiga ozon (O₃) gazi hosil bo'ladi. Ozon odamning nafas yo'llari orqali organizmga kirib uning holatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Ozon strosfera va mezosferada ko'proq bo'lib uning konsentratsiyasi $4 \cdot 10^{-7}$ g/m³ ni tashkil etadi. Atmosferadagi hamma ozonni bir qatlamga yig'ilsa normal atmosfera bosimida uning qalinligi 3 mm dan oshmaydi. Yer sirtidan 20—25 km balandlikda ozon miqdori ko'proq bo'ladi.

Agar NO₂, O₃ va CH miqdori atmosferada belgilangan me'yordan ortiq bo'lsa, xususan namlik yuqori bo'lgan vohalar-

da, suyuq va gazsimon aralashmalar paydo bo'ladi. Bu aralashmalar ko'zning shilliq pardasiga ta'sir etuvchi sarg'ish tuman hosil qiladi va ko'rishni yomonlashtiradi.

Ekologik jihatidan insonga, xususan tabiatga salbiy ta'sir etuvchi issiqlik energiyasi manbalariga ichki yonuv dvigateli bo'lgan hamma turdagi mashina va uskunalar, issiqlik va energetik inshootlar, xususan og'ir sanoat qurilmalari, zavod va fabrikalar kiradi. Bugungi kunda insoniyatning ko'zga ko'rinmas dushmani hisoblangan yonish mahsuloti va turli-tuman chiqindilar ko'payib bormoqda. Atmosfera, biosfera, litosfera, gidrosferaga chiqayotgan zaharli moddalar manbalariga qarshi kurashish bo'yicha Jahon hamjamiyati ijobiy ishlarni amalga oshiryapti. Shunday bo'lsada, ayrim zaharli moddalar miqdori, hozirgi kunda, ekologiya talablari bo'yicha Jahon hamjamiyati belgilagan me'yoriy miqdordan ancha ortiq. Ekologik talab va ko'rsatmalarni bajarish bo'yicha jahon issiqlik energetikasi va texnikasi sohasi xodimlari oldiga bu dolzarb masala ko'ndalang qo'yilgan. Keyingi yillarda transport vositalarining atmosferaga chiqarayotgan zaharli komponentlar miqdorini kamaytirish uchun turli xil filtrlar, so'ndirgichlar ishlatilishi bilan birga yoqilg'i tarkibiga kiruvchi zaharli moddalarsiz yoki ular miqdorini kamaytirib yoqilg'i ishlab chiqarish yo'lga qo'yilmoqda. Shu bilan birga gaz dvigatellari soni ortib bormoqda. Atmosfera va suvdagi vodoroddan foydalanib ishlaydigan harakatning texnik vositalari yo'lga qo'yilsa, ekologik muammolar ma'lum darajada o'z yechimini topgan bo'lar edi. Albatta, kelajakda vodorod va Quyosh energiyasi bilan ishlaydigan transport vositalari insonlarga xizmat qiladi. Buning uchun Yerda mavjud va ekologik jihatidan toza bo'lgan shamol, suv to'liqini, gellio, geotermal, boshqariladigan termoyadro sintez reaksiyasi va sh.k. energiyalardan samarali foydalanish yo'llarini topmog'imiz shart.

11.2. Zaharli chiqindilarning inson va atrof-muhitga salbiy ta'siri

Atmosfera, biosfera, litosfera, gidrosferaga antropogen (inson faoliyati tufayli) chiqindilardagi (hajmi birligidagi) zaharli moddalarning miqdori qabul qilingan eng yuqori chegaraviy ruxsat etilgan me'yor (ChREM)ning bir martalik, o'rtacha sutkalik, o'rtacha yillik miqdorlari bilan taqqoslanadi.

Atmosfera havosi, suv, tuproq va o'simliklar olamining *me'yoriy ifloslanganlik darajasi* tushunchasi bu antropogen chiqindilarning,

zaharli moddalar majmuasining inson salomatligiga, hayvonot olamiga, o'simliklar dunyosiga, san'at obidalariga va sh.k.larga salbiy ta'siridir. Albatta, salbiy ta'sir etuvchi moddalarni tarqatuvchi manbalarga yaqin bo'lgan joylardagi aholi, hayvonat olami, tuproq, suv, o'simliklar ko'proq, aksincha bu manbalardan uzoqroqdagilari, mos ravishda, kamroq zaharlanadi, ya'ni turli darajadagi salbiy ta'sir doirasida bo'ladi. Masalan, avtotransport trassalari yaqinida va undan uzoqda joylashgan ob'yektlar (shahar, posyolka, qishloqda, qo'riqxonada yashovchilar va sh.k.) turli darajada zaharlanadilar (13-jadval).

Ko'psonli epidemiologik va toksikologik tadqiqotlar natijalariga ko'ra, me'yordan ortiq bo'lgan zaharlovchi moddalarning yagona turi ham o'ziga xos qayta tiklanmaydigan (somatik va patologik) salbiy oqibatlariga olib kelishi mumkinligi tasdiqlangan. Zaharli modda atrof-muhitga ta'sir etish xususiyatiga ko'ra, xronologik, ya'ni biror kasallikka xos bo'lmagan (sun'iy kasalliklarni qo'zg'ovchi) va o'ziga xos turlarga bo'linadi.

Salbiy ta'sirlar quyidagi belgilar bo'yicha aniqlanadi:

1. **Uglerod oksidi (CO)** — atmosferaga tez aralashuvchi, kuchli zaharlovchi gaz, u 2 oydan 42 oygacha reaksiyaga kirishmasdan erkin holatda bo'lishi mumkin. Uglerod oksidi nafas yo'llari orqali organizmga kirib qondagi gemoglobin bilan reaksiyaga kirishadi va kislorodni surib chiqaradi. Natijada insonning asab sistemasiga kuchli ta'sir etib bosh aylanishi, xushdan ketish hollari kuzatiladi. Havodagi CO ning hajm birligidagi miqdori hamda ta'sir vaqtining davomiyligiga qarab, undan organizmning zaharlanish darajasi turlicha bo'ladi. Organizmning o'z-o'zini himoya qila olish qobiliyatiga ko'ra, gemoglobin bilan bog'langan uglerod oksidining 50% ortig'i sog'lom organizmlardan har 3—4 soat davomida chiqariladi yoki zaharsiz birikmaga aylanadi. Shunday bo'lsa-da, CO ndamning markaziy asab sistemasiga kuchli salbiy ta'siri tufayli ko'zni ranglarni ajrata olish qobiliyati hamda yorug'lik nuriga bo'lgan sezgirliги pasayadi natijada yo'llarda avtohalokatlar sodir bo'lish hollari ko'payadi. CO konsentratsiyasining eng yuqori ChREM aholi yashaydigan joylarda 3 mg/m^3 bo'ladi.

2. **Azot (NO) oksidi** miqdori atmosfera havosida turli ta'sirlar va yonish mahsuloti gazlari hisobiga ortib turadi hamda tez orada yemiriladi. Azotning ikki oksidi, azot oksidiga nisbatan 7 marta zaharliroq. NO, asosan NO ning atmosferadagi kislorod bilan o'zaro 0,5—3 soatdan to 100 soatgacha bo'lgan vaqt davomida reaksiyaga kirishishidan hosil bo'ladi.

Atmosferada NO_2 ning eng yuqori ChREM 15 mg/m^3 atrofida bo'lib, uning miqdori $200\text{--}300 \text{ mg/m}^3$ dan ortib ketisa, inson hamda tirik jonzotlarda o'pkaning oqishi kuzatiladi. Xususan atmosferada namlik miqdori yuqori bo'lganida undagi suv bilan azot oksidlari reaksiyaga kirib azot kislotasini hosil qiladi, metallarni zanglatadi, o'simlik olamiga katta talafot keltiradi va boshqa salbiy oqibatlariga olib keladi.

Azot oksidlarining Quyosh nuri ta'sirida fotokimyoviy reaksiyaga kirishuvidan zaharli uchuvchi aralashma hosil bo'ladi. Shuning uchun aholi yashaydigan joylar atmosferasidagi azotning eng yuqori ChREM $85 \cdot 10^{-3} \text{ mg/m}^3$ dan oshmasligi shart.

3. **Gazsimon past molekular uglevodorodlar** (kabonsuvchillar) (GPMU) odamni giyohvandlik kayfiyatiga tushuruvchi modda hisoblanadi. Organizmni *eyforiya* (o'z-o'zidan xursand bo'lish) holatiga tushurib qo'yadi va zaharlanish ehtimolligini orttiradi. Atmosferada GPMUdan tashqari boshqa turdagi salbiy ta'sir etuvchi moddalar bo'lganida ularning zaharlash darajasi yana ham ortadi. Chunki Quyosh nuri ta'sirida sodir bo'ladigan fotokimyoviy reaksiya jadallashadi va tumansimon zaharli uchuvchi oksidlar aralashmasi miqdori atmosferada ortib boradi. Shuning uchun GPMU ning eng yuqori ChREM 5 mg/m^3 dan ortmasligi shart.

4. **Polisiklik xushbo'y uglevodorodlar (PXU)** kanserogen modda bo'lib, ular ichki yonuv dvigatellarining (dizel) yonish mahsuloti bilan atmosferaga chiqadi. Ular orasida xususan *benz-a-piren* ($\text{C}_{20}\text{H}_{12}$) o'ta salbiy ta'sir etuvchi modda, uning konsentratsiyasi dizel dvigatellari tutun gazlarida ko'proq bo'ladi. PXU ning havodagi eng yuqori ChREM $0,01 \text{ mg/m}^3$ dan oshmasligi shart.

5. **Qurum** atmosferadagi zaharsiz changlarga nisbatan zaharlash darajasi ancha yuqori bo'lgan uglerod birikmasi shaklida yonish mahsuloti bilan atrof-muhitga chiqariladi. Uning xavfliligi shundaki, qurum zarralari sirtida kanserogen moddalar absorbsiyalanishi natijasida ular to'planib qoladi.

Yonish mahsuloti tarkibidagi qurum miqdori 130 mg/m^3 dan ortgandan keyin avtotransport tutuni ko'zga ko'rinadi. Qurum zarralarining diametri $0,19\text{--}0,54$ mikron atrofida bo'lganligidan ular nafas yo'llari orqali organizmga kirib burun bo'shlig'i, traxeya, bronxlarda yoki o'pka bo'shliqlari (alveol)da o'rtnashib qoladi.

6. **Oltingugurt oksidining konsentratsiyasi** inson faoliyat ko'rsatadigan doirada (oltingugurt ishlab chiqarish, ishlatish va sh.k.) $10^{-3}\%$ dan oshmasligi shart (hajm birligida). Oltingugurt tuzining

miqdori eng yuqori ChREM dan organida odamning nafas yo'llarini qichitadi. Uning konsentratsiyasi $10^{-2}\%$ dan yuqori bo'lganida esa odam bir necha minut davomida zaharlanadi. Oltinugurt oksidi atmosferadagi namlik bilan reaksiyaga kirishib sulfat kislotasini hosil qilishi mumkin. Sulfat kislotasining bug'i atmosfera havosida paydo bo'lishi inson nafas yo'llari uchun o'ta xavflidir. Shuningdek, u o'simliklar olamidagi fotosintezni susaytiradi. SO_2 ning havodagi konsentratsiyasi $0,9 \text{ mg/m}^3$ dan ortiq bo'lganida fotosintez hodisasi susayadi va ayrim daraxt hamda o'simliklar avval sarg'ayadi, so'ngra esa tezda barglari to'kilib ketadi. Shuning uchun oltinugurt oksidining eng yuqori ChREM inson, hayvonat, o'simliklar olamiga salbiy ta'sir qilmasligi uchun 10 mg/m^3 dan oshmasligi shart.

7. **Qo'rg'oshin birikmasi** o'ta zaharli modda bo'lgani uchun organizmga kirib qolgandan so'ng oqsillarning fermentativ faolligining ortishi hisobiga odamda bosh og'rish, holsizlanish, toliqish, uyqusizlik holatlarini paydo qiladi. Qo'rg'oshin organizmda to'planish xususiyatiga ega. Qo'rg'oshin bilan organizmning zaharlanishi natijasida odam asab va qon aylanish sistemasida o'ta og'ir tuzalmaydigan xastaliklarga olib keladi. Shuning uchun uning eng yuqori sutkalik ChREM $3 \cdot 10^{-4} \text{ mg/m}^3$ dan ortmasligi shart.

13-jadval

Odam organizmiga salbiy ta'sir qiluvchi moddalarning zaharlash darajasi (CO ga nisbatan)

Tartib raqamlari	Modda nomi, formulasi	Zaharlash darajasi
1	Uglerod oksidi, CO	1,0
2	Uglevodorodlar, CH	1,26
3	Vodorod sulfidi, H ₂ S	3,16
4	Azot oksidlari, NO _x	16,5
5	Uglerod, C	$4,11 \cdot 10^3$
6	Aldegidlar, RCHO	$4,15 \cdot 10^3$
7	Qo'rg'oshin, Pb	$22,4 \cdot 10^3$
8	Benz-a-piren, C ₂₄ H ₁₂	$126 \cdot 10^4$

Atmosfera havosidagi zaharli moddalar miqdoriga qarab odamda turli xil og'ir kasalliklar paydo bo'ladi (14-jadval).

Inson faoliyat ko'rsatayotgan barcha sohada turli xil salbiy ta'sir qiluvchi moddalar, shovqin, radiatsiya (radioaktiv moddalarning nurlashi), elektr va magnit maydoni ta'siri tufayli og'ir ahvolga tushib qolishi va hatto nobud bo'lishi mumkin.

14-jadval

Tartib raqamlari	Kasallik belgilari	Zaharli moddalar miqdori, mg/m ³		
		CO	SO ₂	NO _x
1	Bir necha soat sezilarsiz	11,50	6,0	15,0
2	Yengil zaharlanish yoki 2—3 soatdan keyin shilliq pardaning bezovta qilish belgisi paydo bo'ladi	15—575	130	20
3	0,5 soatdan keyin zaharlanish	2300—3500	210—400	100
4	O'limga olib kelishi (oniy vaqtda ta'sir qilganida)	5700	1600	150

Shuning uchun bu salbiy ta'sir etuvchi (xususan zaharli va radioaktiv) moddalarning inson organizmiga tushishidan saqlanish kerak. Masalan, avtotransport atmosferaga chiqargan yonish mahsuloti tarkibidagi zaharli moddalar turli xil yo'llar bilan suv, oziq-ovqat va boshqa yo'llar bilan odam organizmiga kirib turli darajadagi salbiy funksional o'zgarishlarga olib kelishi mumkin (14, 15 va 16-jadvallarga qarang).

Suv havzalaridagi zaharli moddalar bilan aholi yashaydigan joylarning ifloslanish darajasi ifloslanganlik indeksiga muvofiq 0, 1, 2 va 3 darajada ifloslangan deyiladi, ya'ni suvdagi zaharli moddalar miqdori eng yuqori ChREM talabi darajasiga nisbatan ChREM darajasida, ChREM talabidan 2—3, 4—10 va 100 marta katta bo'lganligini bildiradi.

**Zaharli moddalarning odam organizmiga kirishi
hisobiga paydo bo'ladigan funksional
o'zgarishlar turlari**

Tartib raqam- lari	Aholi salomatligi haqida ma'lumot	Eng yuqori ChREM ga nisbatan ortiqqligi, n marta
1	Salbiy o'zgarishlar yo'q	1,0
2	Ayrim funksional ko'rsatkichlarda o'zgarishlar paydo bo'lgan holat	2—3
3	Sezilarli aniq funksional o'zgarishlar mavjud bo'ladi	4—7
4	O'ziga xos kasalliklarni ko'payish holati kuzatiladi	8—10
5	Kuchli zaharlanish hodisasi kuzatiladi	$100 \geq 50$
6	O'linga olib keluvchi zaharlanish hodisasi kuzatiladi	$100 < < 500$

Bunday holatlarda suv havzasining ifloslanganlik darajasi, mos ravishda, *me'yorida, o'rtacha, yuqori va o'ta yuqori* deb nomlanadi. Shu ma'lumotlar asosida ekologiya idoralari ifloslantiruvchi manbalarni tugatish chora-tadbirlarini ko'radi va zarur bo'lganida aholi ko'chiriladi. Kritik holatlarda suv havzasidan foydalanish taqiqlanadi va havzalar ifloslanganlik turi va darajasiga qarab, ular mexanik, fizika-kimyoviy va biologik usullar bilan tozalanadi. Odam iste'mol qiladigan mahsulotlarning hammasi tuproqda yetishtiriladi. Shuning uchun tuproqdan zaharli moddalar mahsulot orqali odamga va boshqa iste'molchilarga o'tadi.

Tuproqdagi kimyoviy mikroelementlar aholi salomatligiga salbiy ta'sir qilishini baholash shkalasi bo'yicha qabul qilingan eng yuqori ChREM dan zaharli moddalar miqdori necha marta kattaligiga qarab, odam organizmida turli xil tiklanmaydigan fiziologik o'zgarishlar sodir bo'lishi mumkin (16-jadval).

**Tuproqdagi mikroelementlar miqdori bilan aholi
salomatligi orasidagi bog'lanish**

Tartib rangam- lari	Aholi salomatligi haqida ma'lumot	Eng yuqori ChREM ga nisba- tan ortiqligi, n marta
1	Eng kichik fiziologik o'zgarishlar	to 4 gacha
2	Sezilarli fiziologik o'zgarishlar	4—10
3	Ayrimshakl va guruhlardagi kasalliklar sonining ortishi	20—120
4	Saqlanib qoladigan kasallik	120—200
5	O'tkir zaharlanishlar	200—1000

Yuqorida keltirilgan ma'lumotlardan shunday xulosa chiqarish mumkinki, inson o'z faoliyatida texnikadan foydalanish (transport, isitish tarmog'i va qishloq xo'jaligi ekinlariga kimyoviy ishlov berish) hamda unga xizmat ko'rsatish davrida atmosfera, biosfera, litosfera va gidrosferaga turli-tuman zaharli moddalarni chiqaradi. Bu moddalar salbiy ta'sirlarni qo'zg'atuvchi komponentlar hisoblanadi. Natijada aholi salomatligini ko'rsatkichi pasayadi, ya'ni biologik organizmda turli xil tiklanadigan va tiklanmaydigan funksional o'zgarishlar sodir bo'ladi. Bu jamiyat taraqqiyotiga salbiy ta'sir ko'rsatadi. Shuning uchun Xalqaro ekologiya Hamjamiyati belgilagan va taqiqlagan moddalar konsentratsiyasi eng yuqori ChREM dan ortiq bo'lmasligi uchun kurashmoq shart.

11.3. «Parnik» effekti va uning oqibati

Quyoshdan Yerga katta miqdordagi energiya tushadi. Bu energiya-ning zichligi $7,4 \cdot 10^{11}$ W/m² bo'lib, uning ma'lum qismigina Yer sirtiga yetib keladi. Natijada tabiat mu'jizalaridan biri — Quyosh nuri spektridagi ko'k-zangori nur Yer atmosferasida sochilib sinishidan musaffo ko'm-ko'k osmon va yorug' dunyo paydo bo'ladi. Yer sferasiga tushayotgan energiya-ning bir qismi atmosferadagi Ozon gazi va suv bug'ida yutiladi, bulutlar va atmosferadan qaytadi hamda unda sochilib sinadi. Yer atmosferasiga tushgan energiyani 100% deb olinsa, uning ~42% Yer sirti va atmosferasidan qaytadi, ~43% Yer sirtida, ~15% esa faqat atmosferada yutiladi. Insoniyat tabiat va yer osti boyliklaridan ko'r-ko'rona foydalanish oqibatida yerdagi iqlim salbiy tomonga o'zgarimoqda. Atmosferaga chiqayotgan karbonat angidrid (CO₂)ning miqdori ortib bormoqda.

Uglevodorodli yoqilg'ilarni yoqishda hosil bo'ladigan yonish mahsulotining asosiy qismini CO_2 tashkil qiladi. Ilmiy ma'lumotlarga ko'ra, atmosferaga yil davomida uchib chiqayotgan CO_2 miqdori 600—1000 mlrd. tonna atrofida bo'lib, uning 96—97 % tabiiy manbalardan chiqadi. Faqat 3—3,5% CO_2 *antropogen chiqindi*, ya'ni inson faoliyatida ishlatiladigan texnika vositalaridan chiqadi, bu CO_2 atmosferadagi muvozanatni buzuvchi va "parnik" (issiqxona) effektini kuchaytiruvchi omillardan biri hisoblanadi.

Yer atmosferasi asosiy issiqlik izolatori hisoblanadi. Atmosferaning yuqori qatlamlarida suv bug'i (60—90%), gazlar aralashmasi, minerallar changi, kul, qurum zarralari va sulfat kislotalar tomchilari mavjud. Bu aralashma Quyosh nurini yerga yaxshi o'tkazadi, aksincha yer sirtidan qaytib Koinotga chiqib ketayotgan nurlarni Yerga qaytaradi. Buning natijasida Koinotga chiqib ketayotgan issiqlik atmosferada tutib qolinadi va yer sirtidagi o'rtacha temperatura 255 K dan 288 K gacha ko'tarilishiga olib keladi va oqibatda «parnik» effekti sodir bo'ladi. Agar yer sirtidan qaytgan (yer nurlagan energiya zichligi ~8% va qaytargani ~3%, bulutlar qaytargani ~27%) radiatsiya Koinotga hech qarshiliksiz chiqib ketganida, ehtimol, Yerdagi hayot bo'lmasmidi? — degan savol tug'iladi. Aynan «parnik» effekti tufayli Yerdagi hayot paydo bo'lgan deyish mumkin. Lekin ortiqcha issiqlik atmosferadagi muvozanatni buzibgina qolmasdan Yerdagi hayotga ma'lum darajada xavf soladi. Bu XX asrda boshlangan bo'lsa, XXI asr boshida ham davom etmoqda. Insonning texnikaviy faoliyati hisobiga stratosfera va troposferada CO_2 , CH_4 , uglerod galogenlari, N_2O , azot gemioksidi, ozon va boshqa moddalar qatlamining paydo bo'lishi «parnik» effektini kuchaytiradi. Bu moddalarning ulushi asosiy «parnik» effektida kichik (0,5—15%) bo'lsa-da, XIX asr oxiridagi Yer temperaturasi nisbatan XX asrning 80-yillaridagi temperatura 273,61 K (+0,45°C dan to 0,6°C gacha) ko'tarilishi natijasida iqlimning isishiga olib kelmoqda. Olimlarimizning bashoratiga ko'ra, XXI asrda Yerdagi insonning antropogen faoliyati shunday befarqlik bilan davom etsa, temperatura to +1,2°C gacha ko'tarilishi mumkin. Buning sababi Yer atmosferasida karbonat angidrid va aerazol (feon)lar konsentratsiyasining ortib borishi bilan tushuntiriladi.

CO_2 , CH_4 , N_2O va sh.k. moddalar miqdorining ortishi, o'zgina bo'lsa-da, Yer sirtidagi temperaturaning ko'tarilishiga olib keladi. Bu esa o'z navbatida, muzliklarning jadal erishiga va insoniyat boshiga global falokatlar tushushiga olib kelishi mumkin. Shuning uchun «parnik» effektini nazoratsiz qoldirib bo'lmaydi.

CO_2 yorug'lik va issiqlik nurlarini kuchli qaytaradi. Shunga ko'ra, CO_2 miqdori "parnik" effektida asosiy komponent hisoblanadi, shuning uchun inson atmosferaga kamroq chiqindi chiqaradigan uskunalaridan foydalanishi kerak.

CO_2 ni atmosferaga chiqaruvchi asosiy manbalarga quyidagilarni kiritish mumkin:

- issiqlik elektr stansiyalari — 27%;
- sanoat markazlari — 20%;
- transport vositalari — 17%;
- isitish tarmog'i va kichik energetika — 20%.

CO_2 zaharsiz gaz bo'lganligi uchun yoqilg'ilarni yoqishda uning hosil bo'lishi va miqdori hozircha insoniyatni tashvishga tushirganicha yo'q. Ammo e'tiborsizlik oqibatida ekologik muammo yuzaga kelishi mumkin. Bunday holat yuz bermasligi uchun inson faoliyatida SO_2 ning atmosferaga, quyidagi usullarni qo'llaganida, kamroq chiqishini ta'minlaydi:

- uglevodorodli yoqilg'ilarni kamroq yoqish, ya'ni tejamkor energetik qurilma va dvigatellardan foydalanish;
- kam uglerodli yoqilg'ilar (siqilgan va suyultirilgan gazlar, spirt, efirlar)dan foydalanish;
- vodoroddan foydalanish;
- muqobil energetik manbalar (Quyosh, shamol, suv to'liqini, gidro, atom energiyalari)ga o'tish va ulardan samarali foydalanish taqazo etiladi.

Nazorat savollari

?

1. Ekologiya fani nimani o'rganadi va u issiqlik hodisalari bilan qanday bog'langan? Issiqlik texnikasining qanday ekologik muammolari mavjud?
2. Zaharli modda deb qanday moddaga aytiladi va nima uchun ulardan himoyalanimiz shart?
3. Zaharli moddalarning havodagi belgilangan me'yoriy konsentratsiyasi talab doirasi bo'yicha qanchadan ortmasligi shart?
4. Avtotransport, issiqlik stansiyalari va boshqa turdagi issiqlik qurilmalarining yonish mahsuloti tarkibidagi zaharli moddalarga qanday moddalar kiradi?
5. Zaharli moddalar qanday turdagi kasalliklarni yuzaga keltiradi?
6. Zaharli chiqindilarning inson va atrof-muhitga salbiy ta'siri nimalarda namoyon bo'ladi?
7. «Parnik effekti» qanday issiqlik hodisasi va u qanday antropogen chiqindilar hisobiga paydo bo'ladi? Bu effekt insoniyatga global muammolarni keltirishi mumkinmi va unga qarshi qanday kurashish kerak?
8. «Parnik effekti»ni qanday turdagi moddalar kuchaytirishi va ularning salbiy ta'siri katta bo'lishi mumkinmi?

ADABIYOTLAR

1. *Karimov I. A.* Milliy istiqlol mafkurasi-xalq e'tiqodi va buyuk kelajakka ishonchdir. — «Fidokor» gazetasi, 2000-yil, 08-iyun.
2. *Karimov I. A.* O'zbekiston XXI asrga intilmoqda. — T., «O'zbekiston», 2000.
3. *Karimov I. A.* Tarixiy xotirasiz kelajak yo'q. — T., «Sharq», 1998, 32-b.
4. *Баскаков А. П., Берг Б. В.* и др. Теплотехника, — М., «Энергоиздат», 1982.
5. *Дрижаков Е. В.* и др. Техническая термодинамика, — М., «Высшая школа», 1971.
6. *Алексеев Г. Н.* Общая теплотехника. — М., «Высшая школа», 1980.
7. *Яварский Б. М.* и *Детлаф А. А.* Справочник по физике, — М., «Наука», 1981.
8. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике, 1981.
9. *Veckjanov R. B.* Yadro fizikasi, — T., «Fan», 1975.
10. *Копаков П. Е.* Основы ядерной физики. — М., «Просвещение», 1968.
11. *Алешин В. С., Саркисов А. А.* Энергетические ядерные реакторы — Л., «Судпромгиз», 1961.
12. Энциклопедический словарь юного техника. — М., «Педагогика», 1980.
13. *Гуськов С. Ю., Розанов В. Б.* Лазерный «ключ» к термоядерной энергии. — М., «Знание», «физика»: новое в жизни, науке, технике. 1986/4.
14. *Кузмин Р. Н., Шилкин Б. Н.* Холодный ядерный синтез. — М., «Знание», «физика»: новое в жизни, науке, технике. 1989/10. — 64-с.
15. *Алферов Ж. И.* Гелиотехника. «Наука», «Энергия: экономика, техника, экология». 1988/4.

16. Солнечная и тепловая. — М., «Наука и жизнь», 1987.
17. Кириллин В. А., Сичев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. — М., «Наука», 1998.
18. Nurmatov J., Xalilov N. A., Tolipov O'. Q. Issiqlik texnikasi. — Т., «O'qituvchi», 1998.
19. Рижкин В. Я. Тепловые электрические станции. — М., «Энергия», 1974.
20. Шляхин П. Н. Паровые и газовые турбины. — М., «Энергия», 1974.
21. Архангельский В. М., Вихерт М. М. и др. Автомобильные двигатели. — М., «Машиностроение», 1977.
22. Еткине П. Порядок и беспорядок в природе. — М., «Мир», 1987.
23. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. — М., «Высшая школа», 1981.
24. Колодина М. В. «Энергетические ресурсы мира». № 1, 1959.
25. Линднер Г. Картины современной физики. — М., «Мир», 1977.
26. Ястержембский А. С. Термодинамика и история ее развития. — М., «Энергия», 1966.
27. Жуковский В. С. Термодинамика / Под ред. Глухмана А. А. — М., Энергоатомиздат, 1983.
28. Морозов К. А. Токсичность автомобильных двигателей. — М., Изд. МАДИ, 1997.
29. Нечаев С. Г., Камфер Г. М. Прикладная термодинамика тепловых ДВС. — М., Изд. МАДИ, 1996.
30. Теплотехника / Баскаков А. П. и др. — М., Энергоиздат, 1991.
31. Теплотехника / Архаров А. М. и др.; Под общ. ред. Крутова В. И. — М., Машиностроение, 1986.
32. Техническая термодинамика / Под ред. Крутова В. И. — М., «Высшая школа», 1981.
33. Politexnika lug'ati. — Т., 1989.
34. Шефтер Я. И., Рождественский И. В. Ветронасосные и ветроэлектрические агрегаты. — М., Энергоиздат, 1967.
35. Егорушкин В. Е., Сеплович Б. И. Основы гидравлики и теплотехники. — М., Машиностроение, 1981.
36. Теплотехника / Луканин В. Н. и др. — М., «Высшая школа», 2000.
37. Ruscha-o'zbekcha politexnika atamaları lug'ati. — Т., «Fan», 1995.

MYNDARIJA

So'zboshi	3
Muqaddima	5

BIRINCHI QISM

<i>I bob. Termodinamika</i>	7
-----------------------------------	---

1.1. Issiqlik texnikasi fani, uning maqsad va vazifalari	7
1.2. Texnik issiqlik dinamikasining tushunchalari	10
1.3. Issiqlikning ishga aylanish jarayoni. Issiqlik mashinasining ish jismi	15
1.4. Ish jismining asosiy termodinamik parametrlari	17
1.5. Ideal va real gazlar	20
1.6. Gaz qonunlari	25
1.7. Gazlar aralashmasi va uning tarkibi. Dalton qonuni	27

<i>II bob. Termodinamika qonunlari</i>	32
--	----

2.1. Termodinamikaning birinchi qonuni va uning tenglamalari ...	32
2.2. Termodinamikaning birinchi qonunining talqini	35
2.3. Moddaning ichki energiyasi va issiqlik sig'imi	36
2.4. Termodinamikaning ikkinchi qonuni	44
2.5. Aylanma sikl	45
2.6. Karno sikli va uning foydali ish koeffitsienti	47
2.7. Termodinamikaning ikkinchi qonuni asosida issiqlik mashinalari siklining tahlili	49
2.8. Muvozanatli va nomuvozanat hodisalar	52
2.9. Qaytar va qaytmas jarayonlar	54
2.10. Termodinamikaning ikkinchi qonunining talqini	57
2.11. Termodinamik izojarayonlar	58
2.12. Termodinamik muvozanatning tushuncha va ta'riflari ...	70
2.13. Sistemaning dinamik muvozanati	71
2.14. Entropiya va uning fizik xususiyatlari	73
2.15. Termodinamikaning uchinchi qonuni	75

<i>III bob. Gaz sikllari</i>	76
------------------------------------	----

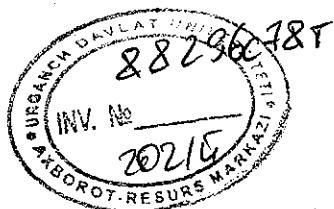
3.1. Ichki yonuv dvigatellari haqida umumiy tushuncha va ularning tasnifi	76
---	----

3.2.	Ichki yonuv dvigatellari siklida kechadigan termodinamik jarayonlar	79
3.3.	Ichki yonuv dvigatelining indikator ishi, quvvati va foydali ish koeffitsienti	84
3.4.	Ichki yonuv dvigatelining issiqlik balansi	88
3.5.	Tashqi yonuv dvigatellari	91
3.6.	Gaz turbinasining tasnifi, tuzilishi va ishlash tartibi	96
3.7.	Gaz turbinali qurilmalari va ularning ish siklidagi termodinamik jarayonlar	97
3.8.	Regeneratsiyali gaz turbinali qurilma siklidagi termodinamik jarayonlar	106
3.9.	Gaz turbinali qurilmalarning tatbiqi	110
3.10.	Gazlarni siqish jarayonlari	111
3.10.1.	Bir bosiqichli kompressor siklidagi termodinamik jarayonlar	112
3.10.2.	Kompressorning ish unumdorligi, quvvati va foydali ish koeffitsienti	120
3.10.3.	Ko'p bosqichli kompressor siklidagi termodinamik jarayonlar	121
IV bob.	Real gaz qonunlari	125
4.1.	Ideal va real gazlarning xususiyatlari	125
4.2.	Van-der-Vaals tenglamasi	127
4.3.	Suv bug'ining hosil bo'lishidagi ayrim fizik hodisalar	135
4.4.	Suv va suv bug'ining asosiy tavsifiy parametrlari	138
V bob.	Gazlar oqimi. Gazning soplo va diffuzordan oqib chiqishi	145
5.1.	Gaz oqimining termodinamik parametrlari	145
5.2.	Gaz oqimi uchun termodinamikaning birinchi qonuni	147
5.3.	Soplo va diffuzordan gazning oqib chiqishi	150
5.4.	Gazning drossellanishi	155
5.5.	Drossel effekti	157
5.6.	Suv bug'ining drossellanishi	159
5.7.	Drossel-effektning fizik ma'nosi	160
VI bob.	Suv bug'ining termodinamik xususiyatlari	164
6.1.	Suv agregat holatining o'zgarishidagi issiqlik hodisalari	164
6.2.	Suv bug'ining termodinamik jarayonlari	167
6.3.	Suv bug'ining iS diagrammasi	171

IKKINCHI QISM

VII bob.	Issiqlik kuch qurilmalari	178
7.1.	Bug'-kuch qurilmasining nazariy sikli	179
7.2.	Oraliq bug' qizdirgichli bug'-kuch qurilmasi	184
7.3.	Binar siklli bug'-kuch qurilmasi	186
7.4.	Issiqlik elektr stansiyalari	189
7.4.1.	Kondensatsiyali elektr stansiyasi	190

7.4.2. Issiqlik elektr markazi	192
7.5. Magnitogidrodinamik generator	194
7.6. Termodinamik generator	204
7.7. Termoemission generator	206
7.8. Atom elektr stansiyasi	208
7.9. Termoyadro sintez reaksiyasi va uning energetikadagi istiqbollari	214
VIII bob. Issiqlik uzatish asoslari	221
8.1. Issiqlikning uzatilishi va almashinuvi	221
8.2. Issiqlik o'tkazuvchanlik	222
8.3. Konvektiv issiqlik almashinuvi	227
8.4. Nurli issiqlik almashinuvi	232
8.5. Nurli issiqlik almashinuvida ekranlarning qo'llanilishi ...	237
8.6. Gazlarning issiqlikni nurlashi	240
8.7. Issiqlik almashinuvida foydalaniladigan asbob-uskunalar va ularning tasnifi	241
IX bob. Muqobil energetika	250
9.1. Gelioenergetika	250
9.2. Geotermal energetika	256
9.3. Shamol energetikasi	257
9.4. Dengiz toshqini elektr stansiyasi	263
9.5. Issiqlik nasosi	265
9.6. Kimyoviy issiqlik transformatorlari	268
X bob. Havo	273
10.1. Atmosfera havosi, uning tarkibi va ayrim xususiyatlari ...	273
10.2. Havoning fizik xossalari	276
10.2.1. Havoni quritish jarayoni	276
10.2.2. Havoning namligi	277
10.2.3. Nam havoning zichligi, universal gaz doimiysi, o'rtacha molekular massasi	281
10.2.4. Nam havoning issiqlik sig'imi va entalpiyasi	283
10.3. Ho'l termometr temperaturasi	284
10.4. Nam havoning t d diagrammasi	286
10.5. Nam havo oqimlarining aralashuvi	291
10.6. Havo namligini psixrometr yordamida aniqlash	294
10.7. Havoni tozalash, isitish, sovitish, suyultirish usullari va asbob-uskunalar	295
XI bob. Issiqlik energiyasidan foydalanishning ekologik muammolari .	300
11.1. Yonish mahsulotidagi zaharli moddalar	301
11.2. Zaharli chiqindilarning inson va atrof-muhitga salbiy ta'siri	305
11.3. «Parnik» effekti va uning oqibati	311
Adabiyotlar	314



M.M. Alimova, Sh.S. Mavjudova, X.S. Isaxodjayev,
R.T. Raximjonov, F.Sh. Umarjonova

ISSIQLIK TEXNIKASINING NAZARIY ASOSLARI FANIDAN TAJRIBA ISHLARI

Toshkent «O'qituvchi», «Ziyo-nashir» KShK, 2003

Muharrir *F. Oripova*
Musahhih *A. Ibragimov*
Texn. muharrir *T. Greshnikova*
Kompyuterda tayyorlovchi *Sh. Sahibov*

IB № 8253

Bosishga 11.10.2003-y. da ruxsat etildi. Bichimi 60×90¹/₁₆, «Tayms» garniturası.
Ofset bosma usulida bosildi. Shartli b. t. 20,0. Nashr b. t. 19,0.
Jami 3000 nusxada bosildi. Buyurtma № 2033. Bahosi shartnoma asosida.

«O'qituvchi» nashriyoti, «Ziyo-nashir» KShK, Toshkent, 129. Navoiy ko'chasi, 30.
Shartnoma № 09—124—03.

O'zbekiston Matbuot va axborot agentligining 1- bosmaxonasida bosildi. Toshkent,
Sag'bon ko'chasi, 1- berk ko'cha, 2- uy. 2003.

