

Ж. НУРМАТОВ, Н. А. ХАЛИЛОВ, У. Қ. ТОЛПОВ

ИССИҚЛИК ТЕХНИКАСИ

*Ўзбекистон Республикаси Олий ва ўрта махсус
таълим вазирлиги олий ўқув юртлари талабалари
учун ўқув қўлланма сифатида тавсия этган*

Ушбу ўқув қўлланма олий ўқув юртлари талабалари учун мўлжалланган бўлиб, унда асосий эътибор термодинамиканинг қонун ва қоидаларига ва улар асосида қурилган иссиқлик машиналарида содир бўладиган термодинамик жараёнларга қаратилган. Иссиқлик энергиясини машиналар ёрдамсиз электр энергияга айлантириш масалалари фан ва техника эришган ютуқларга таянган ҳолда ёритилган. Советиш қурилмалари эса китоб охирида илова қўрилишида баён қилинган.

Қўлланмадан олий ўқув юртларининг «Умумтехника фанлари» ўқитиладиган факультетлар ҳамда айрим ўрта махсус билим юртлари талабалари ҳам фойдаланишлари мумкин.

Тақризчилар: доц. Р. Г. Исянов, доц. С. Х. Ҳакимов,
доц. А. Н. Исоқулов, доц. Э. К. Қурбонов.

СУЗ БОШИ

Мустақил Ўзбекистон Республикасининг равнақи кўп жиҳатдан олий ва ўрта махсус билим юртлари етиштириб берадиган мутахассисларнинг билими ва савияси билан чамбарчас боғлиқ. Чунки бу кадрлар ёш авлодни ўқитишдан тортиб то турли технологик жараёнларни бошқаришгача бўлган мураккаб ва масъулиятли вазифаларни бажарадилар.

Республикадаги энергетик манбалардан тўғри фойдаланиш, қурилмаларнинг самарадорлигини ошириш, атроф-муҳитни экологик жиҳатдан ҳимоялаш масалаларини фан ва техника ютуқлари асосида ўргатиш, албатта, ўқитувчи ва муҳандислар зиммасига юкланади.

Энергетик манбалар асосини ўрганишда термодинамика фани ва унинг амалий қисми бўлган иссиқлик техникаси асосий ўрин эгаллайди. Термодинамика қонунларини билиш иссиқлик машиналарини ҳаётга тўғри татбиқ қилиш ва ишлатиш ҳамда янгиларини яратиш билан боғлиқ бўлган масалаларни ҳал этишда муҳим амалий аҳамиятга эга.

Мазкур ўқув қўлланма муаллифларнинг А. Қодирий номли Жиззах давлат педагогика ва Тошкент кимё-технология институтларида ўқилган кўп йиллик таърузалари асосида ёзилган бўлиб, унда термодинамика қонунлари ва улар асосида яратилган иссиқлик машиналари циклидаги термодинамик жараёнлар баён этилган.

Муаллифлар

МУҚАДДИМА

Иссиқлик техникаси иссиқлик машиналари, аппаратлари ва қурилмалари ёрдамида иссиқлик ҳосил қилиш, уни бошқа турдаги энергияга айлантириб бериш, тақсимлаш, узатиш усулларини назарий ва амалий жиҳатдан қамраб олган ва ўрганадиган умумтехника фанидир.

Термодинамика ва унинг амалий қисми бўлган иссиқлик техникасининг фан сифатида шаклланишида XVIII—XIX аср олимларидан Р. Майер, Ж. Жоуль, М. В. Ломоносов, Г. Гельмгольц, С. Карно, Р. Клаузиус, В. Кельвин, В. Нернст, Д. Максвелл, Д. Бернулли, Л. Больцман, Д. Гиббс, Д. Н. Менделеев, Э. Х. Ленц, А. Г. Столетов, К. Э. Циолковский ва бошқа олимлар илмий тадқиқотлари билан ўз ҳиссаларини қўшганлар.

Иссиқлик энергиясини механик энергияга ва механик энергияни электр энергиясига айлантириш усуллариининг яратилиши, унинг халқ ҳўжалигига татбиқ этилиши натижасида электр энергиясини масофага узатиш ҳамда уни механик энергияга айлантириш масалалари ҳал этилди. Ер юзининг кўпгина минтақаларида катта қувватдаги ГЭС, ИЭС, АЭС ва бошқа турдаги энергетик марказларининг қурилиши натижасида ишлаб чиқариш механизациялаштирилди ва автоматлаштирилди.

Мамлакатимизда иссиқлик энергиясини ишлаб чиқариш ва уни бошқа турдаги энергияга айлантириш усуллариининг самарадорлиги, бирор минтақанинг иқтисодий даражасини кўтаришга таъсир кўрсатиш билан бирга, аҳолининг маиший ва маданий шароитининг яхшиланишига ҳам ижобий таъсир кўрсатади. Энергетик бойлик захирасидан тўғри фойдаланиш мамлакатни энергетик инқироздан сақлайди. Ҳозирги даврда энергия бойлигидан самарали фойдаланилгипти деб бўлмайди. Иссиқлик энергиясининг кўп қисми асбоб-ускуналардан по-

тўғри фойдаланиш, самарасиз ускуналарнинг қўлланилиши ва шу кабилар оқибатида исроф бўлаяпти. Масалан, Ер юзидаги аҳолининг жон бошига ўртача ҳар суткада 25 кг сифатли (1980 йил) кўмир ёқилади, бу кўрсаткич йилдан-йилга ўсиб бормоқда. Инсоният фойдаланадиган энергиянинг асосий қисми (90—92%) нефть ва табiiй газдан олинади. Ўзбекистонда эса асосий энергия манбаи бўлиб табiiй газ ҳисобланади, ундан кейин оз миқдорда нефть ва тошкўмир, дарёларнинг потенциал энергиясидан фойдаланилади.

Энергетика захираларидан тўғри фойдаланилмаслик оқибатида Ердаги экологик мувозанат ёмонлашиб бормоқда.

Атом энергетикаси сунъий энергетик манбалардан энг қувватлиси бўлиб, жаҳон бўйича унинг қурилмаларини такомиллаштириш ҳисобига радиоактив моддаларнинг атроф-муҳитга тарқалмаслик ва ишлатиб бўлинган уран ёқилгисини сақлаш муаммоларининг ечими изланаётир. Европа мамлакатларида энергетик захиралар туғаб бормоқда. Замонавий ишлаб чиқаришнинг энергияга бўлган талаби эса ортиб бормоқда.

Экологик жиҳатдан тоза бўлган Қўш энергияси, шамол, сув тўлқини, гейзерлар каби энергетик манбалардан фойдаланиш кейинги йилларда сезиларли даражада ривожланимоқда. Келажакда экология талабларига жавоб берувчи сунъий энергетик манбалар орасида бошқариладиган термоядро синтези реакциялари асосида ишлайдиган энергетик марказлар инсониятга хизмат қилади, гидро, гелно, гео, шамол, сув тўлқини энергиялари асосий энергия манбалари бўлиб қолади.

1 6 6. ТЕРМОДИНАМИКА, АСОСИЙ ТУШУНЧАЛАР

1.1. Иссиқлик техникаси фани, унинг мақсад ва вазифалари

Термодинамика (грекча *therme* — иссиқлик, *kuch*) иссиқлик эффектлари ҳисобига содир бўладиган турли жараёнлардаги энергиянинг бир турдан иккинчи турга айланишини, моддаларнинг ички тузилишини эътиборга олмаган ҳолда, нисбатлар орасидаги муносабатларни ўрганадиган фандир. Термодинамика табиатнинг универсал қонунидан (энергиянинг айланиши ва сақланиши) фойдаланиб, иссиқликнинг техникада қўлланилишида содир бўладиган термодинамик жараёнлар ечимини ҳал этади. Термодинамика фанининг мақсади бир неча содда қоидалар — термодинамика қонунлари ёрдамида очиб берилади.

Дастлаб термодинамика иссиқлик двигатели энергияси асосларини ўрганиш жараёнида таълимот сифатида пайдо бўлди. Кейинчалик иссиқлик жараёнларида рўй берадиган ҳодисаларни ҳам амалий, ҳам назарий жиҳатдан ўрганиш натижасида жадал ривожланди.

Ҳозир термодинамика қонунлари асосида қурилган мураккаб ва мукаммал асбоб-ускуналар инсон фаолият кўрсатадиган турли хил соҳаларда ишлатилмоқда. Бунга иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантирувчи буғ машиналари, ички ёнув двигателлари ва ҳ. к. мисол бўла олади.

Фан ва техника тараққиётининг маҳсули — техникавий термодинамика XIX асрнинг охирида фан сифатида майдонга келди. Техникавий термодинамика иссиқлик энергияси ёрдамида ишлайдиган машиналар назариясини ўрганади. Бундай машиналарга буғ турбинаси, буғ машинаси мисол бўла олади. 1597 йилда Галилей биринчи термометрни ясаган, шу вақтни техникавий термодинамиканинг пайдо бўлган ва ривожлана бошлаган вақти деб ҳисобласа бўлади.

Термодинамиканинг фан бўлиб майдонга келишида Роберт Майер (1842 й.), Жон Жоуль (1843—46 й.й.), Э. Х. Ленц (1844 й.),* Г. Гельмгольц (1847 й.) каби

* Илмий мақола эълон қилинган йиллар.

олимлар энергия сақланиши қонунининг моҳиятини назарий жиҳатдан очиб берганлар. Ўз навбатида С. Карно (1824 й.), Р. Клаузиус (1854 й.) ва В. Томсон — лорд Кельвин (1856 й.) термодинамиканинг иккинчи қонунини яратишди. Орадан ярим аср ўтгандан сўнг В. Нернст (1906 й.) термодинамиканинг учинчи қонуни теоремасини таърифлаб берди.

Термодинамик жараёнлардаги иссиқлик ҳодисаларини молекуляр-кинетик назария асосида тушунтиришда Д. Бернулли (1738 й.), М. Ломоносов (1758 й.), Д. Максвелл (1860 й.), Л. Больцман (1877 й.), Д. Гиббс (1880 й.), Д. И. Менделеев (1860 й.) ва бошқа олимларнинг ишлари муҳим ўрин тутди.

Термодинамиканинг тараққиётига рус олимларидан Э. Х. Ленц (электр энергиясининг иссиқлик энергиясига айланиш қонуни), А. Г. Столетов (конвектив ва радиация иссиқлик алмашинуви қонунияти), К. Э. Циолковский (қўп босқичли ракета двигателида иссиқлик энергиясининг механик энергияга айланиши), М. В. Кирпичев ва А. А. Глухманлар (термомоделлаш назарияси) жуда катта ҳисса қўшдилар.

Фан ва техниканинг жадал тараққиёти натижасида жаҳонда жон бошига тўғри келадиган энергия миқдори йил сайин ортиб бормоқда. Аммо бундай энергияни ёқилғилар ҳисобига ишлаб чиқариш узоқ вақт давом этиши мумкин эмас. Чунки Ер остидаги тошқўмир, нефть, газ захиралари тобора камайиб бормоқда. Янги энергия манбаларини яратиш, борларидан эса унумли фойдаланиш зарур. Ҳозирги кунда планетамизнинг йиллик энергетик бойлиги тақрибан қуйидагича: тошқўмир — $997 \cdot 10^{14}$ кВт·соат, нефть — $153 \cdot 10^{13}$ кВт·соат, торф — $439 \cdot 10^{13}$ кВт·соат, ядро энергиясининг олишда ишлатиладиган парчаланувчи кимёвий элементлар (U^{235} , U^{238} , Pu^{239} ва ш. к) — $547 \cdot 10^{15}$ кВт·соат, Қуёш энергияси — $79 \cdot 10^{17}$ кВт·соат, шамол энергияси — $601 \cdot 10^{14}$ кВт·соат, дарёлар энергияси — $23 \cdot 10^{12}$ кВт·соат. Ернинг ички иссиқлик энергияси — $232 \cdot 10^{12}$ кВт·соат.

Қуёш энергиясининг таъсирида планетамизда ҳосил бўлган торф, тошқўмир, антрацит, газ, нефтларни Қуёш энергиясининг аккумулятори деб аташ мумкин. Чунки Ернинг 1 м^2 юзасига тушадиган Қуёш нурининг энергияси тақрибан бир киловаттга тенг. Қуёш энергиясининг электр энергиясига айлантириш асбобларининг фик кичиклиги сабабли инсоният ундан тўлалигича фойда-

лана олмаяпти. Агарда, қуёш энергиясини электр энергиясига айлантириш муаммоси ҳал бўлса, инсоният энергетик қаҳатчиликка учрамайди.

Иссиқлик техникаси соҳасида ишлаётган олимларнинг баракали ижоди натижасида наст сифатли (қўнғир қўмир, ёнувчи сланецлар, торф ва ҳ. к.) ёқилғилардан унумли фойдалана оладиган қурилмалар яратилди. Кейинги чорак аср мобайнида иссиқлик техникаси аппаратлари қаторига суьий ва табиий газ ёқилғисидан фойдаланиладиган, ФИК юқори бўлган асбоб-ускуналар, қурилмалар қўшилди. Шамол энергетикасидан ҳам жаҳоннинг жуда кўп мамлакатларида фойдаланилмоқда. Қуёш энергетикаси ҳам самарали ривожлана бормоқда. Ердан ва космонавтикадаги иссиқлик техникаси қурилмаларида (иссиқхоналар, иситгич ускуналари, электр токини ишлаб чиқаришда ва ш. к.) Қуёш нуридан самарали фойдаланилмоқда.

Энергетиканинг яна бир чегараланган соҳаси атом энергетикасидир. Актиноидлар гуруҳидаги U^{235} , U^{238} , Th^{232} , Pu^{239} элементлар ядролари, молекулаларининг иссиқлик энергияси даражасидаги энергияга эга бўлган ва жадал нейтронлар таъсирида парчаланади. Бу ядро реакцияларни вақтида атом реакторларида ҳосил бўладиган иссиқликдан энергетикада кенг фойдаланилади. Ер пўстлоғидаги атом ёқилғисин захираси жуда кўп эмас. Ундан инсоният узоқ йиллар фойдаланиб, ўзининг энергетик талабини тўла қондира олмайди. Атроф-муҳитни муҳофаза қилишда, яъни экологик тозаликни таъминлашда энергиянинг бу манбаи айрим қийинчиликларни тугдирди. Шундай бўлса-да, ҳозирги кунда ривожланган мамлакатларда атом энергетикасидан тинч ва ҳарбий мақсадларда фойдаланилмоқда. Келажак энергетикаси Қуёш энергиясига ва бошқариладиган термоядро синтези реакциясига асосланган. Термоядро синтези энергетикаси йўналишини 1954 йилдан кейин бошланган бўлиб, олимлар бу соҳада айрим ижобий натижаларга эришмишган.

Иссиқлик машиналари, қурилма ва ускуналари қўлланиладиган техниканинг ҳамма тармоқларида ва уларнинг иш жараёнларида иссиқлик техникаси қонун-қоидаларига риоя қилинмаса, иссиқлик машинасидан фойдаланиб бўлмайди, улар тез пшдан чиқади. Шунинг учун ҳам иссиқлик техникаси фан сифатида майдонга

келган ва тараққий этипти. Халқ хўжалигининг ҳамма соҳасида иссиқлик машиналари, аппаратлари, ускуна-ларини ва комплексларидан фойдаланиб келинмоқда. Улар уй-рўзгор иситгич аппаратларида ҳам кенг қўл-ланилади.

Маълумки, машина ва механизмлар деталлари ҳа-ракати вақтида уларнинг сирпаниш нуқталари орасида ҳосил бўладиган ишқаланиш натижасида иссиқлик пай-до бўлади. Иссиқликни ҳисоблашда, ички ёнув дви-гелларида ёниш жараёнини тўғри ростлашда, улардаги ортқича иссиқликни ташқарига чиқаришда, материал-лар мустаҳкамлигининг ва электр қаршилигининг тем-пературага боғлиқлигини, электр ва магнит майдон-лари қийматларининг нўлат ўзак температурасига боғ-лиқлигини ўрганишда иссиқлик техникаси фани умум-машинашунослик курсида муҳим ўринни эгаллайди. Бу жараёнларни билмасдан туриб ўқувчиларга политех-ник меҳнат таълими тўғрисида билим ва тарбия бериб бўлмайди. Шунинг учун ҳам иссиқлик техникаси фани-ни, машинашунослик фанларининг бири сифатида, пе-дагогика, техникавий олний ва ўрта махсус ўқув юртлари талабаларни ўрганади.

1.2. Иссиқлик машиналарининг иш жисми ва уларнинг асосий параметрлари

Иссиқлик энергиясини механик энергияга айланти-рувчи қурилма иссиқлик машинаси дейилади. Иссиқлик машиналарига буғ машиналари, ички ёнув дви-геллари, буғ турбинаси, турли хил ракетаalar (КРД — кимёвий ракета двигатели, ЯРД — ядро ракета дви-гатели, ЭРД — электродинамик ракета двигатели) киради. Иссиқлик машиналарининг ишлаши даврий равнишда так-рорланиб турадиган термодинамик жараёнларга асослан-ган. Бундай даврий жараёнларда иссиқлик аввал систе-мага узатилади, у ташқи кучларга қарши маълум иш бажаргандан сўнг, қолдиқ иссиқлик миқдори системадан чиқарилади.

Айланма жараёнда иш жисмига узатилган иссиқлик миқдорининг фойдали ишга тенг қисмининг узатилган тўла иссиқлик миқдorigа нисбати билан ўлчанадиган катталики иссиқлик машинасининг термик ФИҚ де-йилади ва у ҳар донм бирдан кичик бўлади:

$$\eta_c = \frac{A}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} < 1.$$

Иссиқлик — материя ҳаракатининг бир шаклидир. Моддани ташкил этган заррачалар ва майдонлар мажмуаси материя ҳисобланади. Модданинг таркибий қисмига кирган электрон, атом, молекула, заррача, кристалл панжара тугунларида жойлашган атомларнинг мураккаб ҳаракати натижасида пайдо бўладиган энергия — иссиқликдир.

Молекуляр-кинетик назария нуқтан назаридан тushунтирилган бу ғояни XVIII асрда Д. Бернулли ва Вальтер ривожлантирди. XIX асрга келиб иссиқлик ҳақидаги ғояни Р. Майер, Ж. Жоуль, Р. Клаузиус, Д. Максвелл яна ҳам ривожлантирдилар.

Иссиқлик энергияси жисмларнинг ўзаро таъсирлашуви (контакти) натижасидир. Конвекция ва радиация (нур чиқариш усулларида жисмлар орасида температура фарқи мавжуд бўлгандагина иссиқлик ўтади. Чунки, иссиқлик термодинамик системада кечадиган жараёнларда қатнашадиган заррачаларнинг муҳит билан механик ва иссиқлик таъсирлашувининг энергетик тавсифи ҳисобланади. Системалараро температуралар фарқи ўринли бўлсагина иссиқлик энергия сифатида биринчи системадан иккинчисига ўтади, яъни $T_1 > T_2$, иккала системанинг температуралари бир хил, яъни $T_1 = T_2$ бўлса, иссиқлик узатилмайди; совуқ модда (система) дан иссиқ жисмга иссиқлик узатилмайди, яъни $T_1 < T_2$ бўлиши мумкин эмас.

¶ **Иш жисми** — энергияни бир турдан бошқа турга айлантириш жараёнида иш бажарадиган моддалардир. Иш жисми деганда ёқилғининг (бензин, мазут, керосин, соляр мойи, газ ва газлар аралашмаси, порох, сув буғи, зарралар ёки плазма оқими) ҳар хил турлари тушунилади. Масалан, ички ёнув двигателларида бензин буғи билан ҳаво аралашмаси иш жисми ҳисобланади. Иш жисми ҳисобига иссиқлик ҳосил қилинади, узатилади ва юртиқчаси совитгичга чиқарилади ҳамда маълум миқдорда иш бажарилади. Бу иссиқлик миқдорининг катталиги иш жисмининг иссиқлик бериш хусусиятига боғлиқ.

Техникада қуйидаги газлар энг кўп ишлатилади: O_2 — кислород, N_2 — азот, H_2 — водород, CO — углерод оксиди, CO_2 — карбонат ангидрид, CH_4 — метан (бот-

қоқ газ), H_2O — сув буғи, табиий ва сунъий газ, газлар аралашмаси — атмосфера ҳавоси.

Ҳар қандай иссиқлик двигателининг иш жараёнида иситгичнинг температураси T_1 совитгичнинг температураси T_2 дан катта, яъни $T_1 > T_2$ шарт бажарилганда ва ўринли бўлганда иш бажариш мумкин.

Иссиқликнинг узатилиш қонуниятига мувофиқ иситгич сирт совитгич сиртга бевосита тегиб, маълум иссиқлик миқдорини узатиб тургандагина q_1 иссиқлик миқдори совитгичга ўтади, аммо иш бажарилмайди. Иш бажарилиши учун иш жисми бўлиши шарт. Иситгич сифатида ёқилғининг ёниш маҳсулидан фойдаланилади. Кўпчилик ҳолатларда атмосфера ҳавоси ёки буғ машиналарида конденсатор совитгич вазифасини бажаради.

Термодинамик система. Ўзаро ва бошқа жисмлар билан энергия ва модда алмаша оладиган жисмлар мажмуи **термодинамик система** дейилади. Бирорта термодинамик система берилган бўлсин. Масалан, термодинамик система сифатида цилиндрдаги поршень каллагини устида жойлашган идеал газни ёки ҳаво ва ёқилғи аралашмасини олиш мумкин. Бундай термодинамик система параметрларини ўзаро таъсирлашув натижасида оз миқдорда бўлса ҳам ўзгартира оладиган жисм ташқи муҳит дейилади. Келтирилган мисолимизда идеал газни (иш жисмини) ўраб турган цилиндр деворлари ва поршень каллагининг устки юзаси ташқи муҳит бўла олади. Термодинамик системадаги жараён назорат сиртида юз беради. ИЕД (ички ёнув двигатели) цилиндри девори билан поршень каллагининг устки юзасидан ташкил топган сирт бунга мисол бўла олади. Термодинамик система назорат ҳажмида жойлашади ва шу ҳажмда термодинамик жараён (иш аралашмасининг ёниши) содир бўлади.

Термодинамик системада содир бўладиган ва унинг ҳолат параметрларидан ҳеч бўлмаганда биттаси ўзгариши билан боғлиқ бўлган ҳар қандай ўзгариш **термодинамик жараён** дейилади. Ташқи муҳит билан термодинамик системанинг ўзаро таъсирлашуви натижасида ўрганилаётган системанинг ҳолат параметрлари ўзгаради. Системанинг ҳолат параметрларини ифодалашда **ҳолат параметрлари** деб аталадиган физик катталар қабул қилинган.

Ҳолат параметрларига солиштирма ҳажм, босим ва температура (P , V , T) киради.

Берилган ҳажмдаги газга ташқаридан иссиқлик миқдори узатилса ёки ундан чиқарилса, системанинг бирданига учала параметри ёки бирортаси ўзгариши мумкин. Узатилиши зарур бўлган иссиқлик миқдори ўрнига газ эгаллаган ҳажмини камайтириб ё кенгайтириб, газнинг ҳолат параметрларини ўзгартириш мумкин. Чунки газ сиқилса исийди, аксинча, кенгайтирилса — совийди.

Идеал газ қонувларини ўрганишда баъзан идеал изолятор (мутлақо иссиқлик энергиясини ўтказмайдиган материал) тушунчасидан фойдаланилади.

Босим. Суюқлик ва газ молекулаларининг, плазма ё зарралар оқимининг идиш деворининг юза бирлигига узатган таъсир кучи катталиги босим дейилади:

$$P = \frac{F}{S} \left| \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \right| \quad (2)$$

Газ молекулалари хаотик (тартибсиз) ҳаракатланиши натижасида улар идиш деворларини узлуксиз бомбардимон қилиб, маълум куч импульсини (таъсирини) ҳосил қилгани ҳамда иссиқлик миқдорини идиш деворларига узатиб ёки ундан чиқариб туради. Ҳар қандай газ ўзи жойлашган ҳажмини тўлдириб, шу ҳажм ҳосил қилган идиш деворларига нормал йўналишда таъсир кўрсатади, яъни деворга босим беради. Босим СИ ўлчов бирлиги системасида паскалда ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$; $1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$; $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$) ўлчанади. Физика курсидан маълумки, молекуляр-кинетик назария нуқтан назаридан газ босими

$$P = \frac{2}{3} n \frac{mv^2}{2}, \text{ бунда } n — \text{бирлик}$$

ҳажмдаги молекулалар сони; m — молекулалар массаси; v — молекулаларнинг илгариланма ҳаракатидаги ўртача квадратик тезлик.

Термодинамик система параметри сифатида қабул қилинган босим абсолют босимдир. Энергияни бир турдан бошқа турга айлантиришда газ молекулаларининг нормал йўналишда таъсир узата олиш хоссасидан фойдаланиб, ундан иш жисми сифатида фойдаланилади. Шу мақсадда суюқлик олинганда унинг молекулалари тўғиз жойлашганлиги сабабли, таъсир газларга инсбатан жадалроқ узатилади.

Температура системанинг иссиқлик ҳолатини тавсифлайдиган асосий ҳолат параметрларидан бири. Жисм-

нинг исinganlik даражаси температура орқали ifодаланади. Жисм таркибидаги зарраларнинг тезлиги қанча катта бўлса, уларнинг кинетик энергияси ҳам шунча катта қийматга етади. Демак, температура модда таркибидаги зарраларнинг кинетик энергияси ўлчовидир.

Газнинг температураси газ молекулаларининг ўртача кинетик энергияси ўлчови бўлса, унда температурани энергия ўлчов бирлигида, яъни жоулда ўлчаш керак. Бундай ўлчов бирлигини (жоуль) техникада қўллаш ноқулай. Шу сабабли температура техникада градусда ўлчанади.

Термодинамик жараёнлардаги температура Кельвин (К) шкаласи бўйича ўлчанади. 1848 йили инглиз физиги лорд Кельвин томонидан термодинамик температура шкаласи фанга киритилди.

Л. Больцман идеал газ молекулаларининг тезликлар бўйича тақсимотини ўрганиб, температура модда таркибидаги зарраларнинг иссиқлик ҳаракати жадаллигининг ўлчови, деган хулосага келган. Шунинг учун ҳам иссиқлик ҳаракати жадаллигининг сои қиймати модда таркибидаги зарра (молекула)ларнинг ўртача кинетик энергияси билан боғланганлигининг математик ifодасини берган:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (3)$$

бунда, $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Ж/К — Больцман доимийси $mv^2/2$ — зарранинг кинетик энергияси.

Демак, классик статистик физика қонунига мувофиқ, термодинамик мувозанат ҳолатидаги учта эркинлик даражасига эга бўлган зарранинг ўртача кинетик энергиясини абсолют температура орқали ifодалаш мумкин:

$$T = \frac{2}{3} \frac{H}{k}. \quad (4)$$

Термодинамик температура шкаласининг «ноль» нуқтаси учун идеал газ молекуласининг тартибсиз ҳаракати гўёки тўхтайдиган температура қабул қилинган бўлиб, у абсолют ноль дейилади.

Абсолют температура идеал газ қонунияти нуқтаи назаридан қаралса, унда ўзгармас ҳажмдаги идеал газ босими шу газнинг абсолют температурасига мутаносибдир, яъни $P \approx T$. Шу ҳолат асосида газ термометр-

лари яратилган. Демак, температура бевосита ўлчанмайдиган катталиқ экан. Температура бошқа физик катталиқларни ўлчаш йўли билан аниқланади. Системига температурасини ўлчаш — бу газ ёки суюқлик ҳажмининг ўзгаришини ўлчаш демакдир. Бунга газ ёки суюқлик термометрлари мисол бўла олади. Система температурасини на фақат газ ёки суюқлик термометрлари ёрдамида, балки қаттиқ (кристалл, металл ва ш. к.) жисмларнинг физик хоссаларидан фойдаланиб маълум физик катталиқ (масалан, ЭЮК потенциаллар айирмаси)ларни ўлчаш орқали ҳам аниқлаш мумкин. Бунга термопаралар мисол бўла олади.

Халқаро ўлчов бирлиги системасида (СИ) температура Кельвин шкаласи (К) бўйича ўлчанади.

Кундалиқ ҳаётда, кўпроқ Цельсий (С) шкаласи қўлланилади. Цельсий шкаласидан Кельвин шкаласига қуйидаги муносабат орқали ўтилади:

$$T = t^{\circ} + 273,15.$$

Масалан, хона температураси Цельсий шкаласи бўйича 20°C бўлса, Кельвин шкаласида $T = t + 273,15 = 20^{\circ} + 273,15 = 293,15 \text{ K}$ бўлади.

Солиштирма ҳажм (v) — модданинг бирлик массаси эгаллаган ҳажм. Бир жинсли модданинг массаси m бўлса, унинг солиштирма ҳажми:

$$v = \frac{V}{m} \left| \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \right|. \quad (6)$$

Термодинамик система устувор ва ноустувор бўлиши мумкин: системанинг вақт мобайнидаги термодинамик параметрлари ўзгармас ва ҳамма нуқталарида бир хил бўлса, бундай система устувор система дейилади; аксинча, системанинг ҳар хил нуқталаридаги параметрлари ўзгарувчан қийматларга эга бўлса, у ноустувор система дейилади.

Изоляцияланган термодинамик система ташқи муҳитга иссиқлик энергиясини узатмайди ва ундан қабул қилмайди.

1.3 Системанинг ҳолат тенгламаси

Иш газининг ҳолати ўзгарганида унинг термодинамик параметрлари (P , V , T) ҳам мос равишда ўзгаради, яъни термодинамик системанинг мувозанати бузи-

лади. Термодинамик системанинг мувозанати унинг параметрлари орасидаги боғланиш функцияси шаклида ифодаланади ва у термодинамик системанинг ҳолат тенгламаси дейилади. Иш жиомининг (газ, сув буғи, суюқлик ва ш. к.) ҳажми, босими, температураси орасидаги боғланишни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$j(P, V, T) = 0. \quad (7)$$

Термодинамик система параметрининг ҳар бири учун бу функция яна бошқачароқ ифодаланади:

$$V = \Psi(P, T); P = \Psi(V, T); T = \Psi(V, P).$$

Модданинг хоссаларига мос равишда термодинамик системанинг ҳолат тенгламалари ҳам ўзгариши мумкин. Шунинг учун масала ечимини топишда термодинамик системани соддалаштириб, айрим шартларни киритиш усули билан ечим қидирилади. Масалан, идеал газ ёки реал газ ҳолат тенгламалари бир-биридан катта фарқ қилади.

Термодинамикада идеал газ сифатида, молекулалари ўзаро таъсирлашмайдиган хоссага эга бўлган модда қабул қилинган. Бундай хоссага эга бўлган модда зарралари моддий нуқта деб қаралади. Техникада реал газлар қўлланилади, улар паст босимларда идеал газларга ўхшаб кетади. Шунинг учун айрим ҳисоблашларда молекулалар орасидаги ўзаро таъсирлашув кучлари ва молекула эгаллаган ҳажм эътиборга олинмайди.

Физика курсидан маълумки, газ эгаллаган V ҳажмда N та молекула жойлашса, унда ҳажм бирлигидаги молекулалар сони $n = \frac{N}{V}$ бўлади. Шу молекулалар уйғотган босим, Больцман қонунига мувофиқ, $P = nkT = \frac{N}{V} kT$ ёки $\frac{PV}{T} = kN = \text{const}$ бўлади.

Идеал газнинг ҳолат тенгламасидан маълумки, 1 киломоль ихтиёрый газ массаси учун $\frac{PV}{T} = \mu K = 8314 \text{ Ж/кмоль}$ (француз физиги Б. Клапейрон тенгламаси). K — универсал газ доимийси.

Реал газдан термодинамик система сифатида фойдаланилганда газ молекулалари орасидаги тутунлиш кучларини ва газ молекуласининг ҳажминини эътибордан четда қолдириб бўлмайди.

Молекулалар орасидаги тутуниш кучларини ва молекула эгаллаган ҳақиқий ҳажмин ҳисобга олиб, Ван-дер-Ваальс реал газларнинг ҳолат тенгламасини қуйидагича ифодалаган:

$$P + \frac{a}{v^2} \left(V - b \right) = RT \quad (8)$$

бунда a — газ табиатига мос мутаносиблик коэффиценти; b — газнинг сиқилиши мумкин бўлган ҳажми.

Бу тенглама тажрибада ҳар доим ҳам қўйилган натижани бера олмайди. Бунга асосий сабаб газларда учрайдиган ассоциация ҳодисасидир.

Юқоридагилардан хулоса қилиб шунни айтиш мумкинки, термодинамик система мувозанатининг ўзгариши унга иссиқлик миқдорининг узатилиши ёки ундан чиқарилиши ҳамда механик таъсир ҳисобига кечади. Бу берилган газ ҳолатининг ўзгаришига унга q иссиқлик миқдорининг киритилиши (чиқарилиши) ёки унинг механик сиқилиши сабаб бўлади, деганидир.

Термодинамик системанинг бир параметри ёки айрим катталиклар комплекси ўзгармаган термодинамик жараёнлари: изохорик ($V = \text{const}$), изобарик ($P = \text{const}$), озотермик ($T = \text{const}$), адиабатик ($S = \text{const}$), политроп ($PV = \text{const}$) бўлиши мумкин.

Бу жараёнларни кейинроқ қараб чиқамиз.

II БОС. ТЕРМОДИНАМИКАНИНГ БИРИНЧИ ҚОНУНИ

2.1 Системанинг ички энергияси

Моддани ташкил этган зарраларнинг (атом, йон, молекула ва ш. к.) илгариланма, айланма, тебранма ҳаракатидаги кинетик ва потенциал (микрзарраларнинг ўзаро таъсирлашуви: атом, электрон қобиғи ва унинг ядроси ичидаги) энергияларининг алгебранк йиғиндис система (модда)нинг ички энергияси ҳисобланади. У модданинг термодинамик ҳолатини характерлайди. Ички энергия тушунчасини фанга 1850 йили В. Томсон киритган.

Молекуляр-кинетик назария нуқтаи назаридан моддани ташкил этган зарралар шарчалар шаклида ва уларнинг радиуслари 10^{-10} м тартибдаги катталиклари ташкил қилади деб қаралади. Бир грамм моддадаги зарралар сони $n = 10^{22}$ тагача етади. Масалан, 1 г сувда $3,3 \cdot 10^{22}$ молекула бор. Бу зарралар тартибсиз ҳара-

катланади. Зарралар, ўз радиусида, яъни молекула ёки атомдан чиқмайдиган чегарада ҳаракатланса, уларнинг ҳаракати иссиқлик тартибидаги ҳаракат бўлади. Демак, модда зарралари энергияларининг йиғиндиси нолдан фарқли бўлса, система (модда) мувозанат ҳолатдан чиққан бўлади.

Термодинамик система бир неча системачалардан ташкил топган бўлиши мумкин. Масалан, молекула ҳам ўзига хос система бўлиб, у атомлар (системачалар)дан ташкил топган. Атом ҳам молекуладай мустақил система, чунки у (зарралар — протон ва нейтрон) атом ядроси ва электрон қобиғида жойлашган электронлардан ташкил топган. Лекин термодинамиканинг макросистемасида атом ичкарисидаги (атом ички энергиясининг) ўзгаришларга эътибор берилмайди.

Зарраларнинг айланма, илгариланма, тебранма ҳаракати, яъни кинетик энергияси температуранинг функцияси бўлганлиги сабабли уларнинг ўзаро таъсирлашиш масофасининг ўзгариши модда (газ) эгаллаган ҳажмнинг ўзгаришига олиб келади. Демак, потенциал энергия ҳажмнинг функцияси экан.

Юқорида келтирилган фикрлардан модданинг ички энергиясини қуйидагича таърифлаш мумкин: ички энергия бевосита модда ҳолатининг функциясидир:

$$U = f(P, V); \quad U = f(P, T); \quad U = f(V, T). \quad (9)$$

Мураккаб системанинг солиштирма ички энергияси сифатида жисм (система) масса бирлигига тўғри келадиган энергия миқдори қабул қилинган:

$$U = \frac{W}{m} \left| \frac{Ж}{кг} \right|. \quad (10)$$

Ички энергиянинг ўзгариши термодинамик системада кечадиган жараёнлар турига боғлиқ бўлмасдан, шу системанинг бошланғич ва охири ҳолатларидаги энергияларига боғлиқ.

$$\Delta u = \int_1^2 du = u_2 - u_1 \quad (11)$$

Системада кечаётган термодинамик жараён айланма бўлса, унинг тўла ички энергиясининг ўзгариши нолга тенг, яъни

$$\oint du = 0, \quad \text{чунки } u_2 = u_1. \quad (12)$$

Модда бир термодинамик ҳолатдан иккинчисига ўтга-

нида унинг ички энергияси ўзгаради. Буни солиштирма ҳажм ва температура функцияси кўринишида ёзиш мумкин:

$$du = \left(\frac{du}{dT} \right)_V dT + \left(\frac{du}{dV} \right)_T dV. \quad (13)$$

$$du = \left(\frac{du}{dp} \right)_V dp + \left(\frac{du}{dV} \right)_p dV$$

$$du = \left(\frac{du}{dp} \right)_T dp + \left(\frac{du}{dT} \right)_p dT$$

Идеал газ молекулалари орасида ўзаро таъсирлашиш кучлари мавжуд эмаслиги ҳисобга олинса, унда газнинг ички энергияси идеал газ ҳажмига ва босимига боғлиқ бўлмайди, яъни

$$\left(\frac{du}{dV} \right)_T = 0; \left(\frac{du}{dp} \right)_T = 0. \quad (14)$$

Демак, идеал газнинг ички энергияси унинг термодинамик параметрларидан фақат абсолют температурага боғлиқ бўлар экан. У ҳолда, идеал газнинг ички энергияси температура бўйича олинган тўла ҳосилага тенг бўлади:

$$\left(\frac{du}{dT} \right)_p = \left(\frac{du}{dT} \right)_V = \frac{du}{dT}. \quad (15)$$

Термодинамик система бирор dq иссиқлик миқдори таъсири натижасида ташқи кучларга қарши dA иш бажарса, у ҳолда система ички энергиясининг ўзгариши қуйидагича бўлади:

$$du = u_2 - u_1 = dq - dA. \quad (16)$$

Агар система аввалги ҳолатига қайтса, унинг ички энергияси ўзгармайди, яъни

$$dq = dA.$$

Сийраклаштирилган газ молекулалари идеал газ молекулалари сингари жуда ҳам кам таъсирлашган-лиги сабабли, уларнинг ички энергияси ўзгаришини кинетик энергиясининг ўзгаришига тенг деб қабул қилиш мумкин. Шунинг учун бундай ҳолатдаги газ ички энергиясининг ўзгариши температурага боғлиқ. Шу шарт бажарилганда ~~бир моль газнинг ички энергияси~~ қуйидагича ифодаланади:

$$U = \frac{3}{2} kNT = \frac{3}{2} RT = C_V T, \quad (17)$$

бунда N — Авогадро сонн; k — Больцман доимийси; R — универсал газ доимийси; C_v — ўзгармас ҳажмдаги газнинг солиштирма иссиқлик сифими.

Термодинамик система сифатида танланган модданинг ички энергиясининг математик ифодасини модда турига мос равишда, турлича кўринишларда ёзиш мумкин (Физика курсига қаранг).

2.2. Модданинг кенгайишида бажарилган иш

Физика курсидан маълумки, системага бирор куч таъсир этганда, у ўзининг мувозанат ҳолатидан чиқади, яъни жисм бирор аниқ масофага кўчади, ўз ҳажминини ўзгартиради ва ҳ. к.

Термодинамик система сифатида цилиндрда жойлашган газ олиб, унга элементар dq иссиқлик миқдори узатилади. Узатилган dq иссиқлик таъсирдан бу газ молекулалари ҳаракати жадаллашиб P босим ҳосил қилади ва бу босим кучи билан S юзали поршень каллагига таъсир кўрсатиб, ўз ҳажминини ўзгартириши даврида поршенни бирор dl масофага силжитади ҳамда ташқи кучларга қарши элементар иш бажаради:

$$dA = PSdl = PdV. \quad (18)$$

Газнинг V_1 ҳажмидан то V_2 гача кенгайишида бажарилган тўла ишни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = P(V_2 - V_1). \quad (19)$$

Юқоридаги ифодадан кўриниб турибдики, ёпиқ термодинамик системада газнинг кенгайиши ҳисобига бажарилган иш босим билан ҳажм ўзгаришининг кўпайтмасига тенг.

Термодинамик системанинг бажарган иши мусбат ёки манфий ишорали бўлиши мумкин. Масалан, цилиндрдаги газ ташқи кучлар таъсиридан сиқилса, яъни поршень юқорига қараб ҳаракатланса, унда бажарилган иш манфий ($dA < 0$), аксинча, сиқилган газ поршенни пастга қараб итариши натижасида ўз ҳажминини кенгайтирса, унда система (газ)нинг бажарган иши мусбат ($dA > 0$) ишорали бўлади.

Демак, молекулалар ўлчами даражасида зарралараро, системалараро ва ташқи муҳит билан энергия алмашинувида термодинамик система иш бажармайди.

Термодинамик системани мувозанат ҳолатидан чиқариш учун унга маълум миқдордаги dq иссиқлиқни киритиш ёки ундан чиқариш керак. Ана шунда система параметрларидан (P , V , T) бири ўзгаради ва система ё мусбат, ё худ манфий ишорали иш бажаради.

СИ ўлчов бирлигида иш бирлиги қилиб Жоуль (Ж), техник системада — килограммометр (кГм) қабул қилинган.

2.3. Модданинг иссиқлик сифими

Турли хил моддаларни бир хил температурагача иситиш учун уларнинг ҳар бирига турлича миқдордаги иссиқлик энергиясини узатиш зарур бўлади. Бу ҳол модданинг агрегат ҳолатига ва тузилишига боғлиқ. Модда бирлик массасини 1° иситиш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори шу модданинг иссиқлик сифими дейилади. Бунда модда Δq иссиқлик миқдорини ютиши натижасида унинг температураси T_1 дан T_2 гача ортади. Модданинг ўртача иссиқлик сифими қуйидагича ифодаланади:

$$C = \frac{\Delta q}{T_2 - T_1}. \quad (20)$$

Моддани 1° иситиш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори унинг ҳақиқий иссиқлик сифими деб қабул қилинган:

$$C = \frac{\Delta q}{dT}. \quad (21)$$

Модданинг бирлик масса температурасини бир градус ўзгартириш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори солиштирма иссиқлик сифими дейилади. Солиштирма иссиқлик сифимини масса, ҳажм ва бошқа ўлчов бирликларида ифодалаш мумкин.

а) солиштирма масса иссиқлик сифими:

$$C_m = \frac{1}{m} \cdot \frac{\Delta q}{dT} \text{ Ж кг} \cdot \text{К}, \quad (22)$$

б) ўзгармас ҳажмдаги (1 м^3) моддага узатилган иссиқлик миқдорининг шу модда температурасини бир градус ўзгаришига нисбати билан ифодаланадиган физик катталиқ ҳажмий солиштирма иссиқлик сифими дейилади:

$$C_v = \frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta q}{dT}. \quad (23)$$

СИ ўлчов бирлигида $C_v \text{ Ж/м}^3 \cdot \text{К}$ билан ўлчанади.

Ўзгармас ҳажм ($V = \text{const}$) да кечадиган термодинамик жараёндаги система (газ) нинг солиштирма ҳажмий иссиқлик сифмини шу система ички энергиясидан абсолют температура бўйича олинган хусусий ҳо-сила шаклида ифодалаш мумкин:

$$C_v = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v \quad (24)$$

в) солиштирма моль иссиқлик сифми:

$$C_{\mu} = \frac{\mu}{m} \cdot \frac{\Delta q}{dT} \left| \frac{\text{Ж}}{\text{К моль} \cdot \text{К}} \right| \quad (25)$$

Модданинг ўртача иссиқлик сифми билан унинг ҳақиқий иссиқлик сифми орасида боғланиш мавжудлигини аниқлаш учун $dq = CdT$ асосида ўртача иссиқлик сифми ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$C = \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta q}{T_2 - T_1} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} CdT. \quad (26)$$

Модданинг иссиқлик сифми шу модданинг қандай термодинамик жараёнда система сифатида қатнашувига ҳам боғлиқ. Чулки система (модда) температурасининг ўзгариши унга узатилган иссиқлик миқдори ўзгармас бўлганида фақат термодинамик жараён турига боғлиқ бўлади. Шунинг учун ҳам системанинг иссиқлик сифмининг термодинамик жараён функцияси деб қараш мумкин. Турли-туман моддаларнинг бирлик массаси температурасини бир градус орттириш учун ҳар хил катталиктаги иссиқлик миқдори керак бўлади.

Бу ифодани идеал газ учун қуйидагича ёзиш мумкин:

$$C_v = \frac{dU}{dT}. \quad (27)$$

Ўзгармас босимли ($P = \text{const}$) газга узатилган Δq иссиқлик миқдорининг шу термодинамик система (газ) температурасининг ўзгаришига нисбати билан ифодаланган физик катталик ўзгармас босимдаги модданинг солиштирма иссиқлик сифми дейилади.

$$C_p = \frac{\Delta q}{dT}. \quad (28)$$

Системада ютилган Δq иссиқлик миқдори шу система температурасининг ортиши ҳисобига система (газ) эгаллаган ҳажмнинг ўзгаришига олиб келади.

Демак, системага келтирилган иссиқлик миқдори унинг ички энергиясини орттирибгина қолмасдан, система параметрларини ҳам ўзгартиради ва маълум миқдорда фойдали иш бажаради.

Р. Майер модданинг ўзгармас ҳажм ва босимда кечадиган жараёнлардаги солиштира иссиқлик сифимлари билан универсал газ доимийси орасидаги боғланишни ўрганиб, қуйидаги тенгламани чиқарган:

$$C_p = C_v + R \quad \text{ёки} \quad R = C_p - C_v. \quad (29)$$

Ҳар доим ўзгармас босим остида кечадиган (изобарик) жараёнда изохорик ($V = \text{const}$) жараёнга нисбатан кўпроқ иссиқлик миқдори сарфланади. Изохорик жараёнда системанинг бажарган иши нолга тенг, чунки система (идеал газ) нинг ички энергияси фақат абсолют температурага боғлиқ бўлиб, ҳажмга боғлиқ эмас. Шу са-

бабдан $\left. \frac{du}{dV} \right|_T = 0$. Демак, изохорик жараёнда система иш бажармайди, чунки $V = \text{const}$, аксинча, изобарик жараёнда система фойдали иш бажаради. Шунинг учун ҳам $C_p > C_v$.

Реал газлар учун $C_p - C_v > R$, чунки $P = \text{const}$ бўлган изобарик жараёнда система фақат ташқи кучларга қарши иш бажарибгина қолмасдан, молекулалар аро мавжуд бўлган ўзаро тутуниш кучларига қарши ҳам иш бажаради.

Демак, $P = \text{const}$ ва $V = \text{const}$ бўлган термодинамик жараёнларда реал газ иш бажариш ва унинг ички энергиясини орттириш учун идеал газга нисбатан унга кўпроқ иссиқлик миқдори сарфланар экан.

Статистик физика методларидан фойдаланиб, кўпчилик моддаларнинг иссиқлик сифимларини назарий усул билан ҳисоблаш мумкин. Бунинг учун молекула-

нинг битта эркинлик даражасига тўғри келадиган $\frac{1}{2}kT$ энергиясидан фойдаланилади ва бир, икки ва кўп атомли газнинг бир моль миқдорига мос келувчи иссиқлик сифимлари топилади. Масалан, айрим моддаларнинг $t = 0^\circ\text{C}$ да идеал газ ҳолатидаги иссиқлик сифимлари 1-жадвалда келтирилган.

Газнинг номи (формуласи)	Эркинлик даражалари сони	Моляр иссиқлик сифими, $\frac{\text{кЖ}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$	$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$
Гелий (He)	3	12,60	1,660
Аргон (Ar)	3	12,48	1,660
Кислород (O_2)	5	20,96	1,397
Водород (H_2)	5	20,30	1,410
Азот (N_2)	5	20,80	1,400
Метан (CH_4)	6	26,42	1,315
Аммиак (NH_3)	6	26,67	1,313
Карбонат ангидрид (CO_2)	6	27,55	1,302

2.4/ Термодинамика биринчи қонунининг талқини

Физика курсидан маълумки, А. Эйнштейн қонунига ($E=mc^2$) мувофиқ ҳар қандай энергия массага мутаносиб бўлиши мумкин. Бунини умумийроқ қилиб масса ва энергиянинг сақланиш ва айланиш қонуни деб юритилади.

Термодинамиканинг 1-қонуни масса ва энергия сақланиш ва айланиш қонунининг иссиқлик ҳодисаларига қўлланилишининг хусусий ҳолидир. Чунки, энергия бордан йўқ бўлмайди, йўқдан бор бўлмайди, фақат бир турдан иккинчи турга айланади.

Ҳар қандай термодинамик системанинг параметрлари шу системага ташқаридан маълум миқдордаги Δq иссиқлик миқдори киритилганида (ё чиқарилганида) ўзгаради. Система мувозанат ҳолатидан чиқади ёки мувозанат ҳолатига қайтади.

Термодинамик система (бирорта қаттиқ модда) Δq иссиқлик миқдорини ютгандан сўнг унинг параметрларидан айримлари (босими, ҳажми, температураси) ўзгаради, яъни ҳажми dV га, температураси dT га ортади. Агар қаттиқ жисм ўрнига газ ёки суюқлик олинса, унда босим P , ҳажм V ва температура T ҳам ўзгарувчан бўлади.

Демак, системанинг температураси dT га ортса, уни ташкил этган зарраларнинг кинетик энергияси ҳам ортади; ҳажми dV га катталашганида зарралар орасидаги тутуниш кучлари камайса-да, потенциал энергияси ортади. Чунки зарралар оралиғидаги масофа катталашади.

ди. Системада бундай ҳолатнинг пайдо бўлиши унинг ички энергияси du ни орттиради. Ҳар қандай система ташқи муҳит таъсирида бўлади, у билан таъсирлашади. Система мувозанат ҳолатига қайтиши учун ташқи муҳитга бирор босим P билан таъсир кўрсатиб, ташқи кучларга қарши иш бажаради.

Демак, энергиянинг сақланиш қонуни асосида термодинамиканинг биринчи қонунини қуйидагича таърифлаш мумкин: *Системага узатилган иссиқлик миқдори шу система ички энергиясининг ўзгаришига ва ташқи кучларга қарши бажарилган фойдали ишга сарфланади.*

Термодинамика биринчи қонунининг математик ифодасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\Delta q = du + \Delta A. \quad (30)$$

Системада ўтаётган термодинамик жараён турига қараб, қонуннинг математик ифодасидаги учала ҳадларнинг қийматлари мусбат ва манфий ишорали ҳамда нолга тенг бўлиши мумкин. Бу тўғрида термодинамик жараёнларни ўрганаётганингизда батафсилроқ танишиб olasiz.

2.5. Энтропия

Энтропия (юнонча entropia — айланиш, ўзгариш) термодинамик системанинг ҳолат, функцияси бўлиб, у s ҳарфи билан белгиланади:

$$ds = \frac{dq}{T} \left| \frac{TK}{K} \right|. \quad (31)$$

Энтропия термодинамик система билан ташқи муҳитнинг ўзаро иссиқлик алмашинуви жараёнининг кечиш йўналишини ифодалайди. Термодинамик системанинг ташқи муҳит билан таъсирлашувининг хусусиятига қараб квазистатик (қайтувчан, мувозанатли) жараёнларда энтропия қиймати мусбат ва манфий ишорали ҳамда нолга тенг бўлиши мумкин, яъни $ds > 0$ — модда иситилаяпти; $ds < 0$ — модда совитилаяпти; $ds = 0$ — модда мувозанат ҳолатида.

Энтропия тушунчасини фанга 1865 йил Клаузиус киритган. СЎ ўлчов бирлигида унинг ўлчови Жоуль/К. Масса бирлигида олинган модда учун s нинг ўлчов бирлиги Жоуль/кг·К.

Энтропия ҳам термодинамик системанинг ҳолат функ-

цияси эканлиги сабабдан уш система параметрлари ҳолатининг функцияси сифатида ифодалаш мумкин:

$$s = \xi_1(P, V); \quad s = \xi_2(P, T) \quad s = \xi_3(V, T). \quad (32)$$

Системанинг энтропиясини шу системанинг абсолют температураси нолга нитилганда аниқлаб бўлмайди. Бундай ҳолат ўринли бўлганда назарий усул билан энтропиянинг абсолют қийматларини ҳам *изожараёнларда* ҳисоблаб топиш мумкин эмас. Бундай қийинчиликдан фақат тажриба йўли билан аниқланган натижалар орқали чиқиш мумкин.

В. Нернст (1906 й.) ўта паст температураларда моддалар хоссаларини ўрганиб, тадқиқотлар натижаларига таяниб, *абсолют ноль температурада кечадиган ҳар қандай изотермик жараёндаги энтропиянинг ўзгариши нолга тенг деган хулосага келди*. Бу ҳолат ўринли бўлганда системанинг параметрлари (P , V ва ш. к.) ўзгариши мумкин.

Бунга В. Нернст принципи ёки термодинамиканинг учинчи қонуни дейилади.

Модданинг абсолют температураси нолга яқинлашса, моддани ташкил этган зарралар ҳаракати деярли тўхтайди. Демак, термодинамик системанинг абсолют температураси нолга яқинлашади, аммо мутлақо нолга эришилмайди, яъни модда ҳар қанча ўта паст температурага совирилганда ҳам зарраларнинг ҳаракати мутлақо тўхтамайди, фақат айрим назарий масалалар счминини топишда шундай шарт қабул қилинади.

М. Планк (1912 й.) мазкур масалани статистик физика асосида ўрганиб, жараён характери квант хоссаларига бориб тақалишини назарий жиҳатдан исботлади. Амалийётда энтропиянинг абсолют қийматидан эмас, балки унинг термодинамик жараёндаги ўзгаришидангина фойдаланилади, яъни:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} \quad (33)$$

Энтропия тўғрисида ҳар бир термодинамик жараёнда қатнашган система (модда) ҳолатлари ўрганилганда аниқ ва тўлароқ маълумотларга эга бўламиз.

2.6. Энтальпия

Энтальпия (юнонча *enthalpo* — иситман) термодинамик системанинг ҳолат функцияси бўлиб, у ёки H ҳарфи билан белгиланади.

Термодинамик система ички энергияси u билан шу система босими P нинг ҳажм V га кўпайтмасининг йиғиндиси **энтальпия** дейилади.

Энтальпия энергия ўлчов бирлиги (Жоуль) да ўлчанади:

$$i = u + PV. \quad (34)$$

Тенгламадан кўриниб турибдики, унга кирган катталиклар термодинамик системанинг ҳолат функцияси ҳисобланади, шунинг учун i ни ҳам функция кўринишида ҳолат параметрлари орқали ифодалаш мумкин:

$$i = f_1(P, V); \quad i = f_2(V, T); \quad i = f_3(P, T).$$

Ҳисоблашларда солиштирма энтальпия ифодаси $h = \frac{i}{m}$ дан фойдаланилади ва у СИ ўлчов бирлигида (Жоуль/кг) ўлчанади. Энтальпия термодинамик системанинг ҳолат функцияси бўлганлиги учун унинг тўла дифференциали di бўлади. Демак, энтальпиянинг ўзгариши система қатнашаётган жараён турига боғлиқ бўлмасдан, шу системанинг бошланғич ва охириги ҳолатларига боғлиқ бўлади, яъни

$$\Delta i = \int_1^2 di = i_2 - i_1. \quad (35)$$

Энтальпия энергия нуқтан назаридан қараб чиқилса, $E = i$ бўлади, чунки

$$E = u + PV = i,$$

бунда u — системанинг ички энергияси; PV — системанинг ташқи кучларга қарши бажарган иши бўлиб, системага таъсир кўрсатадиган ташқи босим кучининг потенциал энергиясини ифодалайди.

Демак, *термодинамик системанинг энтальпияси шу система ички энергияси билан ташқи босим кучларининг потенциал энергиялари йиғиндисига тенг экан.*

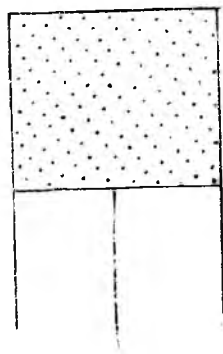
Термодинамик жараёнларда энтальпиянинг эгаллаган ўрнини *изожараёнларни ўрганганимизда* қараб чиқамиз.

2.7. Термодинамик жараёнлар

Изожараёнларни ўрганиш асосида ҳар бир термодинамик жараёнда бажарилган ишни, система ички энергиясининг ўзгаришини, сарфланган иссиқлик миқдорини

аниқлаш билан чекланмасдан, системанинг ҳолат параметрлари орасидаги боғланиш ҳам қараб чиқилади.

Изохорик жараён. Системанинг ўзгармас солиштирма ҳажми $V = \text{const}$ да юз берадиган термодинамик (физик ва кимёвий) ҳодисалар мажмунига *изохорик жараён* дейилади. Жараёнини тасаввур қилиш ва англаш мақсадида мисол тариқасида цилиндрининг энг юқори қисми ва поршень каллагининг юзаси билан чегараланган ҳажм (ёниш камерасига)га иш моддаси (газ ва ҳаво аралашмаси)ни киритиб, поршеньни қўзғалмас ҳолатда сақлаймиз. Шундай вазиятда $V = \text{const}$ бўлади (1-расм).



1-расм. Ўзгармас ҳажмдаги газ.

Ташқаридан q иссиқлик миқдори киритилгунга қадар газнинг параметрлари P_1 , V_1 , T_1 бўлади, иссиқликни қабул қилгандан сўнг эса P_2 , V_2 , T_2 . Икки ҳолат учун ҳолат тенгламасини тузамиз:

$$P_1 V_1 = R T_1,$$

$$P_2 V_2 = R T_2.$$

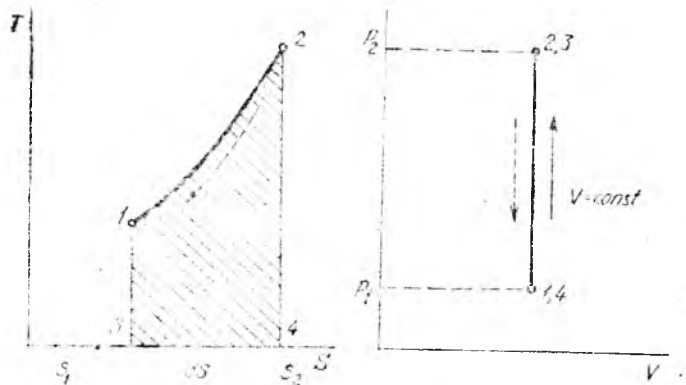
Тенгликларнинг нисбатларидан Шарль қонуни ифодаси ҳосил бўлади, чунки $V_1 = V_2 = \text{const}$.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{ёки} \quad P_1 T_2 = P_2 T_1. \quad (38)$$

Демак, изохорик жараёнларда босимлар нисбати абсолют температуралар нисбатларига тенг бўлади, яъни босим ўзгариши бу жараёндаги абсолют температура ўзгаришига тўғри мутаносибдир.

Изохорик жараён диаграммасини PV , TS координатларида ифодалаймиз (2-расм). Жараёни термодинамиканинг биринчи қонуни асосида қараб чиқамиз. Термодинамиканинг биринчи қонунидан маълумки, системага узатилган иссиқлик миқдори q шу система ички энергиясининг ўзгариши ($u_2 - u_1$) га ва ташқи иш (A) га сарф бўлади, яъни

$$q = (u_2 - u_1) + A. \quad (39)$$



2-расм. $V=\text{const}$ бўлганда жараёнинг PV ва TS диаграммалари.

Бу тенгликни дифференциал шаклда ифодалаб, изохорик жараёнда газ бажарган элементар ишни унинг термодинамик параметрларидан фойдаланиб ёзамиз:

$$dq = du + dA = du + PdV. \quad (40)$$

Изохорик жараёнда газ ҳажмининг ўзгариши $dV = V_1 - V_2 = 0$, ўз навбатида $dA = PdV = 0$ бўлганлигидан:

$$dq = du \quad (41)$$

Демак, системага берилган dq иссиқлик миқдори шу система ички энергиясининг ўзгаришига сарфланад экан.

Термодинамик системанинг изохорик жараёндаги ички энергиясининг ўзгаришини иссиқлик сифими орқали ифодалаймиз.

Маълумки, бир киломоль модда массасини 1° иситиш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори шу модданинг иссиқлик сифими дейилади. Юқоридагиларни эътироф этиб, (40) га (27) ни қўйиб изохорик жараёндаги иссиқлик миқдорини топамиз:

$$dq_V = C_V dT + PdV = C_V dT = du. \quad (42)$$

Изохорик жараёнда $T_2 > T_1$ бўлса, иссиқлик системага узатилади $(+q)$, $T_2 < T_1$ бўлганда иссиқлик чиқади $(-q)$. Шу жараёндаги энтропиянинг ўзгаришини аниқлаймиз. Юқоридаги (42) тенгликни $\int$ га бўлиб, кейин

Клапейрон тенгламасидан фойдаланиб соддалаштирамиз:

$$\frac{dq}{T} = C_V \frac{dT}{T} + P \frac{dV}{T} \quad (43)$$

ёки

$$\frac{dq}{T} = C_V \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V}, \quad (44)$$

чунки $\frac{P}{T} = \frac{R}{V}$.

Бунда $\frac{dq}{T} = dS$ — термодинамик системанинг ҳолат функцияси.

$$\text{Демак, } dS = S_2 - S_1 = C_V \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V} \quad (45)$$

система (газ) нинг ҳолати чексиз кичик ўзгаргандаги энтропия ўзгаришини ифодалайди.

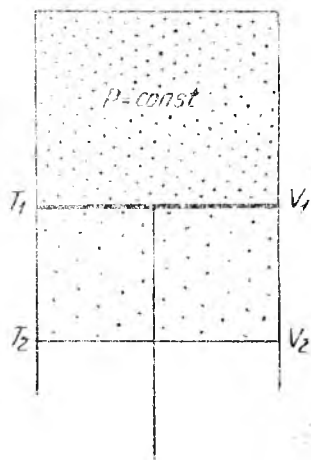
Бу тенгликни интеграллаб, газ ҳолатининг охириги ўзгариши учун энтропия ўзгарувчанлиги ифодасини ҳосил қиламиз:

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (46)$$

Изохорик жараёнда $V = \text{const}$ бўлганлиги учун тенгликнинг ўнг томонининг иккинчи қисми нолга тенг бўлади. Унда изохорик жараёнда энтропиянинг ўзгаришини қуйидагича ёзамиз:

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (47)$$

Энди, изохорик жараёнда газ бажарган ишнинг катталигини аниқлаймиз. Термодинамиканинг биринчи қонунидан маълумки, $V = \text{const}$ бўлганда $V_2 - V_1 = 0$ ва $PdV = 0$ бўлган. Демак, изохорик жараёнда газ иш бажармайди. Унга узатилган dq иссиқлик миқдори термодинамик система (газ) ички энергиясининг ўзгаришига сарфланади.



3-расм. $P = \text{const}$ бўлгандаги газ.

Изобарик жараён. Ўзгармас босим остида кечадиган термодинамик ҳодисалар мажмуи изобарик жараён дейилади. Бу термодинамик жараёнда $P = \text{const}$ бўлиб, газнинг V , T параметрлари киритилган q иссиқлик миқдори ҳисобига ўзгариши мумкин. Юқорида келтирилган мисолдаги цилиндр поршенининг устки юзаси ва цилиндрининг шифти билан чегараланган ҳажм (ёниш камераси) га иш жисми (газ) ни киритамиз ва унга q иссиқлик миқдорини узатамиз. Бунда газнинг ҳажми V_1 дан V_2 гача, температураси T_1 дан T_2 гача ўзгаради. Бу ўзгариш жараёнида поршень ўзининг мувозанат ҳолатидан чиқади, яъни пастга қараб ҳаракатланади (3-расм). Ҳар пккала ҳолат учун жараённинг ҳолат тенгламаларини ёзамиз:

$$P_1 V_1 = RT_1; P_2 V_2 = RT_2.$$

Ҳолат тенгламалари нисбатидан Гей-Люссак қонуни-нинг ифодасини ҳосил қиламиз:

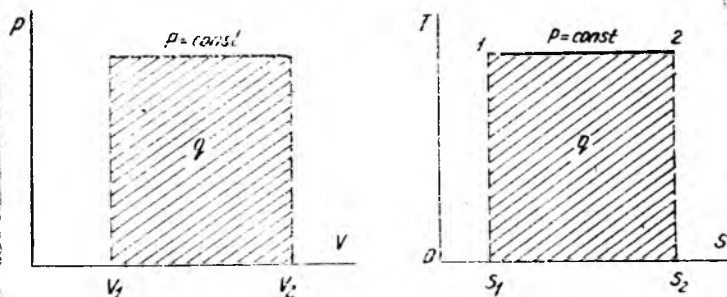
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{ёки} \quad V_1 T_2 = V_2 T_1. \quad (48)$$

Изобарик жараён диаграммасини PV ва TS координатларида тасвирлаймиз (4-расм).

Изобарик жараёнда системага узатилган иссиқлик миқдорини солиштира иссиқлик сифми орқали изохорик жараёндагидек усулдан фойдаланиб ёзамиз:

$$q_p = C_p (T_2 - T_1). \quad (49)$$

Изобарик жараёнда энтропиянинг ўзгаришини кўриб чиқамиз. Бунда, худди изохорик жараёндаги усулдан фойдаланиб, асосий тенгламаларни топамиз.



4-расм. $P = \text{const}$ бўлганда жараённинг PV ва TS диаграммалари.

$dq = C_V dT + PdV$ ни T га бўлиб, ҳолат тенгламаси $PV = RT$ асосида айрим соддалаштиришлардан сўнг ёза оламиз:

$$\frac{dq}{T} = C_V \frac{dT}{T} + R \frac{dT}{T} = (C_V + R) \frac{dT}{T}. \quad (50)$$

Тенглик (50) ни интеграллаб, 1 кг газ ҳолатининг охириги ўзгариши учун энтропия ўзгарувчанлигини топамиз:

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{T_2}{T_1} = (C_V + R) \ln \frac{T_2}{T_1} = C_P \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (51)$$

Майер тенгламаси $C_P - C_V = R$ дан фойдаланиб, моляр иссиқлик сғимлари айирмаси $\mu C_P - \mu C_V = \mu R$ дан $R_0 =$ — универсал газ доимийсини топиш мумкин: $\mu R = R_0 = 8314 \text{ Ж/моль} \cdot \text{К}$.

Изобарик жараёндаги термодинамик системанинг бажарган ишнинг катталигини жараён бошланishiдаги ва охиридаги ҳажмлар айирмасининг босимга кўпайтмаси шаклида ёзамиз ва уни бошлангич ва охириги ҳолатлар оралигида интеграллаймиз:

$$A = \int_V dA = \int_1^2 PdV = \int_1^2 R dT = R(T_2 - T_1). \quad (52)$$

Агар температуралар фарқи 1° бўлса, изобарик жараёнда термодинамик системанинг бажарган иши универсал газ доимийси қийматига тенг бўлади:

$$A = R. \quad (53)$$

Демак, изобарик жараёнда термодинамик системага узатилган иссиқлик миқдори асосан шу система ички энергиясининг ортишига ва оз қисми ташқи механик иш бажарилишига сарф бўлар экан. Бундай жараён буғ машиналарида, дизель двигателларида ва қозонларнинг ўтхоналарида учрайди.

Термодинамик системага узатилган иссиқлик миқдорини энthalпия орттирмаси тушунчасидан фойдаланиб аниқлаймиз.

Системага узатилган иссиқлик миқдорини бирор икки нуқта (графикдаги) оралигида кўриб чиқамиз ва охириги ўзгариш учун ёзамиз:

$$q = (u_2 - u_1) + \int_1^2 PdV. \quad (54)$$

Бунда $PdV = d(PV) - VdP$ эканлиги асосида системага узатишган иссиқлик миқдорининг ифодаловчи тенгликни қуйидагича ёза оламиз:

$$\begin{aligned} \text{ёки} \quad dq_p &= du + d(PV) - Vdp \\ dq_p &= d(U + PV) - Vdp. \end{aligned} \quad (55)$$

Юқоридан маълумки, $u + PV = i$ — энтальпия эканлиги асосида (55) ни изобарик ҳолат учун ёзамиз:

$$dq_p = di - Vdp \quad (56)$$

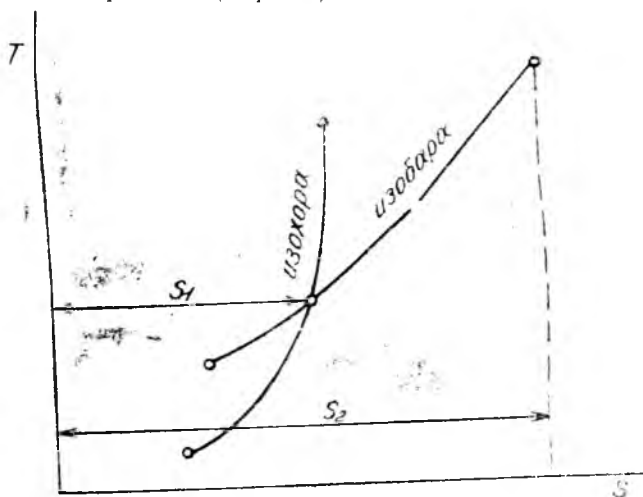
Термодинамик системага узатишган иссиқлик миқдори $P = \text{const}$ бўлганда, $VdP = 0$ бўлади. Шунинг учун энтальпия қийматининг катталиги иссиқлик миқдорига тенг, яъни

$$dq_p = di \quad \text{ёки} \quad q_p = i_2 - i_1. \quad (57)$$

Демак, системага узатишган иссиқлик миқдори энтальпиянинг ўзгаришига тенг экан.

TS — диаграммада изохора ва изобаранинг жойлашуви.

Тўғри бурчакли TS координата системасида термодинамик система ҳолатининг график усулдаги тасвири TS диаграмма дейилади. Абсцисса ўқида солиштирма энтропия (системанинг масса бирлиги энтропияси — S) ва ордината ўқида — абсолют температура T жойлаштирилади (5-расм).



5-расм. Изохора ва изобаранинг TS координатада жойлашуви.

Бундай координаталарда изохорик ва изобарик жараёнларнинг графиги юқорига қараган парабола бўлиб, улар бир-биридан фарқ қилади, чунки дифференциал тенгламалари нолдан фарқлидир, яъни

$$\left(\frac{dT}{dS}\right)_p = \frac{T}{C_p} > 0 \text{ ва } \left(\frac{dT}{dS}\right)_v = \frac{T}{C_v} > 0.$$

$C_p > C_v$ бўлганлиги сабабли изохора графиги изобарага нисбатан тикроқ бўлади. Демак, жараёнларнинг энтропияси ҳам ўзаро фарқли бўлади, яъни

$$(S_2 - S_1)_p > (S_2 - S_1)_v$$

TS — диаграммалар айланма жараёнлардаги термодинамик ҳодисалар таҳлилида кенг қўлланилади.

Демак, термодинамик системаларга бир хил миқдордаги иссиқлик энергияси берилса ҳам энтропиянинг ўзгариши изохорик жараёнда изобарик жараёнга нисбатан тикроқ ўзгаради.

Изотермик жараён

Ўзгармас ($T = \text{const}$) температурада содир бўладиган термодинамик жараён изотермик жараён дейилади. Бу жараёндаги термодинамик системани $T = \text{const}$ ҳолат учун қараб чиқамиз.

Системага ташқаридан бериладиган q иссиқлик миқдори унинг ҳолатини ўзгартиради, система ҳолатларининг тенгламаларини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$P_1 V_1 = RT_1; \quad P_2 V_2 = RT_2.$$

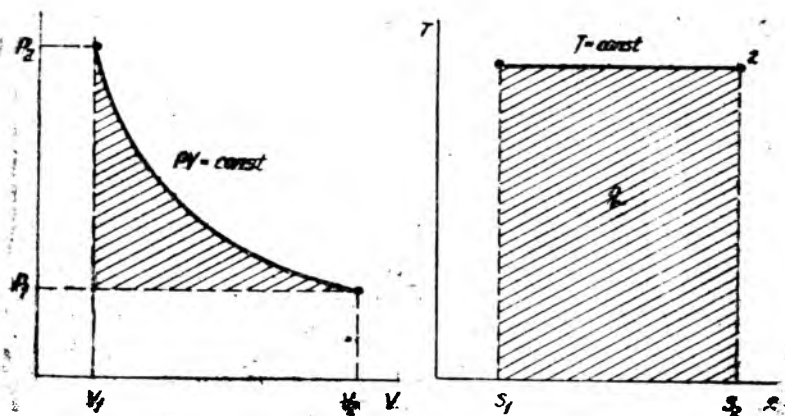
$T = \text{const}$ бўлганлиги учун $T_2 = T_1$. Бойль-Мариотт қонунининг ифодаси система ҳолат тенгламаларининг нисбатидан топилади:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \text{ ёки } P_1 V_1 = P_2 V_2 \dots P_n V_n = \text{const}. \quad (59)$$

Ўзгармас температурадаги берилган газ массаси босимининг ҳажмига кўпайтмаси ўзгармас катталиқдир. Изотермик жараённинг PV , TS координатадаги диаграммаси гиперболадан (6- расм) иборат. Система ички энергиясининг ўзгариши $du = 0$, чунки $u = \text{const}$. Термодинамик системага узатишган иссиқлик миқдорини термодинамиканиннг биринчи қонунини ёзиб, унинг таҳлилидан аниқлаймиз:

$$dq_T = C_v dT + PdV. \quad (60)$$

Бу тенглик изотермик жараён асосида қараб чиқилса,



6-расм. Изотермик жараёниги PV ва TS диаграммалари.

$T = \text{const}$ бўлганлиги учун система температурасининг ўзгариши $dT = T_2 - T_1 = 0$. Унда $C_v dT = 0$ бўлади, чунки $u = \text{const}$.

Демак, системага узатишган иссиқлик миқдори dq системанинг P , V ва T параметрларини ўзгартиради, яъни бу иссиқлик миқдори газнинг босими ва ҳажмини ўзгартриб, ташқи таъсир кучига қарши механик иш бажаришга сарфланади:

$$dq_r = PdV = dA. \quad (61)$$

Ихтиёрий иккита ҳолат ораллиғида газнинг кенгайишида бажарилган ишни аниқлаймиз:

$$\begin{aligned} A &= \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = RT(\ln V_2 - \ln V_1) \\ \text{ёки} \quad A &= RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \end{aligned} \quad (62)$$

Системанинг P ва V параметрлари изотермик жараёнда $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ боғлиқлигини назарга олиб, (62) тенгликни босим орқали ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned} A &= RT \ln \frac{P_1}{P_2} \\ \text{ёки} \quad P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} &= P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned} \quad (63)$$

Изотермик жараёнда газнинг изотермик кенгайишдаги энтропиясининг ўзгаришини (61) тенгликни аниқ ҳолатлар оралиғида интеграллаб аниқлаймиз:

$$dq_T = \int_{S_1}^{S_2} T dS = \int_{S_1}^{S_2} P dV = A$$

ёки

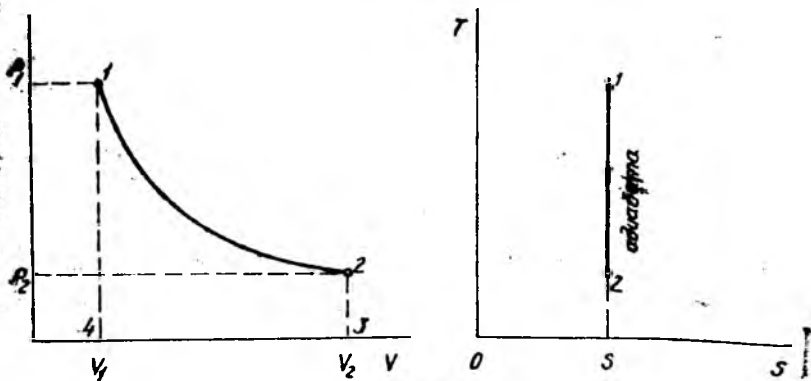
$$A = T \int_{S_1}^{S_2} dS = T(S_2 - S_1) \quad (64)$$

Изотермик жараёнда системанинг бажарган иши абсолют температура билан энтропия ўзгаришининг кўпайтмасига тенг экан.

Адиабатик жараён

Иш моддаси ташқи муҳит билан иссиқлик алмашмаган ҳолда унда кечадиган термодинамик жараён адиабатик жараён дейилади. Бундай жараёнда иш моддаси кенгайганда ёки сиқилганда унинг температурасининг ўзгариши фақат системанинг ички энергияси ҳисобига содир бўлади. Ташқаридан системага энергия узатилмайди ва ундан чиқарилмайди, яъни $dq=0$. Реал шароитда реал жараёнлар мувозанатда бўла олмайди, шунинг учун адиабатик жараён ҳам бўлиши мумкин эмас. Аммо тез кечадиган жараёнларни адиабатик деб қараш мумкин. Маълумки, иш жисми билан ташқи муҳит ўртасида содир бўладиган иссиқлик алмашинуви пайтидаги иссиқлик миқдорини узатиш, тез кечадиган жараёнларда, жуда ҳам кам бўлади. Шунинг учун бундай жараёнлар адиабатик деб қаралади.

Ташқаридан системага киритилган иссиқлик миқдори $dq_A=0$ бўлганлиги учун, шу система энтропиясининг ўзгариши $ds = \frac{dq}{T} = 0$ бўлади. Демак, системада кечадиган жараён адиабатик бўлса, бундай термодинамик системанинг энтропияси ўзгармасдир, яъни $S = \text{const}$. Адиабатик жараёнда термодинамик системанинг учала параметри P , V , T бирданига ўзгариши мумкин. Фараз қилайлик, цилиндрдаги поршень каллаги юзаси ва ёниш камерасининг шифти юзаси билан чегараланган, унча катта бўлмаган ҳажмда (ёниш камерасида) 1 кг газ сиқилган бўлсин. Шу иш (гази) жисми ташқи муҳитдан мутлақо изоляцияланган деб фараз қилайлик. Иш жис-



7-расм. Газ адиабатик кенгайишнинг PV ва TS диаграммалари.

нинг поршень каллаги юзасига берган P босими ташқи куч F га тенг ва система мувозанатда, яъни $P=F$ бўлади.

Бу адиабатик жараёнда қатнашаётган иш жисмининг бошланғич ҳолатдаги параметрлари P_1, V_1, T_1 бўлса, босим кучи ҳисобига поршень пастга силжигандан кейинги параметрлари P_2, V_2, T_2 бўлади (7-расм).

Адиабатик жараён учун термодинамиканинг биринчи қонунини, газ (иш жисми) параметрларидан фойдаланиб, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$dq_A = C_V dT + PdV.$$

Лекин $dq_A = 0$ бўлгани учун уни қайта ёзамиз:

$$C_V dT - PdV = 0. \quad (65)$$

dT ни аниқлаш учун системанинг (иш жисмининг) ҳолат тенгламасини ёзиб, сўнгра $PV = RT$ ни дифференциаллаймиз:

$$PdV + VdP = RdT \quad (66)$$

Бундан $dT = \frac{PdV + VdP}{R}$ ни топиб, уни (65) тенгликка қўямиз:

$$C_V \frac{PdV + VdP}{R} + PdV = 0. \quad (67)$$

R —универсал газ доимийсини алмаштириш учун (67) тенглик қисмларни $\frac{C_V}{R}$ га бўламиз ва қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\left(1 + \frac{R}{C_V}\right) PdV + VdP = 0 \quad (68)$$

Майер тенгламаси ($C_p - C_v = R$) дан R ни топиб, уни (68) тенгликка қўямиз ва ихчамлаймиз:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{C_p - C_v}{C_v}\right) PdV + VdP &= 0, \\ \left(1 + \frac{C_p}{C_v} - 1\right) PdV + VdP &= 0, \\ \frac{C_p}{C_v} PdV + VdP &= 0, \\ KPdV + VdP &= 0, \end{aligned} \quad (69)$$

бунда $K = \frac{C_p}{C_v}$ — ўзгармас босим остидаги иш жисмининг солиштирма иссиқлик сифимини ўзгармас ҳажмдагисига нисбатан неча марта катталигини кўрсатувчи коэффициент бўлиб, у адиабата кўрсаткичи дейилади. (69) тенгликнинг ўнг томонини PV га бўлиб, соддалаштирамиз:

$$K \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0. \quad (70)$$

(70) тенгликни $K = \text{const}$ шарти асосида интегралласак $\ln V^K + \ln P = \text{const}$ ёки $\ln PV^K = \text{const}$ ҳосил бўлади. Жараёнда қатнашаётган газ параметрлари орасидаги боғланишни ифодаловчи адиабатик жараён тенгламасини қуйидагича ёзамиз:

$$PV^K = \text{const} \quad (71)$$

ёки газ ҳолатлари учун

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^K, \quad (71)$$

(71)¹ га P_1 нинг қийматини газнинг ҳолат тенгламасидан топиб ўрнига қўямиз. Унда

$$\frac{RT_1}{P_2 V_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^K \text{ ёки } P_2 = \frac{RT_2}{V_2}$$

асосида қуйидагиларни ёзамиз:

$$\frac{RT_1}{V_1} \cdot \frac{V_2}{RT_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^K$$

$$\frac{T_1 V_2}{T_2 V_1} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^k$$

ёки

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} \quad (72)$$

(71)' ва (72) тенгликларни босим учун ёзамиз:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (73)$$

(71), (72), (73) формулалар газ ҳолатининг параметрлари орасидаги боғланишни ифодаловчи адиабатик жараён тенгламаларидир.

Адиабатик жараёнда газнинг бажарган иши катталиги иш гаги ички энергиясининг ўзгаришига тенг, яъни

$$du + PdV = 0 \quad \text{ёки} \quad du = -PdV. \quad (74)$$

Газ ҳажмининг ортиши натижасида унинг босими ва температураси камаяди, сиқилганда эса, аксинча. Бундай жараён фақат газ ички энергиясининг ортиши ёки камайиши ҳисобига содир бўла олади.

Системага (иш газига) узатилаётган иссиқлик $dq = 0$ бўлганлиги учун термодинамиканинг биринчи қонунини қуйидагича ёзамиз:

$$PdV = -C_V dT. \quad (75)$$

(75) тенгликни жараён температуралари T_1 ва T_2 га мос келувчи ораликда интеграллаймиз:

$$A = \int_{T_1}^{T_2} C_V dT = C_V (T_2 - T_1) = - \int_{V_1}^{V_2} PdV \quad (76)$$

Энди (74), (75), (76) тенгликлар асосида қуйидагини ёзамиз:

$$A = u_1 - u_2 = C_V (T_1 - T_2).$$

Чунки системанинг бошланғич ички энергияси унинг охириги ҳолатдаги энергиясидан катта ($u_1 > u_2$) бўлади, яъни системанинг иш бажариши жараёнида унинг ички энергияси камайиб боради.

Р. Майер тенгламаси ва адиабата кўрсаткичига, яъни $C_V = \frac{R}{k-1}$, $k = \frac{C_p}{C_V}$ ва $C_p = kC_V$ га асосланиб, адиабатик жараён учун иш ифодасини ёза оламиз:

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

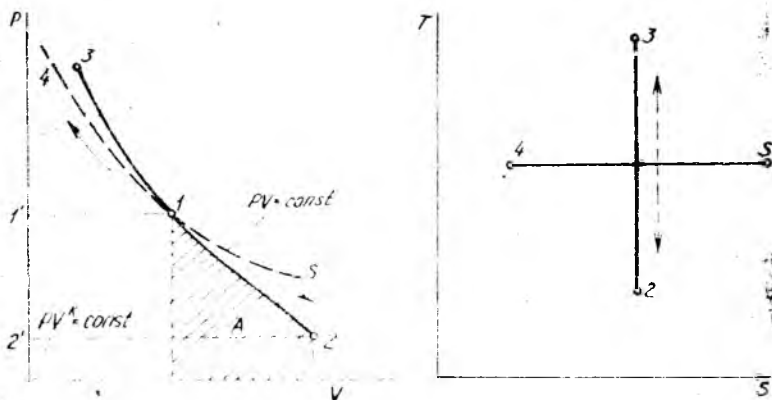
ёки

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{k-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} \right] = \\ &= \frac{P_1 V_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \end{aligned}$$

PV ва TS диаграммаларда изотерма ва адиабатанинг жойлашуви

Фараз қилайлик, ўлчамлари бир хил бўлган иккита цилиндрга бир хил концентрацияли газ аралашмаси (1 кг) жойлаштирилсин, уларнинг бирини изотерма, иккинчисини адиабата бўйича параметрларини ўзгартирайлик (8-расм).

PV диаграммадаги изотермик жараёни бирор ихтиёрий 1 нуқтага нисбатан кўриб чиқамиз. Изотермик жараён бўйича газ кенгайса, унинг босими адиабатага нисбатан секинроқ, газ сиқилганида эса, адиабатик жараёндагига нисбатан яна ҳам секинроқ ўзгарар экан. Адиабатик жараён графигининг тиклигига асосий сабаб, ўрганилаётган газ сиқилганда ҳам, кенгайганда ҳам, унга ташқаридан иссиқлик энергияси берилмаса ҳам газ ҳажмининг ортиши ҳисобига унинг ички энергияси камаяди, яъни температураси тушади; худди шундай, газ



8-расм. PV ва TS диаграммаларда изотерма ва адиабатанинг жойлашуви.

сиқилганда, унинг ҳажмининг камайиши натижасида, газнинг ички энергияси ортади, яъни температураси кўтарилади. Шунинг учун $P_{ад.} > P_{изот.}$

Изотермик жараён $T = \text{const}$ шартга мувофиқ ўтганлиги сабабли, унинг TS диаграммасидаги изотерма графиги абсцисса ўқига параллел бўлади (8-расм, 4 ва 5 нуқталар оралиғи). Демак, газ изотермик сиқилса (1—4 чизиги) ё кенгайса (1—5 чизиги), мос равишда унинг энтропияси ҳам ортади ёки камаяди.

Адиабатик жараёнда эса системага узатилган иссиқлик $qd = 0$ бўлганлиги сабабли қайтар жараёнда энтропиянинг ўзгариши нолга тенг бўлади, энтропия эса $S = \text{const}$. Шунинг учун энтропиянинг ўзгариши жараёнинг TS диаграммасидаги 1 нуқтасига нисбатан график шаклда ифодаланса, газ адиабатик сиқилганда системанинг температураси 1—3 чизиги бўйича, система ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига ортади; кенгайганда эса 1—2 чизиги бўйича камаяди. Системанинг энтропияси ўзгармасдан қолади.

Политроп жараён

Система (газ) нинг солиштира иссиқлик сиғими ($C = \text{const}$) ўзгармас бўлган термодинамик жараён политроп жараён дейилади. Политроп грекча *poli* — кўп ва *tropos* — йўл сўзларидан олинган бўлиб, турлитуман бурилиш, кўп бурилиш деган маънони билдиради. Системанинг солиштира иссиқлик сиғими ўзгармасда, унинг ҳолат параметрлари ўзгаради.

Политроп жараён тенгламаси қуйидагича ифодаланadi:

$$PV^n = \text{const}, \quad (78)$$

бунда $n = \frac{c - C_p}{c - C_v}$ — политроп кўрсаткичи; c — политроп жараёнда қатнашаётган системанинг солиштира иссиқлик сиғими; C_p ва C_v — жараёнда қатнашаётган система (газ) нинг ўзгармас босим ва ҳажмдаги солиштира иссиқлик сиғимлари.

Политроп кўрсаткичи $-\infty$ дан $+\infty$ гача бўлган қийматларни ўз ичига олади.

Политроп жараёнинг иссиқлик сиғими $c = \text{const}$ бўлгандаги ҳолати учун термодинамиканинг биринчи қонунини қуйидагича ёза оламиз:

$$dq = cdT = C_v dT + PdV$$

ёки

$$(c - c_V) dT = PdV. \quad (79)$$

Идеал газнинг ҳолат тенгламасини дифференциаллаймиз ва ҳосил бўлган ифодани (79) тенгликка қўйиб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$(c - c_V) \frac{PdV + VdP}{R} = PdV.$$

ёки

$$(c - c_V) \frac{PdV + VdP}{R} - PdV = 0. \quad (80)$$

Айрим соддалаштиришлардан сўнг (80) тенгламани қуйидаги кўринишга келтирамиз:

$$(c - c_p)PdV + (c - C_V)VdP = 0. \quad (81)$$

(81) ифодани ҳадма-ҳад $(c - C_V)PV$ га бўламиз ва ихчамлаймиз. Ҳосил бўлган тенгламани интеграллаб қуйидаги кўринишга келтирамиз:

$$\frac{(c - c_p)PdV}{(c - c_V)PV} + \frac{(c - c_V)VdP}{(c - c_V)PV} = 0,$$

$$\frac{(c - c_p)dV}{(c - c_V)V} + \frac{dP}{P} = 0,$$

$$\frac{(c - c_p)}{(c - c_V)} \ln V + \ln P = 0.$$

ёки

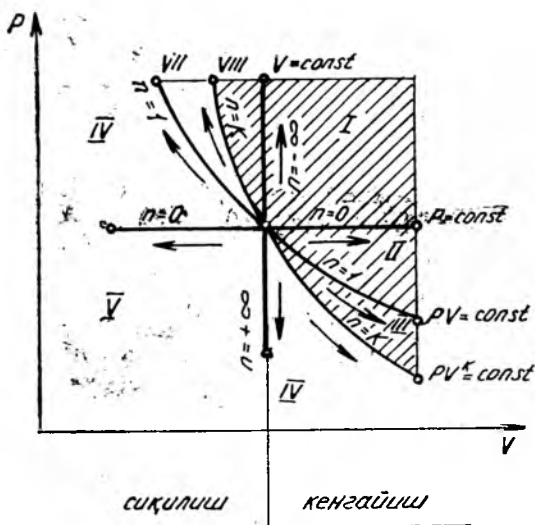
$$PV^{\frac{c - c_p}{c - c_V}} = PV^n = \text{const}. \quad (82)$$

Топилган (82) тенглама политроп жараён тенгламаси дейилади:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_V} \text{ — политроп кўрсаткичи.}$$

Демак, политроп жараёндаги системанинг ҳолат параметрлари ўзгарса ҳам унинг политроп кўрсаткичи ўзгармасдан қолар экан.

Политроп жараёни юқорида қараб чиқилган изожараёнларнинг умумлашган ҳоли деб қараш мумкин (9-расм). Чунки политроп кўрсаткичи қийматини $-\infty$ дан $+\infty$ гача оралиқда ўзгартириб, изохорик, изобарик, изотермик ва адиабатик жараёнлар тенгламаларини ҳо-



9-расм. Политропик жараёшнинг PV диаграммасы.

сил қилиш мумкин. Бунинг учун аввал политроп жараёшнинг солиштирма иссиқлик сифмининг адиабата ва политроп кўрсаткичи ҳамда изохорик ва изобарик жараёнларнинг солиштирма иссиқлик сифимлари билан боғланиш ифодасини топамиз:

$$n(c - c_V) = (c - c_p) \text{ ёки } nc - nc_V = c - c_p,$$

$$nc - c = nc_V - c_p, \text{ бундан, } c(c - 1) = nc_V - \frac{c_p}{c_V} \cdot c_V$$

бўлганлигидан $c(n - 1) = nc_V - kc_V$
ёки

$$c(n - 1) = c_V(n - k).$$

У ҳолда

$$C = \frac{c_V(n - k)}{(n - 1)}. \quad (83)$$

Агар $n = 0$ бўлса, унда $c = c_V k = c_p$ бўлади. У ҳолда политроп жараён тенгламаси изобарик жараён тенгламаси кўринишига келади:

$$PV^0 = \text{const ёки } P = \text{const, чунки } V^0 = 1.$$

Юқоридаги (83) тенгламанинг чап ва ўнг томонларини c_V га бўламиз ҳамда соддалаштирамиз.

$$\frac{c}{c_{V1}} = \frac{n-k}{n-1} \cdot \frac{c_V}{c_V} \text{ ёки } \frac{n-k}{n-1} - 1 = \frac{c}{c_V} - 1.$$

Унда

$$\frac{(n-k)-(n-1)}{n-1} = \frac{c}{c_V} - 1; \quad \frac{1-k}{n-1} = \frac{c}{c_V} - 1. \quad (84)$$

Агар $n = \infty$ бўлса, $\frac{c}{c_V} - 1 = 0$ ёки $c = c_V$ бўлади. У ҳолда политроп жараён тенгламаси изохора ($V = \text{const}$) тенгламасига айланади. Агар $n = 1$ бўлса, $c = \infty$ бўлади. Унда политроп жараён тенгламаси изотермик жараён тенгламаси $PV = \text{const}$ кўринишига келади. Агар $n = k$ бўлса, $c = 0$ бўлади ва жараён адиабатик ҳисобланади, яъни $PV_k = \text{const}$.

Политроп чизигидаги исталган иккита нуқта параметрлар (P , V ва T) орасидаги боғланишни ифдалаш учун политроп жараён ва Клапейрон тенгламаларидан фойдаланиб, қуйидаги ифодани ёзиш мумкин:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (85)$$

Бу ифодалар асосида системанинг исталган ҳолатлари-ни ифдалаш мумкин бўлади. Политроп жараёнда система ҳолатининг ўзгаришида бажарилган ишни (62) кўринишида ёзиш мумкин. Босим ифодасини система ҳолат тенгламасидан топиб, уни (62) тенгламага қўйиб иш ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P_1 V^n \frac{dV}{V^n} = P_1 V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = \frac{P_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right] = \\ = \frac{P_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (86)$$

Термодинамик система сифатида идеал газ қабул қилинса, политроп жараёнда бажарилган иш тенгламасининг абсолют температура, босим ва ҳажм билан боғланган ифодасини, идеал газнинг ҳолат тенгламасидан фойдаланиб, қуйидаги кўринишга келтириш мумкин:

$$A = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{P_1 V_1}{n-1} \left[1 - \frac{T_2}{T_1} \right] = \frac{1}{n-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) \quad (87)$$

Политроп жараёнда системага келтирилган ёки ундан чиқарилган иссиқлик миқдорини система ички энер-

гиясининг ўзгаришидан фойдаланиб аниқлаш мумкин. Бунинг учун, аввал термодинамиканинг биринчи қонуни ифодасидаги ички энергияни ва ишни системанинг солиштирма иссиқлик сифими ва абсолют температураси ҳамда политроп кўрсаткичи билан боғланишини ёзамиз:

$$q = C_v(T_2 - T_1) + \frac{R}{1-n}(T_2 - T_1). \quad (88)$$

Маълумки, система ички энергиясининг ифодаси (17) ни T_1 ва T_2 температуралари оралиғида интеграллаб, иссиқлик миқдорини аниқлаш мумкин:

$$q = C(T_2 - T_1) \quad (89)$$

Политроп жараёнда қатнашаётган идеал газнинг иссиқлик сифими ифодаси (83) ни (89) тенгламага қўйиб ҳосил қиламиз:

$$q = C_v \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1). \quad (90)$$

Демак, *политроп жараёнда системага келтирилган иссиқлик миқдори шу система абсолют температурасининг ўзгаришига сарфланар экан*. Шунинг учун C_v , k , n ўзгармас бўлганда $C = \text{const}$ бўлади.

Политроп жараёнда энтропиянинг ўзгаришини қуйидаги тенгламаларни:

$$\left. \begin{aligned} dS &= \frac{dq}{T} = C_v \frac{dT}{T} + R \frac{dV}{V}, \\ dS &= \frac{dq}{T} = C_p \frac{dT}{T} - R \frac{dP}{P}, \\ dS &= \frac{dq}{T} = C_v \frac{dP}{P} + C_p \frac{dV}{V} \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

интеграллаб аниқлаш мумкин:

$$\left. \begin{aligned} S_2 - S_1 &= C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1}, \\ S_2 - S_1 &= C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}, \\ S_2 - S_1 &= C_v \ln \frac{P_2}{P_1} + C_p \ln \frac{V_2}{V_1} \end{aligned} \right\} \quad (92)$$

Политроп жараён энтропиясининг ўзгаришини унинг солиштирма иссиқлик сифими орқали ҳам ифодалаш мумкин:

$$ds = c \frac{dT}{T} = C_v \frac{n-k}{n-1} \frac{dT}{T}.$$

Бу ифодани интегралласак, у қуйидаги кўринишга келадим:

$$S_2 - S_1 = C_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (93)$$

Политроп кўрсаткичи ифодасини тенгламага қўйиб соддалаштирамиз:

$$S_2 - S_1 = C_v (n-k) \ln \frac{V_1}{V_2}$$

ёки

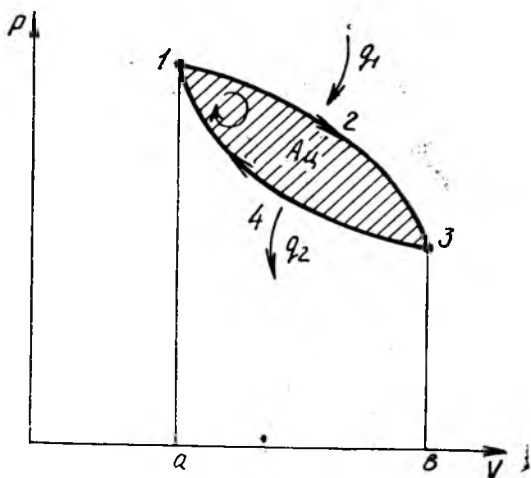
$$S_2 - S_1 = \frac{C_v}{n} (n-k) \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (94)$$

Демак, жараён энтропиясининг ўзгарувчанлиги система-нинг солиштирма иссиқлик сифимига, политропик ва адиабатик иссиқлик сифимига, политропик ва адиабатик кўрсаткичларига ҳамда жараённинг охириги ва бошланғич параметрлари нисбатларининг логарифмларига боғлиқ экан.

III. 606. ТЕРМОДИНАМИКАНИНГ ИККИНЧИ ҚОНУНИ

3.1. Айланма цикл

Термодинамик жараёндаги система иш бажариши учун унга даврий равишда маълум миқдордаги иссиқлик энергияси ёки иш жисми узатиб турилиши ва ишга тўла айланмасдан қолган иссиқлик миқдори системадан ташқарига (совиткичга) узатилиши керак. Шунда цикл даврий равишда такрорланади. Иш жисми сифатида фақат битта модда қўлланилса, у ҳолда модда аввал кенгайди ва маълум миқдордаги ишни бажаради, сўнгра яна сиқилади, кейин бошланғич мувозанат ҳолатига қайтади. Цикл қайтадан такрорланади. Ички ёнув двигателини термодинамик жараёнлар кетма-кет ва даврий равишда кечадиган иссиқлик машинасига мисол тариқасида келтириш мумкин. Бундай турдаги двигателга ҳар доим янги-янги иш моддаси ёки иссиқлик миқдори кетма-кет узатиб турилади ҳамда иссиқликнинг иш бажармаган қисми совиткичга (атмосферага)



10-расм. Айланма цикл.

чиқариб юборилади. Бирорта ҳам машина бир марта киритилган иш жисми билан абадий ишлайдиган иссиқлик машиннасига мисол бўла олмайди. Фақат бир марта киритилган иш жисми билан узлуксиз (даврий равишда) ишлайдиган машина яратилган эмас ва бундай машинанинг бўлиши ҳам мумкин эмас. Лекин унга яқинроқ бўлган қурилмалар мавжуд бўлиб, уларда иш моддасини дастлабки мувозанат ҳолатига қайтариш учун, кенгайиб иш бажариб бўлган иш моддаси ташқи куч (энергия) таъсирида қўшимча иш бажариб, сиқилади. Шунда модда дастлабки ҳолатига қайтади. Бундай цикллар айланма жараёнларда кузатилади. Бунга МГД генераторининг (берк схемаси) идеал циклини мисол тариқасида кўрсатиш мумкин. Бундай циклда, албатта, моддани сиқиш учун сафланган иш миқдори унинг кенгайишида бажарилган фойдали ишдан анча кичик бўлиши керак. Бундай даврий такрорланадиган айланма жараёнининг PV диаграммасини қуйидагича тасвирлаш мумкин (10-расм). Иш моддаси q_1 иссиқлик миқдорини олгандан сўнг 1, 2, 3 чизик бўйлаб кенгайиб мусбат, 3, 4, 1 эгри чизиги бўйича эса q_2 иссиқлик миқдорини системадан советкичга чиқариш жараёнида манфий иш бажаради. Бу ишнинг миқдори a , 1, 2, 3, b , a нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Манфий

ишнинг миқдори эса $a, 1, 4, 3, в, a$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Демак, фойдали ишнинг қиймати $1, 2, 3, 4, 1$ нуқталар ҳосил қилган каттакли майдонча юзасига сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади, яъни

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

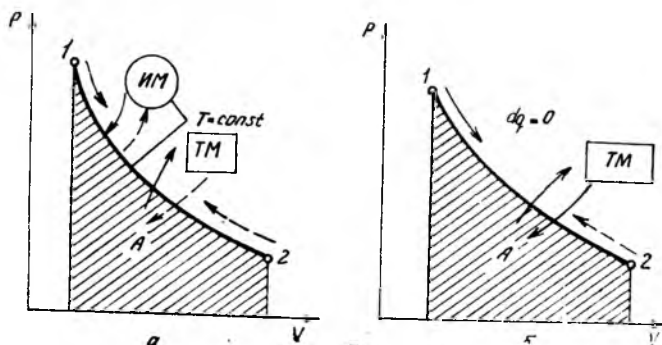
ёки бу тенгламаларни ҳамда-ҳад қўшиб чиқсак

$$q_1 - q_2 = A_1 - A_2 = A_{\text{ц}} \quad (95)$$

$A_{\text{ц}}$ — циклниң бажарган иши.

Жараён қайтар ва қайтмас бўлиши мумкин. Термодинамик жараёндаги асосий куч консерватив (эластик, кулон, гравитация) бўлганда жараён қайтар бўлади. Термодинамик жараённинг охири ҳолатидан бошланғич ҳолатига тескари йўналишда кетма-кет ҳолатлар орқали ўтиши мумкин бўлган жараён қайтар жараён дейилади. Бундай жараённинг PV диаграммасида газ ҳажмининг кенгайиш графиги сиқилиш графиги билан устма-уст тушади (11-расм, а). Фақат жараёнлар йўналишлари билан фарқ қилади. Масалан, кенгайиб иш бажариб бўлган газ, ташқи кучлар таъсирисиз, ўз ҳажмини ўз-ўзидан камайтириб бошланғич ҳолатига қайтса, бу қайтар жараён бўлади.

Демак, системага ташқаридан қанча иссиқлик миқдори берилган бўлса, шунча миқдордаги иссиқлик ташқарига чиқади. Аммо бундай жараён амалда учрамайди. Иш жисми даврий равишда бериб турилиши ҳисобига ишлайдиган ички ёнув двигателларидаги жараённи қайтар жараёнга мисол қилиб келтириш мумкин.



11-расм. Қайтар изотермик (а) ва адиабатик (б) жараёнлар:
ИМ — иссиқлик манбаи; ТМ — ташқи муҳит.

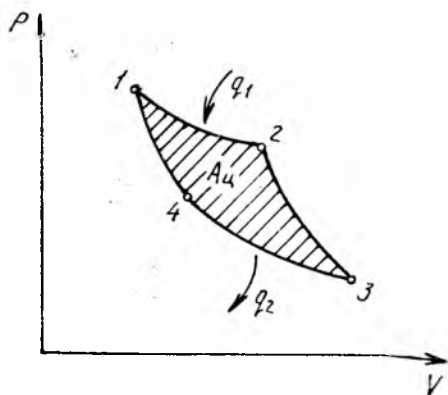
Ўзгармас температурада кечадиган термодинамик (изотермик) жараёнда ҳамда ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмайдиган ва алмашилмайдиган жуда секин кечадиган адиабатик жараён (11-расм, б) қайтар жараёнга мисол бўла олади. Бундай жараёндаги модданинг кенгайиш ва сиқилиш графиклари устма-уст тушади, йўналишлари эса қарама-қарши бўлади.

Термодинамик система ўзининг охириги ҳолатидан қайтар жараёнга тескари йўналишда, кетма-кет ҳолатлардан ўтиб ҳеч бўлмаганда битта ҳолатни ўтмасдан, бошланғич ҳолатига қайта олмаса, бундай жараён қайтмас жараён дейилади. Масалан, сув буғи кенгайиб иш бажариб бўлгандан сўнг ўз-ўзидан сиқилиб, яна ўзининг бошланғич ҳолатига кела олмайди.

3.2. Карно цикли

Карно цикли мантиқан устувор ва мазмунан содда бўлиб, у иккита изотерма ва иккита адиабатадан ташкил топган (12-расм).

Системага ундаги T_1 температура иситгич (иссиқлик манбаи) дан q_1 иссиқлик миқдори узлуксиз келтирилиб туриши ҳисобига ўзгармас сақланади. Системада кечадиган жараён ўзгармас ($T = \text{const}$) температурада содир бўлади. Қолдиқ (иш бажармаган) иссиқлик миқдори q_2 системадан узлуксиз равишда ташқи муҳит — совиткичга чиқарилади. q_2 иссиқлик миқдори ҳам



12-расм. Карно цикли: q_1 — системага киритилган ва q_2 — ташқи муҳитга чиқарилган иссиқлик миқдорлари.

$T_2 = \text{const}$ температурада узатилади. Шунинг учун q_1 нинг ишораси мусбат, q_2 ники манфий деб қабул қилинади.

Система ҳолати кескин ўзгарганида (газ кенгайганида ёки сиқилганида) ташқи муҳитдан мутлақо изоляцияланган, яъни $dq=0$ бўлиши шарт. Шу шарт бажарилса, системада кечадиган жараён адиабатик бўлади. Карно циклининг диаграммаси 12-расмда тасвирланган. Француз инженери Карно Никола Леонар Садн 1824 йилда «Оловнинг ҳаракатлантирувчи кучи ҳақида мулоҳазалар» асарида иссиқлик ва ишнинг ўзаро бир-бирига ўзгариши тўғрисидаги масала ечимини тўғри топган. Ҳозирги кунда ҳам бу ечим натижаси ўз кучини йўқотган эмас. Диаграммадан маълумки, 1, 2 нуқталар оралиғида системага келтирилган иссиқлик миқдори

$$q_1^+ = \int_1^2 \Delta q = \int_1^2 \Delta u + \int_1^2 P dV = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (96)$$

бўлса-да, система сифатида идеал газ олинганида, унинг изотермик жараёнда ички энергиясининг ўзгариши $du = u_1 - u_2 = 0$ бўлади. Шунинг учун газнинг бажарган иши

$$A_1 = \int_1^2 P dV = RT_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} = RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (97)$$

системага киритилган q_1^+ иссиқлик миқдорига тенг бўлади. Цикл диаграммасининг 3, 4 нуқталари оралиғида системадан q^- иссиқлик миқдори ташқи муҳит (совиткич) га ўзгармас T_2 температурада чиқарилади. Бу ҳолатда системанинг q_2^- иссиқлиги иш бажаришга сарфланади. Бу ишнинг катталиги сарфланган q_2^- иссиқлик миқдорига тенг бўлади.

$$q_2 = \int_3^4 \Delta q = RT_2 \ln \frac{V_1}{V_2} = A_2. \quad (98)$$

Бажарилган иш ишораларини аниқлаш мақсадида циклининг 4, 1 ва 2, 3 нуқталари оралиғида кечадиган адиабатик $\Delta q = 0$ жараёнларни ҳам қараб чиқамиз.

Адиабатик жараёнда система ташқи муҳит билан иссиқлик алмашмайди. Бу ҳолат учун термодинамика биринчи қонуни ифодасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$C_v dT + P dV = 0. \quad (99)$$

Иш моддаси сифатида идеал газ олинб, шу газ адиабатик сиқилса (4, 1 нукталар), унинг ички энергияси ортади. Демак, газ таъсирида иш бажарилса, унинг ички энергияси ва абсолют температураси ортар экан.

Идеал газнинг ҳолат тенгласидан T ни топамиз:

$$T = \frac{PV}{R} = \frac{PV}{C_p - C_v}. \quad (100)$$

Соддалаштириш учун (99) тенгликни ҳадма-ҳад $C_v dT$ га бўламиз:

$$\frac{dT}{T} + \frac{P}{C_v T} dV = 0. \quad (101)$$

Босим қийматини (100) тенгликдан топиб (101) га қўйиб, ихчамлаймиз ва $\frac{C_p}{C_v} = k$ қилиб белгилаб қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\frac{dT}{T} + (k-1) \frac{dV}{V} = 0. \quad (102)$$

(102) тенгламани интеграллаб ва потенциаллаб адиабатик жараён тенгласини ҳосил қиламиз:

$$TV^{k-1} = \text{const} \quad (103)$$

Бу тенгламани цикл учун қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\text{а) } T_1 V_2^{k-1} = T_2 V_3^{k-1}; \quad \text{б) } T_1 V_1^{k-1} = T_2 V_4^{k-1} \quad (104)$$

(104) тенгламаларни ҳадма-ҳад ўзаро бўлиб, қуйидаги тенгликни оламиз:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (105)$$

ёки

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{V_3}{V_4}. \quad (106)$$

Демак, циклнинг ФИК ни юқоридаги тенгламалардан фойдаланиб қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_t = \frac{q_1^+ - q_2^-}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} \quad (107)$$

Термик ФИК формуласи (107) ни (96), (98), (106) тенгламалар асосида системанинг абсолют температураси орқали қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (108)$$

(108) тенглама фақат қайтар цикллар учун тўғри.

Демак, Карно циклининг термодинамик ФИК ишла-тилаётган иссиқликнинг хоссасига боғлиқ бўлмасдан фақат иссиқлик манбалари абсолют температуралари-нинг қуйи ва юқори қийматларига боғлиқ бўлар экан.

3.3. Термодинамика иккинчи қонунининг талқини

Термодинамиканинг иккинчи қонуни *иссиқлик дви-гательлари фикнинг $\eta > 1$ бўла олмаслиги тўғрисида бўлиб, даврий, ягона иссиқлик манбадан ишлайдиган абадий (II тартибли) двигателни яратиб бўлмаслигини исботлайди.*

Термодинамика иккинчи қонунининг асосини Сади Карно 1824 йили ўз тадқиқотлари натижаларида баён этди. Термодинамиканинг иккинчи қонунини Р. Клаузиус (1850 й.) қуйидагича таърифлади: *иссиқлик энергияси ишга айланиш жараёнида тўғалигича ишга айланмайди ва иссиқлик совуқ системадан иссиқ системага ўз-ўзидан ўта олмайди.*

Система температураси иссиқликнинг узатилишини таъминлайдиган асосий термодинамик параметр ҳисобланади. Шунинг учун ҳаракатлантирувчи асосий куч си-фатида температура қабул қилинади. Мана шу куч фа-қат температуралар фарқи бўлгандагина пайдо бўлади ва бу фарқ қанча катта бўлса, куч ҳам шунча катта бў-лади. Демак, иш бажарувчи система температураси со-виткичга нисбатан юқори бўлиши шарт. Системадан со-виткичга чиқарилган иссиқлик миқдорини ҳеч вақт иш-га айлантириб бўлмади, чунки, Р. Клаузиус таърифига мувофиқ, совуқ манбадан иссиқлик энергияси иссиқ ман-бага ўз-ўзидан ўтмайди. Ишга айланмаган қолдиқ ис-сиқлик энергиясидан қайтадан фойдаланиб бўлмайди, шунинг учун ҳам иссиқлик двигателига узатилган иссиқ-лик миқдори 100% фойдаланишга айланмайди. Иссиқ-лик энергиясининг асосий қисmini ишга айлантириш учун циклда ҳеч бўлмаганда битта совиткич бўлиши шарт.

4.1. Иссиқликнинг узатилиши ва алмашинуви

Иссиқликнинг температураси юқори бўлган жисм сиртидан температураси пастроқ бўлган жисмга ўтиш ҳодисаси иссиқликнинг узатилиши дейилади.

Термодинамиканинг иккинчи қонунига мувофиқ бу ҳодиса ўз-ўзидан содир бўлади, яъни иссиқлик иссиқроқ жисмдан совуқроқ жисмга ўтади. Бунда иссиқлик оқимининг вектори T_2 дан T_1 га йўналган бўлади, чунки $T_2 > T_1$. Иссиқ жисм муҳитга ўзининг температураси жисмларни ташкил этган зарраларнинг иссиқлик ҳаракати даражаси қийматига тенг бўлган температурага (энергия $E = 0,025$ МэВ) қадар ўздан иссиқликни чиқараверади. Иссиқлик ҳамма турдаги муҳитда (суюқ, қаттиқ, газ, вакуум) тарқалади. Натижада иссиқ жисм совийди, совуқ жисм исийди. Бундай ҳодиса иссиқлик алмашинуви дейилади.

Демак, ҳамма жисмларда иссиқлик энергия шаклида, жисмни ташкил этган заррачалар ҳаракати ҳисобига узатилади. Бундай ҳодиса иссиқлик ўтказувчанлик дейилади. Бу зарралар ҳаракати ҳар доим паст температура томонга йўналган бўлади. Жисмларнинг турига, агрегат ҳолатига қараб, иссиқлик энергиясини ташувчи зарралар турлича бўлиши мумкин. Масалан, газларда — молекулаларнинг тартибсиз ҳаракати, металлларда — эркин электронлар, диэлектрикларда — кристалл панжара тугунларидаги атомларнинг тебранма ҳаракати, суюқликларда — зарралар ҳаракати билан биргаликда макроскопик ҳажмлар ҳаракати, вакуумда — электромагнит майдон ҳисобига иссиқлик ўтказувчанлик пайдо бўлади.

Демак, иссиқликни зарралар, уларнинг бир гуруҳи ёки электромагнит майдони ташир экан. Иссиқлик энергияси уч хил усулда алмашинади. Қуйида иссиқлик алмашинувининг турларини қараб чиқамиз.

4.2. Иссиқлик ўтказувчанлик

Иссиқ жисм сиртининг совуқроқ жисм сиртига текканда иссиқлик энергиясининг паст температурали жисмга ўтиш жараёни иссиқлик ўтказувчанлик дейилади. Иссиқлик ўтказувчанлик жисмлар ўрта-

сида температуралар фарқи бўлганда узлуксиз муҳтда узатилади. Бундай иссиқлик ўтказувчанликда иссиқликни зарралар ва молекулалар ташийди, деб қаралади. Иссиқлик ташувчи агент жисм ичнда, унинг қисмлари орасида, ўзаро тегиб турган иссиқ ва совуқ жисмлар орасида ҳаракатланади деб фараз қилинади.

Узатиладиган иссиқлик миқдори тегиб турган сирт катталигига ва иссиқликнинг ўтиш вақтига боғлиқ бўлади. Термодинамикада бу катталиқ иссиқлик оқимининг қуввати дейилади ва у СИ ўлчов бирлиги системасида Ж/с, яъни Вт да ўлчанади.

Ҳамма нуқталарида температураси бир хил ($T = \text{const}$) бўлган сирт изотермик (юнонча *isos* — тенг, бирдек, ўхшаш ва *terme* — иссиқлик демакдир) сирт дейилади. Температура майдонининг вектори изотермик сиртга тик йўналган бўлади. Температуранинг энг катта ўзгариши нормал (тик) йўналишда кузатилади.

Изотермик сиртга тик туширилган нормал бўйича температура ўзгаришининг Δn масофага нисбати температура градиенти дейилади, яъни $\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta n} =$

$= \frac{dT}{dn} = \text{grad } T$. Француз олими Фурье қонунига мувофиқ иссиқлик ўтказувчанлик бўйича узатилган иссиқлик оқими зичлигининг вектори температура градиентига мутаносиб:

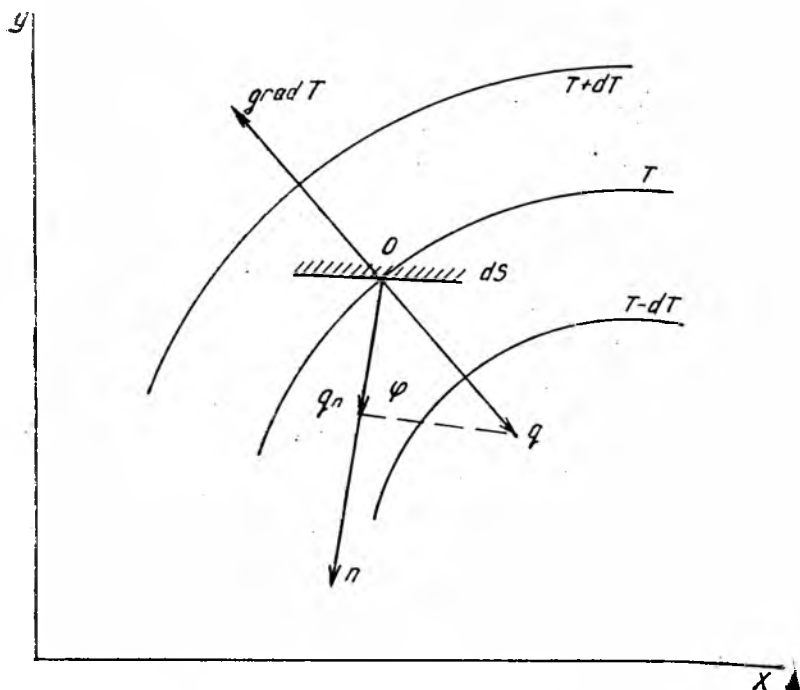
$$q = -\lambda \text{grad } T, \quad (109)$$

бунда λ — жисмнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффиценти, Вт/м·К; λ — коэффицент моддаларнинг иссиқлик ўтказувчанлик хоссасини ифодалайди, тенгламадаги «минус» ишораси эса иссиқлик оқими билан температура градиенти векторларининг йўналишлари қарама-қарши эканлигини билдиради, яъни температуранинг энг катта пасайиши томонга йўналганлигини англатади. Иссиқлик оқимининг зичлиги q_n исталган бирор йўналишдаги q_n вектори билан нормал ўртасидаги бурчак кўпайтмасига тенг:

$$q_n = q \cos \varphi = -\lambda \text{grad } T \cdot \cos \varphi. \quad (110)$$

Маълумки, $\text{grad } T \cos \varphi = \left(\frac{dT}{dn} \right)$ асосида ёзамиз:

$$q_n = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) \quad (111)$$



13-расм. Икки ўлчовчи температура майдонида изотермик сиртларга нисбатан «О» нуқтада $\text{grad} T$ ва q векторларнинг жойлашуви.

Элементар dS юзадан унга перпендикуляр йўналишда ўтадиган иссиқлик оқими қуйидагига тенг бўлади:

$$\Delta q_n = q_n dS = -\lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) dS \quad (112)$$

Бу ифодани интеграллаб исталган S юзадан ўтаётган тўлиқ иссиқлик оқимини аниқлаш мумкин:

$$q = \int_S \Delta q_n = - \int_S \lambda \left(\frac{dT}{dn} \right) dS \quad (113)$$

Моддаларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги турлича ва ўз навбатида, уларнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти λ кенг оралиқдаги ($6 \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К дан то 410 Вт/м·К гача) катталикларни қабул қилади. Вақт бирлиги ичида юза бирлигидан ўтган иссиқлик миқдори қуйидагига тенг:

$$dq = -\lambda \frac{dT}{dn} dS dt. \quad (114)$$

Зарраларнинг ҳаракати, яъни ўртача иссиқлик ҳаракати тезлиги u , уларнинг ўртача эркин югуриш йўли узунлиги $\bar{\lambda}$, жисмнинг зичлиги ρ ва иссиқлик сифими C_v билан dq нинг боғлиқлиги эътиборга олинса, тенгламани қуйидаги кўринишга келтириш мумкин:

$$dq = -\frac{1}{3} u \bar{\lambda} \rho C_v \frac{dT}{dn} ds dt. \quad (115)$$

Жисмларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги уларнинг физик хоссаларига боғлиқ.

Агар $\lambda < 0,2$ Вт/м·К бўлса, бундай материаллар иссиқлик изолятори дейилади. Бундай материалларга ҳаво, енгил ғоваксимон материаллар: пенопласт, шиша толаси ва кўпчилик электр изоляторлар киради (2-жадвал).

2-жа д в а л

Айрим материалларнинг иссиқлик ўтказувчанлик қийматлари

Материаллар номи	λ , Вт м К.	Материаллар номи	λ , Вт м К.
Металлар:		Изоляцион мате- риаллар:	
кумуш	410	асбест	0,1—0,2
мис	380	қизил гил тупроқ	$6 \cdot 10^{-3}$ — $2 \cdot 10^{-2}$
соф темир	70	кигиз, пўкак, торф	
легиранган шўлат	17—45	плитаси	$(4-12) \cdot 10^{-2}$
углеродли пўлат		ёғоч қилиғи	0,07
ва чуян	45—60	Турли хил қаттиқ	
алюминий	200—230	материаллар:	
Қурилиш		сув қозони қасмоғи	0,7—2,3
материаллари:		кумир	0,12—0,2
бетон	1,3	қозон шлаки	0,3
пишиқ ғишт	0,25	Қор:	
оддий шиша	0,75	янги ёққани	0,1
шамот ғишти	0,14—0,18	зичлашгани	0,5
сувоқ материали	0,7—0,9	Карбонат ангидрид	$2 \cdot 10^{-2}$
дарё қуми (қуруқ)	0,3—0,4	Ҳаво	$2,5 \cdot 10^{-2}$
ёғоч (тола бўйлаб		Водород	0,2
қирқилган)		Сув	0,6
	0,35—0,7		
	3		

Фурье формуласини ясси ва цилиндрик девор учун қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$q = \lambda \frac{T_1 - T_2}{l} S, \quad (116)$$

бунда l — девор қалинлиги, м; S — ясси девор юзаси, м².

$$\begin{aligned} q &= 2\pi l \lambda (T_1 - T_2) \left(\ln \frac{d_2}{d_1} \right)^{-1} = \\ &= 0,87\pi l \lambda (T_2 - T_1) \left(\lg \frac{d_2}{d_1} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (117)$$

l — труба узунлиги, м; d_1 ва d_2 — труба^{нинг} ички ва ташқи диаметри, м; λ — иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти.

Демак, иссиқлик ўтказувчанлик усули, яъни жисملар сиртлари ўзаро тегиб турганида иссиқликнинг узатилиши биргина жисملарнинг хоссаларига боғлиқ бўлмасдан уларнинг ўзаро тегиб турган сиртларининг катталигига ҳам боғлиқ бўлар экан.

4.3. Конвектив иссиқлик алмашинуви

Суюқ, газсимон ёки сочилувчан моддалар макроскопик қисмларининг ҳаракати вақтида уларнинг ўзаро зарралари билан аралашуви натижасида иссиқлик энергиясининг узатилиш ҳодисаси конвектив иссиқлик алмашинуви дейилади. Конвекция (лот. *convectio* — келтириш) сочилувчан, суюқ ва газсимон моддалар қатламлари зарраларининг тартибсиз ҳаракатида намоён бўлади. Юқори температурали суюқлик (газ) массаси ҳар доим температураси пастроқ бўлган қисмга томон узлуксиз ва тартибсиз ҳаракатланади ҳамда ўзи билан иссиқликни элтади. Газ ва суюқликнинг конвектив ҳаракати вақтида қаттиқ, суюқ ва газсимон моддаларга иссиқлик энергияси берилиши ҳодисаси иссиқликнинг конвектив узатилиши дейилади. Бунда иссиқлик оқимининг катталиги иссиқлик алмашинуви сирт юзаси билан қаттиқ жисм ва суюқлик сиртларидаги температуралар айирмаси кўпайтмасига мутаносибдир; яъни

$$q = \alpha \cdot S (T_k - T_c). \quad (118)$$

Буни Ньютон ва Рихман қонуни дейилади. Бунда T_k ва T_c — қаттиқ ва суёқ жисмлар температураси (уларнинг абсолют қийматлари олинади ҳамда ҳар доим уларнинг айирмаси мусбат деб қабул қилинади, яъни катта сондан кичиги айрилади); α — иссиқлик бериш коэффициенти, Вт/м²·К.

Иссиқлик бериш коэффициенти L нинг физик маъноси иссиқлик берилиш жадаллигини билдиради. Унинг сон қиймати қаттиқ жисм сирти билан суёқлик температуралари фарқи бир Кельвин бўлган бирлик юзадаги алмашинувчи иссиқлик оқимига тенг.

L коэффициент конвектив ҳаракатдаги оқим турига ва бошқа таъсирларга боғлиқ.

Конвектив иссиқлик алмашинувидаги иссиқлик элтувчи модданинг (суёқлик, газ) ҳаракати табиий ва суғъий бўлади. Табиий конвекция ҳодисаси фақат суёқлик (газ) массасининг иссиқлик манбаи билан иссиқлик алмашинуви натижасида иссиқ сирт яқинида ўз ҳажмини ўзгартириб юқорига қараб ҳаракатланиши ҳисобига пайдо бўлади. Иссиқлик берувчи сирт яқинидаги суёқлик (газ) молекулаларининг температураси юқори бўлиб, иссиқлик манбандан узоқлашган сайин уларнинг температураси пасайиб боради.

Физика курсидан маълумки, зичлиги кичик бўлган газ ва суёқлик ҳар доим ўздан зичлиги катта бўлган моддага нисбатан юқори қатламда жойлашади. Бир жинсли суёқлик ёки газсимон модда қиздирилганда иссиқлик манбаига яқин бўлган қисмининг элементар ҳажмчаларидаги модда, ютилган иссиқлик энергияси ҳисобига ўз ҳажмини орттиради ва натижада зичлиги камаяди. Шунинг учун бу ҳажмчадаги суёқлик (газ) моддаси юқорига қараб кўтарилади.

Демак, зичликлар фарқи пайдо бўлганлиги сабабли суёқлик (газ) ҳажмчасидаги моддага кўтариш кучи F_k таъсир этади. Бу кучнинг катталиги Архимед ва оғирлик кучларининг алгебраик йиғиндисига тенг:

$$F_k = \rho_c g h S - m g = \rho_c g V - \rho g V = g V (\rho_c - \rho). \quad (119)$$

Ҳажм бирлигидаги суёқлик массаси олинганлиги учун $V = 1$ м³ бўлади. Шунинг учун кўтариш кучи ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$F_k = g (\rho_c - \rho), \quad (120)$$

бунда ρ ва ρ_c — иссиқ ва совуқ суюқлик (газ) зичлик-
лари.

Ҳажмнинг жадал кенгайиши ҳажмий кенгайиш тем-
пература коэффиценти орқали ифодаланади:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dT} \right)_{p=\text{const}} \quad (121)$$

Идеал газлар учун ҳажмий кенгайиш коэффицентининг
температурага боғлиқлиги қуйидагича ифодаланади:

$$\beta = \frac{1}{T}$$

Шунинг учун суюқликларда бу коэффицент кичиклиги-
ни эътиборга олиб, солиштира ҳажм ҳосиласини юқо-
ри ва паст температураларга мос келувчи ҳажмлар
айирмаси кўринишида ёзиш мумкин:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{V - V_c}{T - T_c} \right)$$

ёки

$$\beta = \frac{\rho_c - \rho}{\rho_c(T - T_c)} \quad (122)$$

Бу тенгликни қуйидагича ёза оламиз:

$$\beta \rho_c (T - T_c) = \rho_c - \rho. \quad (123)$$

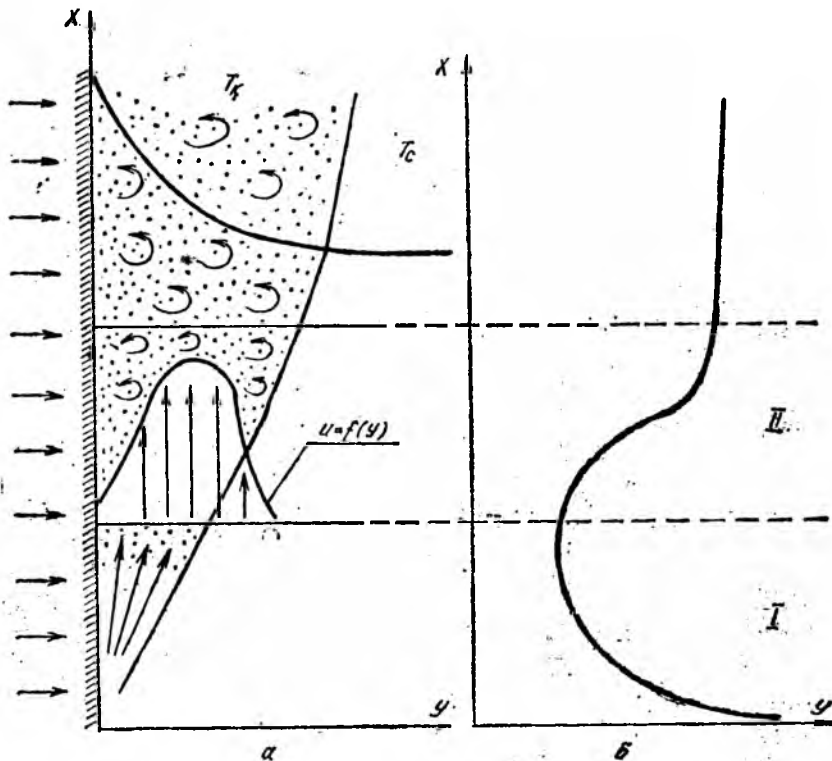
Энди, иссиқ ва совуқ суюқлигининг бирлик ҳажмчалари-
даги зичликлар айирмаси ифодаси (123) ни (120) га
қўйиб, конвектив иссиқлик алмашинуви жараёнидаги
кўтариш кучининг катталигини суюқликнинг юқори ва
қуйи температуралари айирмасига ҳам боғлиқлигини
қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$F_k = c \beta_c (T - T_c), \quad (124)$$

бунда T ва T_c — иссиқ ва совуқ суюқликлар температу-
ралари.

Исingan суюқлик (газ) массасини юқорига кўтариш
кучи F_k зарраларни қуйи қатламдан юқорига кўтаради.
Бунда ташқи куч иштирок этмайди, яъни суюқлигининг
юқори температурали қисми ўз-ўзидан табиий кўтари-
лади.

14-расм, б дан кўриниб турибдики, суюқлик масса-
сини ташкил этган зарралар қиздирилиш зонасида ла-
минар ҳаракат қилади. Ўттиш зонасида уларнинг ҳам
ламинар, ҳам турбулент ҳаракати кузатилади. Охириги
зонада зарралар ҳаракати турбулент бўлади.



14-расм. а) Табiiй конвекцияда иссиқлик ташувчининг тезлик ва температура бўйича ламинар ва турбулент ҳаракатидаги тақсимоти; б) иссиқлик бериш коэффициентининг ламинар ва турбулент оқимлардаги ўзгариши: I—ламинар, II—ўтиш ва III—турбулент зоналар.

Иссиқликни бериш коэффициентининг α нинг қиймати конвектив иссиқлик алмашинуви жараёнининг ламинар зонасида секин-аста пасайиб боради, сўнгра ўтиш зонасининг чегарасидан бошлаб то турбулент зонасигача ортади, сўнгра турғунлашади (14-расм, б).

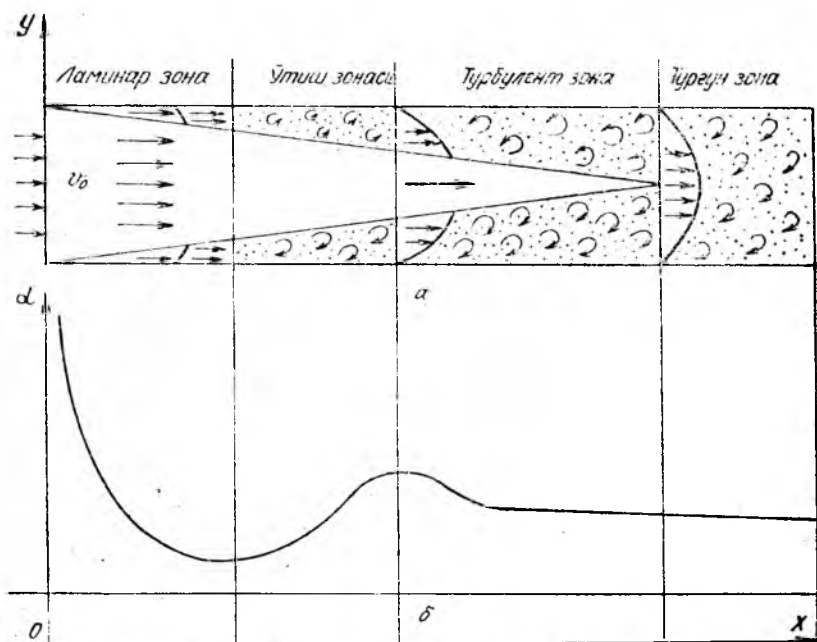
Демак, ламинар оқимда иссиқлик вектори оқим йўналишига перпендикуляр бўлганлиги учун унинг қиймати катта бўлмайди. Турбулент оқимда эса суyoқлик (газ) уюрмали ҳаракатланади ва улар яхши аралашади ҳамда иссиқликни жадал узатади. Суyoқлик (газ)

массаси паст температурали ҳажмдан насос, вентилятор ёки бирорта бошқа машина ёрдамида сўриб чиқарилиб иситкичга йўналтирилса, яъни ҳаракат мажбурий (очиқ ёки берк контур бўйича) ҳосил қилинса, бундай конвекция мажбурий конвекция дейилади. Ташқи таъсир ҳисобига суюқлик (газ) зарралари бир текис ҳаракатланмасдан уюрма ҳаракат турига ўтади. Суюқлик тўлиқ аралашини жараёнида ўзаро ва қаттиқ девор (труба, панжара ва ҳ. к.) билан контактлашиш вақтида иссиқлик алмашади. Мажбурий конвекцияда иссиқликнинг узатилиши, асосан, иссиқлик энергияси элтувчисининг муҳитга теккан вақтида, иссиқлик ўтказувчанлик бўйича содир бўлади. Фараз қилайлик, иссиқлик труба девори орқали ундаги суюқликка узатилаётган бўлсин. Унда ҳосил қилинган суюқлик оқимининг чегаравий қисмида, яъни труба ички девори билан суюқлик оралиғида юпқа парда қатлами ҳосил бўлади. Бу қатламнинг ҳаракатланиш тезлиги v тақрибан нолга тенг.

Чегаравий қатлам суюқликнинг қўшни қатламларига ишқаланиб, уларнинг ҳам тезлигини камайтиради. Суюқликнинг бундай оқими марказида (труба ўқида) тезлик энг катта бўлади ва у ($v = t(r)$) радиус функцияси-дир, яъни труба ўқидан унинг деворигача тезлик камайиб боради. Оқимнинг чегаравий қатламидаги ҳаракати ламинар ва ундаги зарраларнинг температураси қаттиқ девор температурасига тенг бўлади. Қаттиқ девордан то турба шаклидаги оқим марказигача суюқлик температураси пасайиб боради. Иссиқлик алмашинуви оқимнинг чегаравий қатлами орқали амалга ошади. Бу қатламда иссиқлик алмашинуви иссиқлик ўтказувчанлик қонунияти бўйича кечади ва у иссиқлик оқимининг ҳаракатига қаршилиқ кўрсатади. Натижада, бу қатламда температура исрофи катта бўлади.

Иссиқлик алмашинувида қўлланиладиган асбоб-ускуналарнинг турига, конструкциясига, материалига мувофиқ улар ҳар хил иссиқлик алмашинув жараёнларида қўлланилади. Масалан, ички ёнув двигателининг совитиш системаларида мажбурий конвектив иссиқлик алмашинуви усули қўлланилади. Совитиш агенти (сув, антифриз) цилиндрлар блокидаги ортиқча иссиқлик миқдорини ўзининг мажбурий ҳаракати даврида совиткичга чиқаради.

Иссиқлик алмашинуви жараёнида қўлланиладиган юқори ва паст температурали суюқлик оқими, йўнали-



15-расм. а) Мажбурий конвекцияда иссиқлик элтувчининг ҳаракати;
б) α — коэффициентнинг оқим турига боғлиқлик графиги.

3-жадвал

Табиий ва мажбурий конвекцияда иссиқлик узатиш коэффициенти қийматлари

Конвектив иссиқлик узатиш турлари	Иссиқлик узатиш коэффициенти α , Вт/м ² ·К
Газлардаги табиий конвекция	5,8—34,7
Газ трубада ё улар оралиғида ҳаракатланганда	11,6—116
Сув буғининг трубадаги ҳаракати	116—2320
Сувнинг табиий конвекцияси	116—1160
Сувнинг трубадаги ҳаракати	575—11600
Сувнинг қайнаши	2320—11600
Сув буғининг конденсацияси	4650—17500

шига қараб тўғри, тескари ва кесишган оқимли бўлади. Бундай оқимлар конденсаторда, экономайзерда, регенераторда қўлланилади.

Иссиқлик узатиш коэффициентининг киймати иссиқлик элтувчи ва қабул қилувчининг физик хоссаларига қараб турлича бўлади (3-жадвалга қаранг).

4.4. Нур воситасида иссиқлик алмашинуви

Иссиқликнинг бир жисмдан иккинчисига нур орқали узатилиш жараёни нур (радиация) воситасида иссиқлик алмашинуви дейилади. Иссиқлик нурларининг тарқалиши бу жисм ички энергиясининг электромагнит тўлқин энергиясига айланишидир. Температураси абсолют нолдан фарқли бўлган ҳамма жисмлар нур тарқатади. Бу электромагнит нур тарқатиш (тўлқин) энергияси жадаллиги (интенсивлиги) ҳамма жисмларда бир хил эмас. Бу нурлар бошқа жисмлар билан таъсирлашиш жараёнида уларнинг маълум қисми жисмда ютилади, бир қисми қайтади ва қолгани ўтиб кетади. Бундай физик ҳолат жисм хоссасига ва нур энергиясига боғлиқ.

Нур иссиқлиги энергияси муҳит билан таъсирлашиб, унда ютилса, шу муҳитнинг ички энергияси ортади. Нур энергияси маълум тўлқин узунлигига ва частотага эга бўлиб, вакуумда ёруғлик тезлиги ($c=3 \cdot 10^8$ м/с)да тарқалади. Нур энергиясини ташувчи зарра сифатида фотон қабул қилинган. Фотон (юнон *phos* (*photos*) — ёруғлик) ҳаракатланаётган вақтда маълум массага эга, тинч ҳолатда унинг массаси нолга тенг бўлади.

Иссиқликнинг нур шаклидаги энергияси жисмлар билан $5 \cdot 10^{-14}$ м дан 10^4 м гача бўлган тўлқин узунлиги оралигида таъсирлашади (4-жадвалга қаранг).

Нурлар орасида кўзга кўринадиган ва инфрақизил нурлар кўп миқдорда иссиқлик энергиясини элтганлиги сабабли улар иссиқлик нурлари дейилади.

4-жадвал

Нурларнинг тўлқин узунлиги

Нурланиш тури	Тўлқин узунлиги, λ , м
Космик нурланиш	$5 \cdot 10^{-14}$
Гамма нурлари	$5 \cdot 10^{-13}$ дан $1 \cdot 10^{-13}$ гача
Рентген нурлари	$1 \cdot 10^{-12}$ дан $2 \cdot 10^{-8}$ гача
Ультрабинафша нурлар	$2 \cdot 10^{-3}$ дан $4 \cdot 10^{-7}$ гача
Кўзга кўринадиган нурлар	$4 \cdot 10^{-7}$ дан $8 \cdot 10^{-7}$ гача
Инфрақизил нурлар	$8 \cdot 10^{-7}$ дан $8 \cdot 10^{-4}$ гача
Радиотўлқинлар	10^{-2} дан 10^4 гача

Сфера марказида жойлашган иссиқ жисм ҳамма йўналишда бир хил нур тарқатади ва температураси ортган сайин нур тарқатиш жадаллиги ҳам ортади.

Жисмнинг нур тарқатиш хусусияти аниқ температурада жисм бирлик юзасидан вақт бирлигида тарқатилган барча частоталардаги тўлқинларнинг нур энергиясининг миқдори E билан ифодаланади:

$$q = \frac{E}{S \cdot t} \quad (125)$$

Демак, жисм сиртига тушган нур энергияси ютилган, қайтган ва ўтган нурларнинг йиғиндисига тенг бўлади:

$$E_T = E_A + E_R + E_D, \quad (126)$$

бунда E_T , E_A , E_R ва E_D — мос равишда, жисмга тушган, унда ютилган, ундан қайтган ва ўтиб кетган нур энергияларидир. Содалаштириш ва тенглама моҳиятини очиш мақсадига (126) тенгламани ҳадма-ҳад E_T га бўламиз:

$$\frac{E_A}{E_T} + \frac{E_R}{E_T} + \frac{E_D}{E_T} = \frac{E_T}{E_T},$$

бунда $\frac{E_A}{E_T}$, $\frac{E_R}{E_T}$ ва $\frac{E_D}{E_T}$ нисбатларни ютилиш (A), қайтариш (R) ва ўтказиш (D) коэффициентлари сўрали ифодаласак, тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$A + R + D = 1. \quad (127)$$

Ҳосил қилинган тенглама (127) ниссиқлик баланси тенгламаси дейилади. Агар $R = D = 0$ бўлса, унда $A = 1$, яъни жисм сиртига тушган ҳамма тўлқин узунликларидаги нур энергияси мутлақо ютилади. Бундай жисм абсолют қора жисм дейилади. Абсолют қора жисм кўзга кўринмайди, чунки у ҳамма тўлқин узунликларидаги нурларни ютади.

Абсолют қора жисм табиатда йўқ. Аммо унга айрим хоссалари жиҳатидан яқинроқлари мавжуд. Масалан, қурум учун нур ютиш коэффициенти $A = 0,9—0,96$. Табиатда шундай жисмлар борки, улар иссиқлик нурини ютади, аммо кўзга кўринадиган нурни ўзидан яхши ўтказиш ва қайтаради. Бунга мисол қилиб музни, қорни ва шишани келтириш мумкин. Муз ва қор учун $A = 0,95—0,98$ бўлса, шиша учун $A = 0,94$.

Агар $A=D=0$ шарт, яъни $R=1$ бажарилса, жисм сиртига тушган ҳамма тўлқин узунликларидаги нурлар қайтади. Бундай жисмдан нур диффузион қайтса (лот. *diffusio* — тарқалиш, оқиш) оқ жисм дейилади.

Жисм сиртига тушган нурнинг тушиш бурчаги унинг қайтиш бурчагига тенг бўлса, бундай жисм кўзгу дейилади.

Ҳар қандай жисм ўз сиртига тушаётган нурни қайтариш билан бирга, ўзидан ҳам нур чиқаради. Жисм сиртидан қайтган ва жисм тарқатган нур энергиялари йиғиндисини эффектив нурланиш дейилади:

$$E_{\text{эф}} = RE_T + E.$$

Агар $A=R=0$ шарт, яъни $D=1$ бажарилса, жисм сиртига тушган нур ундан ўтиб кетади. Бундай жисм абсолют шаффоф жисм дейилади. Шаффоф жисмлар диатермик (юнонча *dia therme*, *dia* — орқали, *therme* — иссиқлик), яъни иссиқлик нурларини ютмай диган жисмлар дейилади. Бир ва икки атомли газлар диатермик ҳисобланади. Қўп атомли газлар эса иссиқлик энергиясини нур кўринишида тарқатади ва ютади.

Юқориди баён қилинган фикр ва мулоҳазалардан маълумки, табнатда мутлақо қора, оқ ва шаффоф жисмлар бўлмасдан, фақат уларга яқинроқ бўлганлари мавжуд. Нур воситасида иссиқлик алмашинуви асосан М. Планк, В. Вин, Стефан-Больцман, Кирхгоф қонунлари ёрдамида батафсил тушунтирилади.

Маълум температурадаги жисм ўзидан фақат ягона тўлқин узунлигидаги нурларни (электромагнит тўлқини) атроф-муҳитга нурлантирмасдан, кенг ораликдаги тўлқинларни тарқатади. Тарқалаётган тўлқинларининг жадаллиги (интенсивлиги) ҳар хил тўлқин узунликларида турлича бўлади.

Бирор аниқ тўлқин узунлигидаги нур оқими спектри зичлигининг жадаллиги қуйидагича ифодаланади:

$$I_{\lambda d} = \frac{dE}{d\lambda}, \quad (129)$$

бунда dE — ажратилган маълум тўлқин узунлиги $d\lambda$ да нурланадиган электромагнит тўлқин энергияси.

Абсолют қора жисм температураси билан нур тарқалиш оқими спектри зичлигининг тўлқин узунлиги ора-

сидаги боғланишни М. Планк 1900 йили асослади ва унинг математик ифодасини берди:

$$I_{0\lambda} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1} \quad (130)$$

бунда $C_1 = 3.74 \cdot 10^{-16}$ Вт/м² ва $C_2 = 1.44 \cdot 10^{-2}$ м·К — нурланиш доимийлари; λ ва T — тарқалаётган нур тўлқини узунлиги ва жисмнинг нурланиш вақтидаги абсолют температураси; e — натурал логарифмлар асоси.

Бу тенглама (130) М. Планк формуласи (қонуни) дейилади.

16-расмдан кўриниб турибдики, жисмнинг температураси ортирилса, унинг нур тарқатиш жадаллигининг максимуми қисқа тўлқин томонга силжийди. Бу қонуниятни В. Вин 1893 йили кашф этган ва унинг математик ифодасини берган:

$$\lambda_{\text{max}} = 0.0028989/T \quad (131)$$

ёки

$$T \lambda_{\text{max}} = b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}.$$

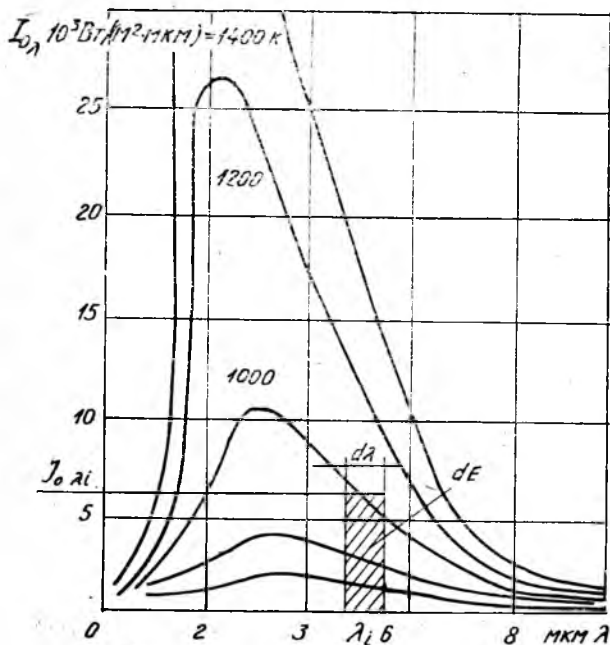
Бу В. Виннинг силжиш қонуни дейилади. Силжиш қонунига мувофиқ жисмлар нур кўринишида тарқатадиган электромагнит тўлқинларнинг жадаллиги ҳар хил температурада турлича бўлади. Масалан, электр иситкичининг $T = 1100$ К бўлганда, у $\lambda_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-6}$ м бўлган тўлқини узунлигини нурлантиради, унинг спектри таркиби асосан инфракизил нурдан иборат. Яна бир мисол қилиб қуёш ($T = 5500$ К) нури тўлқини спектрини олсак, ундаги тўлқини узунлик $\lambda_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{-7}$ м га тўғри келади. Бу тўлқини узунлик λ_{max} спектрининг кўзга кўринадиган қисмига тўғри келади.

16-расмда нур тарқалиш оқими спектри зичлигининг температураларга мос равишда чиққан нурнинг тўлқини узунлигига боғлиқлиги тасвирланган.

Абсолют қора жисм сирти тарқатган нур оқимининг зичлиги қилиб нурланиш оқими спектри зичлиги $I_{0,\lambda}$ нинг шۇ нур тўлқини узунлиги кенглиги $d\lambda$ га қўпайтмаси олинган, яъни

$$dE_0 = I_{0,\lambda} \cdot d\lambda. \quad (132)$$

(132) тенгликни 0 билан ∞ оралиғида интеграллаб, аниқ температурадаги абсолют қора жисмнинг бирлик



16-расм. Нурланиш оқими спектри зичлигининг температураларга мос равишда чиққан нурнинг тўлқин узунлигига боғлиқлиги.

сирти вақт бирлигида чиқарган нур оқимининг зичлигини, яъни нур тарқатиш қобилиятини топиш мумкин:

$$E_0 = \int_0^{\infty} I_{0\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \cdot d\lambda = \sigma_0 T^4 \quad (133)$$

Бу қонун Стефан-Больцман номи билан юритилади. Бунда $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К — абсолют қора жисмнинг нурлаш доимийси.

Демак, абсолют қора жисмнинг бирлик юзадан вақт бирлиги ичида нур тарқатиш қобилияти (ҳамма тўлқин узунликларидаги энергияси) абсолют температуранинг тўртинчи даражасига мутаносиб. Бу қонуниятни 1879 йили И. Стефан тажриба йўли билан топган ва 1884 йили А. Больцман назарий жиҳатдан исботлаб берган.

Техник масалалар ечимини топишдаги ҳисоблашларда Стефан-Больцман қонуни қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$E = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (134)$$

бунда $C_0 = 5.67 \cdot 10^8 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — абсолют қора жисмнинг нур тарқатиш қобилияти.

Стефан-Больцман қонуни абсолют қора жисмнинг иссиқликни нурлаш (нур кўринишида тарқатиш) коэффициентини $\epsilon = \frac{E}{E_0}$ орқали реал кулранг жисмлар учун қуйидагича ёзиш мумкин:

$$E = \epsilon E_0 = \epsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (135)$$

бунда C — кулранг жисмнинг нурлаш хусусияти.

Абсолют қора ва кулранг жисмларнинг иссиқлик нурларини ютиш ва тарқатиш хоссалари орасидаги боғланишни Г. Кирхгоф 1882 йили ўрганиб, қуйидаги қонуниятни очган:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \frac{E_3}{A_3} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E(T), \quad (136)$$

бунда $\frac{E_1}{A_1} = E_0$ — абсолют қора жисмнинг нур тарқатиш қобилияти.

Жисмнинг нурлаш хусусиятининг нур ютиш қобилиятига нисбати жисм табиатига боғлиқ эмас ва барча жисмлар учун температура функциясидир; жисмнинг нур чиқариш қобилияти абсолют қора жисмнинг шу температурадаги нур чиқариш қобилиятига тенг.

Демак, жисмнинг бирор температурада тарқатган нур энергиясининг нурнинг ютилиш коэффициентига нисбати жисм табиатига боғлиқ бўлмайди ва у абсолют қора жисмнинг шу температурада чиқарган нур энергиясига тенг бўлар экан. Жисм ўзидан қанча кўп нур чиқарса, шунчасини ютади, яъни ютган ва чиқарган нурнинг тўлқин узунликлари бир хил бўлади:

$$\epsilon_\lambda = A_\lambda \quad (136)$$

Кулранг жисмнинг нур ютиши иссиқлик манбаига ва ўзининг температурасига боғлиқ бўлмайди. Жисм сиртига перпендикуляр йўналишда тарқалган нур оқими интенсив (жадал) лиги катта бўлади. Маълум бурчак

остида (нормалга нисбатан) нур чиқариш энергиясининг катталиги

$$E_{\varphi} = E_n \cos \varphi. \quad (137)$$

Демак, $\varphi = 90^\circ$ бўлганда сирт бўйлаб нур чиқариш жадаллиги нолга интилади.

Юқорида қараб чиқилган $\varepsilon = \frac{E}{E_0}$ нисбатдан кўринадики, жисмнинг қоралик даражаси, яъни абсолют қора жисмга бошқа жисмнинг нур ютиш ва чиқариш хусусияти жиҳатидан яқинлашуви орқали уни термодинамик нуқтаи назардан баҳолаш мумкин. Шунинг учун кулранг жисмлар учун тааллуқли Стефан-Больцман тенгламаси қозон қурилмалари ўтхоналарининг нур тарқатиш қобилиятларини аниқлашда қўлланилади. Ўтхона деворлари ҳам нур тарқатади, ҳам нурни ютади, яъни термодинамик мувозанатда бўла олмайди. Шу сабабли ўтхонадаги нур энергиясидан нур воситасида иссиқлик алмашинувида тўлароқ фойдаланилмайди. Ўтхонадаги ўзаро параллел сиртларнинг иссиқлик алмашинувини қуйидагича ифодалаш мумкин:

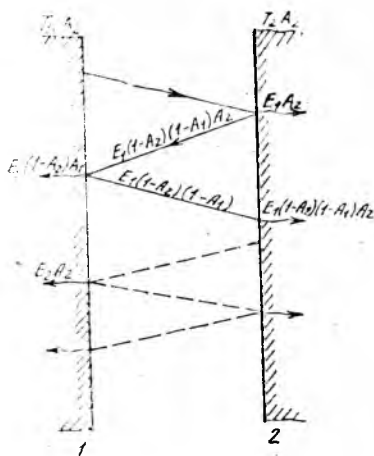
$$q = SC_{\varepsilon_k} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

бунда $\varepsilon_k = \left(\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ — иссиқлик алмашинувида қатнашувчи жисмлар системасининг келтирилган нур чиқариш коэффиценти; S — нур чиқарувчи сирт юзаси; T_1 ва T_2 — биринчи ва иккинчи сиртларнинг температура-лари.

4.5. Нур воситасида иссиқлик алмашинувида экранларнинг қўлланилиши

Нур иссиқлиги энергияси оқимининг жадаллиги юқори бўлганда иситкич ва совиткичлар ўртасига нур энергиясини камайтириш мақсадида турли хил геометрик шакллардаги тўсиқлар (экранлар) қўйилади. Бу билан иссиқлик техникаси асбоб-ускуналари ҳимояланади ва уларнинг яхши ҳамда узоқ муддат ишлаши таъминланади (17-расм). Еруғлик нурини оқ рангли жилвирланган экран энг яхши қайтаради. Шунинг учун нур иссиқлиги энергиясидан иссиқлик техникаси асбоб-ускуналарини ҳимоя қилишда иссиқлик изоляцияси сифатида жилвирланган металл пластинкалар ёки металл пардалар ҳа-

ётда ва иссиқлик техни-
касида кенг қўлланила-
ди. Масалан, алюминий
ва унинг қотишмаларидан
тайёрланган пардалар,
алюминий упаси иссиқлик
техникасида қўлланила-
ди. Бунга асосий сабаб,
алюминий упасидан тай-
ёрланган пардалар иссиқ-
лик нурларини юқори да-
ражада қайтаради ва
ютади, яъни ҳам иситкич-
дан, ҳам ташқаридан ке-
лаётган иссиқлик нурла-
рини ютади ҳамда тарқа-
тади. Амалда технологик
жараёнда бундай плас-
тинка (парда) ларни тай-
ёрлаш мумкин. Уларнинг



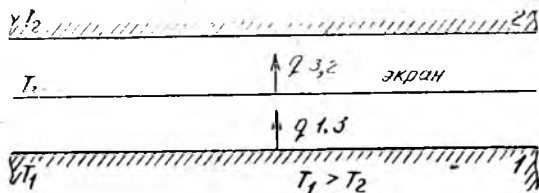
17-расм. Икки параллел сирт-
ларнинг нур иссиқлик алмаши-
нуви.

қоралик даражаси $E_{к.э} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ (абсолют кулранг жисм нур тарқатиш коэффициентининг абсолют қора жисм нур тарқатиш коэффициентига нисбати) $5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$ атрофида бўлади. Бундай пардасимон материаллар иссиқлик трассаларида, қозон қурилмаларида, иссиқлик изоляторлари ва қайтаргичларида кенг қўлланилади.

Жилвирланган пластинка ёки пардалар экран сифатида қўлланилганда, уларнинг сиртига тушган иссиқлик нурлари қисман ютилади ва қайтади. Ютилган иссиқлик энергияси экран сиртидан атроф-муҳитга ҳам тарқалади.

Демак, бирламчи иссиқлик нурлари экранда ютилиб, унинг икки энергиясини орттиргандан сўнг, экран муҳитга ўз сиртидан иккиламчи иссиқлик нурини чиқаради, яъни экран орқали иссиқлик алмашишуви деб аталадиган жараёни содир бўлади.

Фараз қилайлик, нур тарқатувчи ва нурни ютувчи жисмлар сиртларининг қоралик даражаси коэффициентлари жисмнинг иссиқликни нурлантириш коэффициентига ва ўз навбатида, экраннинг қоралик даражаси коэффициентига тенг, яъни $E_1 = E_2 = \epsilon_{к.э} = \epsilon$ бўлсин. Унда, албатта $T_1 > T_2$ бўлади. Иссиқ ва совуқ сиртлар оралиғидаги экраннинг пардасимонлигини эътиборга олсак, у ҳолда экраннинг иккала сиртидаги температуралар бир



18-расм. Экран орқали икки параллел сиртнинг нур иссиқлик алмашинуви.

хил бўлади, яъни $T_{\text{э}1} = T_{\text{э}2} = T_{\text{э}}$. Шу шарт бажарилса, экраннинг термик қаршилиги $R_{\text{н}} = \frac{1}{\epsilon}$ (тарқатиш коэффициентига тескари бўлган катталиқ) энг кичик қийматга эришади, яъни жисмнинг қаршилиги иссиқликнинг ўтишига нисбатан кичикдир. Биринчи девор — экран ва экран — иккинчи девор оралиқларидаги иссиқлик алмашинувининг бир хиллиги асосида улар сиртларининг қоралиқ даражалари $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon$ бўлади. Шунинг учун келтирилган нур тарқатиш коэффициентини девор I → экран → девор II ҳолати учун қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\epsilon_k = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1} = \left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon} - 1 \right)^{-1} = \frac{\epsilon}{2 - \epsilon}. \quad (139)$$

Шу шарт бажарилса, иссиқ деворнинг бирлик юзасидан экраннинг бирлик юзасига қуйидаги иссиқлик миқдори узатилади:

$$q_{1.э} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (140)$$

Экрандан иккинчи деворга узатилган иссиқлик миқдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_{э.2} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_э}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (141)$$

Иссиқлик алмашинуви турғун, яъни сиртлар температуралари ўзгармас бўлганда $q_{1.э} = q_{э.2}$ бўлади. Унда (140), (141) тенгламалар асосида қуйидагини ёзамиз:

$$\left(\frac{T_э}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (142)$$

Экран температураси ифодасини юқоридаги тенгламаларга қўйиб, иссиқлиги алмашинувчи деворлар ўртаси-

да экран бўлган ҳолат учун биринчи девордан иккинчи деворга экран орқали ўтган нур иссиқлиги миқдори йфодасини ҳосил қиламиз:

$$q_{1,2}^{\circ} = q_{1,3} = q_{3,2} = \frac{1}{2} \left\{ \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \right\} \quad (143)$$

Деворлар ўртасида экран бўлганда иссиқлик алмашинуви икки марта камроқ бўлади, яъни $q_{1,3}/q_{3,2} = 0,5$. Экранлар сонини орттириш усули билан нур иссиқлиги алмашинувини бир неча ўн мартабалаб камайтириш мумкин. Нур иссиқлиги алмашинуви экран материалига ва унинг сиртининг ҳолатига боғлиқ. Масалан, оксидланган темир тахтаси (листи) экран сифатида қўлланилса, бу экран нур иссиқлиги миқдорини 13 марта, шундай листдан учтаси қўйилса 39 марта камайтиради.

Нур иссиқлиги миқдорининг исрофини камайтириш мақсадида турли-туман материаллардан экран сифатида фойдаланилади.

4.6. Газларнинг иссиқликни нур кўринишида тарқатиши (нурлаши)

Иссиқлик машиналари камераларида, қозон қурилмаси ўтхоналарида ва турли хил тузилишдаги ўчоқ ҳамда камераларда ёқилғини ёқишда атмосфера ҳавосидан кенг фойдаланилади. Атмосфера ҳавосининг иссиқлик нурларини тарқатиши кенг спектрга эга. Бир ва икки атомли газлар иссиқлик нурлари учун шаффофдир. Фақат кўп атомли газлар (карбонат ангидрид — CO_2 , сульфид ангидрид — SO_2 , сув буғи H_2O , аммиак — NH_3 ва ш. к) иссиқлик нурларини тарқатади ва ютади. Ёқилғининг тўлароқ ёнмаслигига асосий сабаб унинг таркибида сув (намлик) ва CO_2 нинг кўплиги ёки ёниш жараёнида уларнинг ҳосил бўлишидир. Сув буғу ва карбонат ангидрид ёқилғининг ёнишидан ҳосил бўлиши маълум даражада нур иссиқлиги алмашинувини жадаллаштиради, маълум миқдорда сусайтиради. Газларнинг аксарияти маълум тўлқин узунликдаги нурларни чиқаради, яъни чиққан нур кенг оралиқдаги тўлқин узунликларини қамрамасдан, аниқ узунликлардаги тўлқинлардан ташкил топади. Газлар тарқатган спектрининг тор оралиқдаги тўлқин узунликларидаги энергияни ютади ва чиқаради. Тарқалган нур спектрининг кўзга кўринадиган қисмида карбонат ангидрид газ ва сув буғи нур чиқармайди ва ютмайди. Бу газлар тарқатган нур спектрининг узун тўл-

қин қисмида қисқа тўлқин қисмига нисбатан анча жадалроқ нур чиқади ва ютилади.

Атмосфера таркибидаги углерод икки оксиди (CO_2) миқдори йил сайин маълум даражада кўпайиб бориши эҳтимоллиги ҳозирги кунда сир эмас. Бунга асосий сабаб инсон техникадан, саноат корхоналаридан тўғри фойдалана олмаяпти, яъни ёқилғининг тўла ёниши таъминланмаяпти. Атмосферадаги карбонат ангидрид газини қисқа тўлқинли нурларни ёмон ва узун тўлқинлисини яхши ютади. Бундан ҳодиса иқлимнинг илтиқ бўлиши ва «иссиқхона» эффектнинг пайдо бўлишига олиб келиши мумкин.

Газларнинг температураси орттирилганда, иссиқликнинг нур тарқатиш коэффициенти камаяди ва кўпроқ қисқа тўлқиндаги нурлар чиқаради. Нур тарқатиш жадаллиги газнинг зичлигига, босимига, температурасига ҳам боғлиқ.

Газ ўзини ўраб турган муҳитга тарқатган нур оқимининг зичлигини юқорида қараб чиқилган нур тарқатиш жараёнларига ҳослиги асосида, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$q_{\text{н.м.}} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right],$$

бунда $\epsilon_k = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_m}{\epsilon_m - \epsilon_r(1 - \epsilon_m)}$ иссиқлик алмашинувида қатнашувчи газлар системаси тарқатган нур коэффициенти; ϵ_r ва ϵ_m — газ ва муҳитнинг қоралик даражасини белгиловчи коэффициенти.

4.7. Иссиқлик алмашинувида фойдаланиладиган асбоб-ускуналар ва уларнинг таснифи

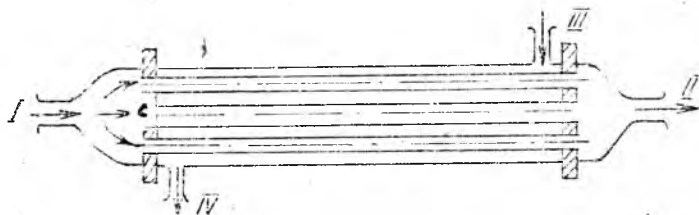
Иссиқлик элтувчи модда (сув, буғ, ҳаво, антифриз, мойлар ва ш. к.) ни иситиш ёки совитишда турли хил қурилма (мосламалар)дан фойдаланилади. Бундай қурилмага радиатор (лат. radio — нур тарқатаман), конденсатор (лат. condense — зичлайман, суюқлантираман), ҳар хил трубалар тўплами ва ш. к. лар мисол бўла олади. Иссиқлик ташувчи модданинг иссиқлиги иссиқлик алмашинув асбоблари девори ёки иссиқ модданинг совуқ моддага аралashiши билан иккинчи модда (совиткич) га узилади. Бунда иссиқлик ташувчининг температураси пасаяди, иссиқлик қабул қилувчи (совиткич) нинг температураси эса ортади.

Моддалар орасида иссиқлик алмашинув усулига қараб иссиқлик алмашинув асбоблари қуйидаги турларга бўлинади: аралаштиргичли, рекуперативли (лат. recuperator — қайта олинадиган), регенеративли (лат. regeneratio — тикланиш) ва оралиқ иссиқлик ташувчили. Аралаштиргичли иссиқлик алмашинуви жараёнида иссиқлик ташувчи (этувчи) модда температураси пастроқ модда билан аралаштирилади. Масалан, қозон қурилмадан чиқадиган юқори температурали буғ ё сув совуқ ёки илқ сув билан аралаштирилади, сўнгра истеъмолчиларга узатилади. Аралаштиргичли иссиқлик алмашинувида асосий агент (иссиқлик ташувчи) сифатида бир-бирига аралашмайдиган модда ва материаллар ишлатилади: буғ — сув, газ — қаттиқ материал, сув — мой ва ҳ. к.

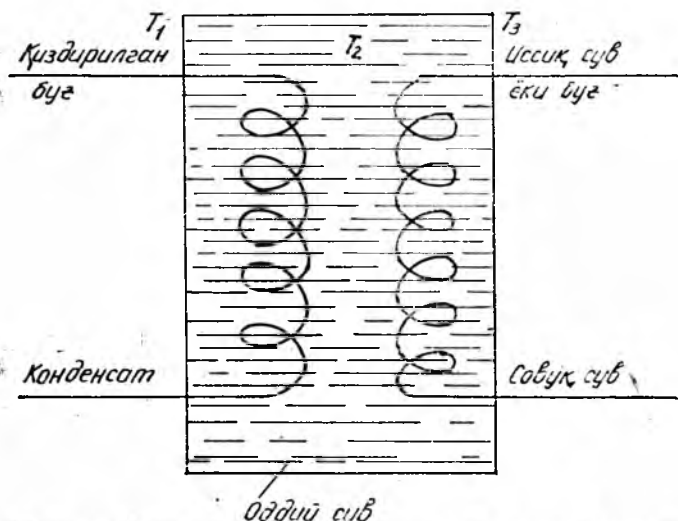
Рекуператив иссиқлик алмашинувида атмосферага чиқиб кетадиган газлар иссиқлигидан фойдаланилади. Бунда иссиқлик миқдори совиткичга оралиқ қаттиқ девор орқали узатилади. Иссиқлик ташувчи ва совиткич йўналишига қараб тўғри, тескари, кесишган, аралаш оқимли ва сиртларнинг геометрик шаклига кўра ясси, юмалоқ, қовурғали рекуператорлар бўлади (19- расм).

Регенератив иссиқлик алмашинувида атмосферага (циклга қайтарилётган буғ) чиқарилиб юбориладиган газ (ёниш маҳсулотли) таркибидаги иссиқлик миқдоридан янгитдан киритилаётган газ, буғ, сув, ёқилғи, ёнилғи ва ҳаво аралашмасини иситишда қўлланилади. Бу асбоб регенератор дейилади.

Регенераторларда улар девори сиртининг температураси юқори ($t > 1000^{\circ}\text{C}$) ва оралиқ иссиқлик ўтказувчи материал қалин бўлади. Оралиқ девор сифатида оғир металл листлар, ўтга чидамли ёшт, шлак, шағалдан фойдаланилади. Металл листларнинг олд қисмига ис-



19- расм. Қувурга ўрнатилган филофли рекуператив иссиқлик алмаштиргич: I — сув буғи; II — илқ сув (конденсат); III — иситиладиган модда; IV — исиган модда.



20-расм. Иссиқликнинг иссиқлик ташувчи оралиқ модда — суюқлик ёрдамида регенератив иссиқлик алмашинуви.

сиқбардош (шамот, магнезит) ғиштлар териб чиқилади. Иссиқ газ оқими аввал иссиқбардош ғиштларга асосий иссиқлик миқдорини беради, сўнгра атмосферага ёки бошқа иссиқлик алмаштиргичга йўналтирилади. Ғиштдаги иссиқлик металл листга, у эса суюқликка иссиқликни узатади. Оралиқ иссиқлик ташувчи муҳит қаттиқ девор, суюқлик ёки буғ бўлиши мумкин. Атом реакторининг биринчи берк контурида иссиқликни ташувчи (совиткич) сифатида оғир сув ишлатилади (20-расм), унинг актив зонасидаги иссиқлик шу сув ёрдамида ташқарига чиқарилади. Контур берк бўлганлиги сабабли, ташқи иссиқлик алмаштиргич резервуаридаги сувга иссиқликнинг асосий қисми спиралсимон қувур деворлари орқали узатилади. Ўз навбатида, иссиқлик иссиқлик алмаштиргич резервуарларидаги оддий сувга оғир сувнинг берк контури деворидан ўтади. Бу ўтган T_2 иссиқлик миқдори иккинчи спиралсимон қувур деворлари орқали шу қувурдаги сувга узатилади. Демак, оғир сув — қаттиқ девор (I), оддий сув — қаттиқ девор (II) — сув кетма-кетлигидаги регенератив иссиқлик алмашинуви юз беради.

Рекуператор ва регенераторларнинг ишлаш тартиби бир-бирига жуда ўхшаш. Рекуператор сиртининг тем-

ператураси паст ($t < 200 - 250^\circ\text{C}$) ва иситувчи билан исувчи моддалар ўртасида юпқа қаттиқ девор бўлади. Рекуператорга автомобиль ва трактор радиаторини, спиралсимон қувурни, бир-бирининг ичига жойлаштириладиган труба филофли найчалар дастасини мисол қилиб кўрсатиш мумкин.

Оралиқ қаттиқ девор ёки суюқлик (газ) орқали иссиқлик узатилаётганда иссиқлик ташувчининг агрегат ҳолати ўзгариши мумкин. Масалан, сув буғи иссиқлик алмашинуви жараёнида сувга айланади. Бу турдаги иссиқлик алмашинуви ишлаб чиқаришнинг турли тармоқларида кенг қўлланилади.

Иссиқлик алмашинув асбобларини яратишдан аввал уларнинг геометрик шакли танланади ва нур тарқатувчи сиртларининг юзалари ҳисоб-китоб қилинади. Бундай ҳисоб-китобларда энергиянинг сақланиш қонунига риоя қилиш лозим, яъни системага келтирилган энергия миқдори ундан узатилган ва исроф бўлган энергиялар йиғиндисига тенг бўлиши керак.

Иссиқлик алмашинуви асбобларини ҳисоблашда иссиқлик баланси тенгламаси асосий ҳисобланади. Иссиқлик баланси тенгламасини система энтальпиясининг ўзгариши орқали қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$q_1 = i - i_2 = m_1(C'_{p1}t_1 - C''_{p1}t_2), \quad (145)$$

бунда q_1 — системага келтирилган тўлиқ иссиқлик миқдори;

m — иссиқлик элтувчи массасининг сарфи; c'_{p1} ва c''_{p1} ўзгармас босим остида иссиқлик элтувчи модданинг мос равишда t_1 ва t_2 температуралардаги иссиқлик сифмлари.

Иссиқлик исрофи эътиборга олинганда келтирилган иссиқлик миқдорининг иккинчи қисмига ўтган улушини асбобнинг ФИК орқали ифодалаш мумкин:

$$q_2 = \eta q, \quad (146)$$

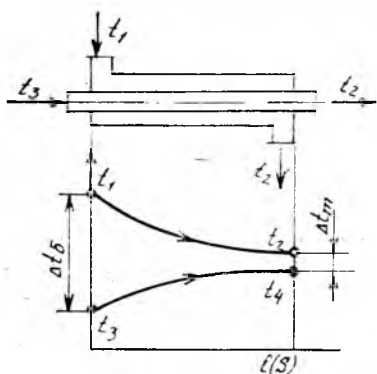
бунда η — асбобнинг ФИК.

Совиткич қабул қилган иссиқлик миқдорини энтальпия айирмаси сифатида ёза оламиз:

$$q_2 = i_3 - i_1 = m_2(C'_{p2}t_3 - C''_{p2}t_1)$$

ёки

$$q_2 = \eta q_1 = \eta(i - i_2) = \eta m_1(C'_{p1}t_1 - C''_{p1}t_2), \quad (147)$$



21-расм. Иссиқлик элтувчининг иссиқлик алмашинуви асбобида туғри оқимли ҳаракати схемаси ҳамда i ва t орасида боғланиш диаграммаси.

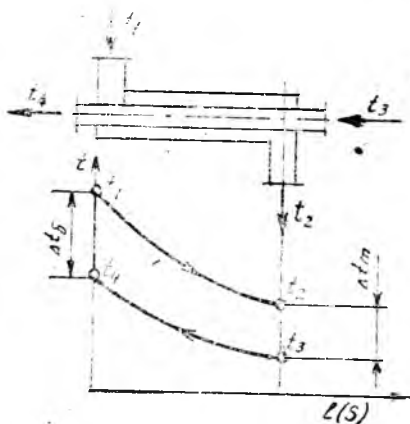
Диаграммадан кўриниб турибдики (22, 23-расмлар), иссиқлик элтувчи ва қабул қилувчи моддалар оқимларининг ҳаракати қарама-қарши. Иссиқлик алмашинадиган асбобнинг девори юққа бўлганида (рекуператив) иссиқ модданинг совуқ

моддага узатган иссиқлик миқдорини тақрибан қуйидагича ифода қилаш мумкин:

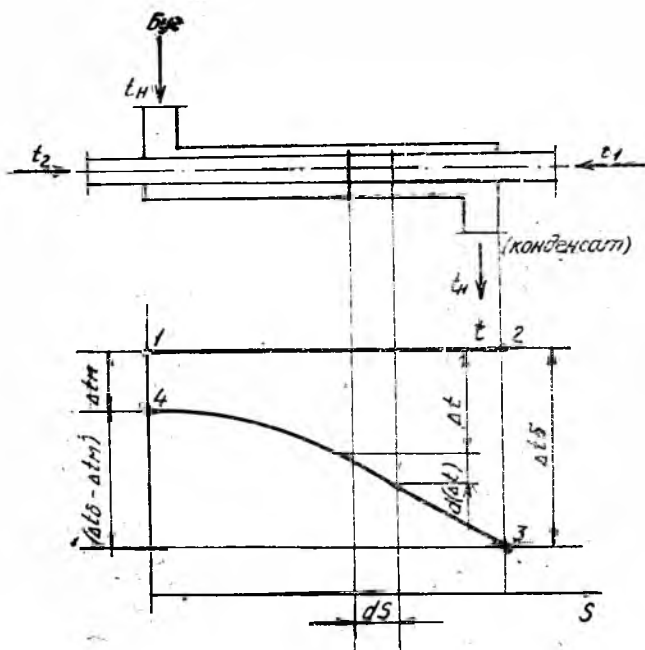
$$q_2 = kS(t_1 - t_2) = kS\Delta t, \quad (148)$$

бунда $k = \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^{-1}$ — иссиқлик узатиш коэффициентини;

α_1 ва α_2 — иссиқ ва совуқ суюқлик оқимининг иссиқлик бериш коэффициентлари; λ — иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини; l — юққа девор қалинлиги;



22-расм. Иссиқлик элтишнинг иссиқлик алмашинуви асбобида тескари оқимли ҳаракати схемаси, i ва t нинг боғланиш диаграммаси.



23-расм. Иссиқлик элткич (буғ) температурасининг иссиқлик алмашинуви асбобида ўзгариш графиги.

s — юпқа девор сиртининг юзаси; t_1 ва t_2 — юпқа деворнинг ички ва ташқи сиртларидаги температуралари.

Иссиқлик элтувчининг t_1 ва иссиқлик ютувчининг t_2 температураларини ўзгармас сақлаш қанча мураккаб бўлганлигидан шу температуралар айирмасининг ўртача қийматидан фойдаланган маъқул, яъни

$$q_2 = kS\Delta\bar{t} = 0,5kS(\Delta t_6 - \Delta t_m), \quad (149)$$

буندا $\Delta t_6 = t_1 - t_4$; $\Delta t_m = t_2 - t_3$ (тескари оқимли ҳолат),
 $\Delta t_6 = t_1 - t_3$; $\Delta t_m = t_2 - t_4$ (тўғри оқимли ҳолат),
 $\Delta t_6 = t_1 - t_4$; $\Delta t_m = t_2 - t_3$ (иссиқлик элткич температураси $t_1 = t_2 = \text{const}$ бўлган ҳолат).

Бу ифодадаги $\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_m}\right) < 2$ бўлганда юқоридаги тенглама мақсадга мувофиқ бўлади, чунки бу шарт бажарилганида ҳисоблаш хатолиги 4% дан ошмайди.

Иссиқлик элтувчи ва иссиқлик ютувчи моддалар оқимларининг йўналишига қараб Δt_6 ва Δt_m қийматлар ўзгаради.

Иссиқлик алмашинуви асбобларидан кўпчилик ҳолларда қарама-қарши оқимли қилиб ишлатилади. Бунда уларнинг тақрибий ҳисоби осонлашади, чунки Δt ҳар доим тўғри оқимли иссиқлик алмашинувига нисбатан катта (21, 22 ва 23-расмларга қаранг).

Ўзаро кесишган оқимли иссиқлик алмашинуви асбоблари ҳам кенг қўлланилади. Бундай ҳолатдаги иссиқлик алмашинуви асбобидаги иссиқлик элтувчи ва ютувчи моддалар температуралари айирмасининг ўртача қиймати қарама-қарши оқимли иссиқлик алмашинуви асбобидек олиниб айрим тузатишлар киритилади.

Иссиқлик алмашувчи асбоблар сиртларининг юзаларини ҳисоблашда энг аввал q_2 аниқланади. Сўнгра иссиқлик элтгич оқимининг тезлиги v_4 маълум диаметрдаги труба учун топилади. Иссиқлик элткич учун иссиқлик бериш α ва узатиш k коэффициентлари қийматлари ҳисобланади. Δt қиймат келтирилган тенгликдан топилгандан сўнг, иссиқлик алмаштиргичнинг S юзаси ҳисобланади. Зарур бўлганда иссиқлик алмаштиргич трубасининг узунлиги ҳам топилади. Иссиқлик алмаштиргич асбоби сиртининг юзаларини аниқлашда, айрим параметрлар аниқ бўлиши керак. Ҳеч бўлмаганда иссиқлик элткич ёки иссиқликни ютувчи моддаларнинг иссиқлик алмаштиргичдан чиқишидаги температураси маълум бўлиши шарт. Ҳисоблаш ишларида ҳозирги кунда албатта ЭХМ дан фойдаланилади.

V б о б. ЁҚИЛҒИ

5.1. Ёқилғи ва унинг хоссалари

Асосий таркибий қисми углероддан иборат ёнувчи моддага ёқилғи дейилади. Кимёвий реакциянинг жадвал бориши натижасида ёқилғи ўзидан иссиқлик чиқаради. Ёқилғига қуйидаги талаблар қўйилади: ёниш вақтида кўп миқдорда иссиқлик чиқариш; ёниш маҳсулотидан табиатга зарар етказадиган моддалар миқдорининг кам бўлиши; тез ва тўла ёниши; қазиб олиш арзон бўлиши ва қайта ишлаш ҳамда транспортда бир жойдан иккинчи жойга кўчиришнинг осон бўлиши. Ёқилғи қазиб олинishi ёки тайёрланишига кўра табиий ва сунъ-

ий бўлади. Табиатда ишлатишга тайёр ҳолда мавжуд бўлган ёқилғилар табиий ёқилғилар дейилади. Қазиб олинadиган тошқўмир, ёнувчи сланецлар, торф, нефть, газ, ўтин, қишлоқ хўжалиги ишлаб чиқариши чиқиндилари табиий ёқилғи ҳисобланади. Табиатдаги ёқилғиларни ёки умуман моддаларни қайта ишлаш натижасида олинadиган ёқилғилар сунъий ёқилғилар дейилади. Буларга кокс, кукун ҳолатигача майдаланган қаттиқ ёқилғи, брикетлар, ёғоч қўмири, бензин, керосин, соляр мойи, газойль, мотор мойи, мазут, домна ва кокс батареяси газлари ва табиий газни қайта ишлашда олинadиган газлар киради.

Ёқилғи қаттиқ, суюқ ва газ ҳолатида бўлади. Қаттиқ ёқилғига тошқўмир, торф, ёнувчи сланецлар, кокс, ёғоч қўмири ва ш. к. киради. Суюқ ёқилғига нефть ва нефть маҳсулотлари (бензин, керосин, соляр ва мотор мойлари, газойль, мазут, қозон қурилмаси) ёқилғиларини киритиш мумкин. Газ ёқилғисига — кокс ва домна, генератор, нефтни қайта ишлаш заводлари газлари, пропан, ацетилен, тошқўмир қазиб олишда олинadиган газлар ва ш. к. мисол бўла олади.

Ёқилғи таркиби органик ва минерал моддалардан иборат бўлади. Органик моддаларга углерод (C), водород (H_2), кислород (O_2), азот (N_2) ва олтингугурт (S) киради. Бу кимёвий элементлар ва улар бирикмаларининг миқдори турли хил ёқилғида турлича бўлади. Масалан, нефть ва унинг маҳсулотлари таркиби асосан углерод ва водороддан ташкил топган.

Ёқилғининг агрегат ҳолатидан қатъи назар, унинг таркибидаги углерод ва водород асосий бўлиб, суюқ ёқилғида уларнинг миқдори 85—87%, қаттиқ ёқилғида эса 50—90% ни ташкил этади. Кислород элементининг миқдори қаттиқ ёқилғида 6,5% гача, суюқ ёқилғида эса 25% гача этади.

Газдаги водород ва углероднинг умумий миқдори 0,3 дан 95% гача. C ва H_2 бирикма ҳолида, яъни метан (CH_4) гази кўринишида кўпроқ учрайди.

Ёқилғининг табиатда ҳосил бўлиш даврида унинг таркибий қисмидаги кимёвий элементлар миқдори ҳам ўзгариб боради. Айрим кимёвий элементлар миқдори камайса, айримлариники ортади. Хусусан, ёқилғи ёнишининг ортиб бориши унинг таркибидаги углерод миқдорининг кўпайишига олиб келади. Масалан, антрацит

таркибида 93% углерод бўлса, ёғочда 40% ни ташкил этади.

Ёқилгининг таркибий қисми фоиз (%) ларда ифодаланади, яъни унинг иш, қуруқ, ёнувчи, органик қисмларини ташкил қилган кимёвий элементлар йиғиндиси ҳар бир ҳолат учун 100% деб қабул қилинади:

$$C^u + H^u + O^u + N^u + S^u + A^u + W^u = 100\%; \quad (150)$$

қуруқ масса қисми

$$C^k + H^k + O^k + N^k + S^k + A^k = 100\%; \quad (151)$$

ёнувчи масса қисми

$$C^e + H^e + O^e + N^e + S^e = 100\%; \quad (152)$$

органик масса қисми

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100\% \quad (153)$$

Ёқилғи таркибида углерод қанча кўп бўлса, кислород шунча кам бўлади ва аксинча. Кислород миқдорининг ёқилғи таркибида ортиши унинг иссиқлик беришини пасайтиради. Ёқилғи таркибидаги кимёвий элементларнинг реакцияга кириши (ёниши) да ҳар хил миқдордаги иссиқлик ажралади.

Турли хил ёқилғининг кимёвий таркиби турлича бўлиши мумкин (5 ва 6-жадваллар).

5-жадвал

Қаттиқ ва суюқ ёқилғининг таркибий қисми

Ёқилғи тури	Ёқилғи таркибидаги ёнувчи элементлар, %			
	C ^e	H ^e	O ^e	S ^e
Ёғоч	50	6	43	0
Торф	53—62	5,2—6,2	32—37	0,1—0,3
Қўнғир кўмир	62—72	4,4—6,2	18—27	0,5—6,0
Тошкўмир	75—90	4,5—5,5	4—15	0,6—6,0
Антрацит	90—96	1,0—2,0	1—2	0,5—7,0
Нефт	83—86	11—13	1—3	0,2—4,0

Ёнувчи газнинг таркибий қисми

Газ тури	Қуруқ газ ҳажмидаги модда миқдорлари, %							
	CH ₄	H ₂	CO	C _n H _m	O ₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂
Табиий (Бу-хоро)	94,9	—	—	3,8	—	0,4	—	0,9
Кокс газ (то-заланган)	22,5	57,5	6,8	1,9	0,8	2,3	0,4	7,8
Домна газ	0,3	2,7	28	—	—	10,2	0,3	58,5
Суюлтирилган газ	4	қолгани бошқа газлар: пропан 79%, этан 6%, водород, изобутан 11%.						

Кам миқдорда водород газ суви электролиз қилиш усули билан олинади ва илмий тадқиқот лабораторияларида қўлланилади. Табиий ва сунъий газ ёқилғи сифатида саноатнинг турли тармоқларида, автомобилда, авиацияда охириги ўн йил мобайнида кенг қўлланилмоқда.

5.2. Ёқилғи турлари

Қаттиқ ёқилғи. Ёқилғи массаси ёнувчи қисмининг таркиби ўзгармас катталиқ бўлиб, унинг асосий характеристикаси ҳисобланади. Ундаги намлик ҳамда кул миқдори ўзгарганида ҳам унинг характеристикасига салбий таъсир қилмайди. Турли хил ёқилғиларда ёнувчи масса миқдори ҳар хил бўлади. Шунинг учун ҳам уларнинг иссиқлик бериш хусусияти турличадир.

Ёнувчи масса таркибига кирган кимёвий элементлар реакцияга киришида (ёнишида) ажралиб чиқадиган иссиқлик миқдори ҳамма элемент учун бир хил эмас. 1 кг углерод тўла ёнганда CO₂ ҳосил бўлади ва 32,8 МЖ иссиқлик миқдори ажралади. 1 кг водород ёнганда 12,56·10⁴ кЖ иссиқлик ажралади ва ҳ. к.

Ёниш жараёнининг тўлалигини таъминлаш ёниш камерасига узатиладиган атмосфера ҳавосининг миқдорига боғлиқ. Ҳавонинг кўп ёки камлигига қараб кимёвий реакция вақтида турли-туман заҳарли ва заҳарсиз кимёвий бирикмалар ҳосил бўлади. Масалан, ҳаво етарли бўлмаганида углерод кислород билан тўла реакцияга ки-

риша олмаганлигидан захарли углерод оксиди CO ҳосил бўлади. Ёқилғидаги олтингугуртнинг реакцияга киришидан эса сульфид ангидриди SO_2 ҳосил бўлади. У ёқилғи таркибидаги намликдан вужудга келган сув буғи билан бириккиб сульфат кислотаси H_2SO_3 га айланади.

Ҳосил бўлган H_2SO_3 металл сиртларини, занглатиб емиради, бу ички ёнув двигателларига салбий таъсир кўрсатади.

Суюқ ёқилғи асосан нефтни $300\text{—}370^\circ\text{C}$ қиздиришдан ҳосил бўлган буғни ҳар хил фракцияларга ажратиш ва уларни конденсациялаш (суюқлантириш) йўли билан олинади: суюқлантирилган газ 1%, бензин 15% атрофида (суюқлантириш температураси $t_c = 30\text{—}180^\circ\text{C}$), керосин 17% атрофида ($t_c = 120\text{—}315^\circ\text{C}$), соляр мойи 18% атрофида ($t_c = 180\text{—}350^\circ\text{C}$) ва мазут 45% (қайнаш температураси $t_k = 330\text{—}350^\circ\text{C}$) ҳамда қолдиқ масса 4% атрофида бўлади.

Мазутни юқори босим остида юқори температурага-ча қиздириш йўли билан ундаги оғир молекулаларнинг парчаланиши натижасида енгил суюқ маҳсулотлар олинади. Мазут 84—86% гача углерод (ёқишга яроқли) ва 10—12% водороддан ташкил топган бўлиб, у мотор ёқилғиси ёки қозон қурилмаси ёқилғиси сифатида ишлатилади.

Газ ёқилғиси, асосан табиий газ бўлиб, унинг таркиби метан (ботқоқ гази) CH_4 , водород H_2 , азот N_2 , юқори даражадаги углерод бирикмалари C_nH_m , углерод оксиди CO , карбонат ангидриди CO_2 дан иборат. Бу газларнинг миқдори газ конининг ҳаммасида ҳам бир хил эмас. Турмушда ишлатиладиган газ тозалангандан сўнг, унга газнинг сирқиб чиқишини аниқлаш мақсадида махсус қўшилма — *одоризатор* қўшилади, у ўзига хос сассиқ ҳидга эга. Маълумки, турмушда ишлатиладиган газ суюлтирилган ҳолатда махсус баллонларда ташилади. Улар нефтни қайта ишлашда ёки нефть билан бирга чиққан ҳамроҳ газлардан олинади ва саноатда ҳамда турмушда ёқилғи сифатида кенг қўлланилади. Масалан, Сургут ГРЭС ҳамроҳ газ билан ишлайди.

Суюлтирилган газ таркибида техникавий пропан ($\text{C}_3\text{H}_8 + \text{C}_3\text{H}_6$) ёки бутан ($\text{C}_4\text{H}_{10} + \text{C}_4\text{H}_8$) камида 93% атрофида бўлади. Суюлтирилган пропан ва бутан газлари ташиладиган баллонлардаги босим 2 МПа, уларнинг тегишаралашмаси солинганда босим 0,6 МПа атрофида бўлади.

Кокс ва домна газларини металлургия саноати корхоналари беради ва уларнинг таркибида заҳарли СО гази 5—10% ни ташкил этади. Шунинг учун улар асосан завод аҳтиёжларида кўпроқ ишлатилади.

Ёқилғининг агрегат ҳолатидан қатъи назар, ҳамма ёнғилғи бир хил иссиқлик миқдорини ажратмайди. Шунинг учун унинг таркиби ёнувчи ва балласт (кул ва намлик)дан иборат бўлади.

Ёқилғи тўла ёнганда ажралиб чиқадиған иссиқлик миқдори турлича бўлганлигидан, уларни бир-биридан фарқлаш мақсадида, ёқилғининг *ёниш иссиқлиги* тушунчаси киритилган. Иш ёқилғисининг бирлик массаси тўла ёнганда ажралган иссиқлик миқдори ёниш иссиқлиги дейилади. Ёниш иссиқлигининг ўлчови кЖ/кг ёки кЖ/м³. Ёқилғининг ёнишида ажраладиган иссиқлик миқдори юқори ($q_{ю}^n$) ва қуйи (q_k^n) бўлади.

Иш ёқилғисининг бирлик массаси тўлиқ ёнганда, унинг таркибидаги намликнинг буғланишига сарф бўлган иссиқлик миқдори ҳисобга олинмайдиган ёниш жараёнида, ажралиб чиққан иссиқлик миқдори *юқори* ($q_{ю}^n$) *иссиқлик ажралиш* дейилади. Ёқилғининг бирлик массаси ёнганда унинг таркибидаги намлик ҳамда водороднинг кислород билан реакцияга киришиши жараёнида ҳосил бўлган намлик ҳисобга олинган ҳолатда ажралган иссиқлик миқдори *қуйи иссиқлик ажралиш* дейилади. Шунинг учун бу исроф эътиборга олинганда ҳисоблар тўғри бўлади. Масалан, 1 кг водород кислород билан реакцияга киришиши жараёнида 9 кг сув ҳосил бўлади. Табиийки, ҳар қандай ёқилғи таркибида ва ёнишни таъминлаш учун киритиладиган атмосфера ҳавосида водород мавжуд. Ҳосил бўлган бир кг сувни буғлантириш учун $24 \cdot 10^2$ кЖ иссиқлик миқдори сарфлаш керак, 1 кг буғ суюқликка айланиш жараёнида атрофга 2,5 МЖ ($t=20^\circ\text{C}$) иссиқлик чиқаради.

Демак, $q_{ю}^n$ билан q_k^n орасидаги боғланишни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$q_{ю}^n = q_k^n + 25(9H^n + W^n). \quad (154)$$

Қаттиқ ёқилғиларнинг ёниш иссиқлиги $10 \div 28$ МЖ/кг оралиғида бўлиб, унинг таркибидаги намлик ва кул миқдорининг, яъни балласт қисмининг ортиши билан $q_{н.а}^n$ (иш ёқилғисининг иссиқлик ажратиши) камайиб боради. Суюқ ёқилғиларда $q_{н.а}^n = 39$ МЖ/кг гача бўл-

са, газларда унинг қиймати $4 \div 88,5$ МЖ/м³ ни ташкил этади.

Қаттиқ ва суёқ ёқилғиларнинг иссиқлик ажратиши-ни Д. И. Менделеевнинг эмперик формуласи асосида етарли аниқликда Ж/кг ўлчовида назарий ҳисоблаб топилади:

$$q_k^u = 10^4 [34,013C^u + 125,6H^u - 10,9(O^u - S^u) - 2,5(9H^u + W^u)]. \quad (155)$$

$$q_{\text{ж}}^u = 339C + 1250H - 109(O - S). \quad (156)$$

Газ ёқилғиси учун (155) тенглама Ж/м³ ўлчовида қуйидагича ёзилади:

$$q_{\text{г}}^u = 10^3 (12,8CO + 10,8H_2 + 35,8CH_4 + 56C_2H_2 + 59,5C_2H_4 + 63,4C_2H_6 + 91C_3H_8 + 120C_4H_{10} + 144C_4H_{12}).$$

Ёқилғининг иссиқлик ажратиши (ёниш иссиқлиги) (155), (156), (157) формулалар билан ҳисобланганда колорометрик усулга нисбатан унча катта хатоликка йўл қўйилмайди. Турли-туман ёқилғиларнинг ажратган иссиқлиги бир хил эмас.

Шартли ёқилғи сифатида иссиқлик ажратиши $q_k^u = 29,35$ МЖ/кг ($7 \cdot 10^3$ ккал/кг) га тенг бўлган ёқилғи қабул қилинган. Шартли ёқилғи асосида бошқа ёқилғилардан иқтисодий жиҳатдан фойдаланиш мақсадга мувофиқлиги ва улар сарфини аниқланади.

7-жа д вал

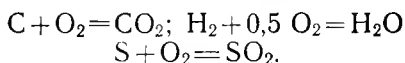
Ёқилғиларнинг q_k^u иссиқлик ажратиши

Ёқилғи	$q_k^u \cdot 10^{-4}$, кЖ/кг	Ёқилғи	$q_k^u \cdot 10^{-4}$, кЖ/кг
Ёғоч	1,05—1,47	Нефт	4,30—4,60
Торф	0,84—1,05	Мазут	4,0 —4,55
Қунағир		Керосин	4,40—4,60
Кўмир	0,63—1,09	Бензин	4,40—4,70
Тошкўмир	2,1 —3,0	Табий газ	2,70—3,80
Антрацит	2,70—3,10	Нефтининг ҳамроҳ газлари	4,20—7,10
Ёнувчи сланецлар	0,73—1,50	Кокс гази	1,50—2,10
Писта кўмир	3,0 —3,40	Домна гази	0,36—0,41
Ярим кокс	2,50—3,10	Генератор гази	0,41—0,71
Кокс	2,80—3,10	Сув гази	1,05—1,17

5.3. Ёқилғининг ёниши ва ортиқча ҳаво коэффициенти

Ёқилғининг ёниши учун албатта атмосфера ҳавоси зарур бўлади. Унинг миқдори қўп ёки кам бўлишига қараб кимёвий реакция (ёниш) жадал ёки суст бўлади. Ўз навбатида, ёниш маҳсулоти таркибидаги заҳарли газларнинг миқдори ҳам кенг оралиқда бўлади.

Маълумки, ёқилғи таркибидаги С, Н реакцияга киришиб, охири CO_2 , H_2O ва SO_2 ҳосил бўлиши билан тугайди



12 кг С (углерод)нинг тўлиқ реакцияга кириши учун 32 кг кислород керак бўлади. Шунда 44 кг CO_2 ҳосил бўлади, 32 кг олтингугуртнинг тўлиқ реакцияга кириши учун 32 кг кислород керак бўлади, бунда 64 кг SO_2 ҳосил бўлади; 2 кг водороднинг ёниши учун 16 кг кислород зарур бўлади, шунда 18 кг сув буғи ҳосил бўлади ва ш.к.

Ёқилғининг ёнишида асосий оксидловчи модда сифатида кислород ёки атмосфера ҳавоси олинади. Ёқилғининг тўла ёниши учун зарур бўлган атмосфера ҳавосининг миқдори назарий жиҳатдан ҳисоблаб топилади. Маълумки, кислороднинг нормал шарондаги зичлиги $\rho = 1,43 \text{ кг/м}^3$ ва унинг атмосфера ҳавосидаги улуши 23,15% ни ташкил этади.

Ўтхонада қаттиқ ёки суюқ ёқилғининг 1 кг тўлиқ ёниши учун зарур бўлган кислород миқдори қуйидаги тенгликдан топилади (кислород-ёқилғи нисбатидан):

$$q_{\text{к.н}} = (2,67\text{C}^{\text{I}} + 8\text{H}^{\text{II}} + \text{S}^{\text{III}} + \text{O}^{\text{IV}}) : 100, \quad (158)$$

бунда 2,67 ва 8 сонлари тегишлича 1 кг углерод ва 1 кг водороднинг тўлиқ ёниши учун зарур бўлган O_2 миқдори, кг; $q_{\text{к.н}}$ —кислороднинг назарий миқдори, кг.

1 кг ёқилғининг тўлиқ ёниши учун зарур бўлган ҳаво массаси қуйидаги ифодадан топилади:

$$m_{\text{х.н}} = \frac{q_{\text{к.н}}}{23,15} \cdot 100 = 0,115\text{C}^{\text{I}} + 0,344\text{H}^{\text{II}} + 0,043(\text{S}^{\text{III}} + \text{O}^{\text{IV}}), \quad (159)$$

бунда $m_{\text{х.н}}$ —назарий ҳисобланган ҳаво массаси, кг; 23,15—бирлик ҳажмдаги ҳаво таркибидаги кислород миқдори, %; $\text{C}^{\text{I}} + \text{H}^{\text{II}} + \text{S}^{\text{III}} + \text{O}^{\text{IV}} + \text{N} = 100\%$ иш ёқилғисининг ёнувчи қис-

ми, %; $2,67 \cdot 23,15 = 0,115$; $8 \cdot 23,15 = 0,344$; $1 \cdot 23,15 = 0,043$ сонлар C, H, S миқдорларининг ҳаводаги O_2 улушига нисбатлари.

Назарий ҳисобланган ҳаво массасини ҳажмий бирликларда ифодалаш учун $m_{x,n}$ ни ҳаво зичлигига (нормал шароитда)

$$\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3 \text{ га бўламиз } V_{x,n} = \frac{m_{x,n}}{\rho_x} = 0,089C^u + 0,0266H^u + 0,033(S^1 - O^u), \quad (160)$$

бунда $V_{x,n}$ —1 кг ёқилғининг тўлиқ ёниши учун зарур бўлган атмосфера ҳавосининг назарий ҳажми, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Бир килограмм (ёки метр куб) ёқилғининг тўлиқ ёнишини таъминлаш учун реал шароитларда зарур бўлган назарий ҳаво миқдори ҳисоблаб топилади. Аммо реал шароитда ўтхоналарни жуда такомиллаштирганимизда ҳам назарий ҳаво миқдори етарли бўлмайди. Ҳаво таркибидаги кислород атомларининг ҳаммаси ёқилғи билан тўлиқ реакцияга киришишга улгурмасдан ёниш маҳсулоти (тутун) га аралашиб ташқарига чиқиб кетади. Шунинг учун $V_{x,n}$ га нисбатан кўпроқ ҳаво миқдори керак бўлади ва у қуйидаги тенгликдан ҳисоблаб топилади:

$$V_x = 0,01 (2,67C^u + 8H^u + S_{отк} - O^u) : 0,21 \cdot 1,43, \quad (161)$$

бунда 0,01—ёқилғи таркибидаги кислород улуши; $S_{отк}$ органик ва колчедан S; 0,21—нормал шароитдаги қуруқ ҳаводаги кислород улуши.

Тўла ёниш учун зарур бўлган ҳақиқий ҳаво миқдорининг назарий ҳисоблаб топилган миқдорига нисбати ортиқча ҳаво коэффиценти дейилади ва у қуйидагича ифодаланади:

$$\alpha_x = V_x / V_{x,n}$$

α_x нинг катталиги ёқилғининг турига, агрегат ҳолатига, реакция кечадиган шароитга, ёқиш усулига, ўтхона (камера) конструкциясига ва бошқаларга боғлиқ. α_x қанча кичик бўлса, ёниш жараёни шунча тежамли бўлади, аксинча, ёқилғи чала ёнади ва ўтхонанинг ҳамда у билан боғлиқ бўлган қурилмаларнинг ФИК камаяди.

Такомиллашган ўтхоналар учун $\alpha_x = 1,05$ —1,1 бўлса, такомиллашмаганлари учун 1,3—1,5 га тенг.

Карбюраторли двигателлар учун $\alpha_x = 1,0$ —1,1 бўлса, дизелли двигателларда $\alpha_x = 2,0$ —2,2, авиация двигателларида 0,85—0,95 ни ташкил этади.

α_x нинг қиймати ўзгарганда ёқилғининг ёниш температураси ҳам ўзгаради (8-жадвал).

8-жадвал

Ёқилғи ёниш температурасининг α_x коэффициентга боғлиқлиги

Ёқилғи номи	Ёниш температураси			
	$\alpha_x = 1.0$	$\alpha_x = 1.3$	$\alpha_x = 1.5$	$\alpha_x = 2.0$
Антрацит	2270	1845	1665	1300
Торф	1700	1510	1370	1110
Мазут	1125	1740	1580	1265
Газ (Саратов)	2000	1749	1478	1167

Демак, ёқилғининг тўла ёнишини таъминлаш учун ўтхоналарга ҳаво миқдорини ростловчи автоматик мосламалар ўрнатилади ва шу билан уларнинг ФИК орттирилади.

5.4. Ёниш маҳсулоти ва унинг таркиби

Ёқилғи ёнганда маълум миқдордаги иссиқлик энергияси ажралади ва тутун газлари ҳамда қолдиқ кул ҳосил бўлади. Тутун газлари (соддароқ қилиб айтганда тутун) ва кул ёниш маҳсулотлари дейилади.

Ёниш маҳсулотининг таркиби ва унинг миқдори ёқилтурига ва сифатига қараб турлича бўлиши мумкин.

Амалда ёниш камераси (ўтхона)га киритилган ёқилғи массаси билан ҳаво (оксидловчи) массасининг йиғиндиси ёниш маҳсулоти массасига тенг бўлиши керак.

Ёниш маҳсулотидаги тутун қисмининг ҳажми $V_{т.г.}$ қуруқ газлар ҳажми $V_{қ.г.}$ билан ёқилғи таркибидаги водороднинг реакцияга кириши ва намликнинг бугланишидан ҳосил бўлган сув бугининг ҳажми $V_{с.б.}$ йиғиндисига тенг, яъни

$$V_{т.г.} = V_{қ.г.} + V_{с.б.} \quad (163)$$

Қуруқ газларга $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{SO}_2 + \text{O}_2 + \text{N}_2$ кириди ва уларнинг йиғиндиси 100 фоиз деб қабул қилинади. $\text{CO}_2 + \text{SO}_2 = \text{RO}_2$ уч атомли газлар йиғиндиси деб белгиланади.

Юқорида айтиб ўтганимиздек, ёқилғининг тўлиқ ёнишини таъминлаш учун назарий ҳисоблаб топилган ҳавонинг $V_{х.н}$ ҳажми ҳақиқий зарур бўлган V_x ҳажмдан кичик бўлади. Шунинг учун ҳам $V_{х.н} > V_x$ шарти асоси-

да айрим ҳисоб-китобларни 10—25% хатолик билан амалга ошириш мумкин.

Демак, $V_{т.г.}$ ҳажмин қуйидагича ёзиш мумкин:

$$V_{т.г.} = V_{RO_2} + V_{H_2O} + 0,79 z_x \cdot V_x + 0,23(z_x - 1)V_x, \quad (164)$$

бунда $0,79 z_x \cdot V_x$ — атмосфера ҳавоси таркибидаги, реакцияга кирмаган «транзит» — ўткинчи, азот миқдори; α_x — ортқича ҳаво коэффициентини; V_x — ҳақиқий ҳаво миқдорининг ҳажми; $0,79$ — азотнинг ҳаводаги улуши; $0,23$ — қуруқ ҳавонинг ҳажм бирлигидаги кислород улуши; $0,23(\alpha_x - 1)V_x$ — реакцияга кирмасдан тутунга қўшилиб атмосферага чиқиб кетадиган ҳаводаги ортқича ўткинчи кислород миқдори.

Нормал шаронтда идеал газнинг $22,4 \text{ м}^3$ ҳажминини 1 кмоль газ эгаллайди. Уч атомли газлар V_{RO_2} ҳажми қуйидаги ифодадан ҳисоблаб топилади:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \left(\frac{C^u}{12} \cdot 10^{-2} + \frac{S^u_{0+K}}{32} \cdot 10^{-2} \right) 22,4 = \quad (165)$$

$$= 0,0163 (C^u - 0,375 S_{0+K}),$$

бунда S_{0+K} — ёнувчи олтингуғургининг органик ва колчедон қисми; 12 ва 32 — углерод ва олтингуғуртнинг моляр массалари.

Сув буғинини идеал газга яқинроқ деб қабул қилинса, унинг зичлиги (нормал шаронтда) $\rho = 18/22,4 = 0,805 \text{ кг/м}^3$ бўлади. Агарда атмосфера ҳавосидаги сув буғи зичлиги (нормал шаронтда) $\rho_{с.б.} = 0,01 \text{ кг/м}^3$ ҳам ҳисобга олинса, ёқилгининг ёнишида ҳосил бўлган сув буғи ҳажмини қуйидаги ифодадан ҳисоблаб топиш мумкин:

$$V_{H_2O} = \frac{0,01 H^u \cdot 9}{80,5 \cdot 10^{-2}} + \frac{W^u}{80,5 \cdot 10^{-2}} = 0,111 H^u + 0,0124 W^u \quad (166)$$

Демак, ёниш маҳсулотли таркибини назарий ҳисоблаб аниқлаш ҳам мумкин. Лекин амалда RO_2 , O_2 , CO , CH_4 , H_2 ҳажм бирлигидаги миқдорлари махсус газ анализаторлари ёрдамида ўлчанади.

Ички ёнув двигателлари циклидаги ёниш жараёнининг нормал ўтаётганлигини CO , CO_2 , SO_2 ва бошқа газларнинг миқдорларини ўлчаш йўли билан баҳолаш ва уларни, зарур бўлганда, ростлаш мумкин. Масалан, Инфралит-1100 асбоби ёрдамида CO миқдорини юқори аниқликда ўлчаш мумкин.

мумкин. Чўғдон устидаги ёқилғига бу тартибдаги ҳаракатларни беришдан асосий мақсад, унинг тўлиқроқ ёнишини, кулнинг яхши ажралишини ва ҳаво оқимининг тўғри ўтишини таъминлаш ҳамда ўтхона ишларини механизациялашдан иборат.

Машъалали ёқиш. Ўтхонанинг ФИК ни орттириш ва ёқилғининг тўлиқ ёнишини таъминлашда қаттиқ ёқилғи махсус тегирмонларда кукун ҳолатига келтирилиб, ҳаво оқими билан биргаликда ўтхонага узатилади. Бундай ёниш машъалали ёниш дейилади (24- расм, б).

Машъалали ёқишнинг асосий афзаллиги ёқилғи исрофсиз ёнади ва катта миқдорда иссиқлик ажралиб чиқади. Газ-ҳаво оқимидаги зарраларнинг суйрилиқ даражаси кичик бўлганлигидан машъалали ёқиш жадаллигининг чегараланганлиги ҳамда оқим ўзгариши ёнишга тез таъсир этиши бу усулда ёқишнинг асосий камчилиги ҳисобланади.

Уюрмали ёқиш. Ўтхона бўшлиғида кучли, уюрмали оқим ҳосил қилиш усули билан ёқилғи ёқилганда ёқилғи зарралари узоқ вақт ўтхонада бўлади ва тўлиқ ёнади (24- расм). Ҳаво оқими ёқилғи зарраларини уюрма траекторияси бўйлаб олиб ўтади ва жадал ёнишни таъминлайди. Ёқилғи зарраларининг ўлчами 3—5 мм ни ташкил этса ҳам ўтхонада улар анча муддат давомида учиб юрганлигидан тўлиқ ёнади ва катта миқдордаги иссиқликни ажратади. Кул ва шлак ўтхона охиридан учиб ва оқиб чиқади.

Чангсимон ҳолатга келтирилган қаттиқ ёқилғиларни бу усулларда ёқишнинг ўзига хос афзалликлари бор:

а) паст навли кўмирни, кўмир қазиб олишда ва уни бойитишдаги қолдиқ чиқиндиларни катта қувватли қозон қурилмалари ўтхоналарида ёқиш мумкин;

б) ортиқча ҳаво коэффиценти $\alpha_x = 1,2—1,25$ қилиб олинганда чала ёнишда вужудга келадиган исрофлар жуда кам ва ўтхона самарадорлиги иқтисодий жиҳатдан юқори бўлади;

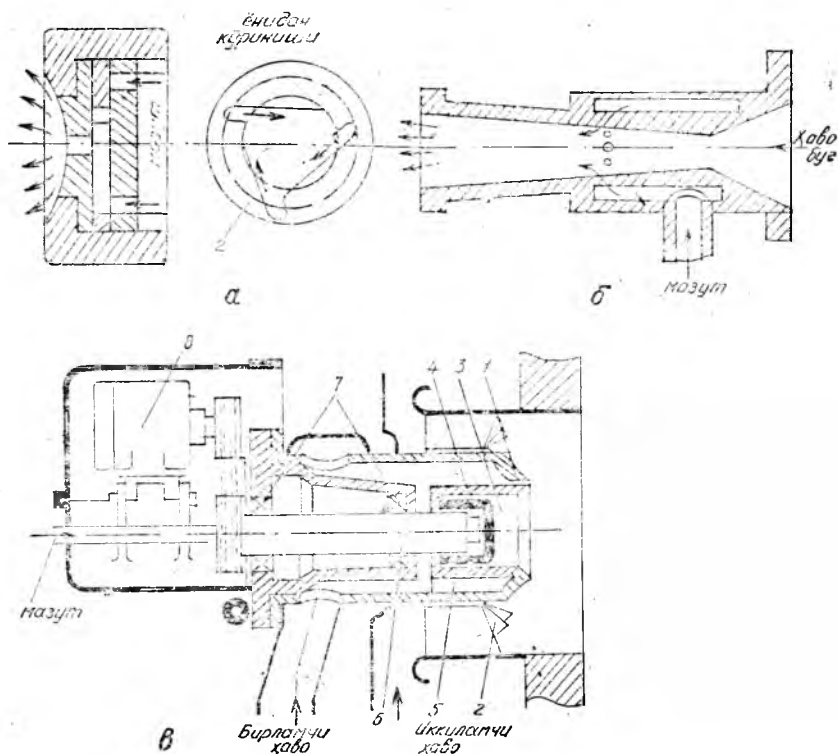
в) ёниш жараёнини тўла механизациялаштириш ва автоматлаштириш мумкин;

г) паст қувватларни осонгина олиш мумкин.

Бундай афзалликлари билан бирга қурилмаларнинг нархи қиммат, тегирмон ва вентиляторларга қўшимча электр энергияси талаб этилади, газ-ҳаво оқими кучлилигидан ёниш маҳсулотининг кул қисмининг 80% га яқини

атмосферага учиб чиқади ва атроф-муҳитни ифлослайтиради.

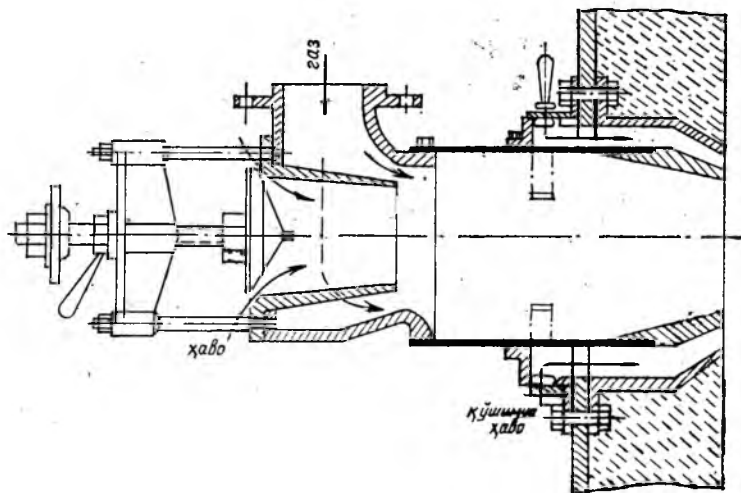
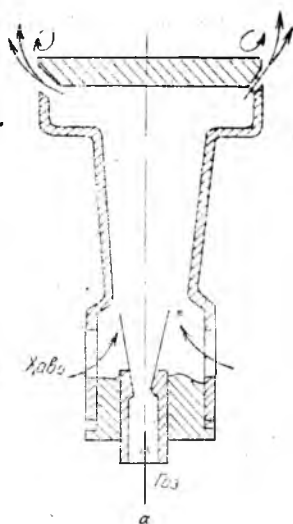
Суюқ ва газ ёқилғиларини ёқишда махсус мосламалар — горелка ва форсунка (ингл. форсе — дам бермоқ) қўлланилади. Горелка ва форсункаларнинг тузилиши камера, ўтхоналарнинг қуввати ва уларнинг турига қараб ҳар хил бўлади. Суюқ ва газ ёқилғиларидан фақат камера ва ўтхоналардагина ёқилмасдан, ички ёнув двигателларида, реактив двигателларда ҳам иш ёқилғиси сифатида кенг фойдаланилади. Горелка ёки форсунка ёниш камералари (ўтхоналари)нинг асосий қисми ҳисобланади. Суюқ ёқилғилар ёқилганда улар форсунка орқали камерага пуркалади. Ёқилғини форсунка майда зарраларга айлантириб, камерага тўзғитиб пуркайди ва пуркалган ёқилғи ҳаво билан яхши аралашиб, тўлиқ ёнади.



25-расм. Форсунка турлари: а) механик; б) пневматик; в) ротацион.

Қозон қурилмаларида форсунка қўлланилганда асосий ёқилғи мазут ёки ишлатиб бўлинган турли-туман техник мойлар, яъни нефть маҳсулотлари чиқиндиси ёқилади. Бунда буғ форсункаси қўлланилади (25-расм, б). Мазутни ёқишда Бобкок ва Вилькоксининг механик форсункасидан (25-расм, а) фойдаланилади. Мазут юқори (10 атм) босим остида форсункага узатилади. Форсункага узатилаётган мазут температураси камида $80-115^{\circ}\text{C}$ бўлганлиги учун унинг қовушқоқлиги камайиб бир текис тўзғийди. Механик форсунка анча тежамли ишлайди ва уни ростлаш оддий.

Газ ёқилғисини ёқишда ўзига хос техник талаблар бажарилади. Шунинг учун горелка (25-расм) ҳамда форсунканинг тузилиши содда ва ишлатиш осон бўли-



26-расм. Газ горелкасининг схемаси: а) инжекторли; б) катта қувватли (Тербек системаси).

ши керак. Домна, кокс батареялари, камераларда металлургия заводлари газини ва табиий газ ёқилади. Ўтхонага ҳаво ва газ горелкалар орқали узатилади.

Горелкалар юқори ва паст калорияли газ ёқилғисини ёқишга мўлжалланган. Қозон қурилмалари ўтхоналарида газини ёқиш ишлари ҳозирги вақтда махсус электр учқунлари ёрдамида амалга оширилади ва автоматик назорат қилиб турилади. Сунъий газлар асосий қисмининг калорияси паст, табиий газларники юқори бўлади.

Газ горелкаси қуйидагича ишлайди. Газ горелка ўқи бўйлаб ҳаракатланиб, аввал сопло 1 га киради. Соплонинг олди қисмидаги ҳалқасимон тирқиш орқали унга ҳаво сўрилади. Соплонинг давоми газ ва ҳавонини аралаштириш вазифасини бажарганлигидан унда иш ёқилғиси (газ ва ҳаво аралашмаси) ҳосил бўлади. Ўтхона ичида жойлашган горелканинг тешикли қисмидан иш аралашмаси камерага киради ва ёнади. Газ ёқи ҳаво оқимининг миқдори заслонка (тўсиқ) ва клапанлар ёрдамида ростланади.

Ёқилганда қул ҳосил бўлмаслиги ва маълум шарт-шароит яратилганда юқори температурани ҳосил қилиш мумкинлиги газнинг муҳим афзаллиги ҳисобланади. Ёқиш жараёнини осон механизациялаштириш ва автоматлаштириш мумкин.

Ички ёнув двигателларида (ИЁД) ёқилғи сифатида нефтни қайта ишлаш йўли билан олинадиган бензин, керосин, соляр мойи ҳамда қайта ишланган табиий газ, ҳозирча лаборатория шаронтиларида олинаётган ва тадқиқот қурилмаларида қўлланиладиган водород газидан фойдаланилади.

Карбюраторли ички ёнув двигателларида, асосан бензин, лигроин ва газ; дизель ички ёнув двигателларида газойль ва соляр мойи; реактив двигателларда керосингазойль фракциялари ишлатилади. Бензин (франц benzine — хушбўй модда) углевод ва водород бирикмаларидан иборат бўлиб 30—205°C қайнайди. Унинг зичлиги $\rho = 700\text{—}800\text{ кг/м}^3$. Нефддан олинадиган А-66, А-72, А-76, АН-91, АИ-92, АИ-93, АИ-98 маркали бензинлар карбюраторли двигателларда қўлланилади. Авиацияда сифати юқорироқ бўлган Б-100/130, Б-95/130, Б-31/115 маркали ёқилғи ишлатилади. Бензин автомобиль двигателида энг кам сарфланади: 260 г/кВт·соат.

Газойль (газ ва ингл. oil — мой) дизель двигатели

ёқилғиси 200—400°C да қайнайди. Газойль қайта ишланса яна ҳам яхшироқ ёқилғи олиниши мумкин.

Соляр мойи. Нефтни қайта ишлаш жараёнида, уни ҳайдаш, фракцияларга ажратишда олинадиган дизель двигателларининг ёқилғиси. Қайнаш температураси 240—400°C, қовушқоқлиги 5—9 сст, 50°C да қотиш температураси — 20°C, очиқ ҳавода алангаланиш температураси 125°C дан юқори.

Керосин (юнон. Keros — мум) — суяқ углеводородлар аралашмаси бўлиб, реактив ва дизель двигателларининг ёқилғиси ҳисобланади. Керосин нефтни тўғри ҳайдаш ёки нефть маҳсулотларини крекинглаш йўли билан олинадиган тиниқ ёки сарғиш-зангори тусдаги суяқлик бўлиб, тез алангаланади. Қайнаш температураси 180—320°C, зичлиги $\rho = 775\text{—}850 \text{ кг/м}^3$.

Лигроин (оғир бензин) — нефть ёки нефть-газни ишлашда ҳосил бўладиган конденсат фракцияси бўлиб, 120—240°C да ажратиб олинади ва дизель двигатели ёқилғиси сифатида ишлатилади. Лигроин рангсиз, тиниқ ёки сарғиш суяқлик, зичлиги $\rho = 785\text{—}795 \text{ кг/м}^3$.

Турли хил ёқилғиларнинг таркибий қисми ва уларнинг иссиқлик чиқариш хусусиятлари турлича (9-жадвал).

9-жадвал

Айрим ёқилғиларнинг таркиби ва уларнинг иссиқлик чиқариш хусусиятлари

Ёқилғи номи	Оғирани буйича таркиби				Силиқли ма сирлиги, г/м^3	Иссиқлик чиқариш хусусияти, кал/кг	15°C, ел 1 атм ҳавонинг узариш сарфи, м ³ /кг
	C, %	H, %	O + N, %	S, %			
Бензин	85,0	15,0	—	—	0,70	10200	12,5
Керосин	85,5	14,0	0,5	—	0,82	10300	12,5
Бензол	91,0	7,5	1,0	0,5	0,88	9600	11,1
Соляр мойи	85,5	12,2	1,5	0,8	0,82	10000	11,8
Спирт	52,0	13,0	35,0	—	0,80	6000	7,6

Сурков мойлар. Ички ёнув двигателлари деталларининг сирпанувчи сиртлари орасидаги ишқаланишни камайтириш учун турли-туман мойлаш материаллари ишлатилади: Автол, ТАД-17, Литол-24, Филлол-1, Техник вазелин ВТВ-1 ва ҳ. к.

6.1. Ички ёнув двигателлари ҳақида умумий тушунча ва уларнинг таснифи

Иш ёқилғиси махсус қурилма ичида ёнадиган ва ёниш жараёнида ажралиб чиққан иссиқлик миқдорининг маълум қисмини механик энергияга айлантириб бера оладиган иссиқлик машинасига ички ёнув двигатели (ИЁД) дейилади. Барча термодинамик жараёнлар цикл давомида цилиндрнинг иш ҳажмида кетма-кет кечадиган поршенли; иш жисми ҳаво компрессорида сиқиладиган, махсус ёниш камерасида ёнадиган ва ёниш маҳсулоти газ турбинасида кенгайдиган газ турбинали ва ёниш маҳсулоти соплда кенгайишидан реактив куч вужудга келадиган реактив двигателлар мавжуд ва улар инсон фаолиятининг турли соҳаларида кенг қўлланилади.

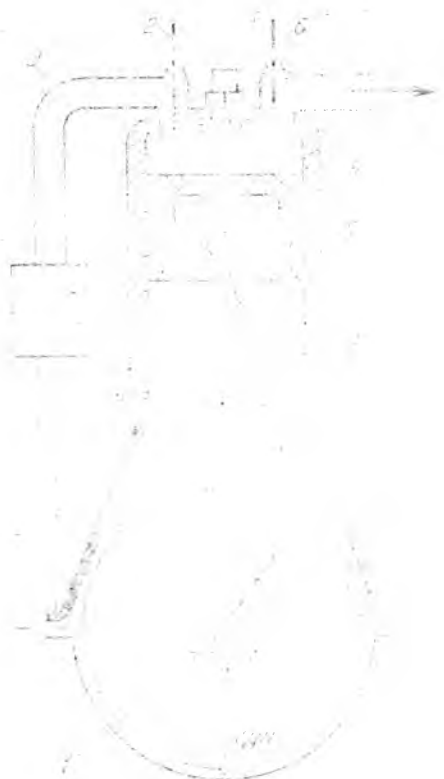
Ички ёнув двигателлари ёқилғи турига қараб, газ ёқилғисида (газ двигатели), суюқ ёқилғида (бензин, соляр мойи, керосин, лигроин ва ҳ. к), бинар (суюқ ва газ) ёқилғида ишлайдиган двигателларга бўлинади. Иш циклига қараб икки ва тўрт тактли; ёқилғининг камерага киритилишига қараб босимли ва босимсиз; иш аралашмасининг тайёрланишига кўра иш жисми ташқарида ва ичкарида тайёрланадиган двигателларга бўлинади. Иш аралашмасини ўт олдириш усулига қараб ташқи электр манбандан (электр учқунни, ўт олдириш шари—калоризатор) ва цилиндрда сиқилган ҳавонинг қизиши (дизель двигатели) ҳисобига ўт олдириладиган двигателлар мавжуд. ИЁД лари автомобиль, авиация, газ турбинали ва реактив двигателларга бўлинади.

Автомобиль учун ИЁД ларининг яратилиши ўтган асрнинг 60-йилларига тўғри келади. Бу даврда Ленуар (1860 й.) Францияда, Н. Отто ва Э. Ленген (1867 й.) Германияда тадқиқотлар олиб борган. Н. Оттонинг тўрт тактли двигатели (1867 й.) Бо-де-Роша томонидан (1862 й.) тақлиф этилган схема бўйича ясалди. 19-асрда нефтни қайта ишлашдан олинган бензин, керосинларни электр учқунни ёрдамида ёқилиши ИЁД ларининг кенг тарқалишига сабаб бўлди.

Россияда биринчи марта бензинда ишлайдиган ИЁД (Костович двигатели) 1889 йил ясалган. Немис муҳандиси Р. Дизель томонидан ихтиро этилган (1897 й.) сиқилиш ҳисобига қизиган ҳавога пуркалган ёқилғининг

ёниши натижасида ишлайдиган ИЕДнинг такомиллашган конструкцияси 1899 й. Петербургда ясалади. Кейинчалик компрессионсиз дизель двигателини 1901 йилда Г. В. Трипклер ва 1910 йилда Я. В. Мамин яратадилар. Дизель двигателларининг назарияси тўлароқ ўрганилиши даврида, унинг конструкциялари ҳам такомиллашиб борди.

Дизель двигатели тежамли бўлганлиги учун у кенг тарқала бошлади. Ҳозирги вақтда энг яхши дизель двигателининг солиштирма ёқилги сарфи тахминан



27-расм. Поршеньли ПЕДнинг принципиал схемаси: 1 — картер; 2 ва 6 — киритиш ва чиқариш клапанлари; 3 — ўт оқдириш свечаси; 4 — цилиндр; 5 — поршень; 7 — шатуни; 8 — кривошип; 9 — киритиш трубаси.

190 г/кВт·соат, бошқа турлари учун эса ўртача 270 г/кВт·соатни ташкил этади. Дизель двигателларида ёқилғи сарфининг ФИК 31—44% бўлса, карбюраторли двигателларда одатда, 25—30% дан ошмайди. Газ ёқилғисинда ишлайдиган газодизель двигателлари ҳам мавжуд.

Поршенли двигателлар тежамли ишланганлиги, кам металл сарфланганлиги, ишга тушириш осонлиги, ишончли ишлаши, мустаҳкамлиги ҳамда узоқ муддат ишлаши, илчамлиги туфайли транспортда етакчи ўрнини эгаллайди. Бундан ташқари у кичик ва катта қувватли электр станцияларида (20 кВт дан 20 МВт гача) ҳам ишлатилади.

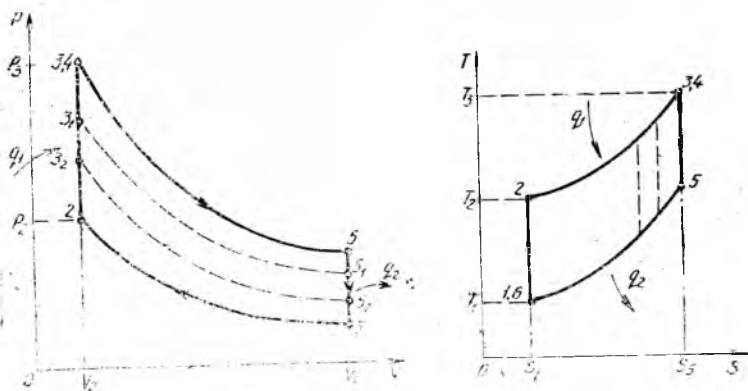
ИЕД нинг принципиал схемаси 27-расмда келтирилган. Поршенли ИЕД нинг асосини цилиндр 4 ва унга киритилган поршень 5 ташкил этади. Поршень кривошип-шатунли механизм орқали тирсак валига ёниш маҳсули газлари вужудга келтирган босим кучини узоқлади. Цилиндрлар блокининг остки қисмига тирсак вали, устки қисмига тирсак вали, устки қисмига киригиш 2 ва чиқариш 6 клапанлари жойлаштирилган цилиндр қаллаги ўрнатилади. Цилиндрлар блоки қаллагига карбюраторли двигателларда свеча 3, дизель двигателларида эса форсункалар ўрнатилади. Поршень цилиндрида илгариланма-қайтма ҳаракат қилади. Цилиндрда поршень ЮЎН (юқори ўт олиш нуқтаси) ва ҚЎН (қуйи ўт олиш нуқтаси) оралиғида ҳаракатланади ва бу оралиқ (l) поршень йўли дейилади. Цилиндрнинг иш

ҳажми $V_n = \frac{\pi d^2}{4} l$ поршень диаметрига ва унинг йўлига боғлиқ. Цилиндрнинг тўла ҳажми иш ҳажми билан ёниш камераси ҳажмлари йиғиндисига тенг. $V_n = V_{ш} + V_{к}$. Иш ёқилғисининг сиқилиш даражаси поршеннинг цилиндридаги ҳолатига боғлиқ ва қуйидагича ифодаланади:

$$\varepsilon = V_{к} \left(1 - \frac{V_{ш}}{V_{к}} \right) \quad (167)$$

6.2. Ички ёнув двигателлари циклида кечадиган термодинамик жараёнлар

ИЕД ларнинг идеал цикллари. Тўрт тактли ИЕД нинг цикли киритиш (ёқилғи билан ҳаво аралашмасининг ёниш камерасига киритилиши), сиқилиш (иш ёқилғисининг сиқилиши), кенгайиш (ёниш маҳсуллариининг кен-



28-расм. ИЕДнинг термодинамик иқлига $V = \text{const}$ бўлганда иссиқлик киритиладиган жараёнинг PV ва TS диаграммалари.

гайиш) ва чиқариш (кенгайиб бўлган ёниш маҳсулотининг сиқиб чиқарилиши) тактларидан иборат.

Соддароқ қилиб уларни биринчи (киритиш), иккинчи (сиқиш), учинчи (кенгайиш) ва тўртинчи (чиқариш) тактлар деб юритилади.

Ҳар бىр тактда поршеньнинг цилиндрдаги ҳолати тўғрисида батафсил тўхталмаймиз.

Карбюраторли тўрт тактли ИЕД назарий циклидаги жараёнларни қараб чиқамиз. Циклга $V = \text{const}$ бўлганда иссиқлик киритилиши (Отто цикли) жараёнида иш жисми параметрларининг ўзгаришини ўрганамиз. Поршень ҚЎН дан то ЮЎН гача (28-расм, 1, 2 нуқталар оралиғида) цилиндрга киритилган иш ёқилғисини адабатиқ ($dq = 0$) сиқиш жараёнида, термодинамик система (иш ёқилғиси) параметрлари (P , V , T) ўзгаради. Иш ёқилғиси ҳажмининг камайиб бориши натижасида унинг температураси, термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ, система ички энергияси ҳисобига ортади, яъни ёқилғи аралашмаси исийди. ИЕД да бензол, бензин, керосин ишлатилганда сиқиш такти охиридаги босим 5—10 атм; газ қўлланилганда 9—14 атм га етади.

Иш ёқилғисини тўла сиқилгандан сўнг, унга ташқаридан q_1 иссиқлик миқдори киритилади, яъни свеча контактлари оралиғида электр учқунини чиқаради. Киритилган q_1 иссиқ ҳисобига иш аралашмаси кучли кимёвий реакцияга киришади (портлаб ёнади) ва ёниш маҳсулотини

(термодинамик система)нинг P ва T параметрлари (29-расм, нуқталар 2, 3 оралиғида) сакраб ўзгаради, яъни $P=25-30$ атм. га, $T=2200, 2300$ К га етади. Ёниш жараёнининг охирида поршень ЮЎН дан КЎН га томон ёниш маҳсулотининг босим кучи таъсиридан ҳаракатланади. Шунда термодинамик система адиабатик ($dq=0$; 28-расм, 3—4 нуқталар оралиғи) кенгайди, яъни параметрлар P , V , T нинг ўзгариши ҳисобига ши бажарилади. Поршень КЎН га етиши олдидан чиқариш клапани очилади ва фойдали ишга айланмасдан қолган иссиқлик миқдори q_2 ёниш маҳсулот газлари, ёсимасдан қолган ёқилғи ва реакцияга киришмаган ҳаво билан ташқарига (совиткичга) чиқарилади (4—1 нуқталар оралиғи).

Демак, циклниң PV диаграммасидаги нуқталар 1—2 ва 3—4 оралиғидаги жараёнлар адиабатик; 2—3 ва 4—1 нуқталари оралиғида эса изохорик бўлади. Шундай қилиб, иссиқлик термодинамик системага $V=\text{const}$ бўлган ҳолатда киритилгандан сўнг ёниш жараёни содир бўладиган циклниң TV диаграммаси иккита адиабатадан ва иккита изохорадан ташкил топар экан. Циклниң TS диаграммасидан кўришиб турибдики, системага иссиқлик киритилганида ёки ундан чиқарилганда система энтропияси ўзгариувчан бўлар экан. Лекин системаниң абсолют температураси изохорик жараёнда кескин ортада, адиабатик жараёнда эса текис камаяди.

Демак, иш ёқилғисиниң сиқилишини, яъни поршеньнинг сиқилиш жараёнини PV — диаграмма асосида қуйидагича рефодлади мумкин.

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (163)$$

бунда V_1 ва V_2 — цилиндрнинг тўла иш ва ёниш камераси ҳажмлари, м³.

Худди шундай ёниш камерасидаги иш ёқилғисига иссиқлик миқдори киритилгандан кейинги босимни, сиқилиш тактиниң охиридаги босимга нисбатан неча марта ортганлигини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\lambda = P_3/P_2. \quad (169)$$

Демак, киритилган q_1 иссиқлик миқдори иш ёқилғисиниң тўлаи ёнишига ижобий таъсир кўрсатиши билан циклниң фойдали ишини орттиради. Циклниң бажарган фойдали иши нуқталар 1—2—3—4 билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Тўлиқ бажа-

рилган иш мусбат ва манфий ишларнинг йнғиндисига, яъни нуқталар $V_1-O-P_3-I-I-V_1$ билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Унда фойдали иш қўидагича ифодаланади:

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

Отто циклининг термик ФПК қўидагича ифодаланади:

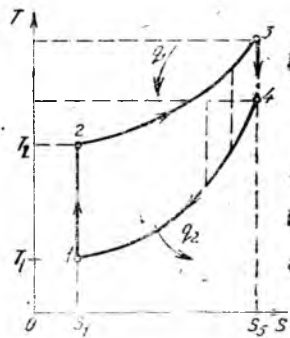
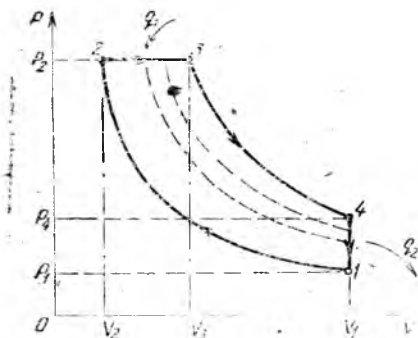
$$\eta = 1 - \frac{1}{\kappa^n}, \quad (176)$$

бунда κ — адиабата кўрсаткичи.

Иссиқлик $P = \text{const}$ бўлганда киритиладиган цикл (Дизель цикли). Юқорида кўриб ўтилган $V = \text{const}$ бўлган циклдан карбюраторли ИЕД ни олиб, унинг циклини қараб чиқамиз. Поршень ҚУН дан ЮУН томон силжиганда иш ёқилгисен $I-2$ нуқталар оралиғида адиабатик ($aq=0$) сиқилади, яъни термодинамик система параметрлари система ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига бошқа қийматларни қабул қиладн. Дизель двигателларида сиқилиш тактининг охиридаги босим $30-35$ атм. га етади. Карбюраторли двигателларнинг сиқилиш даражаси $\epsilon=6-9$ (айримларида $\epsilon=11$), такт охиридаги босим $P_3=0.0-1.5$ МПа ва иш ёқилгисен температураси $T_3=550-750$ К га етади. PV -диаграммадаги нуқталарга мос равишда (28 ва 29-расмлар) 3 нуқтадаги P_3 ва T_3 қийматлар қўидаги тенгламалардан фойдаланиб ҳисобланиши мумкин:

$$\begin{aligned} P_3 &= P_1 \epsilon^{n_1}, \\ T_3 &= T_1 \epsilon^{n_1-1}, \end{aligned} \quad (171)$$

бунда $P_1=0.09$ МПа; $T_1=323$ К; $n_1=1.40$. Поршень ЮУН етганда, яъни сиқилиш тактининг охирида q_1 иссиқлик миқдори киритилади (сиқилган ҳаво температураси ёқилгисининг ўз-ўзидан ёниш температурасидан юқори бўлган $T=1000-1200$ К га етказилади ёки электр учқунн чақнайди). Поршень қайлаги ва ёниш камераси деворлари билан чегараланган ҳажмда ёнаётган иш ёқилгисининг ёниш маҳсулот босимини $P = \text{const}$ да сақлаб туриш учун жуда тез бўлмаса-да, поршень ҚУН томон ҳаракатланади. Шунда маълум вақт оралиғида V_2 ўзгарса-да, босим $P = \text{const}$ сақланади (29-расм, 2—3 нуқталар оралиғи). Системанинг абсолют температураси озгина ортади. Иш ёқилгисен тўлиқ ёниб бўлгандан сўнг, адиабата-



29 расм. Циклга $P = \text{const}$ бўлганда иссиқлик киритиладиган жараёнинг PV ва TS диаграммалари.

тик кенгайётган ёниш маҳсулотининг босими таъсирида поршень ЮН дан ҚУН га томон ҳаракатланади (нуқталар 3—4 оралиғи). Бу кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш бажаради. Ёниш маҳсулотидаги қолдиқ иссиқлик энергияси q_2 тутун газлари билан ташқарига чиқарилади (нуқталар 4—1 оралиғи). Цикл яна такрорланади.

Циклнинг бажарган тўла иши $V_1 - O - P_2 - 3 - 4 - V_1$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг.

Циклда иштирок этган иш жисми устида бажарилган манфий, яна сиқиш тактининг иши $V_1 - O - P_2 - 2 - 1 - V_1$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Циклнинг бажарган фойдали иши эса юқорида келтирилган тўла юзадан манфий иш юзасини айирмаси $1 - 2 - 3 - 4 - 1$ га тенг.

Циклнинг TS — диаграммасидан кўриниб турибдики, энтропиянинг ўзгариши $dS = S_4 - S_1$, $V = \text{const}$ бўлган ҳолатда циклга иссиқлик киритиладиган жараёнга нисбатан кучсизроқ ўзгарар экан. Чунки циклга иссиқлик киритилганда иш ёқилгиси ёниш билан шу вақтнинг ўзида поршень ҳам ҳаракатга кела бошлайди, яъни сиқиш такти ҳосил қилган босим остида ёниш жараёни кечади ва босим иш ёқилгиси ёнганда ҳам ўзгармайди.

Цикл иккита адиабата ва биттадан изобара ҳамда изохоралардан ташкил топади. Иш ёқилгисининг сиқилиш даражаси цикл тактининг сиқиш коэффициенти орқали ифодаланади:

$$\eta = \frac{V_1}{V_2}.$$

Сикши тактида босим ортишининг нуқталар 1 ва 2 (PV диаграмма) оралигида P қийматининг ўзгариши $\lambda = P_2/P_1$ орқали ифодаланади. Маълумки, ёниш жараёни $P = \text{const}$ да кечганлиги сабабли иссиқлик миқдори q_1 киритилиши даврида иш ёқилгиси ҳажмининг ўзгаришини қуйидагича ёза оламиз:

$$\eta = \frac{V_1}{V_2}.$$

Ёниш маҳсулотини адиабатик кенгайиши давомида ўз параметрлари (P, V, T) ни ўзгартиради ва шу ўзгариш жараёнида иссиқлик энергияси фойдали ишга айланади. Нуқталар 3 ва 4 (PV диаграмма) оралигида ёниш маҳсулотини ҳажмининг ўзгаришинини ифодаловчи коэффициент-

ни $\delta = \frac{A}{V_3}$ нисбатдан аниқлаш мумкин, чунки $V_1 - V_4$ бўл-

ганлигидан $\delta = \frac{A}{V_3}$ кўринишида ёза оламиз. Циклнинг термик фойдали иш коэффициентинини адиабатик сикши ва кенгайиш жараёнларидаги адиабата кўрсаткичи, ҳамда коэффициентлар ρ ва ϵ орқали қуйидагича ёзиш мумкин:

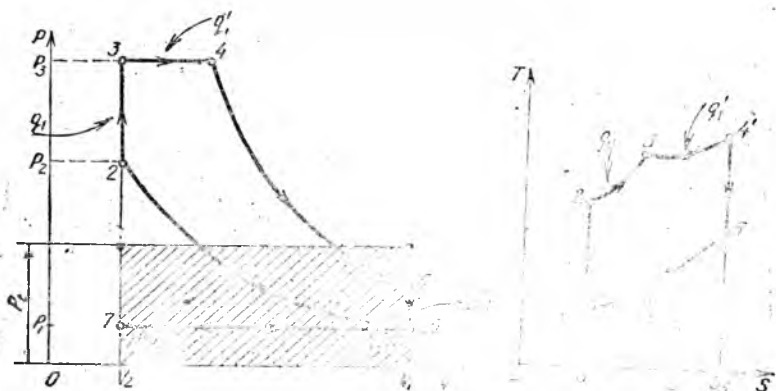
$$\eta_c = 1 - \frac{\rho^K - 1}{K(\rho - 1)} - \frac{1}{\epsilon^{K-1}}. \quad (172)$$

Демак, $P = \text{const}$ бўлган ҳолатда иш ёқилгисига ташқаридан иссиқлик миқдори q_1 киритилганида термик ФИК V_3 ва K — адиабата кўрсаткичларига кўпроқ боғлиқ бўлар экан.

Циклга $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ бўлганда аралаш (кет-макет) иссиқлик киритилиши (Тринклер—Сабатэ цикли).

Бу цикл Отто ва Дизель циклининг бирлаштирилгани бўлиб, иш ёқилгисининг маълум қисми $V = \text{const}$ (изохора) бўлганда ёна, қолган қисми $P = \text{const}$ (изобара) бўлганда ёнади. Циклда кечадиган термодинамик жараёнларини ва унинг PV ва TS диаграммаларини қараб чиқамиз (30-расм).

Циклнинг киритилган ёқилғи ва ҳаво аралашмаси сикши тактида ўз параметрларининг нуқта 1 га нисбатан нуқта 2 гача адиабата бўйича ўзгартриб боради, яъни термодинамик система мувозанатда бўлмайди. Сикши



30-расм. Ёниш $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ бўлганда содир бўладиган циклнинг PV (а) ва TS (б) - диаграммалари.

такти охирида бу термодинамик системага иссиқлик миқдори q_1 киритилиши билан система параметрларидан P , T қийматлар ортади, яъни ёниш маҳсулотининг босими ва температураси нуқта 3 ҳолатига етади. Чунки ёниш $V = \text{const}$ ҳолатида кечади. Изохора бўйича ёниш содир бўлганда (нуқталар 2 ва 3 оралиғи) қабул қилинган иссиқлик миқдори q ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$q_1 = mc_v (T_3 - T_2). \quad (173)$$

Ёқилган изохора бўйича тўлиқ ёниб улгурмасдан унга q_1 иссиқлик миқдори киритилади. Ёниш жараёнининг давомий изобара бўйича кечади, яъни тўлиқ ёнимасдан қолган ёқилган $P = \text{const}$ остида ёндирилади. Поршень ЮУН да бўлганлиги сабабли у ёқилган тўлиқ ёниб бўлгандан сўнг ёниш маҳсули аднабата ($dq = 0$) бўйича кенгайиб поршеньни ҚУН га силжитиш жараёнида иш бажаради ва унинг қиймати юқорида қараб чиқилган усулдагидай аниқланади. Сиқиш даражаси $\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}$ худди Отто циклидагидай бўлса, жараён $P = \text{const}$ бўлганда ҳажмининг олдиндан кенгайиши Дизель циклидагидай бўлади. Босимнинг ортиш даражаси $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$ ҳам Отто циклидагидай бўлади.

Циклнинг TS диаграммаси (30-расм, б) таҳлил қилинса, системанинг температураси бир текис ўзгармасдан маълум даражада сакраб-сакраб ўзгаради, энтро-

ниясининг ўзгарувчанлиги $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ бўлган цикллардагидай қолади.

Юқоридаги фикрлар асосида циклнинг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин.

$$\eta_i = 1 - \frac{r^K - 1}{r - 1 + K(r - 1)} \cdot \frac{1}{z^K - 1} \quad (174)$$

6.3. ИЕД индикатор иши қуввати ва ФИК

Юқорида қараб чиқилган цикллар идеал бўлиб, уларда турли хил қаршилиқ, исрофлар ҳисобга олинмайди.

Реал двигателларнинг иш циклини таҳлил қилиш ва уларнинг ишини, қувватини, фойдали иш коэффициентини аниқлаш мақсадида двигателнинг индикатор диаграммаси (цилиндрдаги босимнинг иоршень каллаги ўстидаги ҳажмга боғлиқлиги), индикатор асбоби ёрдамида PV координатасида қурилади.

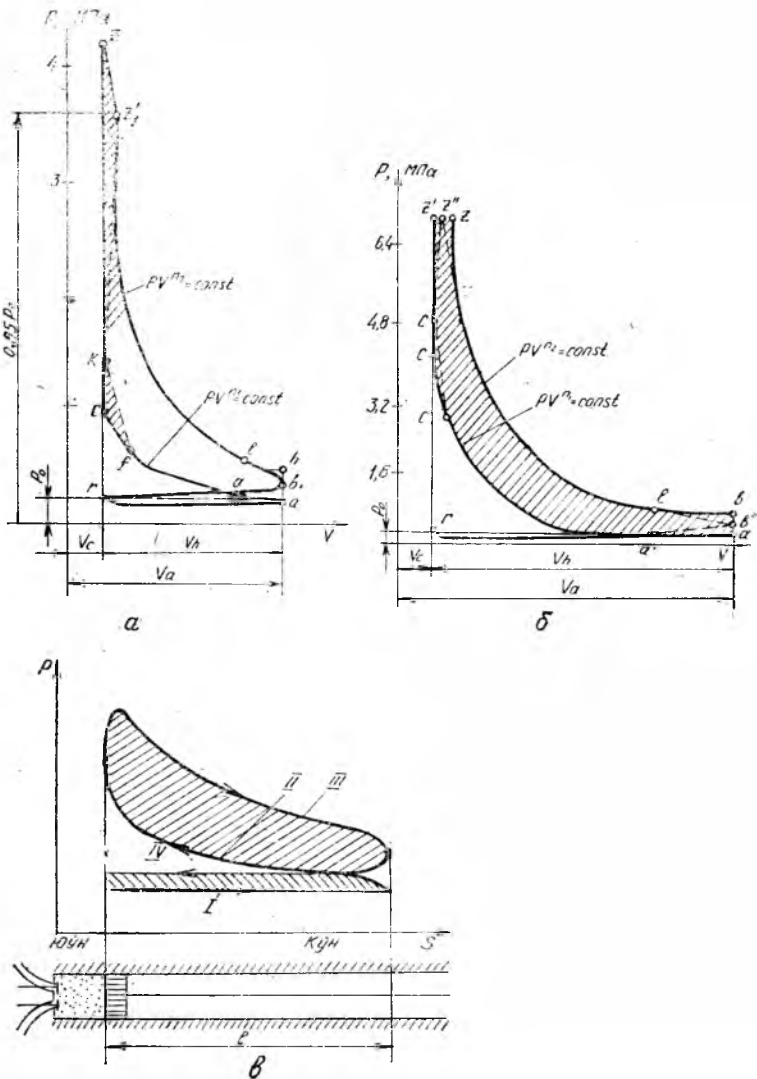
Индикатор диаграмма асосида двигателнинг индикатор иши A_i аниқланади. Унинг қиймати $a - a' - f - k - z_1' - e - b_1 - a$ нуқталар билан чегараланган (31-рasm, a) юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Ҳар қандай ИЕД да ёниш маҳсулоти — туташ ҳосил бўлади. Агар газларнинг ҳосил бўлишига сарфланган иш ҳам ҳисобга олинса, унда двигателнинг (тўрт тактли карбюраторли) тўла индикатор ишини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$A_{ig} = A_i - A_{иср} \quad (175)$$

Иш A_i миқдори турли-туман деталлар орасидаги ишқаланишни камайтиради ва уларни механик исрофлар A_m — дейилади. Механик исрофларга яна мой, ёқилғи насосларини юритишга сарфланган қувватнинг миқдори ҳам қўшилади. Унда истеъмолчи двигателнинг валидан оладиган эффектив (самарали) иш қуйидагича ифодланади: Тўрт тактли ИЕД ларида $A_{изз}$ га механик исрофларни ҳисобга олувчи A_m ҳам қўшилиб кетади. ИЕДнинг индикатор диаграммасини идеал цикл диаграммасига солиштирганда, унда бир жараёндан иккинчисига раво (бурчаксиз) ўтилади.

Реал ишлайдиган двигателдаги жараёнларнинг бошланиш ва охириги нуқталари аниқ бўлганда, яъни уларнинг чегаралари бир-бирига қўшилиб кетмаганда двигатель раво ишлай олмасди.

Индикатор диаграммаларидан кўриниб турибдики, $a - c - z - b - a$ (31-рasm, a) ва $a - c - z, z - b - a$ (31-



31-расм. Тўрт тактли карбюраторли (а) ва дизель (б) двигателлари идеал циклининг индикатор ва ўртача индикатор босимиини аниқлаш (в) диаграммалари

расм, б) чегараланган юзалар назарий ҳисобланган индикатор иши A_{in} га тенг. Ҳақиқий иш эса $a-a'-f-k-z'-l-b_1-a$ (31-расм, а) ва $a-c'-c''-z''-l-b'-a$ (31-расм, б) нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади. Диаграммалардан кўриниб, турибдики, $f-c-k-z-z_1'-k-f$ ва $z'-c''-c-c'-c''-z''-z'$ ҳамда $z''-k-z-z''$ нуқталар билан белгиланган штрихланган юзалар қийматига тенг бўлган катталikka двигателининг назарий ҳисобланган индикатор иши A_i фарқ қилар экан.

Дизель двигателининг индикатор диаграммаси (31-расм, б) $V=\text{const}$ ва $P=\text{const}$ бўлганда системага ташқаридан иссиқлик узатишган ҳолатга мос келади. Бу индикатор диаграммаси асосида дизель двигателининг бажарган ишнинг ёза оламиз:

$$A_i = A_{z'-z} - A_{z-b} - A_{a-c}. \quad (176)$$

$z'-z$ нуқталари оралигида $P=\text{const}$ бўлганда двигателининг бажарган иши

$$\begin{aligned} A_{z'-z} &= P_z V_z - P_z V_c \text{ ёки } A_{z'-z} = P_z V_c (\rho - 1) = \\ &= P_c V_c (\rho - 1). \end{aligned} \quad (177)$$

Ёниш маҳсулотини адиабатик кенгайиш жараёнида системанинг бир неча параметрлари ўзгариши мумкинлиги асосида $z-b$ нуқталар оралигида бажарилган ишнинг политропик кенгайишдаги иш орқали ифодалаб, $\rho = \frac{V_z}{V_c}$;

$\delta = \frac{V_b}{V_z}$; $\lambda = \frac{P_c}{P_z}$ эканлигини эътиборга олиб ҳамда айрим соддалаштиришлардан сўнг ёзамиз:

$$\begin{aligned} A_{z-b} &= \frac{P_c V_z}{n_2 - 1} \left[1 - \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2 - 1} \right] = \\ &= \frac{P_z V_z}{(n_2 - 1)} \cdot \frac{V_c}{V_c} \left[1 - \left(\frac{V_z}{V_b} \right)^{n_2 - 1} \right] = \\ &= P_c V_c \frac{\lambda \rho}{(n_2 - 1)} \left[1 - \frac{1}{\delta^{n_2 - 1}} \right]. \end{aligned} \quad (178)$$

Сиқиш тактида (нуқталар $a-c$ оралиги) бажарилган ишнинг ҳам политропик сиқилиш деб қабул қилинса, уни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$A_{a-c} = \frac{P_c V_c}{n_1 - 1} \left[1 - \left(\frac{V_c}{V_a} \right)^{n_1 - 1} \right] = \frac{P_c V_c}{n_1 - 1} \left[1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right]. \quad (179)$$

бунда $\frac{V_a}{V_c}$ — сиқилиш даражаси.

Тўла бажарилган индикатор иш цикли жараёнларида бажарилган ишларнинг алгебраник йиғиндисига тенг, яъни

$$A_i = P_i V_c \left[(p-1) + \frac{\gamma p}{n_i-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^{n_i-1}} \right) - \frac{1}{n_i-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_i^{n_i}} \right) \right] \quad (180)$$

ИЕД нинг индикатор қуввати. — бу цилиндр ичида эришладиган индикатор диаграммасидан ҳисоблаб топиладиган қувват. Индикатор-қувват цилиндрдаги ўртача босимга ва сиқилиш такти ҳажмига, цилиндрлар сонига, циклда поршень йўлининг сонига боғлиқ, яъни

$$N_{i\pi} = \frac{2i}{\pi} P_i V_a = \frac{2i}{\pi} A_i, \quad (181)$$

бунда $\frac{2i}{\pi}$ — двигателнинг 1 секунддаги иш цикли сонига

n — тирсак валининг айланмишлар частотаси, айл/с;
 τ — циклдаги поршень йўлининг сонига; $A_i = P_i V_h$ — двигателнинг индикатор иши (бунда, P_i — ўртача индикатор босим, Па; $V_h = \frac{\pi d^2}{4} l$ — цилиндрининг иш ҳажми; d — цилиндр диаметри; l — поршень йўли, м).

Цилиндр сонига i бўлганда индикатор қуввати қуйидагича ифодаланади:

$$N_i = \frac{2i}{\pi} P_i V_h. \quad (182)$$

Бу тенгламани ҳисоблашларда қўлланганда бўлиши ва қувватни кВт чиқариш учун P_i ни МПа да, V_h ни литрда, n ни айл/минда ифодалаб, қуйидаги кўринишга келтирамыз:

$$N_i = \frac{2i}{\pi} \cdot \frac{P_i V_h}{60} i. \quad (183)$$

Тўрт тактли ИЕД ларда $\tau=4$ бўлганлиги учун (183) тенгламага қийматини қўйиб ёзамиз:

$$N_i = \frac{2i}{4} \cdot \frac{P_i V_h}{60} i = \frac{n \cdot i \cdot P_i V_h}{120}. \quad (184)$$

Икки тактли ИЕД лари учун (183) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$N_i = \frac{n \cdot i \cdot P_i V_{\text{ф}}}{60} \quad (185)$$

ИЕД нинг индикатор ФИК ҳақиқий циклдаги иссиқлик миқдоридан фойдаланиш даражасини кўрсатадиган катталик бўлиб, циклниң бажарган тула иши A_1 ни шу циклда ёқилган ёқилғи ажратган жами иссиқлик миқдори q га нисбати билан ифодаланади:

$$\eta = \frac{A_1}{q_1} \quad (186)$$

Ёқилғининг бирлик массаси ёнганда циклда бажарилган индикатор иш орқали ИЕД нинг индикатор фик ни ёзиш мумкин.

$$\eta = \frac{A}{q_{\text{к}}} \quad (187)$$

бунда $q_{\text{к}}$ — ёқилғи ажратган қуйи иссиқлик миқдори.

Реал двигателнинг индикатор диаграммаси (31-расм, а) электронвизматик индикатор (масалан, МАИ-2) ёки катодли инерцион бўлмаган осциллограф (кварц датчикли) ёрдамида ёзиб олинади ва диаграмма контури ҳисоб қилган юза аниқланади. Ҳар бир миллиметрга мос келадиган босимни МПага ифодалайди ва шу асосида уртача индикатор босим аниқланади:

$$P_i = \frac{S}{l \cdot P_{\text{м}}} \quad (188)$$

бунда l — поршень йўли узунлигига мос келувчи (миллиметрга ифодаланган) узунлик; m — масштабнинг ҳар бир миллиметрга мос келадиган босим, мм/МПа.

Агар двигателнинг қуввати N_i ва вақт бирлиги (соат) давомида сарфланган ёқилғи миқдори аниқ бўлса, у ҳолда ёқилғининг солиштирма сарфи (г/кВт·соат) қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$q_1 = \frac{n}{N_i} \cdot 10^4, \quad (189)$$

бунда $M_{\text{н}}$ — двигателнинг аниқ тартибда (яъни $N_i = \text{const}$; $n = \text{const}$; $P = \text{const}$) ишлашнинг таъминланган ҳолда исосбланган (назарий) ёқилғи миқдори, кг/соат. Ушбу юқоридаги тенгламалар асосида ИЕД индикатор фик ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$\eta_i = \frac{1}{q_K^u \cdot q_i} \quad (190)$$

бунда q_K^u нинг ўлчов бирлиги Ж/кг; q_i — ники кг/Ж. Амалий ҳисоблашларда q_K^u ни МЖ/кг ва q_i ни г/кВт, соат ўлчаб η_i қуйидаги ифодадан топилади:

$$\eta_i = \frac{3,6 \cdot 10^3}{q_K^u \cdot q_i} \quad (191)$$

Газ двигателларида ёқилғи сарфи m^3 да ўлчаниб η_i юқоридагилардан фойдаланиб ёзилади,

$$\eta_i = \frac{1}{q_K^u \cdot V_i} \quad (192)$$

бунда q_K^u ва V_i ларнинг ўлчов бирлиги мос равишда Ж/м³ ва м³/Ж да ифодаланади. q_K^u ва g_i амалий ҳисоб-китобларда, мос равишда МЖ/м³ ва м³/кВт·соатда ифодаланганлиги учун η ни қуйидагича ёзамиз:

$$\eta_i = \frac{3,6}{q_K^u \cdot V_i} \quad (193)$$

Турли хил ёқилғиларнинг қуйи иссиқлик ажратиш ҳусусияти турлича (уларнинг сон қийматлари адабиётларда келтирилган).

6.4. ИЕД нинг эффектив қуввати ва ФИК

Двигателнинг тирсак валдан оладиган қуввати эффектив қувват дейилади. Ҳар доим $N_{эф.}$ N_i дан кичик бўлади, чунки механик исрофларга қувватнинг маълум қисми сарфланади ва у қуйидагича ифодаланади:

$$N_{эф.} = N_i - N_m \quad (194)$$

Механик исрофга сарфланган қувватни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$N_m = \frac{2n \cdot i}{60} \cdot \frac{P_m \cdot V_h}{\tau} = \frac{n \cdot i \cdot P_m}{30} V_h \quad (195)$$

(195) тенгликдан механик исрофга сарф бўлган ўртача босим P_m ни топамиз:

$$P_m = \frac{30 \cdot N_m \cdot \tau}{i \cdot n \cdot V_h} \quad (196)$$

Ўртача эффектив $P_{эф}$ босим индикатор босим билан механик исроф учун бўлган босим айирмасига тенг, яъни

$$P_{эф} = P_i - P_m. \quad (197)$$

Унда, эффектив кувватни кВт ифодалаш учун $P_{эф}$ ни МПа да, V_n ни литрда, n ни айл/мин. ўлчов бирлигида олиб $N_{эф}$ ни қайта ёзамиз:

$$N_{эф} = \frac{2\pi \cdot i}{60} \cdot \frac{N_{эф}}{\tau} V_n. \quad (198)$$

бунда i — цилиндрлар сони.

Энди (198) тенгликдан $P_{эф}$ (МПа) ни топамиз:

$$P_{эф} = \frac{30 \tau}{i \cdot n} \cdot \frac{N_{эф}}{V_n}. \quad (199)$$

ИЕД нинг эффектив фик ни аниқлашда энг аввал ёнишда ҳосил бўлган иссиқлик миқдоридан ва ёқилгининг солиштира эффектив сарфидан қандай фойдаланганлиги билиб олинади. 1 кг ёқилгининг ёнишда ажралган иссиқлик миқдорини эффектив иш орқали ифодалаш мумкин:

$$A_{эф} = A_i - A_m. \quad (200)$$

Демак, ИЕД нинг эффектив ФИК ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_{эф} = \frac{A_{эф}}{q_K^H}. \quad (201)$$

У ҳолда эффектив ишнинг индикатор ишига нисбатн ФИК га тенг бўлади.

$$\frac{A_{эф}}{A_i} = 1 - \frac{A_m}{A_i} \eta_m. \quad (202)$$

Бундан $A_{эф} = \eta_m \cdot A_i$ тенглик ҳосилда $\eta_{эф}$ ни механикавий ва индикатор ФИК орқали ифодалаш мумкин:

$$\eta_{эф} = \eta_n \cdot \eta_i. \quad (203)$$

Ёқилгининг қуйи ёнишда ажралган иссиқлик миқдорини эътиборга олсак, суюқ ёқилгида ишлайдиган ИЕД учун эффектив ФИК ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$\eta_{эф} = \frac{2L_0 \gamma_m \rho_i}{q_K^H \cdot \gamma_1 \cdot \rho_K} = \frac{2 \cdot \dot{L}_0}{q_K^H \cdot \rho_K \cdot \gamma_{IV}} P_{эф}. \quad (204)$$

ИЕДларнинг механик ФИК ва цилиндрдаги ўртача эффектив
босим қинматлари

ИЕД тури	$P_{эф.}$, МПа	η
4 тактли карбюр.	0,6—0,95	0,7—0,85
4 тактли дизель	0,55—0,85	0,7—0,82
Газ билан пуфланган	0,5—0,75	0,75—0,85
Пуфланган тўрт тактли дизель	0,7—2,0	0,8—0,9
Тезюар икки тактли дизель	0,4—0,75	0,7—0,85

Юқорида қараб чиқилган усулга ўхшаш ёқилғининг
солиштирма эффектив сарфи $g_{эф.}$ орқали аниқланади:

$$g_{эф.} = \frac{1}{\eta_{эф.}} \quad (205)$$

(205) тенгликка $\eta_{эф.}$ қийматин қўйиб, уни қайта ёзамиз:

$$g_{эф.} = \frac{g_{ф.}}{\eta_{эф.} \cdot P_{эф.}} \quad (206)$$

$P_{эф.}$ ни МПа да, $g_{ф.}$ ни г/кВт. соатда ифодаласак, у
ҳолда (206) тенгламани қуйидагича ёзамиз:

$$g_{эф.} = \frac{3600 \cdot g_{ф.} \cdot 10^3}{\eta_{эф.} \cdot P_{эф.}} \quad (207)$$

Албатта, ёқилғи тури ўзгаришидан $g_{эф.}$ ва $\eta_{эф.}$ қийматлар
бошқачарақ кўринишга кетади. Масалан, газ ёқилғисидан
инилайдиган ИЕД нинг эффектив фик $\eta_{эф.}$ ва ёқилғининг
солиштирма эффектив сарфи $g_{эф.}$ қуйидаги кўринишда ифо-
даланади:

$$\eta_{эф.} = \frac{371,15 \cdot 10^3 \cdot T_K \cdot P_{эф.}}{M \cdot q \cdot P_K} \quad (208)$$

ва

$$g_{эф.} = \frac{9700 \cdot P_K}{M \cdot T_K \cdot P_{эф.}} \quad (209)$$

буида M ва T_K — янги киритилган ёқилғининг массаси
ва сиқилиш такти охиридаги температураси; P_K — насос
ёки компрессор ҳосил қилган босим.

Маълумки, ҳар қандай ИЕД нинг ёқилғи камерасида
ёқилғининг ёнишидан ажралган иссиқлик миқдорининг

ҳаммаси ишга сарфланмайди. Агарда, қуйи иссиқлик ажратишни $Mж/м^3$ да, ёқилғининг солиштирма эффектив сарфини $м^3/кВт\cdot соат$ да ифодаласак, унда иссиқликнинг солиштирма сарфи қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$q_{\Sigma} = 700 \frac{q_{\Sigma} + P_{\Sigma}}{P_{\Sigma}} \quad (210)$$

$q_{\Sigma} = 17-14,4$ $Mж/кВт\cdot соат$ атрофида бўлади.

ИЕД ларининг q_{Σ} , $q_{\Sigma экв}$, q_{Σ} ва $q_{\Sigma экв}$ қийматлари кенг оралиқда бўлади (11-жадвал).

11-жадвал

ИЕДларнинг солиштирма ёқилғи сарфи ва ФИК

ИЕДнинг тўри	q_{Σ}	$q_{\Sigma экв}$	q_{Σ} м ³ /т. соат	$q_{\Sigma экв}$ м ³ /т. соат
Карбюраторли автомобил двигатели	0,28-0,39	0,15-0,33	215-300	300-325
Тезюрар дизель	0,22-0,48	0,35-0,40	175-205	217-238
Газ двигатели	0,28-0,50	0,23-0,28	—	—

6.5. ИЕД нинг иссиқлик баланси

Маълумки, двигателнинг ёниш камерасига киритилган ёқилғининг ёнишдан ҳосил бўлган иссиқлик миқдори тўлалигича фойдаланишга сарфланмайди. ИЕД циклининг таҳлили шунинг кўрсатадигани, двигателнинг эффектив ишига жами иссиқлик миқдорининг бир қисми сарфланади экан. Шунинг учун қолган иссиқлик миқдори нимага сарфланишини ва совитиш системасини ҳисоблашда киритилган ёқилғидан қай даражада фойдаланиш мумкинлигини билиш зарур. Шу сабабли иссиқлик баланси тевгламаси тузилади:

$$q = q_{\Sigma} + q_{\Sigma экв} + q_{\Sigma} + q_{\Sigma экв} + q_{\Sigma} + q_{\Sigma экв} \quad (211)$$

бунда q_{Σ} — двигателга маълум иш тартибда киритилган ёқилғининг умумий иссиқлик миқдори; $q_{\Sigma экв}$ — двигателнинг эффектив ишга эквивалент бўлган иссиқлик миқдори; q_{Σ} — совитувчи муҳитга узатишган иссиқлик миқдори; $q_{\Sigma экв}$ — түтүннинг двигателдан олиб чиққан иссиқлик миқдори; q_{Σ} — түла ёймаган ёқилғи ҳисобига сарф бўлган иссиқлик миқдори; $q_{\Sigma экв}$ — мойлаш мойла-

ри олган иссиқлик миқдори; $q_{\text{кол}}$ — иссиқлик балансида ҳисобга олинмай қолган иссиқлик миқдори.

ИЕД га киритилган тула иссиқлик миқдорига нисбатан унинг ташкил этувчиларининг фойдаланиш мумкин:

$$\begin{aligned} Q_{\text{э.кв}} &= \frac{q_{\text{э.кв}}}{q_{\text{у}} \cdot 100}; & Q_{\text{с}} &= \frac{q_{\text{с}}}{q_{\text{у}} \cdot 100}; & Q_{\text{г}} &= \frac{q_{\text{г}}}{q_{\text{у}} \cdot 100} \\ Q_{\text{т.э}} &= \frac{q_{\text{т.э}}}{q_{\text{у}} \cdot 100}; & Q_{\text{мо.г}} &= \frac{q_{\text{мо.г}}}{q_{\text{у}} \cdot 100}; & Q_{\text{о.л}} &= \frac{q_{\text{о.л}}}{q_{\text{у}} \cdot 100}. \end{aligned} \quad (212)$$

Унда

$$Q_{\text{э.кв}} + Q_{\text{с}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{т.э}} + Q_{\text{мо.г}} + Q_{\text{о.л}} = 100\% \quad (213)$$

У ҳолда $M_{\text{э}}$ ни кг с, $q_{\text{у}}^{\text{н}}$ ни Ж кг да фойдаласак, 1 с да сарф бўлган иссиқлик миқдорини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$q_{\text{у}} = q_{\text{н}}^{\text{н}} M_{\text{э}}, \quad (214)$$

бунда $M_{\text{э}}$ — сарф бўлган ёқилги массаси.

Двигателнинг эффектив қувватига тенг бўлган иссиқлик миқдори фойдаланиш қуйидагича ёзамиз:

$$q_{\text{э.кв}} = N_{\text{эф.}} \quad (215)$$

ИЕД нинг цилиндр, цилиндрлар блокнинг қаллаги, поршень ва унинг ҳалқалари деворлари орқали совиткичдаги суюқликка узатиладиган иссиқлик миқдори қуйидагича фойдаланади:

$$q_{\text{с}} = M_{\text{с}} C_{\text{с}} (t_{\text{чик}} - t_{\text{кн.г}}), \quad (216)$$

бунда $M_{\text{с}}$ — двигатель орқали ўтадиган совитувчи модда (суюқлик) миқдори, кг/с; $C_{\text{с}}$ — совиткичнинг солиштирма иссиқлик сифми (масалан, сув учун $C_{\text{с}} = 4186$ Ж/кг); $t_{\text{чик}}$ ва $t_{\text{кн.г}}$ — совиткичнинг двигателдан чиқишидаги ва киришидаги температуралари, °С.

Тутуннинг двигателдан ташқарига олиб чиққан иссиқлик миқдори қуйидаги формуладан фойдаланиб аниқланади:

$$q_{\text{г}} = M_{\text{г}} (m_2 \mu C_p' t_{\text{г}} - m_1 \mu C_p t_0), \quad (217)$$

бунда $M_{\text{г}} m_2 C_p' t_{\text{г}}$ — иш бажариб бўлган газларнинг цилиндрдан ташқарига чиқарган иссиқлик миқдори, Ж с; $M_{\text{г}} m_1 \mu C_p t_0$ — янги ёқилги билан цилиндрга киритилган иссиқлик миқдори, Ж с — $\mu C_p'$ ва μC_p — ёнгиш махсули ва янги иш ёқилгисининг ўзгармас босим ($P = \text{const}$) остидаги

моляр иссиқлик сифимлари. $\text{Ж кмоль} \cdot \text{с}$, t_r — газларнинг иш бажаргандан кейин чиқиб кетадиган труба ортидаги температураси, $^{\circ}\text{С}$; $t_{\text{ш}}$ — цилиндрга киритиладиган янги иш ёқилғиси температураси, $^{\circ}\text{С}$.

$\alpha \geq 1$ бўлганда тўла ёнмаган ёқилғига сарфланган иссиқлик миқдори $q_{т.е}$ ни махсус ҳисобламасдан, унинг қийматини кўпчилик ҳолларда $q_{\text{хол}}$ га қўшиб юбориб қуйидаги ифодадан аниқланади:

$$q_{\text{хол}} = q_y - (q_{\text{э.в}} + q_c + q_r + q_{\text{моп}}). \quad (218)$$

$\alpha < 1$ бўлганда тўла ёнмаган ёқилғи чиқаридиган иссиқлик миқдори қуйидаги тенгликдан топилади:

$$q_{т.е} = (\Delta q_{\text{с}}^{\text{н}})_{\text{хим}} \cdot M_{\text{с}}. \quad (219)$$

бунда

$$(\Delta q_{\text{с}}^{\text{н}})_{\text{хим}} = A(1 - \alpha)V_{\text{н}} = (228 - 383) \cdot 10^6.$$

$V_{\text{н}}$ — назарий ҳисобланган ҳаво ҳажми. $q_{\text{хол}}$ нинг ўлчов бирлиги Ж/с ; $q_{\text{моп}}$ — мойнинг сувга узатган иссиқлик миқдори бўлиб, мой совиткича ўлчаб аниқланади.

ИЕД нинг иссиқлик баланси тенгламасига киритилган катталикларининг айрим қийматлари 12-жадвалда келтирилган.

12-жадвал

Двигатель тури	$\frac{b_{\text{кв}}}{c_{\text{кв}}}$	$\varphi_{\text{с}}$	q_r	$q_{т.е}$	$q_{\text{хол}}$
Электр учқун билан ўт олдириладиган	21—28	12—27	30—55	0—15	3—10
Дизель двигатели:					
пуфлаш усули қўлланилмаганда	29—42	15—35	20—45	0—5	2—5
пуфлаш усули қўлланилганда	35—45	10—25	25—40	0—5	2—5

Жадвалдан кўришиб турибдики, пуфлаш усули қолганларига нисбатан анча фойдалироқ экан.

6.6. Пуфлаш ва двигателларни ишлаб чиқаришда унинг аҳамияти

ИЕД нинг цилиндрини ёниш маҳсули қолдиқларидан тозалаш ва уни янги иш аралашмаси билан тўлдирish жараёни пуфлаш дейилади. Бу жараён поршеннинг иш йўли охирида ва сиқиш тактининг бошланишида амалга оширилади. Пуфлаш усули билан цилиндрга ки-

ритиладиган иш аралашмаси zichлигини ва ҳаво босимини орттириш мумкин. Чунки цилиндрдаги иш аралашмаси zichлиги p ортинин билан унга мос равишда $P_{эф}$ ҳам ортади, ўз навбатида, ИЕД шнинг литраж қуввати кўтарилади. Двигателларда пуфлаш жараёнидаги механик қаршиликлар пуфланмагандаги ҳолатга нисбатан ортади, ammo механик ФИК шнинг эффе́ктив қуввати кўтарилади. Эффе́ктив босим $P_{эф}$ компрессорда ёки поршень ёрдамида цилиндрда ҳосил қилинади.

Пуфлаш ҳисобига двигатель қувватини орттириш пуфлаш даражаси билан баҳоланади:

$$P_{эф.п.} = \frac{P_{ф.п.}}{P_{эф.}}, \quad (220)$$

бунда $P_{эф.п.}$ — двигательда пуфлаш усулини қўллаш билан ҳосил қилинган ўртача эффе́ктив босим, $P_{эф}$ — эффе́ктив босим.

Пуфлашда сиқиниш тактининг охирида ҳаво температураси ва босими ортади. Карбюраторли двигательларда бу ҳолат детонация (франц. *detoner* — портлаш) га сабаб бўлганлигидан бу турдаги двигательларда пуфлаш, кенг тарқалган. Пуфлаш усули дизель двигательларида қўлланилса, детонациянинг вужудга келиш хавфи йўқолади, чунки цилиндрга киритилаётган ҳаво босими $P_{кпр}$ ортганда детонацияли ёниш кузатилмайди. Бунда дизель двигателяли литраж қувватининг ортининга имкон яратилади. Булардан ташқари, дизель двигательлининг бошқа параметрлари ҳам яхшиланади. Мана шу ижобий қўрсаткичлар автомобиль ва тракторда дизель двигательларининг кенг қўлланишига асосий сабаб бўла олади. Пуфлаш усули билан автотракторларда дизель двигательлари қўлланилганда улардаги босим $P_{эф}$ ни 30% гача кўтариш (яън даражадаги пуфлаш) мумкин. Юқори даражадаги ўниш ҳосилсига эга бўлган дизель двигательларида эффе́ктив босимни 40—50% гача орттириш мумкин. Пуфлаш компрессорли, турбокомпрессорли ва аралаш (уйғунлаштирилган) юритмали бўлади.

6.7. Ташқи ёнув двигателлари

Бундай двигателларда иш ёқилгиси двигатель ташқарида ёқилиб ҳосил бўлган иссиқлик унинг иш бажарувчи қисмига йўналтирилади. Ташқи ёнув двигатели (ТЕД) — ташқаридан киритиладиган ва регенерацияланадиган иссиқлик энергиясини фойдали механик иш-

га айлантириб берувчи иссиқлик машинаси. Бундай двигателини инглиз ихтирочиси Р. Стирлинг яратган (1816 й.) Қўпчилик адабиётларида ТЁД ни Стирлинг двигатели деб юрйтишади. Стирлинг двигатели қиздирилган ҳавонинг иссиқлик энергиясини 10—20 МПа босим остидаги гелий (He^1) ёки водород (H^1) га регенерация йўли билан узатиш ҳисобига ишлайди. Бу двигателининг асосий иш қисмлари берк бўшлиқда жойлашган.

Гелий ёки водород берк бўшлиқда (атмосфера ҳавоси ўринга гелий ёки водород тулдирилган ҳажм) 10—20 МПа босим остида бўлади. Бу берк ҳажмин регенератор иккига ажратиб туради. Унинг юқориги (иссиқ) ва пастки (совуқ) қисмларига мос равишда иссиқлик келтирилади ва чиқарилади. Қиздирилган ҳаво оқими иссиқлик келтирувчи вазифасини, совуқ сув совиткич вазифасини бажаради. Стирлинг двигателида иккита (яш ва сиқиб чиқарувчи) поршень мавжуд. Поршеньнинг илгариланма-қайта ҳаракатини ромб механизм айланма ҳаракатга келтиради. ТЁД ҳам тўрт тактли (сиқиб, қиздириш, иш йўли ва совитиш) бўлиб, унинг назарий цикли иккита изотермик ва иккита изохорик жарёнлардан ташкил топади.

ТЁД нинг ФИҚ худди Карно циклиникидай қуйидаги тенгликдаи аниқланади:

$$\eta = 2 - \frac{T_1}{T_2} \quad (221)$$

Стирлинг двигателининг индикатор диаграммаси эллипс шаклида. ТЁД юқори ФИҚ эга бўлибгина қолмасдан, атмосферага заҳарли газларни чиқармайди, шовқин даражаси 20 децибел (дБ) дан кам, мойлаш мойлари кам эскиради ва оз ишлатилади, турли хил ёқилғиларда ишлайверади. Шунинг учун ТЁД лари оғир юк автомобилларида, кемаalarda кенг қўлланилади.

И К К И Н Ч И Қ И С М

ИССИҚЛИК КУЧ ҚУРИЛМАЛАРИ

Энергетиканинг бирламчи табиий бойликлари — ёқил-
ғи, сув, шамол ва бошқалардан фойдаланиб механик
энергия ҳосил қиладиган двигателлар ва ёрдамчи ус-
куналар мажмуаси куч қурилмалари дейилади.
Фойдаланиладиган энергия турига кўра иссиқлик, гид-
равлик, атом ва ш. к. куч қурилмалари бўлади.

Иссиқлик куч қурилмалари махсус энергетик иншо-
от бўлиб, у қозон қурилмаси, насослар, конденсаторлар,
буғ турбиналари электр генераторлар, қувурлар ва шун-
га ўхшаш асосий ускуналардан ташкил топган. Буғ куч
қурилмалари, буғ турбиналари, газ турбиналари, реак-
тив двигателлар, умуман ҳамма турдаги катта қувват-
ли иссиқлик двигателлари иссиқлик куч қурилмаларига
мисол бўла олади.

Иссиқлик двигатели иссиқлик энергиясини механик
энергияга айлантириб берувчи қурилмадир. Унинг иш
цикли кетма-кет содир бўладиган термодинамик жара-
ёнлардан иборат. Бу циклда иссиқлик киритилади, маъ-
лум миқдордаги иш шу иссиқлик ҳисобига бажарил-
гандан сўнг қолдиқ иссиқлик миқдори совиткичга чиқа-
рилади. Циклдаги киритилган иссиқлик миқдори q_1 ал-
батта чиқарилган иссиқлик q_2 дан катта, яъни $q_1 > q_2$ бў-
лади.

Иссиқлик двигателлари асосан буғ машинаси, буғ
турбинаси, ИЁД лардан ташкил топган, ИЁД ларига ра-
кета (нем. *fakete*, итал. *Rocchetta* росса — урчуқ) двига-
телларини ҳам киритиш мумкин. Ракета двигатели ре-
актив двигатель бўлиб, унга кимёвий ракета двигатели
(КРД), ядро ракета двигатели (ЯРД), электродинамик
ракета двигатели (ЭРД), суяқ ёқилғили ракета двига-
тели (СЕРД), қаттиқ ёқилғили ракета двигателлари
(ҚЕРД) қиради.

7.1. Иссиқлик энергетикасининг иш жисми— сув буғи

Иссиқлик энергетикасида сув буғи (сувнинг газсимон агрегат ҳолатга ўтиши) кенг қўлланилади. Сув маълум температурада (ташқи босимга нисбатан 0°C дан юқори бўлганда) газсимон ҳолатга ўтади, яъни буғланади. Ташқи босим қанча паст, яъни сув устидаги ҳаво босими кичик бўлса, шунча тезроқ буғланади ва, аксинча.

Агар газ ҳосил қилган сув буғи сув билан мувозанатда бўлса, яъни сувнинг қанча миқдори сув буғига айланиб буғнинг шунча миқдори конденсацияланиб сувга айланидиган ҳолат ўринли бўлганда, бувай бўғ тўйинган бўғ дейилади. Тўйинган бўғ температурасини орттирганимизда, сув молекулаларининг томчилиси ягона молекула даражасигача майдаланиб аввал қиздирилган, сўнгра ўта қиздирилган бўғ ҳолатига ўтади.

Техник эҳтиёжларни таъминлаш учун зарур бўлган сув буғи бўғ қозонларида тайёрланади ва аниқ параметрли тўйинган, қиздирилган, ўта қиздирилган бўғ даражасига етказилади ҳамда бўғ қувурлари орқали истеъмолчига узатилади. Бўғ қозонида ҳосил қилинган бўғ босими, температураси имкони борича ўзгармас сақланади. Шундагина истеъмолчи керакли миқдордаги сув буғини олиб ишлаб чиқаришни ташкил қила олади. Сув буғи ҳамма турдаги иссиқлик электр марказларида асосий иш моддасидан бири ҳисобланади. Чунки сув буғини ҳосил қилиш осон, арзон ва экологик жиҳатдан тоза. Шўнинг учун конденсацион электр станциясида, иссиқлик электр станцияларида, регенератив иссиқлик алмашинувида ва шу каби нишоот ва қурилмаларда ёқилган ёқилиб, асосан сув буғи ҳосил қилинади, сўнгра бу бўғ яна қиздирилиб, иш бажарадиган даражадаги параметрларгача етказилади.

7.2. Бўғ-куч қурилмасининг назарий цикли

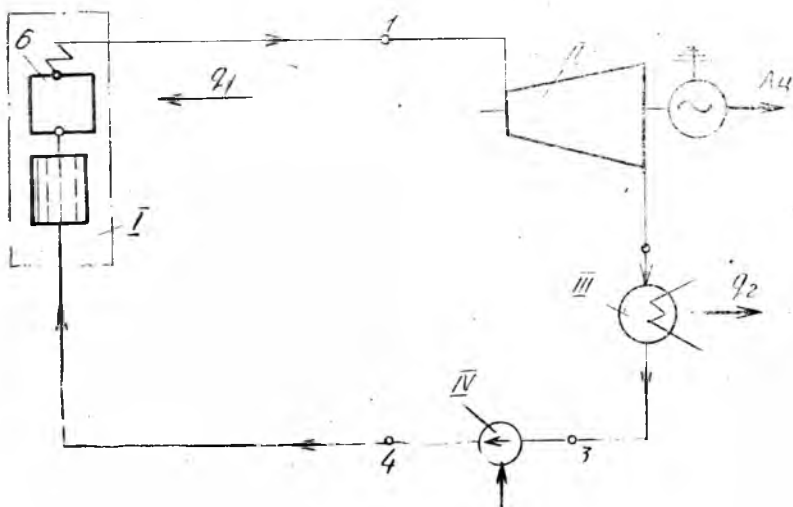
Бўғ-куч қурилмалари қозон агрегати, бўғ турбинаси, конденсатор, насос, электр генератор ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган. Қозон агрегати, ўз навбатида ўчоқ, буғлатиш сиртлари, бўғ қиздиргичлар

(ута қиздиргич), сув экономайзери, аҳво иситгич, мўри ва турли хил вентиляторлардан ташкил топган.

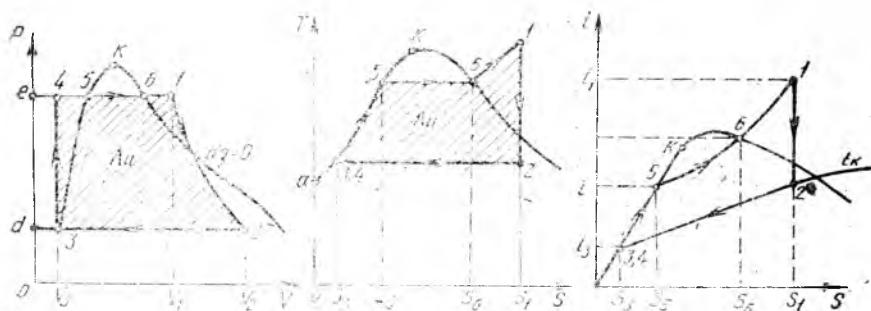
Буг-куч қурилмаларида ишлатиладиган иш жисми — сув буги параметрларининг ўзгаришини қараб чиқамиз.

Буг-куч қурилмаларининг назарий цикли Ренкин цикли ҳисобланади (32-расм).

Ренкин цикли қуйидагича кечади: қозон қурилмаси (I) дан юқори босим ва температурадаги қиздирилган буг буг турбинаси (II) га узатилади. Шунда буг ташқаридан ортқича иссиқлик миқдорини озмадан ($dq=0$) буг турбинасида кенгайиш жараёнида фойдали иш бажаради (нуқталар 1 ва 2 оралиғида, 33-расм, а). Турбинлада иш бажариб бўлган сув буги ўзидаги қолдиқ иссиқлик энергиясини конденсатор (III) дан (нуқталар 2 ва 3 оралиғида, 33-расм, а) совиткичга узтади. Буг конденсацияланиши натижасида сувга айланади. Ташқи куч (электр энергияси) таъсирида насос (IV) нинга тушади ва конденсат (ҳосил бўлган сув) қозон агрегати га узатилади (нуқталар 3 ва 4). Гидравлика фāнидан маълумки, насоснинг ҳайдаш каналидаги босим унинг сўриш қисмидагидан катта бўлади. Шунинг учун диаграммада нуқталар 3 ва 4 оралиғида босим ортади, ҳажм ўзгармас бўлади.



32-расм. Ренкин циклининг буг-куч қурилмаси.



33-расм. Ренкин циклининг PV , TS ва iS диаграммалари.

Демак, сув буғи иш бажариб бўлгандан сўнг ўзидаги қолдиқ иссиқлик энергиясини чиқариб (2 ва 4 нуқталар оралиғи) битта изобарик ва битта изохорик термодинамик жараёнлар орқали ўзининг мувозанат ҳолатига қайтар экан.

Реал шароитларда, насосдан ўтган сув албатта экономайзердан ўтиб, сўнгга қозон агрегатига қуйилади. Қозон агрегати ўтхоналарида ёқилган ёқилғининг ёниш маҳсулоти ташқарига олиб чиқиб кетаётган, фойдаланилмаётган қолдиқ иссиқлик миқдоридан самарали фойдаланиш мақсадига, тутун йўллариغا экономайзер ўрнатилади. Тутун ўзидаги қолдиқ иссиқликни экономайзер орқали ўтаётган конденсатга беради ва шу қолдиқ иссиқлик (тутундаги) яна қозон агрегатига қайтарилади. Шунта сув қолдиқ иссиқлик ҳисобига ўз ҳажминин, температурасини ўзгармас босим остида ўзгартиради (4 ва 5 нуқталар оралиғи, 33-расм а, б).

Қозон агрегатининг ўтхонасида ёқилган ёқилғи ажраган асосий иссиқлик миқдори қозонга қуйилган сувга берилади. Бу сув аввал экономайзер орқали ўтиш жараёнида то қозонгача, маълум даражада исingan бўлади (бу нуқта 5 га мос келади). Асосий иссиқлик миқдори 5 ва 6 нуқталар оралиғида киритилади. Шунда сув ўзининг агрегат ҳолатини ўзгартиради, яъни буғланади. Сувнинг буғланиши ўзгармас босим остида кечади, лекин шу ютилган иссиқлик ҳисобига буғ ўз ҳажминин орттиради, яъни қизийди. Бу қиздирилган буғнинг параметрларини иш бажарадиган даражагача кўтариш учун қўшимча иссиқлик миқдори киритилади. Бундай жараён қозон агрегатининг буғ қиздиргич қисмида амалга

оширилади. Шунда қизиган буғ ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади (6 ва 1 нуқталар оралиғи, 33-расм а). Цикл такрорланади.

Ренкин циклида сув буғининг бажарган иши 1, 2, 3, 4, 5, 6, 1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қўймати жиҳатидан тенг бўлади. Сув буғининг TS диаграммасида буғнинг абсолют температураси билан унинг энтропияси орасидаги боғланиш ифодаланган (33-расм, б). Жараёнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, 1 кг буғ бажарган фойдали ишнинг катталиғи Ренкин циклининг бажарган ишига тенг экан. Бу фойдали ишнинг қиймати P_v диаграммасидагидек T_s диаграммасида ҳам юзалар айирмасидан аниқланади, яъни $A = 0a45612S_10 - 0a32S_10 = 356123$ бўлади. Бунда $0a561S_10$ юза эса буғнинг кенгая бошлаган ҳолатини, яъни 1 нуқта энтальпиясига тенглигини характерлайди. Худди шундай $0a32S_10$ юза эса буғнинг кенгайиб бўлгандан кейинги ҳолатини, яъни 2 нуқта энтальпиясига тенглигини ифодалайди. Шунинг учун 1 ва 2 нуқталар энтальпияларининг айирмаси циклининг бажарган ишига тенг бўлади:

$$A_{\text{и}} = i_1 - i_2. \quad (222)$$

Демак, энтальпиянинг ўзгариши учун 3 ва 4 нуқталар оралиғида сувнинг ҳажми ўзгармасдан босими ортади. Бу босимнинг ортишига сарф бўлган иш $d34ed$ нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади. Бу ишнинг босимлар айирмаси орқали ифодалаш мумкин:

$$A_{\text{и}} = V_3(P_4 - P_3) \cong 0 \quad (223)$$

Иш $A_{\text{и}}$ нинг қиймати асосий ишга нисбатан жуда кичик бўлганлигидан унинг нолга тенглаштириш мумкин.

Шундай қилиб, қозон қурилмасига қайтарилган конденсатдан янги иссиқлик миқдори яна ташқаридан киритилади ва сув шу иссиқлик ҳисобига буғга айланади, сўнгра қиздирилган ва ўта қиздирилган буғга айлантирилиб, буғ турбинасига узатилади (нуқталар 4 ва 1 оралиғи, 33-расм, а). Бу нуқталар оралиғида босим ўзгармас, ҳажм эса ўзгарувчан бўлади. Бундай идеал цикл Ренкин цикли дейилади. Цикл бажарган ишнинг ифодаси юқорида келтирилган бўлиб, у мусбат ва манфий ишларнинг алгебраик йиғиндисига тенг. Лекин бундай идеал цикл бўлмайди.

Ренкин циклининг (идеал цикл) термик фикл цикл

базарган ишнинг шу циклга киритилган иссиқлик миқдорига нисбатига тенг:

$$\eta_1 = \frac{A_{ц}}{q_1}. \quad (224)$$

Циклга келтирилган иссиқлик миқдори q_1 сон қиймати жиҳатидан TS диаграммасидаги S_3 34561 S_1S_3 нуқталар ҳосил қилган юзага тенг (33-расм, б).

Қозон агрегатига конденсат (буғ-сув аралашмаси) нинг киришига қадар бўлган энтальпия i_3 сон қиймати жиҳатидан $Oa3S_3O$ нуқталар ҳосил қилган юзага тенг бўлади. Унда, сув буғини ҳосил қилиш учун сарф бўлган иссиқлик миқдори 1 ва 3 нуқталар энтальпияларининг айирмасига тенг:

$$q_1 = i_1 - i_3. \quad (225)$$

Демак, циклининг ФИК ни энтальпиялар айирмалари нисбатлари кўринишида ёзиш мумкин:

$$\eta_1 = \frac{i_1 - i_3}{i_1 - i_2}. \quad (226)$$

Термодинамик жараён 2 ва 3 нуқталар оралигида изобарик-изотермик бўлганлиги сабабли шу нуқталар температураларининг $t_2 = t_3 = t_k$ — конденсат температурасига тенглиги асосида ва сувнинг иссиқлик снгими 4,1868 кЖ/кг·К эканлигини эътироф этсак, у ҳолда η_1 ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_1 = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - 4,1868 t_k}. \quad (227)$$

Ренкин циклида иш бажариб бўлган буғда қолган иссиқлик миқдорининг 60—70% совиткичга узатилади. Бунда қолдиқ иссиқлик миқдорининг совиткичга узатишдаги термик ФИК 30—40% га яқин. Маълумки, циклда ишлайдиган турли-туман қурилмалар ва асбоб-ускуналарда иссиқлик сарфланади.

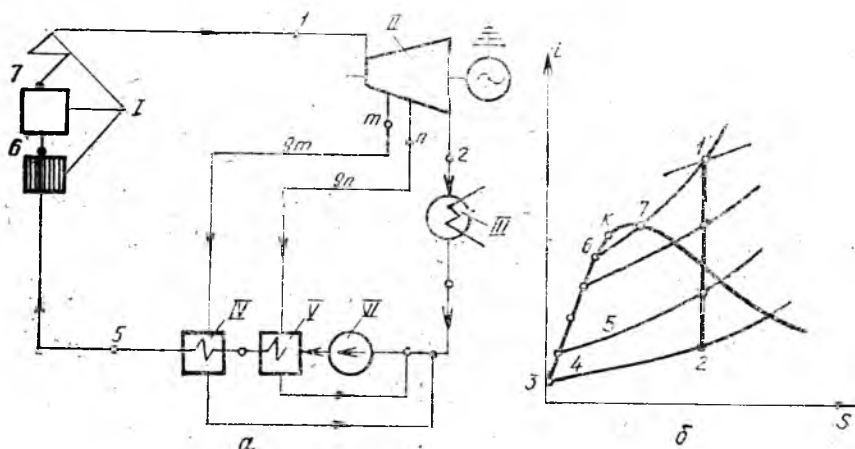
Замонавий буғ куч қурилмалари ўта мураккаб бўлишига қарамасдан уларнинг ФИК 90—98% ни ташкил қилади.

Буғ куч қурилмаларида қўлланиладиган турбиналар буғ иссиқлигидан ўз босқичларида фойдаланиш даражасига қараб, буғдаги ишга айланмасдан қолган иссиқлик миқдоридан тўлароқ фойдаланиш мақсадида *регенерация* циклига эга бўлган қурилмалар ҳам қўлланилади.

Бундай қурилмаларда буғ турбинада иш бажариб бўлганидан сўнг буғнинг маълум қисми турбинанинг бирор босқичидан ажратилиб қозон агрегатига узатилаётган янги совуқ сувни шу ажратилган буғ билан қиздиришда қўлланилади. Бунга **регенерация** цикли дейилади. Регенерация (лот. *regeneratio* — тиклаш) — совиткичга чиқиб кетаётган иссиқлик миқдорини янгитдан узатилаётган бирламчи иш моддасига (сув, буғ-сув аралашмаси, газ ёки ҳаво оқими, ёқилғи ва ёқилғи-ҳаво аралашмаси) киритишдан иборат бўлган усул (34-расм).

Қурилманинг қисмларида кечадиган термодинамик жараёнлар Ренкин циклидан мутлақо фарқ қилади. Шунинг учун буғ-куч қурилмасининг регенерация цикли усулида сув қозон-қурилмасига олдиндан иситиб берилганлиги сабабли қурилманинг термик ФИК Ренкин циклиникидан катта бўлади.

Демак, совиткичга чиқариладиган иссиқлик миқдоридан самаралироқ фойдаланилганда регенератив буғ куч қурилмасининг ФИК ортади. Регенератив циклли куч қурилмасининг iS — диаграммасидан шундай ҳулоса чиқариш мумкин. 1 ва 2 нукталар оралиғида сув буғининг энтальпияси ўзгаради. Чунки системадаги иссиқлик миқдори иш бажаришга сарфланади. Маълумки, системадан иссиқлик миқдори чиқарилса ёки унга ки-



34-расм. Регенерация цикли буғ-куч қурилмаси ва унинг iS диаграммаси: I — қозон қурилмаси; II — буғ турбинаси; III — конденсатор; IV — конденсат насоси; V ва VI — регенерация қурилмалари.

ритилса, системанинг энтропияси ўзгарувчан бўлади. Бу ҳолатда 1 ва 2 нуқталар оралиғида иссиқлик миқдори иш бажаради, шунинг учун унинг энтропияси ўзгармайди. Демак, 2—3—4—5—6—7—1 нуқталар оралиғида иш мўдтаси (сув буғи — термодинамик система) ҳолати, энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади. Бунга тўсқин сабаб системага (сув, буғ-сув конденсати, буғ, қиздирилган буғ) ташқаридан маълум миқдордаги иссиқлик миқдори киритилади ва ундан чиқарилади.

Демак, регенерация циклига эга бўлган буғ куч қурilmасининг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_1' = \frac{A_1'}{q_1'} \quad (228)$$

бунда A_1 — циклининг ўқла бажарган иши;

$$q_1' = i_1 - 4, 1868 t_5$$

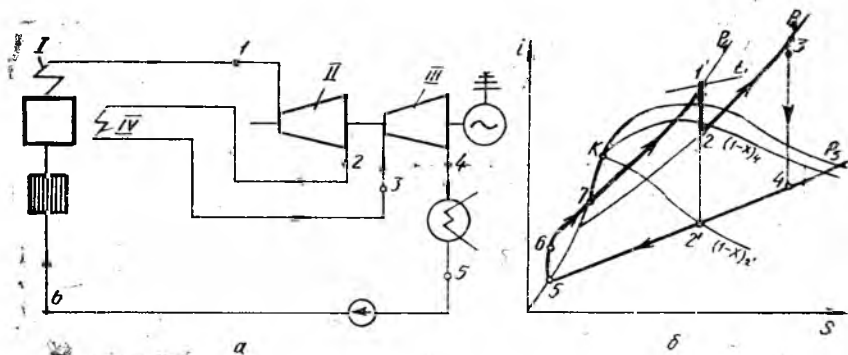
системага киритилган иссиқлик миқдори бўлиб, у энтальпиянинг ўзгаришига тенг.

7.3. Оралик буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмаси

Бир неча турбинада ў унинг босқичида иш бажариб бўлган буғнинг намлиги ортиб кетганида, буғнинг параметрларини ростилаш мақсадидан, оралик буғ қиздиргични усул қўлланилади. Буғ намлигининг ортиб кетиши турбинанинг ёмон ишлашига ва унинг қисмларини тез-тез заҳирлаб ишдан чиқинишига сабаб бўлади. Бу камчиликни тузатиш мақсадидан биринчи турбинада иш бажариб бўлган, ammo намлиги юқори бўлган буғ қайтадан қозон агрегатида жойлашган буғ қиздиргичда қиздирилади. унинг қуруқлик даражаси орттирилади ва шу билан буғнинг иш бажарини параметрлари яхшиланади.

Бундай турдаги буғ-куч қурилмаси (35-расм, а) асосан битта ўқда жойлашган иккита мустақил буғ турбинаси, иккиламчи буғ қиздиргичдан ташкил топган бўлиб, бошқа турдаги буғ-куч қурилмаларидан фарқ қилади.

Буғни қайтадан қиздириб, уни такроран ишлатадиган буғ-куч қурилмасининг PV ва TS диаграммалари юқорида қараб чиқилган цикларникига ўхшаш бўлса-да, айрим ўзгаришларга эга. Оралик буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмаси циклида содир бўладиган термодинамик жараёнларнинг iS — диаграммаси 35-расм, б да



35-расм. Оралиқ буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмасининг схемаси ва iS диаграммаси.

келтирилган. Циклнинг iS — диаграммасидан кўриниб турибдики, 1 ва 2, 3, ва 4 ҳамда 5 ва 6 нуқталар ораллигида, яъни биринчи ва иккинчи турбиналарда ва насосда, термодинамик системанинг энтропияси ўзгармас бўлади. Чунки циклнинг шу нуқталарига мос келувчи ҳолатларида системага иссиқлик келтирилмайди. Диаграмма таҳлилидан шунни айтиш мумкинки, 4 ва 5, 5 ва 1, 2 ва 3 нуқталар ораллигида содир бўладиган жараёнларда термодинамик системанинг энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади. Чунки системада иш бажармасдан қолган иссиқлик миқдори совиткичга чиқарилади (4—5 нуқталар ораллиги) ҳамда системага ташқаридан иссиқлик миқдори (2 ва 3 ҳамда 6 ва 1 нуқталар ораллиги) келтирилади.

Бундай услубда кечадиган циклнинг термик ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_t = \frac{A'_n}{q_1}, \quad (229)$$

бунда $q_1' = (i_1 - i_5) + (i_3 - i_2)$ — бир кг буғ олиш учун иккинчи мартаба қиздириш даврида сарфланадиган иссиқлик миқдори; A'_n — циклнинг бажарган иши.

Тенгламадан кўриниб турибдики, буғ адиабатик кенгайганда (1—2 ва 3—4 нуқталар ораллиги) ва конденсат сиқилганда (5 ва 6 нуқталар ораллиги) системага ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмаган бўлса ҳам турбиналарда мусбат, насосда манфий ишорали иш бажарилар экан. Шунинг учун иккала (II ва III) тур-

бинада аднабатик кенгайиб ўтган буғ энтальпиялари ўзгаришларининг йиғиндисини насосдан ўтадиган конденсат энтальпиялари ўзгаришидан катта бўлади. Тўла фойдали ишни 1—2 ва 3—4 нуқталар оралиғида буғнинг кенгайишида бажарган ишга тенглаштириш мумкин ва бу иш оддий циклда 1 ва 4 нуқталар (32-расм, а; PV диаграммаси) оралиғидаги ишдан катта. Шунинг учун ораллиқ буғ қиздириш услубига эга бўлган буғ-куч қурилмалари қўлланилади.

7.4. Бинар цикли буғ-куч қурилмаси

Иш жисми сифатида иккита моддадан фойдаланиладиган ва улар мутлақо бир-бирига аралашмайдиган ҳамда мустақил циклларга эга бўлган иссиқлик-куч қурилмаси бинар (лот. bīnarus — қўш) цикли куч қурилмаси дейилади. Симоб-сув бинар куч қурилмаси бунга мисол бўла олади (36-расм). Қурилманинг бирламчи берк контурида иш жисми сифатида симоб олинган ва махсус конструкциядаги турбина-конденсатор қўлланилган. Симоб заҳарли модда, унинг критик нуқтасининг температураси $T=1673,15\text{ К}$, шу нуқтадаги босим $P=980 \cdot 10^5\text{ Па}$. Иссиқлик алмаштиргичда (конденсатор) симоб юқори температурада ҳам тўйиниш ҳолатига ($T=498,35\text{ К}$) ўта олади. Сув бундай хоссага наст температурада ($T=306,03\text{ К}$) ўтади. Сув буғини қайтадан қиздириш температураси $T=873,15\text{ К}$, бундан юқори температураларга қиздиришга қўлланилган ўтга чидамли материаллар бардош бера олмайди. Оқибатда сув буғининг юқори температураларидан фойдаланиб бўлмайди. Бу камчиликни тугатиш мақсадида бинар цикли куч қурилмаларидан фойдаланилади. Схемадан кўришиб турибдики, иссиқлик бирламчи берк контурдан (иш жисми—симоб) иккиламчисига (иш жисми—сув буғи) махсус қурилма — симоб турбинасининг конденсаторида регенератив иссиқлик алмашинуви орқали келтирилади. Симобли конденсатор тўйинган сув буғининг қозони вазифасини бажаради. Тўйинган сув буғи симобли конденсаторда ҳосил бўлгандан сўнг, яна қўшимча симобли турбина контуридаги қозон қурилмасининг буғ қиздиригичида иссиқ газ оқими ёрдамида қиздирилиб, босими ва температураси керакли қийматларга етказилади. Шундан кейин иккинчи берк контурдаги буғ турбинасига узатилади. Турбинада, буғ кенгайиб иш бажариш жа-

раёнида, иссиқлик алмашинуви ҳисобига суюқликка айланади. Ҳосил бўлган сув, яъни конденсат сув насоси ёрдамида симобли конденсаторга узатилади. Унда бўғланиб бўлгандан сўнг буғ қиздиргич орқали буғ турбинасига узатилади. Цикл такрорланади.

Бинар циклининг TS диаграммасини қараб чиқамиз: биринчи берк контурининг бажарган иш $i-2-3-4-1$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлиб, система (симоб)нинг термодинамик параметрлари сув бугиниқига инебатан юқори. Масалан, нуқта 3 нинг абсолют температураси нуқта 3' никидан катта, яъни $T_3 > T_{3'}$.

Циклининг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл T_1-T_2 температуралар оралиғида содир бўлади ва 1 кг сув бугининг бажарган иш $3-4-5-1-2-3$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Масалан, Карно цикли нуқтан назаридан қаралса, шу температуралар ўзгаришида бажарилган иш сон қиймати жиҳатидан 36123 нуқталар ҳосил қилган тўртбурчак юзага тенг бўлар эди. Рейкии циклининг Карно циклига яқинлашувини билиш учун гоҳи шу циклларда бажариладиган ишларнинг инебатлари аниқланади. Бу инебатдан ҳосил бўлган коэффициент циклининг карнолаштириш коэффициенти дейилади:

$$\alpha = \frac{A_1}{A_{\text{к}}} \quad (230)$$

1 кг сув бугини симоб қозонининг буғ қиздиргичида қиздириш учун сарф бўлган иссиқлик миқдори симоб-сув бинар системасининг энтальпиялари айирмалари йиғиндисен кўринишида ифодаланади:

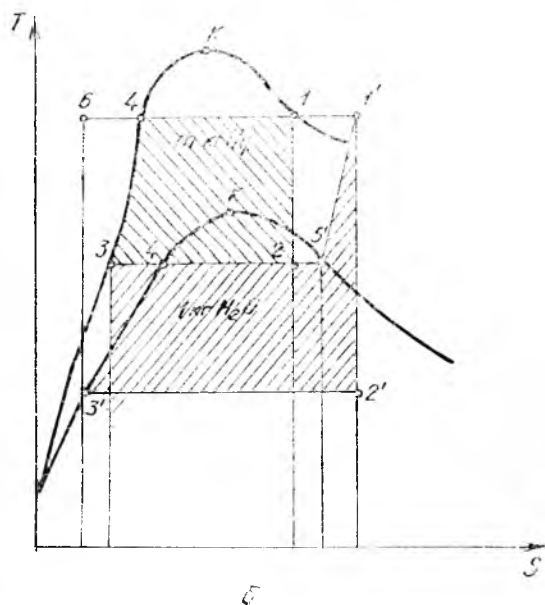
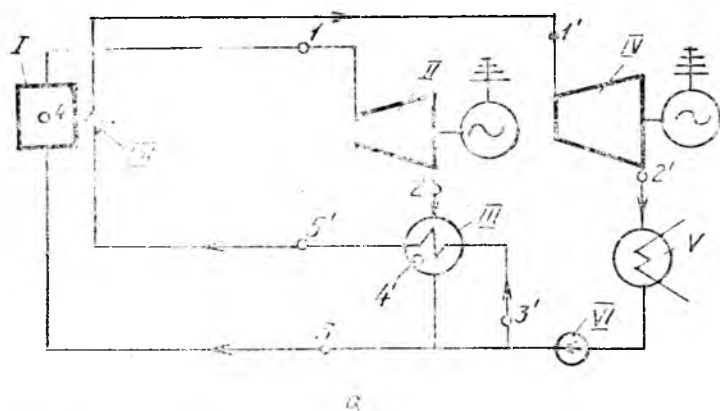
$$q_1^{\text{ин}} = m(i_1 - i_3) + (i_1 - i_3). \quad (231)$$

Бинар циклда бажарилган ишни симоб турбинасида ва буғ турбинасида иш жисмларининг адиабатик кенгайишидаги энтальпиялари ўзгаришларининг йиғиндисен кўринишида ифодалаш мумкин:

$$A_{\text{к}}^{\text{бм}} = i_{1'} - i_{2'}. \quad (232)$$

Бинар циклининг термик ФИК қуйидагига тенг:

$$\eta_1^{\text{бм}} = \frac{A_{\text{к}}^{\text{бм}}}{q_1^{\text{ин}}}. \quad (233)$$



36-расм., Симоб-суз бинар куч қуритмаси ва унинг иш циклининг TS диаграммаси: I — қозон қуритмаси; II ва III — симоб турбинаси ва конденсатори; IV — буғ турбинаси; V — конденсатор; VI — конденсат насоси; VII — буғ ўта қиздиргичи.

Бинар циклининг термик ФИК бошқа циклларикидан катта:

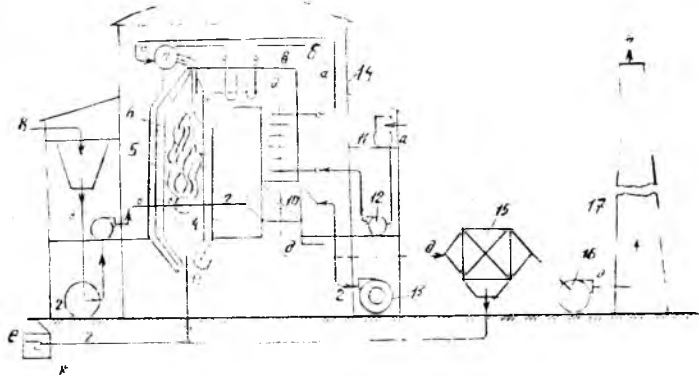
$$\eta_t^{\text{тин}} > \eta_t.$$

7.5 Қозон қурилмаси, унинг тузилиши ва ишлаш тартиби

Ўчоқда ёқилган ёқилгидан ажралган иссиқлик ҳисобига босим остида иссиқ сув ва буғ ҳосил бўладиган ускуналар мажмуи қозон агрегати дейилади. Қозон агрегати ўчоқ, буғлатиш сиртлари — экран, буғ қиздиргич, сув экономайзери ва ҳаво иситкичлардан ташкил топади. Қозон қурилмаси тайёрланадиган маҳсулот турига кўра *буғ қозонлари* ва *сув иситадиган қозонларга* бўлинади. Технология жараёнларининг чиқиндиларини ёқиб ёки металлургия заводларидан ва домна печларидан чиққан тутун-газ аралашмалари иссиқлигидан фойдаланиб ишлайдиган қозонларга *утилизатор қозони* дейилади. Қозон агрегати ва ёрдамчи ускуналар мажмуи қозон қурилмаси дейилади. Қозон қурилмалари ишлатилишига кўра *энергетик, ишлаб чиқариш* ва *иситиш* турларига бўлинади. Фақат иссиқлик электр станцияларининг буғ турбиналарини буғ билан таъминлайдиган қозон қурилмалари энергетик қозон қурилмаси дейилади.

Саноатни ва аҳоли яшайдиган жойларни ҳамда идораларни иссиқ сув ёки буғ билан таъминлайдиган қозонлар ишлаб чиқариш ва иситиш қозонлари дейилади.

Қозон қурилмасининг схематик тасвири 37-расмда келтирилган. Қозон қурилмасининг технологик схемасидан кўриниб турибдики, қурилма ўтхона ва тутун йўли, иссиқ сув-буғ аралашмаси йиғиладиган цилиндрсимон ёпиқ идиш — барабан ($h=0,9\div 1,8$ м, $l=35\div 40$ м, $P=20$ МПа гача), иситиш сиртлари (босим остидаги сув ёки буғ трубалари), ҳаво иситкич, экономайзер, буғ қиздиргич, кул туткич, тутун, кул ва шлак чиқарувчи мосламалар, мўри ҳамда ёрдамчи асбоб-ускуналардан ташкил топган. Иситиш сиртларига босим остида ҳаракатланадиган сув ва буғ трубаларидан ташқари ўтхона экрани (ўтхона девори бўйлаб жойлаштирилган трубалар дастаси), буғ қиздиргич ва сув экономайзери киради. Қозон қурилмасини енгиллаштириш ва унинг иситиш сирт-



37-рasm. Қозон қурилмасининг технологик схемаси: *а* — сув йўли; *б* — қиздирилган буғ йўли; *в* — ёқилғини ўтхонага узатиш йўли; *г* — ҳаво оқимининг ҳаракатланиш йўли; *д* — ёғиш маҳсулотини ташқарига чиқариш йўли; *е* — ўтхона ва кул туткидан чиққан шлак ва кулни ташқарига чиқариш йўли; 1 — ёқилғи буғкери; 2 — кўмир майдалайдиган тегирмон; 3 — тегирмон вентилятор; 4 — горелка; 5 — қозон агрегатининг ўтхонаси ва тутун-газ йўллариининг кесимида кўриниши; 6 — трубалардан ташкил тонган экран (ўтхона экран); 7 — цистернасимон идиш (барабан); 8 — буғ қиздиригич; 9 — сув экономайзери; 10 — ҳаво иситкич; 11 — деаэрацияли сув ғамлайдиган идиш; 12 — таъминловчи насос; 13 — вентиллятор; 14 — қозон қурилмаси ўрнатилган бино; 15 — кул туткич мослама; 16 — тутун газларини сургич; 17 — тутун трубаси — мўри; 18 — кул-шлак (аралашмаси) бўғқасини ҳайдовчи насос станцияси; 19 — коллектор.

ларини орттириш мақсадида иситилиши зарур бўлган ҳамма асбоблар, асосан трубалардан ясалади. Катта қувватли қозон қурилмаларида сув экономайзери, ҳаво иситиш асбоблари қуйиб ишланади. Буғ ҳосил қилувчи трубалар, ўтхона экран ва уларга сув келтирувчи трубалар барабанга уланади. Уларда сув-буғ аралашмаси берк контур бўйича ҳаракатланади, яъни ўтхона ташқарисидаги трубадан сув-оқиб тушиб, 19-коллекторга қуйилади ва ундаи аланга ва тутун газлари билан иссиқлик алмашинувчи ўтхона экранига ўтиб, у ерда буғланади. Коллектор ўтхонанинг совуқ воронкаси, яъни кул ва шлак тушадиган қисмида жойлашган. Иссиқлик тутун газлари йўлидаги сув экономайзери ва ҳаво иситкичга конвектив иссиқлик алмашиниш усулида узатилади. Шунинг учун ўтхонанинг бу қисми конвекция шах-

та с и дейилади. Тутун газларининг температураси конвекция шахтасидан ўтиш вақтида 800—900 К дан 300—400 К гача пасаяди.

Ўтхона деворининг ички қисмига ўтга чидамли ғиштлар (иссиқбардош шамот, динас, магнезит ва ш. к.) терилади. Ташқи томонидан металл қоплама билан ўралади. Бу ўтхона мустаҳкамлигини оширибгина қолмасдан, унинг ичига девор орқали ортиқча ҳавонинг сўрилишидан ва газларнинг ташқарига чиқишидан сақлайди.

Сув бугини ҳосил қилишда махсус конструкциядаги қозон қурилмаларидан — сув тайёрлаш, буғ қиздиргич, буғ генераторларидан фойдаланилади. Ҳосил қилинган буғ ёрдамида бир ва кўп босқичли (қувватига қараб) буғ турбинаси электр генераторидан фойдаланиб, электр энергияси ишлаб чиқарилади. Ишлатиб бўлинган буғнинг қолдиқ иссиқлигидан тўла фойдаланиш мақсадида иссиқлик конденсатор орқали чиқарилиб истеъмолчига (турар жой бинолари, саноат корхоналари, манший хизмат идоралари, мактаб, касалхона, боғча ва ш. к.) узатилади. Истеъмолчилар қўллаган иситиш аппаратлари ўз навбатида совиткич вазифасини ҳам бажаради. Ишлатилиб бўлинган буғнинг асосий қисми конденсаторда иссиқлик алмашинуви натижасида совитилиб, сувга айлантирилади ва у насос ёрдамида яна қозон агрегатига ёки буғ генераторига қайтарилади.

Қозон қурилмасининг асосий ёқилғиси сифатида тошкўмир, торф, нефт ва унинг оғир фракциялари, домна ва табиий газ, ёнувчи сланецлар ишлатилади. Айрим куч қурилмаларида иссиқлик энергияси манбаи сифатида қуёш энергиясидан, актиноидлар гуруҳидаги уран, плутоний элементларининг занжирли ядро реакцияси вақтида ажраладиган иссиқлик энергиясидан фойдаланади.

Қозон қурилмасига ёқилғи махсус ёқилғи сақланадиган омборхоналардан турли-туман узаткичлар орқали, майдалаб ёки бутунлигича, махсус қўшимчалар қўшиб ё қўшмасдан бункерга узатилади. Қаттиқ ёқилғини чанг ҳолатигача майдалаб, ёқиладиган қозон қурилмасини қараб чиқайлик. Унинг технологик схемаси 37-расмда келтирилган. Кўмир омборхонада майдаланганидан сўнг, узлуксиз ҳўл кўмирни қабул қилувчи ёқилғи бункери 1 га ва ундан кўмир тегирмони 2 га йўналтирилади. Тегирмонда тайёрланган чангсимон кўмир махсус вентилятор 3 ҳосил қилган ҳаво оқими ёрдамида,

трубопровод орқали, қозон қурилмаси биноси 14 ичида жойлашган ўтхона 5 нинг горелкаси 4 га узатилади. Ёнишни тўла таъминлаш мақсадида иситкич 10 орқали атмосфера ҳавоси иситилиб пуфлаш вентилятори 13 ёрдамида горелкага узатилади. Қозонни сув билан таъминлайдиган цилиндрсимон барабан 7 га сув деаэрация (юнонча *de* — ажратиб олиш ва *aer* — ҳаво) ли сув ғамлайдиган идиш 11 дан таъминлаш насоси 12 ёрдамида узатилади. Ҳайдалган сув, албатта сув экономайзери 9 орқали ўтгандан сўнг барабан 7 га қуйилади. Сув буғи, ўтхона экрани 6 вазифасини бажарувчи трубаларда ҳосил бўлади ва босим остида барабан 7 га ўтади. Трубаларда ҳосил бўлган қуруқ тўйинган буғ барабан орқали ўта қиздиргич 8 га ва ундан истеъмолчига узатилади.

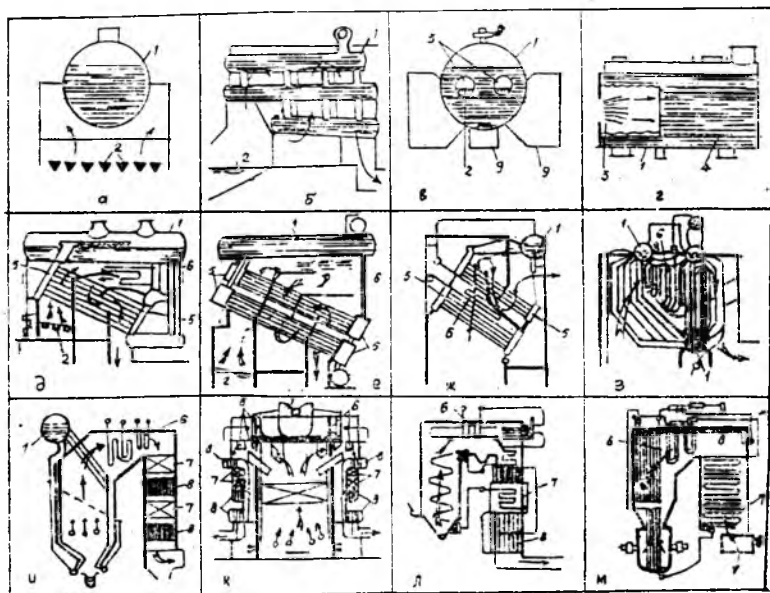
Ёқилғининг ёнишидан машъалали аланга пайдо бўлади ва унинг температураси 1700—1800 К га етади. Бу юқори температурали аланга ўтхона ичида унинг девори бўйлаб вертикал жойлашган труба сиртларини ялаб иситиши натижасида унинг температураси 1200—1300 К гача пасаяди. Тутун газлари ўтхонанинг юқори қисмида газ йўлида жойлашган буғни ўтақиздиргич 8 ни иситиб ўтгандан сўнг сув экономайзери 9 ва ҳаво иситкич 10 орқали тутунни ташқарига тозалаб чиқариш асбобларига ўтади. Заҳарли айрим маҳсулотлардан тутун-газ аралашмаси култуткич 15 да тозаланиб, мўри 17 орқали атмосферага чиқариб юборилади. Атмосферага чиқарилган тутун газларининг температураси 350—380 К ва ундан ортиқроқ бўлиши мумкин.

Қаттиқ ёқилғи чанги ёки майдаси ёқилганида ҳам кул ва шлак ҳосил бўлади. Тутун газларига нисбатан кул ва шлакнинг учувчанлиги кам бўлганлигидан улар чўкинди сифатида ўтхона остига тушади. Кулнинг ўта майда зарралари култуткич 15 да ушланиб қолинади ва сувли махсус ариқчада оқизилиб, кул ва шлак бўтқасини ҳайдовчи насос станцияси 18 ёрдамида қозон қурилмасидан чиқарилади.

7.6. Буғ қозонлари

Иссиқлик энергиясига саноат, маиший хизмат, идоралари ва аҳоли яшайдиган турар жойларда талаб ортаган сайин буғ ва иссиқ сув тайёрлайдиган қозонлар турғилиши ва уларда тайёрланадиган буғ параметрлари

ўзгариб борди. Энг аввал, буғ қозонининг тузилиши содда, ишончли ва хавфсиз ишлаши, уни тайёрлашга металл кам сарфланиши ва ФИК юқори бўлишига эътибор берилди. Янги турдаги буғ қозонлари лойиҳаланди, сўнгра қурилди ва синаб қўрилди (38-расм). Тайёрланадиган буғ босими атмосфера босимидан юқори бўлган ҳамма турдаги қозонларда ёқилғининг ёнишида ажралиб чиққан иссиқлик миқдоридан самарали фойдаланиш масаласи асосий масаладир. Тузилиши жиҳатидан улар бир-биридан фарқланса-да, уларнинг вазифаси битта—буғ тайёрлашдан иборат. Масалан, оддий цилиндрсимон буғ қозони икки йўналишда такомиллаштирилган: а) *газ труба*ли, яъни буғланадиган сув ичидан катта диаметрдаги 2—3 та ўт қувурлари ўтиб, унинг охири кичик диаметрли тутун қувурларига ажралади;



38-расм. Буғ қозонларининг турлари: а — цилиндрсимон; б — бата-
реяли; в — ўт труба; г — ўт ва тутун труба; д — камерали го-
ризонтал сув труба; е — камерали горизонтал (В. Г. Шухов лойи-
ҳаси) сув труба; ж — икки тарамли қия труба; з — сув труба-
лари қия жойлашган; и — сув труба П шаклида жойлашган;
к — сув труба вертикал жойлашган Т-симон қозон; л — тўғри
оқимли (Л. К. Рамзин лойиҳаси); м — ТПП-210А туридаги тўғри
оқимли қозон.

б) *сув труба*ли, яъни катта диаметрдаги сув қувурларининг ташқи сиртларининг аланга — тутун газлари ялаб-ювнб ўтади.

Бу лойиҳа такомиллаштирилиб, катта диаметрли сув қувурлари (3—9 та) ўрнига тўплам-тўплам қилиб жойлаштирилган кичик диаметрли горизонтал, қия (12° гача бурчак остида) ва вертикал сув қувурли қозонлар яратилди. Бу сув қувурларининг пастки учи коллекторга, юқори учи барабанга бирлаштирилиши натижасида буғ йнғувчи барабанлар сони 1 ёки 2 тадан ошмайдиган қозонлар даражасигача такомиллаштирилди. Буғ қозонларнинг энг аввалгиларининг ФИК 30%, буғ босими 1 МПа атрофида бўлса, замонавий буғ қозонларининг ФИК 93—95%, ишлаб чиқариладиган буғ миқдори 4000 т/соат, иш буғ босими 25,5 МПа га етади.

Энергетика соҳасида қўлланиладиган буғ қозонларида тайёрланадиган сув буғи юқори кўрсаткичларга эга бўлиб, катта (1200 МВт гача) қувватдаги буғ турбиналарини буғ билан таъминлайди. Бунда ўта қиздирилган буғ босими 25,5 МПа, температураси 750—850 К гача етади. Ишлаб чиқариш технологик буғ қозонлари паст босимли (0,3—0,7 МПа, айрим ҳолатлардагига 1,3 МПа гача) буғ тайёрлайди, иситиш тармоқларида қўлланиладиган буғ қозонлари 0.13 МПа дан 0,3 МПа гача бўлган босимдаги буғни истеъмолчига етказиб беради.

7.6. Сув-буғ тайёрлаш ва сув иситиш қозонларидаги жараёнлар

Қозонларга сув тайёрлаб беришдан асосий мақсад қозонга узатиладиган сувни қайта ишлаш йўли билан унинг физик хоссаларини яхшилаш, қозон агрегатининг иш унумини ва самарадорлигини оширишни таъминлашдан иборат. Маълумки, табиатдаги сувда турли-туман кимёвий элементлар ва уларнинг тузлари эриган ҳолда учрайди. Буларга сув газлари, минерал тузлар, органик моддалар, қаттиқ (қум) зарралар киради. Бу моддаларнинг сувда бўлиши қозон деворларини тез зангла-тади, уларда қаттиқ чўкма—қуйқа (қасмоқ) қолади. Натижада қозоннинг иш унуми пасайиб кетади ва тезда чиқади.

Масалан, сувда эриган газлар (кислород ва карбонат ангидрид) металлни кучли зангла-тади, қаттиқ зарралар қозон бўшлигининг фойдали ҳажмини эгаллайди ва

иссиқлик ўтказувчанликни пасайтиради, ўз навбатида, эриган минерал тузлардан кальций ва магний тузлари сувнинг қайнаши жараёнида қозон деворларида қасмоқ ҳосил қилади.

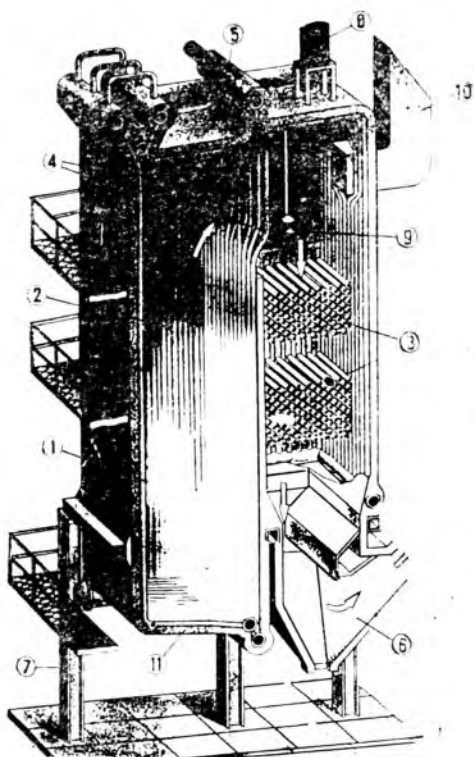
Сувнинг қаттиқ ёки юмшоқлиги, унинг таркибидаги кальций ва магний тузлари $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 ва ш. к. миқдори билан баҳоланади. Масалан, 1 мг экв/л сувнинг қаттиқлик бирлиги бўлиб, 1 л сувдаги магний (12.16 мг) ёки кальций (20.04 мг) миқдори олинади. Кальций ва магний миқдори кимёвий анализ йўли билан аниқланади. Сувнинг қаттиқлиги таркибидаги Ca^{2+} ва Mg^{2+} ионлари миқдорига қараб ўзгаради. Сувнинг қаттиқлиги икки хил: сувда Са ва Mg сульфатлари эришдан *нокарбонат* қаттиқлик ҳосил бўлади. Худди шундай, сувда Са ва Mg бикарбонатлари эришидан *карбонат* қаттиқлик пайдо бўлади. Дарё ва кўл сувининг қаттиқлиги 0,1—0,2 мг·экв/л, ер ости, денгиз ва океан сувиники 80—100 мг·экв/л. Сув таъминотидаги сувнинг қаттиқлиги 7 мг·экв/л гача етади.

Сувнинг қаттиқлигини пасайтириш (юмшатиш) учун қозонларга сувни узатишдан аввал, унга сода, натрий фосфат, айрим ҳолларда бошқа тузлар қўшилади. Шунда Са ва Mg қўшилган моддалар билан кимёвий реакцияга киришиб, CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ тузларини ҳосил қилиб қозон тубига чуқади ва сув юмшайди. Сувни юмшатишнинг *ионит* усули қўлланилганда, унга сувда эримайдиган табiiй ва сунъий материаллар қўшилади. Масалан, сульфат кислотаси билан ишлов берилган кўмир, сунъий алюминосиликатлар ва ҳ. к.

Сувни *термик* усул билан ҳам юмшатиш мумкин. Бу усулда сув буғидан дистилланган сув олинади. Дистилланган сув билан тўғри оқимли, юқори ва ўта юқори босимли қозонлар таъминланади.

Қаттиқ механик аралашмалардан сувни тозалашда тиндириш, фильтрлаш усулларидан кенг фойдаланилади. Паст босимли (1,5 МПа гача) қозонларга сувни узатишда уни аввал юмшатиш учун ўювчи натрий (каустик сода) — NaOH , натрий уч фосфат (Na_3PO_4) ҳам ишлатилади.

Сув иситиш қозонлари асосан маълум температура ва босимдаги иссиқ сув ёки иссиқ сув-буғ аралашмаси тайёрлашга мўлжалланган. Идоралар, айрим корхоналар ва аҳоли яшайдиган уйлар ва уларда ўрнатилган



39-рasm. Газ ва мазутда ишлайдиган сув иситиш қозони. 1—горелка; 2—экран; 3—конвектив оқим йўлидаги қувурлар дастаси; 4—фестон (оқим йўлидаги эгри қувурлар); 5—коллектор; 6—бункер; 7—спич; 8—сочиладиган материал; 9—сачраткич материал; 10—портлаткич клапан; 11—қозон қопламаси.

иситиш аппаратлари (батареялар) да иссиқ сувдан фойдаланилади ва улар орқали иссиқлик энергияси алмашинади ва узатилади. Иссиқ сув тайёрлайдиган қозонлар тўғри оқимли бўлиб, сув узлуксиз оқиб туради, яъни ҳар доим янги сув қозонга оқиб кириб, ундан исиб чиқади ва чиқарилган сувнинг асосий массаси қозонга қайтиб келмайди.

Қозондан чиқадиган сув температураси ва босими бир хил сақлангани учун иситиш жойларидаги хоналар ҳа-

порати кескин ўзгармайдн. Атмосфера ҳавосининг температураси пасайганида қозондан чиқадиған иссиқ сув температураси кўтарилади ва аксинча. Сув иситиш қозонларидаги иссиқ сув температураси 340—380 К дан 420—450 К гача бўлади. Кейинги йилларда иссиқ сувни узоқ масофага ва мураккаб қувурлар орқали узатилаётганлиги сабабли унинг температураси 480 К гача етказилмоқда.

Сув иситиш қозонларига қайтарилган ёки янги узатилаётган сув температураси 340 К дан паст бўлса, қозон деворлари ва сув узатиш қувурлари тез занглайди. Шунинг учун қозон табиий газ билан иситилганда унга киритиладиган сув температураси 340 К дан паст бўлмаслиги керак. Агар қозон ёқилғиси сифатида, таркибида олтингугурт кам бўлган мазут ишлатилса, сув температураси $T=340-345$ К дан, олтингугурт кўп бўлганда эса 380—385 К дан кам бўлмаслиги керак.

Қайтган иссиқ сув температураси турли хил таъсирлар ҳисобига юқорида кўрсатилган қийматлардан паст бўлса, унга аввал қозондан тайёр иссиқ сув қўшилади, сўнгра қозоннинг киритиш қисмига узатилади. Сув иситиш қозонининг схематик тасвири 39-расмда келтирилган.

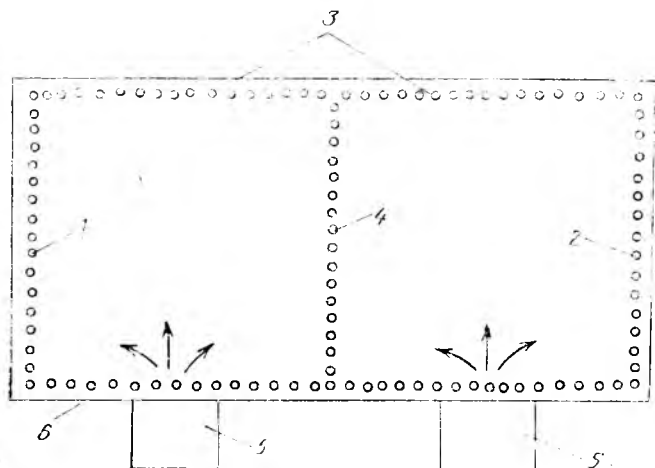
Буг қозонлар ўтхонали ва ўтхонасиз бўлиши мумкин: ўтхонали буг қозонларда ҳамма асбоб-ускуналар иссиқлик манбаи бўлган ўтхонада ва унинг атрофига жойлаштирилади. Ўтхонасиз буг қозонлари турнга қозон утилизаторни киритиш мумкин (39-расм). Бу қозон утилизаторда, асосан ёниш маҳсулоти таркибидаги тутун газлари иссиқлигидан фойдаланилади.

Ўтхонали буг қозонининг буг ҳосил қилувчи элементи, асосан буг экрани ҳисобланади. Сув-буг циркуляцияси табиий ёки мажбурий бўлиши мумкин.

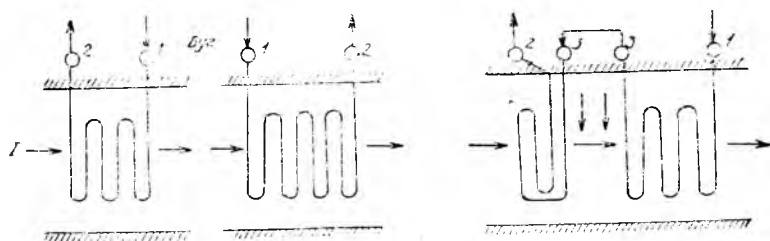
Буг тайёрловчи экран (трубалар) билан иссиқлик алмашинуви, хусусан ўтхонада, радиация (нурли) иссиқлик алмашинуви инфрақизил нурланиш ҳисобига устувор бўлади. Экранда, ёниш вақтида ҳосил бўлган алапга билан контактлашгандаги иссиқлик алмашинуви асосий ҳисобланмайдн. Ёниш маҳсулоти билан ўтхонанинг чиқиш қисмидаги контактлашувда иссиқлик алмашинуви кўпроқ бўлади.

Ўтхона ичидаги буг тайёрловчи экран (трубалар)нинг сирти сўглиқ булганда тутун газлари табиий конвекциясининг бир текис ўтиши таъминланади. Экран трубала-

рининг ички диаметри 50—60 мм, улар оралиғи 4—6 мм қилиб танланади. Қозон тузилиши ва бошқа параметрларига қараб, буғ экрани трубаларининг қуйи ва юқори учлари, мос равишда, коллектор ва барабанларга уланади; айримларида юқори коллектор вазифасини барабан бажаради. Буғ қозони ўлчамини кичрайтириш ва қувватини орттириш мақсадида ўтхона ўртасидан уни иккига ажратувчи экран ўрнатилади. Экраннинг ҳар иккала томонидан ҳам алаңга ялаб иссиқлик алмашинади (40-расм).



40-расм. Буғ қозони ўтхонасида экранларнинг жойлашиши (горизонтал кесими): 1—4 экран трубалари; 5 —горелкалар; 6 — ўтхона танаси.



41-расм. Горизонтал тутун-газ йўлида конвектив буғ ўтақиздиргичининг жойлашуви: 1 — ёниш маҳсули; 2 — қарама-қарши оқимли; 3 — түгүн оқимли; 4 — аралаш оқимли.

Буг қозонларининг бир қисми бугни ўтақиздиргичлар бўлиб, улар қозонда ҳосил қилинган буг температурасини, босимини яна кўтаришга мўлжалланади. Қозон агрегатида буг ҳосил қилиш учун сарфланган жами иссиқлик миқдорининг тақрибан 60% бугни ўтақиздиргичга тўғри келади. Шунинг учун бугни ўтақиздиргич трубалари мустақамлиги юқори бўлган қотишмалардан тайёрланади.

Иссиқлик алмашиниш зонасида жойлашган бугни ўтақиздиргич трубаларининг ўрнатилишига қараб, улар конвектив, нур ёрдамида ва қисман нур ёрдамида иссиқлик алмашиниш усуллари билан иссиқлик энергиясини қабул қилади.

Нур ёрдамида иссиқлик алмашиниш усули билан ўта қиздирилган буг тайёрлашда диаметри 22—54 мм ли металл трубалар ўтхонада жойлаштирилади ва ёқилғи алангасининг бевосита таъсири ҳисобига уларда ўта қиздирилган буг ҳосил бўлади.

Конвектив усулда ўта қиздирилган буг тайёрлашда трубалар тарам-тарам ёки илонизисимон қилиб жойлаштирилади.

Илонизисимон трубаларда буг, тутун ҳаракатига нисбатан тўғри, қарама-қарши, аралаш оқимда ҳаракатланиши мумкин (41-расм).

Тайёрланадиган буг параметрлари ва унинг сарфи бир текис сақланади, бу билан исгеъмолчи талаби ба-жарилади.

Буг тайёрлаш қозонларига узатиладиган сув, албатта аввал сув юмшаткич ва сув экономайзеридан ўтказилади, қозонга ҳаво эса ҳаво иситкич орқали узатилади.

7.8. Сув бугининг ҳосил бўлишида айрим физик жараёнлар

Суюқликнинг ташқи таъсир натижасида газ ҳолатига ўтиши бўғланиш дейилади. Сувнинг буг ҳолатига ўтиши учун унинг сиртидаги босимни ўзгармас ёки ўзгарувчан ҳолатда сақлаб, унга маълум миқдордаги иссиқликни киритиш керак. Шунда сув молекулалари орасидаги тутуниш кучлари камаяди ва молекулаларнинг кинетик энергияси ортади. Молекуланинг мувозанат ҳолатидаги кинетик энергияси унинг q иссиқлик миқдорини ютгандан кейинги кинетик энергиясидан анча кичик бўлгандагина суюқлик газ ҳолатига ўта бошлай-

ди, яъни буғлапади. Аксннча, бўлганда конденсация ҳодисаси кузатилади. Суюқлик сиртидан қанча молекула узилиб чиқиб газ ҳолатига ўтса ва худди шунча молекула конденсацияланиб суюқлик ҳолатига қайтса, бундай ҳодиса тўйиниш ҳолати деб қабул қилинган, яъни буғ сув билан мувозанатда бўлади. Суюқлик билан динамик мувозанатдаги буғ тўйинган буғ дейилади. Суюқликнинг эркин сирти устидаги бўшлиқни тўйинтирадиган буғ қисми нам буғ дейилади. Тўйинган нам буғда майда сув томчилари бўлади.

Суюқликка узатиладиган иссиқлик миқдори ортиб бориши билан унинг температураси ҳам кўтарилади ва суюқлик молекулаларининг газ ҳолатига ўтиши кузатилади. Натижада жадал равишда буғ пуфакчалари пидиш деворларида суюқлик ҳажмида пайдо бўлади ва катталашиб суюқлик сиртига қалқиб чиқиб ёрилади. Бундай ҳодиса қайнаш дейилади.

Қайнаш суюқлик сиртидаги босимга боғлиқ, яъни босим ортса, қайнаш температураси ҳам ортади ва, аксннча.

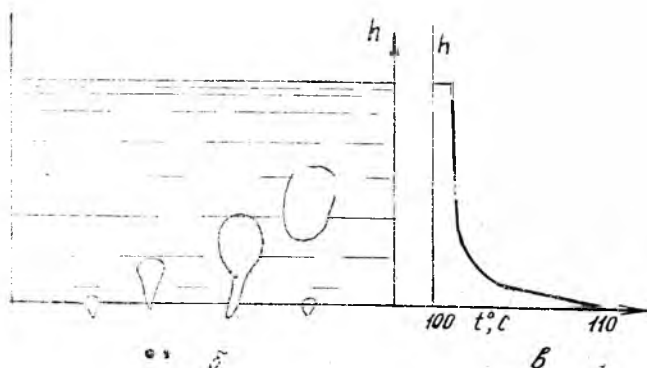
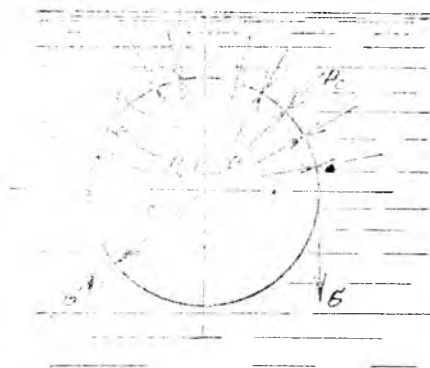
Ҳосил қилинган нам буғга яна қўшимча иссиқлик миқдори узатилса, унинг таркибидаги жуда майда сув томчилари буғ ҳолатига ўтади ва тўйинган қуруқ буғ ҳосил бўлади. Буғнинг қуруқлик ва намлик даражаси тўйинган қуруқ буғ таркибидаги буғ ва сув томчилари миқдори билан баҳоланади.

Буғнинг қуруқлик даражаси қанча катта бўлса, уни ишлатиш ҳам шунча қулай.

Тўйинган қуруқ буғни яна қиздирсак, у ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади, яъни суюқлик буғи молекула даражасигача майдалашиб боради.

Сув буғининг PV диаграммасини қараб чиқамиз (42-расм). Диаграммадан кўриниб турибдики, сувга ташқаридан q иссиқлик миқдори узатилганда, унинг температураси ортиб боради: аввал ҳажми ортади, сўнгра жадал буғланиш даражаси (қайнаш)га етади ($a'-b'$ нуқталар оралиғи, iV координаталарида; $a-b$ нуқталар оралиғи, PV координаталарида). Ташқаридан бериладиган иссиқлик миқдори q ортиб борган сайин, сув жадал буғга айланади ва нам буғ пайдо бўлади ($b-d$ ва $b'-d'$ нуқталари оралиғи). Ҳажмдаги ҳамма сув миқдори нуқталар d ва d' оралиғида тўла газ ҳолатига ўтади, яъни тўйинган қуруқ буғ ҳосил бўлади.

Жадал буғланиш ўзгармас босим ($P=\text{const}$) ости-



42- расм. Сув буғининг PV диаграммаси.

да содир бўлганда жараён ҳам изобарик, ҳам изотермик бўлади ($b-d$ ва $b'-d'$ нуқталар оралиғи).

Тўйинган қуруқ буғга q иссиқлик миқдори киритилса, унинг параметрлари ўзгаради, яъни T ва V ортади, чунки жараён $P=\text{const}$ да содир бўлади. Тўйинган буғ d ва d' нуқталардан ўнг томонда ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади.

Сув сирти устидаги босим бир хилда тутилмаса, b ва d нуқталар аста-секин бир-бирига яқинлашиб, K (критик) нуқтада маълум босим ва ҳажмда устма-уст тушади. Критик нуқтадан чап томонда сув буғи таркибида майда сув томчилари бўлган ўта қизиган буғ ҳолатида бўлади; шу K нуқтадан ўнг томонда сув буғи

таркибида сув томчилари йўқ даражада, яъни идеал газга яқин бўлади. Сув буғининг критик нуқтасидаги параметрлари қуйидагича: $P_{кр} = 221,29 \text{ бар} = 22,12 \text{ МПа}$; $\Delta_{кр} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $T_{кр} = 647,3 \text{ К}$.

Сув буғини ўрганиш ва ундан фойдаланишда изохорик, изобарик, изотермик ва адиабатик жараёнлар ўринли бўлади.

7.9. Сув буғи ва уни тайёрлашдаги асосий термодинамик жараёнлар

Содир бўладиган термодинамик жараёнларни билмасдан туриб сув буғидан буғ-куч қурилмаларида самарали фойдаланиб бўлмайди. Бу жараёнларни қисқагина қараб чиқамиз.

Изохорик жараён. Ўзгармас ҳажмда ($V = \text{const}$) жойлашган сув буғига иссиқлик миқдори узатиб, бу тўйинган буғни тўйинган қуруқ ва ўта қиздирилган буғга айлантириш мумкин. Лекин, ҳар қандай температурадаги буғни совутганимизда конденсацияланиш даврида суюқ фаза миқдори ортиб борса-да, буғ 100% суюқликка айланмасдан суюқлик устида маълум миқдорда буғ қолади. Шунинг учун изохорик жараённинг PV диаграммаси нолдан бошланмайди (43- расм, 1 ва 2 нуқталар оралиғи).

Ҳар қандай паст босимда ҳам суюқлик сирти устида маълум миқдордаги тўйинган буғ бўлади.

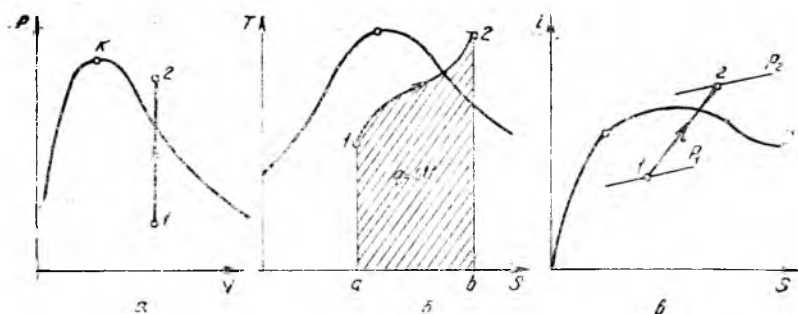
Демак, термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ $V = \text{const}$ бўлганда сув буғининг бажарган иши $A = 0$ бўлади. Буғга узатилган q иссиқлик миқдори унинг ички энергиясининг ўзгаришига сарф бўлади:

$$q = \int_1^2 dq = \int_1^2 dU = U_2 - U_1 \quad (234)$$

ёки

$$q = (i - PV)_2 - (i - PV)_1.$$

Сув буғининг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, буғга узатилган иссиқлик миқдори $a12b$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Сув буғининг $V = \text{const}$ бўлган жараёндаги P , T параметрлари ўзгарганда, унинг энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади (43- расм, iS диаграмма).



43-расм. Сув буғининг изохорик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммаларин.

Изобарик жараён. Ўзгармас босим остидаги буғга ташқаридан q иссиқлик киритилса, унинг V , T параметрлари ўзгариши натижасида буғ иш бажаради ва унинг сон қиймати d 12 b нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади.

Сарфланган иссиқлик миқдори a 12 b нуқталари ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади (144-расм, а, б). Бу иссиқлик миқдори буғнинг ички энергиясини ўзгартирибгина қолмасдан фойдали иш ҳам бажаради:

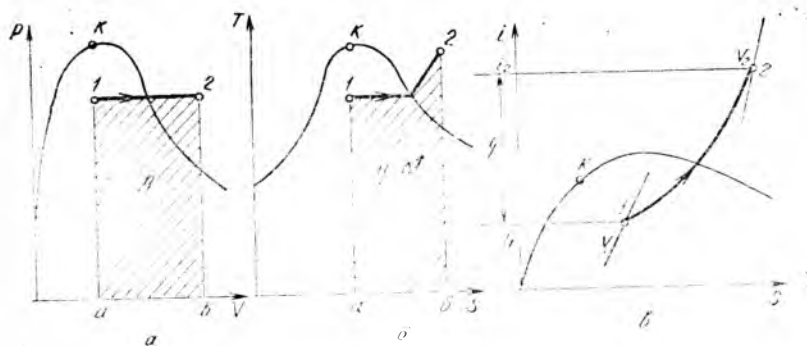
$$q = \int_1^2 dq = \int_1^2 di = i_2 - i_1 \quad (235)$$

ёки

$$q_1 = u_2 - u_1 = (i - PV)_2 - (i - PV)_1, \\ A = P(V_2 - V_1) \quad (236)$$

Сув буғига узатилган иссиқлик миқдорининг ютилиши натижасида тўйинган ҳўл буғнинг қуруқлик даражаси аввалига ортади, сўнгра бу қуруқ буғ қуруқ ҳолатдан ўта қиздирилган даражага ўтади. Бунда, албатта буғнинг температураси кўтарилиб боради.

Изотермик жараён. Сув буғининг температураси ўз-

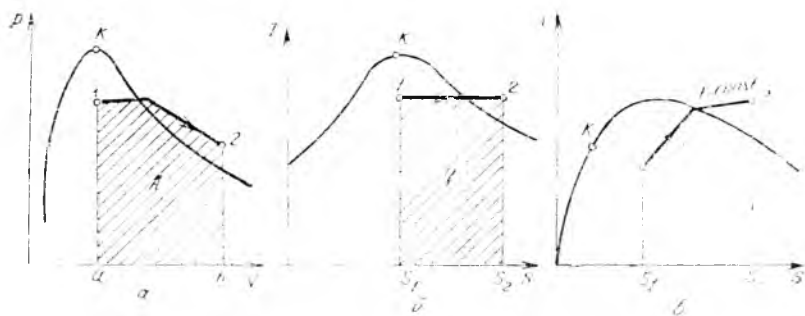


44-расм. Сув бугининг изобарик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

гармас сақланиши учун унга иссиқлик берилади. Лекин, берилган иссиқлик таъсиридан сув бугининг P, V параметрлари ўзгаради. Ҳажм ўзгарувчан бўлганлиги сабабли босимни бир текис сақлаб бўлмайди. Демак, сув буғи иш бажаради, унинг ифодаси термодинамиканинг биринчи қонунидан топилади:

$$A = q - du.$$

Бу ишнинг қиймати PV диаграммадаги $a12ba$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлса, иссиқлик миқдори эса S_112S_2 нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади (45-расм).



45-расм. Сув бугининг изотермик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

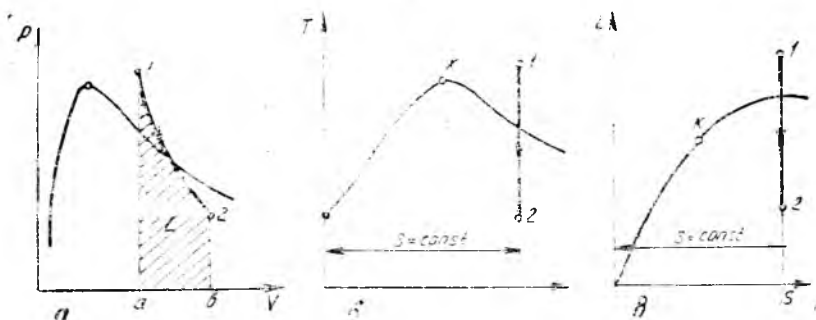
Демак, сув буғига $T = \text{const}$ бўлган жараёнда келтирилган иссиқлик миқдори унинг энтропиясининг ўзгаришига сарфланар экан:

$$q = T(S_2 - S_1) \text{ ёки } q = (t = 273,15) \cdot (S_2 - S_3) \quad (238)$$

Адиабатик жараён. Сув буғига ташқаридан иссиқлик берилмаган ҳолда уни кенгайтирганимизда буғ соғийди, яъни буғнинг температураси ва босими пасаяди. Буғнинг ички энергияси камаяди.

Маълумки, идеал газнинг иссиқлик сиғимларининг нисбати ($k_g = C_p / C_v$) сув буғининг иссиқлик сиғимлари нисбати ($\kappa = C_p / C_v$) га тенг эмас. Шу сабабли $PV^\kappa = \text{const}$ тенгламасини буғнинг аниқ соҳаларига жорий қилиш мумкин. Чунки адиабата кўрсаткичи κ ҳар хил қийматларни қабул қилади. Масалан, ўта қиздирилган буғ соҳаси учун C_p / C_v нинг ўртача қиймати $\kappa = 1,3$ бўлса, нам буғ соҳасидаги қиймати $\kappa = 1,035 - 0,1$ х кўринишида қабул қилинади. Бунда, κ — буғнинг қуруқлик даражасини билдиради. Кўпчилик ҳолатларда (буғнинг кенгайиши бошланишида ёки сиқилиши охирида) адиабатанинг энг юқори чўққисида $\kappa = 1,0$ бўлса, нам буғ соҳасида унинг қийматини $\kappa = 1,135$ деб қабул қилиш мумкин. Шу сабабли, адиабатик кенгайиш паст босимда содир бўлаётган бўлса, $PV = \text{const}$ тенгламани тахминий ҳисоблашларда қўллаш мумкин.

Сув буғининг PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари 46-расмда келтирилган. PV диаграммадан кўришиб турибдики, буғнинг адиабатик кенгайишида бажарган ишининг катталиги $a12b$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Аммо адиабата



46-расм. Сув буғининг адиабатик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

тик жараён тенгламасидан фойдаланиб бу ишни ҳисоблаш адиабата кўрсаткичининг ҳар хил нуқталаридаги қиймати ўзгарувчан бўлганлигидан, анчагина ноаниқликларга олиб келади. Шунинг учун иш қийматини термодинамиканинг биринчи қонунидан фойдаланиб аниқлаган маъқул. Чунки сув буғи кенгайганда унинг ички энергияси камаяди.

Демак, бажарилган иш ички энергиянинг камайиши ҳисобига бажарилади:

$$dq = du + dA$$

$$dA = -du, \text{ чунки } dq = 0$$

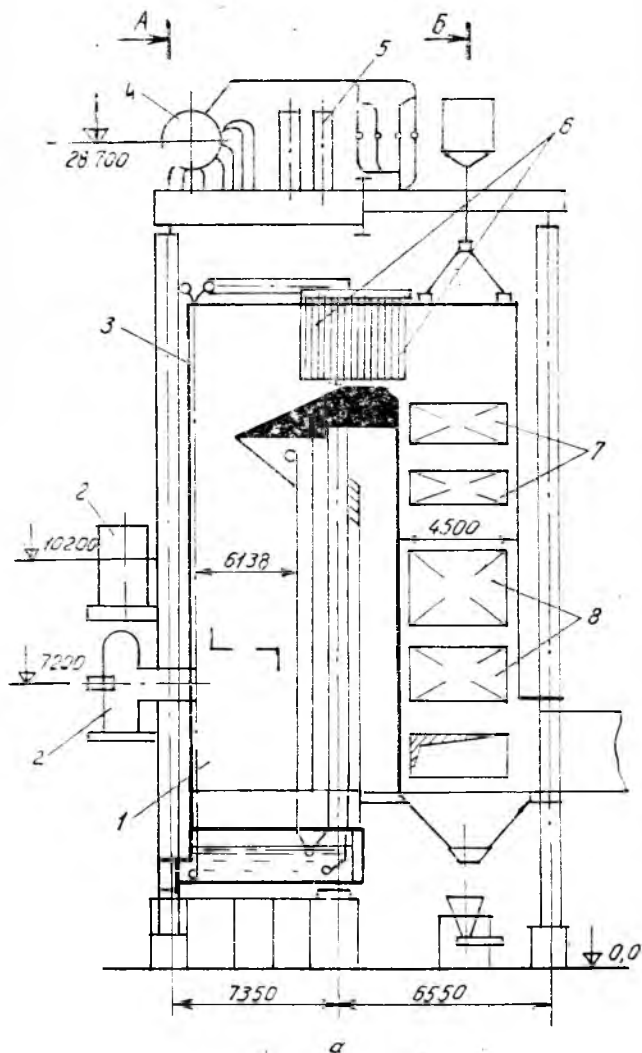
$$A = u_1 - u_2 = (i - PV)_1 - (i - PV)_2. \quad (239)$$

$S = \text{const}$ бўлгани учун буғ кенгайганда унинг абсолют температураси ва энтальпияси адиабатик жараёнининг TS ва iS диаграммаларида пасайиб борувчи вертикал чизиқлардан иборат бўлади.

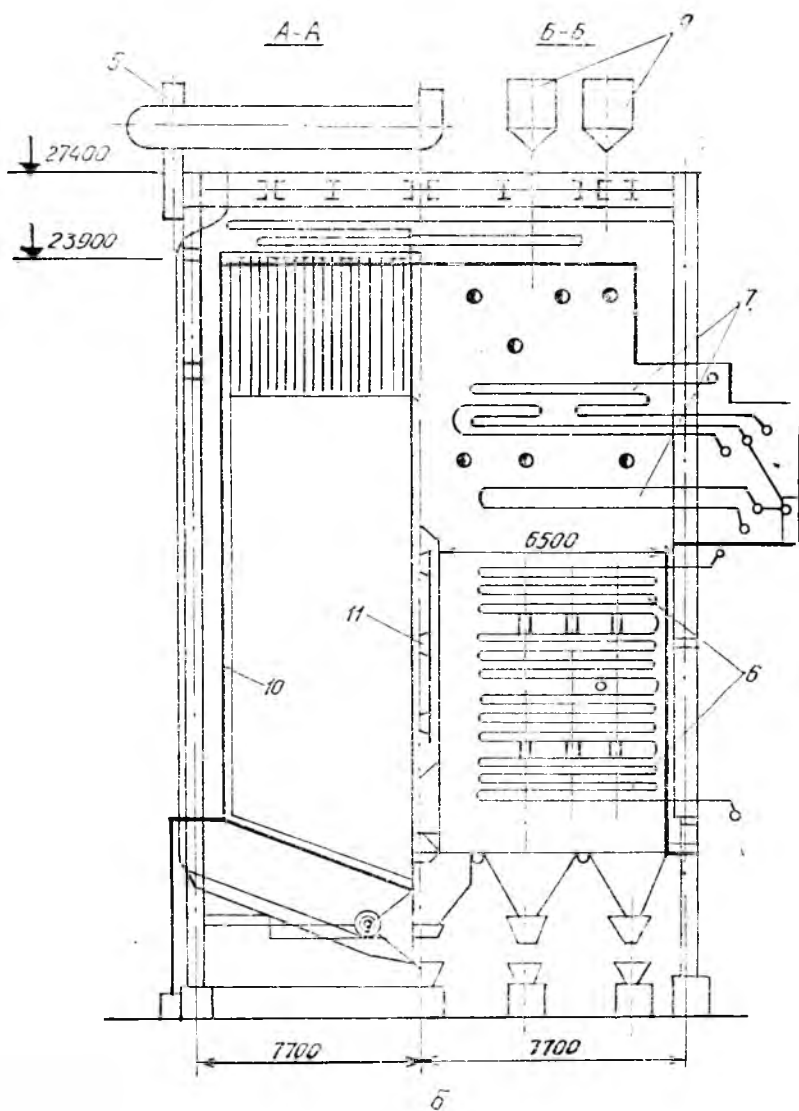
Замонавий қозон агрегатлари асосан табиий ёки сунъий газда, мазутда, чангенмон кўмирда ишлайди. Улар асосан, барабан, экран сув иситкич, ҳаво иситкичдан ташкил топган. Замонавий қозон агрегатларининг ишлаб чиқарадиган буғининг сарфи 400—450 т/соат, босими 25,5 МПа гача, температураси 700—850 К га етади. Қурилиши жиҳатидан замонавий қозон агрегатларига кам металл сарфланган, бошқариш етарли даражада механизациялаштирилган ва автоматлаштирилган, экологик нуқтан назардан атроф-муҳитга заҳарли газларни камроқ чиқаради. Бунга 47-расмда келтирилган газ-мазутда ишлайдиган табиий циркуляцияли ТГМ-84Б маркали қозон агрегати мисол бўла олади.

Бундай буғ қозонлари унча катта эмас (баландлиги 30 м атрофида). Трубалардан ташкил топган экран ёрдамида ўтхона икки бўлакка бўлинади ва ҳар бири ярим ўтхона томонидан иситилади.

Буғ экрани (буғ генератори) ўтхона девори бўйлаб жойлаштирилган трубалардан ташкил топган бўлиб, уларнинг жойлашган қисми экран майдони деб юритилади. Ўтхона шифтига ҳам трубалар зич қилиб жойлаштирилган ва улар шифт экрани ёки шифтнинг радиацияли буғ ўта қиздиргичи дейилади. Буғ ўта қиздиргичининг яна бир қисми труба пардаси ҳисобланади. Ўта қиздиргичининг яна бир қисми тутун газлари йўлида жойлашган бўлиб, у конвектив бўлма дейилади.



47-расм. Газ-мазутда ишлайдиган ТГМ-84Б буғ қозони: а — бўй-лама кесими; б — кўндаланг кесими; 1 — ўтхона; 2 — горелка; 3 — экран — буғ қиздиргич; 4 — барабан; 5 — циклонлар; 6 — буғ қиздиргич пардалари; 7 — буғ қиздиргичнинг конвектив қисми; 8 — сув экономайзери; 9 — майда зарраларни тутиб қолувчи қурилма тутқич; 10 — буғлатгичнинг ён экранлари; 11 — устма-уст жойлашган экран.



Замонавий буғ қозонларида иссиқлик энергиясининг 60% дан ортиқроғи радиацияли иссиқлик алмашинуви йўли билан буғ генераторларига, буғ ўта қиздиргичларига узатилади.

Ўтхонанинг юқори қисмидаги тутун йўлининг пастки қисмида ёниш маҳсули оқимининг аэродинамик хусусиятини яхшилаш мақсадида махсус геометрик шаклдаги қайтаргичлар ўрнатилади. Натижада тутун оқими труба пардали буғ ўта қиздиргичларини тўлиқ ялаб ўтади ва жадал иссиқлик алмашинувини таъминлайди.

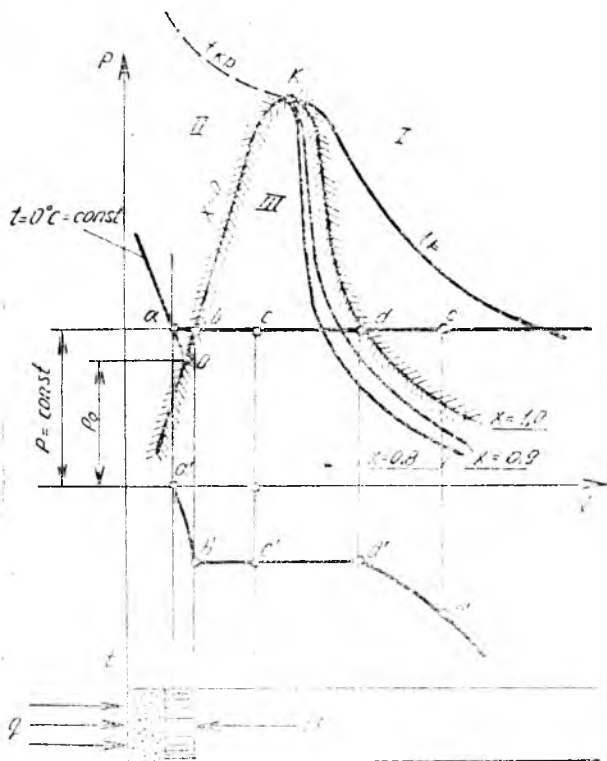
Замонавий газ-музутда ишлайдиган буғ қозонларида соатига 25—30 тонна мазут ёки 30 минг м³ табиий газ ёқилади. Қозонга узатиладиган сув температураси 500 К дан кам бўлмайди. Ишлатилиб бўлинган ёниш маҳсулоти газларининг атмосферага чиқарилаётган қисмининг температураси 390—410 К дан паст бўлмайди. Бу қозонларнинг ФИК 90—92% атрофида.

Замонавий буғ қозонларининг циклида регенератив иссиқлик алмашинуви ҳам кенг татбиқ этилди. Буғ тайёрловчи қозонларсиз ҳозирги замон ишлаб чиқаришини ва энергетикасини тасаввур этиб бўлмайди. Шунинг учун буғ қозонлари кенг жорий этилмоқда ва янги лойиҳалари яратилляпти.

7.1. Сув агрегати ҳолатининг ўзгаришида иссиқлик алмашинуви

Буғ қозонидаги сувга бирор миқдордаги иссиқлик узатилса, унинг агрегат ҳолати ўзгаради. Сувнинг қайнаш температураси тўйинган буғники $T_{т.б.}$ га тенг, яъни $T_c = T_{т.б.}$ бўлганда сув ҳажмида буғ бўлиши мумкин эмас ва иссиқликнинг узатилиши табиий конвекция бўйича рўй бера олмайди. Чунки суюқлик ҳажмидаги сув буғи пуфакчаси ичидаги босим P_n пуфакча сиртига таъсир қилаётган сув босими P_c ва сирт таранглик кучи йиғиндисига тенг бўлади.

Маълумки, $P_n > P_{т.б.}$ бўлса, $T_n > T_{т.б.}$ шarti бажарилганда, ҳеч бўлмаганда $T_n = T_c$ бўлади. Сувнинг қайнаши учун $T_c > T_{т.б.}$ шарт бажарилиши керак. Шунда сирт таранглик кучи асосий бўлиб, пуфакча босимининг орттирмасига қайнаш боғлиқ бўлади, яъни ΔP қанча катта бўлса, сув шунча тез қайнайди. Шунда $\Delta T_c = T_c - T_{т.б.}$ ҳам катта бўлади. 48-расмдан кўриниб турибдики, буғ пуфакчаси кесимининг периметри бўйлаб



48-расм. Қайнаётган сув ичидаги пуфакчага таъсир этувчи кучлар (а), қиздирилаётган идиш сиртидаги микроёриқларда сув буғи пуфакчаларининг пайдо бўлиши (б) ва қайнаётган сув қалинлиги бўйича температуранинг тақсимланиши (в).

сирт таранглик кучи таъсир этади. Унинг катталиги босим кучининг вертикал йўналишдаги проекциясига тенг:

$$2\pi R\sigma = (P_c = \Delta P) \pi R^2 - P_c \pi R^2 \quad (240)$$

Бу тенгламани ихчамлаб ундан ΔP ни топамиз:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}, \quad (241)$$

бунда σ — сирт таранглиги кучи; R — пуфакчанинг ички радиуси, м.

Демак, буғ пуфакчасининг радиуси қанча кичрай-тирилишидан қатъи назар, маълум $R_{кр}$ (критик ради-ус)да пуфакча ичидаги $P_c + \Delta P$ босимлар йиғиндиси би-рор $T_c = T_{т.б.} + \Delta T_c$ температурада $P_{т.б.}$ босимга тенг-лашади. Шунда $P_n > P_c + \Delta P$ бўлганлигидан пуфакча ра-диуси ортиб боради, яъни шишади. $R_{кр} > R$ бўлганда пу-факлар сирт таранглик кучи ҳисобига сиқилади ва улар суюқлик билан қўшилиб кетади. Таҳлилдан шундай фикр келиб чиқади: *пуфаклар радиуси нолдан бошлан-ганда, суюқлик ҳеч вақт қайнамаган бўлар эди.*

Сувнинг қайнаши бу, албатта, сув газларининг ажра-лиши, яъни буғ пуфакларининг пайдо бўлишидан бош-ланади. Сув буғи учун $R_{кр}$ мавжуд эмас. Чунки сув бу-ғи пуфакчаси ҳосил бўлганидан сўнг унга ташқаридан иссиқлик узатилиши натижасида унинг радиуси ортиб боради ва маълум вақтдан сўнг девордан ажралиб сув ҳажмида сузиб, юқорига чиқиб ёрилади.

Сув тўлдирилган идишнинг иссиқлик узатиладиган сиртидаги микроёриқлар ва ғадир-будурлар газ пуфак-чаларининг пайдо бўлиш марказлари ҳисобланади. Ис-сиқ сиртда пайдо бўлган газ пуфакчалари иссиқлик таъсири ҳисобига тезда катталашиб сиртдан узилади, суюқлик бўйлаб юқорига кўтарилади ва иссиқлик ал-машинуви ни жадаллаштиради. Сиртдан ажралмасдан қолган газ пуфакчалари, ўз навбатида, янги пуфакча-ларнинг ҳосил бўлишида манба ҳисобланади.

Иссиқ сиртга бериладиган иссиқлик миқдори ортиб борганида газ пуфакчаларининг ҳосил бўлиши жадал-лашади ва маълум температурада суюқлик ва иссиқ сирт ўртасида буғ парда пайдо бўлади. Шундай ҳолат ўринли бўлганда иссиқ сирт билан суюқлик ўртасида буғ пуфакчалари орқали иссиқлик алмашинуви ва буғ ҳосил бўлиши жадаллашади. Лекин, буғ пуфакчалари-нинг иссиқлик ўтказувчанлиги ёмон бўлганлигидан буғ пардаси иссиқлик алмашинуви га тўсқинлик қилади. Ис-сиқ сирт температураси жуда кўтарилиб (1000°C) кети-ши оқибатида аппаратлар ишдан чиқиши мумкин. Шу-нинг учун буғ парда ҳосил бўлишига йўл қўйилмайди. Бундай ҳолатда, у қозонга келтириладиган иссиқлик миқдорини кескин камайтириш зарур бўлади. Бу эса қозон агрегатига зўр келади. Шунинг учун буғ пуфак-чали қайнаш жараёни ўринли бўлишини таъминлаш мақ-садида, махсус тажрибада аниқланган эмпирик форму-

лалардан фойдаланиб, иссиқлик узатиш коэффициентини α ҳисобланади.

Масалан, сув буғининг босими 0,1—0,3 МПа оралиғида бўлганда иссиқлик узатиш коэффициентини

$$\alpha = 0,38q^{1/4} p^{1/3}, \quad (242)$$

деб қабул қилиш мумкин.

Сув буғидаги q иссиқлик миқдори бошқа муҳитга узатилганда (ўтказилганида) у совийди, натижада конденсация ҳодисаси (буғнинг сувга айланиши) устувор бўлади. Бу ҳолат сув буғининг температурасига нисбатан иссиқлик алмаштиргич сирти температураси кичик бўлганда ($T_{т.б} > T_{и.б}$) содир бўлади. Конденсация икки хил — томчисимон ва пардасимон бўлади. Симоб буғи ёки идиш деворини ҳўлламайдиган суюқликларда томчисимон конденсация кузатилади. Идиш деворини ҳўллайдиган суюқликларда пардасимон конденсация ўринли бўлади. Пардасимон конденсация ҳаётда ва техникада кўпроқ учрайди.

Иссиқлик алмаштиргич сиртидаги температура $T_{и.б}$ тўйинган буғ температурасига тенг. Конденсацияловчи сирт температураси қанча паст бўлса, конденсатнинг ҳосил бўлиши жадаллашади.

Сув буғининг суюқликка айланиш жараёнидаги иссиқлик алмашинувида иссиқлик узатиш коэффициентини $\alpha = 5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ атрофида бўлади. Идиш деворининг юқорисидан пастки қисми томон конденсат (ҳосил бўлган сув) қалинлиги ортиб боради. Аммо пардасимон конденсация ўринли бўлганда идиш деворининг юқори қисмида иссиқлик узатилиши яхши бўлса, пастки қисмида ёмонлашади. Пардасимон қатламда иссиқлик алмашинуви жадаллашиш ўрнига секин-аста сусаяди, чунки парда қалинлашиб боради.

Конденсатнинг ламинар оқиб тушиш жараёнидаги маҳаллий иссиқлик узатиш коэффициентини В. Нуссельт конвектив иссиқлик алмашинуви учун қуйидагича ифодалаган:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{r \rho q^{2/3}}{4\mu(T_{т.б.} - T_{г.б})x}}, \quad (243)$$

бунда r — буғ ҳосил бўлиш иссиқлиги, кЖ/кг; μ — молекуляр масса; λ — иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти; ρ — конденсат зичлиги; x — девор баландлиги; $T_{т.б.}$ тўйинган буғ температураси; $T_{г.б.}$ — девор температураси, g — конденсат сарфи.

Юқорида таъкидлаганимиздек, конденсат қалинлиги юқоридан пастга томон ортиб боради ва иссиқликнинг узатилиши камаяди. Бундай боғланишларни тик девор учун қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{H} \int_0^H \alpha dx = 0,943 \sqrt[4]{\frac{r^2 g \rho^3}{\mu (T_{т.б.} - T_g) H}} \quad (214)$$

бунда α — иссиқлик узатиш коэффициентининг ўртача қиймати; H — девор баландлиги; dx — элементар баландлик. Бу тенглик горизонтал жойлашган d диаметрли қувур учун қуйидагича ифодаланади:

$$\bar{\alpha} = 0,728 \sqrt[4]{\frac{r^2 g \rho^3}{\mu (T_{т.б.} - T_g) d}} \cdot \varepsilon_T, \quad (245)$$

бунда

$$\varepsilon_T = \left[\left(\frac{\lambda_g}{\lambda} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right) \right]^{1/8} \text{ — тузиш коэффициенти.}$$

7.11. Буғ қозонининг иссиқлик баланси ва ФИК

Буғ қозонига бериладиган иссиқлик миқдори сарфланганига тенг, яъни $q_{кел} = q_{сарф}$ бўлиши керак. Иссиқлик баланси тенгламаси, одатда 1 м³ суюқлик ёки газ, 1 кг қаттиқ ёқилғининг мўътадил (нормал) шаронда (273,15 К; 0,1030 МПа) ёнган ҳолати учун тузилади. Бунинг учун узатиладиган ихтиёриймиздаги иссиқлик $q_{и.и}$ тушунчасидан фойдаланилади. Иссиқлик балансининг келтирилган (кирим берилган) қисми дейилганда ҳам $q_{и.и}$ тушунилади.

Демак, келтирилган иссиқлик миқдори қуйидагилар йиғиндисидан ташкил топади:

$$q_{кел} = q_{и.и} = q_k^s + q_{ф.и} + q_{с.х} + q_{б.и}, \quad (246)$$

бунда q_k^s — ёқилғининг қуйи ёниш иссиқлиги; $q_{ф.и}$ — ёқилғининг физик иссиқлиги; $q_{с.х}$ — ҳаво иситкичга ва тирқишлардан ўтхонага сўрилган совуқ ҳаво иссиқлиги; $q_{б.и}$ — буғ иссиқлиги.

Маълумки, бу иссиқлик миқдорларининг ҳар бирини соддалаштирилган ҳолда ифодалаш мумкин, яъни:

$$q_{ф.и} = C_{\varepsilon} T_{\varepsilon}; \quad q_{с.х} = \alpha_{о.х} V_{и} C_{\varepsilon} \cdot T_{с.х}; \quad (247)$$

$$q_{б.и} = g_{б.и} (i_6 - 2750),$$

бунда C_{ε} ва C_{ε} — ёқилғи ва ҳавонинг солиштирма иссиқлик сифимлари; T_{ε} ва $T_{с.х}$ — ёқилғи ва совуқ ҳаво-

нинг абсолют температуралари; $V_{и}$ — 1 кг ёки 1 м³ ёқилғининг ёниши учун зарур бўлган ҳавонинг назарий ҳисобланган ҳажми; $\alpha_{г.х}$ — ортиқча ҳаво коэффиценти; $g_{б.с}$ — пуфланадиган буғнинг солиштира сарфи (масалан, ўтхонада мазут ёқилганда 1 кг мазутга 0,3 кг буғ пуркалади); i_6 — сув буғининг энтальпияси, кЖ/кг; 2750 кЖ/кг — чиқиб кетаётган аниқ температурали ($T=400-410$ К) газлар таркибидаги сув буғининг энтальпияси.

Юқорида келтирилган тенгламадаги $q_{и.и}^с$ ва $q_{и.и}$ — иссиқлик миқдорларида ёқилғининг ёниши жараёнида сув буғининг конденсацияланишида ажраладиган иссиқлик эътиборга олинмаган. Келтирилган баланс тенгламасида ҳавонинг келтирилган иссиқлик миқдори ҳам ҳисобга олинмаганлигига асосий сабаб атмосферага чиқарилиши зарур бўлган иссиқликни ҳаво қайтариб ўтхонага узатади, деб фараз қилинади.

Баланс тенгламасидаги $q_{ф.и} + q_{с.х} + q_{г.и}$ йиғинди $q_{и.и}^с$ га нисбатан жуда кичик бўлганлиги сабабли уларни айрим тақрибий ҳисоблашларда эътиборга олинмаса ҳам бўлади. Унда (216) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$q_{кел} = q_{и.и} \cong q_{и.и}^с.$$

Қозон агрегатидида сувни иситишга, буғланишга ва буғнинг ўта қиздирилиши учун зарур бўлган иссиқлик фойдаланилган иссиқлик миқдори q_1 , қолган иссиқлик миқдорлари ($q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = q_{исф}$) исроф бўлган иссиқлик миқдори бўлади. Демак, $q_1 + q_{исф} = q_{арф}$, бунда q_2 — тутун газлари олиб чиқадиган иссиқлик миқдори;

q_3 — ёқилғининг тўла ёнмаслигилан юзага келадиган исроф;

q_4 — механик жиҳатдан тўла ёнмасликка олиб келадиган исроф;

q_5 — тутуннинг конвектив йўлларидаги исрофи;

q_6 — қозон агрегатидан ташқарига чиқариладиган шлак иссиқлиги ҳисобига бўладиган исроф.

Демак, қозоннинг иссиқлик баланси тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$q_{и.и}^к = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (248)$$

Қозонга келтирилган тўла иссиқликни 100% деб олинса,

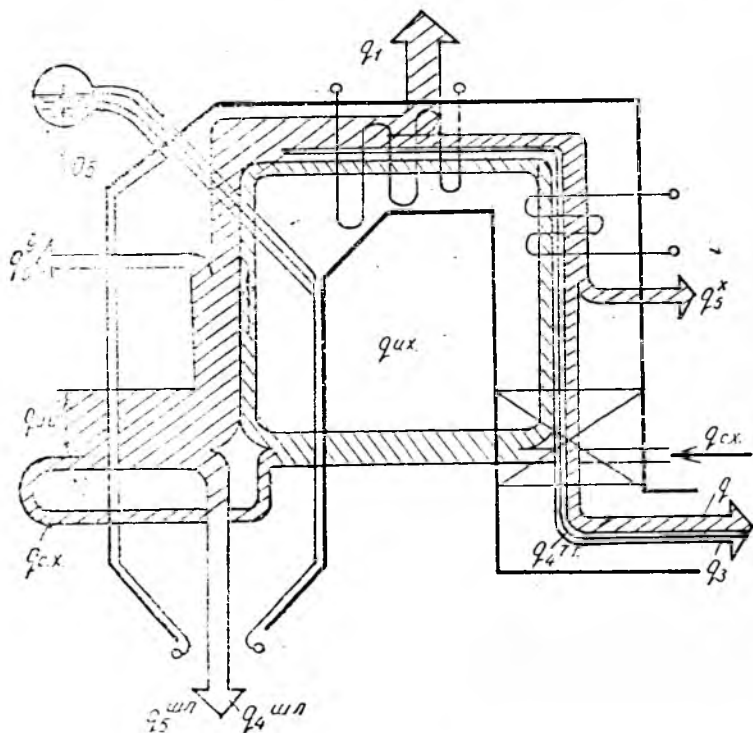
у ҳақида баъзи тенгламасини қуриштириш имконияти мумкин.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 100\%. \quad (249)$$

Бу қозондаги иссиқлик балансини схематик усулда тасвирлаш мумкин (49-расм).

Схематик тасвирдан маълумки, $q_{н.х}$ — иссиқ ҳаво оқимидаги иссиқлик миқдори ёниш маҳсулидан олинadиган, ёниқ контур бўйича ҳаракатланadиган иссиқлик энергиясидир. Албатта, бу иссиқлик тутун газларидан олиниб яна ўтхонага ҳаво орқали қайтади. Бу қозон агрегатининг ўзига сарф бўладиган иссиқлик миқдорини ҳисобга олмасдан ҳисобланган ФИК қозонининг брутто ФИК дейилади.

$$\eta_{i,6} = \frac{q_1 \cdot 100}{q_{н.и}} = Q_1 \quad (250)$$



49-расм. Бу қозонининг иссиқлик баланси.

$$\epsilon_{\kappa, \delta} = 100 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6), \quad (251)$$

бунда q_1 — қозон агрегатидagi сув ва буғнинг қабул қилган иссиқлиги (узлуксиз пуфлаш усули қўлланилган ҳолат учун). Агарда, баримбанди бугнинг бир қисми истеъмолчига узатилади, у такроран иккинчи марта ўта қиздирилса, q_1 ни қуйидаги ифодадан аниқлаш мумкин:

$$q_1 = \frac{1}{B} [D(i_{\text{у.к.б}} - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{и.с}}(i' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{т.б}}(i'' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{и.у.к.б}}(i''_{\text{и.б.ч}} - i'_{\text{и.б.к}})], \quad (252)$$

бунда D — қозон агрегатининг иш унуми; $D_{\text{и.с.}}$, $D_{\text{т.б.}}$ ва $D_{\text{и.у.к.б.}}$ — пуфлашга ишлатиладиган сув, тўйинган буғ ва иккиламчи ўта қиздирилган буғ сарфлари; $i_{\text{у.к.б.}}$ ва i'' , $i_{\text{т.с.}}$, i' — ўта қиздирилган ва тўйинган буғ, таъминлаш ҳамда қозон сузининг энтальпияси; $i_{\text{и.б.к}}$ — иккиламчи буғнинг киришдаги энтальпияси; i' ва i'' — тўйинган буғ ва қозон сувининг энтальпияси $i''_{\text{и.б.ч}}$ — иккиламчи буғнинг чиқишидаги ва i — иккиламчи буғнинг кириш қисмларидаги энтальпиялари; B — ёқилги сарфи, у қуйидагича аниқланади:

$$B = \frac{D(i_{\text{у.к.б}} - i_{\text{и.б.к}}) + D_{\text{и.с}}(i' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{т.б}}(i'' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{и.у.к.б}}(i''_{\text{и.б.ч}} - i'_{\text{и.б.к}})}{\frac{q_{\text{и.и}} \cdot \eta_{\text{к.б}}}{(i''_{\text{и.б.с}} - i_{\text{и.б.к}})}}, \quad (253)$$

Қозоннинг ФИК (250) баланс тенгламаси натижалари асосида ҳисобланади. Қозон агрегатининг лойиҳадаги ФИК тенглама (251) дан топилади. Бу ҳисоблашларда, албатта q_1 синаладиган лойиҳадаги қозон агрегати учун шунга ўхшашларида аниқланган натижалардан олинади.

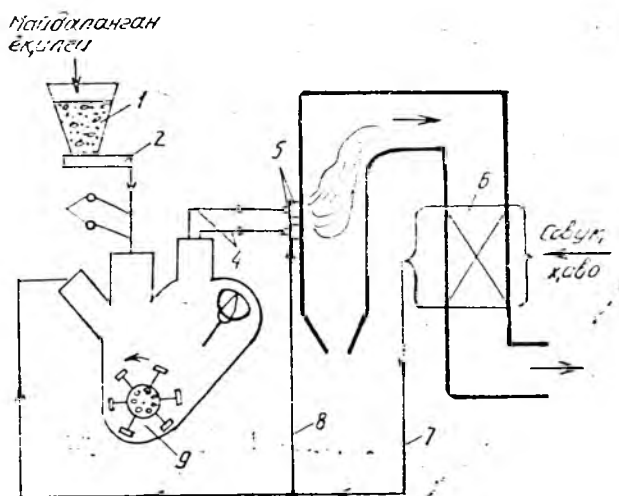
Замонавий қозон агрегатларининг ФИК 90—95% атрофида бўлиб, улар саноатнинг турли соҳаларини буғ ва сув билан таъминлайди ҳамда буғ турбинаси билан ҳамкорликда электр энергияси ишлаб чиқаради.

7.12. Қозон қурилмаларининг ёрдамчи ускуналари

Бу ускуналарга қаттиқ ёқилгини чангсимон ҳолатга келтириб, уни ўтхонага узатувчи қурилма, сўриш-пуфлаш қурилмаси, тутун газларини зарарли моддалар (CO_2 , CO , кул зарралари) дан тозалайдиган қурилмалар (ЦН циклон, батареяли кул туткич, марказдан қочма ВТИ скрубери, электр филтрлар) ва қозон қурилмасини автоматик бошқариш ва назорат қилиш ас-

Боб усуқуналари киради. Қаттиқ ёқилғини чаңсимон ҳолатга келтириб ёқиндан асосий мақсад ёқилғининг тўла ёнишини, уни ўтхонага осон узатилишини ҳамда узатиш миқдориини турғун сақлашни таъминлашдан иборат бўлибгина қолмасдан, оғир ишларнинг асосий қисми механизацияланади ва автоматлашади. Тайёрланган чаңсимон ёқилғи тегирмондан тўғри ўтхонанинг горелкасига пуфлаш йўли билан узатилиши мумкин (50-расм). Чаңсимон ёқилғи тайёрловчи қурилма ҳўл кўмир бункери 1, кўмир узаткич 2, очилиб-ёпилиб турувчи тескари клапанлар 3, чаңсимон ёқилғи трубаси 4, горелка 5, ҳаво иситкич 6, иссиқ ҳаво трубаси 7, иккиламчи иссиқ ҳаво трубаси 8 ва инерцияли ажратгичли болғаси бор тегирмон 9 дан ташкил топган. Чаңсимон ёқилғи зарраларининг ўлчами 40 мкм (микрон) атрофида бўлиб, ҳаво билан таъсирлашувчи ёқилғи сиртининг умумий юзаси майдаланмаганига нисбатан тахминан 500 марта катта. Бу эса ёқилғининг тўла ёнишига самарали таъсир кўрсатади ва қозон қурилмасининг тежамли ишлашини таъминлайди.

Ўтхонада ёқилғининг ёнишдан ҳосил бўлган ёниш маҳсулларини атмосферага ва қурилмадан ташқарига чиқаришда ҳамда ҳавони горелкага узлуқсиз бир текис узатиб туришда сўриш-пуфлаш усулидан фойдаланила-



50-расм. Чаңсимон ёқилғи тайёрловчи ва уни пуфлаш усули билан узатувчи қурилма схемаси.

ди. Ҳуруф ва ёқиларча сўзлаб беришда ва тўқунли атмосферага чиқаришда марказдан қочма вентиляторлар қўлланилади. Сўриш-чуфлаш машиналари мустаҳкам қилиб ишланади, чунки улар узоқ муддат давомида юқори температурани (580—120 К) муҳитда ва зарарли газлар аралашмасида ишлайди.

Сўриб чиқариш қурилмалари айрим ҳолларда билан мўриллар билан алмаштирилади.

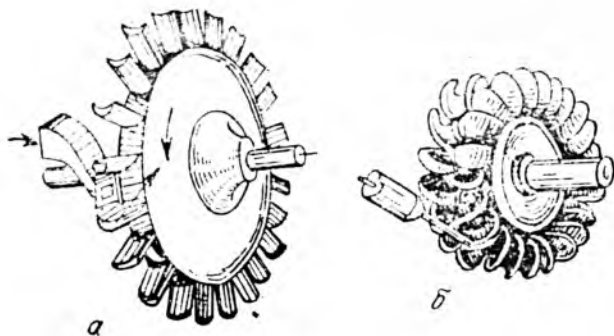
Қозон қурилмалари атроф-муҳитга ортиқча миқдорда зарарли тутун газлари ва кулли чиқармаслиги учун улар махсус ёрдамчи қурилмалар билан жиҳозланади. Ёқилғининг таркибий қисми ўта мураккаб бўлганлигидан уни мутлақо тўла ёқиб бўлмайди. Натижада тутун газлари билан атмосферага заҳарли маргимуш (As), фторли бирикмалар, ванадий бирикмалари, азот оксиди, олтингугурт оксиди, карбонат ангидриди ва кул зарралари чиқарилади. Бу зарарли газлар инсоният ва тирик организмга, ўсимликлар, ҳайвонот оламига, санъат обидаларига салбий таъсир кўрсатади.

Ҳар йили жаҳонда органик ёқилғиларнинг ёқилишидан атмосферага ўртача 100 млн. т кул ва 150 млн. т. карбонат ангидрид газини чиқарилади. Масалан, майда антрацит ёқиладиган қуввати 950 т/соат бўлган буғ генератори мўрисидан бир кечаю кундузда 60 тоннагача азот оксиди атмосферага чиқарилади. Шунинг учун қозон қурилмаларининг мўътадил ишлашини таъминлаш мақсадида электрон ҳисоблаш машиналаридан фойдаланилади. Автоматик системаларнинг иши ва қозон қурилмасининг ҳамма параметрлари ЭҲМ ёрдамида назорат қилиб борилади. Чунки горелкадаги аланганинг ўчиб қолиши оқибатида озгина вақтдан сўнг йиғилиб қолган ёқилғининг бирдан ёнишидан авария юз бериши ёки кўпгина асбоб-ускуналар ишдан чиқиши мумкин. Таъминловчи сув етарли бўлмаса экран трубалари деформацияланиши, ҳимоя клапанлари ишламай қолса барабақ ёрилиши ва ш. к. ҳолатлар содир бўлиши мумкин.

VIII б о б. БУҒ ТУРБИНАСИ

8.1. Буғ турбинасининг таснифи, тузилиши, ишлаш тартиби ва унда кечадиган термодинамик жараёнлар

Буғнинг иссиқлик энергиясини босқичма-босқич механик энергияга айлантириб берувчи иссиқлик машина-



51-расм. Куракли (а) ва ковшли (б) буғ турбиналари.

си буғ турбинаси дейилади. Ҳосил қилинган энергия бошқа турдаги энергияга ёки механик энергияга (ишга) айлантирилади.

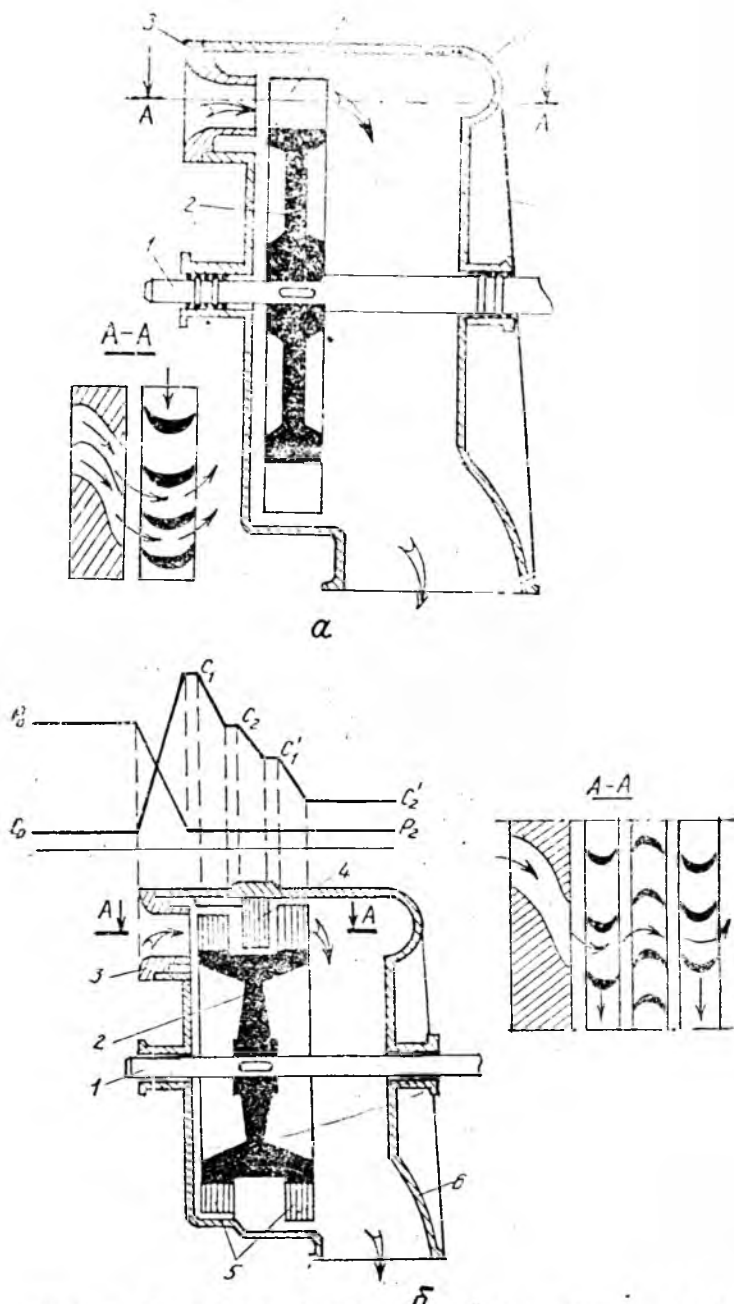
Италиялик олим Д. Бранка буғ турбинаси моделига хос бўлган буғ ғилдирагини 1629 йилда яратган, унда буғ оқимининг кинетик энергияси уйғотган импульс куракли ғилдиракни айлантиришга сарфланган.

Эраминдан олдинги даврда, Герон Александрийский томонидан буғнинг реакция кучи ҳисобига айланадиган шар шаклидаги асбоб яратилган. У «Герон шар» деб юритилади. Бранка ғилдираги ва Герон шар ҳеч қаерда қўлланилмаса-да, улар буғ энергиясини механик энергияга айлантириш мумкинлигини исботлаб берганлар.

Кейинчалик буғ энергиясини механик энергияга айлантириш бўйича кўпгина олим ва ихтирочилар иш олиб бордилар. Масалан, инглиз ихтирочиси Жеймс Уатт 1774 й. ишга яроқли буғ машинасини яратди. Ундан олдинроқ 1766 й. буғ машинасининг қисмларини И. И. Ползунов ясаган эди.

Сув буғининг кинетик энергиясини механик энергияга айлантириш мумкинлигини швед муҳандиси Г. П. де-Лаваль 1888 й. (биринчи буғ турбинаси) исботлади (53-расм, а). Шундай қилиб, буғ турбинаси яратилгандан сўнг, уни такомиллаштириш тадқиқотлари ривож топди. Натижада бир, икки, уч ва кўп босқичли буғ турбиналари яратилди (52-расм).

Буғнинг потенциал энергиясини (Бранка ва де-Лаваль услубига асосан) механик энергияга айлантирувчи буғ турбинаси актив турбина дейилади. Буғ-



53-расм. Актив буғ турбиналарининг схематик тасвири: *а* — бир босқичли де-Лаваль турбинаси; *б* — икки босқичли турбина.

ростланмай, нисан) ва таррашга қўйиб турбинуларнинг актив ва реактив муҳитига қўяди.

Конденсация турбиналаридаги босқичларнинг босими 1 атм (атмосфера) боғлиқ бўлишига қарамай, конденсаторда турлиқ сувга айланади. Конденсация нуктида чиқариладиган иссиқлик муқдори иссиқлик ағирлашувчи усули билан системадан чиқаришга турлиқ чиқарилади, яъни бониқа муҳитга узатилади.

Иссиқлик алмашишнинг асбоблари сифатида регенерация усулида ишлайдиган аниаратлар қўлланилади, яъни қозонга узатиладиган соғуқ сув турбинада ишлатиб бўлишдан буг билан ишатилади.

Босимни ростланадиган конденсация буг турбиналарига йўналтириладиган бугнинг маълум қисми турбина саноат маркасларига ва аҳоли яшайдиган жойларга юборилади.

Қарши босимли буг турбиналарида эса ишлатилиб бўлган бугнинг қолдиқ иссиқлигидан ишлаб чиқаришда ва иситиш тармоқларида ишлатилади.

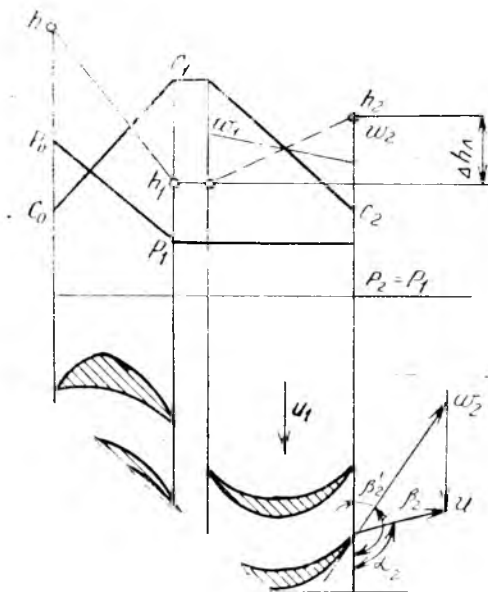
Буг турбиналари бир, икки ва кўп босқичли ҳамда мос равишда паст, ўртача ва юқори босимли бўлади.

Буг турбинаси, бугни ҳалқасимон киритишли камера 1, енгиллаштириш поршени 2, бирлаштирувчи буг труба 3, ротор барабани 4, иш кураклари 5 ва 8, йўналтирувчи кураклар 6 ва 9, тана 7 дан ташкил топган (52-расм). Буг турбинаси компрессорга нисбатан тескари жараёшли иссиқлик машинаси бўлиб, стационар (иссиқлик электр станцияларида) ва кўчма (кемаларда) ҳолида ишлатилади. Шунингдек, буг турбинаси катта қувватдаги марказдан қочма ҳаво ҳайдагичлар, компрессорлар ва насосларни ишлатишда асосий куч манбаи ҳисобланади. 53-расмда бир босқичли де-Лаваль ҳамда икки тезлик босқичли актив буг турбиналарининг схематик тасвири келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, актив буг турбинаси вал 1, кураклар 5, маҳкамланадиган диск 2, бугининг кириш канали ҳисобланган сопло 3, турбина танаси 6 ва босқичли турбиналарда эса қўшимча йўналтирувчи кураклар 4 дан ташкил топган. Иш бажарувчи куракларда иссиқликнинг пасайиши Δi_k ни маълум тезликка мос келувчи имконияти бўлган иссиқликнинг пасайиши Δi_n га нисбати билан ўлчанадиган катталиқ буг турбинаси босқичининг асосий тавсифи бўлиб ҳисобланади ва у *босқич реактивлиги* дейилади:

$$\Omega = \frac{\Delta i_{\text{г}}}{\Delta i_{\text{т}}}, \quad (254)$$

Агар $\Omega=0$ бўлса, имконияти бўлган иссиқлик пасайи-
шининг ҳаммаси, яъни босимнинг ўзгариши, сопло-
да тезлик босими (C_2-C_1) га айланади. Бундай жара-
ён актив буғ турбинаси куракларида содир бўлади. Буғ
оқими турбина бўшлиғидан босқичма-босқич оқиб ўти-
шида унинг тезлиги, босими, температураси ўзгаради
(54-расм). Агар $\Omega=1$ бўлса, унда имконияти бўлган
иссиқликнинг пасайиши фақат турбина куракларида юз
беради. Бундай жараён ўрнили бўлганда турбина ре-
актив дейилади.

Одатда, реактив турбиналарни қуриш анча мурак-
каб. Шунинг учун комбинациялаштирилган турбиналар
қурилади. Де-Лаваль томонидан яратилган турбина ҳам
битта актив босқичдан иборат бўлган.



Турбинанинг актив босқичида буг бирданига бир ё бир неча сопо 3 га йўналтирилади. Сопода буг узининг тезлигини маълум даражада орттирганидан кейин иш кураклари 5 га бориб урилади ва ўз импульсини беради. Иш бажариб бўлган буг чиқариш трубаesi орқали чиқарилади. Турбина танаси 6 ичидаги вал 1 га куракли ротор 2 ўрнатилган. Бугнинг ташқарига чиқиб кетишидан сақлаш мақсадида куракли ротор махсус лабиринт валининг боши ва охирига ўрнатилган. Де-Лаваль турбинасида, буг битта босинида ишлаганлиги сабабли, унинг тезлиги кураклардан чиқишда ортади. Масалан, киришдаги босими 1 МПа, температураси 780 К бўлган буғнинг ишлаши натижасида унинг босими 10 кПа га тушади. Бунда иссиқлик 980 кЖ/кг гача пасаяди. Бу турбина куракларидан буг зарраларининг 1400 м/с тезликда учиб чиқишига тўғри келади.

Демак, турбина ротори дискининг гардишидаги тезлиги 700 м/с бўлиши талаб этилади. Чунки гардишдаги айланма тезлик бугнинг оқиб чиқиш тезлигининг ярмига тенг бўлганда турбина юқори ФИК эга бўлади. Лекин турбина деталлари бундай тезликка бардош бера олмайди. Тақрибан 300 м/с атрофидаги тезлик турбина учун зўриқиниларни унча уйғотмайди. Шу сабабли асосан актив турбина ўз даврида кўпроқ қўлланилган, чунки актив турбина куракларига иш буғи йўналтирилгунга қадар, унинг кенгайиши ҳисобига температураси анча пасаяди. Албатта, актив турбина кураклари сонини орттириш ва йўналтирувчи куракларни қўллаш йўли билан унинг ФИК ни кўтариш мумкин.

Замонавий, кўп босқичли буг турбиналарининг биричи босқичида икки чамбаракли Кертис дискдан фойдаланилади. Икки чамбаракли Кертис дискининг ўрта қисми очиқ бўлиб, уш турбина танасида (статор) жойлашган йўналтирувчи кураклар тўлдирди ва буғни куракларга буриб йўналтириб узатиш вазифасини бажаради. Бундай усул қўлланилганда турбинанинг ФИК ортади.

Актив турбиналар босим босқичли, тезлик босқичли ҳамда аралаш (ҳам босим ва ҳам тезлик) босқичли турларга бўлиниди. Босқичлар оралиги диафрагма билан ажратилган. Иш кураклари ўрнатилган диск ягона умумий валга маҳкамланган.

Буг турбиналарининг ҳаммасига ҳам босим остидаги юқори температурали буг сопо орқали киритилади.

Қўидаданг кесими S бўлган сопога киришидаги буғ босими P_1 бўлса, ундан (сопо, турбина кураклари) ўтаётганда ҳажмининг кенгайиши ҳисобига буғ зарраларининг тезлиги ортади ва босими P_2 гача тушади. Буғ зарраларининг бошланғич тезлигини C_0 , охириги босим P_2 га мос келувчи тезлигини C_1 деб қабул қилинади. Буғнинг сопо ва кураклардан ўтиш давридаги кенгайиш жараёнини адиабатик жараён деб қараш мумкин. Чунки буғ узатувчи труба ва турбина куракларига ташқаридан иссиқлик миқдори узатилмайдиган ҳамда труба деворларидан ташқарига чиқариладиган иссиқлик ҳисобга олинмайдиган даражада кичик бўлади. Шунинг учун $dq=0$ деб олиш мумкин.

Маълумки, адиабатик жараён тенгламаси:

$$PV^\kappa = \text{const},$$

бунда κ — адиабата қарсаткичи бўлиб, унинг қиймати турли хил ҳолатлардаги газ ва буғлар учун ўзгаради. Масалан, мўстадил температурадаги газ учун $\kappa=1,4$; ўта қиздирилган, тўйинган қуруқ ва тўйинган нам буғлар учун мос равишда $\kappa=1,3$; $\kappa=1,135$ ва $\kappa=1,035$ — $0,1 \times$ бўлади (x — буғнинг қуруқлик даражаси).

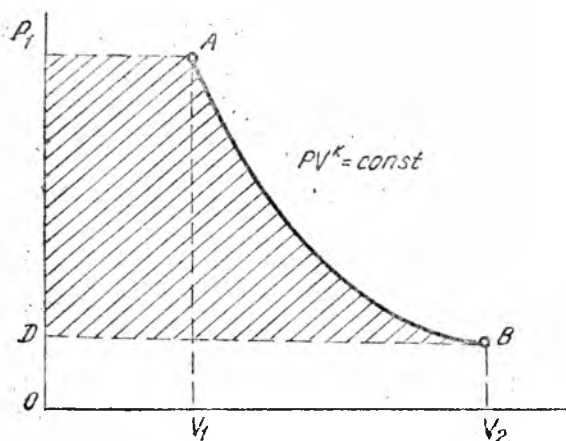
Буғнинг адиабатик кенгайиши PV диаграммдан қўриниб турибди, буғ кенгайиши жараёнида унинг ҳажми V_1 дан V_2 гача ва босими P_1 дан P_2 гача ўзгарибгина қолмасдан, мос равишда унинг температураси, энтропияси ҳам ўзгаради (55-расм).

Демак, буғнинг бундай кенгайишида унинг термодинамик параметрлари ўзгарувчан бўлганлигидан у иш бажаради. 1 кг буғнинг эгаллаган $P_1 AB V_2 OP_1$ юзаси босимнинг потенциал энергияси бўлиб, сои қиймати жиҳатидан буғнинг кинетик энергиясига тенг. Чунки буғ соплодан кейин турбина куракларидан оқиб чиқиши жараёнида тезлигини бирор C_0 дан C_1 гача ўзгартиради. Бу кинетик энергиянинг ўзгаришини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{C_1^2}{2g} - \frac{C_0^2}{2g} = S_1, \text{ яъни } S_1 = P_1 AB V_2 OP_1. \quad (255)$$

Буғнинг адиабатик кенгайишида бажарган иши ABV_2V_1A юза S_2 га сои қиймати жиҳатидан тенглиги асосида адиабатик жараён тенгламаларидан фойдаланиб тенглама (255)ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$S_1 = \frac{1}{\kappa - 1} (P_1 V_1 - P_2 V_2). \quad (256)$$



55-расм. Буғиниң оқиб чиқиш жарёни PV диаграм-
масы.

Буғиниң соғлаға оқиб кириш тезлиги анча кичиклигини, яъни $C_0=0$ эканлигини эътиборға олсак, у ҳолда

$$\frac{C_1^2}{2g} = P_1 V_1 + \frac{1}{\kappa-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) - P_2 V_2. \quad (257)$$

Чунки

$S = P_1 A B D P_1$; $S_1 = P_1 \cdot V_1 \cdot \eta_1$; $S_2 = A B V_1 P_2$; $S_3 = P_2 B V_2$ P бўлганлиги асосида юзалариниң алгебранк йиғиндисин қуйидагича ифода қилади:

$$S = S_1 + S_2 - S_3. \quad (258)$$

Демак,

$$S_1 = P_1 V_1; S_2 = \frac{1}{\kappa-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2); S_3 = P_2 V_2.$$

Юқорида келтирилган тенгламани соддалаштириб ҳо-
сил қиламиз:

$$\frac{C_1^2}{2g} = \frac{P}{\kappa-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2). \quad (259)$$

Адиабатик жарайёдан маълумки, ҳажмлар нисбатлари-
га оид қуйидаги тенгламадан:

$$P_1 V_1^\kappa = P_2 V_2^\kappa, \text{ ёки } \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

фойдаланиб жараёнда қатнашаётган буғнинг кенгайишидаги кинетик энергиясини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{C_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (260)$$

Охириги тенглик (260) дан буғ заррасининг учиб чиқиш тезлигини топамиз:

$$C_1 = \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (261)$$

Буғ турбинасининг маълум вақт давомида сарфлаган буғ миқдори ишлатилиб бўлинган буғнинг солиштирма оғирлигига, буғ оқиб чиқадиغان қувур кесимининг юзасига ва буғ оқими тезлигига боғлиқ:

$$G = S_{12} C_1 = S \frac{C_1}{V_2}. \quad (262)$$

Сарф тенгламасига V_2 ва C_1 қийматларини қўйиб, уни соддалаштириб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$G = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{V_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (263)$$

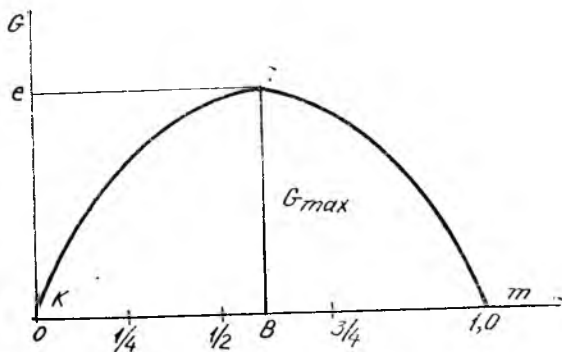
Сарф тенгламасига V_2 ва C_1 қийматларини қўйиб, мумкин: агар $P_2/P_1 > 1$ шарт бажарилса, у ҳолда ташқи босим P_2 ички босим P_1 дан катта бўлади, яъни буғ оқиб чиқмайди; агар $P_2/P_1 = 1$ бўлса, у ҳолда $G=0$ бўлади ва нисбат P_2/P_1 нинг камайиши билан G ортиб боради; агарда $P_2/P_1 = 0$, яъни $P_2 = 0$ бўлса, у ҳолда турбинадан ташқарида абсолют бўшлиқ ҳосил бўлиши мумкин. Демак, сарф $G=0$ бўлади. Лекин, маънавий таҳлил қилинса, бундай бўлиш эҳтимоллиги йўқ. Чунки турбинадан ташқаридаги босим йўқ даражада бўлганда, буғ албатта жуда катта тезликда оқиб чиқиши керак. Аммо назарий жиҳатдан қаралса, буғ ташқарига оқиб чиқа олмасдан унинг сарфи нолга яқинлашади. Бундай бўлиши учун ташқи босим турбинада иш бажараётган буғ босимидан катта бўлиши керак. Амалий тажриба натижалари шуни кўрсатадики, маълум шартлар бажарилганда, яъни $P_2/P_1 = 1$ ва $P_2/P_1 = 0$ бўлганда, сарф нолга тенг бўлган қийматлар қабул қилинади. Лекин, бу нолга тенг қийматлар оралиғида, албатта ҳеч бўлмаганида,

битта энг катта қийматни қабул қилиши керак (56-расм). Келтирилган график шаклидаги тасвир P_2/P_1 нисбатга асосланган сарфнинг ўзгариш қонунияти бўлиб, у тўнкарилган қозон кесими шаклида бўлади. Тасвирдан кўриниб турибдики, P_2/P_1 нисбат қиймати яримга тенг бўлганда сарф энг юқори бўлар экан. Лекин, графикнинг mk қисми тажрибада тасдиқланса-да, OK бўлагини ўз исботини топмаган. Бу зиддиятни аниқлаш учун Вансел ва Сен-Венан томонидан гипотеза таклиф этилган: чиқиш кесимидаги газ ёки буғ босими ҳамма вақт ҳам ташқи муҳит босимига тенг бўла олмайди. Демак, турбина соплосининг чиқиш қисмидаги P_2 босим маълум қийматларгача ташқи муҳит босимига тенг бўлса-да, ташқи муҳит босим пасайганида P_2 нинг қиймати ҳам пасайиб боради. Чунки буғнинг оқиб чиқиш тезлиги ортиб кетади (mk нуқталар оралиғи) ва маълум критик қийматга эришади. Лекин, ташқи муҳит босимини яна ҳам пасайтириб борганимизда, график юқорига қараб ўсмайди, яъни P_2 ортмайди ва OK чизиги бўйлаб ўзгармасдан қолади. Натижада $G = \text{const}$ бўлади.

Критик ҳолат (k нуқта) учун сарф тенгламасини $P_2 = P^*$ бўлганлиги учун қуйидагича ёза оламиз:

$$G = S \sqrt{2 \varepsilon \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_K}{V_1} \left(\frac{P_K}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} - \left(\frac{P_K}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (264)$$

Радикал остидаги ўзгарувчи қиймат (катта қавс ичидаги) юқори бўлгандагина буғ сарфи энг катта қийматга эришади. Радикал остидаги ўзгарувчидан биринчи да-



56-расм. Буғ сарфининг тезликлар нисбатига боғлиқлик графиги.

ражалли ҳосилла олиб ва унн ногга тенглаштириб сўнг-
ра тенглик ҳосил қилингандан кейин унинг ҳар иккала

13-жадвал

Бўғ ёки газ номи	k	P_k/P_1	α	β
Тўйинган қуруқ бўғ	1.135	0.577	3.23	1.990
Ута қиздирил- ган бўғ	1.30	0.546	3.33	2.090
Атмосфера ҳавоси	1.40	0.528	3.38	2.145

қисминин ҳам $(k+1) \cdot \left(\frac{P_k}{P_1}\right)^{\frac{1-k}{k}}$ га бўлиб ҳосил қиламиз:

$$\frac{2}{k-1} = \left(\frac{P_k}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Бандан

$$\frac{P_k}{P_1} = \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (265)$$

бўлади.

Бу тенглик критик ва бошлайиш босимлар нисбати-
нинг қиймати бўлиб, унга мос келувчи энг юқори сарф
 G ни ифода қилади. Демак, ташқи муҳитдаги босим P_2 бо-
сим P_k дан катта, яъни $P_2 > P_k$ бўлган ҳамма ҳолатлар-
да турбинанинг чиқариш кесимидаги газ ёки бўғ оқими-
нинг босими ташқи муҳит босимига тенг бўлади ва сарф
критик қийматга етмайди. Ақенича, яъни $P_2 < P_k$ бўл-
ганда, чиқариш кесимидаги газ ёки бўғ оқимининг бо-
сими ташқи муҳит босимига тенг бўлади ва оқим тез-
лигининг қиймати ортади ҳамда юқори сарф $G_{\max}$ таъ-
минланади.

Агарда, ҳисоблашларда критик тезлик C_k ни ва
сарфин аниқлаш зарур бўлса, юқорида келтирилган C_1
ни аниқлаш ифодаси (261) даги P_2/P_1 ўрнига P_k/P_1
қийматини охириги тенглик (265) дан олиб қўйилади ва
айрим алмаштириш ҳамда ўзгартиришлардан сўнг C_k
ва $G_{\max}$ ифодаси ҳосил қилинади:

$$C_k = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} P_1 V_1}$$

$$G_{\max} = S \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{P_1}{V_1}} \quad (266)$$

Бу тенгламаларни яна ҳам соддалаштириш учун айрим коэффициентлар билан радикал остидаги ўзгармас кўнайтувчилар алмаштирилиб улар нлдиз остидан чиқарилади:

$$C_2 = \alpha \sqrt{P_1 V_1}; \quad G_{\max} = S \cdot \beta \sqrt{\frac{P_1}{V_1}} \quad (267)$$

Буг ёки ҳаво учун критик ҳолатдаги коэффициентлар юқоридаги 13- жадвалда келтирилган. Жадвалдан кўри- ниб турибдики, P_k тақрибан бошланғич P_1 нинг ярмига тенг, яъни $P_k = P_1/2$.

8.2. Буг турбинасидаги исрофлар

Икки хил ички ва ташқи исрофлар бўлади. Ички исрофларга қуйидагиларни киритиш мумкин:

а) соплó ва иш кураклари деворларига буг оқими- нинг ишқаланиши, уюрмалар ҳосил бўлиши натижасида оқимнинг кинетик энергияси исрофи. Ишқаланишсиз оқимга нисбатан бу энергия жараён охирида иссиқлик энергиясига айланиб иш буғи энтальпиясини орттиради;

б) иш бажариб бўлган буғнинг оқиб чиқишида тез- ликнинг камайиши ҳисобига кинетик энергия исрофи;

в) иш кураклари ва турбина танасининг ички девор- лари ҳамда диафрагма ва вал оралиғидаги тирқишлар- дан иш буғининг оқиб ўтиши ҳисобига бўладиган ис- рофлар;

г) буғнинг намлиги ҳисобига, турбинанинг охириги босқичида сув томчилари куракларга урилиб роторнинг айланишига қаршиллик кўрсатиши натижасида пайдо бўладиган исрофлар.

Ташқи исрофларга қуйидагиларни киритиш мумкин:

а) турбина танасининг икки елкасида, яъни вал та- янадиган нуқталарида мавжуд бўлган тирқишлардан иш буғининг сирқиб чиқиши ҳисобига бўладиган исрофлар ташқарига сирқиб чиққан буг турбина кўрсаткичлари- га кучли салбий таъсир кўрсатмаса-да, буғнинг сарфи- ни орттиради;

б) турбина ротори елкаларидаги подшипниклардаги ишқаланишни енгишга ва ёрдамчи механизмларни юритишга сарфланадиган энергия ҳисобига бўладиган механик исрофлар.

8.3. Буг турбинасининг қуввати ва ФИК

Иссиқлик двигателларида буг турбинаси иши ҳам куракларда уйғотилган индикатор (ички) ва ротор ва-лида ҳосил бўлган эффектив қувватлар орқали ифода-ланади. Маълумки, турбинанинг эффектив қуввати $N_{\text{эф}}$ унинг индикатори N_1 қувватидан механик исрофлар қиймати катталигича кичик бўлади.

Индикатор (ички) қуввати эса исрофсиз ишлайдиган турбина қувватидан ички исрофлар қиймати каттали-гича кичик бўлади.

Буг турбинаси нисбий индикатор ФИК иш. унинг ички исрофлари ҳисобга олинганда, қуйидагича ифода-лаш мумкин:

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_{\text{и}}}. \quad (268)$$

Худди шунга ўхшаш механик исрофлар ҳам ҳисобга олинадиган механик, яъни турбина валидаги (эффек-тив) қувватин ички қувватга нисбати билан ўлчавади-ган. ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{N_{\text{эф}}}{N_1}. \quad (269)$$

Замонавий буг турбиналарининг η_i ва $\eta_{\text{мех}}$ мос ра-вишда 0,7—0,88 ва 0,99—0,995 атрофида бўлади.

Ҳозирги пайтда ишлаб чиқаришда электр, иссиқлик энергияларининг қўлланилиши кун сайин ортиб бормо-да. Чунки мукамаллашган технологик услубларсиз та-комиллашган саноат ишлаб чиқаришининг тасаввур этиш қийин.

Демак, буг турбиналарини қуриш ва уларнинг энг қулай конструкцияларини қуввати бўйича танлаш дол-зарб масалалардан бири бўлишига асосий сабаб, бу ис-сиқлик машиналарини ишлатиш осон, катта қувватлар-ни олиш мумкин ҳамда экологик жиҳатдан тоза ҳисоб-ланади. Замонавий буг турбиналарининг паст қувват-лиларини қуриш ҳар томонлама мақсадга мувофиқ эмас. Шунинг учун катта қувватдаги кўп босқичли буг турбиналари қурилади.

Буг турбина ва қозон қурилмаси блоклари система-сининг иқтисодий самарадорлигини орттиришда қувва-ти 300 МВт дан ортиқ бўлган буг турбиналарини қуриш

техник жиҳатдан мақсадга мувофиқдир. Шу сабабли, ҳозирги вақтда қуввати 300, 500, 800, 1200 МВт бўлган турбиналар қурилмоқда. Бундай қувватдаги турбиналарга узатиладиган иш буғи температураси $T=800-850$ К, босими $P=23,5-25,5$ МПа атрофида бўлади. Иш бажариб бўлган буғ температураси 300—400 К, босими 3—7 кПа атрофида бўлади.

IX. 6.6. ГАЗ ТУРБИНАСИ

9.1. Газ турбинасининг таснифи, тузилиши ва ишлаш тартиби

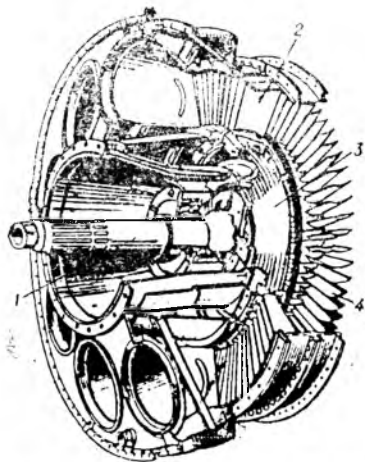
Юқори босим ва температура остидаги ёниш маҳсули (газ) энергиясини кураклар ёрдамида ротор валининг механик энергиясига айлантирувчи иссиқлик машинаси газ турбинаси дейилади. Актив ва реактив газ турбиналари бўлади.

Газ турбиналари газ двигателларига мансуб бўлиб, иш моддасининг ёқилиш услубига кўра $V=\text{const}$, $P=\text{const}$ ва аралаш ҳамда босқичли бўлади.

Газ турбинаси сопло аппаратынинг кетма-кет жойлашган қўзғалмас (йўналтирувчи) курак тожлари ва унинг оқим кесимини ҳосил қиладиган иш ғилдирагининг айланувчи тожларидан ташкил топган (57-расм).

Газ турбинаси вал 1, статорда жойлашган сопло аппаратынинг йўналтирувчи кураклари 2, турбина диски (лаппак) 3 ҳамда роторнинг иш кураклари 4 дан ташкил топган. Сопло аппаратынинг йўналтирувчи кураклар билан роторга ўрнатилган иш кураклари турбина босқичини ташкил қиладн. Одатда газ турбиналари кўп босқичли бўлиб, қуввати 100 МВт дан катта бўлади.

Газ турбинаси газ



57-расм. Бир басқичли газ турбинаси.

турбиналари қурилмаларининг асосини ташкил этади ва иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантиришда кенг қўлланилади. Газ турбиналари ҳам буғ турбиналаридай бўлиб, фақат уларда буғ ўринга ёниш маҳсулоти — тутун асосий иш жисми ҳисобланади. Газ турбинасида газ зарраларининг кинетик энергияси механик энергияга (ҳаракат миқдорининг сақланиш қонунига мувофиқ) айланади. Тутун газлари босимининг потенциал энергияси соплода кинетик энергиянинг ортишига олиб келса, кинетик энергия роторнинг механик энергиясига айланади.

9.2. Газ турбиналари қурилмалари ва уларнинг циклидаги термодинамик жараёнлар

Газ турбинасининг таркибий қисми ёниш камераси 6, ёниш маҳсулоти оқимидаги иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантирувчи газ турбинаси 2, атмосфера қавосини сўриб ва сиқиб узатувчи компрессор 3, ёқилғи насоси 5 ва бак 4, электр генератори 1, соплони 11, ёниш камераси 9 ва бошқа ёрдамчи қисмлардан ташкил топган (58-расм). Тузлигини ва ёқилғининг ёқилиш услубига кўра, газ турбинаси қурилмаси (ГТҚ) таркибига электр свеча, иш моддаси (ҳаво ва ёқилғи) ни ёниш камерасига киритиш ҳамда ёниш маҳсулини камерадан чиқаради.



58-расм. Ёқилғи $P = \text{const}$ бўлганда ёқиладиган ГТҚнинг схемаси: 1 — электр генератор; 2 — газ турбинаси; 3 — ҳаво компрессори; 4 ва 5 — ёқилғи баки ва насоси; 6 — ёқилғи труба; 7 — форсулка; 8 — сиқилган ҳаво труба; 9 — ёниш камераси; 10 — ёниш маҳсули оқимини йўналтирувчи аппарат; 11 — газ турбинаси қурама; 12 — соплони.

риш клапанлари, регенерация бўлмаси, бирламчи ва иккиламчи босқичли ёшши камералари ҳамда турбинлари, шунингдек, иккиламчи компрессор киради. ГТҚ ларда иш молдасини ёшши услубига кўра $V = \text{const}$, $P = \text{const}$ ва аралаш босқичли бўлади. ГТҚ ларда ёшшига сифатида табиий газ, тазаланган кокс, домна ва генератор газлари, махсус дизель ва соялар моллари ишлатилади.

Газ турбинаси қурилмасидаги турбина, электр генератори, ҳаво компрессори ва ёшши насоси ягона умумий ватда жойлаштирилади. Ёшши ёшшигисининг $V = \text{const}$ да ёшшиган ГТҚ циклидаги термодинамик жараёнларни қараб чиқамиз (58-расм. *Давоми*). Атмосфера ҳавоси компрессор 3 га сўрилиб унда сиқилади (PV диаграммада 1 ва 2 нуқталар оралиғи) ва аниқ параметрга (T , P , V) эга бўлгандан сўнг аралаш ҳавоини киритиш, кейин ёшшигисини киритиш клапанлари очилиб ёшши камерасига мос равишда, сиқилган ҳаво ва ёшшига узатилади. Шунда ҳосил бўлган иш ёшшигисига ташқаридан q_1 ишсизлик миқдори киритилади, яъни свеча контактилари орасида электр учқунини чиқарайди. Шу электр учқунини q_1 ишсизлик миқдори ҳисобланади ва иш ёшшигисини ёшширади. Бу ёшши натижасида ёшши камерасидаги босим кескин ортади (PV — диаграммада 2 ва 3 нуқталар оралиғи). Иш ёшшигисини тўла (қазмида 95%) ёшшидан сўнг, ушнинг температураси 2300 К га кўтарилади, шунда ёшши камерасидаги босим энг юқори қийматга етади. Ана шундагина ёшши маҳсулотини газ турбинаси куракларига йўналтиришни қавалда жойлашган ишқарини клапанни очилади. Шунда ёшши маҳсулоти температурасини 1000—1400 К га энг пастайтиришни мақсадида унга махсус йўллар орқали совуқ ҳаво узатилади (чунки газ турбинаси ута юқори температураларга чиқармайди). Ҳосил бўлган аралашма қатта босим остида турбина куракларига таъсир кўрсатиб, ушнинг рогорини айлантиради, яъни ишсизлик энергияси механик энергияга айланади. Демак, ёшши маҳсулоти ташқаридан ишсизлик энергиясини олмаган ҳолда, яъни $dq = 0$ да турбинада адиабатик кенгайиб (PV диаграммада 3 ва 4 нуқталар оралиғи) иш бажаради. Газ турбинасида иш бажариб чиққан ёшши маҳсулоти сояло орқали атмосферага чиқарилади. Система ўзининг мувозанат ҳолатига, атмосферага чиқарилган ёшши маҳсулотидан қолдиқ ишсизлик миқдорини совингичга (атмосферага) узатиб бўлгандан сўнг қайтади (PV — диаграммадаги 4 ва 1 нуқталар оралиғи). Цикл такрорланади.

Демак, ГТҚ да ўтадиган циклга $V = \text{const}$ остида ис-
сиқлик берилганда, у иккита адиабатик ($1-2$ ва $3-4$
нуқталар оралиғи), битта изохора ($2-3$ нуқталар ора-
лиғи) дан ҳамда битта изобара ($4-1$ нуқталар орали-
ғи) дан иборат бўлган термодинамик жараёнлардан
ташқил топар экан.

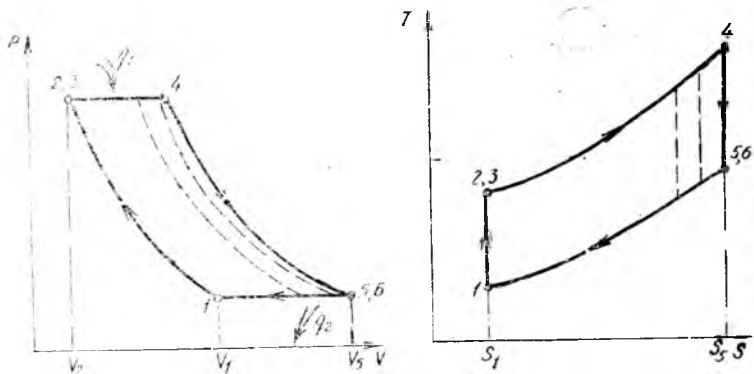
Циклнинг бажарган фойдали иши $1-2-3-4-1$ нуқ-
талар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатдан
тенг.

Циклнинг TS — диаграммасидан кўриниб турибдики,
системанинг энтропияси иш моддаси ўзгармас ҳажмда
ёнганда ва ўзгармас босимда тўла кенгайганда, ўзга-
рувчан бўлади. Бунга асосий сабаб термодинамик система-
га ташқаридан иссиқлик миқдори q_1 киритилади ва ун-
дан иссиқлик миқдори q_2 совиткичга (атмосферага) чи-
қарилади.

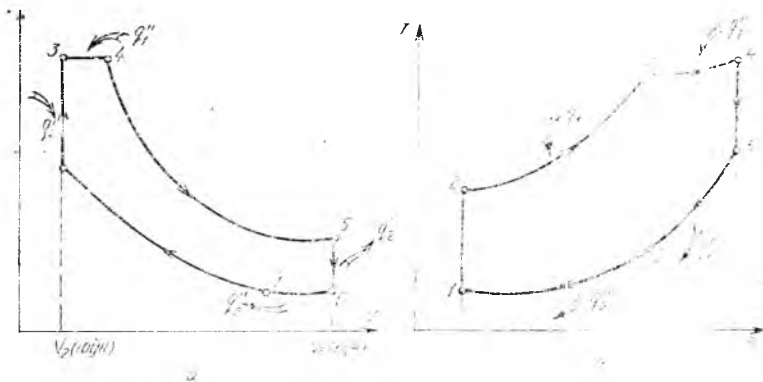
Демак термодинамик системадан иссиқлик чиқарил-
ганида ёки унга киритилганида система энтропияси ва
абсолют температураси ўзгарувчан бўлади.

ГТҚ келтирилган тўла иссиқлик миқдорини ишга ай-
лантириш мураккаб физик ва кимёвий, газодинамик ва
термодинамик жараёнларда кечадиган ҳодисаларга боғ-
лиқ бўлиб, уларнинг ҳаммасини ҳисобга олиш жуда
қийин ва аниқ тажрибалар натижаларини эътиборга
олиш зарур бўлади.

Шунинг учун соддалаштириш мақсадида жараёнлар-
ни ва унинг иш жисминини идеаллаштириб қабул қилина-
ди. Иссиқлик машиналари цикл таҳлил қилинса, улар-
да кечадиган жараёнлар шартли цикл қисмларидан



58-расм. Давоми. Иссиқлик $V = \text{const}$ бўлганда узатиладиган ГТҚ
циклдаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграмма-
лари.



59-расм. Иссиқлик куч машиналарининг умумлашган термодинамик циклининг PV ва TS диаграммалари.

ташкил топади ва уларнинг диаграммалари PV ва TS координаталарда ифодаланади. Циклининг термик ФИК ни аниқлашда умумлаштирилган цикл диаграммаларидан фойдаланилади. Масалан, иш жисмининг сиқилиши адиабатик жараён ($dq=0$) деб қабул қилинади. Иш жисмига иссиқлик миқдори (q ва d_1') $V=\text{const}$ ёки $P=\text{const}$ бўлганда ҳамда кетма-кет аввал изохорик, кейин изобарик жараёнларда келтирилади деб қаралади. Иш жисмининг иш бажариши учун унинг кенгайиши адиабатик ($dq=0$) жараён деб қаралади. Қолдиқ иссиқлик миқдори q_2 иш жисмидан $V=\text{const}$ бўлган ҳолатда чиқарилади. Тўғаллигича иш жисмидан чиқмасдан қолган иссиқлик миқдори (q_2') $P=\text{const}$ бўлганда ундан чиқарилади, деб фараз қилинади.

Умумлашган цикл параметрлари тавсифи қуйидагича белгиланган бўлади (59-расм):

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \text{ — сиқилиш даражаси;}$$

$$\lambda = \frac{P_2}{P_1} \text{ — босимнинг ортish даражаси;}$$

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \text{ — ҳажмнинг дастлабки кенгайиш даражаси;}$$

$$\lambda_p = \frac{P_3}{P_6} \text{ — босимнинг пасайиш даражаси;}$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_3}{V_1} \text{ — ҳажмнинг қисқариш даражаси.}$$

$q_1 = q_1' + q_1''$ — умумлашган циклдаги 1 кг иш жисмига келтирилган иссиқлик миқдори;

$q_2 = q_2' + q_2''$ — умумлашган циклдаги 1 кг иш жисмининг совиткичага узатган иссиқлик миқдори.

Циклдаги иш моддасининг иссиқлик сиғими ва ҳолатлардаги температуралар орқали иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_v (T_2 - T_1) + C_p (T_2^k - T_1) \\ q_2 &= C_v (T_3 - T_1) + C_p (T_3^k - T_1) \end{aligned} \quad (270)$$

Циклга келтирилган ва ундан чиқарилган иссиқлик миқдорларининг цикл параметрлари орқали ҳисоблаш учун албатта цикл ҳолатларига мос келувчи ҳамма нуқталар температураларининг бирор нуқта температураси билан ифодалаш зарур бўлади.

Масалан, сиқиниш тақтида $dq=0$ бўлса, жараён адиабатик бўлади. Келтирилган PV — диаграммада бу 1—2 нуқталарга мос келади. Демак, жараёнини унинг ҳолат параметрлари орқали ифодалаш мумкин, яъни

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa-1} = \varepsilon^{\kappa-1}$$

ёки

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \quad (271)$$

Худди шундай $V = \text{const}$ жараёни учун қуйидагини ёзиш мумкин:

$$\frac{T_3}{T_1} = \frac{P}{P_2} = \lambda$$

бундан

$$T_3 = \lambda T_1 \quad (272)$$

(271) даги T_2 қийматини (272) га қўйсак

$$T_3 = T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1} \quad (273)$$

ҳосил бўлади.

Изобарик жараёни параметрлари 3—4 нуқталар ҳолатлари орқали ифодаланади, яъни

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{V}{V_1} = \rho \quad (274)$$

ёки

$$T_4 = \rho T_3$$

ёки T_2 қийматини юқорида келтирилган формуладан олиб (274) га қўйсак, қуйидаги ҳосил бўлади:

$$T_4 = \lambda \rho T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \quad (275)$$

Термодинамик системада иш бажармасдан қолган қолдиқ иссиқлик миқдори $P = \text{const}$ да совиткичга чиқари-

лади, унинг тенгламасини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{T_5}{T_6} = \frac{P_5}{P_6} = \lambda_{\text{в}},$$

будан

$$T_5 = \lambda_{\text{в}} T_6. \quad (276)$$

Системадан тўла чиқарилмасдан қолган иссиқлик миқдорининг қолдиқ қисми улушини $b-i$ нукталарга мос келувчи ҳолатлар параметрлари орқали. Жараён изобарик бўлганлиги учун, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{T}{T_1} = \frac{P}{P_1} = \varepsilon_{\text{в}},$$

ёки

$$T_{\text{в}} = \varepsilon_{\text{в}} T_1. \quad (277)$$

Юқоридаги тенгламалардаги $T_{\text{в}}$ қийматини (276) тенгламага қўйсак, қуйидаги ҳосил бўлади:

$$T_{\text{в}} = \lambda_{\text{в}} \varepsilon_{\text{в}} T_1. \quad (278)$$

Циклнинг маълум нукталарига мос келувчи (271), (272) ва (275) тенгламалардан фойдаланиб, иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_v(T_1 \lambda^{\kappa-1} - T_1 \varepsilon^{\kappa-1}) + C_p(\rho \lambda T_1 \lambda^{\kappa-1} - T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1}) = \\ &= C_v T_1 \lambda^{\kappa-1} (\lambda - 1) + C_p T_1 \lambda^{\kappa-1} (\rho - 1) = \\ &= T_1 \lambda^{\kappa-1} [C_v (\lambda - 1) + C_p \rho (\rho - 1)]. \end{aligned} \quad (279)$$

Маълумки, $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ бўлганлиги асосида (279) ни қайта ёзамиз:

$$q_1 = T_1 \lambda^{\kappa-1} C_v [(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)]. \quad (280)$$

Худди шу услубда ташқарига, яъни совиткичга чиқарилган иссиқлик миқдорини топамиз, яъни

$$q_2 = C_v T_1 [\varepsilon_{\text{в}} (\lambda - 1) + \kappa (\varepsilon_{\text{в}} - 1)]. \quad (281)$$

Циклга келтирилган q ва ундан совиткичга чиқарилган q_2 иссиқлик миқдорларини топнишнинг аҳамияти шундан иборатки, улар ёрдамида циклнинг термик фойдали иш коэффициентини ва бажарган ишнинг аниқлаш мумкин.

Маълумки, циклниң ФІК термодинамиканиң иккинчи қонуни ифодасидан аниқланади, яъни

$$\eta_i = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Бу ифодадаги иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ўрнига, юқорида қараб чиқилган умумлашган цикл учун топилаган қийматларни қўйиб, ҳосил қиламиз:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{C_v(\lambda_p - 1) - \kappa(\varepsilon_v - 1)}{(\gamma - 1) + \kappa^2(\rho - 1)}. \quad (282)$$

Умумлашган циклниң бажарган иши q_1 ва q_2 айирмасидан топилади:

$$A = q_1 - q_2 = C_v T_1 \varepsilon^{\kappa-1} [(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1) - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon^{\kappa-1}} (\lambda_p - 1) - \frac{\kappa}{\varepsilon^{\kappa-1}} (\varepsilon_v - 1)] \quad (283)$$

ёки

$$A = \eta_i \cdot q_1 = \eta_i \cdot C_v T_1 \varepsilon^{\kappa-1} [(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)] \quad (284)$$

Юқорида келтирилган умумлашган цикл тенгламаларини аниқ циклга татбиқ этиб, шу ўрганилаётган циклдаги η_i ва A ни аниқлаш мумкин бўлади.

ГТҚ циклдаги термодинамик жараёнлар учун худди шундай тенгламаларни тузиб, уларни ишлаб, соддалаштирилиб иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни аниқлаб, улар асосида ГТҚ нинг ФІК аниқланади:

$$\eta_i = 1 - \frac{\frac{1}{\varepsilon^{\frac{\kappa}{\lambda} - 1}}}{\lambda - 1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\frac{\kappa-1}{\lambda}}}, \quad (285)$$

бунда $\lambda = P_3 / P_2$ — босимнинг ортиш даражаси;

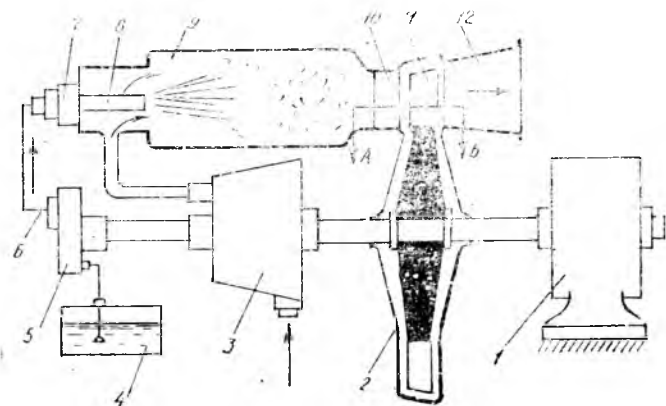
$$\varepsilon = \pi = P_2 / P_1 = \frac{V_1}{V_2} - \text{сиқилиш даражаси.}$$

Демак, юқорида келтирилган ГТҚ си циклининг Т диаграммасидан кўриниб турибдики, унинг термк ФИК атмосфера ҳавосининг компрессорда сиқилиш даражасига ва ёниш камерасидаги иш моддасининг ёниш маҳсули ҳосил қилган босимининг ортиш даражасига боғлиқ бўлар экан.

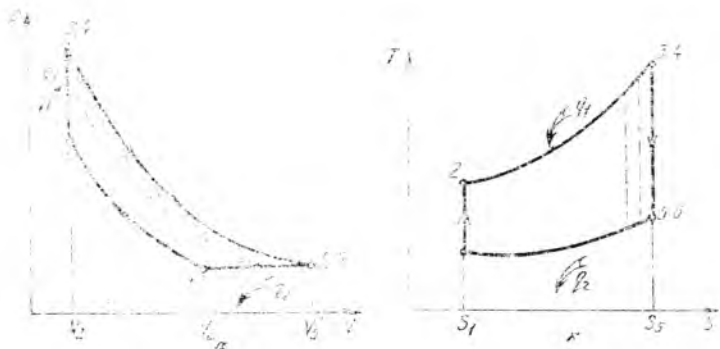
9.3. Иссиқлик $P = \text{const}$ да узатиладиган газ турбинаси қурилмаси (ГТҚ)

Газ турбинаси қурилмаси циклида иш ёқилғиси ўзгармас босим остида ёқилганда циклга ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмайди. Бундай турдаги циклда ёниш камерасидаги юқори температурали сиқилган ҳавога ёқилғи форсунка ёрдамида пуркалади. Ёниш $P = \text{const}$ остида кечадиган ГТҚ циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV диаграммаси иккита аднабата (1—2 ва 3—4 нуқталар оралиқлари) дан иборат (60-расм). Диаграммадан кўриниб турибдики, ГТҚ нинг термик ФНҚ ни бир хил қийматда сақлаш учун албатта ёниш камерасидаги босим ўзгармас бўлишини таъминлаш керак. Буни амалга ошириш учун, биринчидан, компрессордан узатиладиган сиқилган ҳавонинг термодинамик параметрлари ва миқдори бир хил сақланади; иккинчидан, ёқилғи насоси узатадиган ёқилғи миқдори ҳам ҳаво миқдорига мос равишда рўстланади.

Демак, бир хил миқдордаги ёниш маҳсули оқимининг босими турбина куракларига таъсир этади ва буровчи моментни юзага келтиради, яъни иссиқлик энергиясининг механик энергияга айланиш самарадорлигига эришилади.



60-расм. Ёқилғисиз ўзгармас ҳажмда ($V = \text{const}$) ёқаётган турбина қурилмасининг схемаси: 1 — электр иссиқатор; 2 — газ турбинаси; 3 — компрессор; 4 ва 5 — ёқилғи баки ва насоси; 6 — ёқилғи йўли; 7 ва 8 — ёқилғи ва ҳаво клапанлари; 9 — ёниш камераси; 10 — йўналтирувчи аппарат; 11 — иш кураклари; 12 — соқол, 13 — чиқарилган клапан; 14 — ўт олдириш свечаси.



61-расм. Ёқилги $P = \text{const}$ бўлганда ёнадиган ГТҚ циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

Мазкур қараб чиқиладиган циклининг PV ва TS диаграммаларидан кўриниб турибдики (61-расм), иш жисми аввал компрессорда адиабатик сиқилади (шу жараён ёқилги насосида ҳам содир бўлади), сўнгра унга q_1 иссиқлик миқдори келтирилади. Шу иссиқлик миқдорини келтиришда ёниш камерасидаги босим ($P = \text{const}$) сақланади. Киритилган иссиқлик иш ички энергияси ҳисобига пайдо бўлади, яъни компрессорда сиқилган ҳаво қизиб, унинг температураси ёқилгининг ёниш температурасидан катта бўлади. Сиқилган юқори температурали ва босимли ҳавога ёқилги пуркалганда кучли кимёвий реакция содир бўлади, яъни у ёнади. Бунда ёпиш ўзгармас босим остида юз беради. Шундан сўнг ҳосил бўлган ёпиш маҳсули адиабатик кенгайиб (3—4 нуқталар оралиғи, PV диаграмма) иш бажаради. Циклининг бажарган фойдали ишини диаграммалардан аниқласак, у 1—2—3—4—1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Бу адиабатик кенгайиш даврида иш жисми ташқи муҳит билан иссиқлик алмашмайдиган деб, фараз қилинади.

Ишга айланмасдан қолган қолдиқ иссиқлик миқдори q_2 атроф-муҳитга чиқарилади.

Термодинамик циклда ёқилги $P = \text{const}$ ёнганлиги, яъни киритилганлигини ва қолдиқ иссиқлик q_2 совиткичга чиқарилганлиги ҳисобга олинса, босимнинг ортинш даражаси λ ҳамда пасайиш даражаси λ_p ўзаро тенг бўлади: $\lambda = \lambda_p = 1$, чунки PV диаграммада 2—3 ва 4—1

нукталар оралигида $P = \text{const}$ бўлади. q_1 циклга $P = \text{const}$ остида киритилса, иш моддаси энтропияси 2—3 ва 4—1 нукталарда ўзгарувчан, қолган ҳолатларда $S = \text{const}$ бўлади.

Демак, ГТҚ си ($P = \text{const}$) циклининг термик ФНҚ асосан компрессорда атмосфера ҳавосининг сиқилиш даражасига, яъни система ички энергиясининг ўзгаришига боғлиқ бўлар экан. Шу сабабли умумлашган цикл учун ёзилган ФНҚ тенгламасини тўғридан-тўғри қўллаб бўлмайди, чунки $\lambda = \lambda_p = 1$.

Демак, ёқилги $P = \text{const}$ остида ёқиладиган цикл учун η_i ни қуйидагича ёза оламиз:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\kappa - 1} \cdot \frac{t_3 - 1}{t_2 - 1}. \quad (286)$$

Бу циклда дастлабки кенгайиш даражаси (E_v) ва ҳажмнинг камайиш даражаси (ρ) нисбатлари ўзаро боғлиқ бўлганлиги учун юқорида келтирилган тенгликни шу циклга татбиқ этиб ёза оламиз:

$$E_v = \frac{V}{V_1} = \frac{V}{V_1}.$$

Шунинг учун айрим ўзгартиришларини амалга оширамиз.

$$E_v = \frac{V_1}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_2} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{V_1}{V_1} \cdot \frac{V_2}{V_1}.$$

бунда

$$\frac{V_1}{V_2} = \epsilon; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\epsilon}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \epsilon; \quad \frac{P_1}{P_2} = \epsilon^{\kappa} = 1;$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} = \epsilon^{\kappa} \text{ тенглиги асосида}$$

$$\epsilon_v = \epsilon. \quad (287)$$

ёзамиз.

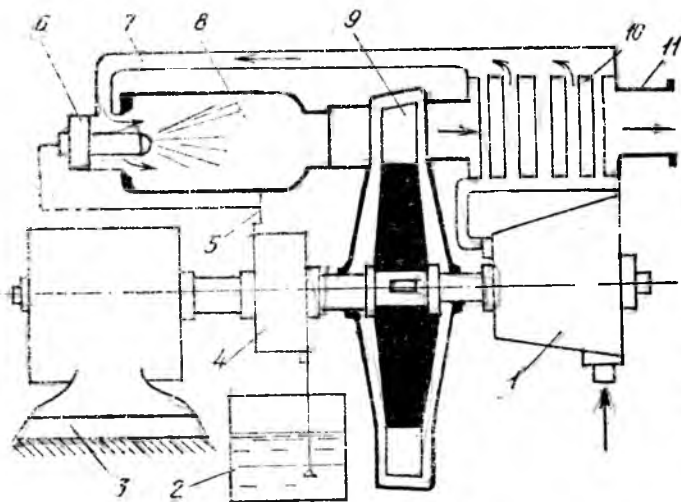
Юқорида келтирилган тенгликларни эътиборга олиб, термик ФНҚ тенгламасини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\kappa - 1}. \quad (288)$$

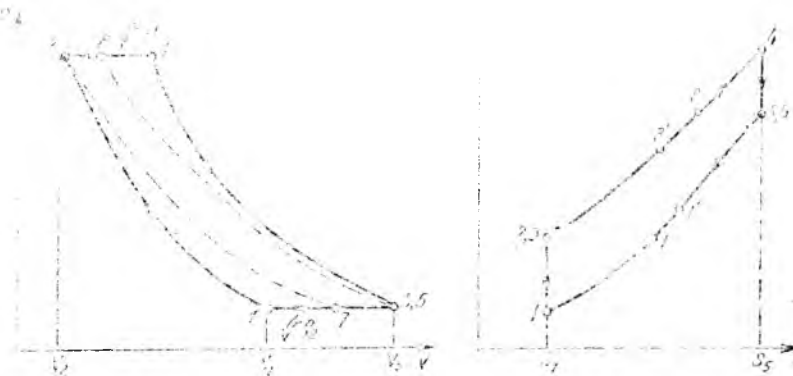
Ҳақиқатан ҳам ГТҚ циклининг η_i катталиги ҳавони компрессорда сиқилиш даражаси ϵ га боғлиқ бўлар экан.

9.4. Регенерацияли газ турбинали қурилма

Регенерация усулининг асосий мазмуни иш бажариб бўлган ёниш маҳсули таркибидаги иссиқлик миқдорини атмосферага (совиткичга) чиқармасдан ундаги қолдиқ иссиқликдан фойдаланиб қурилма ФІІК орттиришдан иборат. Регенерация услубига эга бўлган ГТҚ га ҳам иссиқлик $P=\text{const}$ остида келтирилади. Фақат компрессорда сиқилган атмосфера ҳавоси регенерация бўлмаси (блоки) дан ўтиш вақтида унга атмосферага чиқарилиб юборилаётган ёниш маҳсули — тутундаги қолдиқ иссиқлик миқдори қисман узатилади. Шунда газ ҳажми яна ҳам ортади, босими эса ўзгармас сақланади, яъни термодинамика нуқтан назаридан системанинг параметрлари, киритилган иссиқлик dq ҳисобига бошқа қийматларни қабул қилади (2 ва 3 нуқталар оралиғида V ҳамда S ўзгарувчан бўлади). Регенерацияли услубга эга бўлган ГТҚ нинг схематик тасвири 62-расмда келтирилган. Циклда регенерация услуби қўлланилган ГТҚ юқорида қараб чиқилганлардан фақат регенерация бўлмаси билан фарқланади. Циклда содир бўладиган тер-



62-расм. Иссиқлик $P=\text{const}$ бўлганда иш жисмига келтириладиган регенерацияли ГТҚнинг схематик тасвири: 1 — компрессор; 2 ва 4 — ёқилғи баки ва насоси; 3 — электр генератор; 5 — ёқилғи грубаси; 6 — форсунка; 7 — сиқилган ҳаво трубаси; 8 — ёниш камераси; 9 — газ турбинаси; 10 — регенерация бўлмаси; 11 — сопло.



63-расм. Иссиқлик миқдори $P = \text{const}$ бўлганда иш жисмига узатиладиган ва регенерацияли ГТҚ циклининг PV ва TS диаграммалари.

модинамик жараёнларини қараб чиқамиз. Компрессорда сиқилган ҳаво регенерация бўлмасига узатилади ва у ерда қолдиқ иссиқлик миқдори ҳисобига яна маълум даражагача қиздирилади (63-расм, PV диаграммадаги 2—3 нуқталар оралиғи). Аввал регенерация бўлмасида қиздириб бўлинган ҳаво ёниш камерасига юқори температурада ва ўзгармас босим ($P = \text{const}$) да узатилади. Сўнгра, унга параллел равишда ёқилғи насос ёрдамида ҳайдалиб форсунка орқали ёниш камерасидаги қиздирилган ҳавога пуркалади. Шунда ҳаво ва ёқилғи ўртасида кучли кимёвий реакция кечади (ёнади). Бунда иш жисмининг (ёниш маҳсулоти) параметрларидан V , P ва T ўзгаради (PV ва TS диаграммалардаги 2 ва 4 нуқталар оралиғи). Бу жараён изобарик ($P = \text{const}$) бўлади. Регенерацияли ГТҚ циклга ва ташқаридан иссиқ q_1 берилмаса ҳам ёқилғи ёнади.

Амалда компрессорга сўрилган ҳаво унда сиқилиш натижасида ҳавонинг қизиб кетиши кузатилади. Бу қизиган ҳаво регенерация бўлмасида яна қўшимча қиздирилади. Шу иссиқликлар ҳисобига иш аралашмаси ёнади ва юқори температурали ва босимли ёниш маҳсули ҳосил бўлади. Бу бутун газларининг потенциал босим энергияси ёниш камераси чиқиш қисмининг тораёниси ҳисобига зарралар тезлигининг ортиб кетиши натижасида зарралар кинетик энергияси катталашади, яъни зарралар импультси ортади. Катта импультси тутун газлари газ турбинаси кураклари билан таъсирлашиб

аднабатик кенгайди ва ўзининг иссиқлик энергиясини роторнинг механик энергиясига айлантиради. Ротор валидаги бу механик энергия иссиқмолин—электр генераторига узатилади ва у ерда электр энергиясига айланади.

Демак, аднабатик кенгайган тутун газлари фойдалиниш бажаради. Турбина кураклари билан таъсирлашиб ўтган ёниш маҳсули (тутун газлари) регенерация бўлмаси ковшургалари орасидан ўтин жараёнида компрессордан узатилаётган атмосфера ҳавосини кўшимча иштиб, ўзи совиткича чиқарилади. Цикл такрорланади (62-расм).

Бундай ГТҚ шикли бажарган фойдалинишнинг катталиги $1-2-3-6-1$ нуқталар билан чегараланган юзга сои қиймаси жиҳатидан тенг. Регенерация услубига эга бўлган циклниң бажарган иши ёқилиги $V=\text{const}$ ва $P=\text{const}$ да ўтин оддий цикллариқига инебатан катта бўлар экан. Бунга асосий сабаб регенерация услуби билан кўшимча иссиқлик мақдори q_1 иш молласига киритилишидир.

Регенерация бўлмасида тутун газларидаги иссиқлик тўлиқлиғича компрессордан ҳайдаган ҳавога узатилмайди. Агарда шу ҳавога жами иссиқлик регенерация йўли билан ўтказилса, яъни тўлиқ регенерация ўрнили бўлса, $T_1=T_2$ ва $T_3=T_4$ бўлади (узлуқли чиқиклар изотермани ифодалайин). Шунинг учун $T_4-T_3=T_2-T_1$ бўлади (TS диаграммага қаранг).

Демак, ёниш камерасидаги иш жиемига регенерация йўли билан келтирилган иссиқлик мақдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_1 = C_p (T_4 - T_3) \quad (289)$$

Совиткича чиқарилган иссиқлик мақдори

$$q_2 = C_p (T_2 - T_1) \quad \text{бўлади.}$$

Унда тўлиқ регенерацияли циклниң термик ФНҚ қуйидагича ифодалани мумкин:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_1 - T_2}. \quad (290)$$

Маълумки, $T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}$; $T_3 = T_1 \lambda \cdot \varepsilon^{k-1}$; $T_4 = T_1 \lambda \cdot \varepsilon^k$ ва $\lambda_p = \lambda = 1$; $\varepsilon = p$ бўлганлиги асосида (290) тенгликни қуйидагича ёза оламиз:

$$\eta_k = 1 - \frac{1}{p} = 1 - \frac{T_1}{T_2}. \quad (291)$$

Юқоридаги q_1 тўлиқ регенерация ўринли бўлгандагина тўғри. Маълумки, ҳеч қандай иссиқлик машинасидаги иссиқлик миқдори иссиқлик алмашинуви жараёнида совиткичга тўлиқ узатилмайди. Бу TS диаграммадан аниқ, чунки $T_7 > T_7$. Регенерация бўлмасда ҳаво T_8 гача қиздирилиш даврида у T_7 гача совийди. Шунинг учун регенерацияли циклнинг термик ФНҚ бошқачароқ кўринишда ифодаланади. Бунинг учун регенерация даражасини билиш керак бўлади, яъни

$$\delta = (T_{8'} - T_2) : (T_8 - T_2), \quad (292)$$

бунда нуқта 2 нуқта 8 нинг яқинида (чап томонда) жойлашади. Тўлиқ регенерация ўринли бўлса, $\sigma = 1$. Шунинг учун тўлиқ регенерация ўринли бўлмаганлигидан регенерацияли цикл ФНҚ аниқлашда q_1 ва q_2 ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$q_1 = C_p(T_4 - T_{8'}) = C_p(T_4 - T_2 + T_2 - T_{8'}).$$

Агар регенерация даражасини эътиборга оладиган бўлсак, у ҳолда q_1 ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$q_1 = C_p[T_4 - T_2 - \sigma(T_8 - T_2)].$$

Худди шу услубда q_2 ни қуйидагича ёза оламиз:

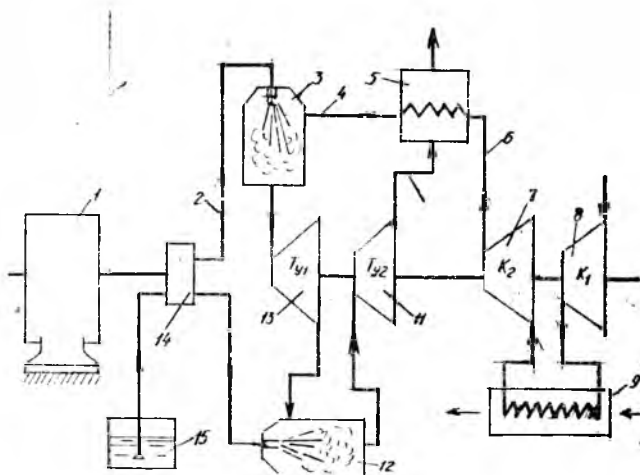
$$q_2 = C_p[T_5 - T_4 - \sigma(T_8 - T_2)].$$

Демак, унда регенерацияли циклнинг ФНҚ

$$\eta_1 = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_5 - T_4 - \sigma(T_8 - T_2)}{T_4 - T_2 - \sigma(T_8 - T_2)} \quad (293)$$

9.5. Иссиқлик $P = \text{const}$ да циклга келтириладиган босқичли сиқиш, ёниш ва регенерацияли ГТҚ

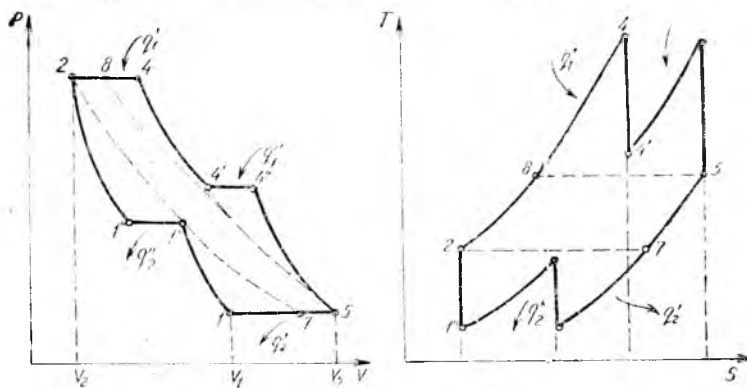
Иш жиемига иссиқлик $P = \text{const}$ остида берилганда, ҳаво босқичма-босқич сиқиладиган ва босқичли регенерация қўланилган ГТҚ ёқилган 2, сиқилган ва қиздиритган ҳаво 4 ва 6, ёниш маҳсули 10, трубалар, бирламчи ва иккиламчи ёниш камералари 3 ва 12, компрессорлар 7 ва 8, турбиналар 13 ва 11 ҳамда регенерация ва совиткич бўлмалари 5 ва 9, электр генератор 1, мой идриши 15 ва насос 14 дан ташкил топган. Босқичли ёниш ва сиқиш тактларига эга бўлган ГТҚ юқорида қараб чиқилган ($V = \text{const}$; $P = \text{const}$) регенерацияли қурилмаларига нисбатан анча мураккаб қурилмадир. Мазкур қурилманинг схематик тасвири 65-расмда келти-



61-расм. Иссиқлик циклига $P=\text{const}$ бўлганда узатиладиган босқичли сиқилиш, ёпиш ва регенерацияли ГТҚнинг схематик тасвири.

рилган. Иссиқлик бундай ГТҚнинг ҳар бир босқичига $P=\text{const}$ остида киритилади ҳамда зарур бўлса сиқилган атмосфера ҳавоси совитилади ($1'$ ва $1''$ нуқталар оралиги) ёки регенерация усули билан иссиқлик иш моддасига узатилади (65-расм, PV диаграммадаги 1 ва 2 нуқталар оралиги).

Термодинамик цикл қуйидагича кечади: атмосфера



65-расм. Иссиқлик $P=\text{const}$ бўлганда циклга узатиладиган босқичли сиқилиш, ёпиш ва регенерацияли ГТҚ циклининг PV ва TS диаграммалари.

ҳавоси компрессорнинг биринчи босқичида сиқилади (1 ва 1' нуқталар оралиги), сўнгра совиткичда совитилади (1' ва 1'' нуқталар оралиги). Совиткичдан чиққан ҳаво иккинчи компрессорда яна сиқилади (1'' ва 2 нуқталар оралиги), сўнгра регенератор бўлмасида қўшимча иситилган ҳаво ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилади (2 ва 8 нуқталар оралиги). Ёниш камерасига узатилган сиқилган ва қиздирилган ҳаво температураси ёқилгининг ёниш температурасидан юқори бўлганлиги сабабли унга нуркалган ёқилғи бирданига портлаб ёнади. Бу ёниш маҳсулининг температураси $P = \text{const}$ остида ортади (8 ва 4 нуқталар оралиги). Бу ерда ёниш камерасидаги иш моддасига ташқаридан q_1 иссиқлик миқдори киригилмайди. q_1 иссиқлик компрессорда сиқилган ҳаво ички энергиясининг ортishi ҳисобига ва регенерация вақтида пайдо бўлади. Ёқилғи ёнгандан сўнг ҳосил бўлган ёниш маҳсулоти газ турбинасига йўналтирилади. Юқори температурали ва босимли ёниш маҳсулоти газ турбинаси кураклари билан таъсирлашиб, турбина роторини айлантиради, яъни иссиқлик энергияси механик энергияга айланади. Албатта турбинада ёниш маҳсулоти, адиабатик кенгайди ва фойдали иш бажаради (4 ва 4' нуқталар оралиги). Ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилган қиздирилган ҳаво ва ёқилғи тула реакцияга киришиб улгурмайди. Шунинг учун ёниш маҳсулоти таркибида маълум миқдорда қиздирилган ҳаво ва ёқилғи бўлади. Бундан ташқари, турбина куракларининг юқори температура (2300 К) дан ҳимоялаш мақсадида ёниш маҳсулини газ турбинасига киритишдан олдинроқ унга совуқ атмосфера ҳавоси қўшилади (бу схематик тасвирда кўрсатилмаган) ва температураси 1000—1400 К гача пасайтирилади. Бу қўшилган совуқ ҳаво ёниш камерасининг биринчи босқичида ёниш маҳсулоти газлари билан аралашиб қизийди, сўнгра турбинанинг биринчи босқичида иш бажариб ундан чиқади ва ёниш камерасининг иккинчи босқичига киради. Унда янги киритилган ёқилғи билан кимёвий реакцияга киришади, яъни ёнади. Ёниш маҳсулоти ўзгармас босим остида сақланади, натижада у 4' ва 4'' нуқталар оралигида кенгайди. Ёниш камерасининг иккинчи босқичида ҳосил бўлган юқори температурали ва босимли бу ёниш маҳсулоти газлари оқими иккинчи газ турбинасига киритилади ва у ерда адиабатик кенгайиб иш бажаради (4'' ва 5 нуқталар оралиги). Ёниш маҳсулоти газла-

ридаги қолдиқ иссиқлик энергиясининг маълум қисми ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилаётган атмосфера ҳавосига регенерация ҳисли билан узатилади (5 ва 7 нуқталар оралиғи) қолган қисми эса атмосферага чиқарилади. Цикл такрорланади.

Циклнинг PV ва TS диаграммаларидан кўриниб турибдики, кечадиган термодинамик жараёнлар, асосан иккитадан адиабатик сиқилиш ва кенгайиш ($1-1'$, $1''-2$ ва $4-4'$, $4''-5$ нуқталар оралиғи), иккитадан изобарик сиқилиш ва кенгайиш ($1'-1''$, $5-1$ ва $2-4$, $4'-4''$ нуқталар оралиғи) дан иборат экан.

Циклнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики система ҳолати унинг ички энергияси ҳисобига ўзгарганда ҳолат параметрлеридан V , P , T ўзгарувчан бўлади. Иш моддаси (система) нинг абсолют температураси ва энтропияси иссиқлик келтирилганга ёки чиқарилганда, мазкур ITQ циклида ўзгарувчан бўлади.

Ёқилғи босқичан ёнадиган, ҳаво босқичан сиқиладиган ва совитиладиган, регенерацияли иссиқлик алмашинувиға эга бўлган ҳамда q_1 ўзгармас босим остида циклга киритиладиган ITQ циклининг бажарган иши юқорида қараб чиқилган ($V=\text{const}$, $P=\text{const}$) циклларникига нисбатан юқори бўлади. Бунга асосий сабаб ёналишнинг тўла ёниши ва иссиқликининг кам ироф бўлишидир. Циклнинг $4-4'-4''$ ва $1-1'-1''$ қисмлари (TS диаграммада) ўзаро ўхшашлиғи, яъни кенгайиши ва сиқилишдан иборат бўлганлиғи асосида q_1 ва q_2 ифодасини ёзамиз:

$$q_1 = T_- \Delta S_{1-1''} ; q_2 = T_1 \Delta S_{7-1''} .$$

Циклнинг диаграммаларидан кўриниб турибдики, $7-1''$ ва $8-4''$ нуқталар оралиғидаги жараёнлар бир хил бўлиб, йўналишлари қарама-қарши бўлганлиғи учун улардаги энтропиянинг ўзгарувчанлиғи тенг қийматли бўлади. Шу сабабли $\Delta S_{8-4''} = \Delta S_{7-1''}$ бўлади. Анда q_2 ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_c = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_1}{T_-} , \quad (294)$$

Демак, циклнинг ФІК Карно циклиникига яқинлашиб боради, яъни юқори бўлади. Умумлашган цикл тенгламаларидан фойдаланиб ва $\lambda = 1$ асосида қуйидагини ёзамиз:

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{\lambda^{\gamma-1}} . \quad (295)$$

9.6. ГТҚ нинг татбиқи

Охириги 24—30 йил мобайнида ГТҚ хусусан транспорт ва энергетикада кенг қўлланила бошлади. Энергетикада қўлланиладиган ГТҚ лари асосан узлуқли, электр энергияси стинмасдан қолганда вақт-вақти билан энергетик системада бузилтишлар, авариялар бўлган даврида истеъмолчиларни электр энергиясига бўлган таъинини қолдириш мақсадида ишлатилади. Бундай энергетик ГТҚ лари қуввати 1—100 МВт оралиғида бўлиб, йил мобайнида 1500 соатдан ортиқ ишлатилмайди.

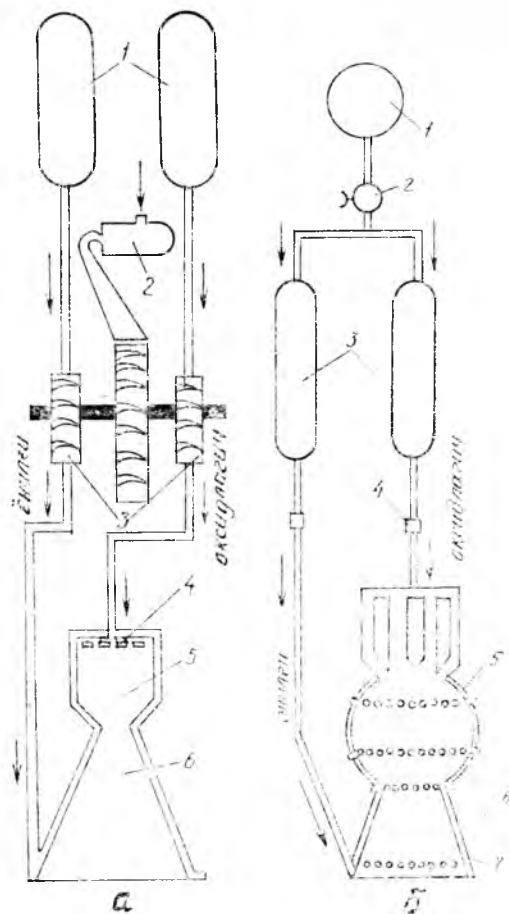
Денгиз кемаларидаги энергетик ГТҚ асосий энергия манбаи ҳисобланади ва уларнинг қуввати 30 кВт дан 10 МВт га қ бўлади. Қимёвий, нефтни қайта ишлаш, металлургия, атом энергетикаси ва ил. к. ишлаб чиқариш соҳаларида кенг қўлланилади. Нефтни ҳайдашда, газ таш, турли трубада, турли хил компрессорларни ишлатишда ГТҚ лари асосий механик энергия манбаи ҳисобланади. ГТҚ асосий транспортидаги турбореактив, турбовинтаги реактив самолётларнинг асосий ва форсаж (форсаж — форс — жидатлаштирмоқ) двигателлари таъинини, денгиз кемаларида ҳам, темир йул транспортидаги локомотив (локо, локомотив — жойидан қўзғатаман) ларида ҳам кенг татбиқ қилинади.

Замонавий турбореактив, турбовинтаги реактив самолётларни, узоқ сафарга бўладиган денгиз кемаларини, темир йул, транспортини катта қувватдаги газ турбиналарнинг тасаввур этиши қийин. Чунки йилдан йилга бу транспорт вақиллари та қўлланиладиган двигателларнинг қуввати охиб бормоқда. Дизель ва карбюраторли двигателлар ГТҚ ларидай содда бўлмасдан катта қувватлар олишни керак бўлганда уларнинг қўлamlари эртиб қолади. Шунинг учун келажакда, катта қувватлар олинадиган газ турбиналаринингина эмас, паст қувватлилари ҳам ишлаб чиқарилади.

Х 606 РЕАКТИВ ДВИГАТЕЛЛАР

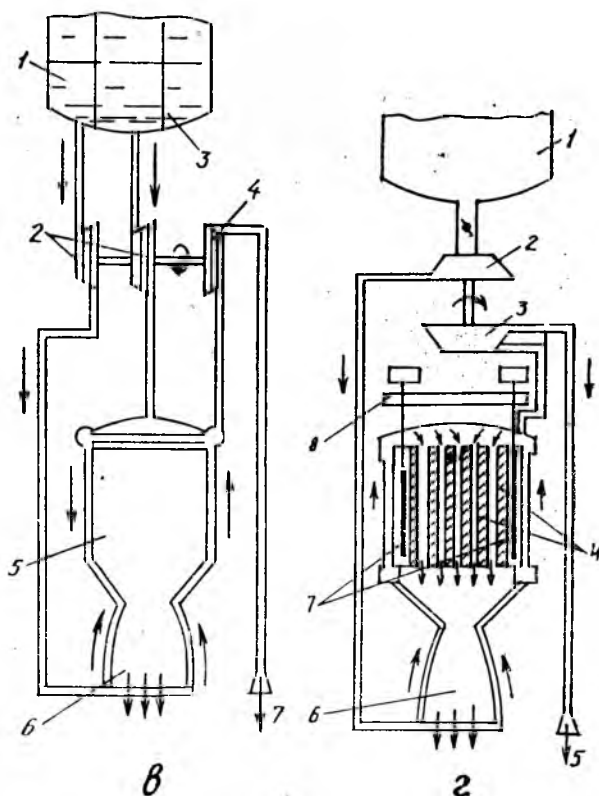
10.1. Реактив двигателларнинг таснифи, турлари, тузилиши, ишлаш тартиби

Ичидан катта тезликда заррачлар оқими учиб чиқши ҳисобига тўртинчи кучи ҳисва қила оладиган иссиқлик машинаси реактив двигатель дейилади. Иссиқ-



66-расм. Ракета двигателлари: а—ёқилгини турбонасос ёрдами-
узатадиган суюқликли двигатель; 1—ёқилгини баки, 2—газ
генератори, 3—турбонасос агрегати, 4—форсункалар, 5—ёғиш
камераси, 6—соплло; б—ёқилгини сиқиб чиқариш
усули билан узатадиган суюқликли двигательлар; 1—суюқ
газ базони, 2—редуктор, 3—ёғилгини баклари, 4—клапан-
лар, 5—ёғиш камераси, 6—ички совитини ёқилгини узатиш
ҳалқаси, 7—соплло.

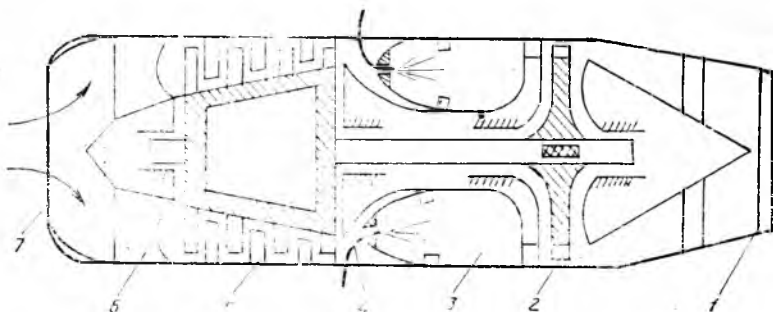
лик, кимёвий, ядро, электр, қуёш энергияларининг таъ-
сири натижасида иш жиёми оқимининг кинетик энергия-
си пайдо бўлади.



66-расм. Давоми. в — қимёвий ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ оксидловчи бак, 2 — насослар, 3 — суюқ ёқилғи баки, 4 — турбина, 5 — ёниш камераси, 6 — сопло, 7 — турбиналарни ҳайдаш канали; 2 — ядро ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ водород, 2 — насос, 3 — турбина, 4 — иссиқлик ажратувчи элементлар, 5 — турбинанинг ҳайдаш канали, 6 — сопло, 7 — бошқариш стерженлари, 8 — химоя экрани.

Реактив двигателларда атмосфера ҳавосининг ишлатилишига кўра, улар икки хил бўлади: атмосфера ҳавосидаги кислороддан оксидловчи сифатида фойдаланидиган ҳаво-реактив двигателлар; оксидловчи кислород учувчи аппаратдаги махсус идишда сақланадиган ҳамма турдаги реактив двигателлар ракета двигателлари дейилади. Ракета двигателлари ракетага ўрнатилади.

Ҳаво-реактив двигателлари (ҲРД) компрессорли



67-расм. Турбореактив двигателнинг схематик тасвири.

(турбореактив двигателлар — ТРД) ва компрессорсиз (туғри оқимли ва пульсацияли) двигателларга бўлинади.

Ракета двигателлари қаттиқ, суяқ ёқилғили ва ким-ёвий ҳамда ядро ракета двигателларига бўлинади (66-расм.)

Реактив двигателларнинг асосий кўрсаткичи бу тортиш кучидир. Тортиш кучи ёниш маҳсулининг соплота кескин кенгайиши ҳисобига газ зарралари оқимининг тезланиши билан атмосферага отилиб чиқиши натижасида пайдо бўлади.

Энг содда турбореактив двигатель труба шаклидаги диффузорли тана ва унинг ички қисмига ўрнатилган турбокомпрессор, газ турбинаси 28, ёниш камераси 3, ёқилғи узатувчи трубалар ва форсункалар 4, сопло 18 дан ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган (67- расм). Ҳаво компрессори билан газ турбинаси бир валга маҳкамланган.

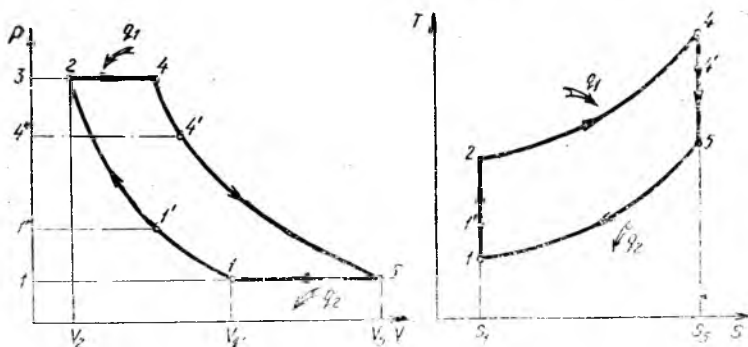
Атмосфера ҳавоси диффузор 7 орқали турбокомпрессор 5 га узатилади, унда ҳаво сиқилади. Шу сиқилган босим остидаги ҳаво турбокомпрессорнинг ҳайдаш труба 3 орқали ёниш камераси 3 га ўтади, шу вақтнинг ўзида ёқилғи насосидан ҳайдалган ёқилғи ҳам труба 4 орқали камерага форсункалар ёрдамида пуркалади. Шунда ҳаво билан ёқилғи кимёвий реакцияга киришиб катта миқдордаги иссиқлик ажралади ҳамда ёниш маҳсулотининг ҳажми ва температураси ортади. Температура-нинг ортиши изобарик ($P = \text{const}$) жараёнда содир бўлади. Ўзгармас, юқори босимли ва температурали ёниш маҳсулоти газ турбинаси кураклари билан таъсирлашиб роторни айлантиради ва у билан бирга турбокомпрессор 5 билан ҳам айланиб туради.

сор ҳам айланиб янги ҳаво оқимини сиқади. Турбина кураклари билан таъсирлашиб ўтган ёниш маҳсулоти қисман адиабатик кенгаяди (реал шароитда абсолют адиабатик бўлмайди, чунки оз миқдорда иссиқлик алмашинуви ўринлидир). Турбина куракларидан соплонинг охиригача ёниш маҳсулоти адиабатик кенгайиб боради ва бу оралиқда тутун газлари зарралари жуда катта тезликка эришади. Ҳаракат миқдорининг сақланиш қонунига мувофиқ зарралар оқими ҳаракатига қарама-қарши йўналишда ёниш маҳсулоти жуда катта тепки кучи (импульс) ҳосил қилади. Бу куч реакция кучи бўлиб, турбореактив двигателни катта тезликда олдинга ҳаракатлантиради.

Демак, кураклар билан таъсирлашиб роторни ҳаракатлантиришда ҳосил бўлган механик энергия, асосан турбокомпрессорни ҳаракатлантиришга сарфланар экан. Реакция кучини соплодан катта тезликда отилиб чиққан ёниш маҳсулоти газлари ҳосил қилади. Шунинг учун ҳам бу двигателлар реактив двигателлар дейилади.

10.2. Реактив двигателъ циклидаги термодинамик жараёнлар

Бу жараёнларни қараб чиқамиз. Атмосфера ҳавоси диффузор 7 га оқиб киришидан бошлаб аввал турбокомпрессоргача бўлган оралиқда, сўнгга компрессорда адиабатик сиқилади (68-расм, PV диаграммадаги $1-1'-2$ нуқталар оралиғи), яъни ҳаво ўзининг ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига қизийди. Сиқилиш-



68-расм. Турбореактив двигателъ циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

дан қизиган ҳаво температураси ёқилғининг ёниш температурасидан юқори бўлади. Айнан зарур параметрларга етган қизиган ҳаво ёниш камерасига кириши билан унга ёқилғи пуркалади ва кучли ёниш содир бўлади. Ёниш камерасидаги иш моддаси $P = \text{const}$ бўлганда ёнади ва ёниш маҳсулоти кенгайди (2—4 нуқталар оралиғи). Ўзгармас босим остидаги ёниш маҳсулоти энг охирига етгандан сўнг, ёниш камерасидан чиқиб, аввал турбина кураклари билан (4—4' нуқталари оралиғи) таъсирлашиш жараёнида кенгайди. Бу адиабатик кенгайиш кейин соплода давом этади (4—5 нуқталар оралиғи) ва асосий иш бажарилади. Ёниш маҳсулоти таркибидаги қолдиқ q_2 иссиқлик миқдори совиткичга (атмосфера ҳавосига) чиқарилади. Бу жараён изобарик бўлади (5—1 нуқталар оралиғи).

Демак, реактив двигателлар циклидаги термодинамик жараёнлар иккита адиабата (1—2 ва 4—5 нуқталар оралиғи) ва иккита изобара (2—4 ва 5—1 нуқталар оралиғи) дан ташкил топар экан. Реактив двигателларнинг турига мувофиқ уларнинг PV ва TS диаграммалари бир-биридан озгина фарқланади. Бунга асосий сабаб реактив двигателларда юз берадиган термодинамик жараёнларнинг жадаллиги ва двигатель конструкциясидир. Циклнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, диффузорда ва компрессорда ҳаво сиқилганда ҳамда ёниш маҳсули турбина куракларида ва соплода кенгайганда, иш моддаси (ёқилғи — ҳаво аралашмаси ҳамда ёниш маҳсули) таркибий қисмининг ички энергияси аввал ортиши, сўнгра мувозанат ҳолатга қайтиши даврида унинг энтропияси ўзгарувчан бўлади.

Газ турбинаси қурилмасининг термодинамик циклининг PV ва TS диаграммаларини реактив двигатель циклиники билан таққосланса, улар жуда ҳам ўхшаш. Шунинг учун реактив двигатель циклининг бажарган иши ва ФИК ГТҚ никидай бўлади:

$$A = \frac{P_2 V_2}{\kappa - 1} (\varphi - 1) \kappa \eta_t;$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varphi^{\frac{1}{\kappa - 1}}} \quad (296)$$

Атмосфера ҳавосини икки хил усулда, яъни махсус қурилма (компрессор) ва учувчи аппарат тезлигини товуш тезлигига яқинлаштириш ёки ундан орттириш йўли билан сиқиш мумкин. Агар учувчи аппарат тезлиги

товуш тезлигига яқинлашса, атмосфера ҳавоси диффузорга киришгача сиқила бошлайди. Бундай ҳодисадан фойдаланилса, реактив двигателлардаги компрессор ва газ турбинасига ҳожат қолмайди.

Бундай компрессорсиз реактив двигателлар ҳаво-реактив двигателлари (ҲРД) га мансуб бўлиб, улар икки хил, яъни тўғри оқимли ва пульсация (тепки) ли бўлади.

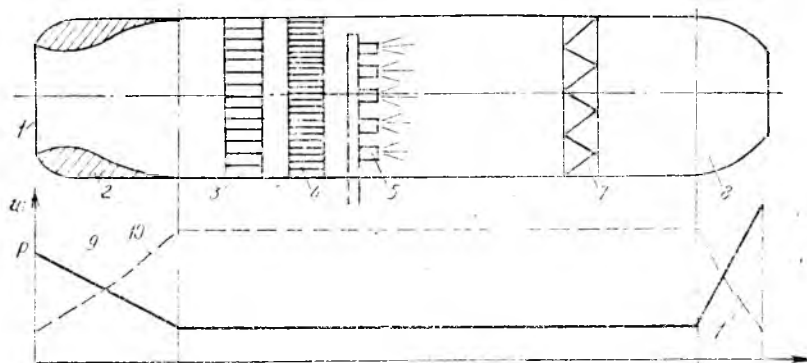
10.3. Тўғри оқимли ҲРД ва уларнинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар

Тўғри оқимли ҲРД диффузор 1, суйрилагич 2, уюрма ҳосил қилувчи панжаралар 3 ва 4, форсункалар 5, ёниш камераси, стабилизатор 7 ва сопло 8 дан ташкил топган (69- расм).

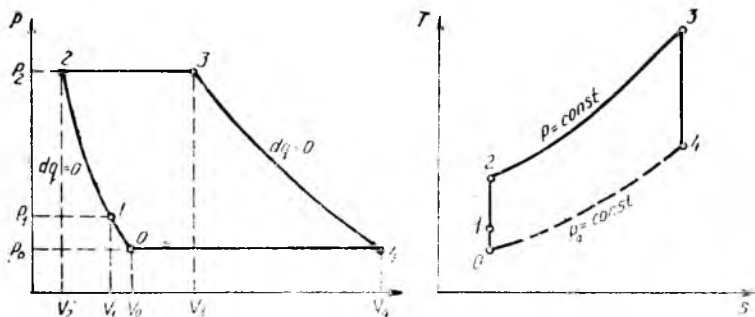
ҲРДларининг айрим конструкцияларида стабилизатор сопло билан ёниш камераси чегарасида жойлаштирилади.

Тўғри оқимли ҲРДлари циклидаги термодинамик жараёнлар ҳам турбореактив двигателларникига ўхшаш.

Циклнинг PV ва TS диаграммаларидан кўриниб турибдики, дастлабки сиқилиш жараёни ($0-1$ нуқталар оралиғи) диффузордан ташқарида содир бўлади. Сиқилишнинг давоми ($1-2$ нуқталар оралиғи) диффузорда адиабатик ($dq=0$) кечади. Атмосфера ҳавосининг сиқилиши натижасида унинг температураси, босим ва ҳажми ўзгаради. Юқори босимли ва температурали ҳавонинг бир жинслилигини ва ёниш жараёнининг жадал



69-расм. Тovuш тезлигида уча оладиган тўғри оқимли ҲРДнинг схематик тасвири.



70-расм. Тўғри оқимли ҲРД циклининг PV ва TS диаграммалари.

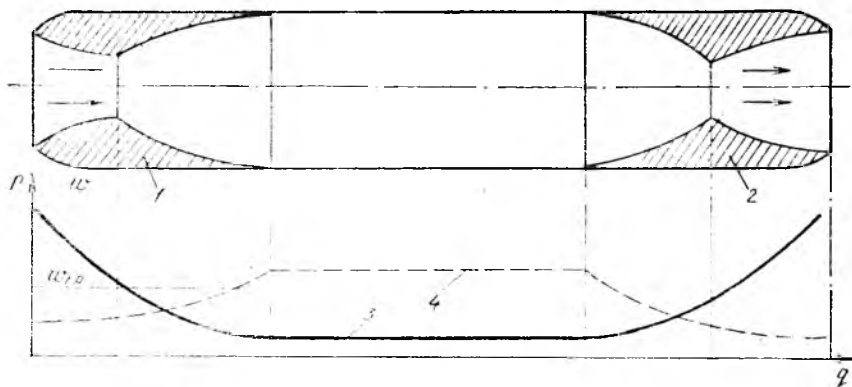
боришини таъминлаш мақсадида сиқилган ҳаво уюрмалли оқим ҳосил қилувчи панжаралардан ўтказилиб, ёниш камерасига ўзгармас ($P = \text{const}$) босимда узатилади. Бу қизиган ҳавога ёқилғи форсункалар 5 орқали пуркалади. Шунда кимёвий реакция жадал боради. Ёниш маҳсулотининг температураси ортади, лекин босим $P = \text{const}$ сақланади (2—3 нуқталар оралиғи), яъни жараён изобарик бўлади (70-расм).

Ёниш маҳсулоти турғуловчи панжарадан ўтиб, паст босими атмосферага жуда катта тезликда учиб чиққандан кейин адиабатик кенгайди (3—4 нуқталар оралиғи). Қолдиқ иссиқлик миқдорини атмосфера ҳавосига ўзгармас босим остида берган ёниш маҳсулоти яна мувозанат ҳолатига қайтади (4—0 нуқталар оралиғи). Цикл такрорланади.

Тўғри оқимли ҲРД ли циклининг TS диаграммасидан маълумки, энтропия 2—3 ва 4—0 нуқталар оралиғида, изобарик жараёнда ўзгарувчан бўлади, чунки иш моддасининг сиқилиши вақтида унинг ички энергияси ўзгариши ҳисобига иссиқлик пайдо бўлади ҳамда кенгайганда эса иссиқлик чиқади.

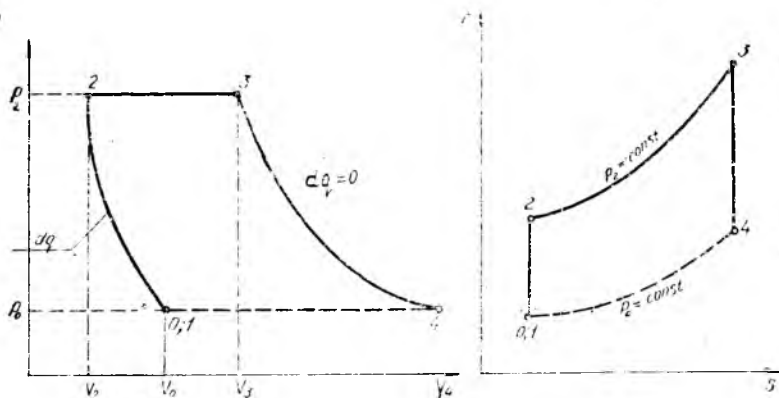
Циклнинг бажарган иши 0—1—2—3—4—0 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Шу тўғри оқимли ҲРД нинг циклида бажарилган ишни компрессорли турбореактив двигателники билан таққосланса ҲРД нинг бажарган иши каттароқ бўлади. ҲРД конструкцияси жиҳатидан анча содда ва унга кам металл сарфланади.

Товуш тезлигидан юқори бўлган тезликларда учадиган аппаратлар двигателларининг диффузори ва соп-



71-расм. Тўғри оқимли говушдан тез уча оладиган ҳаво реактив двигателининг схематик тасвири.

лоси ўзига хос геометрик шаклда бўлади. Чунки, диффузоргача дастлабки сиқилиш ҳодисаси говушдан тез реактив двигателларда бўлмайди. Унинг ўрнига диффузор ва соплонинг конуссимон киритиш ва чиқариш каналлари кенгроқ, уларнинг ўрта қисми торроқ қилиб ясалади. Бундай ўзгартириш ҳаво оқимининг босим ва температурасини ёниш камерасигача равон кўтарилишини, система ички энергияснинг ортиши ҳисобига таъминлайди. Ёниш камерасида ёқилғи ва ҳаво аралашмаси $P = \text{const}$ да ёқилади ва сақланади. Ёниш маҳсулоти нинг температураси соплогача текис ортиб боради. Соплода адиабатик кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш



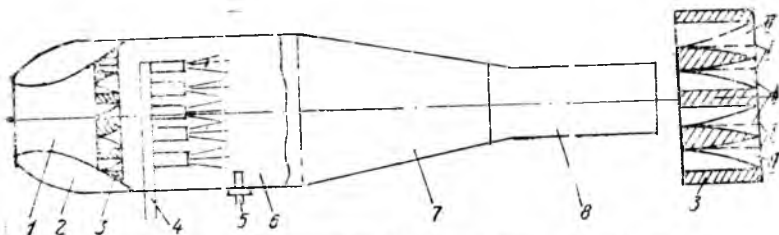
72-расм. Тўғри оқимли говушдан тез уча оладиган ҲРД циклининг PV ва TS диаграммалари

бажаради. Товушдан тез уча оладиган тўғри оқимли ҲРД лар циклининг PV ва TS диаграммасидан маълумки, цикл иккита адиабата ва иккита изобарадан ташкил топган. Товушдан тез ҲРД лари циклида энтропиянинг ўзгарувчанлиги изобарик жараён ўринли бўлганда содир бўлади.

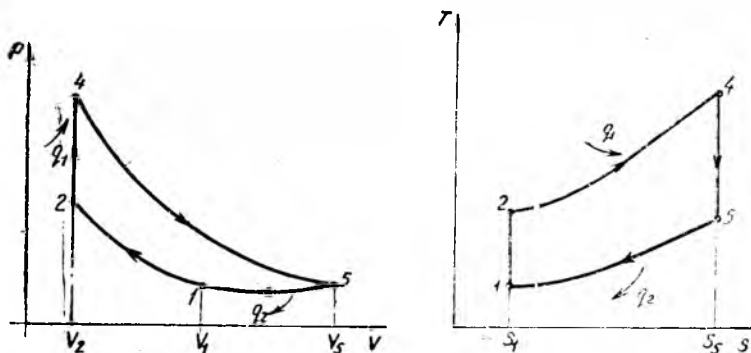
Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҲРД циклида бажарилган иш ва термик ФИК юқорида қараб чиқилган реактив двигателларникига ўхшаш.

10.4. Пульсацияли ҲРД ва унинг циклидаги термодинамик жараёнлар

Пульсацияли ҳаво-реактив двигатели (ПҲРД) ҳам компрессорсиз реактив двигатель бўлиб, у асосан диффузор 1, суйралигич 2, клапанли панжара 3, ёқилғини пурковчи форсункалар 4, ўт олдириш свечаси 5, ёниш камераси 6, конфузор 7 ва тутун газлари трубаси 8 дан ташкил топган (73- расм). ПҲРД циклида жараён қуйидагича кечади: диффузорда сиқилиб босими ва температураси ортган атмосфера ҳавоси, ёниш камерасига бир меъёردа узатиб турилмасдан, махсус клапанлар панжараси ёрдамида узлукли узатилади. Шунда ёниш камерасидаги ҳавога форсункалар орқали ёқилғи пуркалади ва ҳаво билан аралашиб иш моддаси ҳосил бўлади. Иш моддаси свеча контактлари орасида ҳосил бўлган электр учқунни, яъни ташқаридан киритилган q_1 иссиқлиги ҳисобига портлаб ёнади. Ёниш $V = \text{const}$ да содир бўлади ва камерадаги ёниш маҳсулотининг босими ва температураси ортади. Чунки, панжарали клапанлар системаси ва ёниш камераси билан конфузор чегарасидаги тўсиқ очилиб, ёпилиб туради. Ёниш маҳсулоти конфузор ва тутун газлари трубасидан катта тезликда ўтиши жараёнида адиабатик кенгайди ҳамда реакция кучини ҳосил қилади. ПҲРД циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммасидан кўриниб туриб



73-расм. Пульсацияли ҲРДнинг схематик тасвири



74-расм. ПХРД циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

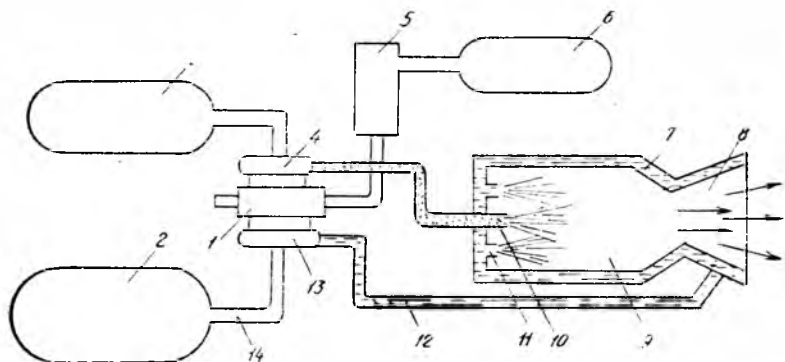
дики, цикл иккита адиабата, биттадан изохора ва изобарадан ташкил топган (74-расм).

ПХРД нинг диффузорига оқиб кирган ҳаво аввал унинг олд қисмида, сўнгра суйрилагичда адиабатик сиқилади (1—2 нуқталар оралиғи). Сиқилган ҳаво ёниш камерасига клапанлар панжараси орқали киритилгандан кейин унга ёқилғи пуркалади ва улар аралашиб иш ёқилғиси ҳосил қилади (2—3 нуқталар оралиғи). Ташқаридан иссиқлик, свеча контактлари орасида ҳосил бўлган учқун сифатида, ёқилғига киритилади ва у портлаб ёнади (3—4 нуқталар оралиғи). Ёниш камераси ҳамма томондан ёпиқ бўлганлигидан ёниш жараёни изохорик бўлади. Шунда ёниш маҳсулотининг босими ва температураси ортади. Шундан сўнг конфузور билан ёниш камераси чегарасидаги тўсиқ очилади ва юқори босимли ёниш маҳсулоти аввал конфузорда, сўнгра тутун газлари трубазида адиабатик кенгайиб (4—5 нуқталар оралиғи) атмосферага чиқади. Ёниш маҳсулотининг катта тезликда оқиб чиқиши натижасида ёниш камерасидаги газлар сийраклашади, яъни вакуум ҳосил бўлади. Бу эса панжарадаги клапанларни очади ва ёниш камерасига янги ҳаво оқими киради. Цикл тақрорланади.

ПХРД циклининг бажарган иши ва ФИК юқорида келтирилган формулалар ёрдамида аниқланади.

10.5. Ракета двигателлари

Ракета двигателлари қаттиқ ва суюқ ёқилғиларда, ядро ёқилғиларда ишлайди. Ракета двигателлари (РД)

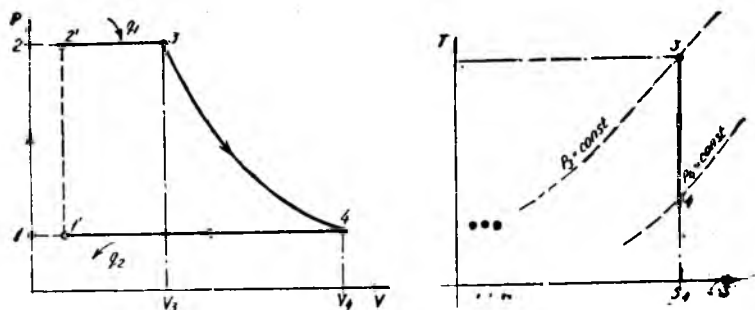


75-расм. Суюқ ёқилғида ишлайдиган РДнинг схематик тасвири.

дан бири 75-расмда тасвирланган. Ракета двигателларида атмосфера ҳавосидан оксидловчи сифатида фойдаланилмайди. Реактив куч иш моддаси (ёниш маҳсулоти, зарралар) оқимининг ортиб бориши ҳисобиغا пайдо бўлади. Иш жисмининг турига кўра РДлар кимёвий, электр, қаттиқ, қаттиқ ҳам суюқ ёқилғида, лазер, фотон билан ишлайдиган хиллари бўлади. Суюқ ва қаттиқ ёқилғида ишлайдиган РДлар кўпроқ тарқалган. РД ларнинг ўлчами бир неча сантиметрдан бир неча ўн метрга, массаси эса бир неча ўн грамдан бир неча юз тоннагача боради. РД бир ва бир неча босқичдан ҳамда бошқариш системаларидан тузилган.

РД лари ишлатилишига кўра ҳарбий, метеорологик (об-ҳавони кузатиш), космик турларга бўлинади. РД ларнинг асосий қисмини ёниш камераси 9, сопло 8, камерани совитувчи ракета «ғилофи» 7 ташкил этади. Ёқилғи ва оксидловчи идишлар 3 ва 2, уларнинг насослари 4 ва 13, турбина 1 ва унинг редуктори 5, иш моддаси 6 ҳамда ёқилғини оксидловчи 14 ва совитувчи 12 ни узатувчи трубалар, ёқилғи 10 ва оксидловчи 11 форсункалардан иборат аппаратлар РД нинг олд қисмида жойлашган.

РД нинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар иккита изобара ва битта адиабатадан иборат. Чунки ёниш камерасига узатилган иш ёқилғиси ҳажми унинг ёниш маҳсулоти ҳажмига тенг. Шунинг учун иш ёқилғисининг сиқилишга сарфланган иши эътиборга олинмайди (суюқ ёқилғи сиқилмайди, оксидловчи идишда сиқил-



76-расм. $PД$ циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

ган ҳолатда сақланади). Бу ҳолат идеал циклга яқин деб қаралса, сиқиш жараёни изохорик бўлиб, унинг бошланиши координата ўқида ётади (76-расм, 1—2 нуқталар оралиғи).

Иш ёқилғиси $P = \text{const}$ да унга киритилган q_1 иссиқлик ҳисобига ёнади. Ёниш маҳсулоти ўз ҳажмини маълум параметрларгача ўзгармас босим остида, 2—3 нуқталар оралиғида ўзгарилади, сўнг соплорга ўтади ва унда адиабатик тўлиқ кенгайди (3—4 нуқталар оралиғи). Атмосферага чиқарилган қолдиқ иссиқлик миқдори ҳаво билан иссиқлик алмашилиб мувозанат ҳолатига қайтади (4—1 нуқталар оралиғи). $PД$ циклининг бажарган иши асосан ёниш маҳсулининг адиабатик кенгайишида унинг энтальпиясининг ўзгаришига тенг бўлади, яъни

$$A_u = i_3 - i_4 \quad (297)$$

$$PД \text{ циклининг ФИК } \eta = \frac{A_u}{q_1} = \frac{i_3 - i_4}{q_1}.$$

Иш ёқилғисига узатилган q_1 иссиқлик миқдори ёниш маҳсули ($P = \text{const}$ да) энтальпиясининг (2—3 нуқталар орлиғи, PV — диаграмма) ўзгаришига тенг, яъни $i_3 - i_2 = \Delta i$.

$$\text{Унда } \eta = (i_3 - i_4) / (i_3 - i_2). \quad (298)$$

Шундай қилиб, $PД$ циклининг термик ФИК иш моддаси энтальпиялари ўзгаришларининг нисбатига боғлиқ экан. Лекин газнинг соплодан оқиб чиқишидаги кинетик энергияси билан боғлиқлиги эътиборга олинса, бажарилган ишни $A = mv^2$ кўринишида ифодалаш мумкин. Унда ФИК η қуйидагича ифодаланади:

$$\eta = \frac{v^2}{2q}. \quad (299)$$

XI боб. ИССИҚЛИК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРИ

Органик ёқилғи ёнганда ажраладиган иссиқлик энергиясини ўзгартириш натижасида ҳам иссиқлик, ҳам электр энергияси ишлаб чиқарадиган ишшоот и с с и қ л и к электр станцияси дейилади. Иссиқлик электр станция (ИЭС)лар иш ёқилғисининг турига кўра: қаттиқ, суюқ, газсимон ва аралаш ёқилғиларда ишлайдиган станциялар; иссиқлик двигателларининг турига кўра: буғ турбинали, газ турбинали, ички ёнув двигателли (дизель электр станцияси) станциялар; истеъмолчига узатадиган энергияси турига қараб: конденсацияли электр станциялари ва иссиқлик электр марказлари; қувват бериш услубига мувофиқ: асосий таъминловчи (йил давомида узлуксиз ишлайдиган) ва тигиз (энергияни истеъмол қилиш ортганда кескин ишлайдиган) станциялар бўлади, ИЭС ларга атом, гелио, геотермик электр станцияларни ҳам шартли равишда киритиш мумкин.

Мамлакатни электрлаштиришда ИЭС лар асосий электр манбаи ҳисобланади ва улар аҳоли зич яшайдиган жойларда, оғир ва енгил саноат, металлургия комбинатлари жойлашган жойларда кўпроқ қурилади. Ҳозирги вақтда уларнинг 2,4—3,6 ГВт дан юқори қувватлари қурилмоқда. ИЭС ларга дунёда ишлаб чиқариладиган электр энергиясининг 80% тўғри келади.

11.1. Конденсацияли электр станцияси (КЭС)

Бундай электр станцияси фақат электр энергиясини ишлаб чиқаришга мўлжалланган бўлади. КЭС истеъмолчи билан фақат электр энергияси орқали боғланган бўлиб, у аҳоли яшайдиган нуқталарда, саноат марказларида ва ёқилғи қазиб олинадиган жойларда қурилади. Туман учун мўлжалланган КЭС одатда ГРЭС (государственные районные электростанции) деб юритилади. ГРЭС лар кўплаб қурилган бўлиб, ҳозирги кунда ИЭС ишлаб чиқарадиган электр энергиясининг 2/3 қисми уларга тўғри келади. ГРЭС ларнинг қуввати жуда катта. Масалан, Экибастус кўмир ҳавзасида қурилган станциянинг бир гуруҳи 4000 МВт, Сирдарё ГРЭС ўнча блокдан иборат бўлиб, улар 3000 МВт электр энергиясини ишлаб чиқаради. ГРЭС ҳозирги кунда жуда катта қувватли (1 ГВт дан ортиқ) ва электр ҳалқа-

Иш бажариб бўлган ёниш маҳсули (ионлашган газ-плазма) таркибидаги зарраларнинг кинетик энергияси, яъни температураси жуда юқори бўлади, чунки улар фақат зарядини бериш даврида ўз температурасини озроқ пасайтиради, холос. Циклнинг ФИК ни орттириш учун шу иссиқлик миқдоридан самарали фойдаланиш зарур. Бунинг учун иссиқ газ оқими аввал регенератордан, сўнгра буғ генераторидан, қолдиқ иссиқлик миқдорининг маълум қисминини иссиқлик алмашинуви йўли билан сиқилган атмосфера ҳавосига ва буғ турбинаси циклига ўтказилади. Шунда ҳам иш жисми аралашмасини ҳосил қилувчи сиқилган ҳаво температурасини яна орттиради ва ёпиқ циклли буғ турбинаси қурилмасида қўшимча электр ва иссиқлик энергияси ишлаб чиқаради. Бу эса, умуман МГД генератори қурилмасининг ФИК орттиради. Фақат МГД генераторнинг ФИК 10—20% (Рязанда ишлаётган МГДГ, қуввати 250 МВт), унинг буғ куч қурилмасининг ФИК 30—40% ташкил этади. Жами ФИК 50—60%.

Албатта, термодинамик жараёнлар нуқтан назаридан иш бажариб бўлган иссиқ газ оқими қолдиқ иссиқлик миқдори ҳисобига қўшимча иш бажаради, чунки бу газ оқими тўла кенгайиб иссиқлигини узатиб бўлган эмас. Демак, ёниш маҳсулоти МГД генераторда адиабатик кенгайгандан сўнг, қолдиқ иссиқлик миқдорини аввал регенераторда, кейин буғ генераторида ва ниҳоят атмосфера ҳавоси билан иссиқлик алмашинуви мувозанат ҳолатга қайтади (4—5—6—7—1 нуқталар оралиғи). Цикл такрорланади.

МГД генератор қурилмаси циклининг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, сиқилган атмосфера ҳавосига регенерация усули билан иссиқлик келтирилганда, иш ёқилғиси кимёвий реакция ҳисобига қизиганда, регенерация бўлимида ёниш маҳсулидан маълум миқдордаги иссиқлик совиткичга чиқарилганда, тўла алмашинуви улгурмаган қолдиқ иссиқлик миқдори буғ генераторига ёниш маҳсулотидан ўтганда ва атмосферга чиқарилганда цикл энтропияси ўзгарувчан (2—3—4 ва 5—6—7—1 нуқталар оралиғи) бўлади. МГДГ қурилмасининг буғ турбинали иссиқлик куч қурилмаси қисми циклининг TS диаграммаси юқорида сув буғи учун қўлланилган қурилмалар циклинига ўхшаш. МГД генераторнинг бажарган иши ионлашган газ (плазма) оқимининг МГД

генератор каналига киришидаги ва ундан чиқишидаги энтальпиялари айирмасидан аниқланади:

$$A = \Delta l = i_k - i_c \quad (304)$$

Плазма назарияси анчагина мураккаб бўлса-да, Максвелл, Фарадей, Ленц, Дебай, Гиббс-Гельмгольц, Нернст, Стефан-Больцман, Лебедев П. Н. тадқиқотлари натижаларини унга қўллаб i_k ва i_c аниқланади. Албатта, плазма параметрлари P , V , T , S , i эркин энергия функциясига кирувчи катталиклар деб қаралади.

Плазма оқими икки, уч ва кўп компонент (таркибий қисм) лардан ташкил топиши мумкин. Шунинг учун плазма параметрларини аниқлашда ҳар бир компонент улушларининг йиғиндиси олинади. Юқоридагилар асосида (исботсиз) МГД генератордаги плазма энтальпиялари қуйидагича ифодаланади:

$$i_k = \frac{1}{\mu_k P_k} \sum_1^n i_{ik} P_{ik}; \quad i_r = \frac{1}{\mu_r \cdot P_r} \sum_1^n i_{ir} P_{ir}, \quad (305)$$

$$\text{у нда } \mu_k = \frac{1}{P_k} \sum_1^n \mu_{ik} \cdot P_{ik} \text{ ва } \mu_r = \frac{1}{P_r} \sum_1^n \mu_{ir} \cdot P_{ir},$$

$\mu_i, P_i i_i$ — плазма компонентларига мос равишда уларнинг молекуляр оғирлиги, босими ва энтальпияси.

Агар плазма оқими мувозанатлашган деб қабул қилинса, унинг энтропияси МГД генераторнинг киришида ва чиқишида ўзаро тенг бўлади, яъни $S_k = S_r$. Унда плазма параметрларидан P ва T ўзгариши эҳтимоллиги мавжуд бўлади. Лекин МГД генератор каналидаги плазма оқимининг босими ўзгармас, чунки жараён изобарик. Шу сабабли МГД генераторга кираётган ва ундан чиқаётган оқим температуралари айирмасидан энтальпия ўзгарувчанлигини аниқлаш мумкин:

$$\Delta i = \int_{T_k}^{T_r} C_p dT = C_p (T_r - T_k), \quad (306)$$

бунда $C_p = \left(\frac{\partial i}{\partial T} \right)_p \cong \left(\frac{\Delta i}{\Delta T} \right)_p$ — плазма оқимининг T_k ва T_r оралиғидаги ўртача иссиқлик сифими.

Биз юқорида таъкидладикки, МГД — генератордан ўтаётган плазма оқими адиабатик кенгайди, у ҳолда температуралар нисбатини шу жараён учун ёза оламиз:

$$\frac{T_k}{T_r} = \left(\frac{P_r}{P_k} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Унда, МГД генератор иши қуйидагича ифодаланади:

$$A = \Delta i = \frac{\kappa-1}{\kappa} RT_r \left[\left(\frac{P_k}{P_r} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (307)$$

МГД генератор қурилмаси циклидаги ФИК ни аниқлашда, албатта унинг ҳар бир жараён кечадиган қисмларига берилган (ёки ҳосил бўлган) ва ундан чиқадиган иссиқлик миқдорларини ҳисобга олиш шарт. Чунки компрессорда ҳаво сиқилганида, ёниш камерасидаги кимёвий реакциянинг боришида, МГД генератор каналидаги ионлашган газ (плазма) нинг электр ўтказувчанлиги натижасида ва ташқи муҳитга иссиқликнинг чиқишида ҳамда регенерация (иссиқлик алмашинуви) да пайдо бўлган ва чиқарилган иссиқлик миқдорлари ҳисобга олинса, МГД генератор қурилмаси циклининг ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_t = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) - (q_5 + q_6)}{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)}, \quad (308)$$

бунда $q_1 = C_p (T_r - T_k) (1 - \eta_k)$ — компрессорда сиқилган атмосфера ҳавосининг қизишда вужудга келган иссиқлик миқдори; T_k ва T_r — ҳавонинг компрессорга кириши ва чиқишидаги температуралари; η_t — компрессорнинг ФИК; $q_2 = C_p (T_3 - T_2)$ — регенерация вақтида сиқилган атмосфера ҳавосига келтирилган иссиқлик миқдори; $T_2 = T_r$ — регенерация бўлмаси киришидаги сиқилган ҳаво температураси; T_3 — регенерациядан чиққан, сиқилган ва қиздирилган ҳаво температураси; $q_3 = C_p (T_4 - T_3)$ — ёниш камерасидаги кимёвий реакция ҳисобига пайдо бўлган иссиқлик миқдори; T_3 ва T_4 — ёниш камерасига узатилган сиқилган ҳамда қиздирилган ҳаво ва ёниш маҳсулининг ёниш камерасини чиқишидаги температуралари; $q_4 = C_p (T_4 - T_5)$ — МРД генератор каналидаги плазма оқимининг электр ўтказувчанлиги ҳисобига пайдо бўлган иссиқлик; T_4 ва T_5 — МГД генератор каналига кираётган ва ундан чиқётган ионлашган газ (плазма) оқимининг температуралари; η_s — МГД генераторнинг электр ишлаб чиқариш ФИК;

$q_s = C_p (T_4 - T_5) \frac{1 - (\eta_s - \xi)}{\eta_s - \xi}$ — МГД генератор каналидаги ионлашган газ оқимининг ташқи муҳит билан ис-

сиқлик алмашинувида исроф бўлган иссиқлик миқдори; ξ — ионлашган газ (плазма) нинг иссиқлик алмашинувида пайдо бўлган исрофларни ҳисобга олувчи коэффициент; $q_6 = C_p (T_5 - T_1)$ иссиқлик алмашинувида (регенерация ва буғ генератори бўлмаларида ҳамда атмосферада) муҳитга чиқарилган иссиқлик миқдори; T_5 ва T_1 — муҳитнинг (регенерация бўлмасига кираётган сиқилган ҳавонинг, буғ генераторидаги буғнинг ёки атмосфера ҳавосининг) бошланғич ва охириги температуралари.

МГД генератор қурилмаси циклининг аниқ нуқталаридаги температуралар орқали унинг ФИК ифодаланганда, $\eta_c = \eta_s = 1$ ва $\xi = 0$ шарт қабул қилиниб, $q_1 = q_6$ қийматни (257) тенгламага қўйиб, сўнггра ихчамлаб қўйидагини ҳосил қиламиз:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_4 - T_2}. \quad (309)$$

Реал циклларнинг PV ва TS диаграммалари келтирилган цикллар диаграммаларига нисбатан маълум даражада фарқ қилади.

МГД генератор қурилмаси циклининг ФИК иш моддаси энтальпиясининг ўзгарувчанлиги орқали ифодаланса, уни қўйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\eta_{it} = \frac{m [(i_1 - i_5) - (i_2 - i_1)] + (i_1 - i_{III})}{m (i_1 - i_4)}, \quad (310)$$

$$\text{бунда } m = \frac{(i_1 - i_{III}) l}{(i_6 - i_2) \mu_{ог}};$$

$\eta_{ог}$ — буғ генераторининг ФИК.

Берк схемали МГД генератор қурилмасининг циклида содир бўладиган жараёнлар очиқ схемалисиникига қараганда анча мураккаб бўлиб, тузлиши жиҳатдан атом реактори ва махсус совиткичи билан фарқ қилади (82-расм). Ишлатиладиган ёқилғининг тури ва унинг берк контур бўйлаб айланиши билан ажралиб туради. Кечадиган термодинамик жараёнлар очиқ схемали МГД — генераторникига ўхшаш бўлса-да, циклга келтириладиган q_1 иссиқлик миқдори атом реакторидан олинади. Ионлашган газ — гелий температураси 2480 К га етади. Иш бажариб бўлган ионлашган газ таркибидаги қолдиқ q_2 иссиқлик миқдори, аввал буғ генераторига, сўнггра совиткичга узатилади. Натижада газ ҳолатидаги иш моддаси температураси мўътадил ва ундан

ўтаётган ток кучи; τ — Томсон коэффициент; t — токнинг ўтиш вақти.

Бу эффект 1856 йилда Томсон лорд Кельвин Уильям томонидан аниқланган бўлиб, термоэлектр (иссиқликни тўғридан-тўғри электрга айлантириш) ҳодисаларида қўлланилади.

Юқорида қисқагина таърифланган учала эффектлардан маълум бўладики, улар ўтказгич учлари оралигида температуралар фарқи мавжуд бўлганда ўринли бўла олади. Агар берк ўтказгичдан иссиқлик контакт (иссиқлик ўтказувчанлик) усули бўйича узатилса, ҳамда dT фарқ бўлса, у ҳолда занжирдаги қувват Пельтье ва Томсон иссиқликларига сарфланади. Бу термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ қуйидагича ифодаланади:

$$\alpha_{1-2} dT dI = (\tau_1 - \tau_2) dI dT + (\Pi_1 - \Pi_2) dI. \quad (315)$$

Пельтье коэффициентининг температура функцияси эканлиги эътиборга олинса, у ҳолда

$$\alpha_{1-2} = (\tau_1 - \tau_2) + \frac{\partial \Pi_{1-2}}{\partial T} \quad \text{бўлади.}$$

Содир бўладиган жараён қайтар жараён деб олинса, термодинамиканинг иккинчи қонунига мувофиқ система энталпиясининг йиғиндиси нолга тенг бўлади, яъни

$$\sum_i \frac{dq_i}{T_i} = 0. \quad (316)$$

Шунинг учун бу эффектларнинг йиғиндиси ҳам нолдан катта бўлмайди:

$$\frac{\tau_1 - \tau_2}{T} dT dI + \frac{\Pi_1}{T_1} dI - \frac{\Pi_2}{T_2} dI = 0 \quad (317)$$

Бу тенглама айрим соддалаштиришлардан сўнг қуйидаги кўринишга келади:

$$(\tau_1 - \tau_2) - \frac{\Pi_{1-2}}{I} + \frac{\Pi_{1-2}}{dT} = 0, \quad (318)$$

чунки
$$\frac{\Pi_1}{T_1} - \frac{\Pi_2}{T_2} = d \left(\frac{\Pi_{1-2}}{T} \right) = \frac{d\Pi_{1-2}}{T} - \frac{\Pi_{1-2}}{T} dT.$$

Демак, юқоридагилар асосида Пельтье коэффициенти қуйидагича ёзамиз:

$$\Pi_{1-2} = \alpha_{1-2} T. \quad (319)$$

Энди, иссиқлик ЭЮК билан Пельтье коэффициенти

орасидаги боғланиш асосида Томсон коэффициентини ҳам ёзиш мумкин:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{T} (\tau_1 - \tau_2),$$

Чунки

$$\frac{\partial P_{1-2}}{\partial T} = \alpha_{1-2} + T \frac{\partial \alpha_{1-2}}{\partial T}. \quad (320)$$

Юқорида қаралаётган эффектларга қайтмас термодинамик жараёнларни татбиқ этиб ҳамда Жоуль иссиқлиги ва иссиқлик ўтказувчанлиги эътиборга олинганда келтирилган эффектлар тенгламаларини яна ҳам аниқроқ ифодалаш мумкин.

Термоэлементнинг берк занжири учун Ом қонуни, яъни ток кучи ифодасини ёзамиз:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (321)$$

бунда E — занжиридаги ЭЮК; R ва r — занжирнинг ташқи ва ички электр қаршиликлари.

Занжирдаги ЭЮК занжирда қўлланилган ўтказгич турига ва унинг температурасига боғлиқ бўлади. Шунинг учун уни температуралар оралиғи T_1 ва T_2 га мос равишда ёзамиз:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} \alpha(T) dT. \quad (322)$$

Агар $\alpha = \frac{\alpha_1(T_1) + \alpha_2(T_2)}{2}$ бўлса, у ҳолда

$$E \cong \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{бўлади.}$$

Шунинг учун занжирдаги иссиқлик ЭЮК қийматини Ом қонуни ифодасига қўйиб ва $m = \frac{R}{r}$ юкланиш даражасини (нагрузка) белгилаб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$I = \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{r(m + 1)}. \quad (323)$$

Энди, иссиқлик ЭЮК ҳосил бўладиган занжирнинг фойдали қувватини ва контакт учларидаги потенциаллар айирмасини ёзамиз:

$$N = I^2 R = \frac{\alpha^2 (T_1 - T_2)^2 \cdot m}{r(m + 1)^2},$$

$$V = \frac{\alpha(T_1 - T_2) \cdot m}{(m + 1)}. \quad (324)$$

Электр занжирининг бир қисмидаги иссиқлик ЭЮК нинг термик ФИК, конвекция ва нурли иссиқлик ўтказувчанликлар ҳисобга олинмаса, уни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_t = \frac{N}{\sum_k q_{\text{сарф}}} = \frac{N}{q_n(T_1) + q_{\text{исс}} - 0,5 q_{\text{ж}} \pm \Delta q_T}, \quad (325)$$

бунда $q_{\text{исс}}$ — иссиқлик ўтказувчанлик (контакт) бўйича узатилган иссиқлик миқдори; q_n , $q_{\text{ж}}$ ва q_T — мос равишда Пельтье, Жоуль ва Томсон иссиқлик миқдорлари бўлиб, улар қуйидагича ифодаланади:

$$q_n(T_1) = \Pi I = \alpha T_1 I = \alpha^2 T_1 \frac{(T_1 - T_2)}{r(m+1)};$$

$$0,5 q_{\text{ж}} = 0,5 I^2 r = \frac{\alpha^2 (T_1 - T_2) \cdot 0,5}{2 r T_1 (m+1)^2};$$

$$\Delta q_T = I \int_{T_2}^{T_1} \tau''(T) dT - I \int_{T_1}^{T_2} \tau'(T) dT = I \int_{T_1}^{T_2} (\tau'' - \tau') dT,$$

$$\text{агарда} \quad \alpha(T_1) = \alpha(T_2) = \alpha_{\text{урт}}$$

тенглик эътиборга олинса, у ҳолда Томсон иссиқлиги бошқача кўринишда ифодаланади, яъни:

$$\begin{aligned} \Delta q_T &= I \int_{T_2}^{T_1} \left(-T \frac{d\alpha}{dT} \right) dT \cong I T_{\text{урт}} \int_{T_2}^{T_1} (-d\alpha) = \\ &= I T_{\text{урт}} [\alpha(T_1) - \alpha(T_2)] = 0. \end{aligned}$$

$$q_{\text{исс}} = k(T_1 - T_2) = (\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) \frac{1}{e} (T_1 - T_2), \quad (326)$$

бунда k — иссиқлик элементининг иссиқлик ўтказувчанлиги.

Юқорида келтирилган эффектлар асосида ясалган иссиқлик электр генераторларининг ўлчами жуда кичик бўлиб, оғирлиги 100 г атрофида, уларнинг қуввати 100—150 Вт, кучланиши 1—3 В, ФИК 7—20% ташкил этади ва замонавий автоматик бошқариш системаларида ҳамда фан ва техникада кенг татбиқ этилади.

11.5. Термоэмиссион генератор

Бу иссиқлик энергияси таъсирида металллар сиртидан электронларнинг учиб чиқиш ҳодисасига асосланган ге-

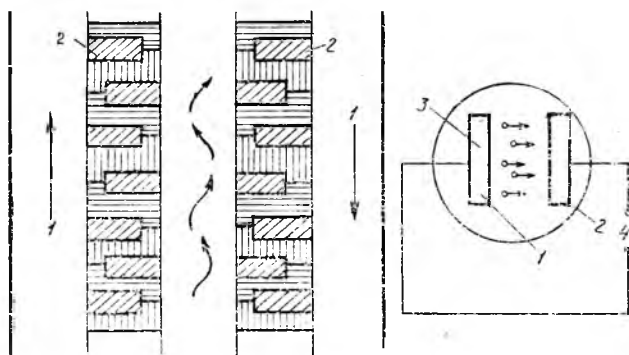
нератордир. Термоэмиссион (therme — иссиқлик, emission — чиқармоқ) ҳодисаси Ричардсон эффе́ктига, яъни иссиқлик таъсирида эмиссион тоқнинг ҳосил бўлишига асосланган бўлиб, иссиқлик энергиясини тўғридан-тўғри электр энергиясига айлантирувчи генераторларда қўлланилади. Энг содда иссиқлик электрон ўзгартгич бир-бирига жуда яқин жойлаштирилган иккита металл сиртлардан иборат бўлиб, уларнинг бири электронлар оқими (қиздирилган сирт) ҳосил қилса, иккинчиси шу электронларни қабул қилади. Тузилиши жиҳатидан диод лампага ўхшаш (82-расм).

Қиздириладиган металл сиртлар катод, электронларни қабул қилувчи сиртлар эса анод дейилади. Катод қиздирилганда маълум температурагача унинг сиртидан учиб чиқадиган электронлар сони ортиб боради, сўнгра тўхтайди, яъни занжирда тўйиниш тоқи ҳосил бўлади.

Ҳосил бўлган эмиссион тўйиниш тоқининг қиймати-ни ҳисоблашда Ричардсон-Дёшман тенгламасидан фойдаланилади, яъни

$$j_s = \frac{I}{S} \overline{A} B T^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (327)$$

бунда I — ток кучи; S — электронлар чиқадиган металл сиртнинг бирлик юзаси; B — назарий ҳисоблаб аниқланган ($1,2 \cdot 10^6$ а/м²·град²) кўпайтирувчи — эмиссия доимийси; A — электроннинг ўрганилаётган металлдан чиқиш иши; k — Больцман доимийси; T — катоднинг абсо-



82-расм. Иссиқлик энергиясини электр энергиясига айлантирувчи қурилмаларнинг схематик тасвирлари: а — ярим ўтказгичли иссиқлик электр генератори; б — иссиқлик электрон (ион) генератор.

лют температураси; D — металл-вакуум чегарасидаги электрон тўлқин учун потенциал тўсиқининг ўртача шаффофлиги. Занжирдаги ток зичлигини орттириш учун, албатта катод температураси 1800—2000 К гача кўтарилиши зарур. Шунда занжирдаги ток зичлиги $j = 1000 \text{ а/м}^2$ га етади.

Термоэлектрон генераторлардаги ток зичлигининг катод температурасига ва анод-катод оралиғидаги масофага боғлиқлиги қуйидагича ифодаланади:

$$j = \frac{7.73 \cdot 10^{-12} T^{3/2}}{d^2} \left[\text{а см}^2 \right] \quad (328)$$

d қиймат (анод-катод орасидаги масофа) ортган сайин, ток зичлиги камаяди, шунинг учун ҳам ҳозирги кунда фойдаланиб келлинаётган генераторларнинг анод-катоди орасидаги масофа 10 микрондан ортмайди. Термоэлектрон генераторларнинг ФИК ни занжирга берган қувват ва катод иссиқлиги орқали ифодалаш мумкин:

$$\eta = \frac{N}{q_k}, \quad (329)$$

бунда $N \approx IV_R$; V_R — қаршиликларда кучланишнинг тушиши;

$$q_k = I\varphi_k + I(V_{\text{тирқ}} + \varphi_a + V_R - \varphi_-) + W_{\text{т}} + q_{\text{исроф}};$$

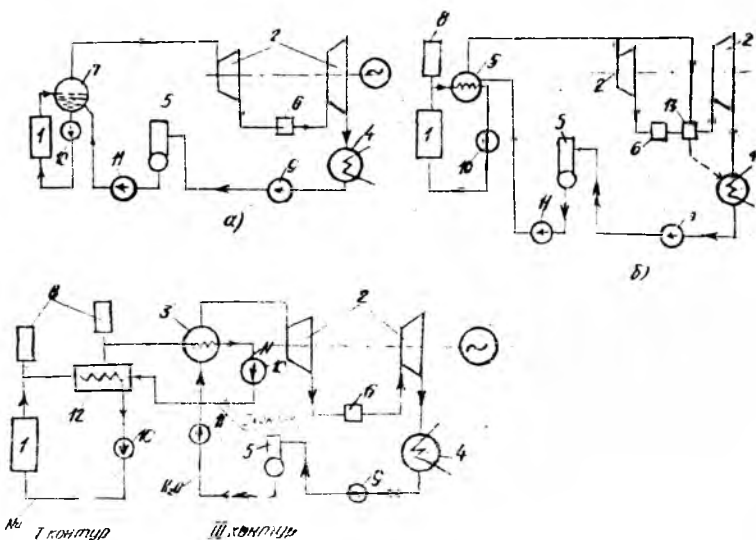
φ_k ва φ_a — катод ва аноднинг чиқариш потенциаллари;

$V_{\text{тирқ}}$ — анод-катод оралиғидаги тирқишда потенциалнинг тушиши; $q_{\text{исроф}}$ — иссиқлик исрофи.

Иссиқлик электрон генераторининг ФИК 10% атрофида бўлса-да, улар юқори температураларда ишлайди. Шунинг учун кам қувватли ва кучланишли, юқори температурали иссиқлик машиналарида кенг қўлланилади.

11.6 Атом электр станцияси

Ҳозирги кунда жаҳон энергетикасида нефть ва газнинг улуши 50% атрофида, кўмирники 35% ни ташкил этади, қолган 15% энергия гидро, атом ва бошқа электр станцияларга тўғри келади. АЭС атом энергиясини электр энергиясига айлантирувчи станция бўлиб, у атом реактори, паст ва юқори босимли регенератор, паст ва юқори босимли буғ турбиналар, конденсатор, электр генератор ва бошқа ёрдамчи ускуналар ҳамда автоматик контрол-ўлчаш асбоблари ва бошқариш системасидан ташкил топган (83-расм). Ҳозир дунёда 300 га яқин АЭС ишляпти. Бунга Воронеж, Белоярск, Санкт-Петербург, Шевченко, Кольск,



83-расм. Бир ва кўп контурли АЭС схемаси: а — бир контурли; б — икки контурли; в — уч контурли; 1 — атом реактори; 2 — буғ турбинаси; 3 — буғ генератори; 4 — конденсатор; 5 — деаэратор; 6 — сепаратор; 7 — буғ тўпланувчи идиш, 8 — ҳажми тўлдиргич; 9 — 10, 11 — конденсат, совиткич ва таъминловчи насослар; 12, 13 — оралиқ иссиқлик алмаштиргич ва буғ қиздиргич.

Курск АЭС ларини, атом музёарлари ва камалари («Саванна», «Бобкок-Вилкокс» ва ш. к.) мисол бўла олади.

Табиатда уран-235 изотопининг миқдори 0,72%, уран-238 ники 99,274%, уран-234 ники эса 0,006% ташкил қилади. АЭС ларда атом реакторида кечадиган бошқариладиган занжирли ядро реакцияси вақтида, асосан уран-233, уран-235, плутоний-239 атомлари ядроларининг парчаланиши натижасида иссиқлик энергияси ажраллади. Ядро реакциясида ажралган иссиқлик миқдори иссиқлик ташувчи (гелий, оғир сув, суюқ натрий) га узатилади, у биринчи берк контурда, яъни реактор ва ташқи иссиқлик алмаштиргич оралиғида насос ёрдамида мажбурий ҳаракатлантирилади. АЭСнинг иккинчи контуридаги жараёнлар ИЭС ларидагидай кечади.

Атом электр станцияларининг сув-сув энергетик реактори (ССЭР), суюқ металл энергетик реактори (СМЭР) мавжуд бўлиб, улар сув, суюқ металл ва су-юлтирилган газлар билан совитилади.

Энергетикада, транспортда ва космонавтикада (Топаз) иссиқлик энергиясининг манбаи сифатида ҳар хил қувватдаги атом реакторлари қўлланилади.

Атом реакторлари нейтронларнинг спектрига кўра тезкор, иссиқлик ва оралик, яъни тез нейтронлар (100 кэВ) энергияси иссиқлик ҳаракати энергияси (0,025 эВ) га тенг бўлган нейтронлар ва энергияси 1 эВ дан бир неча кэВ гача бўлган нейтронлар таъсирида занжирли ядро реакцияси борадиган турларга бўлинади.

Атом реакторларининг иш моддаси ядро ёқилғиси бўлиб, уларга занжирли реакция вақтида парчаланадиган табиий уран-235 (иссиқлик нейтронларида парчаланади) ва сунъий уран-233, плутоний-239 (тез нейтронларда парчаланади) кирилади. Сунъий ядро ёқилғисининг ҳам ашёси деганда торий-232 ва уран-238 тушунилади. Чунки бу ядролар биттадан нейтрон ютади ва иккитадан беш заррасини чиқариб бошқа турдаги кимёвий элементга, яъни

$\text{Fh}^{232} + n' \rightarrow \text{X}^{233} \rightarrow 2\beta \rightarrow \text{U}^{233}$ ва $\text{U}^{238} + n' \rightarrow \text{X}^{239} \rightarrow 2\beta \rightarrow \text{Pu}^{239}$ айланади.

Ядро куч қурилмаларининг асосини атом реактори ташкил этади. Ядро куч қурилмалари электр энергиясини ишлаб чиқаришда (АЭС), музёран, сув ости кемаларида, самолётларда, локомотивларда, ядро реактив двигателларида қўлланилади.

АЭС ларда асосан электр ва иссиқлик энергиялари ишлаб чиқарилади. Улар тўзлиши жиҳатидан иссиқлик куч қурилмаларига ўхшаш.

Атом реактори бошқариладиган занжирли ядро реакцияси кечадиган ва реакция бир меъёрга сақлаб туриладиган қурилма. У каструлқасимон зангламайдиган идлиш бўлиб, унинг ичига иссиқлик ажратувчи элементлар, бошқариш стерженлари, совиткич модда ҳамда нейтронларни қайтаргич маълум тартиб-қоида бўйича жойлаштирилади. Иссиқлик ажратувчи элементлар шахмат тартибда, нейтронларни қайтаргичлар (графит) ички девори реакторнинг сирти бўйлаб жойлаштирилади. Совиткич вазифасини оғир сув, суюқ металл ва суюлтирилган газ (водород, гелий) бажаради. Оғир сув уз навбатида нейтронларни сусайтиргич вазифасини ҳам ўтайди. Бошқариш стерженлари нейтронлари етишмайдиган кимёвий элементлардан ва лантаноидлар гуруҳидаги элементлар қотишмаларидан тайёрланади ва уларнинг асосийси реактор қозони марказига қолганлари иссиқлик

ажраткич элементлари гуруҳи ўртасига шахмат тартибида жойлаштирилади. Бошқариш стерженлари кадмий, индий, самарий, европий, гольмий ва ш. к. элементлар қотишмаларидан тайёрланади. Бу стерженлар юқорига кўтарилган сайин занжирли ядро реакцияси жадаллашиб боради ва реакторда жуда кўп миқдорда иссиқлик ажралиб чиқади. Бу иссиқликни ташқарига биринчи берк контурда мажбурий равишда насос 10 ёрдамида айланадиган совиткич (сув, суюқ металл, суюлтирилган газ) чиқаради (83- расм). Совиткичдаги иссиқлик миқдори шу даражада юқори (550 К) бўлганлигидан у тўғри буғ генератори 3 га узатилади. Буғ генераторида ҳосил қилинган қуруқ қиздирилган буғ юқори босимли буғ турбинасига йўналтирилади. Иш бажариб бўлган ва маълум даражада босими, температураси пасайган буғ юқори босимли буғ турбинасининг чиқишидан олиниб сепаратор ва буғ қиздиргич орқали кўп босқичли паст босимли буғ турбинасига йўналтирилади.

Умуман олганда, АЭС нинг охириги берк контурида кечадиган жараёнлар ИЭС лариники кабилдр.

Биринчи берк контурдаги совиткичнинг температура-си реактордан чиққанда 550 К атрофида, буғ генераторидан кейин эса реактор турига қараб, 360—460 К атрофида бўлади.

АЭС лар бир, икки ва уч контурли бўлади: бир контурлида сув буғи атом реакторида ҳосил қилинади (83- расм, а) ва унда радиоактив моддалар бўлиши мумкин. Биринчи берк контурдаги радиоактив моддаларнинг иккинчи контурга ўтиш эҳтимоли йўқ (83- расм, б, в). Биринчи берк контурдаги совиткич иккинчи берк контур учун иссиқлик манбаи вазифасини бажаради. Кўпчилик икки контурли АЭС ларнинг биринчи контурида иссиқлик ташувчи вазифасини оғир сув (иссиқлик нейтронларида реакция борганда) ва суюқ натрий (тез нейтронларда реакция борганда) бажаради; уч контурли АЭС да биринчи ва иккинчи берк контурлардаги иссиқлик алмаштиргич (совиткич) вазифасини суюқ натрий, учинчи контурда эса оддий сув бажаради (83- расм, б, в).

АЭС ларнинг ФИК 40% атрофида бўлиб, ишлаб чиқариладиган электр энергиясининг таннархи ИЭС лариники каби, яъни 0,5 тийин (кВт·соат. 1991 й. ҳисобида), АЭС ларининг ҳар бир агрегати 1000 ва ундан юқори МВт қувват беради.

Замонавий АЭС ларида 1 млн. кВт·соат электр энергияси ишлаб чиқариш учун ўртача 200 г уран элементи ядро реакцияси вақтида ёқилади. Худди шунча миқдордаги электр энергиясини ИЭС ишлаб чиқариш учун тақрибан 400 т. кўмир ёқиш керак бўлади.

Ҳозирги даврда совуқ минтақаларда АИЭМ (атом иссиқлик электр марказлари) ишлайпти. Бунга Россия территориясида жойлашган Чукотка, Билинск станцияларини мисол қилиш мумкин. АЭС лари ишлаб чиқараётган электр энергияси унча арзон бўлмаса-да, ёқилғи кам сарфланиши билан ажралиб туради. Иш муддати нуқтаи назаридан ишлатиб бўлинган иссиқлик ажратгич элементларини, албатта алмаштириш керак бўлади. Бу иссиқлик ажратгич элементлари радиоактив моддалардан ташкил топганлиги сабабли улар бирор радиоактив моддалар қабристонига узоқ йиллар (1 млн. йил ва ундан ортиқ) герметик ҳолатда сақланиши керак. Ҳозирги кунда ҳам радиоактив моддаларни сақлаш масаласи узил-кесил ечилган эмас. Экологик нуқтаи назардан қараганда АЭС лардан мутлақо фойдаланиш керак эмас. Турли мамлакатларда атом реакторларидан ҳар хил сабабларга кўра радиоактив моддалар чиқиб (Чернобиль, Три-Майл-Айленд АЭС ларидаги авариялар ва ш. к.), табиатга ва одамларга катта зарар етказаяпти. Радиоактив чиқиндилар тўпланиб қоляпти.

11.7. Термоядро синтез энергетикаси

Табиатда органик ёқилғи захираси камайиб бораётганлиги, атом электр станцияларининг экологик жиҳатдан талабга жавоб бермаслиги гелио ва геотермал станциялар ФИК нинг пастлиги ҳисобга олинганда экология нуқтаи назаридан тоза электр энергияси манбаини яратиш муаммоси ўз ечимини кутмоқда.

Бу муаммонинг ечими термоядро энергетикасини яратишдан иборат. Термоядро синтез реакцияси 1930 йилларда аниқланган бўлиб, у Қуёш ва юлдузларда водород ва гелий ядроларининг қўшилиши натижасида содир бўлади.

Дунё океанларидаги водород ва дейтерий захираси 0,015% ни ташкил қилади. Бу захира бир неча миллион йилларга етарли. Масалан, 1 г термоядро ёқилғиси 1 кг тошкўмир энергиясига нисбатан $5 \cdot 10^7$ марта кўпроқ энергия беради ёки ичимлик сувининг бир литри-

дан ажратилган дейтерийни ёқишдан ҳосил бўлган иссиқлик энергиясининг миқдори 300 кг нефтни ёққанда ажратилган энергияга тенг.

Бошқариладиган термоядро синтез реакцияси енгил кимёвий элемент — водород изотопларини, яъни дейтерий ва тритийни бир-бирига қўшиш (синтез қилиш) натижасида радиоактивликдан озод бўлган энергияни олишдан иборат.

Термоядро реакцияси экзотермик бўлганлиги учун реакция вақтида катта миқдорда иссиқлик энергияси ажралади.

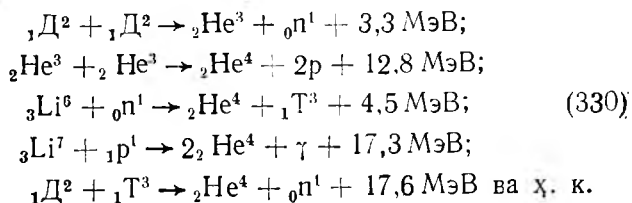
Синтез реакциясини амалга ошириш учун қўшилиши керак бўлган кимёвий элементлар ядроларини бир-бирига ядро кучлари таъсир этадиган даражадаги масофагача, яъни $r_n = 10^{-15}$ м яқинлаштириш керак. Ядролар мусбат зарядли эканлиги ҳисобга олинса, албатта улар ўртасида бир-бирини итарувчи кулон кучи мавжуд. Уларни 10^{-15} м масофагача яқинлаштириш учун албатта бу кулон кучининг потенциал тўсиғини енгувчи энергияни синтезланувчи изотоплар ядролари ташқаридан олиши шарт. Бундай энергия иссиқлик энергияси ҳисобланади.

Инсоният Ерда атом бомбасини, сўнгра водород бомбасини кетма-кет портлатиб, бир неча миллион градус температурани олиш мумкинлигини исботлади.

Демак, енгил элементлар изотопларининг ядроларининг температураси 100 млн. К (10 кэВ)* ва ундан юқори бўлгандагина синтез реакциясини амалга ошириш мумкин экан.

Бундай юқори температурани ҳосил қилиш муаммоси бундан 36 йил муқаддам пайдо бўлган эди. Температура ортиб борган сайин ядроларнинг қўшилиши (синтез) реакцияси жадаллашиб боради ва қўшилишлар сони ортади, кейин сусаяди.

Синтез реакцияларини қуйидагича ёзиш мумкин:



* 1 кэВ = $1,16 \cdot 10^7 \text{ К}$.

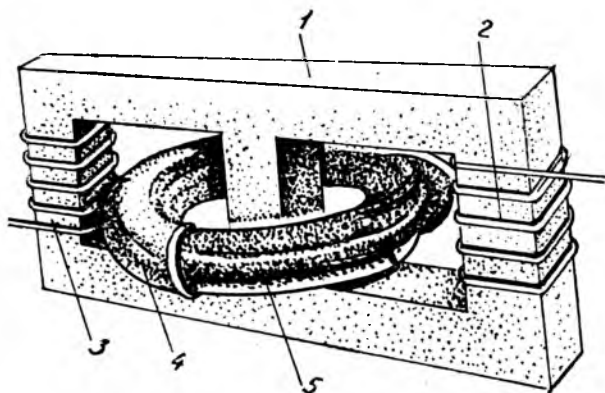
Плазманинг ички энергияси E дан термоядро синтез реакцияси энергияси E_c катта, яъни $E_c > E$ бўлиши учун плазма температураси камида 10 кэВ ва бир сантиметр куб (1 см^3) плазма ҳажмида 10^{14} та синтез реакцияси юз бериши керак. Бундай шарт термоядро реакцияси физикавий критерийсн чегараси, яъни Лоусон критерийси дейилади.

Плазмани тутиб туриш ва синтез реакциясининг узлуксизлигини таъминлаш масаласи анчагина мураккаб бўлса-да, у уч йўналишда давом этмоқда: магнит майдони ёрдамида плазма ипи тороид камерасида тутиб турилади. Плазмадан электр токини ўтказиш йўли билан плазма ипи атрофида кучли магнит майдони ҳосил қилинади. Бу майдон плазма ипини сиқади, натижада унинг температураси бир неча ўн млн. К га етади.

Магнит майдони ёрдамида плазмани тороидал камерада тутиб туришнинг физик асосини академиклардан Л. А. Арцимович ва М. А. Леонтович таклиф қилган ва асослаганлар (84-расм).

Ҳозирги вақтда термоядро синтез реакцияси «ТО-КАМАК» қурилмаларида амалга оширилган бўлиб, уни бошқариш вақти секунднинг улушларини ташкил қилади.

Лазер ёрдамида термоядро синтез реакциясини бошқариш йўналиши 1960 йили академик Н. Г. Басов ва



84-расм. Тороид шаклидаги камера: 1 — темир ўзак; 2 — бирламчи чулғам; 3 — иккиламчи чулғам; 4 — тороид камераси; 5 — плазма ипи.

проф. О. Н. Крохинлар томонидан таклиф қилинган эди. Ҳозирги кунда термоядро синтез реакциясини амалга ошириш мақсадида айрим қурилмаларда бу усул қўлланилмоқда.

Лазер ёрдамида термоядро синтез реакциясини амалга оширишда лазер нури импульс шаклида дейтерий-тритий «таблетка» сига йўналтирилади. Шунда, бу таблетканинг юқори қатлами ўта қисқа вақтда, яъни 10^{-8} секунд оралиғида, унинг температураси бир неча миллион градусга етади. Натижада, таблетка қатламида термоядро микропортлашлари содир бўлади. Бу термоядро микропортлашларида ажралган иссиқлик шу қадар катта бўладики, термоядро синтез реакцияси амалга ошириладиган термоядро реактори деворлари, ускуналари бундай иссиқликка чидамайди. Плазмани тутиб туриш ва уни термоядро реактори деворидан изоляциялашда кучли магнит майдонидан фойдаланилади.

Ҳосил қилинган микропортлаш термоядро синтез реакциясининг ёндирилиши ҳисобланади. Бу реакция вақтида енгил элементлар ядроларининг қўшилиши (синтези) содир бўлади. Натижада бу портлашларда ўта катта босим таъсирида таблетка сиртидаги зарралар жуда ҳам катта тезликка эришиб, термоядро ёқилғисини (дейтерий-тритий таблеткаси) сиқади ва қиздиради. Бу микропортлашлар даврий содир бўлиши (йўналтирилган лазер импульсига мос равишда) эътиборга олинса, у худди ички ёнув двигатели циклидаги термодинамик жараёнларга ўхшаш бўлади. Шунда иссиқлик энергияси даврий такрорланадиган микропортлашларда ажралади.

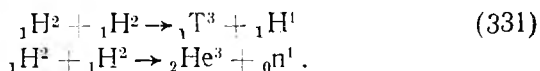
Аммо бошқариладиган термоядро синтез реакциясига сарфланадиган энергия миқдори, ҳозирги кундаги илмий тадқиқотларда, синтез вақтида ажралган энергиядан катта, яъни иқтисодий жиҳатдан зарарга ишламоқда, чунки ядролар ўртасидаги ўзаро итариш (кулон) кучларини енгил амалий тадқиқотларда осон бўлмаяпти.

Ядроларни синтез қилишнинг яна бир йўналиши — совуқ ядро синтез реакциясини паст температураларда (291—293 К) амалга ошириш мумкинлиги тўғрисида 1948 йил академик А. Д. Сахаров «Мезомолекулалар ДДМ ва ДТМ ҳосил қилганда енгил ядролар синтези содир бўлади» деб айтган эди. 1989 йили америкалик олимлар Флейшман ва Понс ҳамда тадқиқотчилар гу-

руҳи (Жоунс) электролиз вақтида енгил элементлар синтези содир бўлишини эълон қилади, яъни оғир сувни электролиз қилиш вақтида осциллограммадаги табиий шовқинга—табиий йўл билан пайдо бўладиган нейтрон оқимининг шовқинига нисбатан асбоблар ёрдамида қайд этилган нейтронлар сони кўпроқ бўлиши кузатилган. Бундай натижаларни тадқиқот тажрибаларида Флейшман, Понс, Жоунс (АҚШ, Юта штати), Р. Н. Кузьмин ва Б. Н. Швилкин (Россия, МДУ) кузатганлар.

Совуқ ядро синтез реакциясининг физик механизми тўлалигича яратилган эмас. Фақат бу олимларнинг айримлари водород атомини қабул қилиш, ютиш эҳтимоллиги юқори бўлган палладий, титан, тантал, цирконий, ерда кам учрайдиган элементлар, ванадий қотишмасидан ясалган катод ҳамда платинадан анод сифатида фойдаланган.

Дейтерийнинг мусбат иони палладийга электролиз вақтида электролитдан (LiD 0,1 моль/л) $\sim 1,6$ mA/cm^2 ток ўтганда киртилган. Шунда D^+ иони қуйидаги реакцияга кириши мумкин деб ҳисобланган, яъни



Бу реакциядан кўриниб турибдики, водород изотопларининг қўшилиши натижасида водород, яъни протон ва нейтрон учиб чиқади. Ҳосил бўлган нейтронлар совуқ ядро синтези вақтида ажралади деб ҳисоблаганлар. Лекин, бошқариладиган совуқ ядро синтез реакцияси тўла ишончлилиги ҳозирча амалга оширилмаган (исбатланмаган).

11.8 Гелиоэнергетика

Гелио (юнон helios — Қуёш) энергетика Ер сиртига тушадиган Қуёш нури энергиясини электр энергиясига айлантирувчи гелиоқурилмалар асосида пайдо бўлган. Бундай қурилмалардан ташкил топган ва электр энергиясини ишлаб чиқарадиган станциялар *гелиоэлектр* станцияси дейилади.

Гелиоэлектр станциялар иссиқлик цикли (нур қайтаргич буғ қозни — буғ двигатели) бўйича ёки фотоэлектр генератори, термоэлектр генераторидан фойдаланиб ишлаши мумкин.

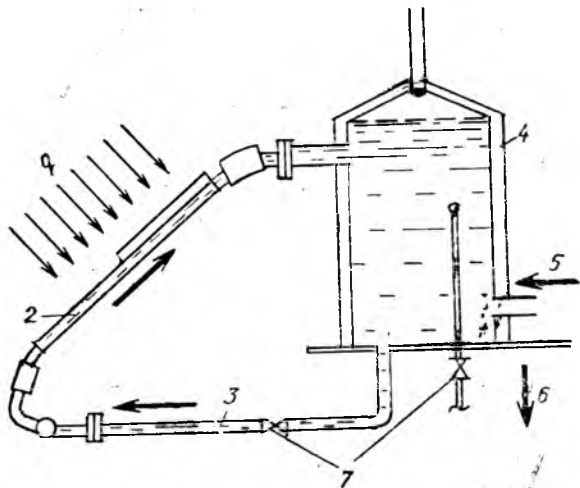
Дунёда биринчи гелиоэлектр станцияси 1912 йили

Мисрда (Қоҳира яқинида) қурилган бўлиб, унинг қуввати 45 кВт ни ташкил қилган.

Замонавий гелиоэлектр станцияларидан бири Қрим Қуёш электр станцияси ҳисобланади. Унинг қуввати 5000 кВт. Қуёш энергиясидан тўғри фойдаланилса, 1 м^2 Ер юзасидан 1 кВт электр энергияси ҳосил қилиш мумкин. Чунки, Ерга Қуёшдан $1,57 \cdot 10^{18}$ кВт соат энергия бир йил давомида келиб тушади. Аммо, ҳозирги кунда Қуёшдан келадиган ёруғлик нури (радиация) энергиясини электр энергиясига айлантирувчи асбоб-ускуналарнинг ФИК анча паст (10—12% кремний кристалли).

Қуёш нурини электр энергиясига айлантиришда, асосан яримўтказгичлардан олтингугурт — таллий кремний кристалли ($p-n$ ўтказувчанлик, ФИК 6%), аморф, кремний, галлий арсениди (ФИК 33—34%) ва ҳоказолардан фойдаланилади. Кремний кристаллининг температураси ортиши билан унинг ФИК камаяди, масалан, $T = 291 - 193 \text{ К}$ да ФИК 28—30% бўлса, 373 К да 12—15%.

Ерда гелиоэлектр станцияларни Қуёшли кунлар кўп бўладиган минтақаларда, яъни Марказий Осиёда, Экватор атрофида, Калифорнияда (АҚШ) қуриш мумкин.



85-расм. Қуёш сув иситкичининг схемаси: 1 — қуёш нури; 2 — иситкич бўлмаси; 3 — сув айланишини берк контур бўйича таъминловчи труба қувур; 4 — иссиқ сув тўпланадиган идиш; 5 ва 6 — созуқ ва иссиқ сув трубалари; 7 — вентиллар.

Бундай гелиоэлектр станцияларнинг ФИК 10% атрофида бўлиши учун $100 \text{ км} \times 100 \text{ км} = 10000 \text{ км}^2$ майдон керак бўлади. Шунда ФИК юқори бўлган яримўтказгичларнинг яратилишини кутиб ўтирмасдан Қуёш энергиясидан тўғри фойдаланиш мумкин бўлади.

Ерга тушаётган Қуёш нуруни линза ва кўзгулар ёрдамида бир нуқтага тўплаш йўли билан гелиоқурилмаларнинг самарадорлигини орттириш мумкин. Бундай гелиоқурилмалар иморатларни иситишда, чорвадорлар ўтовларида, кичик қувватли насосларни ишлатишда, лабораторияларда қўлланилмоқда (85-расм).

Космик аппаратларнинг асосий электр манбаи Қуёш батареялари ҳисобланади. Шундай бўлса-да, катта қувватли гелиоэлектр станцияларни коинотда жойлаштириш лойиҳалари истиқболли деб бўлмайди.

Ўзбекистонда Қуёш электр станциясини қуриш лойиҳаси ишланмоқда. Бундай ҚЭС лари Хоразм ва Бухоро вилоятларида қад кўтаради. Бу гелиоэлектр станцияларнинг қуввати 100 МВт атрофида бўлиб, ҳар бири 200 гектар майдонни эгаллайди.

Ўзбекистон Республикасида (Паркент тумани) «Қуёш» деб номланган кучли гелиомарказ ишламоқда. Унда Қуёш нури энергиясини тўплаб юқори температура-ларда суюқланидиган қотишмалар олинмоқда.

Гелиоэлектр станциялар экологик жиҳатдан тоза, табиатга мутлақо зарар етказмайди. Ҳозирги кунда гелиоэлектромобилларни яратиш масаласи бўйича дунё олимлари илмий тадқиқотлар олиб бормоқдалар ва бу соҳада айрим ижобий натижаларга эришилган (Туркменистон, Япония, Франция ва ш. к.)

11.9. Геотермал электр станцияси

Ер қобиғидаги иссиқликдан самарали фойдаланиш йўли билан электр энергиясини ишлаб чиқарувчи иншоот геотермал электр станцияси дейилади.

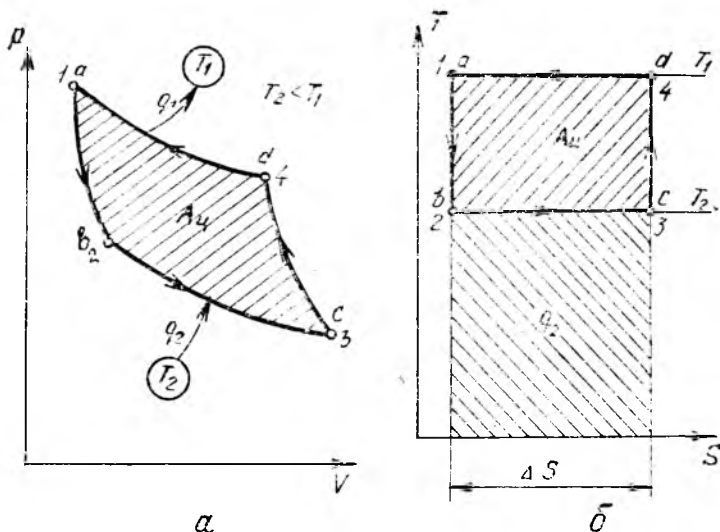
Гео юнонча — Ер, *термал* юнонча *therme* — иссиқлик бўлиб, Ер иссиқлиги деган маънони беради. Ер иссиқлигидан фойдаланиб электр энергиясини ишлаб чиқарадиган станцияларнинг асосий иш жисми манбаи бу — қайноқ булоқлар (гейзер) дан қайнаб чиқадиган иссиқ сувдир. Яна бир усули Мантия (Ернинг ички қобиғи) га яқин қатламларгача Ерни бурғулаб, шу чуқурликда ҳамж ҳосил қилинади ва унга совуқ сув ҳайдалиб, иккинчи қу-

12.1. Идеал совиткич қурилмаси ва унинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар

Совиткич машиналарнинг ишлаш принципи термодинамиканинг иккинчи қонунига асосланган бўлиб, уларда иш жисми температурасининг атроф-муҳит температурасидан пасайишидан иборат, яъни жисмдан иссиқлик миқдори ташқи муҳитга чиқарилади. Модданинг температураси кичик бўлишини таъминлаш учун албатта иш бажарилади. Бу қурилмаларда совуқ элитгич сифатида сув, шўр сув ($-21,4^{\circ}\text{C}$), кальций хлорид (-55°C), этиленгликоль (-70°C), хладон ($-96,7^{\circ}\text{C}$) ва ш. к. моддалардан фойдаланилади.

Совитиш машиналарнинг цикли Карно циклига тескари бўлган циклдир. Карно циклига тескари бўлган цикл совиткич машиналарнинг идеал цикли дейилади. Идеал циклга совиткич машиналарнинг реал циклари солиштирилиб, уларнинг иқтисодий жиҳатдан самарадорлиги аниқланади.

Карнонинг совитиш цикли (87-расм) дан кўриниб турибдики, совитувчи моддага иссиқлик миқдори совитилувчи жисмдан изотерма ($T = \text{const}$) бўйича узатила-



87-расм. Карно совитиш циклининг PV ва TS диаграммалари.

ди (2 ва 3 нуқталар оралиғи). Бу жараён давомида иш жисми (реал шароитда сув буғи, аммиак, карбонат ангидрид, фреон-12 ва ш. к.) босими ўз ҳажмини ошириши ҳисобига пасаяди. Иш жисми ҳажми кенгайиб борган сари унинг температураси пасаяди, яъни иш жисми совийди. Шундан сўнг иш жисми адиабатик ($dq \approx 0$) сиқилади. Бу сиқилиш жараёнида маълум миқдорда иш бажарилади ва иш жисми температураси кўтарилади. Яъни исийди (3 ва 4 нуқталар оралиғи).

Исиган иш жисмининг изотермик сиқиш жараёнида 4 ва 1 нуқталар оралиғи, ундан q_1 иссиқлик миқдори муҳитга чиқади. Сиқиш тактининг охирида иш моддаси катта босимга ва кичик ҳажмга эга бўлади (1 нуқтада). Шундан сўнг иш жисми адиабатик кенгайди (1 ва 2 нуқталар оралиғи) ва кескин совийди. Натижада ташқи муҳитдаги ортиқча иссиқлик миқдорини ютади. Цикл такрорланади.

Совитиш циклининг бажарган иши $1-2-3-4-1$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатдан тенг, яъни

$$A_{\text{ц}} = q_1 - q_2, \quad (332)$$

бунда q_1 — иш моддасидан совитувчи жисмга узатилган иссиқлик миқдори; q_2 — совитилувчи жисмдан иш моддасига узатилган иссиқлик миқдори; A — циклниң бажарган иши.

Совитиш машиналарининг иқтисодий самарадорлиги совитиш коэффициентни ξ орқали ифодаланади:

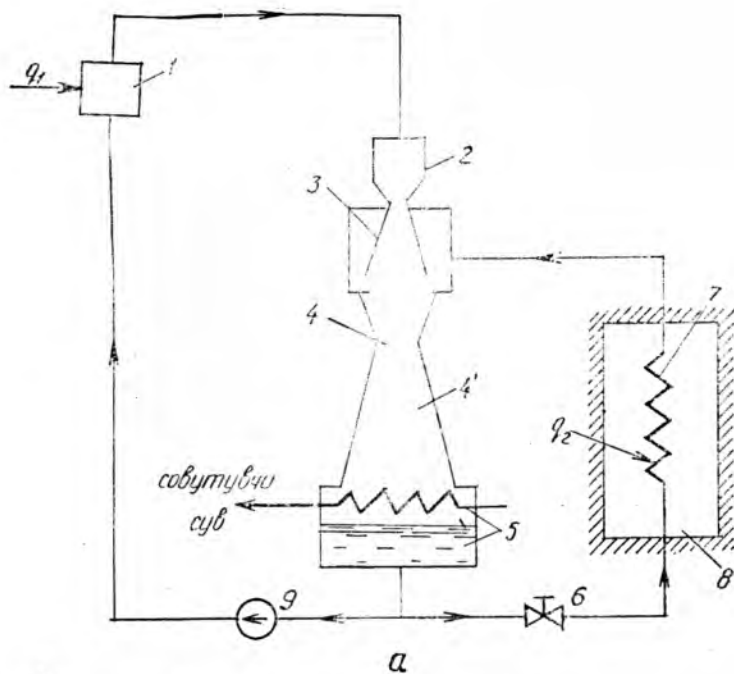
$$\xi = \frac{q_1}{A_{\text{ц}}}. \quad (333)$$

Карнонинг совитиш цикли учун ξ коэффициентни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{q_1}{A_{\text{ц}}} = \frac{\Delta S \cdot T_2}{\Delta S \cdot (T_1 - T_2)} = \frac{1}{\left(\frac{T_1}{T_2} - 1\right)}, \quad (334)$$

бунда T_1 ва T_2 — иш жисми ва ташқи муҳит температуралари; ΔS — иш жисмининг изотермик кенгайишидаги ва сиқилишидаги энтропиясининг ўзгариши.

Карнонинг совитиш циклининг PV диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл иккита изотермик ва иккита адиабатик жараёнлардан ташкил топар экан. Бундай қурилмаларда совитиш жараёни иш жисми ички энер-



90-расм. Буг оқимли совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б — циклинг TS диаграммаси.

— b' — a' нуқталар билан чегараланган юзага η сон қиймати жиҳатидан тенг. TS диаграммадаги a' — $4'$ — $5'$ — $1'$ — b' — a' нуқталар билан чегараланган юза g кг сувни буғлатишга сарф бўлган иссиқлик миқдорига η сон қиймати жиҳатидан тенг.

Буғ оқимли совитиш қурилмасининг иқтисодий самарадорлигини, насосга сарфланган иш эътиборга олинмаса, қурилмадан чиққан q_2 ва унга киритилган q_1 иссиқлик миқдорлари нисбати, яъни иссиқликдан фойдаланиш коэффициенти кўринишида ифодалаш мумкин:

$$\xi = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\text{юза } a-4-1-\delta-a}{\text{юза } a'-4'-5'-\delta'-a}. \quad (341)$$

Циклдаги иш моддаси энтальпияларининг ўзгарувчанлиги учун ξ ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{i_1 - i_4}{g(i_1' - i_4')}, \quad (342)$$

бунда i_1 — i_4 — TS диаграммадаги 1 ва 4 нуқталар энтальпиялари; i_1' — i_4' — бир кг буғнинг (TS диаграммадаги) $1'$ ва $4'$ нуқталари энтальпиялари.

Буғ оқимли совитиш қурилмаси циклидан шундай хулоса чиқариш мумкинки, термодинамиканинг иккинчи қонунига мувофиқ температуралар фарқи мавжуд бўлганда фойдали ишни олиш мумкин экан. Бу қурилмада температуралар фарқи қозондаги буғ билан конденсатордаги сув ўртасида пайдо бўлади.

АДАБИЁТ

1. Баскаков А. П., Берг Б. В. и др. Теплотехника. — М., «Энергоиздат», 1982, 262 с.
2. Дрижаков Е. В., Козлов Н. П. и др. Техническая термодинамика. — М., «Высшая школа», 1971, 472 с.
3. Политехника лугати (махсус муҳаррир Т. Р. Рашидов, ЎзССР ФА акад.). — Т., ЎзСЭ Бош редакцияси, 1989, 704 б.
4. Яварский Б. М. и Детлаф А. А. Справочник по физике. — М., «Наука», 1981, 944 с.
5. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике. — М., «Наука», 1981, 720 с.
6. Ўзбек Совет энциклопедияси. 1—14 т. — Т., ЎзСЭ, Бош редакцияси, 1970—1980.
7. Бекжанов Р. Б. Ядро физикаси. — Т., «Фан», 1975.
8. Энциклопедический словарь юного техника. — М., «Педагогика», 1980, 512 с.
9. Гуськов С. Ю., Розанов В. Б. Лазерный «ключ» к термоядерной энергии. — М., «Знание», «Физика»: новое в жизни, науке, технике, 1986/4, 64 с.
10. Кузьмин Р. Н., Швилкин Б. Н. Холодный ядерный синтез. — М., «Знание», «Физика»: новое в жизни, науке, технике, 1989 10, 64 с.
11. Алферов Ж. И. Гелиотехника. — М., «Наука», «Энергия»: «Экономика, техника, экология», 1988 4, 8 с.
12. Солнечная и тепловая. — М., «Знание», «Наука и жизнь», 1987 6, 54 с.
13. Кириллин В. А., Сичев В. В., Шейншлин А. Е. Технический термодинамика. — Т., «Ўқитувчи», 1979, 512 б.
14. Михеев М. А., Михеев И. М. Основы теплопередачи. — М., «Энергия», 1977, 343 с.
15. Рышкин В. Я. Тепловые электрические станции. — М., «Энергия», 1976, 447 с.
16. Шляхин П. Н. Паровые и газовые турбины. — М., «Энергия», 1974, 224 с.
17. Архангельский В. М., Вихерт М. М. и др. Автомобильные двигатели. — М., «Машиностроение», 1977, 591 с.
18. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. — М., «Высшая школа», 1981, 400 с.
19. Колодина М. В. «Энергетические ресурсы мира», № 1, 1959.
20. Ребани К. К. Энергия, энтропия, среда обитания. — М., «Знание», «Физика»: новое в жизни, науке, технике, 1985/4, 64 с.
21. Ястержембский А. С. Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1960.

S I нинг асосий бирликлари

Катталик	Улчов бирлиги	Улчов бирлигининг		
		номла-ниши	белгиланиши	
			ўзбекча	халқаро
Узунлик	L	метр	м	m
Масса	M	килограмм	кг	kg
Вақт	T	секунд	с	s
Электр токининг кучи	I	ампер	A	A
Термодинамик температура	⊙	кельвин	К	К
Модда миқдори	N	моль	моль	mol
Ёруғлик кучи	J	кандела	кд	cd

Унга каррали ва улушли birlikларни ҳосил қилувчи кўпайтувчилар ва олд қўшимчалар

Кўпайтувчи	Олд қўшимча		
	номла- ниши	белгила- ниши	
		Ўзбекча	халқаро
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{18}$	экса	Э	E
$1\,000\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$	тера	Т	T
$1\,000\,000\,000 = 10^9$	гига	Г	G
$1\,000\,000 = 10^6$	мега	М	M
$1\,000 = 10^3$	кило	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,000001 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,000000000 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000000000000 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,0000000000000000 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,000000000000000001 = 10^{-18}$	атто	а	a

МУНДАРИЖА

Сўз боши	3
Муқаддима	4

БИРИНЧИ ҚИСМ

ТЕРМОДИНАМИКА АСОСЛАРИ

I боб. Термодинамика. Асосий тушунчалар	
1.1. Иссиқлик техникаси фани, унинг мақсад ва вазифалари	6
1.2. Иссиқлик машиналарининг иш жисми ва уларнинг асосий параметрлари	9
1.3. Системанинг ҳолат тенгламаси	14
II боб. Термодинамиканинг биринчи қонуни	
2.1. Системанинг ички энергияси	16
2.2. Модданинг кенгайишида бажарилган иш	19
2.3. Модданинг иссиқлик сифими	20
2.4. Термодинамика биринчи қонунининг талқини	23
2.5. Энтропия	24
2.6. Энтальпия	25
2.7. Термодинамик жараёнлар	26
Изохорик жараён	27
Изобарик жараён	30
TS — диаграммада изохора ва изобаранинг жойлашуви	32
Изотермик жараён	33
Адиабатик жараён	35
PV ва TS диаграммаларда изотерма ва адиабатанинг жойлашуви	39
Политропик жараён	40
III боб. Термодинамиканинг иккинчи қонуни	
3.1. Айланма цикл	45
3.2. Карно цикли	48
3.3. Термодинамика иккинчи қонунининг талқини	51
IV боб. Иссиқлик ўтказувчанлик	
4.1. Иссиқликнинг узатилиши ва алмашинуви	52
4.2. Иссиқлик ўтказувчанлик	52
4.3. Конвектив иссиқлик алмашинуви	56
4.4. Нур иссиқлиги алмашинуви	62

**ЖУРАҚУЛ НУРМАТОВ
НУРИДДИН АББОСОВИЧ ҲАЛИЛОВ
УТҚИР ҚАРШИЕВИЧ ТОЛИПОВ**

ИССИҚЛИК ТЕХНИКАСИ

(Ўқув қўлланма)

Тошкент «Ўқитувчи» 1998

Мухаррир Д. Аббосова

Расмлар муҳаррири Ф. Некқадимбоев

Техник муҳаррирлар: Э. Вильданова, С. Турсунова

Мусаҳҳиҳ М. Иброҳимова

ИБ № 7308

Теришга берилди 28.05.98. Босишга рухсат этилди 26.10.98. Бичими 84×108^{1/32}. Кегли 10 шпонсиз. Литературная гарнитураси. Юқори босма усулида босилди. Шартли б. т. 13,44. Шартли кр.-отт. 11,26. Нашр. т. 11,26. Тиражи 3000. Буюртма № 2004.

«Ўқитувчи» нашриёти қошидаги «Зиё-Ношир» кичик шўъба корхонаси. Тошкент, Навоий кўчаси, 30. Шартнома № 11—98.

Ўзбекистон Республикаси Давлат матбуот қўмитасининг 1-босма-хонасида босилди. 700002. Тошкент, Сағбон кўчаси, 1-берк кўча, 2-уй. 1998 й.

Н 87

Нурматов Ж. ва бошқ.

Иссиқлик техникаси: Олий ўқув юртлари талабалари учун ўқув қўлланма/Ж. Нурматов, Н. А. Ҳалилов, У. Қ. Толипов. — Т.: «Ўқитувчи», 1998. — 256 б.

1.1,2 Автордош.

ББК 31.3я7

**1997—1998 йилда «Ўқитувчи» нашриётининг
умумтехника таҳририятида қуйидаги китоблар
нашр этилди.**

1. Панкратова В. А. Тикувчиликдан ишлаб чиқариш таълими асослари.
2. Юсуфбеков Н. Р., Муҳамедов Б. Э., Ғуломов Ш. М. Технологик жараёнларни бошқариш системалари.
3. Каминский М. М., Каминский В. М. Автоматлаштириш асбоблари ва тизимларини монтаж қилиш.
4. Литвинова И. Н., Шахова Я. А. Аёллар уст кийимини тикиш.
5. Шебеко Л. П. Электр-газ алангасида пайвандлашга ўргатиш.
6. Лепаев Д. А. Кир ювиш машиналарини таъмирлаш.
7. Никулин Н. В. ва б. Радиоматериаллар ва радиокомпонентлар.
8. Бутейкис Н. Г., Жукова А. А. Ундан қандолат маҳсулотлари тайёрлаш технологияси.
9. Абдуқуддусов О. Қишлоқ хўжалик машиналари фанидан дарс ишланмалари.
10. Горячев В. И., Неелов В. А. Кошинлаш ишлари.
11. Жамбаров М. М. Металл кесиш станоклари курсидан лаборатория ишлари.

**1997—1998 йилда «Ўқитувчи» нашриётининг
умумтехника таҳририятида қуйидаги
луғатлар нашр этилди**

1. Раҳимбоев Ф. М. Гидротехникадан русча-ўзбекча қисқача изоҳли луғат.
2. Раҳимбоев Ф. М., Холиқулов С. И. Сув хўжалигига онд русча-ўзбекча-французча луғат.
3. Раҳимбоев Ф. М. Сув хўжалигига онд русча-ўзбекча-инглизча луғат.