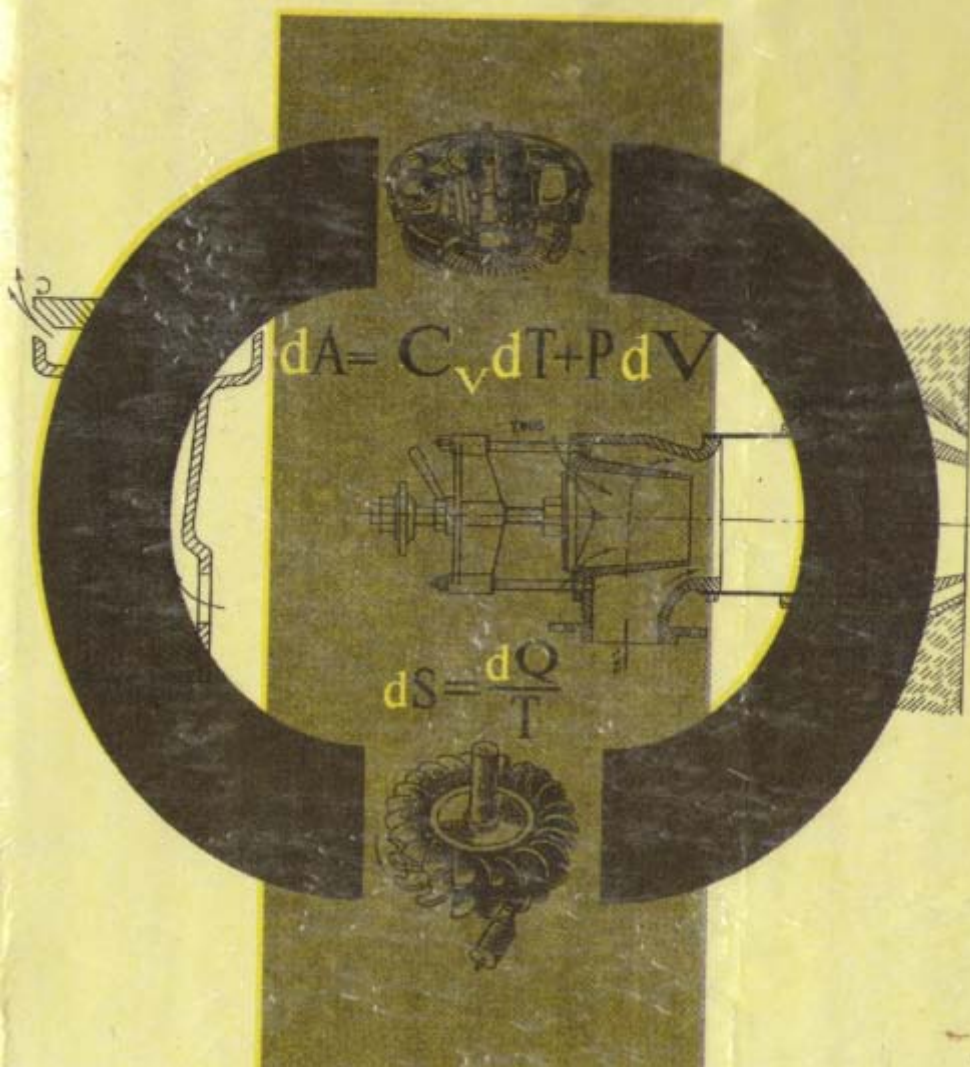


Ж. Нурматов, Н. А. Халилов, Ў. Қ. Толипов

ИССИҚЛИК ТЕХНИКАСИ



Ж. НУРМАТОВ, Н. А. ҲАЛИЛОВ, У. Қ. ТОЛІПОВ

ИССИҚЛИК ТЕХНИКАСИ

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

ТОШКЕНТ «УЎҚИТУВЧИ» 1998

Ушбу ўқув қўлланма олий ўқув юрлари талабалари учун мўлжалланган бўлиб, унда асосий эътибор термодинамиканинг қонун ва қондаларига ва улар асосида қўрилган иссиқлик машиналарида содир бўладиган термодинамик жараёнларга қаратилган. Иссиқлик энергиясини машиналар ёрдамисиз электр энергияга айлантириш масаллари фан ва техника эришган ютуқларга таянган ҳолда ёритилган. Советиш қўрилмалари эса китоб охирида илова қўрилишида баён қилинган.

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

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

AND. M II

14/1567

СЎЗ 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 тўғри 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 маърузалари 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. И. 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 усулларининг яратилиши, унинг халқ хўжалигига 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 марказларнинг қурилиши натижасида ишлаб чиқариш механизациялаштирилди ва автоматлаштирилди.

Мамлакатимизда иссиқлик энергиясини ишлаб чиқариш ва уни бошқа турдаги энергияга айлантириш усулларининг 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 фойдаланилаёпти деб бўлмайди. Иссиқлик энергиясининг кўп қисми асбоб-ускуналардан но-

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 табиий газдан олинади. Ўзбекистонда эса асосий энергия манбаи бўлиб табиий 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 сувъий энергетик манбалардан энг қувватлиси бўлиб, жаҳон бўйича унинг қурилмаларини такомиллаштириш ҳисобига радиоактив моддаларнинг аτροφ-муҳитга тарқалмаслик ва ишлатиб бўлинган уран ёқилғисини сақлаш муаммоларининг ечими изланаётир. Европа мамлакатларида энергетик захиралар тугаб бормоқда. Замонавий ишлаб чиқаришнинг энергияга бўлган талаби эса ортиб бормоқда.

Экологик жиҳатдан тоза бўлган Қуёш энергияси, шамол, сув тўлқини, гейзерлар каби энергетик манбалардан фойдаланиш кейинги йилларда сезиларли даражада ривожланмоқда. Келажакда экология талабларига жавоб берувчи сувъий энергетик манбалар орасида бошқариладиган термоядро синтези реакциялари асосида ишлайдиган энергетик марказлар инсониятга хизмат қилади, гидро, гелио, 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, куч) 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 қонуидан (энергиянинг айланиши ва сақланиши) фойдаланиб, иссиқликнинг техникада қўлланилишида содир бўладиган термодинамик жараёнлар ечимини ҳал этади. Термодинамика фанининг мақсади бир неча содда қондалар — 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 мукамал 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 вақтнинг 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 сақланиш қонунининг моҳиятини назарий жиҳатдан очиб берганлар. Уэ 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 қонунини 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 (кўп 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 тошкўмир, нефть, газ захиралари тобора камайиб бормоқда. Янги энергия манбаларини яратиш, борларидан эса унумли фойдаланиш зарур. Ҳозирги кунда планетамизнинг йиллик энергетик бойлиги тақрибан қуйидагича: тошкўмир — $997 \cdot 10^{14}$ кВт·соат, нефть — $153 \cdot 10^{13}$ кВт·соат, торф — $439 \cdot 10^{13}$ кВт·соат, ядро энергиясини 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, тошкўмир, антрацит, газ, нефтларни Қуёш энергиясининг аккумулятори деб аташ мумкин. Чунки Ернинг 1 м^2 юзасига тушадиган Қуёш нурунининг энергияси тақрибан бир киловаттга тенг. Қуёш энергиясини 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 олувларнинг баракали ижоди натижасида паст сифатли (қўнғир кўмир, ёнувчи сланецлар, торф ва ҳ. к.) ёқилғилардан унумли фойдалана оладиган қурилмалар яратилди.

Кейинги чорак аср мобайнида иссиқлик техникаси аппаратлари қаторига сунъий 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 энергетикаси. пр. Актиноидлар гуруҳидаги U^{235} , U^{238} , Th^{232} , Pu^{239} элементлар ядролари, молекулаларнинг иссиқлик энергияси даражасидаги энергияга эга бўлган ва жадал нейтронлар таъсирида парчаланadi. Бу ядро реакциялари вақтида атом реакторларида ҳосил бўладиган иссиқликдан энергетикада кенг фойдаланилади. Ер пўстлоғидаги атом ёқилғиси 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 тугдиради. 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 йўналиши 1954 йилдан кейин бошланган бўлиб, олимлар бу соҳада айрим ижобий натижаларга эришишган.

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

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

Маълумки, машина ва механизмлар деталлари ҳарқатни вақтида уларнинг сирпаниш нуқталари орасида ҳосил бўладиган ишқаланиш натижасида иссиқлик пайдо бўлади. Иссиқликни ҳисоблашда, ички ёнув двигателларида ёниш жараёнини тўғри ростлашда, улардаги ортиқча иссиқликни ташқарига чиқаришда, материаллар мустаҳкамлигининг ва электр қаршилигининг температурага боғлиқлигини, электр ва магнит майдонлари қийматларининг пулат ўзак температурасига боғлиқлигини ўрганишда иссиқлик техникаси фани умум-машинашунослик курсида муҳим ўринни эгаллайди. Бу жараёнларни билмасдан туриб ўқувчиларга политехник меҳнат таълими тўғрисида билим ва тарбия бериб бўлмайди. Шунинг учун ҳам иссиқлик техникаси фанини, машинашунослик фанларининг бири сифатида, педагогика, техникавий олий ва ўрта махсус ўқув юртлари талабалари ўрганади.

1.2. Иссиқлик машиналарининг иш жисми ва уларнинг асосий параметрлари

Иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантирувчи қурилма иссиқлик машинаси дейилади. Иссиқлик машиналарига буғ машиналари, ички ёнув двигателлари, буғ турбинаси, турли хил ракеталар (КРД — кимёвий ракета двигатели, ЯРД — ядро ракета двигатели, ЭРД — электродинамик ракета двигатели) киради. Иссиқлик машиналарининг ишлаши даврий равишда такрорланиб турадиган термодинамик жараёнларга асосланган. Бундай даврий жараёнларда иссиқлик аввал системага 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 катталик иссиқлик машинасининг термик ФИК дейилади ва у ҳар доим бирдан кичик бўлади:

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

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 тушунтирилган 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 тушунлади. 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 қатталиги 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 газя), 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 каллаги 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. Қелтирилган 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 ётув двигатели) цилиндри девори билан поршень каллагининг устки юзасидан ташқил 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 ўзгарishi билан боғлиқ бўлган ҳар қандай ўзгарish **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 катталиклар 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 ҳажми камайтириб ё кенгайтириб, газнинг ҳолат параметрларини ўзгартириш мумкин. Чунки газ сиқилса исийди, аксинча, кенгайтирилса — совийди.

Идеал газ қонунларини 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:

$$P = \frac{F}{S} \left| \frac{H}{m} \right| \quad (2)$$

Газ молекулалари хаотик (тартибсиз) ҳаракатланиши натижасида улар идиш деворларини узлуксиз бэмбардимон қилиб, маълум куч импульсини (таъсирини) ҳосил қилади ҳамда иссиқлик миқдорини идиш деворларига узатиб ёки ундан чиқариб туради. Ҳар қандай газ ўзи жойлашган ҳажми 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 нуқтаи назаридан газ босими $P = \frac{2}{3} n \frac{mv^2}{2}$, бунда n — 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 ишбадан жадалроқ узатилади.

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

нинг исиганлик даражаси температура орқали ифодалангани. Жисм таркибидаги зарраларнинг тезлиги қанча катта бўлса, уларнинг кинетик энергияси ҳам шунча катта қийматга эришади. 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 қўлланш мумкин. 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 тақсмотини ўрганиб, температура модда таркибидаги зарраларнинг иссиқлик ҳаракати жадаллигининг ўлчови, деган хулосага келган. Шунинг учун ҳам иссиқлик ҳаракати жадаллигининг соли қиймати модда таркибидаги зарра (молекула)ларнинг ўртача кинетик энергияси билан боғланганлигининг математик ифодасини 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 ифодалаш 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 нуқтаназаридан 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 бевос
майдиган катталиқ экан. Температура бошқа физик
катталиқларни ўлчаш йўли билан аниқланади. Систе-
ма температурасини ўлчаш — бу газ ёки суюқлик ҳаж-
мининг ўзгаришини ўлчаш демакдир. Бунга газ ёки
суюқлик термометрлари мисол бўла олади. Система
температурасини на фақат газ ёки суюқлик термометр-
лари ёрдамида, балки қаттиқ (кристалл, металл ва ш. к.)
жисмларнинг физик хоссаларидан фойдаланиб маълум
физик катталиқ (масалан, ЭЮК потенциаллар айирма-
си)ларни ўлчаш орқали ҳам аниқлаш мумкин. Бунга
термопаралар мисол бўла олади.

Халқаро ўлчов бирлиги системасида (СИ) темпера-
тура Кельвин шкаласи (К) бўйича ўлчанади.

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

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

Масалан, хона температураси Цельсий шкаласи бўйича
20°C бўлса, Кельвин шкаласида $T = t + 273,15 = 20^{\circ} +$
 $+ 273,15 = 293,15$ К 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 бўли-
ши мумкин: системанинг вақт мобайнидаги термодина-
мик параметрлари ўзгармас ва ҳамма нуқталарида бир
хил бўлса, бундай система устувор система дейилади;
аксинча, системанинг ҳар хил нуқталаридаги параметр-
лари ўзгарувчан қийматларга эга бўлса, у ноустувор
система дейилади.

Изоляцияланган термодинамик система ташқи му-
ҳитга иссиқлик энергиясини узатмайди ва ундан қабул
қилмайди.

1.3 Системанинг ҳолат тенгламаси

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

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

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

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

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

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-бирдан 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 $\frac{PV}{T} = \mu R = 8314 \text{ Ж/кмоль}$ (француз физиги Б. Клапейрон тенгламаси). R — универсал газ доимийси.

Реал газдан термодинамик система сифатида фойдаланилганда газ молекулалари орасидаги тутунш кучларини ва газ молекуласининг ҳажмини эътибордан четда қолдириб бўлмайди:

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

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

бунда a — газ табиатига мос муносиблик коэффициент; b — газнинг сиқилиши мумкин бўлган ҳажми.

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

Юқоридагилардан хулоса қилиб шуни 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 ($P = \text{const}$), изотермик ($T = \text{const}$), адиабатик ($S = \text{const}$), политроп ($PV = \text{const}$) бўлиши мумкин.

Бу жараёнларни кейинроқ қараб чиқамиз.

II Б. 6. ТЕРМОДИНАМИКАНИНГ БИРИНЧИ ҚОНУНИ

2.1 Системанинг ички энергияси

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

Молекуляр-кинетик назария нуқтан назаридан моддани ташкил этган зарралар шарчалар шаклида ва уларнинг радиуслари 10^{-10} м тартибидаги катталиқни 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 йиғиндисини 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:

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

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.

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

Модда бир термодинамик ҳолатдан иккинчисига ўтганда

нда 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

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

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

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

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 таъсирлашганлиги 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 сони; 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 ҳажмини ўзгартиради ва ҳ. к.

Термодинамик система сифатида цилиндрда жойлашган газ олиб, унга элементар dq иссиқлик миқдори узатилади. Узатилган dq иссиқлик таъсиридан бу газ молекулалари ҳаракати жадаллашиб P босим ҳосил қилади ва бу босим кучи билан S юзали поршень қаллагига таъсир кўрсатиб, ўз ҳажмини 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 ҳисобиغا 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 юқorigа қараб ҳаракатланса, унда бажарилган иш манфий ($dA < 0$), аксинча, сиқилган газ поршенни пастга қараб итариши натижасида ўз ҳажмини 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 иссиқликни 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 бирлиқларида 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 Ж/ $\text{м}^3 \cdot \text{К}$ 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:

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V; \quad (24)$$

в) солиштирма моль иссиқлик сифми:

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

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. Чунки система (модда) температурасининг ўзгариши унга узатилган иссиқлик миқдори ўзгармас бўлганида фақат термодинамик жараён турига боғлиқ бўлади. Шунинг учун ҳам системанинг иссиқлик сифмини термодинамик жараён функцияси деб қараш мумкин. Турли-туман моддаларнинг бирлик массаси температурасини бир градус орттириш учун ҳар хил катталиқдаги 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 ифодаланадиган физик катталиқ 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 солиштирма иссиқлик сифимлари билан универсал газ доимийси орасидаги боғланишни ўрганиб, қуйидаги тенгламани чиқарган:

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

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

$\left. \frac{du}{dV} \right|_T = 0$. 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, молекулаларро 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 молекуланинг 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 сигъими, кЖ кмоль·К	$K = \frac{C_p}{C_V}$
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. Буни 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 (δ 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 сууюқлик 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 катталаша-

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:

$$\Delta q = du + \Delta A. \quad (37)$$

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 оласиз.

2.5. Энтропия

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

$$ds = \frac{dq}{T} \left| \frac{Ж}{К} \right| \quad (31)$$

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. СИ 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 сабабли уни 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 интилганда 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, модданн ташкил этган зарралар ҳаракати деярли тўхтайдн. Демак, термодинамик системанинг абсолют температураси нолга яқинлашади, аммо мутлақо нолга эришилмайди, яъни модда ҳар қанча ўта паст температурага совирилганида ҳам зарраларнинг ҳаракати мутлақо тўхтамайди, фақат айрим назарий масалалар ечимини топишда шундай шарт қабул қилинади.

М. Планк (1912 й.) мазкур масалани статистик физика асосида ўрганиб, жараён характери квант хоссаларига бориб тақалишини назарий жиҳатдан исботлади. Амалнётда 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* — иситаман) термодинамик системанинг ҳолат функцияси бўлиб, у i 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. Жараённи тасаввур қилиш ва англаш мақсадида мисол тариқасида цилиндрнинг 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).

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:

$$P_1 V_1 = RT_1,$$

$$P_2 V_2 = RT_2.$$

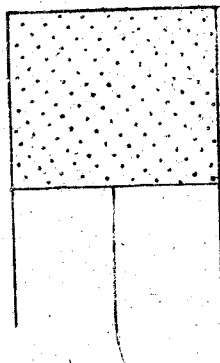
Тенгликларнинг нисбатларидан Шарль қонуни ифодаси ҳосил бўлади, чунки $V_1 = V_2 = \text{const}$.

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

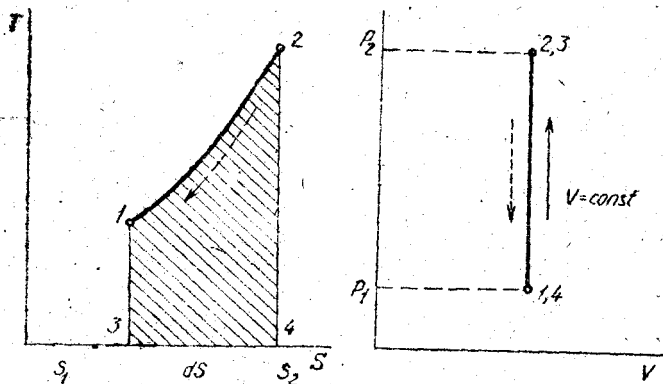
Демак, изохорик жараёнларда босимлар нисбати абсолют температуралар нисбатларига тенг бўлади, яъни босим ўзгариши бу жараёндаги абсолют температура ўзгаришига тўғри мутаносибдир.

Изохорик жараён диаграммасини PV, TS координаталарида ифодалаймиз (2-расм). Жараённи 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

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



1-расм. Ўзгармас ҳажмдаги газ.



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 сарфланар 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 T га бўлиб, кейин

Клапейрон тенгласидан 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.

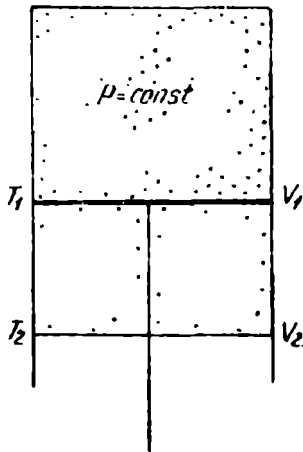
Бу тенгликни интеграллаб, газ ҳолатининг охириги ўзгариши учун энтропия ўзгарувчанлиги ифодасини ҳосил қиламиз:

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

Изохорик жараёнда $V = \text{const}$ бўлганлиги учун тенгликнинг ўнг томониинг 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 иккала ҳолат учун жараённинг ҳолат тенгламаларини ёзамиз:

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

Ҳолат тенгламалари нисбатидан Гей-Люссак қонунининг ифодасини ҳосил қиламиз:

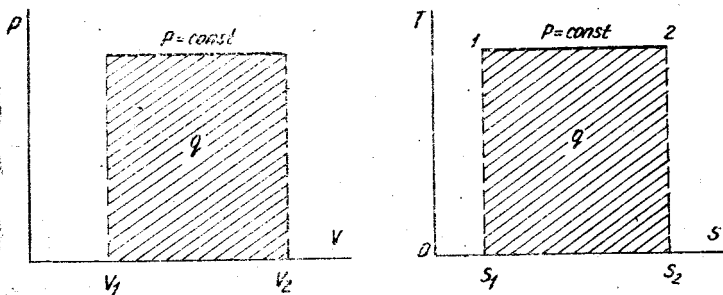
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{ёки} \quad V_1 T_2 = V_2 T_1. \quad (48)$$

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

Изобарик жараёнда системага узатилган иссиқлик миқдорини солиштирма иссиқлик сифими 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 сифмлари айирмаси $\mu C_p - \mu C_V = \mu R$ дан $R_0 = \mu R$ — универсал газ доимийсини топиш мумкин: $\mu R = R_0 = 8314 \text{ Ж/моль} \cdot \text{К}$.

Изобарик жараёндаги термодинамик системанинг бажарган ишининг катталигини жараён бошланишидаги ва охиридаги ҳажмлар айирмасининг босимга кўпайтмаси шаклида ёзамиз ва уни бошланғич ва охириги ҳолатлар оралиғида 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 энтальпия орттирмаси тушунчасидан фойдаланиб аниқлаймиз.

Системага узатилган иссиқлик миқдорини бирор икки нуқта (графикдаги) оралиғида 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 системани узатилган иссиқлик миқдорини 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:

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

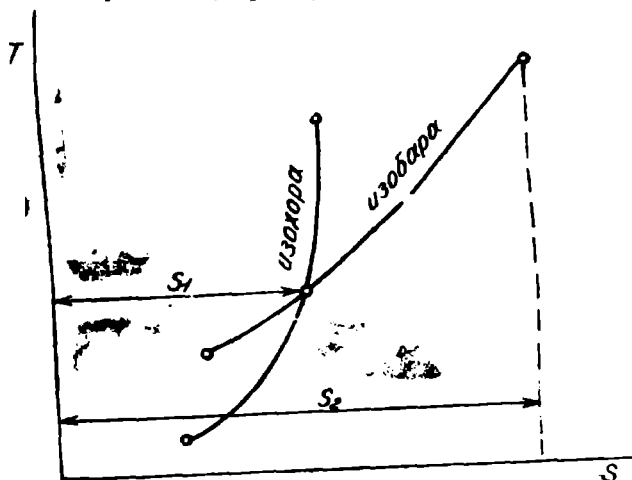
Термодинамик системага узатилган иссиқлик миқдор $P = \text{const}$ бўлганида, $VdP = 0$ бўлади. Шунинг учун энтальпия қийматининг катталиги иссиқлик миқдориг тенг, яъни

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

Демак, системага узатилган иссиқлик миқдори энтальпиянинг ўзгаришига тенг экан.

TS — диаграммада изохора ва изобаранинг жойлашуви

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



5-расм. Изохора ва изобаранинг TS координатада жойлашуви

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

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

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

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

S — диаграммалар айланма жараёнлардаги термодинамик ҳодисалар таҳлилида кенг қўлланилади.

Демак, термодинамик системаларга бир хил миқдордаги иссиқлик энергияси берилса ҳам энтропиянинг ўзариши 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 $T = \text{const}$ ҳолатда чун қараб чиқамиз.

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

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

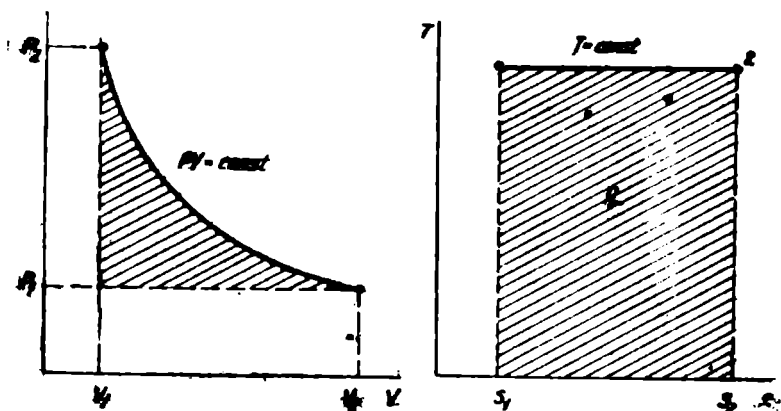
$T = \text{const}$ бўлганлиги учун $T_2 = T_1$. Бойль-Мариотт қонунининг ифодаси система ҳолат тенгламаларининг нисбатидан топилади:

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

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

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

Бу тенглик изотермик жараён асосида қараб чиқилса,



б-расм. Изотермик жараёнишиг 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 узатилган иссиқлик миқдори dq системанинг P , V ва T параметрларини ўзгартиради, яъни бу иссиқлик миқдори газнинг босими ва ҳажмини ўзгартириб, ташқи таъсир кучига қарши механик иш бажаришга сарфланади:

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

Ихтиёрий иккита ҳолат оралиғида газнинг кенгайишида бажарилган ишни аниқлаймиз:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV = \int_{V_1}^{V_2} RT \frac{dV}{V} = RT(\ln V_2 - \ln V_1)$$

ёки

$$A = RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (62)$$

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:

$$A = RT \ln \frac{P_1}{P_2}$$

ёки

$$P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = P_2 V_2 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (63)$$

Изотермик жараёнда газнинг изотермик кенгайишидаги 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

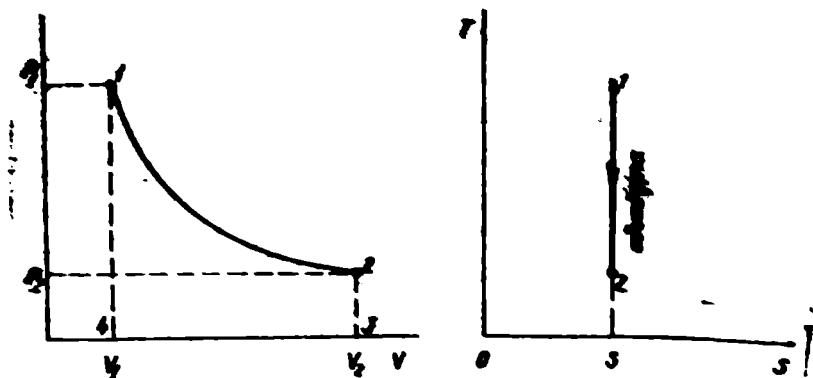
$$A = T \int_{S_1}^{S_2} dS = T(S_2 - S_1) \quad (64)$$

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 учалла 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.

мининг 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 ифodalаш 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 эниқлаш 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:

$$\left(1 + \frac{R}{C_V}\right) P dV + V dP = 0 \quad (68)$$

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

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{C_p - C_v}{C_v}\right) P dV + V dP &= 0, \\ \left(1 + \frac{C_p}{C_v} - 1\right) P dV + V dP &= 0, \\ \frac{C_p}{C_v} P dV + V dP &= 0, \\ K P dV + V dP &= 0, \end{aligned} \quad (69)$$

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

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

(70) тенгликни $K = \text{const}$ шарти асосида интегралласак $\ln V^k + \ln P = \text{const}$ ёки $\ln PV^k = \text{const}$ ҳосил бўлади. Қараёнда қатнашаётган газ параметрлари орасидаги боғланишни ифодаловчи адиабатик жараён тенгласини 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 тенгласидан 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 қилинган ички энергиясининг ўзгаришига тенг, яъни

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

Газ ҳажмининг ортиши натижасида унинг босими ва температураси камайди, 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 оралиқда 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:

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

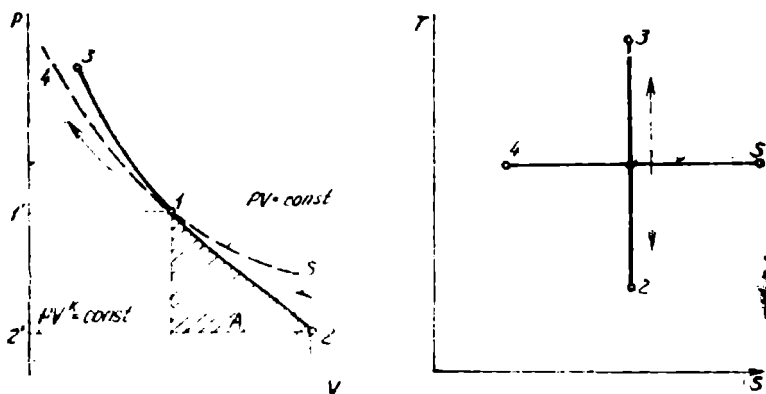
ёки

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

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 жараённи бирор ихтиёрий *I* 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 эңергияси берилмаса ҳам газ ҳажмининг ортиши ҳисобига унинг ички эңергияси камайди, 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 кўтарилди. Шунинг учун $P_{ад.} > P_{изот.}$

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

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

Политроп жараён

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

Политроп жараён тенгламаси қуйидагича ифодланади:

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

бунда $n = \frac{c - C_p}{c - C_v}$ — политроп кўрсаткичи; c — политроп жараёнда қатнашаётган системанинги солиштирма иссиқлик сифими; C_p ва C_v — жараёнда қатнашаётган система (газ) нинги ўзгармас босим ва ҳажмдаги солиштирма иссиқлик сифимлари.

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

Политроп жараёнининг иссиқлик сифими $c = \text{const}$ бўлгандаги ҳолати учун термодинамиканинги биринчи қонуни қуйидагича ёза оламиз:

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

ёки

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

Идеал газнинг ҳолат тенгласини 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 содалаштиришлардан сўнг (80) тенгламани қуйидаги кўринишга келтирамиз:

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

(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

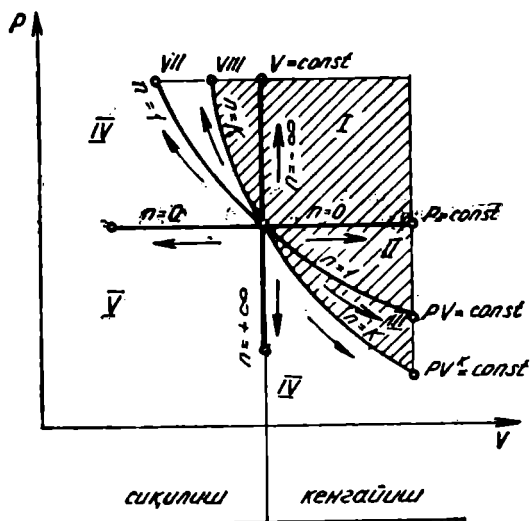
$$PV^{\frac{c - c_p}{c - c_V}} = PV^n = \text{const}. \quad (82)$$

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. Политроник жараёниги PV диаграммасы.

енд қилиш мүмкин. Бунинг үчүн аввал политроп жараёниги солиштирма ысеиқлик сизимни адиабата ва политроп күрсаткичи ҳамда изохорик ва изобарик жараёнларнинг солиштирма ысеиқлик сизимлари билан боғлаиш 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:

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

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

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

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 $PV = \text{const}$ кўрinishига келади. Агар $n = k$ бўлса, $c = 0$ бўлади ва жараён адиабатик ҳисобланади, яъни $PV^k = \text{const}$.

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

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

Бу ифодалар асосида системанинг исталган ҳолатларини ифодалаш 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:

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

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:

$$q = C(T_2 - T_1) \quad (8)$$

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 қўйидаги кўринишга келади:

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

Политроп кўрсаткичи ифодасини тенгламага қўйиб содалаштирамиз:

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

ёки

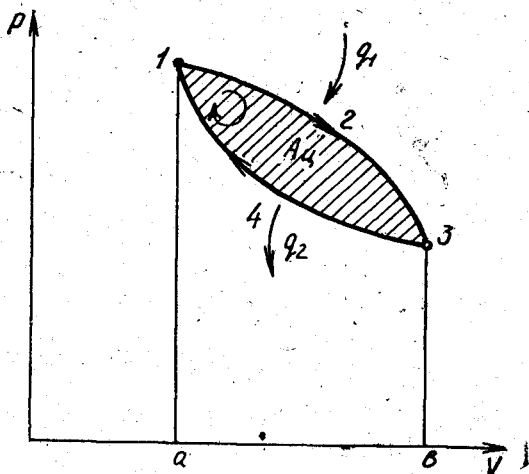
$$S_2 - S_1 = \frac{C_v}{n} (n-k) \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (94)$$

Демак, жараён энтропиясининг ўзгарувчанлиги системанинг солиштирма иссиқлик сиғимига, политропик ва адиабатик иссиқлик сиғимига, 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 машинасига 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 жараённинг PV диаграммасини қуйидагича тасвирлаш мумкин (10-расм). Иш моддаси q_1 иссиқлик миқдорини олгандан сўнг 1, 2, 3 чизиқ бўйлаб кенгайиб мусбат; 3, 4, 1 эгри чизиғи бўйича эса q_2 иссиқлик миқдорини системадан совиткичга 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 $a, 1, 4, 3, b, a$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Демак, фойдали ишнинг қиймати $1, 2, 3, 4, 1$ нуқталар ҳосил қилган каттали майдонча юзасига сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади, яъни

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

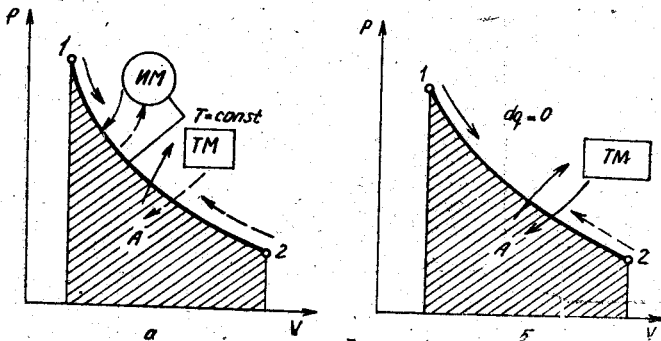
ёки бу тенгламаларни ҳамда-ҳад қўшиб чиқсак

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

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

Жараён қайтар ва қайтмас бўлиши мумкин. Термодинамик жараёндаги асосий куч консерватив (эластик, кулон, гравитация) бўлганда жараён қайтар бўлади. Термодинамик жараённинг охириги 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, *a*). 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 (*a*) ва адиабатик (*b*) жараёнлар: ИМ — иссиқлик манбаи; ТМ — ташқи муҳит.

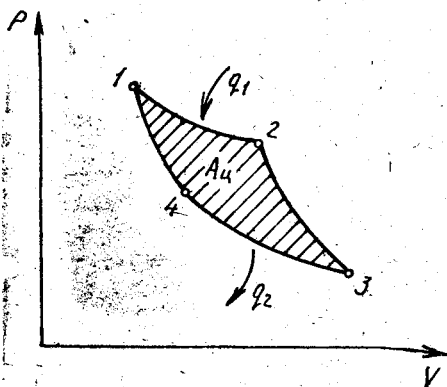
Ўзгармас температурада кечадиган термодинамик (изотермик) жараёнда ҳамда ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмайдиган ва алмашилмайдиган жуда секин кечадиган адиабатик жараён (11-расм, б) қайтар жараёнга мисол бўла олади. Бундай жараёндаги модданинг кенгайиш ва сиқилиш графиклари устма-уст тушади, йўналишлари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

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

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

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

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.

$$-q_2 = \int_3^4 \Delta q = RT_2 \ln \frac{V_4}{V_3} = A_2. \quad (98)$$

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:

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

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

Идеал газнинг ҳолат тенгламасидан 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 тенгламасини ҳосил қиламиз:

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

Бу тенгламани цикл учун қуйидагича ёзиш мумкин:

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

(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 ишлайтилаётган иссиқликнинг хоссасига боғлиқ бўлмасдан фақат иссиқлик манбалари абсолют температураларининг қуйи ва юқори қийматларига боғлиқ бўлар экан.

3.3. Термодинамика иккинчи қонунининг талқини

Термодинамиканинг иккинчи қонуни *иссиқлик двигателлари 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. Клаузис (1850 й.) қуйидагича таърифлади: *иссиқлик энергияси ишга айланиш жараёнида тўлалигича 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 сифатида температура қабул қилинади. Мана шу куч фақат температуралар фарқи бўлгандагина пайдо бўлади ва бу фарқ қанча катта бўлса, куч ҳам шунча катта бўлади. Демак, иш бажарувчи система температураси совиткичга нисбатан юқори бўлиши шарт. Системадан совиткичга чиқарилган иссиқлик миқдорини ҳеч вақт ишга айлантириб бўлмади, чунки, Р. Клаузис таърифига мувофиқ, совуқ манбадан иссиқлик энергияси иссиқ манбага ўз-ўзидан ўтмайди. Ишга айланмаган қолдиқ иссиқлик энергиясидан қайтадан фойдаланиб бўлмайди, шунинг учун ҳам иссиқлик двигателига узатилган иссиқлик миқдори 100% фойдали ишга айланмайди. Иссиқлик энергиясининг асосий қисмини 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 ўзидан иссиқликни чиқараверади. Иссиқлик ҳамма турдаги муҳитда (суюқ, қаттиқ, газ, вакуум) тарқалади. Натижада иссиқ жисм совиёди, 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 муҳитда узатилади. Бундай иссиқлик ўтказувчанликда иссиқликни зарралар ва молекулалар ташийди, деб қаралади. Иссиқлик ташувчи агент жисм ичйда, 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 катталик иссиқлик оқимининг қуввати дейилади ва у СИ ўлчов бирлиги системасида Ж/с, яъни Вт да ўлчапади.

Ҳамма нуқталарида температураси бир хил ($T = \text{const}$) бўлган сирт изотермик (юнонча *isos* — тенг, бирдек, ўхшаш ва *therme* — 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:

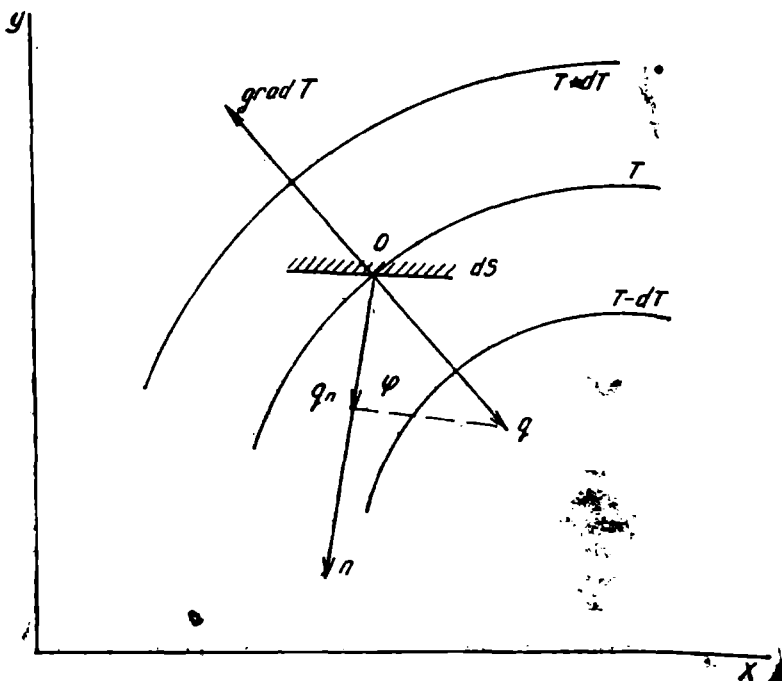
$$q = -\lambda \text{grad } T, \quad (109)$$

буида λ — жисмнинг иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти, 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 «O» нуқтада $\text{grad}T$ ва q векторларнинг жойлашуви.

Элементар dS юзадан унга перпендикуляр йўналишда ўтаётган 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 zichлиги ρ ва иссиқлик сифими C_v билан dq ning боғлиқлиги эътиборга олинса, тенгламани қуйидаги кўринишга келтириш мумкин:

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

Жисмларнинг иссиқлик ўтказувчанлиги уларнинг физик хоссаларига боғлиқ.

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

2-жадвал

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 пўлат	17—45	плитаси	$(4-12) \cdot 10^{-2}$
углеродли пўлат		ёғоч қипиғи	0,07
ва чуян	45—60	Турли хил қаттиқ	
алюминий	200—230	материаллар:	
Қурилиш		сув қозони қасмоғи	0,7—2,3
материаллари:		кўмир	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)	0,35—0,7	Сув	0,6
	3		

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

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

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 — трубанинг ички ва ташқи диаметри, м; λ — иссиқлик ўтказувчанлик коэффициенти.

Демак, иссиқлик ўтказувчанлик усули, яъни жисмлар сиртлари ўзаро тегиб турганида иссиқликнинг узатилиши биргина жисмларнинг 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 донм 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 суюқ жисмлар температураси (уларнинг абсолют қийматлари олинади ҳамда ҳар доим уларнинг айирмаси мусбат деб қабул қилинади, яъни катта сондан кичиги айрилади); α — иссиқлик бериш коэффициентини, $Вт/м^2 \cdot К$.

Иссиқлик бериш коэффициентини L нинг физик маъноси иссиқлик берилиш жадаллигини билдиради. Унинг сон қиймати қаттиқ жисм сирти билан суюқлик 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 (суюқлик, газ) ҳаракати табиий ва сунъий бўлади. Табиий конвекция ҳодисаси фақат суюқлик (газ) массасининг иссиқлик манбаи билан иссиқлик алмашинуви натижасида иссиқ сирт яқинида ўз ҳажмини ўзгартириб юқорига қараб ҳаракатланиши ҳисобига пайдо бўлади. Иссиқлик берувчи сирт яқинидаги суюқлик (газ) молекулаларининг температураси юқори бўлиб, иссиқлик манбаидан узоқлашган сайин уларнинг температураси пасайиб боради.

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

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

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

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

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

бунда β ва β_c — иссиқ ва совуқ суюқлик (газ) зичлик-лари.

Ҳажмнинг жадал кенгайиши ҳажмий кенгайиш температура коэффициентини орқали ифодаланади:

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

Идеал газлар учун ҳажмий кенгайиш коэффициентининг температурага боғлиқлиги қуйидагича ифодаланади:

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

Шунинг учун суюқликларда бу коэффициент кичиклигини эътиборга олиб, солиштирма ҳажм ҳосиласини юқори 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:

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

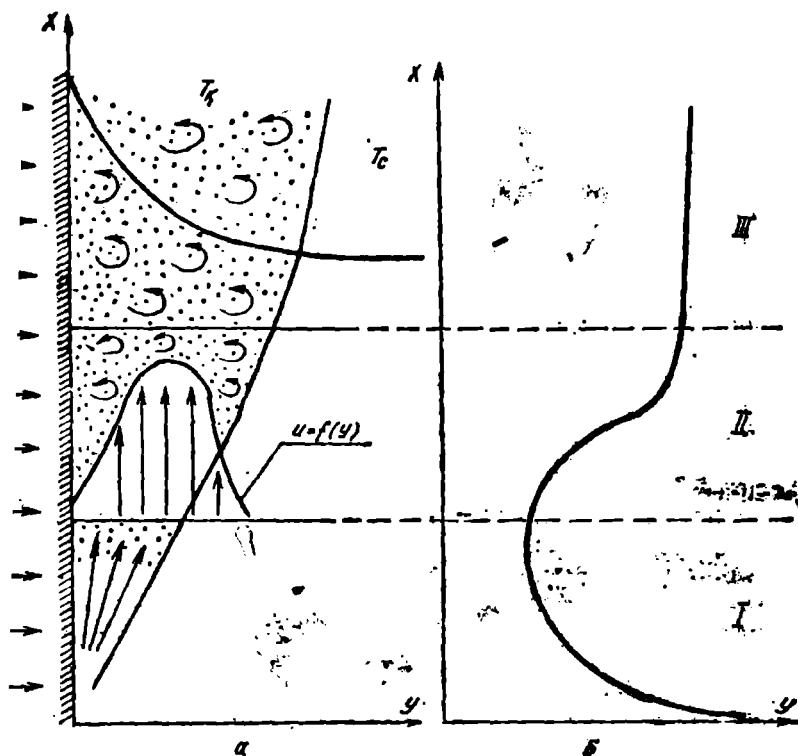
Энди, иссиқ ва совуқ суюқликнинг бирлик ҳажмчаларидаги зичликлар айирмаси ифодаси (123) ни (120) га қўйиб, конвектив иссиқлик алмашинуви жароёнидаги кўтариш кучининг катталигини суюқликнинг юқори ва қуйи температуралари айирмасига ҳам боғлиқлигини қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

бунда T ва T_c — иссиқ ва совуқ суюқликлар температуралари.

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

14-расм, б дан кўришиб турибдики, суюқлик массасини ташкил этган зарралар қиздирилиш зонасида ламинар ҳаракат қилади. Утиш зонасида уларнинг ҳам ламинар, ҳам турбулент ҳаракати кузатилади. Охириги зонада зарралар ҳаракати турбулент бўлади.



14-расм. а) Табиий конвекцияда иссиқлик ташув-ининг тезлик ва температура бўйича ламинар ва турбулент ҳаракатидаги тақсимоти; б) иссиқлик бериш коэффициентининг ламинар ва турбулент оқим-лардаги ўзгариши: I—ламинар, II—ўтиш ва III—турбулент зоналар.

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

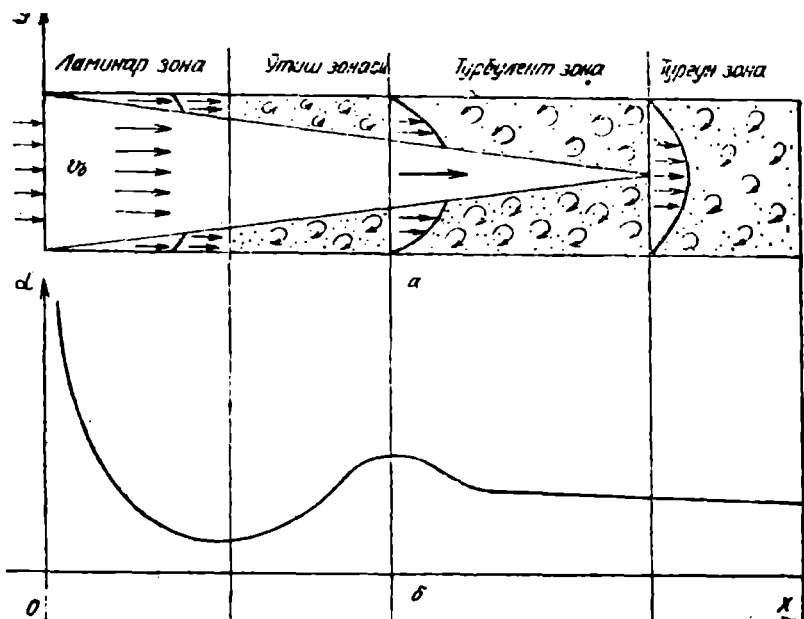
Демак, ламинар оқимда иссиқлик вектори оқим йўналишига перпендикуляр бўлганлиги учун унинг қиймати катта бўлмайди. Турбулент оқимда эса суюқлик (газ) уюрмали ҳаракатланади ва улар яхши аралашади ҳамда иссиқликни жадал узатади. Суюқлик (газ)

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 аралашishi 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 ($v=l(r)$) радиус функциясидир, 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 қаршилик кўрсатади. Натижада, бу қатламда температура исрофи катта бўлади.

Иссиқлик алмашинувида қўлланиладиган асбоб-ускуналарнинг турига, конструкциясига, материалга 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 қиймати 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 $2 \cdot 10^{-9}$ 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:

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

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 мақсадида (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 орқали ифодаласак, тенглама қуйидаги кўринишга келади:

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

Ҳосил қилинган тенглама (127) иссиқлик 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 ўтказиши 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, ж сиртига тушган ҳамма тўлқин узунликларидаги нур қайтади. Бундай жисмдан нур диффузлон қайтса (*diffusio* — тарқалиш, оқиш) о қ ж и с м дейилади.

Жисм сиртига тушган нурнинг тушиш бурчаги ун қайтиш бурчагига тенг бўлса, бундай жисм к ў з дейилади.

Ҳар қандай жисм ў з сиртига тушаётган нурни к тариш билан бирга, ў зидан ҳам нур чиқаради. Ж сиртидан қайтган ва жисм тарқатган нур энергиял йинғиндиси э ф ф е к т и в н у р л а н и ш дейилади:

$$E_{с,ф} = RE_T + E.$$

Агар $A=R=0$ шарт, яъни $D=1$ бажарилса, жисм с тига тушган нур ундан ў тиб кетади. Бундай жисм с с о л ю т ш а ф ф о ф ж и с м дейилади. Шаффоф жи лар диатермик (юнонча *dia therme*, *dia* — орқа, *therme* — иссиқлик), яъни и с с и қ л и к н у р л а р и ю т м а й д и г а н ж и с м л а р дейилади. Бир ва и атомли газлар диатермик ҳисобланади. Кўп атомли г лар эса иссиқлик энергиясини нур кўринишида тарқ а д и ва ютади.

Юқорида баён қилинган фикр ва мулоҳазалард маълумки, табиатда мутлақо қора, оқ ва шаффоф жи млар бўлмасдан, фақат уларга яқинроқ бўлганлари ма жуд. Нур воситасида иссиқлик алмашинуви асос М. Планк, В. Вйн, Стефан-Больцман, Кирхгоф қонуни ри ёрдамида батафсил тушунтирилади.

Маълум температурадаги жисм ў зидан фақат ягон тўлқин узунликдаги нурларни (электромагнит тўлқини атроф-муҳитга нурлантирмасдан, кенг оралиқдаги тў қинларни тарқатади. Тарқалаётган тўлқинларининг ж даллиги (интенсивлиги) ҳар хил тўлқин узунликлари д турлича бўлади.

Бирор аниқ тўлқин узунлигидаги нур оқими спект р зичлигининг жадаллиги қуйидагича ифодаланади:

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

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

Абсолют қора жисм температураси билан нур тарқ а лиш 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 тўлқин 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 орттирилса, унинг нур тарқатиш жадаллигининг максимуми қисқа тўлқин томонга силжийди. Бу қонуниятни В. Вин 1893 йили кашф этган ва унинг математик ифодасини берган:

$$\lambda_{\text{max}} = 0,0028989/T$$

ёки

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

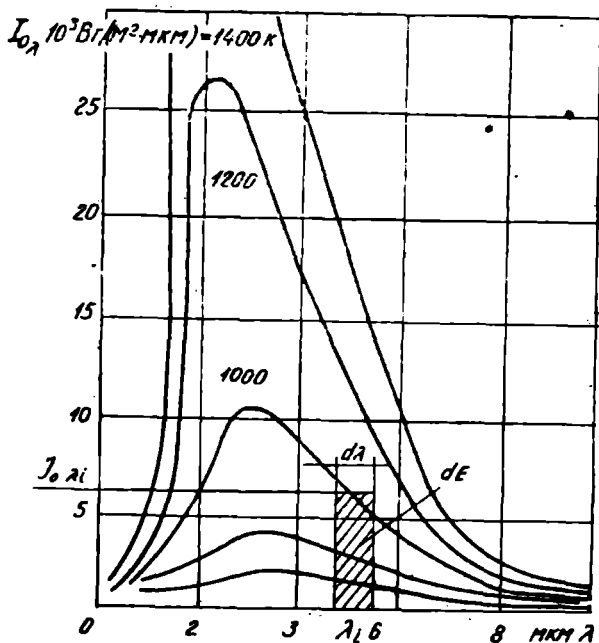
Бу В. Виннинг силжиш қонуни дейилади. Силжиш қонунига мувофиқ жисмлар нур кўринишида тарқатадиган электромагнит тўлқинларнинг жадаллиги ҳар хил температурада турлича бўлади. Масалан, электр иситкичнинг $T = 1100$ К бўлганда, у $\lambda_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-6}$ м бўлган тўлқин узунлигини нурлантиради,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

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

Абсолют қора жисм сирти тарқатган нур оқимининг зичлиги қилиб нурланиш оқими спектри зичлиги $I_{0\lambda}$ нинг шу нур тўлқин узунлиги кенглиги $d\lambda$ га кўпайтмаси 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 температурааларга 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 $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ — абсолют қора жисмнинг нурлаш доимийси.

Демак, абсолют қора жисмнинг бирлик юзадан вақт бирлиги ичида нур тарқатиш қобилияти (ҳамма тўлқин узунликларидоғи 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 $C_0 = 5,67 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — абсолют қора жисмнинг нур тарқатиш қобилияти.

Стефан-Больцман қонуни абсолют қора жисмнинг иссиқликни нурлаш (нур кўринишида тарқатиш) коэффиценти $\epsilon = \frac{E}{E_0}$ 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:

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

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 коэффицентига 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 жаддаллиги нолга интилади.

Юқорида қараб чиқилган $\epsilon = \frac{E}{E_0}$ 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:

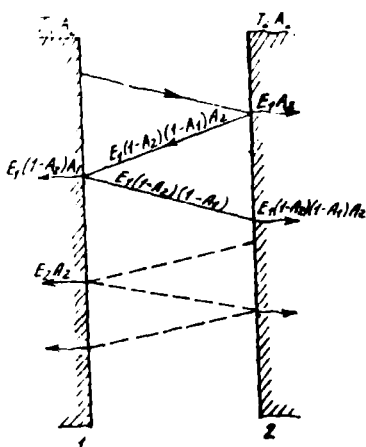
$$q = SC_{0\epsilon} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

бунда $\epsilon_k = \left(\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1}$ — иссиқлик алмашинувида қатнашувчи жисмлар системасининг келтирилган нур чиқариш коэффициенти; 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 пластинка (парда) ларни тайёрлаш мумкин. Уларнинг



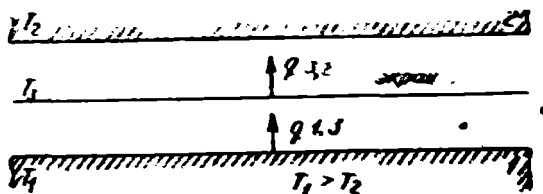
17-расм. Икки параллел сиртларнинг нур иссиқлик алмашинуви.

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 ички энергиясини орттиргандан сўнг, экран муҳитга ўз сиртидан иккиламчи иссиқлик нурини чиқаради, яъни экран орқали иссиқлик алмашинуви деб аталадиган жараён 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 $E_1 = E_2 = e_{к.э} = \epsilon$ бўлсин. Унда, албатта $T_1 > T_2$ бўлади. Иссиқ ва совуқ сиртлар оралиғидати экраннинг пардасимонлигини эътиборга олсак, у ҳолда экраннинг иккала сиртидаги температуралар бир



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

ли. бўлади, яъни $T_{s_1} = T_{s_2} = T_s$. Шу шарт бажарилса, экраннинг термик қаршилиги $R_n = \frac{1}{\epsilon}$ (тарқатиш коэффициентига тескари бўлган катталик) энг кичик қийматга эришади, яъни жисмнинг қаршилиги иссиқликнинг ўтишига нисбатан кичикдир. Биринчи девор—экран ва экран—иккинчи девор оралқларидаги иссиқлик алмашинувининг бир хиллиги асосида улар сиртларининг қоралик 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:

$$q_{1 \rightarrow 2} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (140)$$

Экрандан иккинчи деворга узатилган иссиқлик миқдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_{2 \rightarrow 2} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]. \quad (141)$$

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

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

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 инфодасини ҳосил қиламиз:

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

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 марталаб 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 ёқилгани 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. Ёқилгининг тўлароқ ёнмаслигига асосий сабаб унинг таркибида сув (намлик) ва CO_2 нинг кўплиги ёки ёниш жараёнида уларнинг ҳосил бўлишидир. Сув буғу ва карбонат ангидрид ёқилгининг ёнишидан ҳосил бўлиши маълум даражада нур иссиқлиги алмашинувини жадаллаштирса, маълум миқдорда сусайтиради. Газларнинг аксарияти маълум тўлқин узунликдаги нурларни чиқаради, яъни чиққан нур кенг ораликдаги тўлқин узунликларини қамрамасдан, аниқ узунликлардаги тўлқинлардан ташкил топади. Газлар тарқатган спектрининг тор ораликдаги тўлқин узунликларидаги энергияни ютади ва чиқаради. Тарқалган нур спектрининг кўзга кўринадиган қисмида карбонат ангидрид гази 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. Бундай ҳодиса иқлимнинг илиқ бўлиши ва «иссиқхона» эффектнинг пайдо бўлишига олиб келиши мумкин.

Газларнинг температураси ортирилганида, 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 жараёналарига хослиги 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 коэффициентлар.

4.7. Иссиқлик алмашинувида фойдаланиладиган асбоб-ускуналар ва уларнинг таснифи

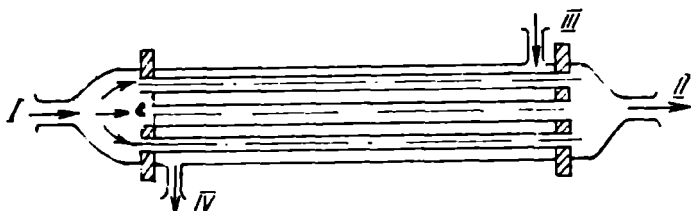
Иссиқлик элтувчи модда (сув, буғ, ҳаво, антифриз, мойлар ва ш. к.) ни иситиш ёки совитишда турли хил қурилма (мосламалар)дан фойдаланилади. Бундай қурилмага радиатор (лат. radio — нур тарқатаман), конденсатор (лат. condense — зичлайман, суюқлантираман), ҳар хил трубалар тўплами ва ш. к. лар мисол бўла олади. Иссиқлик ташувчи модданинг иссиқлиги иссиқлик алмашинув асбоблари девори ёки иссиқ модданинг совуқ моддага аралashi билан иккинчи модда (совиткич) га узатилади. 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 (элтувчи) модда температураси пастроқ модда билан аралаштирилади. Масалан, қозон қурилмадан чиқадиган юқори температурали буғ ё сув совуқ ёки илиқ 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.

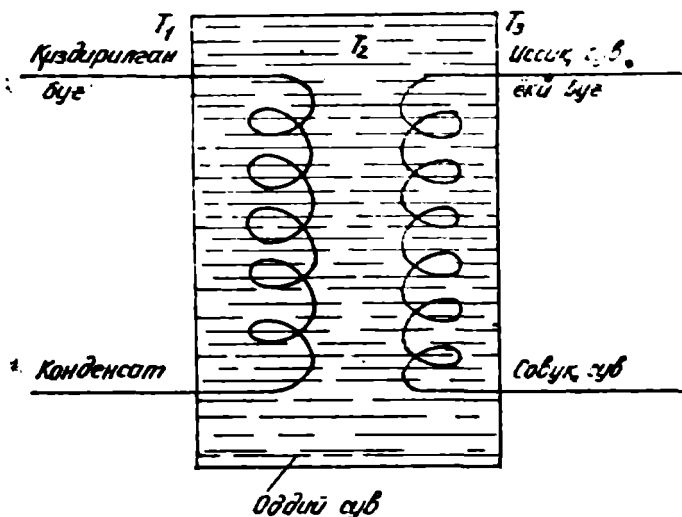
Рекуператив иссиқлик алмаштиргичда атмосферага чиқиб кетадиган газлар иссиқлигидан фойдаланилади. Бунда иссиқлик миқдори совиткичга оралиқ қаттиқ девор орқали узатилади. Иссиқлик ташувчи ва совиткич йўналишига қараб тўғри, тескари, кесишган, аралаш оқимли ва сиртларнинг геометрик шаклига кўра ясси, юмалоқ,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

Регенератив иссиқлик алмашинувида атмосферага (циклга қайтарилаётган буғ) чиқарилиб юбориладиган газ (ёниш маҳсулотни) 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 ғишт, шлак, шағалдан фойдаланилади. Металл листларнинг олд қисмига ис-



19-расм. Қувурга ўрнатилган гилофли рекуператив иссиқлик алмаштиргич: I — сув буғи; II — илиқ сув (конденсат); III — иситиладиган модда; IV — иситган модда.



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

сиқбардош (шамёт, 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. Оралық иссиқлик ташувчи муҳит қаттиқ девор, суюқлик ёки буғ бўлиши мумкин. Атом реакторининг биринчи берк контурида иссиқликни ташувчи (совиткич) сифатида оғир сув яшлатилади (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. Ҳз 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:

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

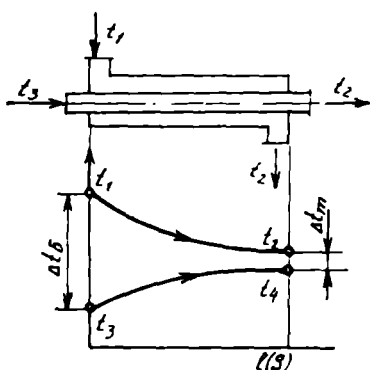
бунда η — асбобнинг ФИК.

Совиткич қабул қилган иссиқлик миқдорини энтальпия айирмаси сифатида ёза оламиз:

$$q_2 = i_3 - i_4 = m_2(C'_{p2}t_3 - C''_{p2}t_4)$$

ёки

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



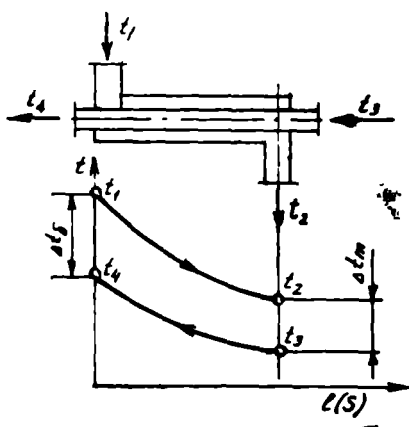
21-расм. Иссиқлик элтувчининг иссиқлик алмашинуви асбобида тўғри оқимли ҳаракати схемаси ҳамда i ва t орасида боғланиш диаграммаси.

Диаграммадан кўриниб турибдики (22, 23-расмлар), иссиқлик элтувчи ва қабул қилувчи моддалар оқимларининг ҳаракати қарама-қарши. Иссиқлик алмашинадиган асбобнинг девори юпқа бўлганида (рекуператив) иссиқ модданинг совуқ моддага узатган иссиқлик миқдорини тақрибан қуйидагича ифодалаш мумкин:

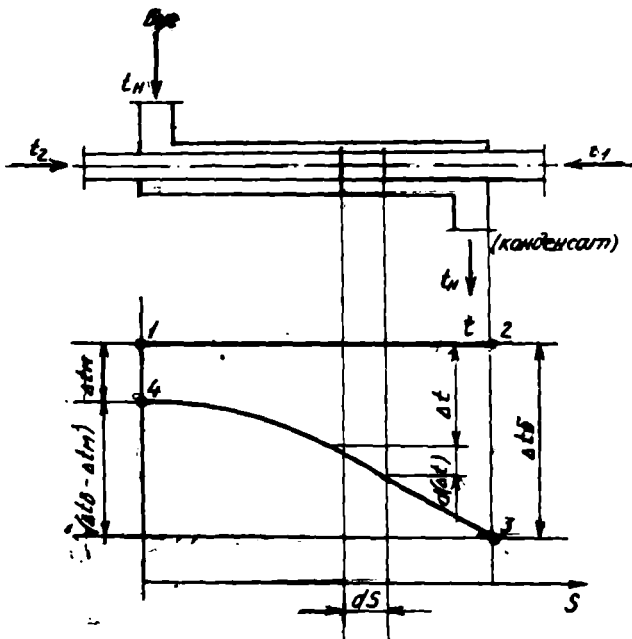
$$q_2 = kS(t_1 - t_2) = kS\Delta t, \quad (148)$$

бунда $k = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{l}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$ — иссиқлик узатиш коэффициентини;

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



22-расм. Иссиқлик элтувчининг 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 — юққа девор сиртининг юзаси; t_1 ва t_2 — юққа 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

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

бунда $\Delta t_6 = t_1 - t_4$; $\Delta t_m = t_2 - t_3$ (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 $\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m}\right) < 2$ 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_7 қийматлар ўзгаради.

Иссиқлик алмашинуви асбобларидан қўпчилик 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 сўнгра, 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 ЭҲМ дан фойдаланилади.

У 6 0 6. ЕҚИЛҒИ

5.1. Еқилғи ва унинг хоссалари

Асосий таркибий қисми углероддан иборат ёнувчи моддага ё қ и л ғ и дейилади. Кимёвий реакциянинг жадал бориши натижасида ё қ и л ғ и ўзидан иссиқлик чиқаради. Еқилғига қуйидаги талаблар қўйилади: ёниш вақтида кўп миқдорда иссиқлик чиқариш; ёниш маҳсулотида 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. Еқилғи қазиб олиниши ёки тайёрланишига кўра табиий ва сунъ-

ий бўлади. Табиатда ишлатишга тайёр ҳолда мавжуд бўлган ёқилғилар табиий ёқилғилар дейилади. Қазиб олинadиган тошкўмир, 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 кўмири, 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 тошкўмир, торф, ёнувчи сланецлар, кокс, ёғоч кўмири 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, тошкўмир қазиб олишда олинadиган газлар ва ш. к. мисол бўла олади.

Ёқилғи таркиби органик ва минерал моддалардан иборат бўлади. Органик моддаларга углерод (С), водород (H_2), кислород (O_2), азот (N_2) ва олтингугурт (S) киради. Бў 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. С 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.

Ёқилғининг таркибий қисми фонз (%) 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
Автрацит	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	Қурук газ ҳажмидаги модда миқдорлари, %							
	CH ₄	H ₂	CO	C _n H _m	O ₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂
Табiiй (Бу-хоро)	94,9	—	—	3,8	—	0,4	—	0,9
Кокс гази (то-заланган)	22,5	57,5	6,8	1,9	0,8	2,3	0,4	7,8
Домна гази	0,3	2,7	28	—	—	10,2	0,3	58,5
Суультирилган газ	4	қолгани бошқа газлар: пропан 79%, этан 6%, водород, изобутан 11%.						

Кам миқдорда водород газини сувни 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 массасини ёнувчи қисмининг таркибини ўзгармас катталиқ бўлиб, унинг асосий харақтеристикасини ҳисобланади. Ундаги намлик ҳамда кул миқдори ўзгарганида ҳам унинг харақтеристикасига 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 ксилород билан тўла реакцияга ки-

риша олмаганлигидан заҳарли углерод оксиди CO ҳосил бўлади. Ёқилғидаги олтингургуртнинг реакцияга киришидан эса сульфид ангидриди SO_2 ҳосил бўлади. У ёқилғи таркибидаги намликдан вужудга келган сув буғи билан бирикиб 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 температурагача қиздириш йўли билан ундаги оғир молекулаларнинг парчаланishi 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 газ) CH_4 , водород H_2 , азот N_2 , юқори даражадаги углерод бирикмалари CH , 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 тенг аралашмаси 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 эҳтиёжларида кўпроқ ишлатилади.

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

Ёқилғи тўла ёнганда ажралиб чиқадиган иссиқлик миқдори турлича бўлганлигидан, уларни бир-биридан фарқлаш мақсадида, ёқилғининг *ёниш иссиқлиги* тushunchаси 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 ($q_{к}^n$) 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 ажралиши* 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 ажралиши* 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 $q_{к}^n$ орасидаги боғланишни қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

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

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

Қаттиқ ва суyoқ ёқилгиларнинг иссиқлик ажратишини Д. И. Менделеевнинг эмперик формуласи асосида етарли аниқликда Ж/кг ўлчовида назарий ҳисоблаб топилади:

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

$$q_k^a = 339C + 1250H - 109(O - S). \quad (156)$$

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

$$q_k^g = 10^4 (12,8CO + 10,8H_2 + 35,8CH_4 + 56C_2H_6 + 59,5C_3H_8 + 63,4C_4H_{10} + 91C_5H_{12} + 120C_6H_{14} + 144C_8H_{18}).$$

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

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

Т-жадвал

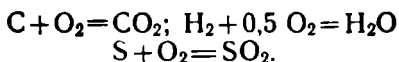
Ёқилгиларнинг q_k^a иссиқлик ажратиши

Ёқилги	$q_k^a \cdot 10^{-4}$, МЖ/кг	Ёқилги	$q_k^a \cdot 10^{-4}$, МЖ/кг
Елоч	1,05—1,47	Нефт	4,30—4,60
Торф	0,84—1,05	Мазут	4,0—4,55
Қўғир		Керосин	4,40—4,60
Кўмир	0,63—1,09	Бензин	4,40—4,70
Тошқўмир	2,1—3,0	Табiiй газ	2,70—3,60
Антрацит	2,70—3,10	Нефтинг ҳамроҳ газлари	4,20—7,10
Егувчи сланецлар	0,70—1,50	Кокс газ	1,50—2,10
Паста кўмир	3,0—3,40	Дома газ	0,36—0,41
Ярим кокс	2,50—3,10	Генератор газ	0,41—0,71
Кокс	2,80—3,10	Суз газ	1,05—1,17

5.3. Ёқилғининг ёниши ва ортиқча ҳаво коэффициенти

Ёқилғининг ёниши учун албатта атмосфера ҳавоси зарур бўлади. Унинг миқдори кўп 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 олтингургуртнинг 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 шароитдаги зичлиги $\rho = 1,43 \text{ кг/м}^3$ ва унинг атмосфера ҳавосидаги улуши 23,15% ни ташкил этади.

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

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

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:

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

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

ми, %; $2,67/23,15=0,115$; $8/23,15=0,344$; $1,23/23,15=0,043$
сонлар С, Н, S миқдорларининг ҳаводаги O_2 улушига
нисбатлари.

Назарий ҳисобланган ҳаво массасини ҳажмий бир-
ликларда ифодалаш учун $m_{x,n}$ ни ҳаво зичлигига (нор-
мал шароитда)

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

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 ёни-
шини таъминлаш учун реал шароитларда зарур бўлган
назарий ҳаво миқдори ҳисоблаб топилади. Аммо реал
шароитда ўтхоналарни жуда такомиллаштирганимизда
ҳам назарий ҳаво миқдори етарли бўлмайди. Ҳаво тар-
кибидаги кислород атомларининг ҳаммаси ёқилғи билан
тўлиқ реакцияга киришишга улгурмасдан ёниш маҳсу-
лоти (тутуш) га аралашиб ташқарига чиқиб кетади. Шу-
нинг учун $V_{x,n}$ га нисбатан кўпроқ ҳаво миқдори ке-
рак бўлади ва у қуйидаги тегиликдан ҳисоблаб топила-
ди:

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

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

Тўла ёниш учун зарур бўлган ҳақиқий ҳаво миқдо-
рининг назарий ҳисоблаб топилган миқдорига нисбати
ортиқча ҳаво коэффиценти дейилади ва у қуйидагича
ифодаланadi:

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

α_x нинг катталиги ёқилғининг турига, агрегат ҳолатига,
реакция кечадиган шароитга, ёқиш усулига, ўтхона (ка-
мера) конструкциясига ва бошқаларга боғлиқ. α_x қан-
ча кичик бўлса, ёниш жараёни шунча тежамли бўла-
ди, 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 двигател-
ларида 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 ортирилади.

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 йиғиндисини ёниш маҳсулоти массасига тенг бўлиши керак.

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

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

Қуруқ газларга $CO_2 + CO + SO_2 + O_2 + N_2$ киради ва уларнинг йиғиндисини 100 фоиз деб қабул қилинади. $CO_2 + SO_2 = RO_2$ уч атомли газлар йиғиндисини 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 $V_{х.н} > V_x$ шартин асоси-

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

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

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

бунда $0,79\alpha_x V_x$ — атмосфера ҳавоси таркибидаги, реакцияга кирмаган «транзит» — ўткинчи, азот миқдори; α_x — ортиқча 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 ортиқча ўткинчи кислород миқдори.

Нормал шароитда идеал газнинг 22,4 м³ ҳажмини 1 кмоль газ эгаллайди. Уч атомли газлар V_{RO_2} ҳажми қуйидаги ифодадан ҳисоблаб топилади:

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2} = \left(\frac{C^u}{12} \cdot 10^{-2} + \frac{S_{O_2+K}^u}{32} \cdot 10^{-2} \right) 22,4 = (165)$$

$$= 0,0168 (C^u - 0,375S_{C+K}),$$

бунда S_{C+K} — ёнувчи олтингурутнинг органик ва қолчедон қисми; 12 ва 32 — углерод ва олтингурутнинг моляр массалари.

Сув буғини идеал газга яқинроқ деб қабул қилинса, унинг зичлиги (нормал шароитда) $\rho = 18/22,4 = 0,805$ кг/м³ бўлади. Агарда атмосфера ҳавосидаги сув буғи зичлиги (нормал шароитда) $\rho_{с.б} = 0,01$ кг/м³ ҳам ҳисобга олинса, ёқилғининг 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 таркибининг 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.

5.5. Ўтхона қурилмалари ва уларда ёқилғини ёқиш усуллари

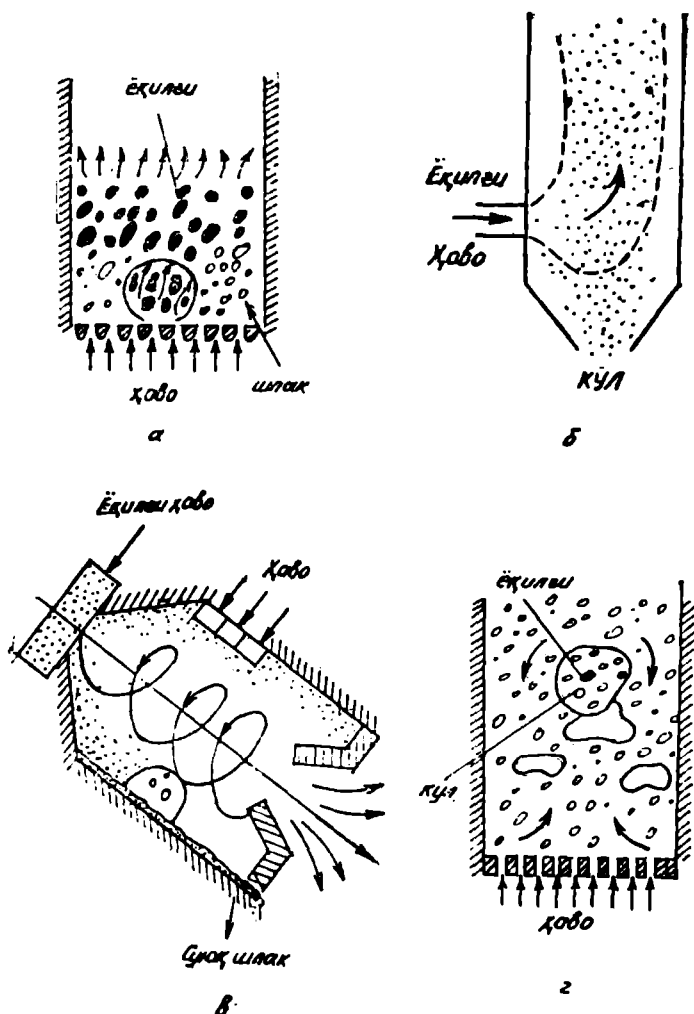
Ёқилғининг ёниш жараёни кечадиган қурилма ўтходейилади. Ёниш жараёнининг боришини таъминлайган ва бошқарадиган ускуналар мажмуи ўтхонарилма сифатида дейилади. Конструкциясига кўра ўтхонда қаттиқ, суюқ ва газ ёқилғилари ёқилади. Қаттиқ ёлғин табиатда қандай пайдо бўлган бўлса, шундайлига, бўлаклаб кукун ҳолига келтириб ёқиши мумкин. хона қурилмаларини лойиҳалашда энг аввал ёқилғинг тежаб ёқишлишига, ёниш маҳсулотига тутун ва окловчи ҳаво оқими йўллارининг тўғри ташкил қилишига ҳамда ўтхонани ишга тушириш, ишлатиш ишрининг механизациялашганлигига ва автоматлаштирилишига асосий эътибор қаратилади.

Ўтхоналар қатламли, камерали (машъалали, уюрли) турларга бўлинади.

Қаттиқ ёқилғини ёқиш. Ёқилғини қатламли ёқиш ўтхонасининг асосини панжарали чўғдон ташкил этади. инжарали чўғдон устига маълум қалинликда қаттиқ ёлғин текис жойлаштирилади ва панжара остидан атмосфера ҳавоси оқими табиий равишда ёки мажбурий илғи оралаб ўтиб туради. Оксидловчи газ (атмосфера ҳавоси) қаттиқ ёқилғин билан таъсирлашиб ёнишни таъминлайди ва ҳосил бўлган аланга ҳисобига иссиқлик эргияси ҳамда ёниш маҳсулотлари ҳосил бўлади. Ёниш маҳсулоти билан ёқилғин зарралари атмосферага учиб кетмаслиги ва тўлиқ ёниши ҳамда кўпроқ иссиқлик қиралиши учун ўтхонада ҳосил бўлган газ оқимининг тартилиш кучи ёқилғини бўлакчасининг оғирлик кучини кичик бўлиши керак. Ёқилғини бўлакчаларининг ўлчами 20—30 мм дан кичик бўлмаслиги лозим.

Панжарали чўғдон ёқилғини тутиб турибгина қолмасдан, ёқилғинга ҳавони ўтказиш, кул ва шлакни кулна томонга узлуксиз ўтказиб туриш вазифасини ҳам жаради. Чўғдондаги ҳамма тешик ва тирқишларнинг идаланг кесимлари йиғиндисини панжаранинг *жонли сими* дейилади. Панжарали чўғдон ўлчамлари ёқилғини ва унинг бўлакларининг катта-кичиклигига мос равишда танланади.

Чўғдон, асосан чўяндан қуйиб ишланади ва юзасини тата бўлганда, у бир неча бўлакдан ташкил топади. хона чўғдони горизонтал, қия зинапояли, тебранма зина



24-расм. Ёқилғини ёқиш усуллари: а) қатламли; б) машъалали; в) уюрмали; г) қайновчи қатламли.

напосяли (Тейлор схемаси), ҳаракатланувчан занжирли (горизонтал ёқи қия) қилиб жойлаштирилади. Утхона қандай қурилганлигига ва ёқилғи турига қараб чўғдон қўзғалмас ёқи махсус механизмлар таъсиринда тебранадиган, илгарилма-айланма ҳаракат қиладиган бўлиши

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 биргалликда 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 суйрилик 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 вақиб чиқади.

Чангсимон ҳолатта 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 коэффициентини $\alpha_x = 1,2—1,25$ қилиб олинганда чала ёнишда вужудга келадиган исрофлар жуда кам ва ўтхона самарадорлиги иқтисодий жиҳатдан юқори бўлади;

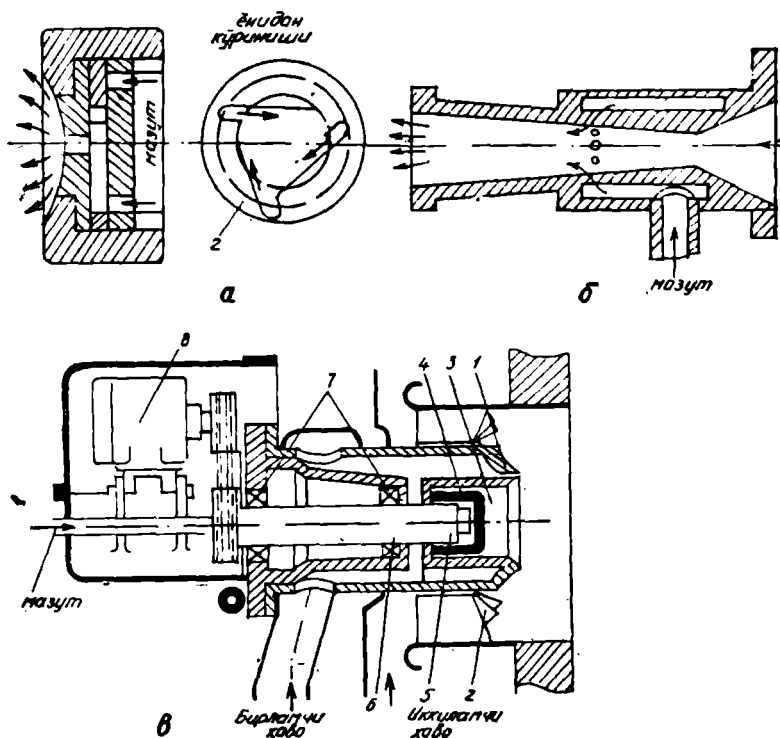
в) ёниш жараёнини тўла механизациялаштириш ва автоматлаштириш мумкин;

г) паст қувватларни осонгина олиш мумкин.

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

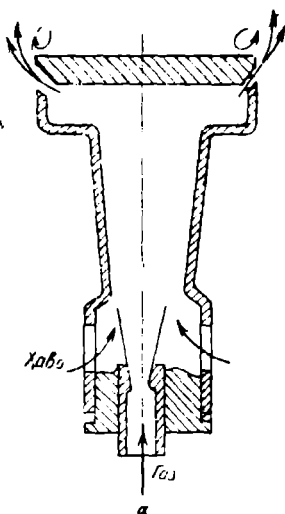
атмосферага учиб чиқади ва атроф-муҳитни ифлослан-
тиради.

Суюқ ва газ ёқилгиларини ёқишда махсус мослама-
лар — горелка ва форсунка (ингл. *force* — дам, бермоқ)
қўлланилади. Горелка ва форсункаларнинг тузилиши ка-
мера, ўтхоналарнинг қуввати ва уларнинг турига қараб
ҳар хил бўлади. Суюқ ва газ ёқилгиларидан фақат ка-
мера ва ўтхоналардагина ёқилмасдан, ички ёнув двига-
телларида, реактив двигателларда ҳам иш ёқилгиси си-
фатида кенг фойдаланилади. Горелка ёки форсунка
ёниш камералари (ўтхоналари)нинг асосий қисми ҳисоб-
ланади. Суюқ ёқилгилар ёқилганда улар форсунка ор-
қали камерага пуркалади. Ёқилгини форсунка майда
зарраларга айлантириб, камерага тўзғитиб пуркайди
ва пуркалган ёқилги ҳаво билан яхши аралашиб, тўлик
ёнади.

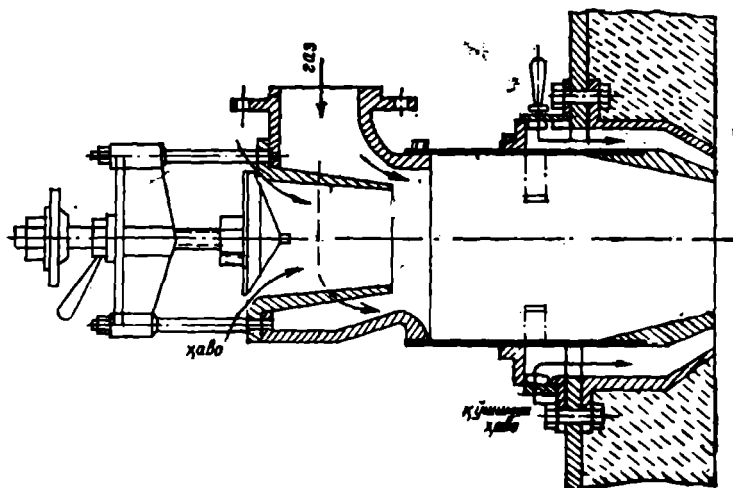


25-расм. Форсунка турлари: а) механик; б) пневматик; в) ротацион

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 қамда 80—115° С 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 газни ва табиий газ ёқилади. Утхонага ҳаво ва газ горелкалар орқали узатилади.

Горелкалар юқори ва паст калорияли газ ёқилғисини ёқишга мўлжалланган. Қозон қурилмалари ўтхоналарида газни 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 олд қисмидаги ҳалқасимон тирқиш орқали унга ҳаво сўрилади. Соплонинг давоми газ ва ҳавони аралаштиргич вазифасини бажарганлигидан унда иш ёқилғиси (газ ва ҳаво аралашмаси) ҳосил бўлади. Утхона ичида жойлашган горелканинг тешикли қисмидан иш аралашмаси камерага киради ва ёнади. Газ ёки ҳаво оқимининг миқдори заслонка (тўсиқ) ва клапанлар ёрдамида ростланади.

Ёқилганда кул ҳосил бўлмаслиги ва маълум шарт-шароит яратилганда юқори температуранинг 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 мойни ҳамда қайта ишланган табиий газ, ҳозирча лаборатория шароитларида олинаётган ва тадқиқот қурилмаларида қўлланиладиган водород газидан фойдаланилади.

Карбюраторли ички ёнув двигателларида, асосан бензин, лигроин ва газ; дизель ички ёнув двигателларида газойль ва соляр мойни; реактив двигателларда керосингазойль фракциялари ишлатилади. Бензин (франц benzine — хушбўй модда) углерод ва водород бирикмаларидан иборат бўлиб 30—205°C қайнайди. Унинг зичлиги $\rho = 700\text{—}800 \text{ кг/м}^3$. Нефтдан 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 двигателларида 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 олинishi 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. Керос — мум) — суюқ 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 суюқлик 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 суюқлик, 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	Оғирлиги бўйича таркиби				Солиштириш маъносидаги зичлиги, Н/м^3	Иссиқлик чиқариш хусусияти, кал/кг	15°C ва 1 атм ҳавосининг назарий сирфи, $\text{м}^3/\text{кг}$
	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 ишқаланишини камайтириш учун турли-туман мойлаш материаллари ишлатилади: Автол, ТАД-17, Литол-24, Филлол-1, Техник вазелин ВТВ-1 ва ҳ. к.

VI боб. ИЧКИ ЁНУВ ДВИГАТЕЛЛАРИ

6.1. Ички ёнув двигателлари ҳақида умумий тушунча ва уларнинг таснифи

Иш ёқилғиси махсус қурилма ичида ёнадиган ёниш жараёнида ажралиб чиққан иссиқлик миқдорини маълум қисмини механик энергияга айлантириб берадиган иссиқлик машинасига ички ёнув двигатели (ИЕД) дейилади. Барча термодинамик жараёнлар цикл давомида цилиндрнинг иш ҳажмида кетма-кет кечадиган поршенли; иш жисми ҳаво компрессорида ёқиладиган, махсус ёниш камерасида ёнадиган ва ёниш маҳсулоти газ турбинасида кенгайдиган газ турбинали ёниш маҳсулоти соплода кенгайишидан реактив кучи пайванд бўлган реактив двигателлар мавжуд ва уларнинг инсон фаолиятининг турли соҳаларида кенг қўлланилади.

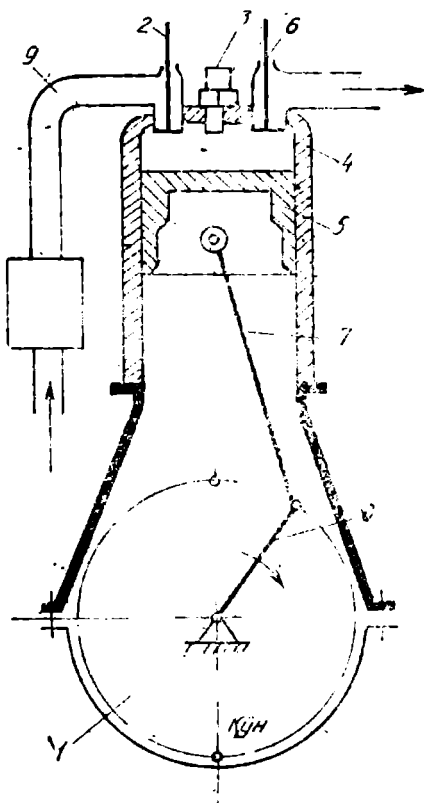
Ички ёнув двигателлари ёқилғи турига қараб, ички ёқилғисида (газ двигатели), суюқ ёқилғида (бензин, спирт, дизель, лар мойи, керосин, лигроин ва ҳ. к.), бинар (суюқ ва газ ёқилғида ишлайдиган двигателларга бўлинади. Иш шартли равишда қараб икки ва тўрт тактли; ёқилғининг камераси киритилишига қараб босимли ва босимсиз; иш аралашмасининг тайёрланишига кўра иш жисми ташқарида ёки ички равишда тайёрланадиган двигателларга бўлинади. Иш аралашмасини ўт олдириш усулига қараб ташқи элементлардан (электр учқуни, ўт олдириш шари—калорифтор) ва цилиндрда сиқилган ҳавонинг қизиши (дизель двигатели) ҳисобига ўт олдириладиган двигателлар мавжуд. ИЕД лари автомобиль, авиация, газ турбинали реактив двигателларга бўлинади.

Автомобиль учун ИЕД ларининг яратилиши ўттинчи асрнинг 60-йилларига тўғри келади. Бу даврда Ленуа (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.) таклиф этилган схема бўйича ясалди. 19-а. да нефтни қайта ишлашдан олинган бензин, керосинларни электр учқуни ёрдамида ёқилиши ИЕД ларини кенг тарқалишига сабаб бўлди.

Россияда биринчи марта бензинда ишлайдиган ИЕД (Костович двигатели) 1889 йил ясалган. Немис муҳандиси Р. Дизель томонидан ихтиро этилган (1897 й.) дизель ёқилиш ҳисобига қизиган ҳавога пуркалган ёқилғини

ёниши натижасида ишлайдиган ИЕД нинг такомиллашган конструкцияси 1899 й. Петербургда ясалади. Кейинчалик компрессорсиз дизель двигателини 1901 йилда Г. В. Тринклер 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. Поршекли ИЕДнинг принципиал схемаси: 1 — картер; 2 ва 6 — киритиш ва чиқариш клапанлари; 3 — ўтқандириш свечаси; 4 — цилиндр; 5 — поршень; 7 — шатун; 8 — кривошин; 9 — киритиш трубаси.

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

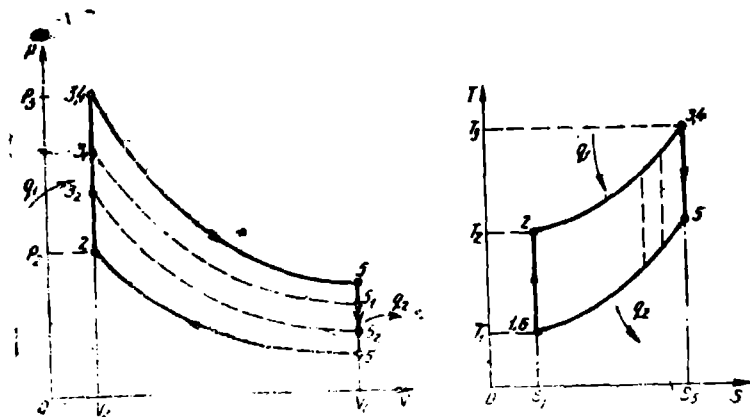
Поршенли двигателлар тежамли ишланганлиги, кам металл сарфланганлиги, ишга тушириш осонлиги, ишончли ишлаши, мустаҳкамлиги ҳамда узоқ муддат ишлаши, ихчамлиги туфайли транспортда етакчи ўринни эгаллайди. Бундан ташқари у кичик ва катта қувватли электр станцияларида (20 кВт дан 20 МВт гача) ҳам ишлатилади.

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 узатади. Цилиндрлар блокнинг остки қисмига тирсак вали, устки қисмига тирсак вали, устки қисмига киритиш 2 ва чиқариш 6 клапанлари жойлаштирилган цилиндр қаллаги ўрнатилади. Цилиндрлар блоки қаллагига карбюраторли двигателларда свеча 3, дизель двигателларида эса форсункалар ўрнатилади. Поршень цилиндрда илгариланма-қайтма ҳаракат қилади. Цилиндрда поршень ЮУН (юқори ўт олиш нуқтаси) ва ҚУН (қуйи ўт олиш нуқтаси) оралиғида ҳаракатланади ва бу оралиқ (l) поршень йўли дейилади. Цилиндрнинг иш ҳажми $V_u = \frac{\pi d^3}{4} l$ поршень диаметрига ва унинг йўлига боғлиқ. Цилиндрнинг тўла ҳажми иш ҳажми билан ёниш камераси ҳажмлари йиғиндисига тенг. $V_u = V_u + V_k$. Иш ёқилганисининг сиқилиш даражаси поршеннинг цилиндрдаги ҳолатига боғлиқ ва қуйидагича ифодаланади:

$$\varepsilon = V_k \left(1 - \frac{V_u}{V_k} \right) \quad (467)$$

6.2. Ички ёнув двигателлари циклида кечадиган термодинамик жараёнлар

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



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

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

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

Ҳар бир тактда поршеннинг цилиндрдаги ҳолати тўғрисида батафсил тўхталмаймиз.

Қарбюраторли тўрт тактли ИЕД назарий шиклидаги жараёнларни қараб чиқамиз. Циклга $V = \text{const}$ бўлганда иссиқлик киритилиши (Отто цикли) жараёнида иш жисми параметрларининг ўзгаришини ўрганамиз. Поршень ҚҮН дан то ЮҮН гача. (28-расм, 1, 2 нукталар оралиғида) цилиндрга киритилган иш ёқилғисини адиабатик ($dq = 0$) сиқиб 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 сиқиб такти охиридаги босим 5—10 атм; газ қўлланилганда 9—14 атм га етади.

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

(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 ЮУН дан ҚУН га томош 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 иш бажарилади. Поршень ҚУН га етиши олдидан чиқариш клапани очилади ва фойдали ишга айлвмасдан қолган иссиқлик миқдори q_2 ёниш маҳсулот газлари, ёнимасдан қолган ёқилғи ва реакцияга киришмаган ҳаво билан ташқарига (совиткичга) чиқарилади (4—1 нуқталар оралиғи).

Демак, цилиндрнинг PV диаграммасидаги нуқталар 1—2 ва 3—4 оралиғидаги жараёнлар адиабатик; 2—3 ва 4—1 нуқталар 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 ташқили топар экан. Циклниң TS диаграммасидан кўриниб турибдики, системага иссиқлик киритилганда ёки ундан чиқарилганда система энтропияси ўзгарувчан бўлар экан. Лекин системаиң абсолют температураси изохорик жараёнда кескин ортади, адиабатик жараёнда эса текис қамаяди.

Демак, иш ёқилғининг сиқилишини, яъни поршеньнинг сиқилиш даражасини PV — диаграмма асосида қуйидагича фойдаланиш мумкин.

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (168)$$

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

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

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

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

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

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

Отто циклининг термик ФИК қуйидагича ифодаланади:

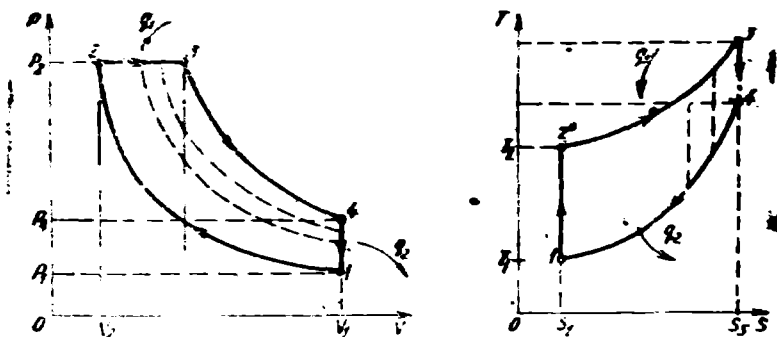
$$\eta_c = 1 - \frac{1}{\kappa^{\frac{1}{\gamma}}}, \quad (170)$$

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 ҚҲН даг ЮҲН томон силжиганда иш ёқилғиси 1—2 нуқталар оралиғида адиабатик ($aq=0$) сиқилади, яъни термодинамик система параметрлари система ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига бошқа қийматларни қабул қилади. Дизель двигателларида сиқиш тактининг охиридаги босим 30—35 атм. га етди. Карбюраторли двигателларнинг сиқиш даражаси $\epsilon=6-9$ (айримларида $\epsilon=11$), такт охиридаги босим $P_3=0.0-1.5$ МПа ва иш ёқилғиси температураси $T_3=550-750$ К га етди. PV -диаграммадаги нуқталарга мос равишда (28 ва 29-расмлар) 3 нуқтадаги P_3 ва T_3 қийматлар қуйидаги тенгламалардан фойдаланиб ҳисобланиши мумкин:

$$\frac{P_3}{T_3} = \frac{P_1}{T_1} \epsilon^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (171)$$

бунда $P_1=0.09$ МПа; $T_1=323$ К; $\gamma_1=1.40$. Поршень ЮҲН етганда, яъни сиқиш тактининг охирида q_1 иссиқлик миқдори киритилади (сиқилган ҳаво температураси ёқилғининг ўз-ўзидан ёниш температурасидан юқори бўлган $T=1000-1200$ К га етказилади ёки электр учқунин чақнайди). Поршень каллагига ва ёниш камераси деворлари билан чегараланган ҳажмда ёнаётган иш ёқилғисининг ёниш маҳсулот босимини $P = \text{const}$ да сақлаб туриш учун жуда тез бўлмаса-да, поршень ҚҲН 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 ёқилғиси тўлиқ ёниб бўлгандан сўнг, адиабата



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

тик кенгаёб; ан ёниш маҳсулотининг босими таъсирида поршень ЮН дан ҚУН га томон ҳаракатланади (нуқталар 3—4 оралиғи). Бу кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш бажаради. Ёниш маҳсулотидagi 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 айирмасин $1-2-3-4-1$ 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. Чункў циклга иссиқлик киритилганда иш ёқилғиси ёниши билан шу вақтнинг ўзида поршень ҳам ҳаракатга кела бошлайди, яъни сиқиш такти ҳосил қилган босим остида ёниш жараёни кечади ва босим иш ёқилғиси ёнганда ҳам ўзгармайди.

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

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V}$$

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

$$\frac{V_1}{V}$$

Ёниш маҳсулоти 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) оралиғида ёниш маҳсулоти ҳажмининг ўзгаришини ифодалаган коэффициентни

$\delta = \frac{A}{V}$ нисбатдан аниқлаш мумкин, чунки $V_1 - V_4$ бўлганлигидан

$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho}$ кўринишда ёза оламиз. Циклнинг термик фойдали иш коэффициентини адиабатик сиқиш ва кенгайиш жараёнларидаги адиабата кўрсаткичи, ҳамда коэффициентлар ρ ва ε орқали қуйидагича ёзиш мумкин:

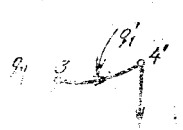
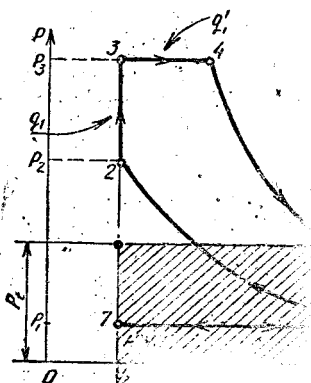
$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^\kappa - 1}{\rho(\rho - 1)} \frac{1}{\varepsilon^{\kappa - 1}} \quad (172)$$

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

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

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

Цилиндрга киритилган ёқилғи ва ҳаво аралашмаси сиқиш тактида ўз параметрларини нуқта 1 га нисбатан нуқта 2 гача адиабата бўйича ўзгартириб боради, яъни термодинамик система мувозанатда бўлмайди. Сиқиш



30-расм. Ёниш $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ бўлганда содир бўладиган циклниң 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 оралиги) қабул қилинган иссиқлик миқдори q ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

Ёқилғи изохора бўйича тўлиқ ёниб улгурмасдан унга q_1' иссиқлик миқдори киритилади. Ёниш жараёнининг давоми изобара бўйича кечади, яъни тўлиқ ёнмасдан қолган ёқилғи $P = \text{const}$ остида ёндирилади. Поршень ЮЎН да бўлганлиги сабабли у ёқилғи тўлиқ ёниб бўлгандан сўнг ёниш маҳсули адиабата ($dq = 0$) бўйича кенгайиб поршенни ҚУН га силжитиш жараёнида иш бажаради ва унинг қиймати юқорида қараб чиқилган усулдагидай аниқланади. Сиқиш даражаси $\epsilon = \frac{V_1}{V_2}$ худди Отто циклидагидай бўлса, жараён $P = \text{const}$ бўлганда ҳажмнинг 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-

пиясининг ўзгарувчанлиги $V = \text{const}$ ва $R = \text{const}$ бўлган цикллардагидай қолади.

Юқоридаги фикрлар асосида циклнинг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин.

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda p^{\kappa-1}}{\lambda - 1 + K\lambda(p-1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}. \quad (174)$$

6.3. ИЕД индикатор иши қуввати ва ФИК

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

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

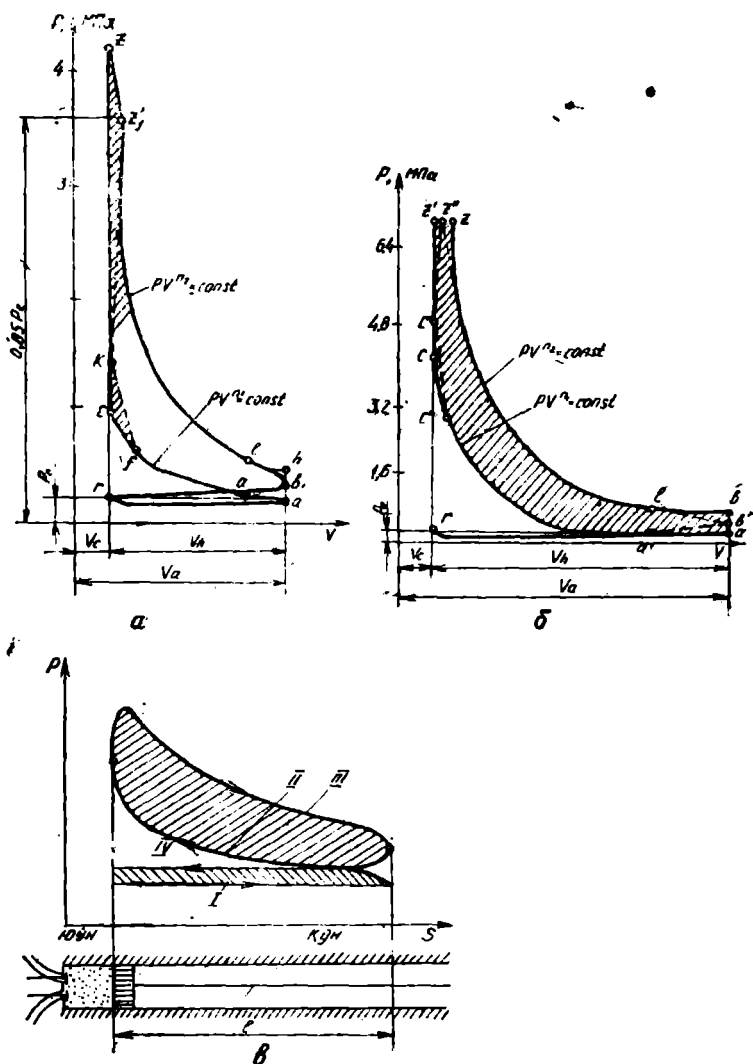
Индикатор диаграмма асосида двигателнинг индикатор иши A_i аниқланади. Унинг қиймати $a-a'-f-k-z_1'-c-b_1-a$ нуқталар билан чегараланган (31-расм, а) юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Ҳар қандай ИЕД да ёниш маҳсулоти — тутун ҳосил бўлади. Агар газларнинг ҳосил бўлишига сарфланган иш ҳам ҳисобга олинса, 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 $A_{i,а,з}$ га механик исрофларни ҳисобга олувчи A_m ҳам қўшилиб кетади. ИЕД нинг индикатор диаграммасини идеал цикл диаграммасига солиштирганда, унда бир жараёндан иккинчисига равон (бурчаксиз) ўтилади.

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

Индикатор диаграммаларидан кўриниб турибдики, $a-c-z-b-a$ (31-расм, а) ва $a-c-z_1-z-b-a$ (31-



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

расм, б) чегараланган юзалар назарий ҳисобланган индикатор иши $A_{i\text{ин}}$ 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 белгилашган штрихланган юзалар қийматига тенг бўлган катталikka дивгательнинг назарий ҳисобланган индикатор иши A_i фарқ қилар экан.

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

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

$z'-z$ нуқталари оралиғида $P = \text{const}$ бўлганда дивгательнинг бажарган иши

$$\begin{aligned} A_{z'-z} &= P_2 V_z - P_2 V_c \text{ ёки } A_{z'-z} = P_2 V_c (\rho - 1) = \\ &= \rho P_c V_c (\rho - 1). \end{aligned} \quad (177)$$

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

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

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

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

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

бунда $\frac{V_a}{V_c}$ сиқиш даражаси.

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

$$A_i = P_c V_c \left[(p-1) + \frac{\lambda p}{n_2-1} \left(1 - \frac{1}{\vartheta_2^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1-1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_1^{n_1-1}} \right) \right]. \quad (180)$$

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

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

бунда $\frac{2\tau}{\tau}$ — двигателнинг 1 секунддаги иш цикли сони;

n — тирсак валининг айланишлар частотаси, айл/с;
 i τ — циклдаги поршень йўлининг сони; $A_i = P_i V_h$ — двигателнинг индикатор иши (бунда, P_i — ўртача индикатор босим, Па; $V_h = \frac{\pi d^3}{4} l$ — цилиндрининг иш ҳажми; d — цилиндр диаметри; l — поршень йўли, м).

Цилиндр сони i бўлганда индикатор қуввати қўйидагича ифодаланади:

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

Бу тенгламани ҳисоблашларда қўллаш осон бўлиши ва қувватни кВт чиқариш учун P_i ни МПа да, V_h ни литрда, n ни айл/минда ифодалаб, қўйидаги кўринишга келтирамиз:

$$N_i = \frac{2\tau}{\tau} \cdot \frac{P_i V_h}{60} i, \quad (183)$$

Тўрт тактли ИЕД ларда $\tau=4$ бўлганлиги учун (183) тенгламага қийматини қўйиб ёзамиз:

$$N_4 = \frac{2 \cdot 4}{4} \cdot \frac{P_i V_h}{60} i = \frac{n \cdot i \cdot P_i V_h}{120}. \quad (184)$$

Икки тактли ИЕД лари учун (183) тенглама қуйидаги ўринишга келади:

$$N_i = \frac{n \cdot i \cdot P_i V_h}{60} \quad (185)$$

ИЕД нинг индикатор ФИК ҳақиқий циклдаги иссиқлик миқдоридан фойдаланиш даражасини кўрсатадиган кағзалик бўлиб, циклнинг бажарган тўла иши A_i ни шу циклда ёқилган ёқилғи ажратган жами иссиқлик миқдори q га нисбати билан ифодаланади:

$$\eta_i = \frac{A_i}{q_i} \quad (186)$$

Ёқилғининг бирлик массаси ёнганда циклда бажарилган индикаториш орқали ИЕД нинг индикатор фики ёзиш мумкин.

$$\eta_i = \frac{A_i}{q_k''} \quad (187)$$

Бунда q_k'' — ёқилғи ажратган қуйи иссиқлик миқдори.

Реал двигателнинг индикатор диаграммаси (31-расм, в) электропневматик индикатор (масалан, МАИ-2) ёки катодли инерцион бўлмаган осциллограф (кварц датчикли) ёрдамида ёзиб олинади ва диаграмма контури ҳосил қилган юза аниқланади. Ҳар бир миллиметрга мос келадиган босимни МПа ифодалайди ва шу асосида ўртача индикатор босим аниқланади:

$$P_i = \frac{S}{l \cdot p_m} \quad (188)$$

бунда l — поршень йўли узунлигига мос келувчи (миллиметрда ифодаланган) узунлик; m — масштабининг 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:

$$q_i = \frac{M_H}{N_i} \cdot 10^3, \quad (189)$$

бунда M_H — двигателнинг аниқ тартибда (яъни $N_i = \text{const}$; $n = \text{const}$; $P = \text{const}$) ишлашини таъминланган ҳолда ҳисобланган (назарий) ёқилғи миқдори, кг/соат. Унда юқоридаги тенгламалар асосида ИЕД индикатор фики 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/ m^3 ва m^3 /Ж да ифодаланлади. q_k^u ва g_i амалий ҳисоб-китобларда, мос равишда МЖ/ m^3 ва m^3 /кВт·соатда ифодаланганлиги учун η ни қуйидагича ёзамиз:

$$\eta_i = \frac{3,6}{q_k^u \cdot Y_i} \quad (193)$$

Турли хил ёқилғиларнинг қуйи иссиқлик ажратиш хусусияти 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 ифодаланлади:

$$N_{эф} = N_i - N_m \quad (194)$$

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:

$$P_m = \frac{30 \cdot N_m \cdot \tau}{i \cdot n \cdot V_h} \quad (196)$$

Уртача эффектив $P_{эф}$ босим индикатор босим билан механик шероф учун бўлган босим айырмасига тенг, яъни

$$P_{эф} = P_l - P_m. \quad (197)$$

Унда, эффектив қувватни кВт ифодалаш учун $P_{эф}$ ни МПа да, V_n ни литрда, n ни айл/мин. ўлчов бирлигида олиб $N_{эф}$ ни қайта ёзамиз:

$$N_{эф} = \frac{2 \cdot i}{60} \cdot \frac{N_{эф}}{\tau} \cdot V_n, \quad (198)$$

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 содиштирама эффектив сарфидан қандай фойдаланганлиги билиб олинади. 1 кг ёқилгининг ёнишида ажралган иссиқлик миқдорини эффектив иш орқали ифодалаш мумкин:

$$A_{эф} = A_l - A_m. \quad (200)$$

Демак, ИЕД нинг эффектив ФИК ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_{эф} = \frac{A_{эф}}{q_n''}. \quad (201)$$

У ҳолда эффектив ишнинг индикатор ишига нисбати ФИК га тенг бўлади,

$$\frac{A_{эф}}{A_l} = 1 - \frac{A_m}{A_l} \cdot \eta_m. \quad (202)$$

Бундан $A_{эф} = \eta_m \cdot A_l$ тенглик эсосида $\eta_{эф}$ ни механикавий ва индикатор ФИК орқали ифодалаш мумкин:

$$\eta_{эф} = \eta_n \cdot \eta. \quad (203)$$

Ёқилгининг қуйи ёнишида ажралган иссиқлик миқдорини эътиборга олсак, суюқ ёқилгида ишлайдиган ИЕД учун эффектив ФИК ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$\eta_{эф} = \frac{\alpha l_0 \eta_m \rho l}{q_n'' \cdot \tau_V \cdot \rho_K} = \frac{\alpha \cdot l_0}{q_n'' \cdot \rho_K \cdot \tau_V} P_{эф}. \quad (204)$$

ИЕДларнинг механик ФИК ва цилиндрдаги ўртача эффектив босим қийматлари

ИЕД тури	$P_{эф.}$, МПа	$\eta_{\text{м}}$
4 тактли карбюр.	0,6—0,95	0,7—0,85
4 тактли дизель	0,55—0,85	0,7—0,82
Газ билан пуфланадиган	0,5—0,75	0,75—0,85
Пуфланадиган тўрт тактли дизель	0,7—2,0	0,8—0,9
Тезюрар икки тактли дизель	0,4—0,75	0,7—0,85

Юқорида қараб чиқилган усулга ўхшаш ёқилгининг солиштирама эффектив сарфи $\eta_{эф.}$ орқали аниқланади:

$$g_{эф.} = \frac{1}{\eta_{эф.} \cdot q_k^a} \quad (205)$$

(205) тенгликка $\eta_{эф.}$ қийматни қўйиб, уни қайта ёзамиз:

$$g_{эф.} = \frac{\rho_k \tau_{\text{св}}}{\sigma \cdot l \cdot P_{эф.}} \quad (206)$$

$P_{эф.}$ ни МПа да, $g_{эф.}$ ни г кВт. соғда ифодаласак, у ҳолда (206) тенгламани қуйидагича ёзамиз:

$$g_{эф.} = \frac{3,6 \cdot \rho_k \cdot \tau_{\text{св}} \cdot 10^3}{\sigma \cdot l \cdot P_{эф.}} \quad (207)$$

Албатта, ёқилги тури ўзгаришидан $g_{эф.}$ ва $\eta_{эф.}$ қийматлар бошқачарақ кўринишга келади. Масалан, газ ёқилгисидан ишлайдиган ИЕД нинг эффектив фик $\eta_{эф.}$ ва ёқилгининг солиштирама эффектив сарфи $V_{эф.}$ қуйидаги кўринишда ифодаланади:

$$\eta_{эф.} = \frac{371,15 \cdot M \cdot T_k \cdot P_{эф.}}{\eta_{\text{св}} \cdot q_k^u \cdot P_k} \quad (208)$$

ва

$$V_{эф.} = \frac{9700 \eta_{\text{св}} \cdot P_k}{M \cdot T_k \cdot P_{эф.}} \quad (209)$$

бунда M ва T_k — янги киритилган ёқилгининг массаси ва сиқилган такти охиридаги температураси; P_k — насос ёки компрессор ҳосил қилган босим.

Маълумки, ҳар қандай ИЕД нинг ёниш камерасида ёқилгининг ёнишидан ажралган иссиқлик миқдорининг

ҳаммаси ишга сарфланмайди. Агарда, қуйи иссиқлик ажратишни Мж/м^3 да, ёқилгининг солиштирма эффектив сарфини $\text{м}^3/\text{кВт}\cdot\text{соат}$ да ифодаласак, унда иссиқликнинг солиштирма сарфи қуйидаги кўринишда ёзилади:

$$q_{\text{эф.}}^{-} = 9700 \frac{\tau_{\text{к}} \cdot P_{\text{к}} \cdot q_{\text{к}}^0}{\Delta t \cdot T_{\text{к}} \cdot P_{\text{эф.}}} \quad (210)$$

$q_{\text{эф.}}^{-} = 17-14,4$ $\text{Мж/кВт}\cdot\text{соат}$ атрофида бўлади.

ИЕД ларнинг $\tau_{\text{и}}$, $\eta_{\text{эф.}}$, g_1 ва $g_{\text{эф.}}$ қийматлари кенг оралиқда бўлади (11-жадвал).

11-жадвал

ИЕДларнинг солиштирма ёқилги сарфи ва ФИК

ИЕДнинг тури	$\tau_{\text{и}}$	$\eta_{\text{эф.}}$	$g_1 \cdot \frac{\text{г}}{\text{црт}\cdot\text{соат}}$	$g_{\text{эф.}} \cdot \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{соат}}$
Карбюраторли автомобиль двигатели	0,28—0,39	0,25—0,33	245—300	307—325
Тезюор дизель	0,42—0,48	0,35—0,40	175—205	217—238
Газ двигатели	0,28—0,33	0,23—0,28	—	—

6.5. ИЕД нинг иссиқлик баланси

Маълумки, двигателнинг ёниш камерасига киритилган ёқилгининг ёнишидан ҳосил бўлган иссиқлик миқдори тўлалигича фойдаланишга сарфланмайди. ИЕД циклининг таҳлили шуни кўрсатадики, двигателнинг эффектив ишига жами иссиқлик миқдорининг бир қисми сарфланар экан. Шунинг учун қолган иссиқлик миқдори нималарга сарфланишини ва совитиш системасини ҳисоблашда киритилган ёқилгидан қай даражада фойдаланиш мумкинлигини билиш зарур. Шу сабабли иссиқлик баланси тенгламаси тузилади:

$$q_{\text{у.}} = q_{\text{экв}} + q_{\text{с}} + q_{\text{г}} + q_{\text{т.е}} + q_{\text{м.о.}} + q_{\text{мо.л.}} \quad (211)$$

бунда $q_{\text{у.}}$ — двигателга маълум иш тартибида киритилган ёқилгининг умумий иссиқлик миқдори; $q_{\text{экв}}$ — двигателнинг эффектив ишига эквивалент бўлган иссиқлик миқдори; $q_{\text{с}}$ — совитувчи муҳитга узатишган иссиқлик миқдори; $q_{\text{г}}$ — тутуннинг двигателдан олиб чиққан иссиқлик миқдори; $q_{\text{т.е}}$ — тўла ёнмаган ёқилги ҳисобига сарф бўлган иссиқлик миқдори; $q_{\text{мо.л.}}$ — мойлаш мойла-

ри олган иссиқлик миқдори; $q_{\text{қол}}$ — иссиқлик балансида ҳисобга олинмай қолган иссиқлик миқдори.

ИЕД га киритилган тўла иссиқлик миқдорига нисбатан унинг ташкил этувчиларини фоизларда ифодалаш мумкин:

$$Q_{\text{эқв}} = \frac{q_{\text{эқв}}}{q_y \cdot 100}; \quad Q_c = \frac{q_c}{q_y \cdot 100}; \quad Q_r = \frac{q_r}{q_y \cdot 100}$$

$$Q_{\text{т.э}} = \frac{q_{\text{т.э}}}{q_y \cdot 100}; \quad Q_{\text{мош}} = \frac{q_{\text{мош}}}{q_y \cdot 100}; \quad Q_{\text{от}} = \frac{q_{\text{қол}}}{q_y \cdot 100} \quad (212)$$

Унда

$$Q_{\text{эқв}} + Q_c + Q_r + Q_{\text{т.э}} + Q_{\text{мош}} + Q_{\text{от}} = 100\% \quad (213)$$

У ҳолда $M_{\text{э}}$ ни кг с, $q_{\text{к}}$ ни Ж кг да ифодаласак, 1 с да сарф бўлган иссиқлик миқдорини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$q_y = q_{\text{к}}^{\text{э}} M_{\text{э}}, \quad (214)$$

бунда $M_{\text{э}}$ — сарф бўлган ёқилги массаси.

Двигателнинг эффе́ктив қувватига тенг бўлган иссиқлик миқдори ифодасини қуйидагича ёзамиз:

$$q_{\text{эқв}} = N_{\text{эф}}. \quad (215)$$

ИЕД нинг цилиндри, цилиндрлар блокнинг қаллаги, поршень ва унинг ҳалқалари деворлари орқали совиткичдаги суюқликка узатиладиган иссиқлик миқдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_c = M_c C_c (t_{\text{чик}} - t_{\text{кир}}), \quad (216)$$

бунда M_c — двигатель орқали ўтадиган совитувчи модда (суюқлик) миқдори, кг/с; C_c — совиткичнинг солиш-тирма иссиқлик сифими (масалан, сув учун $C_c = 4186$ Ж/кг); $t_{\text{чик}}$ ва $t_{\text{ки}}$ — совиткичнинг двигателдан чиқишидаги ва киришидаги температуралари, °С.

Тутуннинг двигателдан ташқарига олиб чиққан иссиқлик миқдори қуйидаги формуладан фойдаланиб аниқланади:

$$q_r = M_{\text{э}} (m_2 \mu C_p' t_r - m_1 \mu C_p' t_0), \quad (217)$$

бунда $M_{\text{э}} m_2 \mu C_p' t_r$ иш бажариб бўлган газларнинг цилиндрдан ташқарига чиқарган иссиқлик миқдори, Ж/с; $M_{\text{э}} m_1 \mu C_p' t_0$ янги ёқилги билан цилиндрга киритилган иссиқлик миқдори, Ж/с; $\mu C_p'$ ва μC_p — ёниш маҳсули ва янги иш ёқилгисининг ўзгармас босим ($P = \text{const}$) остидаги

моляр иссиқлик сифимлари. J кмоль·с, t_r — газларнинг иш бажаргандан кейин чиқиб кетадиган труба ортидаги температураси, °С; t_c — цилиндрга киритиладиган янги иш ёқилғиси температураси, °С.

$\alpha > 1$ бўлганда тўла ёнмаган ёқилғига сарфланган иссиқлик миқдори $q_{т.е}$ ни махсус ҳисобламасдан, унинг қийматишн кўпчилик ҳолларда $q_{қол}$ га қўшиб юбориб қуйидаги фойдадан аниқланади:

$$q_{қол} = q_y - (q_{э.в} + q_c + q_r + q_{қол}). \quad (218)$$

$\alpha < 1$ бўлганда тўла ёнмаган ёқилғи чиқаридиган иссиқлик миқдори қуйидаги тенгликдан топилади:

$$q_{т.е} = (\Delta q_{г}^{и})_{хмм} \cdot M_{г}. \quad (219)$$

бунда

$$(\Delta q_{г}^{и})_{хмм} = A(1 - \alpha)V_{и} = (228 - 383) \cdot 10^6.$$

$V_{и}$ — назарий ҳисобланган ҳаво ҳажми. $q_{қол}$ нинг ўлчов бирлиги Ж/с; $q_{қол}$ — мойнинг сувга узатган иссиқлик миқдори бўлиб, мой совиткичда ўлчаб аниқланади.

ИЕД нинг иссиқлик баланси тенгламасига киритилган катталиқларнинг айрим қийматлари 12-жадвалда келтирилган.

12-жадвал

Двигатель тури	$\frac{h_{кв} - h_{т.кв}}{t_{кв}}$	q_c	q_r	$q_{т.е}$	$q_{қол}$
Электр учқуни билан ўт олдириладиган	21—28	12—27	30—55	0—45	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 кўриниб 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 тўлдириш жараёни пуфлаш дейилади. Бу жараён поршеннинг иш йўли охирида ва сиқиш тактининг бошланишида амалга оширилади. Пуфлаш усули билан цилиндрга ки-

ритиладиган иш аралашмаси зичлигини ва ҳаво босимини орттириш мумкин. Чунки цилиндрдаги иш аралашмаси зичлиги ρ ортинин билан унга мос равишда $P_{эф}$ ҳам ортади, ўз навбатида, ИЕД нинг литраж \cdot қуввати кўтарилади. Двигателларда пуфлаш жараёнидаги механик қаршилиқлар пуфланмагандаги ҳолатга нисбатан ортади, аммо механик ФИК нинг эффектив қуввати кўтарилади. Эффектив босим $P_{эф}$ компрессорда ёки поршень ёрдамида цилиндрда ҳосил қилинади.

Пуфлаш ҳисобига двигатель қувватини орттириш пуфлаш даражаси билан баҳоланади:

$$\bar{P}_{эф.п.} = \frac{P_{эф.и.}}{P_{эф.}}, \quad (220)$$

бунда $P_{эф.и.}$ — двигательда пуфлаш усулини қўллаш билан ҳосил қилинган ўртача эффектив босим, $P_{эф}$ — эффектив босим.

Пуфлашда сиқиш тактининг охирида ҳаво температураи 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 $P_{кир}$ ортганда детонацияли ёниш кузатилмайдн. Бунда дизель двигателяли литраж қувватининг ортиншига имкон яратилади. Булардан ташқари, дизель двигателялининг бошқа параметрлари ҳам яхшиланади. Мана шу ижобий кўрсаткичлар автомобил ва тракторда дизель двигательларининг кенг қўлланишига асосий сабаб бўла олади. Пуфлаш усули билан автотракторларда дизель двигательларини қўлланилганда улардаги босим $P_{эр}$ ни 30% гача кўтариш (паст даражадаги пуфлаш) мумкин. Юқори даражадаги ўтиш ҳоссасига эга бўлган дизель двигательларида эффектив босимни 40—50% гача орттириш мумкин. Пуфлаш компрессорли, турбокомпрессорли ва аралаш (уйғунлаштирилган) юритмали бўлади.

6.7. Ташқи ёнув двигательлари

Бундай двигательларда иш ёқилғиси двигатель ташқарисида ёқилиб ҳосил бўлган иссиқлик унинг иш бажарувчи қисмига йўналтирилади. Ташқи ёнув двигателяли (ТЕД) — ташқаридан киритиладиган ва регенерацияланадиган иссиқлик энергиясини фойдали механик иш-

га айлантириб берувчи иссиқлик машинаси. Бундай двигателни инглиз ихтирочиси Р. Стирлинг яратган (1816 й.) Кўпчилик адабиётларда ТЭД ни Стирлинг двигатели деб юритишади. Стирлинг двигатели қиздирилган ҳавонинг иссиқлик энергиясини 10—20 МПа босим остидаги гелий (He^4) ёки водород (H^2) га регенерация йўли билан узатиш ҳисобига ишлайди. Бу двигателнинг асосий иш жисмлари берк бўшлиқда жойлашган.

Гелий ёки водород берк бўшлиқда (атмосфера ҳавоси ўрнига гелий ёки водород тўлдирилган ҳажм) 10—20 МПа босим остида бўлади. Бу берк ҳажмни 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 (иш ва сиқиб чиқарувчи) поршень мавжуд. Поршеннинг илгариланма-қайта ҳаракатини ромб механизм айланма ҳаракатга келтиради. ТЭД ҳам тўрт тактли (сиқиб, қиздириш, иш йўли ва совитиш) бўлиб, унинг назарий цикли иккита изотермик ва иккита изохорик жарраёнлардан ташкил топади.

ТЭД нинг ФИК худди Карно циклиникидай қўйиладиги тенгликдан аниқланади:

$$\eta = 2 - \frac{T_1}{T_2} \quad (221)$$

Стирлинг двигателининг индикатор диаграммаси эллипс шаклида. ТЭД юқори ФИК 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 ТЭД ларни оғир юк автомобилларида, кемаларда кенг қўлланилади.

ИККИНЧИ ҚИСМ

ИССИҚЛИК КУЧ ҚУРИЛМАЛАРИ

Энергетиканинг бирламчи табиий бойликлари — ёқилғи, сув, шамол ва бошқалардан фойдаланиб механик энергия ҳосил қиладиган двигателлар ва ёрдамчи ускуналар маъмуаси куч қурилмалари дейилади. Фойдаланиладиган энергия турига кўра иссиқлик, гидравлик, атом ва ш. к. куч қурилмалари бўлади.

Иссиқлик куч қурилмалари махсус энергетик иншоот бўлиб, у қозон қурилмаси, насослар, конденсаторлар, буғ турбиналари электр генераторлар, қувурлар ва шунга ўхшаш асосий ускуналардан ташкил топган. Буғ куч қурилмалари, буғ турбиналари, газ турбиналари, реактив двигателлар, умуман ҳамма турдаги катта қувватли 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 жараёнлардан иборат. Бу циклда иссиқлик киритилади, маълум миқдордаги иш шу иссиқлик ҳисобига бажарилгандан сўнг қолдиқ иссиқлик миқдори совиткичга чиқарилади. Циклдаги киритилган иссиқлик миқдори q_1 албатта чиқарилган иссиқлик q_2 дан катта, яъни $q_1 > q_2$ бўлади.

Иссиқлик двигателлари асосан буғ машинаси, буғ турбинаси, ИЕД лардан ташкил топган, ИЕД ларига ракета (нем. *rakete*, итал. *Rocchetta* гossa — урчуқ) двигателларини ҳам киритиш мумкин. Ракета двигатели реактив двигатель бўлиб, унга кимёвий ракета двигатели (КРД), ядро ракета двигатели (ЯРД), электродинамик ракета двигатели (ЭРД), суюқ ёқилғили ракета двигатели (СЕРД), қаттиқ ёқилғили ракета двигателлари (ҚЕРД) қиради.

VII боб. БУҒ-КУЧ ҚУРИЛМАЛАРИ

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 айланган ҳолат ўринли бўлганда, бундай буғ тўйинган буғ дейилади. Тўйинган буғ температурасини орттирганимизда, сув молекулаларининг томчисига ягона молекула даражасигача майдаланиб аввал қиздирилган, сўнгра ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади.

Техник эҳтиёжларни таъминлаш учун зарур бўлган сув буғи буғ қозонларида тайёрланади ва аниқ параметрли тўйинган, қиздирилган, ўта қиздирилган буғ даражасига етказилади ҳамда буғ қувурлари орқали истеъмолчига узатилади. Буғ қозонида ҳосил қилинган буғ 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. Шунинг учун конденсацион электр станциясида, иссиқлик электр станцияларида, регенератив иссиқлик алмашинувида ва шу каби ишшоот ва қурилмаларда ёқилғи ёқилиб, асосан сув буғи ҳосил қилинади, сўнгра бу буғ яна қиздирилиб, иш бажарадиган даражадаги параметрларгача етказилади.

7.2. Буғ-куч қурилмасининг назарий цикли

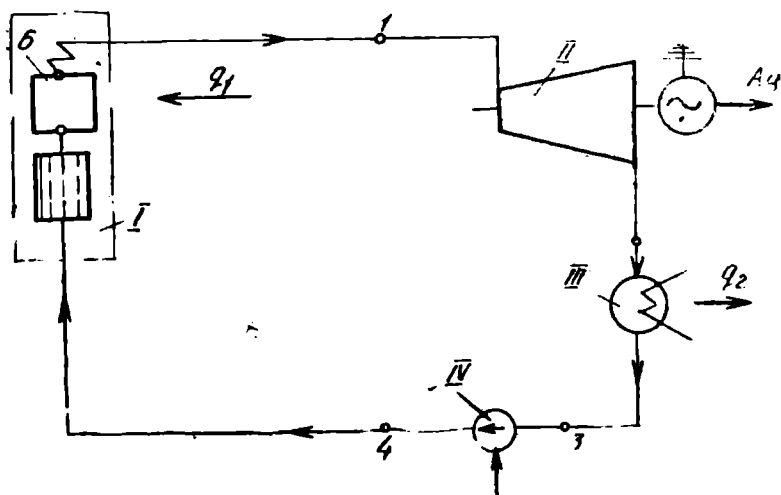
Буғ-куч қурилмалари қозон агрегати, буғ турбинаси, конденсатор, насос, электр генератор ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган. Қозон агрегати, ўз навбатида ўчоқ, буғлатиш сиртлари, буғ қиздиргичлар

(ўта қиздиргич), сув экономайзери, аҳво иситгич, мўри ва турли хил вентиляторлардан ташкил топган.

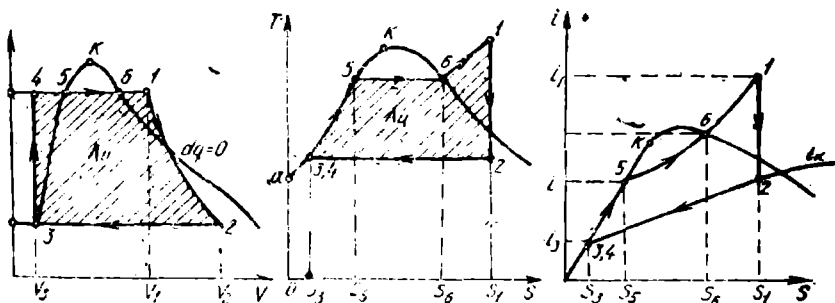
Буғ-куч қурилмаларида ишлатиладиган иш жисми — сув буғи параметрларининг ўзгаришини қараб чиқамиз.

Буғ-куч қурилмаларининг назарий цикли Ренкин цикли ҳисобланади (32-расм).

Ренкин цикли қуйидагича кечади: қозон қурилмаси (I) дан юқори босим ва температурадаги қиздирилган буғ буғ турбинаси (II) га узатилади. Шунда буғ ташқаридан ортиқча иссиқлик миқдорини олмасдан ($dq=0$) буғ турбинасида кенгайиш жараёнида фойдали иш бажаради (нуқталар 1 ва 2 оралиғида, 33-расм, а). Турбинада иш бажариб бўлган сув буғи ўзидаги қолдиқ иссиқлик энергиясини конденсатор (III) дан (нуқталар 2 ва 3 оралиғида, 33-расм, а) совиткичга узатади. Буғ конденсацияланиши натижасида сувга айланади. Ташқи куч (электр энергияси) таъсирида насос (IV) ишга тушади ва конденсат (ҳосил бўлган сув) қозон агрегатига узатилади (нуқталар 3 ва 4). Гидравлика фапидан маълумки, насоснинг ҳайдаш каналидаги босим унин сўриш қисмидагидан катта бўлади. Шунинг учун диаграммада нуқталар 3 ва 4 оралиғида босим ортади, ҳажм ўзгармас бўлади.



32-расм. Ренкин циклининг буғ-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 мақсадида, тутун йўллариغا экономайзер ўрнатилади. Тутун ўзидаги қолдиқ иссиқликни экономайзер орқали ўтаётган конденсатга беради ва шу қолдиқ иссиқлик (тутундаги) яна қозон агрегатига қайтарилади. Шунда сув қолдиқ иссиқлик ҳисобига ўз ҳажмини, температурасини ўзгармас босим остида ўзгартиради (4 ва 5 нуқталар оралиғи, 33-расм а, б).

Қозон агрегатининг ўтхонасида ёқилган ёқилғи ажратган 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 ҳажмини ортиради, 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 қиймати жиҳатидан тенг бўлади. Сув буғининг TS диаграммасида буғининг абсолют температураси билан унинг энтропияси орасидаги боғланиш ифодаланган (33-расм, б). Жараённинг TS диаграммасидан кўришиб турибдики, 1 кг буғ бажарган фойдали ишининг катталиғи Ренкин циклининг бажарган ишига тенг экан. Бу фойдали ишнинг қиймати P_v диаграммасидагидек T_s диаграммасида ҳам юзалар айирмасидан аниқланади, яъни $A = 0 - 0,0010 - 0,032S_1,0 = 356123$ бўлади. Бунда $0,0561S_1,0$ юза эса буғнинг кенгай бошлаган ҳолатини, яъни 1 нуқта энтальпиясига тенглигини характерлайди. Худди шундай $0,032S_1,0$ юза эса буғнинг кенгайиб бўлгандан кейинги ҳолатини, яъни 2 нуқта энтальпиясига тенглигини ифодалайди. Шунинг учун 1 ва 2 нуқталар энтальпияси айирмаси циклининг бажарган ишига тенг бўлади.

$$A_k = i_1 - i_2. \quad (222)$$

Демак, энтальпиянинг ўзгариши учун 3 ва 4 нуқталар оралиғида сувнинг ҳажми ўзгармасдан босими ортади. Бу босимнинг ортишига сарф бўлган иш $d \cdot 34 ed$ нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади. Бу ишни босимнинг ўзгариши орқали ифодалаш мумкин:

$$A_u = V_3(P_4 - P_3) \cong 0 \quad (223)$$

Иш A_u нинг ўзгариши асосий ишга nisbatan жуда кичик бўлганлигидан уни ногла тенглаштириш мумкин.

Шунинг билан, қозон қурилмасига қайтаришган конденсатнинг 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 ишининг ифодаси юқорида келтирилган бўлиб, у мусбат ва манфий ишларнинг алгебраик йиғиндисига тенг. Лекин бундай идеал цикл бўлмайди.

Ренкин циклининг (идеал цикл) термик фикс цикл

базарган ишнинг шу циклга киритилган-иссиқлик миқдорига нисбатига тенг:

$$\eta_t = \frac{A_{II}}{q_1} \quad (224)$$

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, циклниң ФИК ни энтальпиялар айирмалари нисбатлари кўринишида ёзиш мумкин:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_3}{i_1 - i_3} \quad (226)$$

Термодинамик жараён 2 ва 3 нуқталар оралигида изобарик-изотермик бўлганлиги сабабли шу нуқталар температураларини $t_2 = t_3 = t_k$ — конденсат температурасига тенглиги асосида ва сувнинг иссиқлик сисими 4,1868 кЖ/кг·К эканлигини эътироф этсак, у ҳолда η_t ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_3}{i_1 - 4,1868 t_k} \quad (227)$$

Рейкин 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.

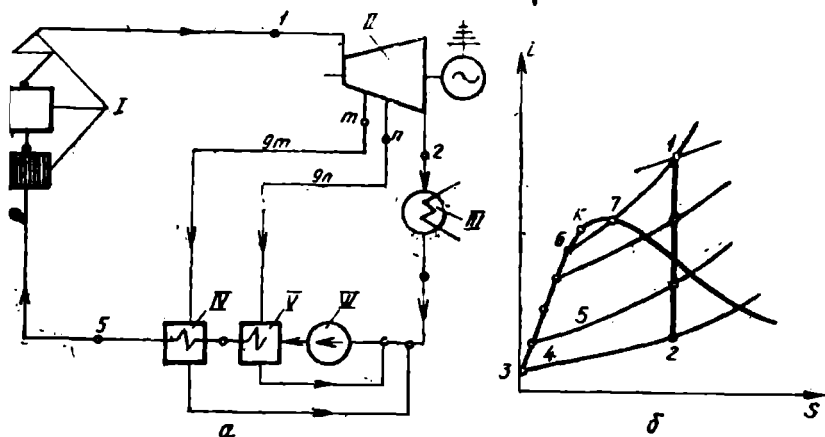
Замонавий буғ куч қурилмалари ўта мураккаб бўлишига қарамасдан уларнинг ФИК 90—98% ни ташкил қилади.

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 буг турбинада иш бажариб бўлганидан сўнг бугнинг маълум қисми турбинанинг бирор босқичидан ажратилиб қозон агрегатига узатилади янги совуқ сувни шу ажратилган буг билан қиздиришда қўлланилади. Бунга **регенерация** цикли дейилади. Регенерация (лот. *regeneratio* — тиклаш) — совиткичга чиқиб кетаётган иссиқлик миқдорини янгитдан узатилаётган бирламчи иш моддасига (сув, буг-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 буг-куч қурилмасининг регенерация цикли усулида сув қозон қурилмасига олдиндан иситиб берилганлиги сабабли қурилманинг термик ФИК Ренкин циклинекидан катта бўлади.

Ўзгача, совиткичга чиқариладиган иссиқлик миқдориди самаралироқ фойдаланилганда регенератив буг-куч қурилмасининг ФИК ортади. Регенератив цикли куч қурилмасининг iS — диаграммасидан шундай хулоса чиқариш мумкин. 1 ва 2 нуқталар оралиғида сув бугининг энтальпияси ўзгаради. Чунки системадаги иссиқлик миқдори иш бажаришга сарфланади. Маълумки, системадан иссиқлик миқдори чиқарилса ёки унга ки-



34-расм. Регенерация цикли буг-куч қурилмаси ва унинг iS диаграммаси: I — қозон қурилмаси; II — буг турбинаси; III — конденсатор; IV — конденсат насоси; V ва VI — регенерация қурилмалари.

ритилса, системанинг энтропияси ўзгарувчан бўлади. Бу ҳолатда 1 ва 2 нуқталар ораллигида иссиқлик миқдори иш бажаради, шунинг учун унинг энтропияси ўзгармайди. Демак, 2—3—4—5—6—7—1 нуқталар ораллигида иш моддаси (сув буғи — термодинамик система) ҳолати, энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади. Бўнга асосий 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 қурилмасининг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_t' = \frac{A_{\text{ш}}}{q_1} \quad (228)$$

бунда A — циклнинг тўла бажарган иши;

$$q_1' = i_1 - 4, 1868t_5$$

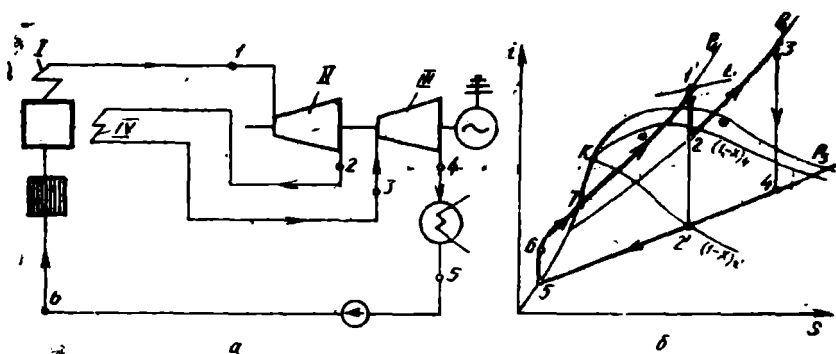
системага киритилган иссиқлик миқдори бўлиб, у энтальпиянинг ўзгаришига тенг.

7.3. Ораллиқ буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмаси

Бир неча турбинада ё унинг босқичида иш бажариб бўлган буғнинг намлиги ортиб кетганида, буғнинг параметрларини роқшлаш мақсадида, ораллиқ буғ қиздиргичли усул қўлланилади. Буғ намлигининг ортиб кетиши турбинанинг ёмон ишлашига ва унинг қисмларини тезроқ занглаб ишдан чиқишига сабаб бўлади. Бу камчиликни тузатиш мақсадида биринчи турбинада иш бажариб бўлган, аммо намлиги юқори бўлган буғ қайтадан қозон агрегатида жойлашган буғ қиздиргичда қиздирилади, унинг қуруқлик даражаси орттирилади ва шу билан буғнинг иш бажариш 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 такфран ишлатадиган буғ-куч қурилмасининг PV ва TS диаграммалари юқорида қараб чиқилган циклларникига ўхшаш бўлсада, айрим ўзгаришларга эга. Ораллиқ 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 оралиғида, яъни биринчи ва иккинчи турбиналарда ва насосда, термодинамик системанинг энтропияси ўзгармас бўлади. Чунки циклнинг шу нуқталарига мос келувчи ҳолатларида системага иссиқлик келтирилмайди. Диаграмма таҳлилидан шуни айтиш мумкинки, 4 ва 5, 5 ва 1, 2 ва 3 нуқталар оралиғида содир бўладиган жараёнларда термодинамик системанинг энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади. Чунки системада иш бажармасдан қолган иссиқлик миқдори совиткичга чиқарилади (4—5 нуқталар оралиғи) ҳамда системага ташқаридан иссиқлик миқдори (2 ва 3 ҳамда 6 ва 1 нуқталар оралиғи) келтирилади.

Бундай услубда кечадиган циклнинг термик ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_t = \frac{A'_u}{q_1}, \quad (229)$$

бунда $q_1' = (i_1 - i_5) + (i_3 - i_2)$ — бир кг буғ олиш учун иккинчи маротаба қиздириш даврида сарфланадиган иссиқлик миқдори; A'_u — циклнинг бажарган иши.

Тенгламадан кўриниб турибдики, буғ адиабатик кенгайганда (1—2 ва 3—4 нуқталар оралиғи) ва конденсат сиқилганда (5 ва 6 нуқталар оралиғи) системага ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмаган бўлса ҳам турбиналарда мусбат, насосда манфий ишорали иш бажарилар экан. Шунинг учун иккала (II ва III) тур-

бинада адиабатик кенгайиб ўтган буғ энтальпиялари ўзгаришларининг йиғиндиси насосдан ўтади ва конденсат энтальпиялари ўзгаришидан катта бўлади. Тўла фойдали ишни 1—2 ва 3—4 нуқталар оралигида буғнинг кенгайишида бажарган ишига тенглаштириш мумкин ва бу иш оддий циклда 1 ва 4 нуқталар (32-расм, а; PV -диаграммаси) оралигидаги 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. binarus — 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 ҳоссага паст 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 фойдаланишади. Схемадан кўриниб 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 яқинчи 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 буғланиб бўлгандан сўнг буғ қиздиргич орқали буғ турбинасига узатилади. Цикл такрорланади.

Бинар циклниң TS диаграммасини қараб чиқамиз: биринчи берк контурниң бажарган иши $1-2-3-4-1$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлиб, система (симоб)ниңг термодинамик параметрлари сув буғиникига нисбатан юқори, масалан, нуқта 3 ниңг абсолют температураси нуқта 3' никидан катта, яъни $T_3 > T_3'$.

Циклниң TS диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл T_1-T_2 температуралар оралиғида содир бўлади ва 1 кг сув буғиниңг бажарган иши $3-4-5-1-2-3$ 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. Ренкин циклиниңг Карно циклига яқинлашувини билиш учун тоҳо шу циклларда бажарилган ишларниңг нисбатлари аниқланади. Бу нисбатдан ҳосил бўлган коэффициент циклниңг карнолаштириш коэффициенти дейилади:

$$\alpha = \frac{A_{\text{ц}}}{A_{\text{к}}} \quad (230)$$

1 кг сув буғини симоб қозониниңг буғ қиздиргичида қиздириш учун сарф бўлган иссиқлик миқдори симоб-сув бинар системасиниңг энтальпиялари айирмалари йиғиндисини кўринишида ифодаланади:

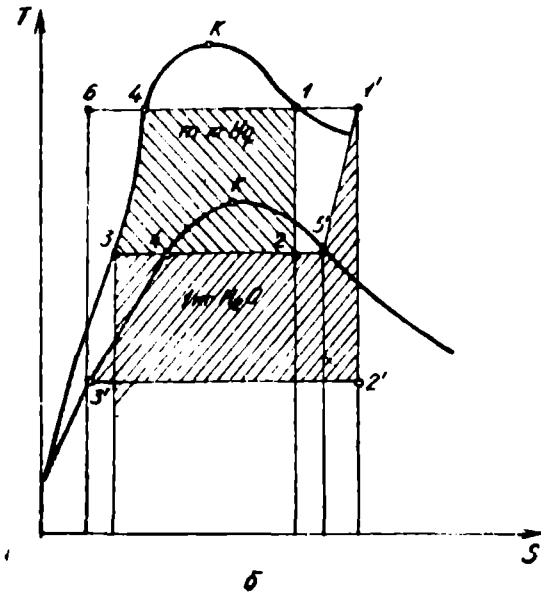
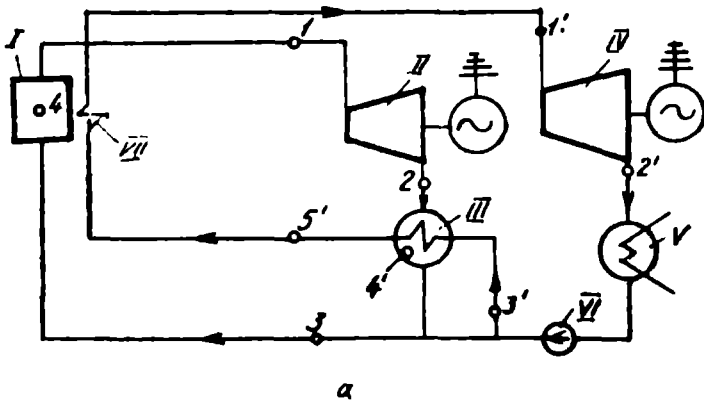
$$q_1^{\text{бин}} = m_2(i_1 - i_3) + (i_4 - i_5) \quad (231)$$

Бинар циклда бажарилган ишни симоб турбинасида ва буғ турбинасида иш жисмлариниңг адиабатик кенгайишидаги энтальпиялари ўзгаришлариниңг йиғиндисини кўринишида ифодалаш мумкин:

$$A_{\text{ц}}^{\text{бин}} = i_1' - i_2' \quad (232)$$

Бинар циклниңг термик ФИК қуйидагига тенг:

$$\eta_{\text{т}}^{\text{бин}} = \frac{A_{\text{ц}}^{\text{бин}}}{q_1^{\text{бин}}} \quad (233)$$



36-расм. Симоб-сув бинар куч қурилмаси ва унинг иш циклининг TS диаграммаси: I — қозон қурилмаси; II ва III — симоб турбинаси ва конденсатори; IV — буғ турбинаси; V — конденсатор; VI — конденсат насоси; VII — буғ ўта қиздиргичи.

Бинар циклнинг термик ФИК бошқа циклларниқидан катта:

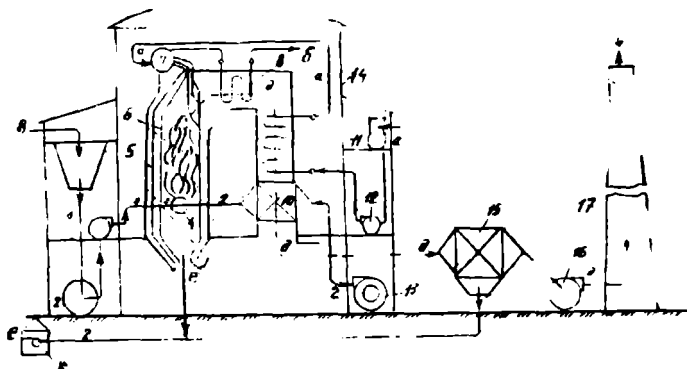
$$\eta_i^{\text{кин}} > \eta_i.$$

7.5 Қозон қурилмаси, унинг тузилиши ва ишлаш тартиби

Ўчоқда ёқилган ёқилғидан ажралган иссиқлик ҳисобига босим остида иссиқ сув ва буғ ҳосил бўладиган ускуналар мажмуи қозон агрегати дейилади. Қозон агрегати ўчоқ, буғлатиш сиртлари — экран, буғ қиздирғич, 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 қиздирғич, 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 қиздирғич ва сув экономайзери киради. Қозон қурилмасини енгиллаштириш ва унинг иситиш сирт-



37-расм. Қозон қурилмасининг технологик схемаси: *a* — сув йўли; *b* — қиздирилган буғ йўли; *в* — ёқилгини ўтхонага узатиш йўли; *г* — ҳаво оқимининг ҳаракатланиш йўли; *d* — ёниш маҳсулотини ташқарига чиқариш йўли; *e* — ўтхона ва кул туткичдан чиққан шлак ва кулни ташқарига чиқариш йўли; *1* — ёқилги бункери; *2* — кўмир майдалайдиган тегирмон; *3* — тегирмон вентилятор; *4* — горелка; *5* — қозон агрегатининг ўтхонаси ва тутунгаз йўллариинг кесимда кўриниши; *6* — трубалардан ташкил топган экран (ўтхона экрани); *7* — цистернасимон идиш (барабан); *8* — буғ қиздиргич; *9* — сув экономайзери; *10* — ҳаво иситкич; *11* — деаэрацияли сув ғамлайдиган идиш; *12* — таъминловчи насос; *13* — вентилятор; *14* — қозон қурилмаси ўрнатилган бино; *15* — кул туткич мослама; *16* — тутун газларини сургич; *17* — тутун трубаси — мўри; *18* — кул-шлак (аралашмаси) бўтқасини 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 экрани 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 ундан 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 алмашилиш усулида узатилади. Шунинг учун ўтхонанинг бу қисми конвекция шах-

та с и дейилади. Тутун газларининг температураси кон-
векция шахтасидан ўтиш вақтида 800—900 К дан 300—
400 К гача пасаяди.

Ўтхона деворининг ички қисмига ўтга чидамли гишт-
лар (иссиқбардош шамот, днас, магнезит ва ш. к.)
терилади. Ташқи томонидан металл қоплама билан ўра-
лади. Бу ўтхона мустаҳкамлигини оширибгина қолмас-
дан, унинг ичига девор орқали ортиқча ҳавонинг сўри-
лишидан 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 буғ-
нинг қолдиқ иссиқлигидан тўла фойдаланиш мақсадида
иссиқлик конденсатор орқали чиқарилиб истеъмолчига
(турар жой бинолари, sanoat корхоналари, маиший хиз-
мат идоралари, мактаб, касалхона, боғча ва ш. к.) уза-
тилади. Истеъмолчилар қўллаган иситиш аппаратлари
ўз навбатида совиткич вазифасини ҳам бажаради. Иш-
латилиб бўлинган буғнинг асосий қисми конденсаторда
иссиқлик алмашинуви натижасида совитилиб, сувга ай-
лантирилади ва у насос ёрдамида яна қозон агрегати-
га ёки буғ генераторига қайтарилади.

Қозон қурилмасининг асосий ёқилғиси сифатида тош-
кўмир, торф, нефт ва унинг оғир фракциялари, домна
ва табий газ, ёнувчи сланецлар ишлатилади. Айрим
куч қурилмаларида иссиқлик энергияси манбаи сифати-
да қуёш энергиясидан, актиноидлар гуруҳидаги уран,
плутоний элементларининг занжирли ядро реакцияси
вақтида ажраладиган иссиқлик энергиясидан фойдала-
нади.

Қозон қурилмасига ёқилғи махсус ёқилғи сақлана-
диган омборхоналардан турли-туман узаткичлар орқа-
ли майдалаб ёки бутунлигича, махсус қўшимчалар қў-
шиб ё қўшмасдан бункерга узатилади. Қаттиқ ёқилғини
чанг ҳолатигача майдалаб, ёқиладиган қозон қурилма-
сини қараб чиқайлик. Унинг технологик схемаси 37-
расмда келтирилган. Кўмир омборхонада майдалангани-
дан сўнг, уэлуksиз ҳўл кўмирни қабул қилувчи ёқилғи
бункери 1 га ва ундан кўмир тегирмони 2 га йўналтири-
лади. Тегирмонда тайёрланган чангсимон кўмир мах-
сус вентилятор 3 ҳосил қилган ҳаво оқими ёрдамида,

трубопровод орқали, қозон қурилмаси олниси 17 ичиде 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.

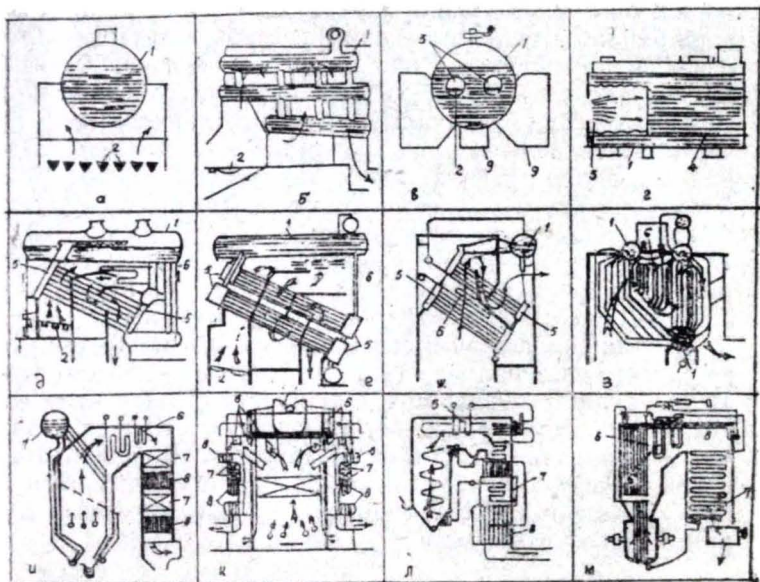
Ёқилгининг ёнишидан машғалали аланга пайдо бўлади ва унинг температураси 1700—1800 К га етади. Бу юқори температурали аланга ўтхона ичиде унинг девори бўйлаб вертикал жойлашган труба сиртларини ялаб иситиши натижасида унинг температураси 1200—1300 К гача пасаяди. Тутун газлари ўтхонанинг юқори қисмида 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 маҳсус 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 ортган сайин буғ ва иссиқ сув тайёрлайдиган қозонлар тузилиши 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 берилади. Янги турдаги буғ қозонлари лойиҳаланди, сўнгра қурилди ва синаб кўрилди. (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 трубали, 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 — батареяли; в — ўт трубали; г — ўт ва тутун трубали; д — камерали горизонтал сув трубали; е — камерали горизонтал (В. Г. Шухов лойиҳаси) сув трубали; ж — икки тарамли қия трубали; з — сув трубалари қия жойлашган; и — суя трубаси П шаклида жойлашган; к — сув трубаси 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 сиртларини аланга — тутун газлари ялаб-ювиб ўтади.

Бу лойиҳа такомиллаштирилиб, катта диаметрли сув қувурлари (3—9 та) ўрнига тўпلام-тўпلام 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 йиғувчи 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 ҳолатлардагина 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 агрегатиининг 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 занглатади, 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 занглатади, қаттиқ зарралар қозон бўшлиғининг фойдали ҳажмини эгаллайди ва

иссиқлик ўтказувчанликни пасайтиради, ўз навбатида, эриган минерал тузлардан кальций ва магний тузлари сувнинг қайнаши жараёнида қозон деворларида қасмоқ ҳосил қилади.

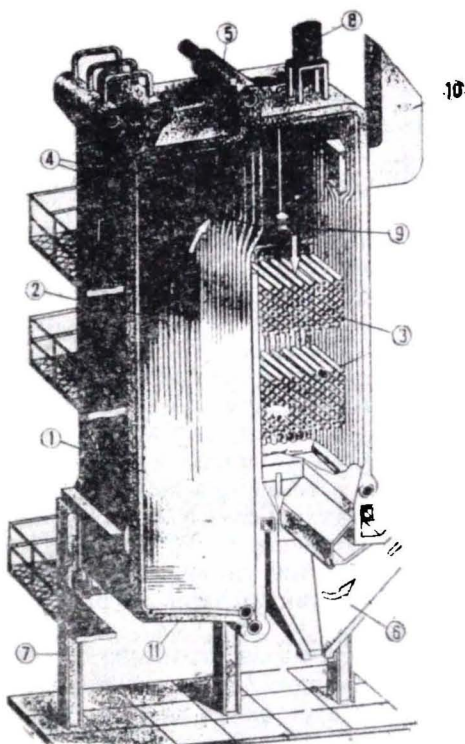
Сувнинг қаттиқ ёки юмшоқлиги, унинг таркибидаги кальций ва магний тузлари $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 ва ш. к. миқдори билан баҳоланади. Масалан, 1 мг экв/л сувнинг қаттиқлик бирлиги бўлиб, 1 л сувдаги магний (12,16 мг) ёки кальций (20,04 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 Ca ва Mg сульфатлари эришдан *нокарбонат* қаттиқлик ҳосил бўлади. Худди шундай, сувда Ca ва Mg бикарбонатлари эришдан *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 Ca ва Mg қўшилган моддалар билан кимёвий реакцияга киришиб, CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ тузларини ҳосил қилиб қозон тубига чўкади ва сув юмшайди. Сувни юмшатишнинг *ионит* усули қўлланилганда, унга сувда эримайдиган табиий ва сунъий материаллар қўшилади. Масалан, сульфат кислотаси билан ишлов берилган кўмир, сунъий алюмосиликатлар 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, филтрлаш усулларида 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-расм. 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—синч; 8—сочиладиган материал солинадиган бункер; 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-

рорати кескин ўзгармайди. Атмосфера ҳавосининг температураси пасайганида қозондан чиқадиган 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 олтингуурти кам бўлган мазут ишлатилса, сув температураси $T=340-345$ К дан, олтингуурт 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.

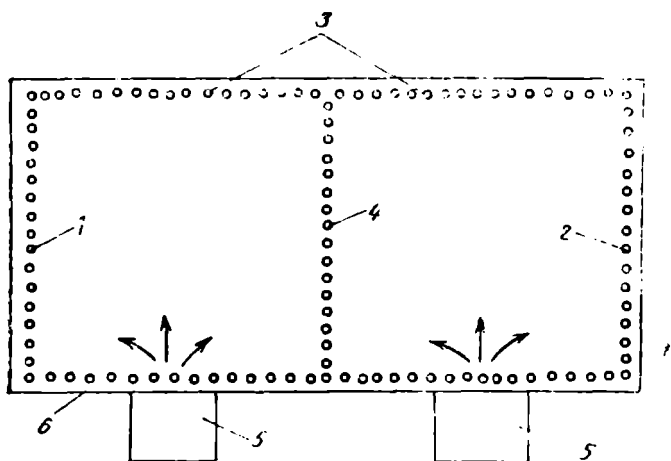
Бу қозонлар ўтхонали ва ўтхонасиз бўлиши мумкин: ўтхонали бу қозонларда ҳамма асбоб-ускуналар иссиқлик манбаи бўлган ўтхонада ва унинг атрофига жойлаштирилади. Ўтхонасиз бу қозонлари турига қозон утилизаторни киритиш мумкин (39-расм). Бу қозон утилизаторда, асосан ёниш маҳсулоти таркибидаги тутун газлари иссиқлигидан фойдаланилади.

Ўтхонали бу қозонининг бу ҳосил қилувчи элементи, асосан бу экран ҳисобланади. Сув-бу циркуляцияси табиий ёки мажбурий бўлиши мумкин.

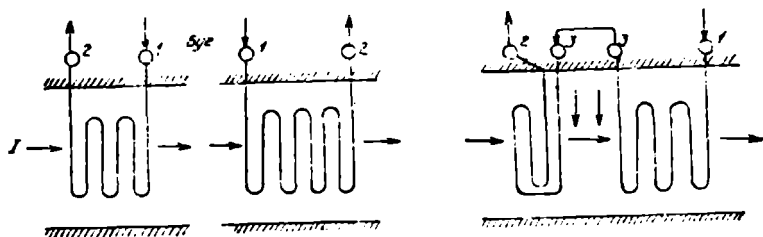
Бу тайёрловчи экран (трубалар) билан иссиқлик алмашинуви, хусусан ўтхонада, радиация (нурли) иссиқлик алмашинуви инфракизил нурланиш ҳисобига устувор бўлади. Экранда, ёниш вақтида ҳосил бўлган аланга билан контактлашгандаги иссиқлик алмашинуви асосий ҳисобланмайди. Ёниш маҳсулоти билан ўтхонанинг чиқиш қисмидаги контактлашувда иссиқлик алмашинуви кўпроқ бўлади.

Ўтхона ичидagi бу тайёрловчи экран (трубалар)нинг сирти силлиқ бўлганда 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 вазифини барабан бажаради. Буғ қозони ўлчамини кичрайтириш ва қувватини орттириш мақсадида ўтхона ўртасидан уни иккига ажратувчи экран ўрнатилади. Экраннинг ҳар иккала томонидан ҳам аланга 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; а — қарама-қарши оқимли; б — тўғри оқимли; в — аралаш оқимли.

Буғ қозонларининг бир қисми буғни ўтақиздиргичлар бўлиб, улар қозонда ҳосил қилинган буғ температурасини, босимини яна кўтаришга мўлжалланади. Қозон агрегатида буғ ҳосил қилиш учун сарфланган жами иссиқлик миқдорининг тақрибан 60% буғни ўтақиздиргичга тўғри келади. Шунинг учун буғни ўтақиздиргич трубалари мустақамлиги юқори бўлган қотишмалардан тайёрланади.

Иссиқлик алмашиниш зонасида жойлашган буғни 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 ўтақиздирилган буғ тайёрлашда диаметри 22—54 мм ли металл трубалар ўтхонада жойлаштирилади ва ёқилғи алангасининг бевосита таъсири ҳисобига уларда ўтақиздирилган буғ ҳосил бўлади.

Конвектив усулда ўтақиздирилган буғ тайёрлашда трубалар тарам-тарам ёки илонизисимон қилиб жойлаштирилади.

Илонизисимон трубаларда буғ, тутун ҳаракатига нисбатан тўғри, қарама-қарши, ағалаш оқимда ҳаракатланиши мумкин (41-расм)

Тайёрланадиган буғ параметрлари ва унинг сарфи бир текис сақланади, бу билан исгеъмолчи талаби бажарилади.

Буғ тайёрлаш қозонларига узатиладиган сув, албатта аввал сув юмшаткич ва сув экономайзеридан ўтказилади, қозонга ҳаво эса ҳаво иситкич орқали узатилади.

7.8. Сув буғининг ҳосил бўлишида айрим физик жараёнлар

Суоқликнинг ташқи таъсир натижасида газ ҳолатига ўтиши буғланиш дейилади. Сувнинг буғ 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 мувозанаг ҳолатидаги кинетик энергияси унинг q иссиқлик миқдорини ютгандан кейинги кинетик энергиясидан анча кичик бўлгандагина суоқлик газ ҳолатига ўта бошлай-

ди, яъни буғланади. Аксинча, 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 идиш деворларида суюқлик ҳажмида пайдо бўлади ва катталашиб суюқлик сиртига қалқиб чиқиб ёрилади. Бундай ҳодиса қайнош дейилади.

Қайнаш суюқлик сиртидаги босимга боғлиқ, яъни босим ортса, қайнаш температураси ҳам ортади ва, аксинча.

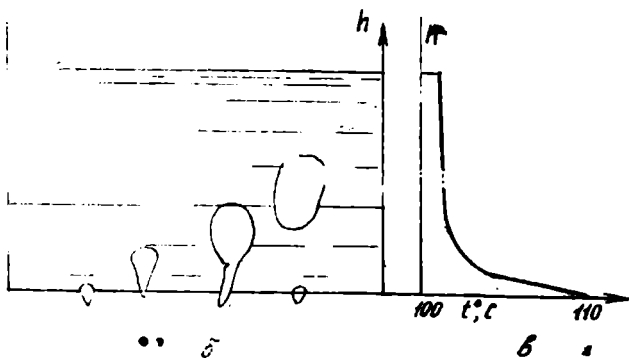
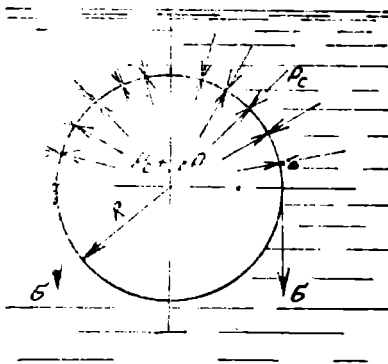
Ҳосил қилинган нам буғга яна қўшимча иссиқлик миқдори узатилса, унинг таркибидаги жуда майда сув томчилари буғ ҳолатига ўтади ва тўйинган қуруқ буғ ҳосил бўлади. Буғнинг қуруқлик ва намлик даражаси тўйинган қуруқ буғ таркибидаги буғ ва сув томчилари миқдори билан баҳоланади.

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, tV 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 тutilмаса, 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; шў K нуқтадан ўнг томонда сув буғи

таркибида сув томчилари йўқ даражада, яъни идеал газга яқин бўлади. Сув буғининг критик нуқтасидаги параметрлари қуйидагича: $P_{кр} = 221,29 \text{ бар} = 22,12 \text{ МПа}$; $A_{кр} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$; $T_{кр} = 647,3 \text{ К}$.

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.

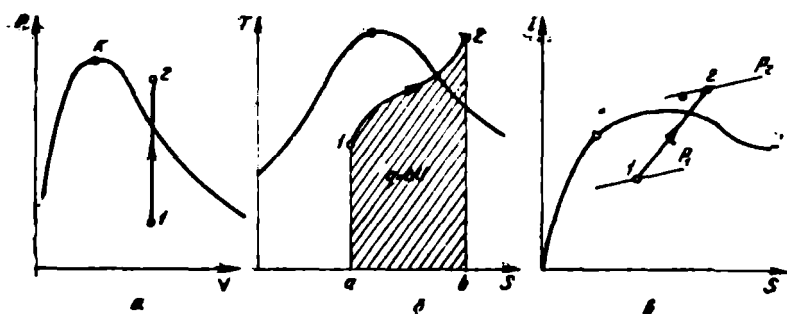
Демак, термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ $V = \text{const}$ бўлганда сув буғининг бажарган иши $A = 0$ бўлади. Буғга узатилган q иссиқлик миқдори унинг ички энергиясининг ўзгаришига сарф бўлади:

$$q = \int_1^2 dq = \int_1^2 dU = U_2 - U_1 \quad (234)$$

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 (с) диаграммалари.

Изобарик жараён. Ўзгармас босим остидаги буғга ташқаридан q иссиқлик киритилса, унинг V , T параметрлари ўзгариши натижасида буғ иш бажаради ва унинг сон қиймати a 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:

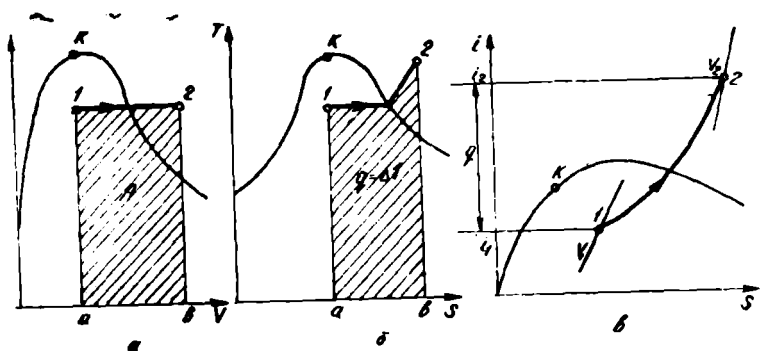
$$q = \int_1^2 dq = \int_1^2 di = i_2 - i_1 \quad (235)$$

ёки

$$q_i = u_2^i - u_1 = (i - PV)_2 - (i - PV)_1, \\ [A = P(V_2 - V_1)] \quad (236)$$

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-

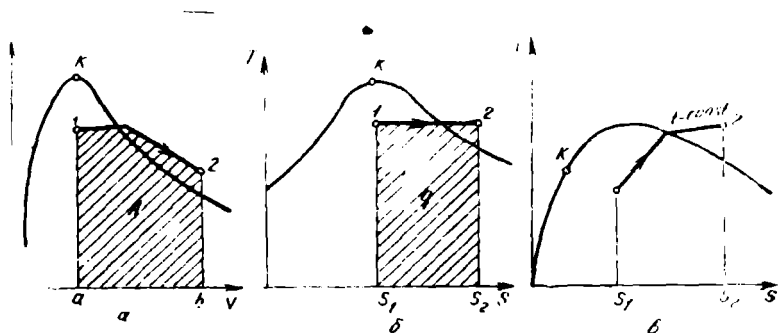


44-расм. Сув буғининг изобарик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

гармас сақланиши учун унга иссиқлик берилади. Лекин, берилган иссиқлик таъсиридан сув буғининг 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 буғининг изотермик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

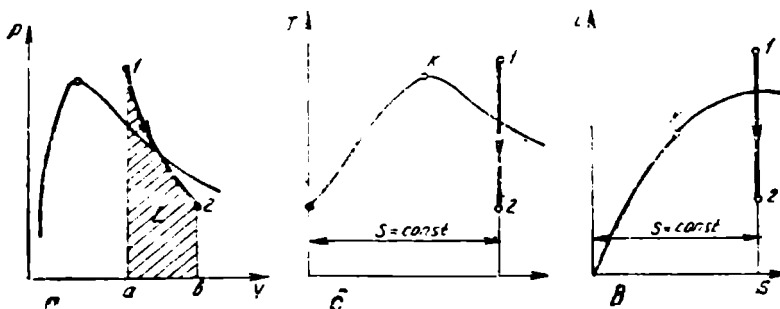
Демак, сув буғига $T = \text{const}$ бўлган жараёнда келтирилган иссиқлик миқдори унинг энтропиясининг ўзгаришига сарфланар экан:

$$q = T(S_2 - S_1) \text{ ёки } q = (t = 273,15) \cdot (S_2 - S_1) \quad (238)$$

Адиабатик жараён. Сув буғига ташқаридан иссиқлик берилмаган ҳолда уни кенгайтирганимизда буғ совиydi, яъни буғнинг температураси ва босими пасаяди. Буғнинг ички энергияси камаяди.

Маълумки, идеал газнинг иссиқлик сифимларининг нисбати ($k_r = C_p/C_v$) сув буғининг иссиқлик сифимлари 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 $\kappa = 1,035 - 0,1x$ кўринишида қабул қилинади. Бунда, x — буғнинг қуруқлик даражасини билдиради. Кўпчилик ҳолатларда (буғнинг кенгайиши бошланишида ёки сиқилиши охирида) адиабатанинг энг юқори чўққисиди $x = 1,0$ бўлса, нам буғ соҳасида унинг қийматини $x = 1,135$ деб қабул қилиш мумкин. Шу сабабли, адиабатик кенгайиш паст босимда содир бўлаётган бўлса, $PV = \text{const}$ тенгламани тахминий ҳисоблашларда қўллаш мумкин.

Сув буғининг PV^κ (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 тенгласидан 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:

$$dq = du + \hat{d}A$$

$$dA = -du, \text{ чунки } dq = 0$$

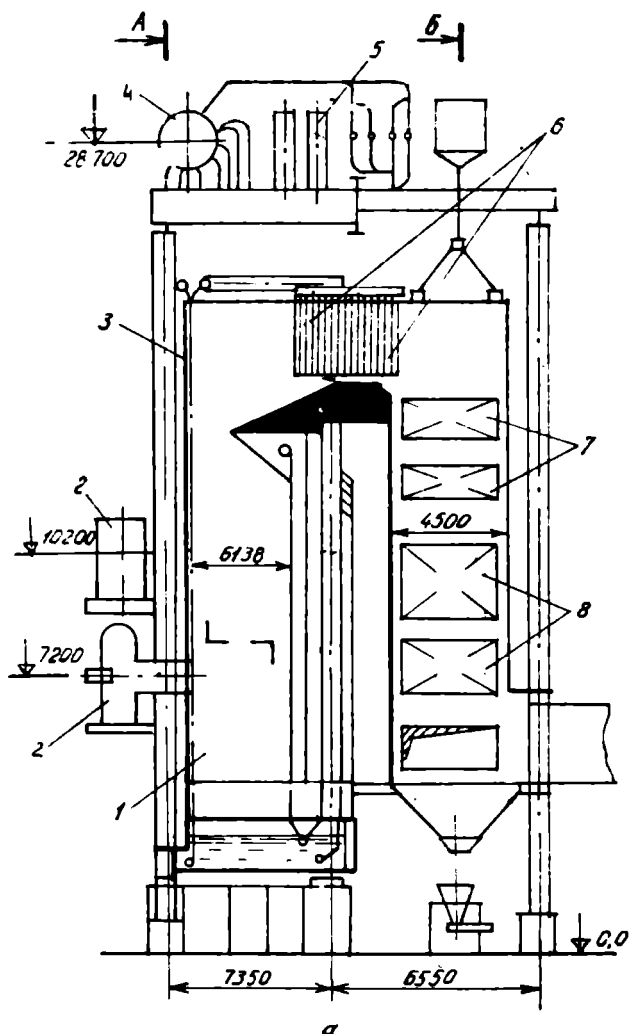
$$A = u_1 - u_2 = (i - PV)_1 - (i - PV)_2. \quad (239)$$

$S = \text{const}$ бўлгани учун буғ кенгайганда унинг абсолют температураси ва энтальпияси адиабатик жараёнининг TS ва iS диаграммаларида пасайиб борувчи вертикал чизиқлардан иборат бўлади.

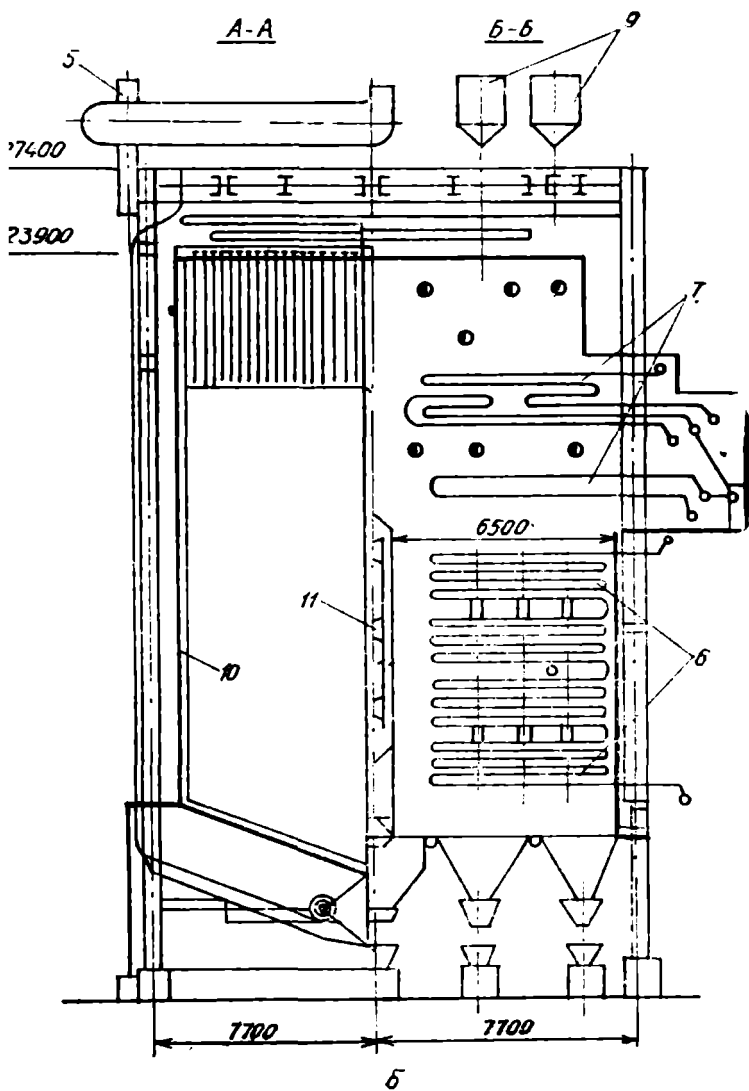
Замонавий қозон агрегатлари асосан табиий ёки сунъий газда, мазутда, чангсимон кўмирда ишлайди. Улар асосан, барабан, экран сув иситкич, ҳаво иситкичдан ташкил топган. Замонавий қозон агрегатларининг ишлаб чиқарадиган буғининг сарфи 400—450 т/соат, босими 25,5 МПа гача, температураси 700—850 К га етади. 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 — буй-лама кесими; б — қўндаланг кесими; 1 — ўтхона; 2 — горелма; 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.

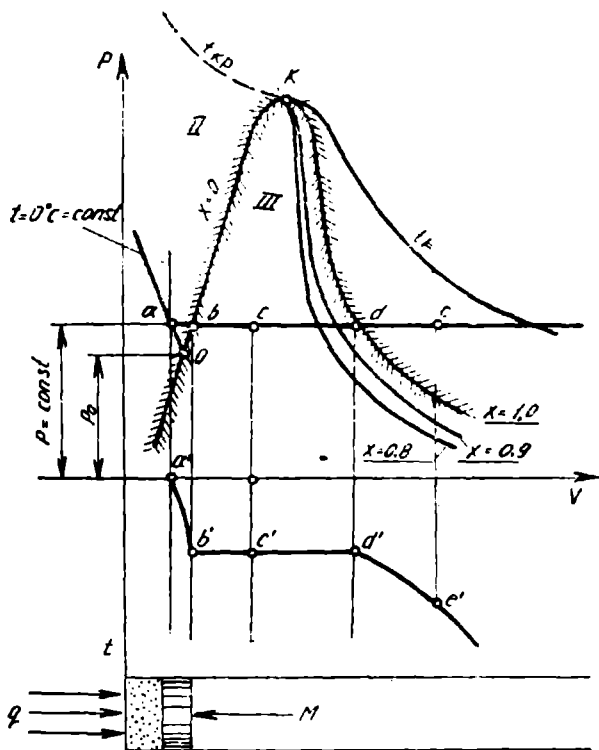
Замонавий газ-музутда ишлайдиган буғ қозонларида соатига 25—30 тонна мазут ёки 30 минг м³ табиий газ ёқилади. Қозонга узатиладиган сув температураси 500 К дан кам бўлмайди. Ишлатилиб бўлинган ёниш маҳсулоти газларининг атмосферага чиқарилаётган қисмининг температураси 390—410 К дан паст бўлмайди. Бу 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 сууқлик 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), қиздирилатган идиш сиртидаги микроёриқларда сув буғи пуфакчаларининг пайдо бўлиши (б) ва қайнаётган сув қалинлиги бўйича температуранинг тақсимланishi (с).

сирт таранглик кучи таъсир этади. Унинг катталиги бо-
сим 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 таранглик кучи; R — пуфакчанин г ички радиуси, м.

Демак, буғ пуфакчасининг радиуси қанча кичрай-тирилишидан қатъи назар, маълум $R_{кр}$ (критик радиус) да пуфакча ичидаги $P_c + \Delta P$ босимлар йиғиндисы бирор $T_c = T_{т.б.} + \Delta T_c$ температурада $P_{т.б.}$ босимга тенглашади. Шунда $P_n > P_c + \Delta P$ бўлганлигидан пуфакча радиуси ортиб боради, яъни шишади. $R_{кр} > R$ бўлганда пуфаклар сирт таранглик кучи ҳисобига сиқилади ва улар суюқлик билан қўшилиб кетади. Таҳлилдан шундай фикр келиб чиқади: *пуфаклар радиуси нолдан бошланганда, суюқлик ҳеч вақт қайнамаган бўлар эди.*

Сувнинг қайнаши бу, албатта, сув газларининг ажралиши, яъни буғ пуфакларининг пайдо бўлишидан бошланади. Сув буғи учун $R_{кр}$ мавжуд эмас. Чунки сув буғи 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 гадир-будурлар газ пуфакчаларининг пайдо бўлиш марказлари ҳисобланади. Иссиқ сиртда пайдо бўлган газ пуфакчалари иссиқлик таъсири ҳисобига тезда катталашиб сиртдан узилади, суюқлик бўйлаб юқорига кўтарилади ва иссиқлик алмашинувни жадаллаштиради. Сиртдан ажралмасдан қолган газ пуфакчалари, ўз навбатида, янги пуфакчаларнинг ҳосил бўлишида манба ҳисобланади.

Иссиқ сиртга бериладиган иссиқлик миқдори ортиб борганида газ пуфакчаларининг ҳосил бўлиши жадаллашади 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 пуфакчаларининг иссиқлик ўтказувчанлиги ёмон бўлганлигидан буғ пардаси иссиқлик алмашинувиге тўсқинлик қилади. Иссиқ сирт температураси жуда кўтарилиб (1000°C) кетиши оқибатида аппаратлар ишдан чиқиши мумкин. Шунинг 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 пуфакчачали қайнаш жараёни ўринли бўлишини таъминлаш мақсадида, 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

$$\alpha = 0,38q^{2,3} p^1 \quad (242)$$

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 ($T_{т.б} > T_{н.б}$) 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 $T_{н.б}$ 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 иссиқдик алмашинуви учун қуйидагича ифодалаган:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{r\rho q^3}{4\mu(T_{т.б} - T_g)x}} \quad (243)$$

бунда r — буғ ҳосил бўлиш иссиқлиги, кЖ/кг; μ — молекуляр масса; λ — иссиқлик ўтказувчанлик коэффициентини; ρ — конденсат зичлиги; x — девор баландлиги; $T_{т.б}$ — тўйинган буғ температураси; T_g — девор температураси, g — конденсат сарфя.

Юқорида таъкидлаганимиздек, конденсат қалинлиги юқоридан пастга томон ортиб боради ва иссиқликнинг узатилиши камаяди. Бундай боғланишларни тик девор учун қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{H} \int_0^H dx = 0,943 \sqrt{\frac{r^2 \rho^2 g \lambda^3}{\mu (T_{т.б.} - T_g) H}} \quad (244)$$

бунда α — иссиқлик узатиш коэффициентининг ўртача қиймати; H — девор баландлиги; dx — элементар баландлик. Бу тенглик горизонтал жойлашган d диаметри қувур учун қуйидагича ифодаланади:

$$\bar{\alpha} = 0,728 \sqrt{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{\mu (T_{т.б.} - T_g) d}} \cdot \epsilon_T, \quad (245)$$

бунда

$$\epsilon_T = \left[\left(\frac{\lambda_g}{\lambda} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right) \right]^{1/8} \text{ — тузиш коэффициенти.}$$

7.11. Буг қозонининг иссиқлик баланси ва ФИК

Буг қозонига бериладиган иссиқлик миқдори сарфланганига тенг, яъни $q_{кел} = q_{свф}$ бўлиши керак. Иссиқлик баланси тенгламаси, одатда 1 м^3 суюқлик ёки газ, 1 кг қаттиқ ёқилғининг мўътадил (нормал) шароитда ($273,15 \text{ К}$; $0,1030 \text{ МПа}$) ёнган ҳолати учун тузилади. Бунинг учун узатиладиган ихтиёримиздаги иссиқлик $q_{н.и}$ тушунчасидан фойдаланилади. Иссиқлик балансининг келтирилган (кирим берилган) қисми дейилганда ҳам $q_{н.и}$ тушунилади.

Демак, келтирилган иссиқлик миқдори қуйидагилар йиғиндисидан ташкил топади:

$$q_{кел} = q_{н.и} = q_{к}^e + q_{ф.н} + q_{с.х} + q_{б.н}, \quad (246)$$

бунда $q_{к}^e$ — ёқилғининг қуйи ёниш иссиқлиги; $q_{ф.н}$ — ёқилғининг физик иссиқлиги; $q_{с.х}$ — ҳаво иситкичга ва тирқишлардан ўтхонага сўрилган совуқ ҳаво иссиқлиги; $q_{б.н}$ — буг иссиқлиги.

Маълумки, бу иссиқлик миқдорларининг ҳар бирини соддалаштирилган ҳолда ифодалаш мумкин, яъни:

$$\begin{aligned} q_{ф.н} &= C_e T_e; & q_{с.х} &= \alpha_{о.х} V_n C_x \cdot T_{с.х}; \\ q_{б.н} &= g_{б.с} (i_b - 2750), \end{aligned} \quad (247)$$

бунда C_e ва C_x — ёқилғи ва ҳавонинг солиштира иссиқлик сифимлари; T_e ва $T_{с.х}$ — ёқилғи ва совуқ ҳаво-

нинг абсолют температуралари; V_n — 1 кг ёки 1 м^3 ёқилғининг ёниши учун зарур бўлган ҳавонинг назарий ҳисобланган ҳажми; $\alpha_{\text{с.х}}$ — ортиқча ҳаво коэффиценти; $g_{\text{б.с}}$ — пуфланадиган буғнинг солиштирама 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 ($T=400-410 \text{ К}$) газлар таркибидаги сув буғининг энтальпияси.

Юқорида келтирилган тенгламадаги q_k^e ва $q_{н.н}$ — 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 $q_{ф.н} + q_{с.х} + q_{\text{с.н}}$ йиғинди q_k^e га нисбатан жуда кичик бўлганлиги сабабли уларни айрим тақрибий ҳисоблашларда эътиборга олинмаса ҳам бўлади. Унда (216) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$q_{\text{кел}} = q_{н.н} \cong q_k^e.$$

Қозон агрегатидан сувни иситишга, буғланишга ва буғнинг ўта қиздирилиши учун зарур бўлган иссиқлик фойдаланилган иссиқлик миқдори q_1 , қолган иссиқлик миқдорлари ($q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = q_{н.ф}$) исроф бўлган иссиқлик миқдори бўлади. Демак, $q_1 + q_{н.ф} = q_{\text{ар.ф}}$ бунда q_2 — тутун газлари олиб чиқадиган иссиқлик миқдори;

q_3 — ёқилғининг тўла ёнмаслигилан юзага келади-ан 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:

$$q_{н.н}^k = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6. \quad (248)$$

Қозонга келтирилган тўла иссиқликни 100% деб олинса,

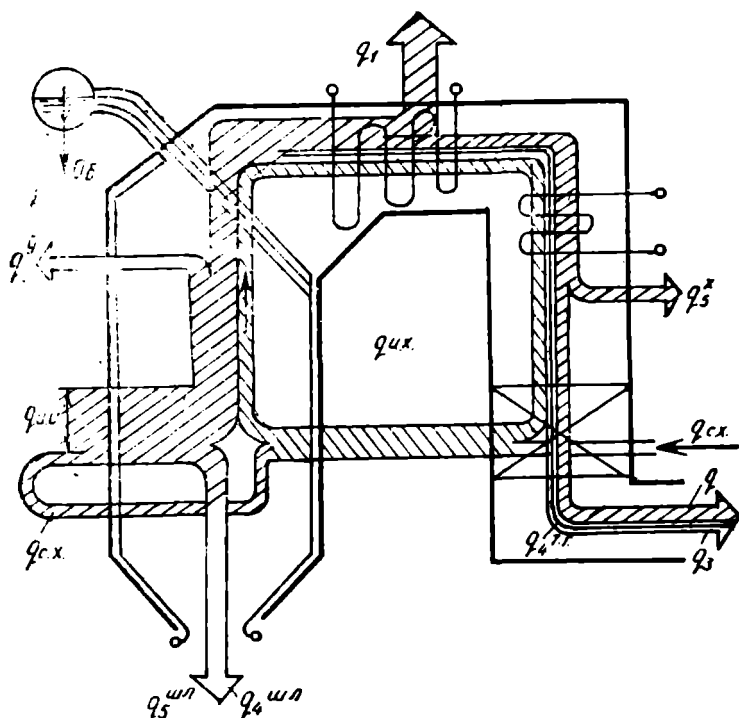
у ҳолда баланс тенгламасини қуйидагича ифодалаш мумкин.

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 = 100\%. \quad (249)$$

Буғ қозонидаги иссиқлик балансини схематик* усул- да тасвирлаш мумкин (49- расм).

Схематик тасвирдан маълумки, $q_{и.х}$ — иссиқ ҳаво оқимидаги иссиқлик миқдори ёниш маҳсулидан олин- адиган, ёпиқ контур бўйича ҳаракатланадиган иссиқлик энергиясидир. Албатта, бу иссиқлик тутун газларидан олиниб яна ўтхонага ҳаво орқали қайтади. Буғ қозони агрегатининг ўзига сарф бўладиган иссиқлик миқдори- ни ҳисобга олмасдан ҳисобланган ФИК қозоннинг брут- то ФИК дейилади.

$$\eta_{i.б} = \frac{q_1 \cdot 100}{q_{и.и}} = Q_1 \quad (250)$$



49-расм. Буғ қозонининг иссиқлик баланси.

$$\bar{\eta}_{\kappa.6} = 100 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6). \quad (251)$$

бунда q_1 — қозон агрегатидаги сув ва буғнинг қабул қилган иссиқлиги (узлуксиз-пуфлаш усули қўлланилган ҳолат учун). Агарда, барабандаги буғнинг бир қисми истеъмолчига узатилиб, буғ такроран иккинчи марта ўта қиздирилса, q_1 ни қуйидаги ифодадан аниқлаш мумкин:

$$q_1 = \frac{1}{B} \left[D(i_{\text{г.к.б}} - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{п.с}}(i' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{т.б.}}(i'' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{н.у.к.б}}(i''_{\text{н.б.ч}} - i'_{\text{н.б.к}}) \right], \quad (252)$$

бунда D — қозон агрегатининг иш унуми; $D_{\text{п.с.}}$, $D_{\text{т.б.}}$ ва $D_{\text{н.у.к.б.}}$ — пуфлашга ишлатиладиган сув, тўйинган буғ ва иккиламчи ўта қиздирилган буғ сарфлари; $i_{\text{г.к.б.}}$ ва i'' , $i_{\text{т.с.}}$, i' — ўта қиздирилган ва тўйинган буғ, таъминлаш ҳамда қозон сузининг энтальпияси; $i_{\text{н.б.к}}$ — иккиламчи буғнинг киришдаги энтальпияси; i' ва i'' — тўйинган буғ ва қозон сувининг энтальпияси $i''_{\text{н.б.ч}}$ — иккиламчи буғнинг чиқишидаги ва i — иккиламчи буғнинг кириш қисмларидаги энтальпиялари; B — ёқилги сарфи, у қуйидагича аниқланади:

$$B = \frac{D(i_{\text{г.к.б}} - i_{\text{н.б.к}}) + D_{\text{п.с}}(i' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{т.б.}}(i'' - i_{\text{т.с}}) + D_{\text{н.у.к.б.}}}{\frac{q_{\text{н.и.}} \cdot \eta_{\kappa.6}}{(i''_{\text{н.б.ч}} - i_{\text{н.б.к}})}}. \quad (253)$$

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.

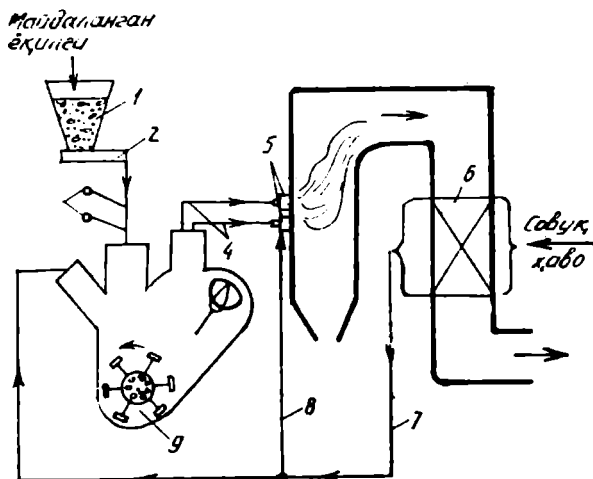
Замонавий қозон агрегатларининг ФИК 90—95% атрофида бўлиб, улар саноатнинг турли соҳаларини буғ ва сув билан таъминлайди ҳамда буғ турбинаси билан қамкорликда электр энергияси ишлаб чиқаради.

7.12. Қозон қурилмаларининг ёрдамчи ускуналари

Бу ускуналарга қаттиқ ёқилғини чангсимон ҳолатга келтириб, уни ўтхонага узатувчи қурилма, сўриш-пуфлаш қурилмаси, тутун газларини зарарли моддалар (CO_2 , CO_3 , кул зарралари) дан тозалайдиган қурилмалар (ЦН циклон, батареяли кул туткич, марказдан (очма) ВТИ скруббери, электр филтёрлар) ва қозон қурилмасини автоматик бошқариш ва назорат қилиш ас-

боб-ускуналари киради. Қаттиқ ёнилғини чангсимон ҳолатга келтириб ёқишдан асосий мақсад ёқилғининг тўла ёнишини, уни ўтхонага осон узатилишичи ҳамда узатиш миқдорини тургун сақлашни таъминлашдан иборат бўлибгина қолмасдан, оғир ишларнинг асосий қисми механизациялашади ва автоматлашади. Тайёрланган чангсимон ёқилғи тегирмондан тўғри ўтхонанинг горелкасига пуфлаш йўли билан узатилиши мумкин (50-расм). Чангсимон ёқилғи тайёрловчи қурилма ҳўл кўмир бункери 1, кўмир узаткич 2, очилиб-ёпилиб турувчи тескари клапанлар 3, чангсимон 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. Чангсимон 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 ёнишидан ҳосил бўлган ёниш маҳсулларини атмосферага ва қурилмадан ташқарига чиқаришда ҳамда ҳавони горелкага узлуксиз бир текис узатиб туришда сўриш-пуфлаш усулидан фойдаланила-



50-расм. Чангсимон ёқилғи тайёрловчи ва уни пуфлаш усули билан узатувчи қурилма схемаси.

ди. Ҳавони горелкаларга етказиб беришда ва тутунни атмосферага чиқаришда марказдан қочма вентиляторлар қўлланилади. Сўриш-пуфлаш машиналари мустақам қилиб ишланади, чунки улар узоқ муддат давомида юқори температурали (380—420 К) муҳитда ва зарарли газлар аралашмасида ишлайди.

Сўриб чиқариш қурилмалари айрим ҳолларда баланд мўрилар билан алмаштирилади.

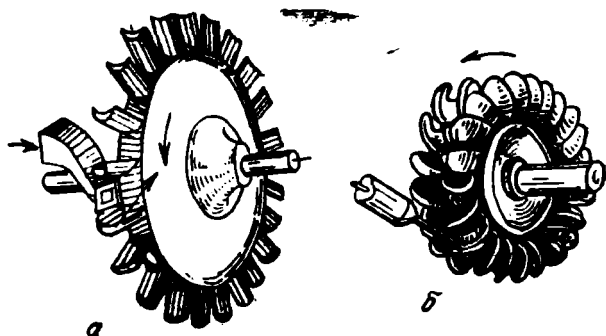
Қозон қурилмалари атроф-муҳитга ортиқча миқдорда зарарли тутун газлари ва кулни чиқармаслиги учун улар махсус ёрдамчи қурилмалар билан жиҳозланади. Ёқилғининг таркибий қисми ўта мураккаб бўлганлигидан уни мутлақо тўла ёқиб бўлмайди. Натижада тутун газлари билан атмосферага заҳарли маргимуш (As), фторли бирикмалар, ванадий бирикмалари, азот оксиди, олтингурут 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 гази чиқарилади. Масалан, майда антрацит ёқиладиган қуввати 950 т/соат бўлган буғ генератори мўрисидадан 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 барабан 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 моделини хос бўлган буғ ғилдирагини 1629 йилда яратган, ундан буғ оқимининг кинетик энергияси уйғотган импульс кўракли ғилдиракни айлантиришга сарфланган.

Эрампиздан олдинги даврда, Герон Александрийски томонидан буғнинг реакция кучи ҳисобига айланмадаги шар шаклидаги асбоб яратилган. У «Герон шар» деб юритилади. Бранка ғилдираги ва Герон шарини ҳеч қачонда қўлланилмасан-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 Уат 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 яратилганда сўнг, уни такомиллаштириш тадқиқотлари ривож топди. Натижада бир, икки, уч ва кўп босқичли буғ турбиналари яратилди (52-расм).

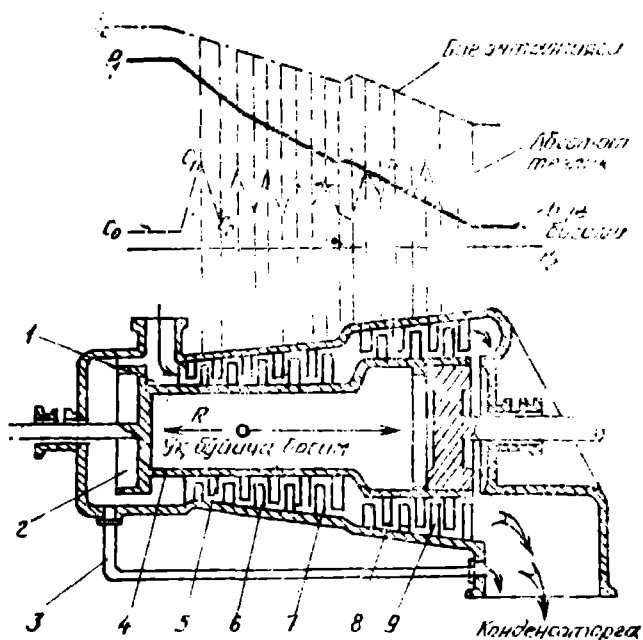
Буғнинг потенциал энергиясини (Бранка ва де-Лаваль услубига асосан) механик энергияга айлантирувчи буғ турбинаси актив турбина дейилади. Буғ

нинг потенциал энергияси буғнинг соплода, йўналтирувчи аппаратда ва кураклар оралиғида тез қенгайишидан унинг кинетик энергиясининг ортиши ҳисобига ишлайдиган буғ турбинаси реактив турбина дейилади. Реактив турбинани 1884 й. инглиз муҳандиси Парсонс яратган, унинг қуввати 10 от кучига (18 минг айл/мин) тенг эди.

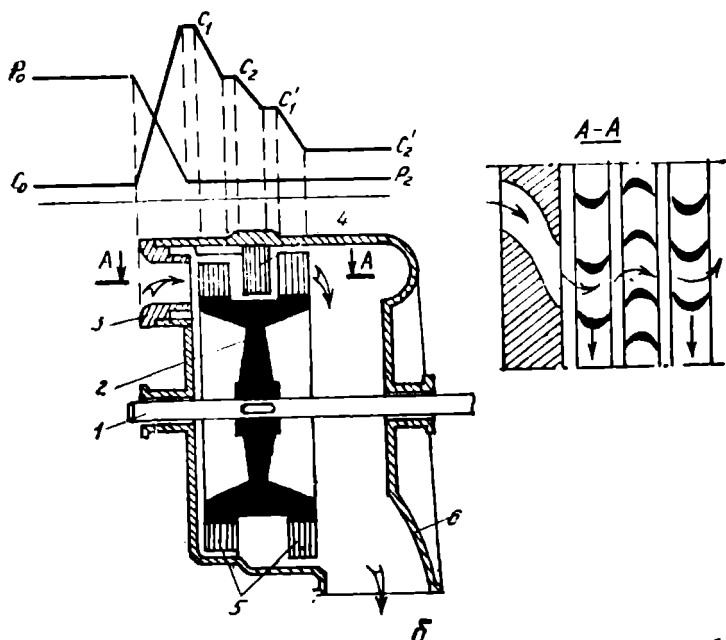
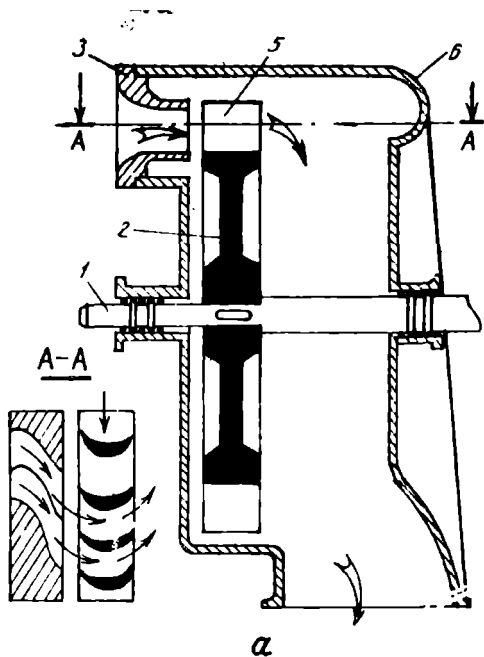
Кейинчалик буғ турбиналарининг номинал қуввати 60 МВт, босими 12,8 МПа га етказилган, у кўпчилик иссиқлик электр станцияларида қўлланилади. Замонавий турбиналарнинг қуввати 1200 МВт дан ишлаб кетган. Турбина роторининг айланишлар сони 2000—50000 айл/мин оралиғида.

Буғ турбиналарида кечадиган иссиқлик жараёнларининг турига кўра, уларни қуйидаги гуруҳларга бўлиш мумкин.

Конденсацион турбиналар (босими ростланадиган ва



52-расм. Урта қувватдаги реактив буғ турбинаси кесми-нинг схематик тасвири.



53-расм. Актив буг турбиналарининг схематик тасвири: *a* — бир босқичли де-Лаваль турбинаси; *b* — икки босқичли турбина.

ростланмайдиган) ва қарши босимли турбиналар. Уларнинг актив ва реактив турлари бўлади.

Конденсацион турбиналарда иш бажариб бўлган буғнинг босими атмосфера босимидан кичик бўлади ва буғ конденсаторда тўлиқ сувга айланади. Конденсация вақтида чиқарилган иссиқлик миқдори иссиқлик алмашинуви усули билан системадан ташқарига тўлиқ чиқарилади, яъни бошқа муҳитга узатилади.

Иссиқлик алмашинуви асбоблари сифатида регенерация усулида ишлайдиган аппаратлар қўлланилади, яъни қозонга узатиладиган совуқ сув турбинада ишлатиб бўлинган буғ билан иситилади.

Босими ростланадиган конденсацион буғ турбиналарига йўналтириладиган буғнинг маълум қисми тўғри саноат марказларига ва аҳоли яшайдиган жойларга юборилади.

Қарши босимли буғ турбиналарида эса ишлатилиб бўлган буғнинг қолдиқ иссиқлигидан ишлаб чиқаришда ва иситиш тармоқларида ишлатилади.

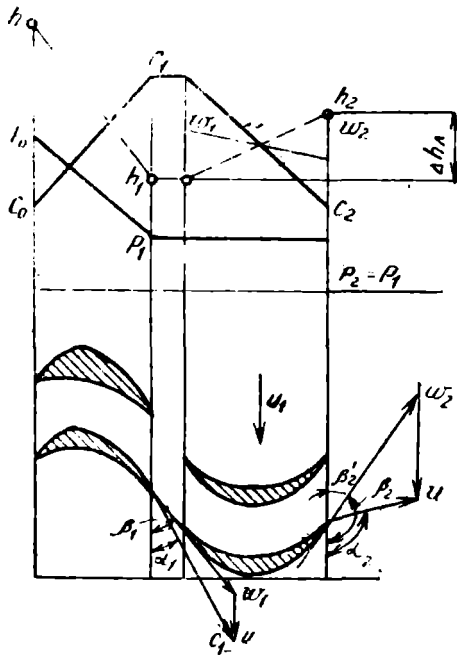
Буғ турбиналари бир, икки ва кўп босқичли ҳамда мос равишда паст, ўртача ва юқори босимли бўлади.

Буғ турбинаси, буғни ҳалқасимон киритилиш камераси 1, енгиллаштириш поршени 2, бирлаштирувчи буғ трубаи 3, роғор барабани 4, иш кураклари 5 ва 8, йўналтирувчи кураклар 6 ва 9, тана 7 дан ташкил топган (52-расм). Буғ турбинаси компрессорга нисбатан тескари жараёнли иссиқлик машинаси бўлиб, стационар (иссиқлик электр станцияларида) ва кўчма (кемаларда) ҳолида ишлатилади. Шунингдек, буғ 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 буғ турбиналарининг схематик тасвири келтирилган. Расмдан кўриниб турибдики, актив буғ турбинаси вал 1, кураклар 5, маҳкамланадиган диск 2, буғнинг 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_1 ни маълум тезликка мос келувчи имконияти бўлган иссиқликнинг пасайиши Δi_2 га нисбати билан ўлчанадиган катталиқ буғ турбинаси босқичининг асосий тавсифи бўлиб ҳисобланади ва у *босқич реактивлиги* дейилади:

$$\Omega = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_n} \quad (254)$$

Агар $\Omega = 0$ бўлса, имконияти бўлган иссиқлик пасайишининг ҳаммаси, яъни босимнинг ўзгариши, соплода тезлик босими ($C_2 - C_1$) га айланади. Бундай жараён актив буғ турбинаси куракларида содир бўлади. Буғ оқими турбина бўшлиғидан босқичма-босқич оқиб ўтишида унинг тезлиги, босими, температураси ўзгаради (51-расм). Агар $\Omega = 1$ бўлса, унда имконияти бўлган иссиқликнинг пасайиши фақат турбина куракларида юз беради. Бундай жараён ўринли бўлганида турбина реактив дейилади.

Одатда, реактив турбиналарни қуриш анча мураккаб. Шунинг учун комбинациялаштирилган турбиналар қурилади. Де-Лаваль томонидан яратилган турбина ҳам битта актив босқичдан иборат бўлган.



51-расм. Турбина босқичидан буғ оқимининг ўтиш кинематикаси.

Турбинанинг актив босқичида буғ бирданга бир ё бир неча соплло 3 га йўналтирилади. Сопллода буғ ўзининг тезлигини маълум даражада орттирганидан кейин иш кураклари 5 га бориб урилади ва ўз импульсини беради. Иш бажариб бўлган буғ чиқариш трубаси орқали чиқарилади. Турбина танаси 6 ичидаги вал 1 га куракли ротор 2 ўрнатилган. Буғнинг ташқарига чиқиб кетишидан сақлаш мақсадида куракли ротор махсус лабиринт валнинг боши ва охирига ўрнатилган. Де-Лаваль турбинасида, буғ битта босқичда 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 буғ 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 буғнинг 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 зўриқишларни 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 буғ турбиналарининг биринчи босқичида икки чамбаракли Кертис дискидан фойдаланилади. Икки чамбаракли Кертис дискининг ўрта қисми очиқ бўлиб, уни турбина танасида (статор) жойлашган йўналтирувчи кураклар тўлдиради ва буғни куракларга бўриб 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 бўлинади. Босқичлар ораллиги диафрагма билан ажратилган. Иш кураклари ўрнатилган диск ягона умумий валга маҳкамланган.

Буғ турбиналарининг ҳаммасига ҳам босим остидagi юқори температурали буғ соплло орқали киритилади.

Кўндаланг кесими S бўлган соплога киришидаги буғ босими P_1 бўлса, ундан (сопло, 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 сопло ва кураклардан ўтиш давридаги кенгайиш жараёнини адиабатик жараён деб қараш мумкин. Чунки буғ узатувчи труба ва турбина куракларига ташқаридан иссиқлик миқдори узатилмайди 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 тур. и хил ҳолатлардаги газ ва буғлар учун ўзгаради. Масалан, мўътадил температурадаги газ учун $\kappa=1,4$; ўта қиздирилган, тўйинган қуруқ ва тўйинган нам буғлар учун мос равишда $\kappa=1,3$; $\kappa=1,135$ ва $\kappa=1,035$ — $0,1 x$ бўлади (x — буғнинг қуруқлик даражаси).

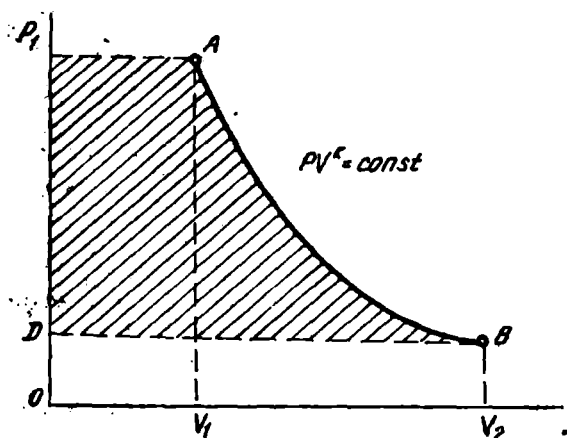
Буғнинг адиабатик кенгайиши PV диаграммадан кўриниб турибди, буғ кенгайиши жараёнида унинг ҳажми V_1 дан V_2 гача ва босими P_1 дан P_2 гача ўзгарибгина қолмасдан, мос равишда унинг температураси, энтропияси ҳам ўзгаради (55-расм).

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, сон 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 иш ABV_2V_1A юза S_2 га сон 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. Бугнинг оқиб чиқиш жарёни PV диаграммаси.

Бугнинг соплота оқиб кириш тезлиги анча кичиклигини, яъни $C_0=0$ эканлигини эътиборга 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

$S = P_1 A B D P_1$; $S_1 = P_1 A V_1 O P_1$; $S_2 = A B V_2 V_1 A$; $S_3 = D E V_2 O P_2$ бўлганлиги асосида юзаларнинг алгебраик йиғиндисини қуйидагича ифодаланади:

$$S = S_1 + S_2 - S_3. \quad (258)$$

Демак,

$$S_1 = P_1 V_1; \quad S_2 = \frac{1}{\kappa-1} (V_1 P_1 - V_2 P_2); \quad S_3 = P_2 V_2.$$

Юқорида келтирилган тенгламани соддалаштириб ҳосил қиламиз:

$$\frac{C_1^2}{2g} = \frac{P_1}{\kappa-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2). \quad (259)$$

Адиабатик жараёндан маълумки, ҳажмлар нисбатларига 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 бугнинг кенгайи-
шидаги кинетик энергиясини қуйидагича ифодалаш
мумкин:

$$\frac{C_1^2}{2g} = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (260)$$

Охири тенглик (260) дан буг заррасининг учиб чиқиш
тезлигини топамиз:

$$C_1 = \sqrt{2g \cdot \frac{k}{k-1} \cdot P_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (261)$$

Буг турбинасининг маълум вақт давомида сарфлаган
буг миқдори ишлатилиб бўлинган бугнинг солиштирма
оғирлигига, буг оқиб чиқадиган қувур кесимнинг юза-
сига ва буг оғирлиги тезлигига боғлиқ:

$$G = S_{1/2} C_1 = S \frac{C_1}{V_2}. \quad (262)$$

Сарф тенгламасига V_2 ва C_1 қийматларини қўйиб,
уни соддалаштириб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$G = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{V_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (263)$$

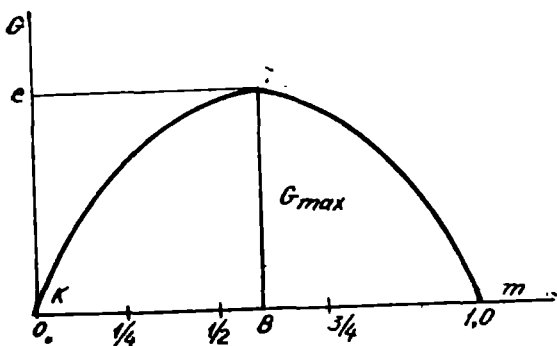
Сарф тенгламасига V_2 ва C_1 қийматларини қўйиб,
мумкин: агар $P_2/P_1 > 1$ шарт бажарилса, у ҳолда ташқи
босим P_2 ички босим P_1 дан катта бўлади, яъни буг оқиб
чиқмайди; агар $P_2/P_1 = 1$ бўлса, у ҳолда $G = 0$ бўлади
ва нисбат P_2/P_1 нинг камайиши билан G ортиб боради;
агарда $P_2/P_1 = 0$, яъни $P_2 = 0$ бўлса, у ҳолда турбинадан
ташқарида абсолют бўшлиқ ҳосил бўлиши мумкин. Де-
мак, сарф $G = 0$ бўлади. Лекин, мантиқан таҳлил қилин-
са, бундай бўлиш эҳтимоллиги йўқ. Чунки турбинадан
ташқаридаги босим йўқ даражада бўлганда, буг албат-
та жуда катта тезликда оқиб чиқиши керак. Аммо назар-
рий жиҳатдан қаралса, буг ташқарига оқиб чиқа олмас-
дан унинг сарфи нолга яқинлашади. Бундай бўлиши
учун ташқи босим турбинада иш бажараётган буг боси-
мидан 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 шаклидағи 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 бўлаги ўз исботини топмаган. Бу зиддиятни аниқлаш учун Ванцел ва Сен-Венан томонидан гипотеза таклиф этилган: чиқиш кесимидаги газ ёки буғ босими ҳамма вақт ҳам ташқи муҳит босимига тенг бўла олмайди. Демак, турбина сопловининг чиқиш қисмидаги P_2 босим маълум қийматларгача ташқи муҳит босимига тенг бўлса-да, ташқи муҳит босими пасайганида P_2 нинг қиймати ҳам пасайиб боради. Чунки буғнинг оқиб чиқиш тезлиги ортиб кетади (mk нуқталар ораллиғи) 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 $P_2 = P^k$ бўлганлиги учун қуйидагича ёза оламиз:

$$G = S \sqrt{2g \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_k}{V_1} \left(\frac{P_k}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} - \left(\frac{P_k}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (264)$$

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.

ражали ҳосила олиб ва уни нолга тенглаштириб. сўнг-
ра тенглик ҳосил қилингандан кейин унинг ҳар иккала

• 13-жадвал

Буг ёки газ номи	k	P_k/P_1	α	
Тўйинган қуруқ буг	1,135	0,577	3,23	1,990
Ўта қиздирил- ган буг	1,30	0,546	3,33	2,090
Атмосфера ҳавоси	1,40	0,528	3,38	2,145

қисмини ҳам $(k+1) \cdot \left(\frac{P_k}{P_1}\right)^{\frac{2-k}{k}}$ га бўлиб ҳосил қиламиз:

$$\frac{2}{k-1} = \left(\frac{P_k}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Бундан

$$\frac{P_k}{P_1} = \left(\frac{2}{k-1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (265)$$

бўлади.

Бу тенглик критик ва бошланғич босимлар нисбати-
нинг қиймати бўлиб, унга мос келувчи энг юқори сарф
 G ни ифодалайди. 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 буг оқими-
нинг босими ташқи муҳит босимига тенг бўлади ва сарф
критик қийматга етмайди. Аксинча, яъни $P_2 < P_k$ бўл-
ганда, чиқариш кесимидаги газ ёки буг 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
сарфни аниқлаш зарур бўлса, юқорида келтирилган C_1
ни аниқлаш ифодаси (261) даги P_2/P_1 ўрнига P_k/P_1
қийматни 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 илдиз остидан чиқарилади:

$$C_2 = \alpha \sqrt{\frac{P_1}{V_1}}; \quad G_{\max} = S \cdot \beta \sqrt{\frac{P_1}{V_1}} \quad (267)$$

Буғ ёки ҳаво учун критик ҳолатдаги коэффициентлар юқоридаги 13-жадвалда келтирилган. Жадвалдан кўришиб турибдики, P_k тақрибан бошланғич P_1 нинг ярмига тенг, яъни $P_k = P_1/2$.

8.2. Буғ турбинасидаги исрофлар

Икки хил ички ва ташқи исрофлар бўлади. Ички исрофларга қуйидагиларни киритиш мумкин:

а) сопо ва иш кураклари деворларига буғ оқимининг ишқаланиши, уюрмалар ҳосил бўлиши натижасида оқимнинг кинетик энергияси исрофи. Ишқаланишсиз оқимга нисбатан бу энергия жараён охирида пессиклик энергиясига айланиб, иш буғи энтальпиясини орттиради;

б) иш бажариб бўлган буғнинг оқиб чиқишида тезликнинг камайиши ҳисобига кинетик энергия исрофи;

в) иш кураклари ва турбина танасининг ички деворлари ҳамда диафрагма ва вал ораллигидаги тирқишлардан иш буғининг оқиб ўтиши ҳисобига бўладиган исрофлар;

г) буғнинг намлиги ҳисобига, турбинанинг охириги босқичида сув томчилари куракларга урилиб роторнинг айланишига қаршилиқ кўрсатиши натижасида пайдо бўладиган исрофлар.

Ташқи исрофларга қуйидагиларни киритиш мумкин:

а) турбина танасининг икки елкасида, яъни вал таянадиган нуқталарида мавжуд бўлган тирқишлардан иш буғининг сирқиб чиқиши ҳисобига бўладиган исрофлар ташқарига сирқиб чиққан буғ турбина кўрсаткичларига кучли салбий таъсир кўрсатмаса-да, буғнинг сарфини орттиради;

б) турбина ротори елкаларидаги подшипниклардаги ишқаланишни енгишга ва ёрдамчи механизмларни юритишга сарфланадиган энергия ҳисобига бўладиган механик исрофлар.

8.3. Буғ турбинасининг қуввати ва ФИК

Иссиқлик двигателларидан буғ турбинаси ичи ҳам куракларда уйғотилган индикатор (ички) ва ротор валида ҳосил бўлган эффектив қувватлар орқали ифодланади. Маълумки, турбинанинг эффектив қуввати $N_{эф}$ унинг индикатори N_1 қувватидан механик исрофлар қиймати катталигича кичик бўлади.

Индикатор (ички) қуввати эса исрофсиз ишлайдиган турбина қувватидан ички исрофлар қиймати катталигича кичик бўлади.

Буғ турбинаси ишсбий индикатор ФИК ни, унинг ички исрофлари ҳисобга олинганда, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_i = \frac{N_i}{N_0} \quad (269)$$

Худди шунга ўхшаш механик исрофлар ҳам ҳисобга олинмаган механик, яъни турбина валидаги (эффектив) қувватини ички қувватга нисбати билан ўлчанадиган, ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_{сх} = \frac{N_{эф}}{N_1} \quad (269)$$

Замонавий буғ турбиналарининг η_i ва $\eta_{сх}$ мос равишда 0.7—0.88 ва 0.99—0.995 атрофида бўлади.

Ҳозирги пайтда ишлаб чиқаришда электр, иссиқлик энергияларининг қўлланилиши кун сайин ортиб бормоқда. Чунки мукамаллашган технологик услубларсиз тақомиллашган саноат ишлаб чиқаришнинг тасаввур этиш қийин.

Демак, буғ турбиналарини қуриш ва уларнинг энг қулай конструкцияларини қуввати бўйича танлаш долзарб масалалардан бири бўлишига асосий сабаб, бу иссиқлик машиналарини ишлатиш осон, катта қувватларни олиш мумкин ҳамда экологик жиҳатдан тоза ҳисобланади. Замонавий буғ турбиналарининг паст қувватлиларини қуриш ҳар томонлама мақсадга мувофиқ эмас. Шунинг учун катта қувватдаги кўп босқичли буғ турбиналари қурилади.

Буғ турбина ва қозон қурилмаси блоклари системасининг иқтисодий самарадорлигини орттиришда қуввати 300 МВт дан ортиқ бўлган буғ 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. БОҒ. ГАЗ ТУРБИНАСИ

9.1. Газ турбинасининг таснифи, тузилиши ва ишлаш тартиби

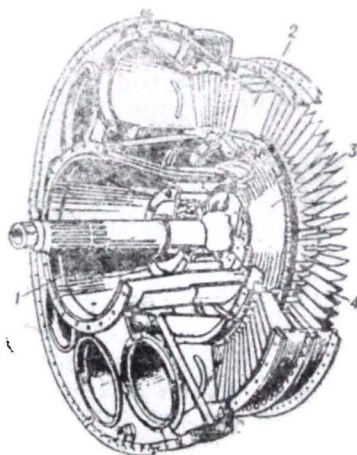
Юқори босим ва температура остидаги ёниш маҳсули (газ) энергиясини кураклар ёрдамида ротор валининг механик энергиясига айлантирувчи иссиқлик машинаси газ турбинаси дейилади. Актив ва реактив газ турбиналари бўлади.

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 аппаратининг кетма-кет жойлашган қўзғалмас (йўналтирувчи) курак тожлари ва унинг оқим кесимини ҳосил қиладиган иш гилдирагининг айланувчи тожларидан ташкил топган (57-расм).

Газ турбинаси вал 1, статорда жойлашган сопло аппаратининг йўналтирувчи кураклари 2, турбина диски (лаппак) 3 ҳамда роторнинг иш кураклари 4 дан ташкил топган. Сопло аппаратининг йўналтирувчи кураклар билан роторга ўрнатилган иш кураклари турбина босқичини ташкил қилади. Одатда газ турбиналари кўп босқичли бўлиб, қуввати 100 МВт дан катта бўлади.

Газ турбинаси газ

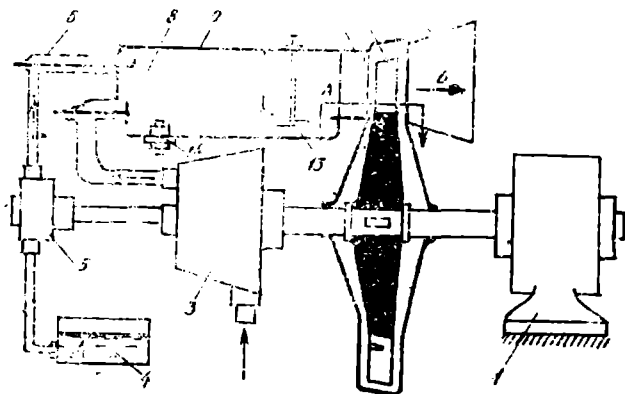


57-расм. Бир босқичли газ турбинаси.

турбиналари қурилмаларининг асосини ташкил этади ва иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантиришда кенг қўлланилади. Газ турбиналари ҳам буғ турбиналаридай бўлиб, фақат уларда буғ ўрнига ёниш маҳсулоти — тутун асосий иш жисми ҳисобланади. Газ турбиnasiда 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 турбиnasiнинг таркибий қисми ёниш камераси 6, ёниш маҳсулоти оқимидаги иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантирувчи газ турбиnasi 2, атмосфера ҳавосини сўриб ва сиқиб узатувчи компрессор 3, ёқилғи насоси 5 ва бак 4, электр генератори 1, сопло 11, ёниш камераси 9 ва бошқа ёрдамчи қисмлардан ташкил топган (58-расм). Тузлиши ва ёқилғининг ёқилиш услубига кўра, газ турбиnasi қурилмаси (ГТҚ) таркибига электр свеча, иш моддаси (ҳаво ва ёқилғи) ни ёниш камерасига киритиш ҳамда ёниш маҳсулини камерадан чиқа-



58-расм. Ёқилғи $P = \text{const}$ бўлганда ёқиладиган ГТҚнинг схемаси: 1 — электр генератор; 2 — газ турбиnasi; 3 — ҳаво компрессори; 4 ва 5 — ёқилғи баки ва насоси; 6 — ёқилғи труба; 7 — форсунка; 8 — сиқилган ҳаво труба; 9 — ёниш камераси; 10 — ёниш маҳсули оқимини йўналтирувчи аппарат; 11 — газ турбиnasi кураклари; 12 — сопло.

риш клапанлари, регенерация бўлмаси, бирламчи ва иккиламчи босқичли ёниш камералари ҳамда турбиналари, шунингдек, иккиламчи компрессор киради. ГТҚ ларда иш моддасини ёқиш услубига кўра $V = \text{const}$, $P = \text{const}$ ва аралаш босқичли бўлади. ГТҚ ларда ёқилги сифатида табиий газ, тозаланган кокс, домна ва генератор газлари, махсус дизель ва соляр мойлари ишлатилади.

Газ турбиnasi қурилмасидаги турбина, электр генератори, ҳаво компрессори ва ёқилги насоси ягона умумий валда жойлаштирилади. Иш ёқилгисининг $V = \text{const}$ да ёнадиган 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 аввал ҳавонни киритиш, кейин ёқилгини киритиш клапанлари очилиб ёниш камерасига мос равишда, сиқилган ҳаво ва ёқилги узатилади. Шунда ҳосил бўлган иш ёқилгисига ташқаридан q_1 иссиқлик миқдори киритилади, яъни свеча контактлари орасида электр учқунни чақнайди. Шу электр учқунни q_1 иссиқлик манбаи ҳисобланади ва иш ёқилгисини ёндиради. Бу ёниш натижасида ёниш камерасидаги босим кескин ортади (PV — диаграммада 2 ва 3 нуқталар оралиғи). Иш ёқилгисини тўла (камида 95%) ёпгандан сўнг, унинг температураси 2300 К га кўтарилади, шунда ёниш камерасидаги босим энг юқори қийматга етади. Ана шундагина ёниш маҳсулотини газ турбиnasi куракларига йўналтирувчи каналда жойлашган чиқариш клапани очилади. Шунда ёниш маҳсулоти температурасини 1000—1400 К гача пасайтириш мақсадида унга махсус йўллар орқали совуқ ҳаво узатилади (чунки газ турбиnasi ўта юқори температураларга чидамайди). Ҳосил бўлган аралашма катта босим остида турбина куракларига таъсир кўрсатиб, унинг роторини айлантиради, яъни иссиқлик энергияси механик энергияга айланади. Демак, ёниш маҳсулоти ташқаридан иссиқлик энергиясини олмаган ҳолда, яъни $dq = 0$ да турбинада адиабатик кенгайиб (PV диаграммада 3 ва 4 нуқталар оралиғи) иш бажаради. Газ турбиnasiда иш бажариб чиққан ёниш маҳсулоти сопло орқали атмосферага чиқарилади. Система ўзининг мувозанат ҳолатига, атмосферага чиқарилган ёниш маҳсулотидаги қолдиқ иссиқлик миқдорини совиткичга (атмосферага) узатиб бўлгандан сўнг қайтади (PV — диаграммадаги 4 ва 1 нуқталар оралиғи). Цикл такрорланади.

Демак, ГТҚ да ўтадиган циклга $V = \text{const}$ остида иссиқлик берилганда, у иккита адиабатик ($1-2$ ва $3-4$ нуқталар оралиғи), битта изохора ($2-3$ нуқталар оралиғи) дан ҳамда битта изобара ($4-1$ нуқталар оралиғи) дан иборат бўлган термодинамик жараёнлардан ташкил топар экан.

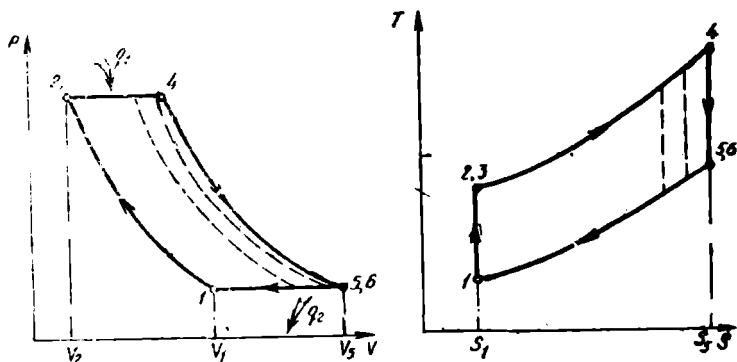
Циклнинг бажарган фойдали иши $1-2-3-4-1$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатдан тенг.

Циклнинг TS — диаграммасидан кўриниб турибдики, системанинг энтропияси иш моддаси ўзгармас ҳажмда ёнганда ва ўзгармас босимда тўла кенгайганда, ўзгарувчан бўлади. Бунга асосий сабаб термодинамик системага ташқаридан иссиқлик миқдори q_1 киритилади ва ундан иссиқлик миқдори q_2 совиткичга (атмосферага) чиқарилади.

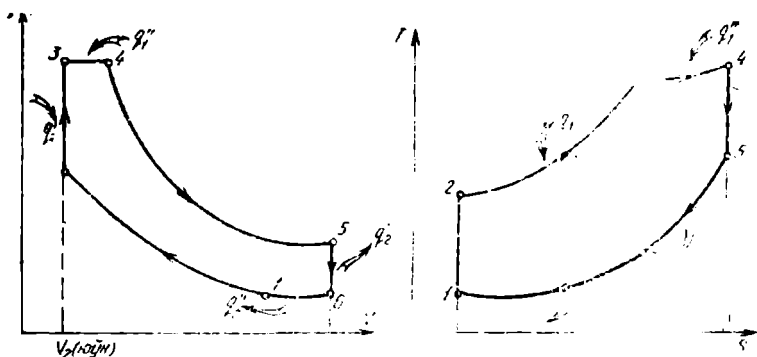
Демак термодинамик системадан иссиқлик чиқарилганда ёки унга киритилганда система энтропияси ва абсолют температураси ўзгарувчан бўлади.

ГТҚ келтирилган тўла иссиқлик миқдорини ишга айлантириш мураккаб физик ва қимёвий, газодинамик ва термодинамик жараёнларда кечадиган ҳодисаларга боғлиқ бўлиб, уларнинг ҳаммасини ҳисобга олиш жуда қийин ва аниқ тажрибалар натижаларини эътиборга олиш зарур бўлади.

Шунинг учун соддалаштириш мақсадида жараёнларни ва унинг иш жисминини идеаллаштириб қабул қилинади. Иссиқлик машиналари цикли таҳлил қилинса, уларда кечадиган жараёнлар шартли цикл қисмларидан



58-расм. Давоми. Иссиқлик $V = \text{const}$ бўлганда узатиладиган ГТҚ циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.



59-расм Иссиқлик куч машиналарининг умумлашган термодинамик циклининг PV ва TS диаграммалари.

ташкил топади ва уларнинг диаграммалари PV ва TS координаталарда ифодаланади. Циклнинг 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 ўчун унинг кенгайиши адиабатик ($dq=0$) жараён деб қаралади. Қолдиқ иссиқлик миқдори q_2 иш жисмидан $V=\text{const}$ бўлган ҳолатда чиқарилади. Тўлалигича иш жисмидан чиқмасдан қолган иссиқлик миқдори (q_2') $P=\text{const}$ бўлганда ундан чиқарилади, деб фараз қилинади.

Умумлашган цикл параметрлари тавсифи қуйидагича белгилаб олинади (59-расм):

$$\epsilon = \frac{V_1}{V_2} \text{ — сиқиш даражаси;}$$

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} \text{ — босимнинг ортиш даражаси;}$$

$$\rho = \frac{V_4}{V_3} \text{ — ҳажмнинг дастлабки кенгайиш даражаси;}$$

$$\lambda_p = \frac{P_5}{P_6} \text{ — босимнинг пасайиш даражаси;}$$

$$\epsilon_v = \frac{V_6}{V_1} \text{ — ҳажмнинг қисқариш даражаси.}$$

$q_1 = q_1' + q_1''$ — умумлашган циклдаги 1 кг иш жисмига келтирилган иссиқлик миқдори;

$q_2 = q_2' + q_2''$ — умумлашган циклдаги 1 кг иш жисмининг совиткичга узатган иссиқлик миқдори.

Циклдаги иш моддасининг иссиқлик сиғими ва ҳолатлардаги температуралар орқали иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_{11} - T_3) \\ q_2 &= C_v (T_3 - T_1) + C_p (T_3 - T_1) \end{aligned} \quad (270)$$

Циклга келтирилган ва ундан чиқарилган иссиқлик миқдорларини цикл параметрлари орқали ҳисоблаш учун албатта цикл ҳолатларига мос келувчи ҳамма нуқталар температураларининг бирор нуқта температураси билан ифодалаш зарур бўлади.

Масалан, сиқиш тактида $dq=0$ бўлса, жараён адиабатик бўлади. Келтирилган PV — диаграммада бу 1—2 нуқталарга мос келади. Демак, жараёнининг 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:

$$\frac{T_3}{T_1} = \frac{P_1}{P_3} = \gamma,$$

бундан

$$T_2 = \lambda T_3 \quad (272)$$

(271) даги T_2 қийматини (272) га қўйсак

$$T_3 = T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1} \quad (273)$$

ҳосил бўлади.

Изобарик жараён параметрлари 3—4 нуқталар ҳолатлари орқали ифодаланади, яъни

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{V_1}{V} = \rho \quad (274)$$

ёки

$$T_4 = \rho T_3$$

ёки T_3 қийматини юқорида келтирилган формуладан олиб (274) га қўйсак, қуйидаги ҳосил бўлади:

$$T_4 = \rho \lambda T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \quad (275)$$

Термодинамик системада иш бажармасдан қолган қолдиқ иссиқлик миқдори $P = \text{const}$ да совиткичга чиқари-

лади, унинг тенгламасини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{T_5}{T_6} = \frac{P_5}{P_6} = \lambda_p,$$

бундан

$$T_5 = \lambda_p T_6. \quad (276)$$

Системадан тўла чиқарилмасдан қолган иссиқлик миқдорининг қолдиқ қисми улушини $b-I$ нуқталарга мос келувчи ҳолатлар параметрлари орқали, жараён изобарик бўлганлиги учун, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{V_4}{V_1} = \varepsilon_v,$$

ёки

$$T_6 = \varepsilon_v T_1. \quad (277)$$

Юқоридаги тенгламалардаги T_6 қийматни (276) тенгламага қўйсақ, қуйидаги ҳосил бўлади:

$$T = \lambda_p \varepsilon_v T, \quad (278)$$

Циклнинг маълум нуқталарига мос келувчи (271), (272) ва (275) тенгламалардан фойдаланиб, иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_v(T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1} - T_1 \varepsilon^{\kappa-1}) + C_p(\rho \lambda T_1 \varepsilon^{\kappa-1} - T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1}) = \\ &= C_v T_1 \varepsilon^{\kappa-1} (\lambda - 1) + C_p T_1 \lambda \varepsilon^{\kappa-1} (\rho - 1) = \\ &= T_1 \varepsilon^{\kappa-1} [C_v (\lambda - 1) + C_p \lambda (\rho - 1)]. \end{aligned} \quad (279)$$

Маълумки, $\kappa = \frac{C_p}{C_v}$ бўлганлиги асосида (279) ни қайта ёзамиз:

$$q_1 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} C_v [(\lambda - 1) + \kappa \lambda (\rho - 1)]. \quad (280)$$

Худди шу услубда ташқарига, яъни совиткичга чиқарилган иссиқлик миқдорини топамиз, яъни

$$q_2 = C_v T_1 [\varepsilon_v (\lambda_p - 1) + \kappa (\varepsilon_v - 1)]. \quad (281)$$

Циклга келтирилган q ва ундан совиткичга чиқарилган q_2 иссиқлик миқдорларини топишнинг аҳамияти шундан иборатки, улар ёрдамида циклнинг термик фойдали иш коэффициентини ва бажарган ишини аниқлаш мумкин.

Маълумки, циклниң ФИК термодинамиканиң иккинчи қонуви ифодасидан аниқланади, яъни

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Бу ифодадаги иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ўрнига юқорида қараб чиқилган умумлашган цикл учун топилган қийматларни қўйиб, ҳосил қиламиз:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{C_v(\rho-1) - \kappa(\varepsilon_v-1)}{(\gamma-1) + \kappa(\rho-1)}. \quad (282)$$

Умумлашган циклниң бажарган иши q_1 ва q_2 айирмасидан топилади:

$$A = q_1 - q_2 = C_v T_1 \varepsilon^{\kappa-1} [(\lambda-1) + \kappa(\rho-1) - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon^{\kappa-1}} (\lambda\rho-1) - \frac{\kappa}{\varepsilon^{\kappa-1}} (\varepsilon_v-1)] \quad (283)$$

ёки

$$A = \eta_t q_1 = \eta_t C_v T_1 \varepsilon^{\kappa-1} [(\lambda-1) + \kappa(\rho-1)] \quad (284)$$

Юқорида келтирилган умумлашган цикл тенгламаларини аниқ циклга татбиқ этиб, шу ўрганилаётган циклдаги η_t ва A ни аниқлаш мумкин бўлади.

ГТҚ циклдаги термодинамик жараёнлар учун худди шундай тенгламаларни тузиб, уларни ишлаб, содалаш тирилиб иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни аниқлаб, ула асосида ГТҚ нинг ФИК аниқланади:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\lambda-1} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \quad (285)$$

бунда $\lambda = P_2/P_1$ — босимнинг ортиш даражаси;

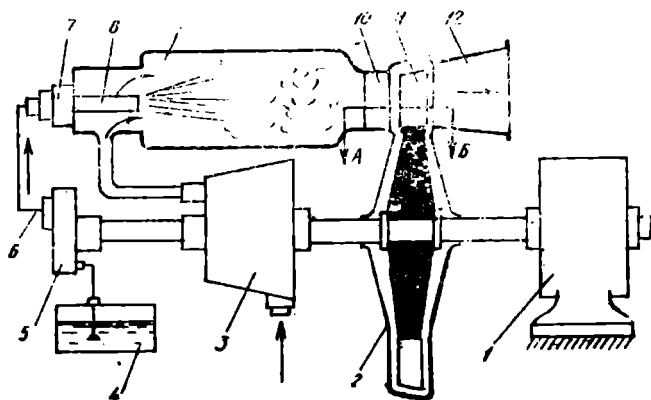
$$\varepsilon = \frac{V_2}{V_1} = P_2/P_1 = \frac{V_1}{V_2} - \text{сиқиш даражаси.}$$

Демак, юқорида келтирилган ГТҚ си циклниң П диаграммасидан кўриниб турибдики, унинг термик ФИК атмосфера ҳавосининг компрессорда сиқилиш даражасига ва ёниш камерасидаги иш моддасининг ёниш маҳсули ҳосил қилган босимнинг ортиш даражасига боғлиқ бўлар экан.

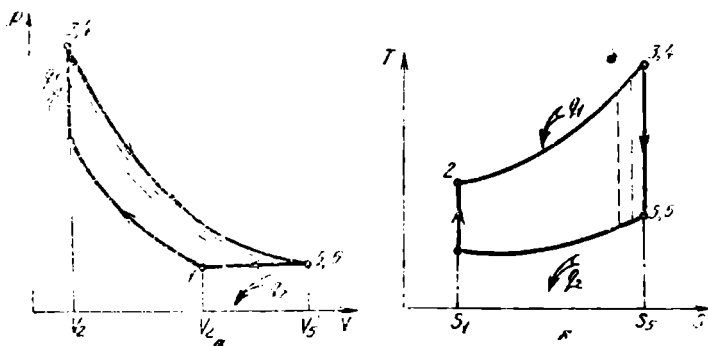
9.3. Иссиқлик $P = \text{const}$ да узатиладиган газ турбинаси қурилмаси (ГТҚ)

Газ турбинаси қурилмаси циклида иш ёқилгани ўзгармас босим остида ёқилганда циклга ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмайди. Бундай турдаги циклда ёниш камерасидаги юқори температурали сиқилган ҳавога ёқилган форсунка ёрдамида пуркалади. Ёниш $P = \text{const}$ остида кечадиган ГТҚ циклдаги термодинамик жараёнларнинг PV диаграммаси иккита адиабата (1—2 ва 3—4 нуқталар оралиқлари) дан иборат (60-расм). Диаграммадан кўриниб турибдики, ГТҚ нинг термик ФИК ни бир хил қийматда сақлаш учун албатта ёниш камерасидаги босим ўзгармас бўлишини таъминлаш керак. Бунинг амалга ошириш учун, биринчидан, компрессордан узатиладиган сиқилган ҳавонинг термодинамик параметрлари ва миқдори бир хил сақланади; иккинчидан, ёқилган насоси узатадиган ёқилган миқдори ҳам ҳаво миқдорига мос равишда ростланади.

Демак, бир хил миқдордаги ёниш маҳсули оқимининг босими турбина куракларига таъсир этади ва буровчи моментини юзага келтиради, яъни иссиқлик энергиясининг механик энергияга айланиш самарадорлигига эришилади.



60-расм. Ёқилгани ўзгармас ҳажмда ($V = \text{const}$) ёқадиган турбина қурилмасининг схемаси: 1 — электр генератор; 2 — газ турбинаси; 3 — компрессор; 4 ва 5 — ёқилган баки ва насоси; 6 — ёқилган йўли; 7 ва 8 — ёқилган ва ҳаво клапанлари; 9 — ёниш камераси; 10 — йўналтирувчи аппарат; 11 — иш кураклари; 12 — сопло; 13 — чиқариш клапани; 14 — ўт олдириш свечаси.



61-расм. Ғқилғи $P = \text{const}$ бўлганда ёнадиған ГТҚ циклидағи термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

Мазкур қараб чиқилаётган циклниң PV ва TS диаграммаларидан кўриниб турибдики (61-расм), иш жисми аввал компрессорда адиабатик сиқилади (шу жараён ёқилғи насосида ҳам ёодир бўлади), сўнгра унга q_1 иссиқлик миқдори келтирилади. Шу иссиқлик миқдорини келтиришда ёниш камерасидағи босим ($P = \text{const}$) сақланади. Кирилган иссиқлик иш ички энергияси ҳисобига пайдо бўлади, яъни компрессорда сиқилган ҳаво қизиб, унинг температураси ёқилғининг ёниш температурасидан катта бўлади. Сиқилган юқори температурали ва босимли ҳавога ёқилғи пуркалганда кучли кимёвий реакция содир бўлади, яъни у ёнади. Бунда ёниш ўзгармас босим остида юз беради. Шундан сўнғ ҳосил бўлган ёниш маҳсули адиабатик кенгайиб (3—4 нукталар оралиги, PV диаграмма) иш бажаради. Циклниң бажарган фойдали ишини диаграммалардан аниқласак, у 1—2—3—4—1 нукталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Бу адиабатик кенгайиш даврида иш жисми ташқи муҳит билан иссиқлик алмашмайди деб, фараз қилинади.

Ишга айланмасдан қолган қолдиқ иссиқлик миқдори q_2 афроф-муҳитга чиқарилади.

Термодинамик циклда ёқилғи $P = \text{const}$ ёнганлиги, яъни кирилганлигини ва қолдиқ иссиқлик q_2 совиткичга чиқарилганлиги ҳисобга олинса, босимнинг ортиш даражаси λ ҳамда пасайиш даражаси λ_p ўзаро тенг бўлади: $\lambda = \lambda_p = 1$, чунки PV диаграммада 2—3 ва 4—1

нуқталар оралиғида $P = \text{const}$ бўлади. q_1 циклга $P = \text{const}$ остида киритилса, иш моддаси энтропияси 2—3 ва 4—1 нуқталарда ўзгарувчан, қолган ҳолатларда $S = \text{const}$ бўлади.

Демак, ГТҚ си ($P = \text{const}$) циклининг термик ФИК асосан компрессорда атмосфера ҳавосининг сиқилиш даражасига, яъни система ички энергиясининг ўзгаришига боғлиқ бўлар экан. Шу сабабли умумлашган цикл учун ёзилган ФИК тенгламасини тўғридан-тўғри қўллаб бўлмайди, чунки $\lambda = \lambda_p = 1$.

Демак, ёқилган $P = \text{const}$ остида ёқиладиган цикл учун η_t ни қуйидагича ёза оламиз:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\varepsilon_v - 1}{\rho - 1} \quad (286)$$

Бу циклда дастлабки кенгайиш даражаси (ε_v) ва ҳажмининг камайиш даражаси (ρ) нисбатлари ўзаро боғлиқ бўлганлиги учун юқорида келтирилган тенгликни шу циклга татбиқ этиб ёза оламиз:

$$= \frac{V_3}{V_1} = \frac{V_1}{V_2}$$

Шунинг учун айрим ўзгартиришларни амалга оширамиз.

$$\varepsilon_v = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_3}{V_2} \left(\frac{P_3}{P_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \cdot \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} \left(\frac{P_1}{P_2} \cdot \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \frac{V_3}{V_1} \cdot \frac{V_2}{V_1}$$

бунда

$$\frac{V_3}{V_1} = \rho; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\varepsilon}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \varepsilon; \quad \frac{P_3}{P_2} = \lambda = 1;$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} = \varepsilon^{\kappa} \text{ тенглиги асосида}$$

$$\varepsilon_v = \rho. \quad (287)$$

ёзамиз.

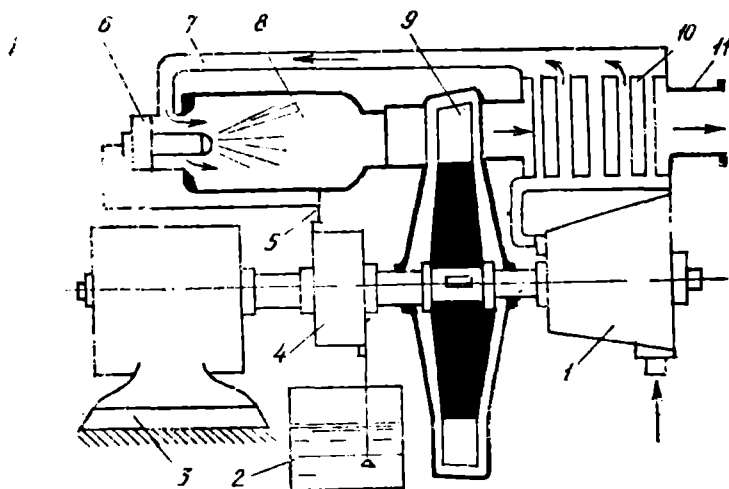
Юқорида келтирилган тенгликларни эътиборга олиб, термик ФИК тенгламасини қуйидагича ифodalаш мумкин:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}}. \quad (288)$$

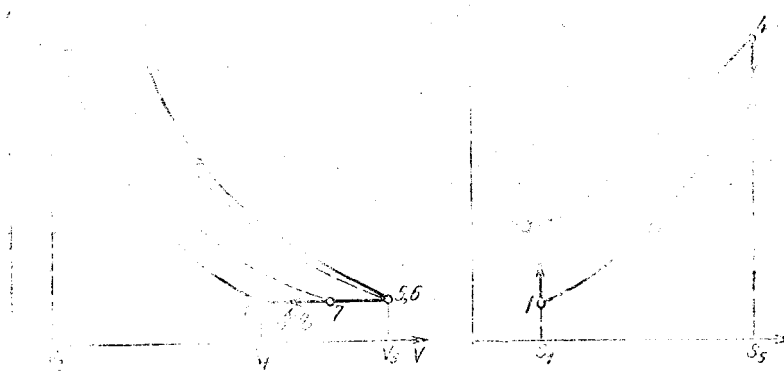
Ҳақиқатан ҳам ГТҚ циклининг η_t катталиги ҳавони компрессорда сиқилиш даражаси ε га боғлиқ бўлар экан.

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 ФИК 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 трубаси; 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 жараёнларни 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 берилмаси ҳам ёқилғи ёнади.

Амалда компрессорга сўрилган ҳаво унда сиқилиши 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 тораёниши ҳисобига зарралар тезлигининг ортиб кетиши натижасида зарралар кинетик энергияси катталашади, яъни зарралар импульси ортади. Катта импульсли тутун газлари газ турбинаси кураклари билан таъсирлашиб

адиабатик кенгайди ва ўзининг иссиқлик энергиясини роторнинг механик энергиясига айлантиради. Ротор валидаги бу механик энергия истеъмолчи—электр генераторига узатилади ва у ерда электр энергиясига айланади.

Демак, адиабатик кенгайган тутун газлари фойдали иш бажаради. Турбина курақлари билан таъсирлашиб ўтган ёниш маҳсули (тутун газлари) регенерация бўлмаси қовургалари орасидан ўтиш жараёнида компрессордан узатилаётган атмосфера ҳавосини қўшимча иситиб, ўзи совиткичга чиқарилади. Цикл такрорланади (62-расм).

Бундай ГТҚ цикли бажарган фойдали ишининг катталиги 1—2—3—6—1 нуқталар билан чегараланган юзга сои қиймати жиҳатидан тенг. Регенерация услубига эга бўлган циклининг бажарган иши ёқилган $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ да ёнган оддий цикллариникига нисбатан катта бўлар экан. Бунга асосий сабаб регенерация услуби билан қўшимча иссиқлик миқдорини иш моддасига киритилишидир.

Регенерация бўлмасида тутун газларидаги иссиқлик тўлиқлигича компрессордан ҳайдалган ҳавога узатилмайди. Агарда шу ҳавога жами иссиқлик регенерация йўли билан ўтказилса, яъни тўлиқ регенерация ўринли бўлса, $T_7 = T_2$ ва $T_5 = T_8$ бўлади (узлуқли чизиқлар изотермани ифодалайди). Шунинг учун $T_5 - T_7 = T_8 - T_2$ бўлади (TS диаграммага қаранг).

Демак, ёниш камерасидаги иш жисмига регенерация йўли билан келтирилган иссиқлик миқдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_1 = C_p(T_4 - T_8) \quad (289)$$

Совиткичга чиқарилган иссиқлик миқдори

$$q_2 = C_p(T_7 - T_1) \quad \text{бўлади.}$$

Ушунинг билан регенерацияли циклининг термик ФИК қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_7 - T_1}{T_4 - T_8} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_5} \quad (290)$$

Маълумки, $T_2 = T_1 \epsilon^{\kappa-1}$; $T_3 = T_1 \lambda \cdot \rho \epsilon^{\kappa-1}$; $T_4 = T_1 \lambda \cdot \rho \epsilon_v$ ва $\lambda \cdot \rho = \lambda = 1$; $\epsilon_v = \rho$ бўлганлиги асосида (290) тенгликни қуйидагича ёза оламиз:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\rho} = 1 - \frac{T_1}{T_5} \quad (291)$$

Юқоридаги η_r 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 бўлмасида ҳаво T_8 гача қиздирилиш даврида у T_7 гача совийди. Шунинг учун регенерацияли циклнинг термик ФИК 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 термик ФИК 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:

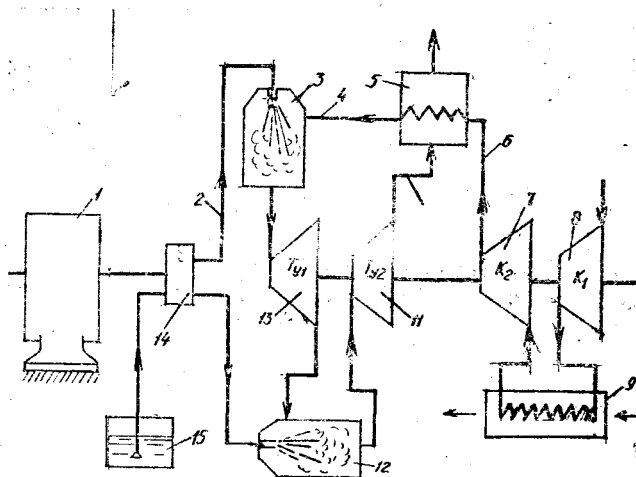
$$q_2 = C_p[T_3 - T_1 - \sigma(T_8 - T_2)].$$

Демак, унда регенерацияли циклнинг ФИК.

$$\eta_r = 1 - \frac{q_2}{q_1} = i - \frac{T_3 - T_1 - \delta(T_8 - T_2)}{T_4 - T_2 - \delta(T_8 - T_2)} \quad (293)$$

9.5. Иссиқлик $P = \text{const}$ да циклга келтириладиган босқичли сиқиш, ёниш ва регенерацияли ГТҚ

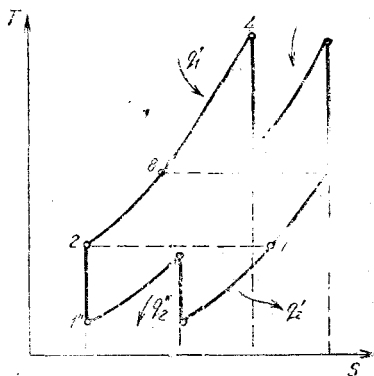
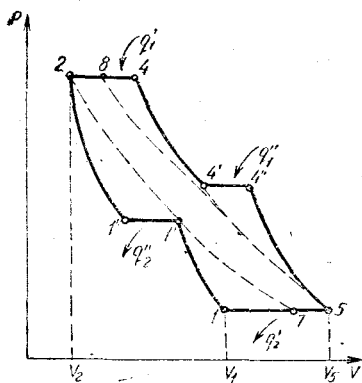
Иш жисмига иссиқлик $P = \text{const}$ остида берилганда, ҳаво босқичма-босқич сиқиладиган ва босқичли регенерация қўлланилган ГТҚ ёқилғи 2, сиқилган ва қиздирилган ҳаво 4 ва 6, ёниш маҳсули 10, трубалар, бирламчи ва иккиламчи ёниш камералари 3 ва 12, компрессорлар 7 ва 8, турбиналар 13 ва 11 ҳамда регенерация ва совиткич бўлмалари 5 ва 9, электр генератор 1, мой идиши 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-



64

риқлиги $P = \text{const}$ бўлганда кир...
 $P = \text{const}$ остида кир...
 ган атом...
 орални...
 моддасига узатилади (65-расм, PV диаграммалаги 1 ва 2 нукталар оралиғи).

Термо... атмосфера



65-расм. Исерилик $P = \text{const}$ бўлганда никкага узатиладиган босқичлик...
 св... генерацияли ГТҚ циклининг PV ва TS диаграммалари.

ҳавоси компрессорнинг биринчи босқичида сиқилади (1 ва 1' нуқталар оралиғи), сўнгра совиткичда совитилади (1' ва 1'' нуқталар оралиғи). Совиткичдан чиққан ҳаво иккинчи компрессорда яна сиқилади (1'' ва 2 нуқталар оралиғи), сўнгра регенератор бўлмасида қўшимча иситилган ҳаво ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилади (2 ва 8 нуқталар оралиғи). Ёниш камерасига узатилган сиқилган ва қиздирилган ҳаво температураси ёқилгининг ёниш температурасидан юқори бўлганлиги сабабли унга пуркалган ёқилғи бирданга портлаб ёнади. Бу ёниш маҳсулининг температураси $P = \text{const}$ остида ортади (8 ва 4 нуқталар оралиғи). Бу ерда ёниш камерасидаги иш моддасига ташқаридан q_1 иссиқлик миқдори киритилмайди. q_1 иссиқлик компрессорда сиқилган ҳаво ички энергиясининг ортиши 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 оралиғи). Ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилган қиздирилган ҳаво ва ёқилғи тўла 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 мақсадига 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 оралиғида 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 оралиғи). Ёниш маҳсулоти газла-

ридаги қолдиқ иссиқлик энергиясининг маълум қисми ёниш камерасининг биринчи босқичига узатилаётган атмосфера ҳавосига регенерация усули билан узатилади (5 ва 7 нукталар 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 $4-4'$, $4''-5$ нукталар оралиғи), иккитадан изобарик сиқилиш ва кенгайиш ($1'-1''$, $5-1$ ва $2-4$, $4'-4''$ нукталар оралиғи) дан иборат экан.

Циклнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, система ҳолати унинг ички энергияси ҳисобига ўзгарганда ҳолат параметрларидан V , P , T ўзгарувчан бўлади. Иш моддаси (система) нинг абсолют температураси ва энтропияси иссиқлик келтирилганда ёки чиқарилганда, мазкур ГТҚ циклида ўзгарувчан бўлади.

Ёқилғи босқичли ёнадиган, ҳаво босқичли сиқиладиган ва совитиладиган, регенерацияли иссиқлик алмашинувиға эга бўлган ҳамда q_1 ўзгармас босим остида циклга киритиладиган ГТҚ циклининг бажарган иши юқориди қараб чиқилган ($V = \text{const}$, $P = \text{const}$) циклларникига нисбатан юқори бўлади. Бунга асосий сабаб ёнилғининг тўла ёниши ва иссиқликнинг кам исроф бўлишидир. Циклнинг $4-4'-4''$ ва $1-1'-1''$ қисмлари (TS диаграммада) ўзаро ўхшашлиги, яъни кенгайиши ва сиқилишдан иборат бўлганлиги асосида q_1 ва q_2 ифодасини ёзамиз:

$$q_1 = T_2 \Delta S_{8-4''} ; q_2 = T_1 \Delta S_{7-1''}$$

Циклнинг диаграммаларидан кўриниб турибдики, $7-1''$ ва $8-4''$ нукталар оралиғидаги жараёнлар бир хил бўлиб, йўналишлари қарама-қарши бўлганлиги учун улардаги энтропиянинг ўзгарувчанлиги тенг қийматли бўлади. Шу сабабли $\Delta S_{8-4''} = \Delta S_{7-1''}$ бўлади. Унда η_t ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (294)$$

Демак, циклнинг ФИК Карно циклиникига яқинлашиб боради, яъни юқори бўлади. Умумлашган цикл тенгламаларидан фойдаланиб ва $\lambda = 1$ асосида қуйидагини ёзамиз:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (295)$$

9.6. ГТҚ нинг татбиқи

Охирги 24—30 йил мобайнида ГТҚ хусусан транспорт ва энергетикада кенг қўлланила бошланди. Энергетикада қўлланиладиган ГТҚ лари асосан узлуқли, электр энергияси етишмасдан қолганда вақт-вақти билан, энергетик системада бузилишлар, авариялар бўлган даврда истеъмолчиларни электр энергиясига бўлган талабини қондириш мақсадида ишлатилади. Бундай энергетик ГТҚ лари қуввати 1—100 МВт оралиғида бўлиб, йил мобайнида 1500 соатдан ортиқ ишлатилмайди.

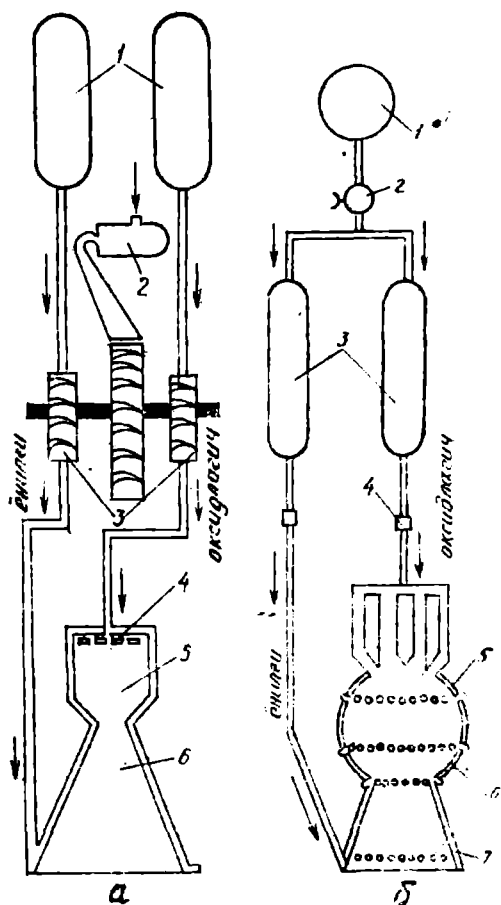
Денгиз кемаларидаги энергетик ГТҚ асосий энергия манбаи ҳисобланади ва уларнинг қуввати 30 кВт дан 10 МВт гача бўлади. Кимёвий, нефтни қайта ишлаш, металлургия, атом энергетикаси ва ш. к. ишлаб чиқариш соҳаларида кенг қўлланилади. Нефтни ҳайдашда, газ магистралли трубаларида, турли хил компрессорларни ишлатишда ГТҚ лари асосий механик энергия манбаи ҳисобланади. ГТҚ авиация транспортидаги турбореактив, турбовинтли реактив самолётларнинг асосий ва форсаж (франц *forcer* — жадаллаштирмақ) двигателларида ҳамда денгиз кемаларида ҳам, темир йўл транспортидаги локомотив (лот. *locomotivo* — жойидан қўзғатаман) ларда ҳам кенг татбиқ этилган.

Замонавий турбореактив, турбовинтли реактив самолётларни, узоқ елфарда бўладиган денгиз кемаларини, темир йўл транспортини катта қувватдаги газ турбиналарисиз тасаввур этиш қийин. Чунки йилдан йилга бу транспорт воситаларида қўлланиладиган двигателларнинг қуввати ошиб бормоқда. Дизель ва карбюраторли двигателлар ГТҚ ларидай содда бўлмасдан катта қувватлар олиниши керак бўлганда уларнинг ўлчамлари ортиб кетади. Шунинг учун келажакда, катта қувватлар олинадиган газ турбиналаринигина эмас, паст қувватлилари ҳам ишлаб чиқарилади.

Х 606. РЕАКТИВ ДВИГАТЕЛЛАР

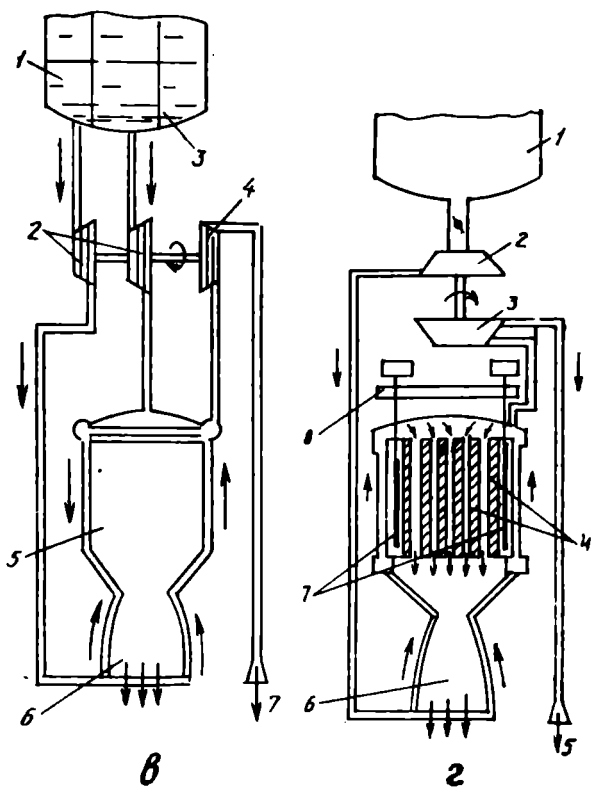
10.1. Реактив двигателларнинг таснифи, турлари, тузилиши, ишлаш тартиби

Ичидан катта тезликда заррачлар оқими учиб чиқishi ҳисобига тортиш кучи ҳосил қила оладиган иссиқлик машинаси реактив двигатель дейилади. Иссиқ-



66-расм. Ракета двигателлари: а—ёқилгини турбонасос ёрдами-узатадиган суюқликли двигатель; 1—ёқилги баки, 2—газ генератори, 3—турбонасос агрегати, 4—форсункалар, 5—ёпиш камераси, 6—сопло; б—ёқилгини сиқиб чиқариш усули билан узатадиган суюқликли двигателлар; 1—суюқ газ балони, 2—редуктор, 3—ёнилги баклари, 4—клапанлар, 5—ёпиш камераси, 6—ички совитиш ёқилги узатиш ҳалқаси, 7—сопло.

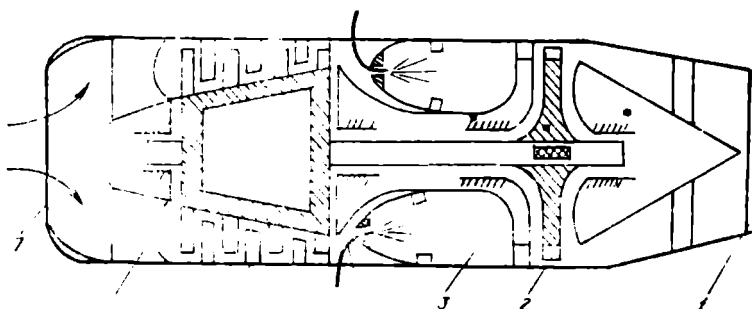
лик, кимёвий, ядро, электр, қуёш энергияларининг таъсири натижасида иш жисми оқимининг кинетик энергияси пайдо бўлади.



66-расм. Дивони. *a* — кимёвий ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ оксидловчи бак, 2 — насослар, 3 — суюқ ёқилги баки, 4 — турбина, 5 — ёпиш камераси, 6 — сопло, 7 — турбиналарни ҳайдаш канали; *б* — ядро ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ водород, 2 — насос, 3 — турбина, 4 — иссиқлик ажратувчи элементлар, 5 — турбинанинг ҳайдаш каналли, 6 — сопло, 7 — бошқариш стерженлари, 8 — химоя экранли.

Реактив двигателларда атмосфера ҳавосининг ишлатилишига кўра, улар икки хил бўлади: атмосфера ҳавосидаги кислороддан оксидловчи сифатида фойдаландиган 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 (тўғри оқимли ва пульсацияли) двигателларга бўлинади.

Ракета двигателлари қаттиқ, суюқ ёқилғили ва кимёвий ҳамда ядро ракета двигателларига бўлинади (66-расм.)

Реактив двигателларнинг асосий кўрсаткичи бу тортиш кучидир. Тортиш кучи ёниш маҳсулининг соплода 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, соплло 18 дан ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган (67-расм). Ҳаво компрессори билан газ турбинаси бир валга маҳкамланган.

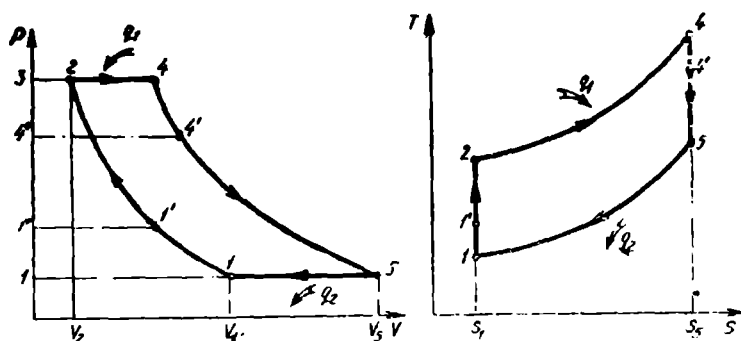
Атмосфера ҳавоси диффузор 7 орқали турбокомпрессор 5 га узатилади, унда ҳаво сиқилади. Шу сиқилган босим остидаги ҳаво турбокомпрессорнинг ҳайдаш труба-си орқали ёниш камераси 3 га ўтади, шу вақтнинг ўзида ёқилғи насосидан ҳайдалган ёқилғи ҳам труба 4 орқали камерага форсункалар ёрдамида пуркалади. Шунда 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 турбокомпрес-

сор ҳам айланиб янги ҳаво оқимини сиқади. Турбина кураклари билан таъсирлашиб ўтган ёниш маҳсулоти қисман адиабатик кенгайди (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 двигатель циклидаги термодинамик жараёнлар

Бу жараёнларни қараб чиқамиз. Атмосфера ҳавоси диффузор 7 га оқиб киришидан бошлаб аввал турбокомпрессоргача бўлган оралиқда, сўнгра компрессорда адиабатик сиқилади (68-расм, PV диаграммадаги $1-1'-2$ нуқталар оралиғи), яъни ҳаво ўзининг ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига қизийди. Сиқилиш-



68-расм. Турбореактив двигатель циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

дан қизиган ҳаво температураси ёқилғининг ёниш температурасидан юқори бўлади. Айнаи 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). Узгармас 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:

$$A = \frac{P_2 V_2}{\kappa - 1} (\rho - 1) \kappa \eta_i;$$

$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\rho^{\frac{1}{\kappa - 1}}} \quad (296)$$

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 турбиначига ҳожат қолмайди.

Бундай компрессорсиз реактив двигателлар ҳаво-реактив двигателлари (ҲРД) га мансуб бўлиб, улар икки хил, яъни тўғри оқимли ва пульсация (тепки) ли бўлади.

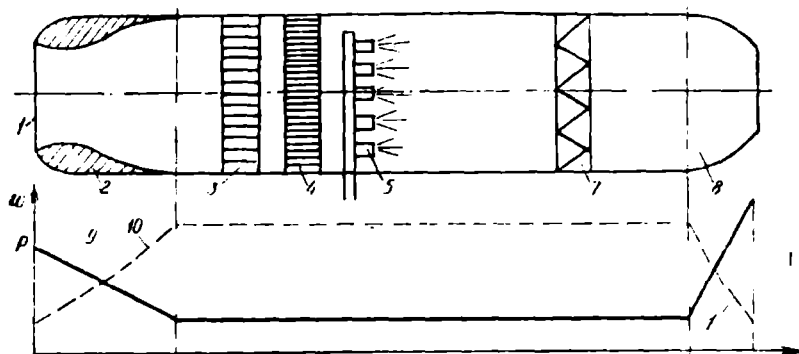
10.3. Тўғри оқимли ҲРД ва уларнинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар

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).

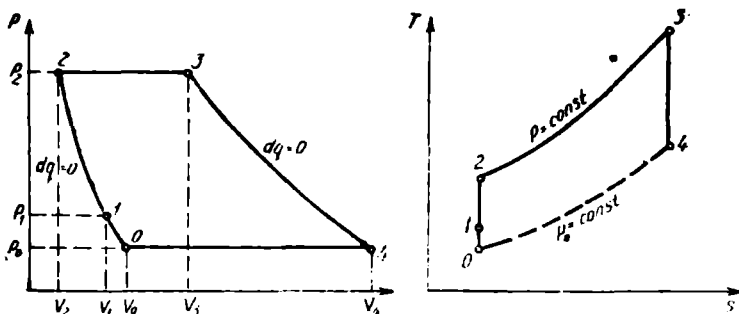
ҲРДларнинг айрим конструкцияларида стабилизатор сопло билан ёниш камераси чегарасида жойлаштирилади.

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 тезлигига уча оладиган тўғри оқимли ҲРДнинг схематик тасвири.



70-расм. Тўғри оқимли ҲРД циклининг PV ва TS диаграммалари.

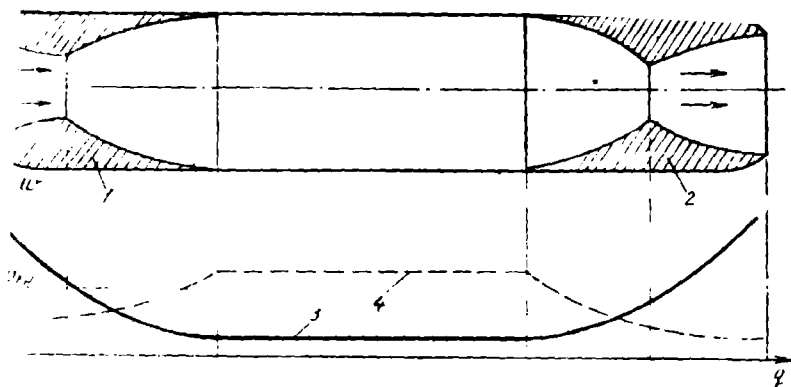
боришни таъминлаш мақсадида сиқилган ҳаво уюрмалли оқим ҳосил қилувчи панжаралардан ўтказилиб, ёниш камерасига ўзгармас ($P = \text{const}$) босимда узатилади. Бу қизиган ҳавога ёқилғи форсункалар 5 орқали пуркалади. Шунда кимёвий реакция жадал боради. Ёниш маҳсулотининг температураси ортади, лекин босим $P = \text{const}$ сақланади (2—3 нуқталар оралиғи), яъни жараён изобарик бўлади (70-расм).

Ёниш маҳсулоти турғунловчи 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.

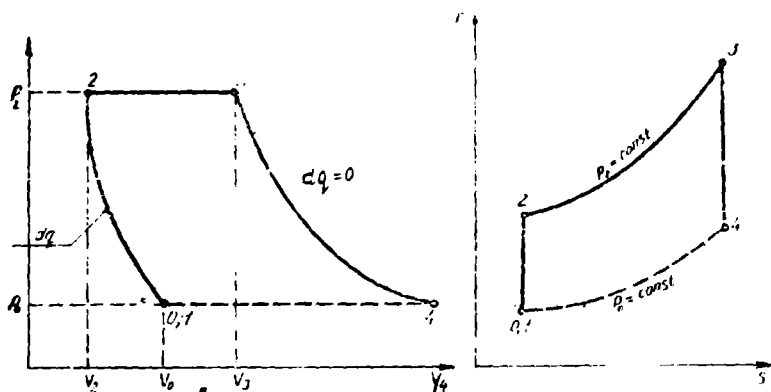
Циклнинг бажарган иши 0—1—2—3—4—0 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Шу тўғри оқимли ҲРД нинг циклида бажарилган ишни компрессорли турбореактив двигателники билан таққосланса ҲРД нинг бажарган иши каттароқ бўлади. ҲРД конструкцияси жиҳатидан анча содда ва унга кам металл сарфланади.

Товуш тезлигидан юқори бўлган тезликларда учадиган аппаратлар двигателларининг диффузори ва соп-



71-расм. Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҳаво реактив двигателнинг схематик тасвири.

лосн ўзига хос геометрик шаклда бўлади. Чунки, диффузорга 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 энергиясининг ортиши ҳисобига таъминлайди. Ёниш камерасида ёқилғи ва ҳаво аралашмаси $P = \text{const}$ да ёқилади ва сақланади. Ёниш маҳсулотининг температураси соплогача текис ортиб боради. Соплода адиабатик кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш



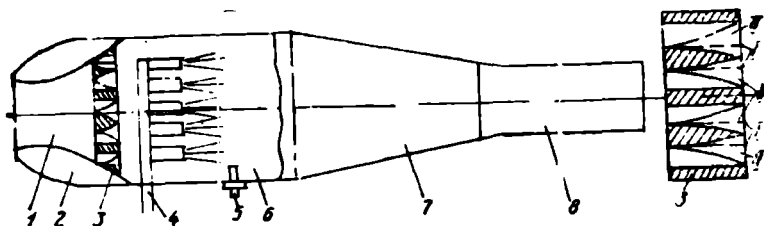
72-расм. Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҲРД циклининг PV ва TS диаграммалари

базаради. Товушдан тез уча оладиган тўғри оқимли ҲРД лар циклининг PV ва TS диаграммасидан маълумки, цикл иккита аднабата ва иккита изобарадан ташкил топган. Товушдан тез ҲРД лари циклида энтропиянинг ўзгарувчанлиги изобарик жараён ўринли бўлганда содир бўлади.

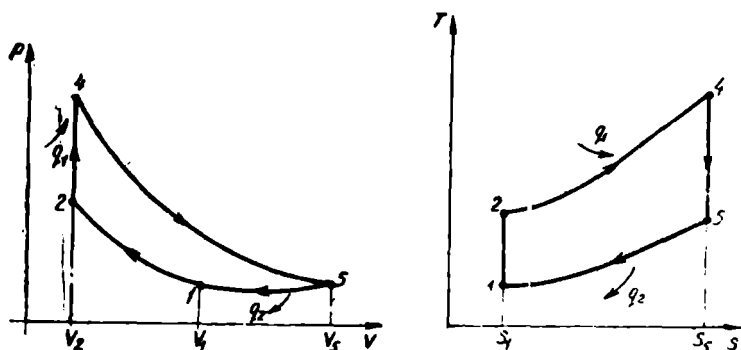
Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҲРД циклида бажарилган иш ва термик ФИК юқорида қараб чиқилган реактив двигателларникига ўхшаш.

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, конфузур 7 ва тутун газлари труба 8 дан ташкил топган (73-расм). ПҲРД циклида жараён қуйидагича кечади: диффузорда сиқилиб босими ва температураси ортган атмосфера ҳавоси, ёниш камерасига бир меъёрада узатиб турилмасдан, махсус клапанлар панжараси ёрдамида узлукли узатилади. Шунда ёниш камерасидаги ҳавога форсункалар орқали ёқилғини пуркалади ва ҳаво билан аралашиб иш моддаси ҳосил бўлади. Иш моддаси свеча контактлари орасида ҳосил бўлган электр учқун, 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 конфузур чегарасидаги тўсиқ очилиб, ёпилиб туради. Ёниш маҳсулоти конфузур ва тутун газлари трубадан 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.

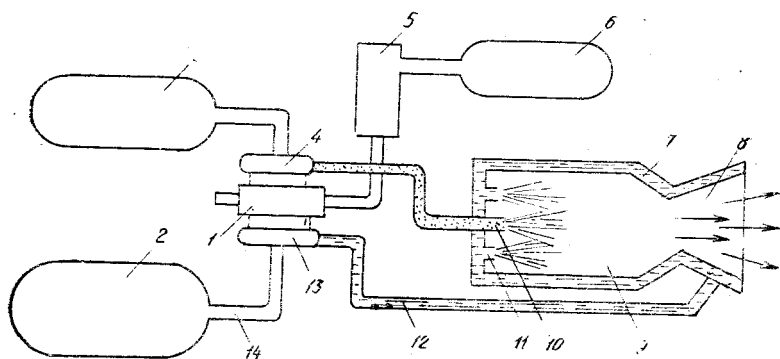
дики, цикл иккита адиабата, биттадан изохора ва изобарадан ташкил топган (74-расм).

ПХРД нинг диффузорига оқиб кирган ҳаво аввал унинг олд қисмида, сўнгра суғрилагичда 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 трубасида 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 такрорланади.

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)

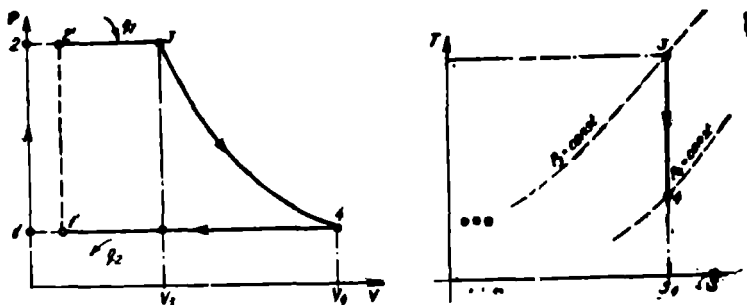


75-расм. Сууюқ ёқилғида ишлайдиган РДнинг схематик тасвири.

дан бири 75-расмда тасвирланган. Ракета двигателларида атмосфера ҳавосидан оксидловчи сифатида фойдаланилмайди. Реактив куч иш моддаси (ёниш маҳсулоти, зарралар) оқимининг ортиб бориши ҳисобига пайдо бўлади. Иш жисмининг турига кўра РДлар кимёвий, электр, қаттиқ, қаттиқ ҳам сууюқ ёқилғида, лазер, фотон билан ишлайдиган хиллари бўлади. Сууюқ ва қаттиқ ёқилғида ишлайдиган РДлар кўпроқ тарқалган. РД ларнинг ўлчами бир неча сантиметрдан бир неча ўн метрга, массаси эса бир неча ўн граммдан 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 жараёнлариккита изобара ва битта адиабатадан иборат. Чунки ёниш камерасига узатилган иш ёқилғиси ҳажми унинг ёниш маҳсулоти ҳажмига тенг. Шунинг учун иш ёқилғисининг сиқишга сарфланган иши эътиборга олинмайди (сууюқ ёқилғи сиқилмайди, оксидловчи идишда сиқил-



76-расм. РД 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 ўзгартиради, сўнг соплга 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). РД циклининг бажарган иши асосан ёниш маҳсулининг адиабатик кенгайишида унинг энтальпиясининг ўзгаришига тенг бўлади, яъни

$$A_{\text{и}} = i_3 - i_4 \quad (297)$$

$$\text{РД циклининг ФИК } \eta_{\text{и}} = \frac{A_{\text{и}}}{q_1} = \frac{i_3 - i_1}{q_1}.$$

Иш ёқилғисига узатилган q_1 иссиқлик миқдори ёниш маҳсули ($P = \text{const}$ да) энтальпиясининг (2—3 нуқталар орлиғи, PV — диаграмма) ўзгаришига тенг, яъни $i_3 - i_2 = \Delta i$.

$$\text{Унда } \eta_{\text{и}} = (i_3 - i_1) (i_3 - i_2). \quad (298)$$

Шундай қилиб, РД циклининг термик ФИК иш моддаси энтальпиялари ўзгаришларининг нисбатига боғлиқ экан. Лекин газнинг соплдан оқиб чиқишидаги кинетик энергияси билан боғлиқлиги эътиборга олинса, бажарилган ишни $A = mv^2$ кўринишида ифодалаш мумкин. Унда ФИК $\eta_{\text{и}}$ қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_{\text{и}} = \frac{v^2}{2T}. \quad (299)$$

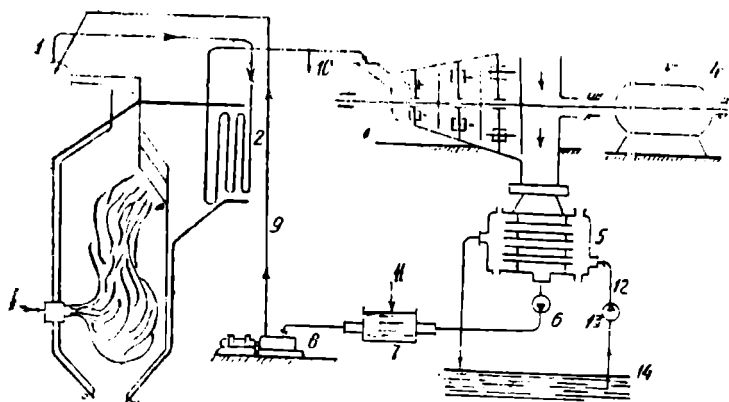
XI БЎБ. ИССИҚЛИК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРИ

Органик ёқилғи ёнганда ажрайдиган иссиқлик энергиясини ўзгартириш натижасида ҳам иссиқлик, ҳам электр энергияси ишлаб чиқарадиган ишбоот й с с и қ д 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; истеъмолчиға 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 чиқарилмайдиган 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 олинмайдиган 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 ўнта блокдан иборат бўлиб, улар 3000 МВт электр энергиясини ишлаб чиқаради. ГРЭС ҳозирги кунда жуда катта қувватли (1 ГВт дан ортиқ) ва электр ҳалқа-



77-расм. КЭСнинг схематик тасвири: 1 — қозон агрегати; 2 — буг қиздиргич; 3 — буг турбинаси; 4 — электр генератор; 5 — конденсат насоси; 7 — сув баки; 8 — сув насоси; 9 — сув трубалари; 10 — электр станциясидаги буг ва энергия исрофи; 11 — исроф бўлган сув ўрнини тўлдирувчи сув трубаси; 12 — конденсаторга узатиладиган совуқ сув трубаси; 13 — марказий насос; 14 — сув ҳавзаси.

сидаги электр станциялари билан биргаликда ишлайдиган КЭС дир.

ГРЭС лар буғининг босими критик босимдан (22 МПа) юқори бўлган босимларда ишлайди. Қуввати 250—300 МВт бўлган турбиналар критик босимдан юқори бўлган босимлар (24 МПа) да ишлайди. Буғнинг бошланғич босими 13—14 МПа, температураси $T=830\text{—}850$ К бўлади. Такомиллашган КЭС ларда буғнинг параметрлари $P=16\text{—}25$ МПа, $T=800\text{—}900$ К га етади.

КЭС лар (ГРЭС) асосан блокли бўлади, яъни буг генератори ва турбинаси электр генератори билан бирга энергия блоки деб юритилади (77- расм).

КЭС лар иссиқлик электр марказларига нисбатан анча содда ва иқтисодий жиҳатдан самаралидир. КЭС-нинг ўзига сарфланадиган (электр двигателларни, насосларни ва ш. к. ёрдамчи асбоб-ускуналарни юритишга) энергияни ҳисобга олмаганда брутто ФИК қуйндагича ифодаланади:

$$\eta_{бр} = \frac{W_3}{q_c} = \frac{W_3}{B \cdot q_{к,е}} \quad (300)$$

бунда W_0 — вақт бирлигида электр генератор ишлаб чиқарган энергия, кЖ; q_c — вақт бирлигида станция сарфлаган иссиқлик миқдори, кЖ; B — вақт бирлигидаг ёқилғи сарфи, кг; $q_{к.е}^e$ — ёқилғининг қуйи ёниш иссиқлиги кЖ/кг.

Амалда, электр энергияси кВт·соатларда ўлчаниш (1 кВт·соат=3600 кЖ) эътироф этилган ҳолда $\eta_{бр}$ н қуйидагича ифодалаш мумкин:

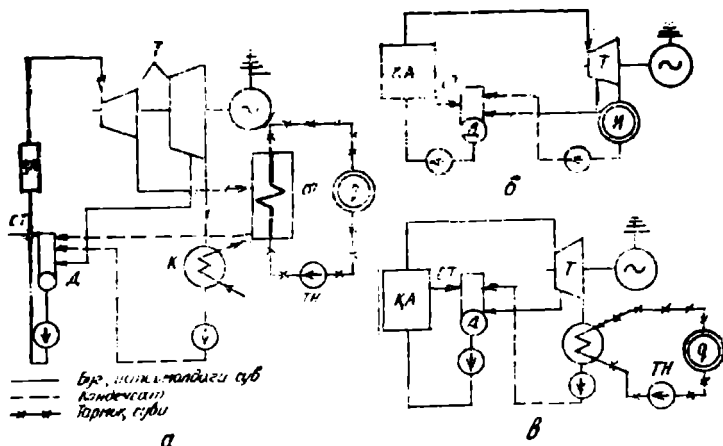
$$\eta_{бр} = \frac{3600}{q_c} \cdot W_0. \quad (301)$$

Замонавий КЭС ларнинг ФИК 30% атрофида бўлиб жуда кўп энергия конденсатордан совиткичга (дарё, ҳавуз, денгиз сувиغا) чиқарилади.

Айрим КЭС ларда исроф бўладиган иссиқликни регенерация бўлмасига ўтказиш билан ундан самарал фойдаланилади.

11.2. Иссиқлик электр маркази (ИЭМ)

Иссиқлик электр маркази бир вақтнинг ўзида ҳақиқий иссиқлик, ҳам электр энергияси ишлаб чиқарадиган



78-расм. ИЭМнинг схематик тасвири: а) тармоқдаги сувни иситиш учун турбина буғидан фойдаланадиган; б) қарама-қарши босимда турбина қўлланадиган; в) турбинани кучсиз вакуум ҳосил қилувчи КА — қозон агрегати; Т — буғ турбинasi; К — конденсатор; Д — деаэратор-иситкич; q — иссиқ сув истеъмолчиси; И — технологик буғ истеъмолчиси; ТН — тармоқ насоси; СТ — сув таъминоти; ~ — ўзгарувчан ток генератори.

станциялар бўлиб, улар катта саноат марказларида ва шаҳарларда қурилади. ИЭМ ларда ёқилладиган ёқилғи иссиқлигидан икки хил (иссиқлик ва электр) энергия ишлаб чиқариш йўли билан улардан самарали фойдаланилади. Буғ турбинасида иш бажариб бўлган буғдаги қолдиқ иссиқлик миқдоридан иссиқлик алмашилиш ёки маълум иссиқлик миқдорини қозон агрегатига қайтариш ҳамда регенерация усуллари орқали ундан тўлароқ фойдаланилади. Бу қолдиқ иссиқлик иситиш тармоқларида сув ва ҳавони иситишга сарфланади. Айрим ҳолларда конденсатордаги иссиқлик алмашилиш усули билан иситиш тармоқларидаги сувни қиздиришда фойдаланилади. Конденсаторда иссиқлик алмашинуви орқали қиздирилган сувнинг температураси 350—360 К га етади. Бундай ҳолатларда буғ турбинасида сезиларли даражада вакуум ҳосил бўлмайди. Иссиқ сувга ва буғга истеъмолчиларда талаб катта бўлганида конденсатор ишлатилмайди. Турли-туман иссиқлик алмашинуви асбоблари (сув иситкичлар, калориферлар, буғлаткичлар, автолав) конденсатор вазифасини бажаради ва ҳосил бўлган конденсат имконияти борича ИЭМ га қайтарилади. Бундай иссиқлик алмашинувининг қўлланилиши натижасида истеъмолчилардаги иссиқликка бўлган талабнинг 90% ИЭМ зиммасига тушади. Шунинг учун улар саноат марказлари ва аҳоли зич жойлашган минтақаларда қурилади.

Марказлаштирилган иссиқлик ва электр энергияси билан таъминлаш иссиқлик таъминоти (теплофикация) дейилади. ИЭС лар ишлаб чиқариладиган энергиянинг 30% дан ортигини беради.

Катта саноат ва металлургия марказларидаги умумий иссиқлик энергиясининг тақрибан 90% ини ИЭМ лар беради. ИЭМ нинг ФИК ишлаб чиқарилган электр ва иссиқлик энергиялари йиғиндисининг ёқилғи сарфини унинг қуйи ёниш иссиқлигига кўпайтмасига нисбати орқали ифодаланади:

$$\eta_i^{\text{ИЭМ}} = \frac{W_{\text{и.ч.}} + q_{\text{и.ч.}}}{B^e \cdot q_{\text{к.и.б.}}^e}, \quad (302)$$

бунда $W_{\text{и.ч.}}$ ва $q_{\text{и.ч.}}$ — ишлаб чиқарилган электр ва иссиқлик энергиялари миқдори, кЖ; B^e — ёқилғи сарфи, кг/с; $q_{\text{к.и.б.}}^e$ — ёқилғининг қуйи иссиқлик бериш хусусияти.

ИЭМ ишлаб чиқарган электр ва иссиқлик энергия-

ларига мос равишда унинг брутто η^b ва η^h қуйидагича
ифодаланади:

$$\eta^b = \frac{W_{н.ч.}^h}{B_3^h \cdot q_{к.н.б.}^e}; \quad \eta^h = \frac{W_{н.ч.}^h}{B_{ш}^h \cdot q_{к.н.б.}^e}. \quad (303)$$

бунда $w_{н.ч.}^h$ — йиллик ишлаб чиқарилган электр энергияси миқдори, кЖ; B_3^h ва $B_{ш}^h$ — йил давомида электр ва иссиқлик энергияларини ишлаб чиқаришга сарфланган ёқилғи миқдорлари; $B_3 = B - B_{и}$ иссиқлик электр маркази ишлатган йиллик ёқилғи миқдоридан иссиқлик ишлаб чиқаришга сарфланган қисмининг айирмаси бир йилда ишлаб чиқарилган электр энергияга сарфланган ёқилғи миқдорини беради. Бунда қозон агрегатига келтирилган ёқилғи ҳосил қилган иссиқлик тўлалигича фойдаланилади, деб фараз қилинади.

ИЭМ нини нетто ФИК ни аниқлашда, станцияни иссиқлик ва электр энергиялари билан таъминлаш учун зарур бўлган энергия ҳам ҳисобга олинади.

Замонавий ИЭМ лари 1 кВт·соат энергия ишлаб чиқаришга ~350 г ёқилғи сарфлайди. Шунинг учун ишлаб чиқариладиган 1 кВт·соат электр энергияси 0,6—1 тийин атрофида бўлган. 1 Гигажоул иссиқлик энергиясининг нархи ИЭМлар учун 0,5 сўмга тўғри келган (1990 й).*

Юқорида қараб чиқилган ИЭСларнинг жойлашувига қараб, шундай хулосага келинади. ИЭС лар мамлакатни электрлаштиришда ва иссиқлик таъминотини режалаштиришда, ёқилғидан тўғри фойдаланиб электр ва иссиқлик энергиялари ишлаб чиқаришда улар асосий манбалар бўлиб қолади.

Атроф-муҳитни ҳимоялашда ИЭСлар чиқиндилари табиатга маълум даражада зарар ҳам келтиради. Тутун газлари таркибидаги заҳарли кимёвий бирикмалар атмосфера ҳавосини ифлослантиради. Шунинг учун ҳам ёқилғидан тўғри фойдаланиш талаби кун сайин ортиб бормоқда. Тежамли, экологик жиҳатдан нисбатан тоза, такомиллашган қурилмалар лойиҳаланиб қурилмоқда.

11.3. Магнитогидродинамик (МГД) генератор

МГД генератор иссиқлик энергиясини бевосита (айланувчи қисмларсиз тўғридан тўғри) электр энергияси-

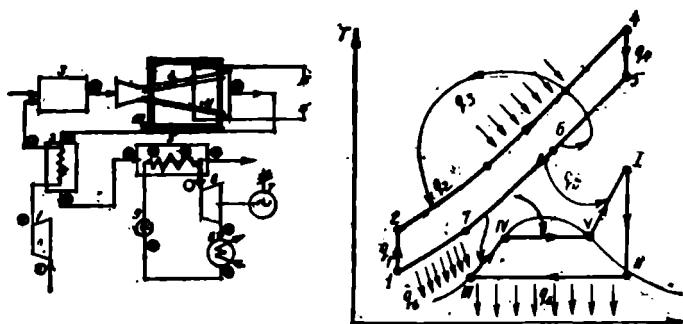
* 1990 йилгача бўлган маълумот ва у ўзгариб туради.

га айлантйривчи қурилма. МГД генератор диффузор, сопло, электродлар, магнит майдони ҳосил қилувчи ташқи индуктив ғалтаклар ва иш жисми (электродит, суюқ металл, ионлашган газ оқими—плазма)дан ташкил топган. МГД генераторнинг ишлаш принципи иш жисмининг ўзгармас магнит майдони куч чизиқларига кўндаланг ҳаракатланиши натижасида плазма зарраларининг шу майдонда оғиши ва электродларга ўз зарядини бериши ҳисобига шу электродлар орасида потенциаллар айирмаси ҳосил бўлишига асосланган.

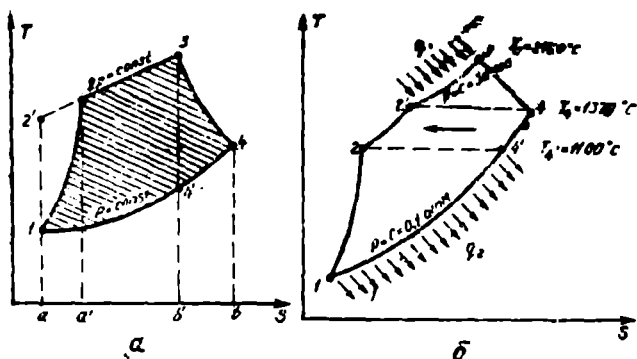
МГД генератордаги иссиқлик энергиясини тўғридан-тўғри электр энергиясига айлантйриш икки йўналишда: юқори температурали иш жисми иссиқлик энергиясини электр энергиясига (қозон қурилмаси, электр генератори ишлатмасдан) айлантйриш; иш жисмининг иссиқлик, кимёвий, ядро, термойдро, ёруғлик энергияларини физик қонунлар асосида электр энергиясига айлантйриш бўйича тадқиқ этилмоқда. Бундай усулларда электр энергияси ҳосил қилувчи асбоб-ускуналарга термпаралар, электродитли аккумуляторлар, бошқариладиган термойдро синтез реакциялари қурилмаси, фотоэлементлар, фотоқаршилиқлар, электрон лампалар, p ва n ўтказувчанликли ярим ўтказгичлар, қуёш батареяларини мисол қилиб олиш мумкин.

Иссиқлик энергиясини электр энергиясига машинасиз айлантйришда ҳамма ҳолатларда ҳам юқори температурали иссиқлик манбаи ва совиткич мавжуд бўлади.

Маълумки, машина ёрдамида электр энергиясини ҳосил қилишда ўзгармас магнит майдонида магнит куч



79-расм. МГД генератори қурилмасининг очик схемаси ва унда кечадиган термодинамик жараёнларнинг TS диаграммаси.



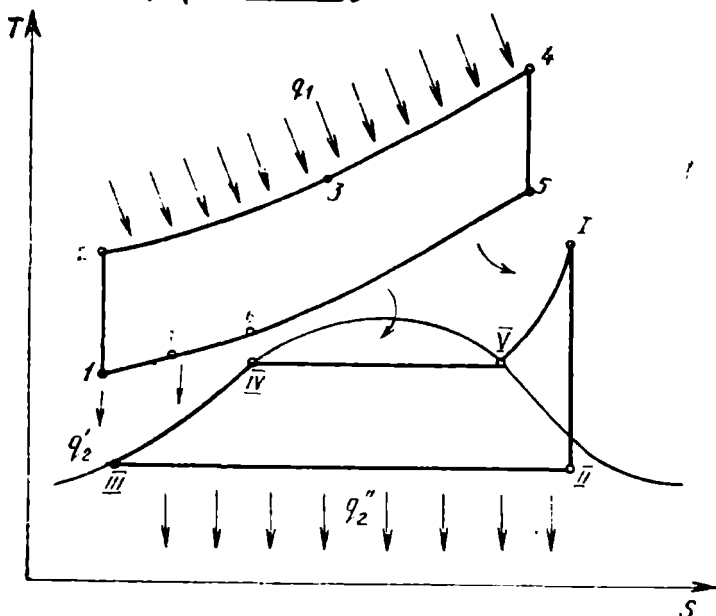
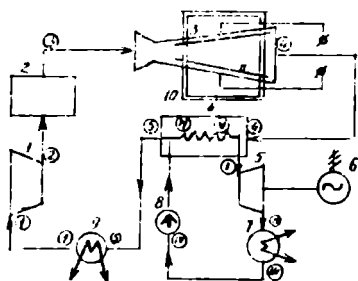
80-расм. Очiq (а) ва берк (б) схемали МГД — генератор қурилмаси реал цикллрининг TS диаграммалари.

чизиқларига перпендикуляр равишда индуктив ғалтак (ротор чулғамлари) айланма ҳаракатланади. Машинасиз электр токини ҳосил қилишда индуктив ғалтаги қўлланилмайди, унинг ўрнига тўғри оқимли иш моддаси (ионлашган газ-плазма) олинади. МГД генератор қурилмасида ишлатиладиган иш моддаси ва МГДГ нинг қурилишига кўра, улар очiq ва берк схемали бўлади (79—81-расмлар).

Очiq схемали МГД генератор ҳаво компрессори, иссиқлик алмаштиргич-регенератор 3, ёниш камераси 1, МГД генератор 2, буғ генератори 5, буғ турбинаси 6, конденсатор 7, конденсат насоси 8, электр генератори 9, электромагнит чулғамлари 12 ва бошқа ёрдамчи қисмлардан ташкил топган.

МГД генератор қурилмаси иш циклидаги термодинамик жараёнларни қараб чиқамиз. Компрессорга сўрилган атмосфера ҳавоси унда адиабатик сиқилади. Термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ компрессорда сиқилган ҳаво ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига унинг параметрлари V , P , T ўзгаради, чунки узатилган $dq=0$. Шунда ҳавонинг сиқилиши ҳисобига исиган ҳаво регенераторда яна ҳам қиздирилганидан сўнг ёниш камерасига узатилади. Қиздирилган ҳавога ёқилғи пуркалади ва кучли портлаб ёниш содир бўлади; ионлар оқимини ҳосил қилиш учун иш ёқилғиси 3000 К температурада махсус ёниш камерасида ёқилади; ёниш маҳсулотининг температураси 2000—2200 К га етади. Бу температурадаги ёниш маҳсулоти таркибида ионлашган

заррлар миқдори унча катта бўлмайди. Шунинг учун гоҳо ионлар миқдорини орттириш мақсадида унга осонроқ ионлашадиган қўшимчалар сифатида калий ёки цезий тузи (1—2%) қўшилади. Шунда юқори температура остидаги ёниш маҳсулоти жадалроқ ионлашади. Шундан кейин ионлашган оқим МГД генератори диффузо-



81-расм. Берк схемали МГД генератори қурилмаси ва унинг циклдаги термодинамик жараёнларнинг TS диаграммаси: 1 — компрессор; 2 — атом реактори; 3 — МГД генератор; 4 — буғ генератори; 5 — буғ турбинаси; 6 — электр генератори; 7 — конденсатор; 8 — конденсат (сув) насоси; 9 — совиткич; 10 — МГД генераторининг электромагнети; 11 — электродлар.

рига йўналтирилади. Унда ташқи магнит майдони таъсирида ионлашган газ оқими тезланиш олиб тезда адиабатик кенгайди. Шу кенгайиш жараёнида газ оқимида ҳосил бўлган индукцион ток электродлар орқали истеъмолчига узатилади. Ҳосил бўлган электр токининг қиймати плазма (юнонча — plasma — ясалган, шаклланган) оқимидаги зарралар сонига, уларнинг зарядига, тезлигига ва ташқи магнит майдони индукцияси катталигига боғлиқ бўлади.

МГД генератор каналида плазма оқимининг кенгайиши адиабатик бўлса-да, иш жисми кучли электр ўтказувчанлигига эгаллиги билан буғнинг кенгайишидан фарқланади. Плазманинг электр ўтказувчанлиги оқимидаги ионлар сони ортиши билан ортиб боради, масалан, $\alpha = 10^{-3}$ бўлганда электр ўтказувчанлик тўла ўтказувчанликнинг ярмига тенг бўлади ва $\alpha = 10^{-2}$ да бу қиймат 90% га яқинлашади. МГД генератор қурилмаси циклидаги термодинамик жараёнлар диаграммасидан кўришиб турибдики, цикл иккита адиабата (1—2 ва 4—5 нуқталар оралиғи) ҳамда иккита изобарадан (2—3—4 ва 5—6—7—1 нуқталар оралиғи) ташкил топган бўлиб, циклга ташқаридан иссиқлик миқдори киритилмасдан, иш моддаси ички энергиясининг ўзгариши ҳисобига ёниш жараёни амалга ошади. q_2' ёниш маҳсулоти таркибидаги ташқарига чиқарилаётган қолдиқ иссиқлик миқдорининг бир қисми бўлиб, у регенерация усули билан яна иш моддасига қисман қайтарилади ва унинг ҳолат параметрларини ўзгаришига сабаб бўлади (80-расм). Иш моддаси ҳажми $P = \text{const}$ остида ортади. Сиқилишда маълум даржада қизиган ва регенераторда қўшимча қиздирилган ҳаво ёниш камерасига узатилади ва шу пайтда камерага ёқилғи пуркалади. Кучли кимёвий реакция ўзгармас босим остида ёниш камерасида юз беради ва ёниш маҳсули етарли даражада ионлашган газ оқимига айланади. Зарур бўлганда бу ионлашган газ оқимига қўшимчалар қўшилади. Шунда ионлашган газ-плазма оқимининг термодинамик ва физикавий хоссалари ўзгаради. Босим $P = \text{const}$ да юқори температурали газ оқими МГД генератор канали орқали ўтаётганда адиабатик кенгайди (4—5 нуқталар оралиғи) ва таркибидаги заряд миқдори ҳисобига магнит майдони қутблари томонида ўрнатилган электродларга манфий ва мусбат ионлар (зарралар) оғиб, уларга ўз зарядларини беради ҳамда шу электродларда ЭЮК ҳосил қилади.

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 қисмини 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 алмашиниб 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 алмашиниб 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 циклинигига ўхшаш. МГД генераторнинг бажарган иши ионлашган газ (плазма) оқимининг МГД

генератор каналига киришидаги ва ундан чиқишидаги энтальпиялари айирмасидан аниқланади:

$$A = \Delta i = i_k - i_\tau \quad (304)$$

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_τ 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:

$$i_k = \frac{1}{\mu_k P_k} \sum_1^n i_{ik} P_{ik}; \quad i_\tau = \frac{1}{\mu_\tau \cdot P_\tau} \sum_1^n i_{i\tau} P_{i\tau}, \quad (305)$$

$$\text{у нда } \mu_k = \frac{1}{P_k} \sum_1^n \mu_{ik} P_{ik} \text{ ва } \mu_\tau = \frac{1}{P_\tau} \sum_1^n \mu_{i\tau} P_{i\tau},$$

i, μ, P, 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 $S_k = S_\tau$. Унда плазма параметрларидан P ва T ўзгариши эҳтимоллиги мавжуд бўлади. Лекин МГД генератор каналдаги плазма оқимининг босими ўзгармас, чунки жараён изобарик. Шу сабабли МГД генераторга кираётган ва ундан чиқаётган оқим температуралари айирмасидан энтальпия ўзгарувчанлигини аниқлаш мумкин:

$$\Delta i = \int_{T_k}^{T_\tau} C_p dT = C_p (T_k - T_\tau), \quad (306)$$

бунда $C_p = \left(\frac{di}{dT} \right)_p \cong \left(\frac{\Delta i}{\Delta T} \right)_p$ — плазма оқимининг T_k ва T_τ

оралигидаги ўртача иссиқлик сифими.

Биз юқорида таъкидладикки, МГД — генератордан ўтаётган плазма оқими адиабатик кенгайд, 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:

$$\eta_r = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) - (q_5 + q_6)}{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)}, \quad (308)$$

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 — ҳавонинг компрессорга кириши ва чиқишидаги температуралари; η_k — 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; $q_4 = C_p (T_4 - T_5)$ — МГД генератор каналидаги плазма оқимининг электр ўтказувчанлиги ҳисобига пайдо бўлган иссиқлик; T_4 ва T_5 — МГД генератор каналига кираётган ва ундан чиқаётган ионлашган газ (плазма) оқимининг температуралари; η_g — МГД генераторнинг электр ишлаб чиқариш ФИК;

$q_5 = C_p (T_4 - T_5) \frac{1 - (\eta_g - \xi)}{\eta_g - \xi}$ — 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 коэффициенти; $q_6 = C_p (T_5 - T_1)$ 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 охири 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, сўнгра ихчамлаб қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\eta_{it} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_4 - T_2}. \quad (309)$$

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 қуйидаги кўринишда ёзиш мумкин:

$$\eta_{it} = \frac{m [(i_4 - i_5) - (i_2' - i_1)'] + (i_1 - i_{11})}{m (i_1 - i_3)}, \quad (310)$$

бунда $m = \frac{(i_1 - i_{11}) l}{(i_6 - i_7) \mu_{6r}}$;

η_{6r} — буғ генераторининг ФИК.

Берк схемали МГД генератор қурилмасининг циклида содир бўладиган жараёнлар очиқ схемалисиникига қараганда анча мураккаб бўлиб, тузилиши 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, сўнгра совиткичга узатилади. Натижада газ ҳолатидаги иш моддаси температураси мўътадил ва ундан

ласт ҳолатгача тушади. Цикл такрорланади. Берк контурли-МГД генератор қурилмаси циклининг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл иккита аднабатик ва иккита изобарик жараёнлардан ташкил топган бўлиб, қолдиқ иссиқлик миқдори ионлашган газдан кетма-кет буғ куч қурилмасига ва совиткичга чиқарилади. Шунинг учун берк контурли МГД генератор қурилмаси циклининг ФИК ни ҳисоблашда буғ куч қурилмасига МГД генератор циклидан узатилган иссиқлик миқдори, бажарган иши ҳам ҳисобга олинади. Буғ куч қурилмаси циклида содир бўладиган термодинамик жараёнлар тўғрисида юқорида батафсил тўхталиб ўтганмиз.

МГД генератор қурилмаси берк контури циклининг ФИК энталпиянинг ўзгарувчанлиги орқали ифодалаш мумкин:

$$\tau_{it} = \frac{m [(i_3 - i_1) - (i_2 - i_1)] - (i_1 - i_{III})}{m (i_3 - i_2)}, \quad (311)$$

бунда $m = (i_1 - i_{III}) : (i_4 - i_5) = 0$

τ_{6p} — буғ генераторининг ФИК.

Ионлашган газ (плазма) оқимидан металлургияда, пайвандлашда, плазматронларда ва плазма двигателларида иш жисми сифатида фойдаланилади. Бу плазма водород, азот, аргон, гелий ва бошқа кимёвий элементлардан ҳосил қилинади.

11.4. Термодинамик генератор

Термодинамик генератор иссиқлик ўтказгичлар учлари оралиғида ЭЮК ҳосил бўлишига асосланган физик ҳодисаларга мувофиқ ишлайди. Термодинамик генератори Зеебек, Пельтье ва Томсон эффектлари асосида қурилган. Бир жинсли бўлмаган турли хил иккита ўтказгичнинг учларида температуралар фарқи мавжуд бўлганда, шу ўтказгичларнинг совуқ учлари оралиғида ЭЮК пайдо бўлади (Зеебек эффекти); икки жинсли, бир хил температурали ўтказгичларнинг бирга кавшарланган учларидан электр токи ўтганда шу нуқталар муҳитга иссиқлик нурлайди ёки совийди (Пельтье эффекти); бир жинсли бўлмаган система ўзидан Жоуль иссиқлигидан ташқари, яна Томсон иссиқлигини ҳам нурлайди, унинг қатталиги температура градиентига ва ток кучига мутаносиб бўлади (Томсон эффекти). Бу эффектларнинг математик ифодалари қуйидагича ёзилади:

$$\begin{aligned}dE &= \alpha dT; \\dq &= \Pi dl; \\dq &= \tau dl \frac{\partial T}{\partial x} dx.\end{aligned}\quad \bullet \quad (312)$$

бунда α — иссиқлик ЭЮК коэффициентини бўлиб, γ ўтказгич материалга боғлиқ; Π — Пельтье коэффициентини; τ — Томсон коэффициентини; x — ўтказгич узунлиги; l — ток кучи; E — иссиқлик ЭЮК.

Зеебек эффектинини ҳосил қилишда констант-мис, висмут-мис, платина-платина-радий, вольфрам-молибден ва шу кабилардан иборат берк занжир тузилади. Температуралар шу эффект асосида олинган бўлиб, юқори температураларни ва энг кичик температуралар айирмасини ўлчашда лабораторияларда ва ишлаб чиқаришда қўлланилади. Пельтье эффектига мувофиқ кавшарланган ўтказгичлар нуқтасида ажраладиган ва ютилган иссиқлик миқдорини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned}q_1 &= I^2 R t - q'; \\q_2 &= I^2 R t + q'',\end{aligned}\quad (313)$$

бунда $I^2 R t$ — Жоуль иссиқлиги; R — ўтказгич қаршилиги;

I — ток кучи; t — токнинг ўтказгичдан ўтиш вақти, $q' = q''$ — Пельтье иссиқлиги; $q' = q'' = \Pi q = \Pi I t$ тенглигига кўра ўтказгичдан электр токи ўтганда ажраладиган ёки ютиладиган иссиқлик миқдори энг аввало ўтадиган ток миқдорига ва унинг йўналишига боғлиқ экан. Пельтье коэффициентини 10^{-2} — 10^{-3} В ораллиғида бўлиб, материал хусусиятларига боғлиқ. Бу эффект асосида яратилган ярим ўтказгичли қиздирғич ва совиткич асбоблари космонавтикада кенг қўлланилади.

Томсон (лорд Кельвин Уильям) эффектига мувофиқ электр токи ўтказгичдан унинг бўйламасига ўтаётганда температуралар фарқи кузатилса, Жоуль-Ленц қонунига мувофиқ ажраладиган иссиқликдан ташқари, қўшимча иссиқлик ажралади (ток йўналишига қараб) ёки ютилади. Бу ажралган иссиқлик, кўпинча Томсон иссиқлиги дейилади ва соддароқ шаклда қуйидагича ифодаланади:

$$q = \tau (T_2 - T_1) I t, \quad (314)$$

бунда $T_2 - T_1$ — температуралар фарқи; I — ўтказгичдан

ўтаётган ток кучи; τ — Томсон коэффициенти; l — 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 ораллигида 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:

$$\alpha_{1-2} dT dl = (\tau_1 - \tau_2) dl dT + (\Pi_1 - \Pi_2) dl \quad (315)$$

Пельтье коэффициентининг температура функцияси эканлиги эътиборга олинса, у ҳолда

$$\alpha_{1-2} = (\tau_1 - \tau_2) + \frac{c\Pi_{1-2}}{dT} \quad \text{бўлади.}$$

Содир бўладиган жараён қайтар жараён деб олинса, термодинамиканинг иккинчи қонунига мувофиқ система энтальпиясининг йиғиндиси нолга тенг бўлади, яъни

$$\sum_i \frac{dq_i}{T_i} = 0. \quad (316)$$

Шунинг учун бу эффектларнинг йиғиндиси ҳам нолдан катта бўлмайди:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{T} dT dl + \frac{\Pi_1}{T_1} dl - \frac{\Pi_2}{T_2} dl = 0 \quad (317)$$

Бу тенглама айрим соддалаштиришлардан сўнг қуйидаги кўринишга келади:

$$(\tau_1 - \tau_2) - \frac{\Pi_{1-2}}{T} + \frac{\Pi_{1-2}}{dT} = 0, \quad (318)$$

Чунки $\frac{\Pi_1}{T_1} - \frac{\Pi_2}{T_2} = d \left(\frac{\Pi_{1-2}}{T} = \frac{d\Pi_{1-2}}{T} - \frac{\Pi_{1-2}}{T} dT \right)$

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

$$\frac{\partial \Pi_{1-2}}{\partial T} = \alpha_{1-2} + T \frac{\partial \alpha_{1-2}}{\partial T}. \quad (320)$$

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:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (322)$$

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:

$$\eta_t = \frac{N}{\sum_k q_{\text{сарф}}} = \frac{N}{q_n(T_1) + q_{\text{исс}} - 0,5 q_{\text{ж}} \pm \Delta q_{\tau}}, \quad (325)$$

Бунда $q_{\text{исс}}$ — иссиқлик ўтказувчанлик (контакт) бўйича узатилган иссиқлик миқдори; q_n , $q_{\text{ж}}$ ва q_{τ} — мос равишда Пельтье, Жоуль ва Томсон иссиқлик миқдорлари бўлиб, улар қуйидагича ифодаланади:

$$q_n(T_1) = \Pi I = \alpha T_1 I = \alpha^2 T_1 \frac{(T_1 - T_2)}{r(m+1)};$$

$$0,5 q_{\text{ж}} = 0,5 I^2 r = \frac{\alpha^2 (T_1 - T_2) \cdot 0,5}{2 r T_1 (m+1)^2};$$

$$\Delta q_{\tau} = I \int_{T_2}^{T_1} \tau''(T) dT - I \int_{T_2}^{T_1} \tau'(T) dT = I \int_{T_2}^{T_1} (\tau'' - \tau') dT,$$

$$\text{агарда} \quad \alpha(T_1) = \alpha(T_2) = \alpha_{\text{срТ}}$$

тенглик эътиборга олинса, у ҳолда Томсон иссиқлиги бошқача кўринишда ифодаланади, яъни:

$$\begin{aligned} \Delta q_{\tau} &= I \int_{T_2}^{T_1} \left(-T \frac{d\alpha}{dT} \right) dT \cong I T_{\text{срТ}} \int_{T_2}^{T_1} (-d\alpha) = \\ &= I T_{\text{срТ}} [\alpha(T_1) - \alpha(T_2)] = 0. \end{aligned}$$

$$q_{\text{исс}} = k(T_1 - T_2) = (\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) \frac{1}{c} (T_1 - T_2), \quad (326)$$

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-

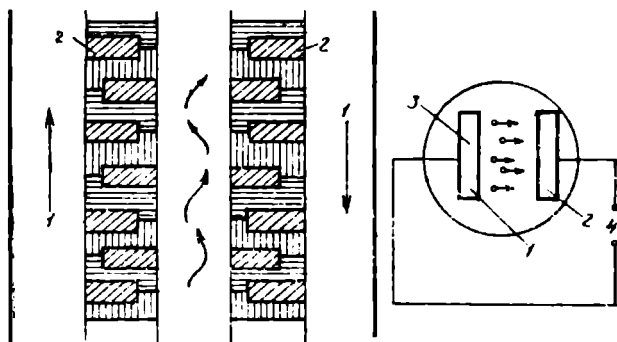
нератордир. Термоэмиссион (therme — иссиқлик, emission — чиқармоқ) ҳодисаси Ричардсон эффектига, яъни иссиқлик таъсирида эмиссион токнинг ҳосил бўлишига асосланган бўлиб, иссиқлик энергиясини тўғридан-тўғри электр энергиясига айлантирувчи генераторларда қўлланилади. Энг содда иссиқлик электрон ўзгартгич бири-бирига жуда яқин жойлаштирилган иккита металл сиртлардан иборат бўлиб, уларнинг бири электронлар оқимини (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 тўхтади, яъни занжирда тўйиниш токи ҳосил бўлади.

Ҳосил бўлган эмиссион тўйиниш токининг қийматини ҳисоблашда Ричардсон-Дёшман тенгласидан фойдаланилади, яъни

$$j_s = \frac{I}{S} \bar{A} B T^2 e^{-\frac{A}{kT}} \quad (327)$$

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 келинаётган генераторларнинг анод-катоди орасидаги масофа 10 микрондан ортмайди. Термоэмиссион генераторларнинг ФИК ни занжирга берган қувват ва катод иссиқлиги орқали ифодалаш мумкин:

$$\eta = \frac{N}{Q_k}, \quad (329)$$

бунда $N = IV_R$; V_R — қаршиликларда кучланишнинг тушиши:

$$Q_k = I\varphi_k + I(V_{\text{тирк}} + \varphi_a + V_R - \varphi_c) + W_T + Q_{\text{исроф}};$$

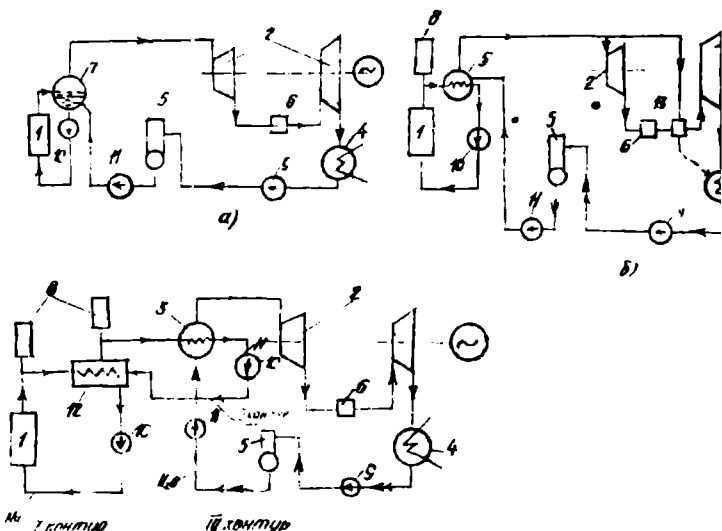
φ_k ва φ_a — катод ва аноднинг чиқариш потенциаллари;

$V_{\text{тирк}}$ — 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 ту бинаси; 3 — буғ генератори; 4 — конденсатор; 5 — деаэратор; 6 — сеп ратор; 7 — буғ тўпланувчи идиш, 8 — ҳажми тўлдиргич; 9 — 11 — конденсат, совиткич ва таъминловчи насослар; 12, 13 — орали иссиқлик алмаштиргич ва буғ қиздиргич.

Курск АЭС ларини, атом музёарлари ва камалар («Саванна», «Бобкок-Вилкокс» ва ш. к.) мисол бўлади.

Табиатда уран-235 изотопининг миқдори 0,72%, уран 238 ники 99,274%, уран-234 ники эса 0,006% ташки қилади. АЭС ларда атом реакторида кечадиган бошқа риладиган занжирли ядро реакцияси вақтида, асосан уран-233, уран-235, плутоний-239 атомлари ядроларининг парчаланиши натижасида иссиқлик энергияси аж ралади. Ядро реакциясида ажралган иссиқлик миқдор иссиқлик ташувчи (гелий, оғир сув, суюқ натрий) г узиллади, у биринчи берк контурда, яъни реактор в ташқи иссиқлик алмаштиргич оралигида насос ёрдами да мажбурий ҳаракатлантирилади. АЭСнинг иккинчи контуридаги жараёнлар ИЭС ларидагидай кечади.

Атом электр станцияларининг сув-сув энергетик ре актори (ССЭР), суюқ металл энергетик реактор (СМЭР) мавжуд бўлиб, улар сув, суюқ металл ва сў қултирилган 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 оралиқ, 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 парчаланadi) ва сунъий уран-233, плутоний-239 (тез нейтронларда парчаланadi) киради. Сунъий ядро ёқилғисининг хом ашёси деганда торий-232 ва уран-238 тушунилади. Чунки, бу ядролар биттадан нейтрон ютади ва иккитадан бундан заррасини чиқариб бошқа турдаги кимёвий элементга, яъни

$${}^{235}_{92}\text{U} + n' \rightarrow {}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow 2\beta \rightarrow {}^{236}_{94}\text{Pu} \text{ ва } {}^{235}_{92}\text{U} + n' \rightarrow {}^{234}_{92}\text{U} \rightarrow 2\beta \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th}$$

айланади.

Ядро куч қурилмаларининг асосини атом реактори ташкил этади. Ядро куч қурилмалари электр энергиясини ишлаб чиқаришда (АЭС), музёран, сув ости кема-судналарида, самолётларда, локомотивларда, ядро реактив гателларида қўлланилади.

АЭС ларда асосан электр ва иссиқлик энергияларини ишлаб чиқарилади. Улар тузилиши жиҳатидан иссиқлик куч қурилмаларига ўхшаш.

Атом реактори бошқариладиган занжирли ядро реакцияси кечадиган ва реакция бир меъёрда сақлаб туриладиган қурилма. У каструлкасимон зангламайдиган қурилма иш бўлиб, унинг ичига иссиқлик ажратувчи элементлар, бошқариш стерженлари, совиткич модда ҳамда нейтронларни қайтаргич маълум тартиб-қоида бўйича жойлаштирилади. Иссиқлик ажратувчи элементлар шахмат тартибида, нейтронларни қайтаргичлар (графит) ички девори реакторнинг сирти бўйлаб жойлаштирилади. Совиткич вазифасини оғир сув, суюқ металл ва суюлтирилган газ (водород, гелий) бажаради. Оғир сув ўз 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 босимли паст босимли буғ турбинасига йўналтирилади.

Умуман олганда, АЭС нинг охириги берк контурида кечадиган жараёнлар ИЭС ларники кабидир.

Биринчи берк контурдаги совиткичнинг температураси 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. Кўпчиллик 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 элементни 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) ишляпти. Бунга Россия территориясида жойлашган Чукотка, Билинск станцияларини мисол қилиш мумкин. АЭС лари ишлаб чиқараётган электр энергияси унча арзон бўлмаса-да, ёқилган кам сарфланиши билан ажралиб туради. Иш муддати нуқтан 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 нуқтан назардан қаралганда АЭС лардан мутлақо фойдаланиш керак эмас. Турли мамлакатларда атом реакторларидан ҳар хил сабабларга кўра радиоактив моддалар чиқиб (Чернобыль, Три-Майл-Айленд АЭС ларидаги авариялар ва ш. к.), табиатга ва одамларга катта зарар етказяпти. Радиоактив чиқиндилар тўпланиб қоляпти.

11.7. Термоядро синтез энергетикаси

Табиатда органик ёқилган захираси камайиб бораётганлиги, атом электр станцияларининг экологик жиҳатдан талабга жавоб бермаслиги гелио ва геотермал станциялар ФИК нинг пастлиги ҳисобга олинганда экология нуқтан 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 ёқилгиси 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 энгил 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.

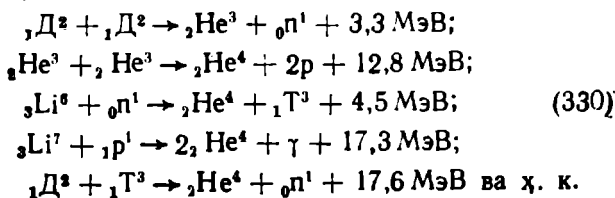
Синтез реакциясини амалга ошириш учун қўшилиши керак бўлган кимёвий элементлар ядроларини бир-бирига ядро кучлари таъсир этадиган даражадаги масофагача, яъни $r_n = 10^{-15}$ м яқинлаштириш керак. Ядролар мусбат зарядли эканлиги ҳисобга олинса, албатта улар ўртасида бир-бирини итарувчи кулон кучи мавжуд. 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, энгил 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 — $1,16 \cdot 10^7$ К.

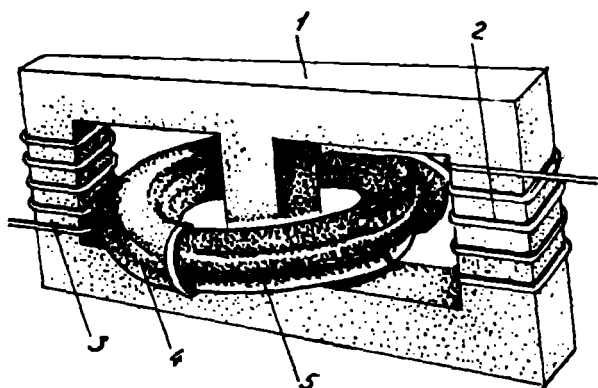
Плазманинг ички энергияси E дан термоядро синтез реакцияси энергияси E_c катта, яъни $E_c > E$ бўлиши учун плазма температураси камида 10 кэВ ва бир сантиметр куб (1 см^3) плазма ҳажмида 10^{14} та синтез реакцияси юз бериши керак. Бундай шарт термоядро реакцияси физикавий критерийси чегараси, яъни Лоусон критерийси дейилади.

Плазмани тутиб туриш ва синтез реакциясининг узулуксизлигини таъминлаш масаласи анчагина мураккаб бўлса-да, у уч йўналишда давом этмоқда: магнит майдони ёрдамида плазма ипи торонд 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 «ТОКАМАК» 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. Торонд 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.

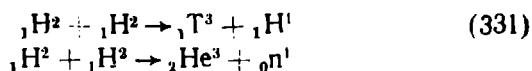
Аммо бошқариладиган термоядро синтез реакциясига сарфланадиган энергия миқдори, ҳозирги кундаги илмий тадқиқотларда, синтез вақтида ажралган энергиядан катта, яъни иқтисодий жиҳатдан зарарга ишламоқда, чунки ядролар ўртасидаги ўзаро итариш (кулон) кучларини енгил амалий тадқиқотларда осон бўлмаяпти.

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 «Мезомолекулар 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 кузатишган. 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) $\sim 1,6 \text{ mA/cm}^2$ ток ўтганда киритилган. 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.

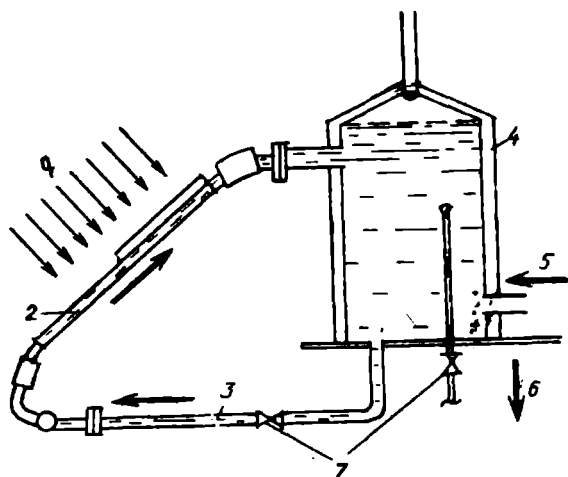
Дунёда биринчи гелиоэлектр станцияси 1912 йили

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 м² 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 кристали).

Қуёш нурини электр энергиясига айлантиришда, асосан яримўтказгичлардан олтингургурт — таллий кремний кристали (*p-n*-ўтказувчанлик, ФИК 6%), аморф, кремний, галлий арсениди (ФИК 33—34%) ва ҳоказолардан фойдаланилади. Кремний кристалининг температураси ортин билан унинг ФИК камаяди, масалан, $T = 291 - 193$ 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 — совуқ ва иссиқ сув трубалари; 7 — вентиляр.

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 коннотда 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.

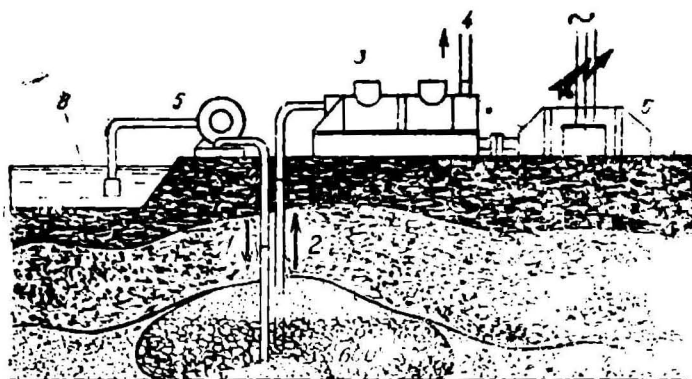
Ўзбекистон Республикасида (Паркент тумани) «Қуёш» деб номланган кучли гелиомакказ ишламоқда. Унда Қуёш нури энергиясини тўплаб юқори температура-ларда суоқланадиган қотишмалар олинмоқда.

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 ҳажм ҳосил қилинади ва унга совуқ сув ҳайдалиб, иккинчи қу-



86-расм. Геотермал электр станциясининг схематик тасвири
 1 — совуқ сув; 2 — буғ; 3 — буғ турбиниси; 4 — иш бажари
 бўлган буғ; 5 — суя насоси; 6 — электр генератор; 7 — ернинг
 юқори температурали қатламидаги сунъий ҳавзаси; 8 — су
 ҳавзаси.

вурдан олинadиган иссиқ сув буғи асосий иш жисм ҳи
 собланади (86- расм). Ер мантиясига яқинлашган сайин
 Ер қобиғининг температураси ортиб боради. Масалан
 Ер юзидан 2000—3000 м чуқурликдаги жисмлар темпе
 ратураси 370—380 К дан юқори бўлади.

Ер ости сувлари турли хил йўллар билан бу исси
 қатламларга тушиб, унда буғга ёки иссиқ сувга айла
 ниб, Ер юзасида иссиқ булоқлар ҳосил қилади. Бунда
 қайноқ булоқлар аксарият ҳолатларда вулқонлар атро
 фида пайдо бўлади. Масалан, Курил—Камчатка тизма
 сида бундай қайноқ булоқлар жуда кўп.

Замонавий геотермал станциялари Доғистонда (Из
 бербаш шаҳри), Камчаткадаги Паужетск дарёси во
 дийсида ишлаб турибди.

Доғистонда геотермал иссиқлик станцияси бир сут
 када 10.000 м³ иссиқ сув ($t=60-70^{\circ}\text{C}$) беради.

Паужетск дарёси водийсидаги геотермал электр
 станциясининг қуввати 5 МВт, қуйи Кошелск геоИЭС
 даи олинadиган қувват 94 МВт.

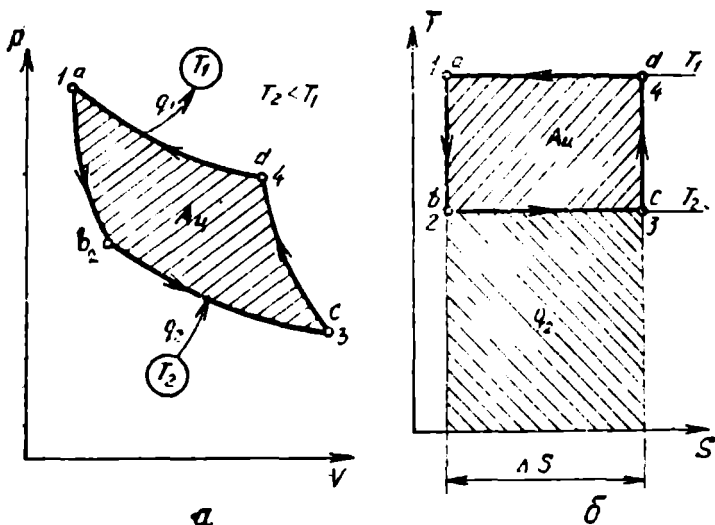
Температураси унча юқори ($40^{\circ}-60^{\circ}\text{C}$) бўлмаган
 шифобахш булоқлар Марказий Осиёда ҳам жуда кўп
 жойларда учрайди. Улар асосида иссиқлик энергетика
 сининг кам қувватли манбаларини ташкил қилиш мум
 кин.

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 bajarиллади. 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 машиналарининг цикли Карно циклига тескари бўлган циклдир. Карно циклига тескари бўлган цикл совиткич машиналарнинг идеал цикли дейлади. Идеал циклга совиткич машиналарнинг реал цикллари 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 диаграмчалари.

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 совиёди. 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 жисмини 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 совиёди. 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 — циклининг бажарган иши.

Совитиш машиналарининг иқтисодий самарадорлиги совитиш коэффициенти ξ орқали ифодаланади:

$$\xi = \frac{q_1}{A_{\text{ц}}} \quad (333)$$

Карнонинг совитиш цикли учун ξ коэффициенти қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{c}{A_{\text{ц}}} = \frac{\Delta S \cdot T_2}{\Delta S \cdot (T_1 - T_2)} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1}, \quad (334)$$

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 кўришиб турибдики, цикл иккита изотермик ва иккита адиабатик жараёнлардан ташкил топар экан. Бундай қурилмаларда совитиш жараёни иш жисми ички энер-

гиясининг ўзгариши ҳисобига содир бўлади. Физика курсидан маълумки, ҳар қандай газ ё суюқлик ўз ҳажмини кескин кенгайтирганда совийди. Советкичларда шу эффектдан фойдаланилади.

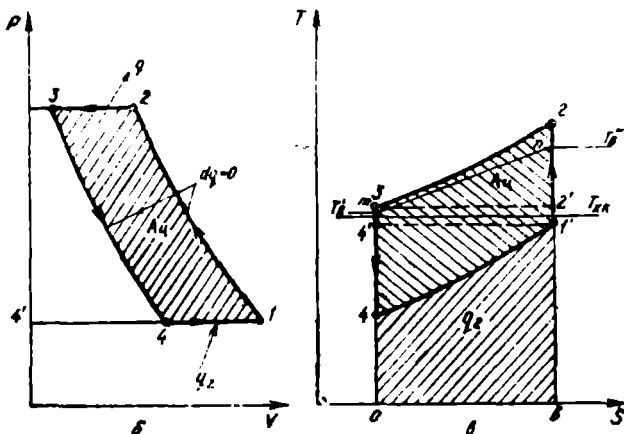
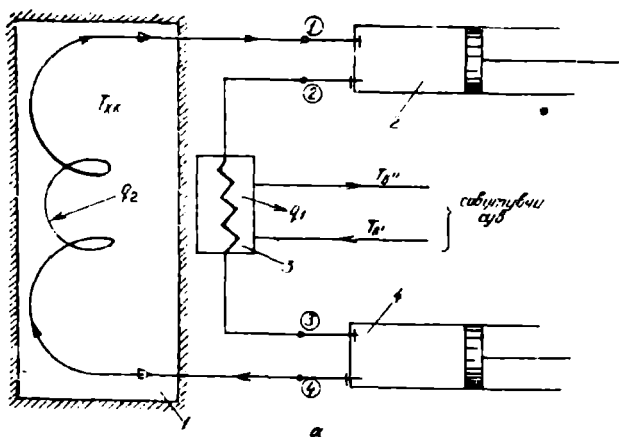
12.2. Ҳаво билан совитиш қурилмаси

Ҳаво билан совитиш қурилмасининг асосий иш жисми атмосфера ҳавоси ҳисобланади. Бундай совитиш қурилмаси совитиш хонаси 1, компрессор 2, иссиқлик алмаштиргич 3 ва пневматик (ҳаво) двигатель 4 дан ташкил топган (89-расм). Ҳаво билан совитиш қурилмасининг цикли қуйидагича кечади: компрессор 2 совитиш хонаси 1 даги T_1 температурали ҳавони сўради ва шу ҳавони адиабатик сиқиб чиқариш клапани 2 орқали иссиқлик алмаштиргич 3 га ҳайдайди. Ҳавонинг компрессордан чиқишидаги температураси совитувчи сув температурасидан юқори бўлади. Шунинг учун иссиқлик алмаштиргичдан q_1 иссиқлик миқдори сиқилган ҳаводан сувга ўтади, натижада ҳаво совийди. Бу совитилган ҳаво пневматик двигательга клапан 3 орқали ҳайдалади ва унда адиабатик кенгайиб мусбат иш бажаради. Адиабатик кенгайиш жараёнида пневматик двигательдаги ҳаво совийди ва унинг температураси совитиш хонаси 1 даги температурадан паст бўлади. Совуқ ҳаво пневматик двигательдан совитиш хонаси 1 га ҳайдалади. У ерда ортиқча иссиқлик миқдори q_2 ни ютади. Совитиш хонаси 1 даги жисм совийди. Цикл такрорланади.

Компрессорда ҳавони сиқиш учун сарф бўлган иш миқдори $4'-1-2-3'-4'$ нуқталар (PV диаграмма) билан чегараланган юзага, пневматик двигательда ҳавонинг кенгайишида бажарилган иш миқдори $3-3-4-4-3$ нуқталар (PV диаграмма) билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади. Циклнинг бажарган иши компрессордаги манфий ва пневматик двигательдаги мусбат ишларнинг айирмасига, яъни $1-2-3-4-1$ нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади.

Иссиқлик алмаштиргичдан сувга узатилган q_1 иссиқлик миқдори сон қиймати жиҳатидан $a-3-2-b-a$ нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади (88-расм, TS_v диаграмма), яъни

$$q_1 = q + A_{\text{ц}} \quad (335)$$



88-расм. Ҳаво билан совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б ва в — ҳаво билан совитиш қурилмаси циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

Совитиш циклининг коэффициентини TS диаграмма орқали қуйдагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{q_2}{A_{ц}} = \frac{1}{[(T_2 - T_1) : (T_1 - T_4)] - 1} \quad (336)$$

PV диаграммадан кўришиб турибдики, 1—2 ва 3—нуқталар ораллиғида ҳаво адиабатик сиқилади ва кен гаяди. Шунини эътиборга олиб ҳаво температуралари нисбатини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_1}$$

Унда совитиш циклининг коэффициентини компрессор ва двигателнинг сўриш ва ҳайдаш каналларидаги ҳаво температуралари нисбати орқали ифодалаш мумкин бўлади, яъни

$$\xi = \frac{1}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1} = \frac{1}{\frac{T_3}{T_1} (-1)} \quad (337)$$

Демак, компрессорнинг ҳайдаш клапанидан ўтган сиқилган ҳаво температураси қанча кичик бўлса ёки ҳаво двигателининг сўриш каналидаги ҳаво температураси қанча паст бўлса, совитиш қурилмасининг иқтисодий самарадорлиги шунча юқори бўлади.

Иссиқлик алмаштиргичга киритиладиган сувнинг температураси қанча паст бўлса, ҳаво билан совитиш қурилмасининг самарадорлиги шунча катта бўлади. Чунки компрессорда ҳавони юқори босимгача сиқиш учун ортиқча иш сарфлаш зарур бўлмайди.

Совитиш коэффициент ξ ни гоҳо солиштирма совуқлик ишлаб чиқариш q_0 деб юритилади. Совуқ манбадан иш бирлиги сарфи вақтида чиқарилган иссиқлик миқдорини билдирувчи катталиқ кЖ ёки Мегажоулда ўлчанади. Солиштирма совуқлик ишлаб чиқаришни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$q_0 = 10^3 \xi.$$

Ҳаво билан совитиш қурилмалари учун $q_0 = 950 - 1250$ кЖ/МЖ атропоида бўлади.

12.3. Сиқилган буғ билан совитиш қурилмаси

Атмосфера босими ёки шунга яқин босимларда буғ ҳолатига ўтувчи газлар моддани сиқиб совитувчи қурилмаларнинг асосий иш жисми бўлиб, улар гоҳо совитиш агенти деб ҳам юритилади. Бундай газлар ноль градусдан паст температураларда тўйиниш нуқтасига эга бўлади.

Сиқилиш ҳисобига совитувчи қурилмаларда қўлланиладиган совитиш агентлари термодинамика нуқтаназаридан қуйидаги талабларга жавоб бериши керак: а) вакуумда буғланиш юз бермаслиги ва ташқаридан совитиш хонасига ҳаво сўрилмаслиги учун нолдан паст бўлган манфий температураларда тўйиниш нуқтасига

эга бўлган совитиш агенти буғининг босими атмосфера босимидан кичик бўлмаслиги шарт; б) сиқиш камера-сидаги босим кичик бўлиши талаб қилинади (ана шундагина машина қисмлари енгил конструкциядан ташкил топади); в) паст температураларда тез ва кўп буғланадиган, яъни ҳажмий совуқлик ишлаб чиқариши юқори бўлиши керак; г) суyoқликнинг иссиқлик сиғими паст бўлиши талаб қилинади.

Бундай талабларга тўлиқ жавоб берадиган совитиш агенти, яъни идеал газ топилганича йўқ. Лекин шунга яқинроқлари совитиш қурилмаларида қўлланилмоқда (15-жадвал).

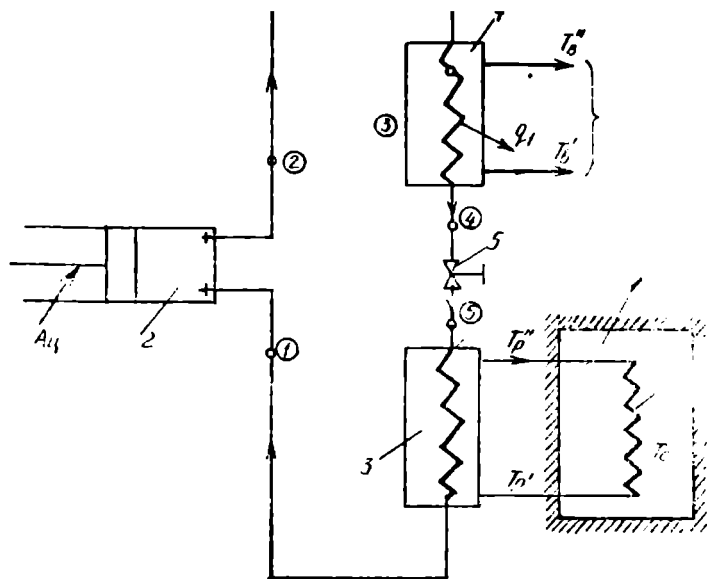
Сиқилган буғ билан совитадиган қурилма совитиш хонаси 1, компрессор 2, буғлаткич 3, конденсатор 4 ва ростловчи (дросселли) вентиль 5 дан ташкил топган (89-расм). Сиқилган буғ билан совитадиган қурилмада юз берадиган термодинамик жараёнларнинг TS диаграммасида кўриниб турибдики (89-расм), цикл совитувчи агент (иш моддаси) ни компрессорга сўриш ва уни адиабатик ($dq=0$) сиқишдан бошланади (1 ва 2 нуқталар оралиғи).

15-жадвал

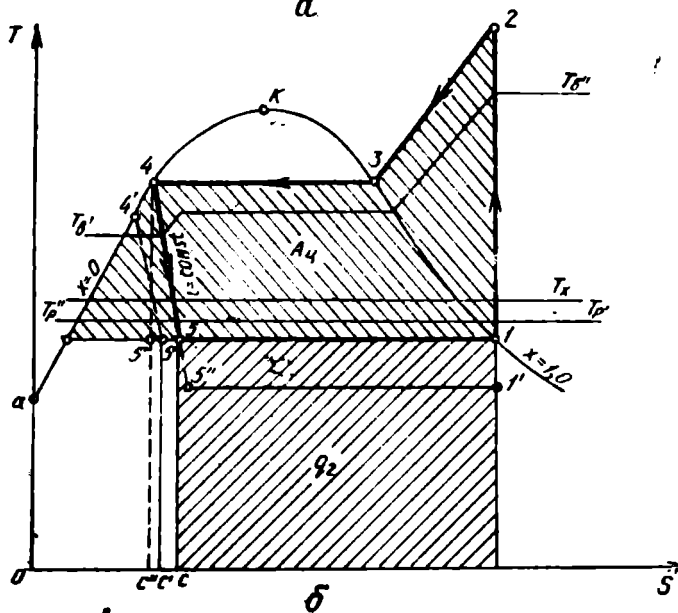
Совитиш моддалари ва уларнинг тўйиниш температуралари ҳамда босимлари

№	Совитиш агентининг номи ва формуласи	1 бар босимдаги тўйиниш температура-ри, С°	Тўйиниш босими, бар	
			15 С°	-10 С°
1	Сув буғи, Н ₂ О	-99,64	0,017	0,00287
2	Аммиак, NH ₃	-33,4	7,28	2,91
3	Карбонат ангидрид, СО ₂	-78,9	50,9	26,4
4	Олтингуғурт ангидрид	-10,3	2,75	1,015
5	Метил хлориди, СН ₃ Сl	-24,0	4,18	1,75
6	Фреон	-30,0	4,9	2,19

Буғлаткич 3 да ўзгармас босим ($P=\text{const}$) остида ҳосил бўлган совитувчи агентнинг буғини компрессор 2 сўриб олади. Албатта, бу совитувчи агент ҳосил қилган буғининг босими атмосфера босимидан катта, температура-си эса манфий ишорали бўлади (1 нуқта, 89-расм). Сўрилган буғ 2 нуқтагача адиабатик сиқилади ва унинг температураси совитувчи сув температурасидан катта бўлади. Сиқилган буғ ўзининг ички энергиясини орти-ши ҳисобига исийди. Демак, $T > T_c''$ ортиқча иссиқликни совитувчи агент конденсатор (совиткич) 4 да иссиқлик



а



б

89-расй. Сидланган буу билан совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б — сидланган буу билан совитиш қурилмаси циклининг *TS* диаграммаси.

алмашинув йўли билан совитувчи сувга беради ва ўзгармас босим остида ($P = \text{const}$) совитувчи агентнинг буғи тўлиқ конденсацияланади. Бу TS диаграммадаги 2—3—4 нуқталарга мос келади.

Ҳосил бўлган совитиш агенти конденсатини яна буғланиш даражасига етказиш мақсадида у дросселлаш вентили 5 дан ўтказилади (4—5 нуқталар оралиғи). Буғланиш даражасига етказилган совитиш агенти буғлаткичга ҳайдалади ва унда кескин кенгайиб совийди. Ҳосил бўлган бу совуқлик миқдори совитувчи шўр сувга узатилади. Бу шўр сув совитиш хонаси температурасини пасайтириб, ундаги моддаларни совитади, яъни улардан иссиқлик миқдори чиқади. Шўр сув томонидан ютилган иссиқлик буғлатиш хонасидаги совитувчи агентни яна ҳам кучлироқ буғланишини таъминлайди. Цикл такрорланади.

Циклнинг бажарган иши 1—2—3—4—5—1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлиб, уни совитиш агентини адиабатик сиқишда (1 ва 2 нуқталар оралиғи) энтальпиянинг ўзгариши орқали ифодалаш мумкин:

$$A_{\text{ц}} = i_2 - i_1', \quad (338)$$

бунда i_1 ва i_2 — совитиш агентининг 1 ва 2 нуқталарга (90-расм, TS диаграмма) мос келувчи энтальпияларининг қиймати.

Буғлаткич хонасидаги совитувчи агентни буғлатиш учун сарф бўлган иссиқлик миқдори q_2 катталиги TS диаграммада жойлашган 5—1— d — c —5 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг, яъни 1 ва 5 нуқталар энтальпиялари айирмаси кўринишида ёзамиз:

$$q_2 = i_1 - i_5. \quad (339)$$

Қурилма совитиш коэффициентининг совитиш хонасидан чиққан иссиқлик миқдори циклнинг бажарган ишига нисбати ёки юзалар ҳамда 5—1 ва 1—2 нуқталар энтальпияларининг айирмаларининг нисбати кўринишида ифодалаш мумкин:

$$\xi = \frac{d_2}{A_{\text{ц}}} = \frac{\text{юза } 5-1-d-c-5}{\text{юза } 1-2-3-4-b-1} = \frac{i_1 - i_5}{i_2 - i_1}. \quad (340)$$

Демак, совитиш хонаси 1 дан қанча кўп миқдорда q_2 иссиқлик чиқса, компрессорни ишга тушириш учун

шунча кам иш сарфланади, натижада мазкур совитиш қурилмасининг иқтисодий самарадорлиги катта бўлади.

Циклнинг TS диаграммасидаги шўр сув чизиғи $T_p' - T_p''$ буғланиш чизиғи $2-1$ га қанча яқинлашиб келса, совитиш хонаси 1 дан шунча кўп иссиқлик миқдори чиқаётганлигини билдиради. Совитиш хонаси 1 даги температурани янада пасайтириш мақсадида гоҳо қурилмага қўшимча совитиш системаси қўшилиши мумкин. Бунда системадан (совитиш хонаси) чиқадиган q_2 ортади ва қурилманинг иқтисодий самарадорлиги кўтарилади, чунки q_2 га мос келувчи юза $5''-1-d-c'-5'$ катталашади.

Яна ҳам кучлироқ совитиш учун юқори даражада дросселлаш, яъни вентилнинг ўтказиш канали тешигини кичрайтириш усулидан фойдаланиш керак. Бунда оз миқдордаги совитиш агенти тешикчадан катта ҳажмга ўтади ва кескин кенгайиб совийди ҳамда босими тушади (89-расм, TS диаграммадаги $5''-1'$ нуқталар оралиғи).

Сиқилган буғ ёрдамида совитадиган қурилмадан ҳаво двигатели ўрнига ростланадиган дросселловчи вентиль қўлланилган. Бу билан қурилмадаги ҳаракатланувчи қисмлар сони камайтирилган ва унинг ишончли ишлаши таъминланган. Иқтисодий жиҳатдан мазкур қурилма ҳаво билан совитиш қурилмасидан қимматроқ ҳисобланса-да, ишончли ишлаши таъминланган.

12.4. Буғ оқимли совитиш қурилмаси

Сув буғи асосий иш жисми сифатида сув оқимли совитиш қурилмаларида ишлатилиши мумкин. Бундай буғ кескин кенгайганда совитиш ҳодисасидан фойдаланади. Агар оддий сув ўрнига шўр сувдан фойдаланилса, у ҳолда — $21,4^{\circ}\text{C}$ гача бўлган температурани атрофмуҳит температурасига нисбатан тушириш мумкин бўлади. Чунки ана шу температурада шўр сув музлай бошлайди.

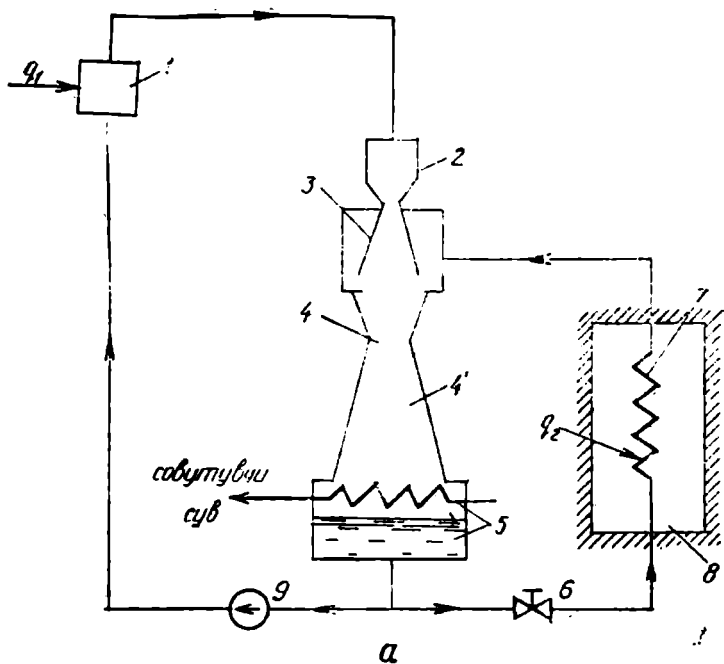
Буғ оқимли совитиш қурилмаси буғ қозони 1 , эжектор (франц. *ejecteur*, *ejecter* — отмоқ), оқимли насос 2 (эжектор ўз навбатида Лаваль соплоси 3 ва конфузор-диффузор 4 дан иборат), конденсатор 5 , дросселлаш вентили 6 , буғлаткич 7 , совитиш хонаси 8 , конденсат насоси 9 дан ташкил топган (90-расм).

Буғ оқимли совитиш қурилмасининг иш цикли қуйидагича: қозон 1 дан буғ оқими эжекторга оқиб киради, у ердан де-Лаваль соплоси 3 орқали ўтаётганда ўз параметрларини (босими, температураси ва ҳажмини) ўзгартириши натижасида буғ оқими зарраларининг тезлиги товуш тезлигидан катта бўлади. Буғ бундай кенгайгандан сўнг у эжекторнинг аралаштиргич қисмига буғлаткич 7 дан сўрилган температураси пастроқ буғ билан биргаликда конфузор 4 да адиабатик сиқилади (1—2 нуқталар оралиғи). Бу сиқилган аралашманинг температураси унинг ички энергияси ҳисобига ортади. Бундаги сиқилиш худди компрессордагидай бўлади. Конфузордан чиққан аралашма диффузор 4' да бирдан кенгайиб совийди. Бу совийш жараёни конденсаторда давом этади. Бу жараён TS диаграммадаги 2—3 нуқталарга мос келади. Конденсатнинг маълум қисми дросселлаш вентилида катта ҳажмга ўтишда кенгайиб совийди (3—4 нуқталар оралиғи) ва совитиш хонаси 8 даги буғлаткич 7 га ўтади. Ўз навбатида, унда буғланиб совийди ва совитиш хонаси 8 да жойлашган жисмлардаги ортиқча иссиқлик миқдорини ютади, жисмлар эса совийди. Буғлаткичдаги совиткичга жисмлардаги q_2 иссиқлик миқдори изотермик келтирилади ва совитувчи модда (буғ) ҳажми ортади (TS диаграммадаги 4—1 нуқталар оралиғи). Буғ қозонида узлуксиз буғ ҳосил бўлиши учун эжекторга узатилган буғ миқдорига тенг бўлган конденсат суюқлик насоси 9 орқали қозонга ҳайдалади. Цикл такорланади.

Демак, буғ оқимли совитиш қурилмаси циклидаги термодинамик жараёнлар битта адиабатик (1—2 нуқталар оралиғи), иккита изотермик (2—3 ва 4—1 нуқталар оралиғи) ва битта изохорадан (3—4 нуқталар оралиғи) ташкил топган экан.

- Циклнинг TS диаграммасидаги OKN чизиғи 1 кг ва $OK'N'$ чизиғи эса g кг буғга мос келади. $OK'N'$ эгри чизиқдаги 1'—2' нуқталар оралиғи буғнинг де-Лаваль соплосидан оқиб чиқишига мос келса, 2'—3' нуқталари оралиғи конфузор-диффузорда g' кг буғнинг сиқилишини билдиради. 3'—4' нуқталарга g кг буғнинг конденсацияланиши тўғри келади. g кг сувнинг қозонда буғланишига 4'—5'—1' нуқталар оралиғи мос келади.

Совитишнинг фойдали эффекти совитиш хонасидаги жисмлардан қанча миқдорда q_2 иссиқликнинг чиққанлигига боғлиқ ва у TS диаграммадаги $a'—4'—5'—1'—$



90-рaсм. Буг оқимли совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б — циклинг TS диаграммаси.

— b' — a' нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. TS диаграммадаги a' — $4'$ — $5'$ — $1'$ — b' — a' нуқталар билан чегараланган юза g кг сувни буғлатишга сарф бўлган иссиқлик миқдорига 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:

$$\xi = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\text{юза } a-4-1-5-a}{\text{юза } a'-4'-5'-a'-a}. \quad (341)$$

Циклдаги иш моддаси энтальпияларининг ўзг'арувчанлиги 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, УзССР ФА акад.). — Т., УзСЭ 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. Узбек Совет энциклопедияси. 1—14 т. — Т., УзСЭ, 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. Гелнотехника. — 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., Шейндлин А. Е. Технический термодинамика. — Т., «Уқитувчи», 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. Ребане 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 ning asosiy birliklari

Катталик	Улчов бирлиги	Улчов бирлигининг ^o		
		номланиши	белгиланиши	
			ўзбекча	халқаро
Узунлик	L	метр	м	m
Масса	M	килограмм	кг	kg
Вақт	T	секунд	с	s
Электр тоининг кучи	I	ампер	A	A
Термодинамик температура	⊙	кельвин	K	K
Модда миқдори	N	моль	моль	mol
Ёруғлик кучи	J	кандела	кд	cd

Унга каррали ва улушли бирликларни 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
$1\ 000\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{15}$	пета	П	P
$1\ 000\ 000\ 000\ 000 = 10^{12}$	тера	T	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
$0,00000 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,000000000 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000000000000 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,000000000000000 = 10^{-15}$	фемто	ф	f
$0,0000000000000000001 = 10^{-18}$	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 сиғими.	20
2.4. Термодинамика биринчи қонунининг талқини.	23
2.5. Энтродия	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

4.5. Нур иссиқлиги алмашинувида экранларнинг қўлланилиши	68
4.6. Газларнинг иссиқликни нур кўринишида тарқатиши (нурлаши).	71
4.7. Иссиқлик алмашинувида фойдаланиладиган асбоб-ускуналар ва уларнинг таснифи	72

V боб. Еқилғи

5.1. Еқилғи ва унинг хоссалари.	78
5.2. Еқилғи турлари.	81
5.3. Еқилғининг ёпиши ва ортиқча ҳаво коэффициенти.	85
5.4. Ёпиш маҳсули ва унинг таркиби	85
5.5. Утхона қурилмалари ва уларда ёқилғини ёқиш усуллари	87

VI боб. Ички ёнув двигателлари

6.1. Ички ёнув двигателлари ҳақида умумий тушунча ва уларнинг таснифи	89
6.2. Ички ёнув двигателлари циклида кетадиган термодинамик жараёнлар	98
6.3. ИЕД индикатори ишининг қуввати ва ФИК	105
6.4. ИЕД эффе́ктив қуввати ва ФИК	110
6.5. ИЕД нинг иссиқлик баланси	
6.6. Пуфлаш ва унинг двигателлари ишлаб чиқаришдаги аҳамияти	113 115
6.7. Ташқи ёнув двигатели	116

ИККИНЧИ ҚИСМ

ИССИҚЛИК КУЧ ҚУРИЛМАЛАРИ

VII боб. Буғ куч қурилмалари

7.1. Иссиқлик энергетикасининг иш жисми — сув буғи.	119
7.2. Буғ куч қурилмасининг назарий цикли	119
7.3. Ораллиқ буғ қиздиргичли буғ куч қурилмаси	125
7.4. Бинар цикли буғ куч қурилмаси.	127
7.5. Қозон қурилмаси, унинг тузилиши ва ишлаш тартиби	130
7.6. Буғ қозонлари	135
7.7. Сув-буғ тайёрлаш ва сув иситиш қозонларидаги жараёнлар	135
7.8. Сув буғининг ҳосил бўлишидаги айрим физик жараёнлар	140
7.9. Сув буғи ва уни тайёрлашдаги асосий термодинамик жараёнлар	143
7.10. Сув агрегат ҳолатининг ўзгаришида иссиқлик алмашинуви.	150
7.11. Буғ қозонининг иссиқлик баланси ва ФИК	154
7.12. Қозон қурилмаларининг ёрдамчи ускуналари.	157

VIII боб. Буғ турбинаси

8.1. Буғ турбинасининг таснифи, тузилиши, ишлаш тартиби ва унда кечадиган термодинамик жараёнлар.	159
8.2. Буғ турбинасидаги исрофлар	171
8.3. Буғ турбинасининг қуввати ва ФИК	172

IX боб. Газ турбиналари

9.1. Газ турбинасининг таснифи, тузилиши ва ишлаш тартиби.	173
9.2. Газ турбиналари қурилмалари ва уларнинг циклидаги термодинамик жараёнлар	174
9.3. Иссиқлик $P = \text{const}$ да узатиладиган газ тақсимлаш қурилмаси (ГТҚ)	181
9.4. Регенерацияли ГТҚ	184
9.5. Иссиқлик $P = \text{const}$ циклга келтириладиган босқичли сиқиш, ёниш ва регенерацияли ГТҚ	187
9.6. ГТҚ нинг татбиқи	191

XI боб. Иссиқлик электр станциялари

10.1. Реактив двигателларнинг таснифи, турлари, тузилиши ва ишлаш тартиби	191
10.2. Реактив двигатель циклидаги термодинамик жараёнлар	195
10.3. Тўғри оқимли ҲРДлар ва уларнинг циклидаги термодинамик жараёнлар	197
10.4. Пульсацияли ҲРД ва унинг циклидаги термодинамик жараёнлар	200
10.5. Ракета двигателлари	201

XI боб. Иссиқлик электр станциялари

11.1. Конденсацияли электр станцияси (КЭС)	204
11.2. Иссиқлик электр маркази (ИЭМ)	206
11.3. Магнитогидродинамик (МГД) генератор	208
11.4. Термодинамик генератор	217
11.5. Термоэмиссион генератор	221
11.6. Атом электр станцияси.	223
11.7. Термоядро синтез энергетикаси	227
11.8. Гелиоэнергетика	231
11.9. Геотермал электр станцияси.	233

XII боб. Совиткич қурилмалар (Илова)

12.1. Идеал совиткич қурилмаси ва унинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар	235
12.2. Ҳаво билан совитиш қурилмаси	237
12.3. Сиқилган буғ билан совитиш қурилмаси.	239
12.4. Буғ оқимли совитиш қурилмаси	243

Адабиёт

247

**ЖУРАҚУЛ НУРМАТОВ
НУРИДДИН АББОСОВИЧ ҲАЛИЛОВ
УТҚИР ҚАРШИЕВИЧ ТОЛИПОВ**

ИССИҚЛИК ТЕХНИҚАСИ

(Ўқув қўлланма)

Тошкент «Ўқитувчи» 1998

Муҳаррир Д. Аббосова

Расмлар муҳаррири Ф. Нехқадамбоев

Техник муҳаррирлар: Э. Вильданова, С. Турсунова

Мусаҳҳиҳ М. Иброҳимова

ИБ № 7308

Теришга берилди 28.05.98. Босишга рухсат этилди 26.10.98. Бичими 84×108¹/₃₂. 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.

СГП

Н 87

Нурматов Ж. ва бошқ.

Иссиқлик техникаси: Олий ўқув юртлари та-
лабалари учун ўқув қўлланма/Ж. Нурматов,
Н. А. Ҳалилов, У. Қ. Толипов. — Т.: «Ўқитувчи»,
1998. — 256 б.

1.1,2 Автордош.

ББК 31.3я7

