

Ж.Нурматов, Н.А.Халилов, Ў.Қ.Толипов

888

ИССИҚЛИК ТЕХНИКАСИ



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

621.03
Н-84

ИССИКЛИК ТЕХНИКАСИ

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

внқри
глари
ми ва
дрлар
к жа-
иасъу-

фой-
ириш,
исала-
атиш,
юкла-

дина-
иқлик
а қо-
а туғ-
яра-
ишда

дирий
тё-тех-
руза-
а қо-
шина-
илган.

ишлар

БИБЛИОТЕКА
Бух. ТИП и ЛП
№ 4 2304

ТОШКЕНТ «УЎҚИТУВЧИ» 1998

Ушбу ўқув қўлланма олиб, унда жалланган бўлиб, унда ва қондаларига на ула, содир бўладиган термодинамик энергиясини машиналар қурилган иссиқлик машиналарида салалари фан ва техника арабларга қаратилган. Иссиқлик гэн. Советни қурилмалари электр энергияга айлантириш ма баён қилинган. ютуқларга таянган ҳолда ёритил-

Қўлланмадан олий ўқув ўқитиладиган факультетлар лари талабалари ҳам фида қилинган. ларининг «Умумтехника фаилари» айрим ўрта махсус билим юрт- лари мумкин.

Тақризчилар:

доц. И. А. И

доц. А. И

Исянов, доц. С. Х. Ҳақимов,
Исоқулов, доц. Э. К. Қурбонов.

2203010000—05

© «Ўқитувчи» нашриёти,
«Зиё-Ношир» ҚШК, 1998

СУЗ БОШИ

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

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

Энергетик манбалар асосини ўрганишда термодинамика фани ва унинг амалий қисми бўлган иссиқлик техникаси асосий ўрин эгаллайди. Термодинамика қонуनларини 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. Қодиррий 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 юзидинг 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 маънавий ва маданий шаронтининг яхшиланишига ҳам ижобий таъсир кўрсатади. Энергетик бойлик захирасидан тўғри фойдаланиш мамлакатини энергетик инкироздан сақлайди. Ҳозирги даврда энергия бойлигидан самарали фойдаланилапти деб бўлмайди. Иссиқлик энергиясининг, кўп қисми асбоб-ускуналардан по-

туғри фойдаланиш, самарасиз ускуналарнинг қулланилиши 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, ундай кейин оз миқдорда нефть ва тошкўмир, дарёларнинг потенциал энергиясида фойдаланилади.

Энергетика захираларидан туғри фойдаланилмаслик оқибатида Ердаги экологик мувозанат ёмонлашиб бормоқда.

Атом энергетикаси сунъий энергетик манбалардан энг қувватлиси бўлиб, жаҳон бўйича унинг қурилмаларини такомиллаштириш ҳисобига радиоактив моддаларнинг атроф-муҳитга тарқалмаслик ва инплатиб бўлинган уран ёқилгисини 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 сунъий 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 б о б. 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, исбатлар орасидаги муносабатларни ўрганадиган фандир. Термодинамика табиатнинг универсал қонунидан (энергиянинг айланиши ва сақланиши) фойдаланиб, иссиқликнинг техникада қўлланилишида содир бўладиган термодинамик жараёнлар ечимини ҳал этади. Термодинамика фанининг мақсади бир неча содда қондалар — термодинамика қонунлари ёрдамида очиб берилди.

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 вақтни техникавий термодинамиканинг пайдо бўлган ва ривожлана бошлаган вақти деб ҳисобласа бўлади.

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

* Илмий мақола эълон қилинган йиллар.

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

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

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

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

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

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

Иссиқлик техникаси соҳасида ишлаётган олимларнинг баракали ижоди натижасида наст сифатли (қуниғир кўмир, ёнувчи сланецлар, торф ва ш. 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. Ердати ва космонавтикадаги иссиқлик техникаси қурилмаларида (иссиқхоналар, иситгич ускуналари, электр токни ишлаб чиқаришда ва ш. к.) Қуёш нуридан самарали фойдаланилмоқда.

Энергетиканинг яна бир чегараланган соҳаси атом энергетикасидир. Актиноидлар гуруҳидаги U^{235} , U^{238} , Th^{232} , Pu^{239} элементлар ядролари, молекулаларининг иссиқлик энергияси даражасидаги энергияга эга бўлган ва жадал нейтронлар таъсирида 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 туғдиради. 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 қонунқоидаларига 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-рузгор иситгич аппаратларида ҳам кенг қўлланилади.

Маълумки, машина ва механизмлар деталлари ҳаракати вақтида уларнинг сирпаниш нуқталари орасида ҳосил бўладиган ишқаланиш натижасида иссиқлик пайдо бўлади. Иссиқликни ҳисоблашда, ички ёнув двигателларида ёниш жараёнини туғри ростлашда, улардаги ортиқча иссиқликни ташқарига чиқаришда, материаллар мустаҳкамлигининг ва электр қаршилигининг температурага боғлиқлигини, электр ва магнит майдонлари қийматларининг пулат узак температурасига боғлиқлигини ўрганишда иссиқлик техникаси фани умум-машинашунослик курсида муҳим ўринни эгаллайди. Бу жараёнларни билмасдан туриб ўқувчиларга политехник меҳнат таълими туғрисида 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 тула иссиқлик миқдорига нисбати билан ўлчанадиган катталиқ иссиқлик машинасининг термик ФИҚ дейилади ва у ҳар доим бирдан кичик бўлади:

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

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 буладиган энергия — иссиқликдир.

Молекуляр-кинетик назария нуқтан назаридан тунтирилган бу гоёни XVIII асрда Д. Бернулли ва Вальтер ривожлантирди. XIX асрга келиб иссиқлик ҳақидаги гоёни 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. Чуқки, 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 дегайда ёқилғининг (бензин, мазут, керосин, соляр мойи, газ ва газлар аралашмаси, порох, сув буғи, зарралар ёки плазма оқими) ҳар хил турлари тушунилади. Масалан, ички ёнув двигателларида бензин буғи билан ҳаво аралашмаси иш жисми ҳисобланади. Иш жисми ҳисобига иссиқлик ҳосил қилинади, узатилади ва ортиқчаси совитгичга чиқарилади ҳамда маълум миқдорда иш бажарилади. Бу иссиқлик миқдорининг катталиги иш жисмининг иссиқлик бериш хусусиятига боғлиқ.

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

қоқ газ), H_2O — сув буғи, табиий ва синтeий 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. Кўнчилиқ 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. Келтирилган мисолимизда идеал газни (иш жисмини) ўраб турган цилиндр деворлари ва поршень каллагининг устки юзаси ташқи муҳит бўла олади. Термодинамик системадаги жараён назорат сиртида юз беради. ИЕД (ички ёнув двигатели) цилиндри девори билан поршень каллагининг устки юзасидан ташқи топган сирт буига мисол бўла олади. Термодинамик система назорат ҳажмида жойлашади ва шу ҳажмда термодинамик жараён (иш аралашмасининг ёниши) содир бўлади.

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

Ҳолат параметрларига солиштира 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:

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

Газ молекулалари хаотик (тартибсиз) ҳаракатланиши натижасида улар идиш деворларини узлуксиз бомбардимон 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 нисбатан жадалроқ узатилади.

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

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

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

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

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

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

буида, $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ 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 нуқтаи назаридан қаралса, унда ўзгармас ҳажмдаги идеал газ босими шу газнинг абсолют температурасига мутаносибдир, яъни $P \approx T$. Шу ҳолат асосида газ термометр-

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.3 Системанинг ҳолат тенгламаси

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

лади. Термодинамик системанинг мувозанати унинг параметрлари орасидаги боғланиш функцияси шаклида ифодаланadi ва у термодинамик системанинг ҳолат тенгламаси дейилади. Иш жисмининг (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 бошқачарoқ ифодаланadi:

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

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

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

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

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

Реал газдан термодинамик система сифатида фойдаланилганда газ молекулалари орасидаги тутунуш 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:

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

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

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

Оқоридагилардан 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 ($P = \text{const}$), озотермик ($T = \text{const}$), адиабатик ($S = \text{const}$), политроп ($PV = \text{const}$) бўлиши мумкин.

Бу жараёнларни кейинроқ қараб чиқамиз.

II 606. 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 алгебраик йиғиндиси система (модда)нинг ички энергияси ҳисобланади. У модданинг термодинамик ҳолатини характерлайди. Ички энергия тушунчасини фанга 1850 йили В. Томсон киритган.

Молекуляр-кинетик назария нуқтаи назардан 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 йиғиндисидан 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 ичкарасидаги (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 ҳажмининг ўзгаришига олиб келади. Демак, потенциал энергия ҳажмининг функцияси экан.

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

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

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

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

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

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

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

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

Модда бир термодинамик ҳолатдан иккинчисига ўтга-

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

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

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

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

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

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

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 таъланган модданинг ички энергиясининг математик ифодасини модда турига мос равишда, турлича кўринишларда ёзиш мумкин (Физика курсига қараи).

2.2. Модданинг кенгайишида бажарилган иш

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2.3. Модданинг иссиқлик сифими

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

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

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

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

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

а) солиштирма масса иссиқлик сифими:

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

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

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

СИ ўлчов бирлигида C_v Ж/м³·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:

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

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:

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

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

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

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

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

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

$$C_p = C_v + R \text{ ёки } R = C_p - C_v. \quad (2)$$

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

баббли $\left. \frac{\partial u}{\partial V} \right|_T = 0$. 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, молекулаларaro 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 сифмларини 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 сифмлари топилади. Масалан, айрим моддаларнинг $t = 0^\circ\text{C}$ да идеал газ ҳолатидаги иссиқлик сифмлари 1-жадвалда келтирилган.

Газнинг номи (формуласи)	Эркинлик даражалари сони	Моляр иссиқлик сигими, 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 ангидри (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 қонунини деб-юритилади.

Термодинамиканинг 1-қонунини масса ва энергия сақланиши ва айланиши 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 (ϵ чиқарилганида) ўзгаради. Система мувозанат ҳолатидан чиқади ёки мувозанат ҳолатига қайтади.

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

Демак, системанинг температураси dT га ортса, уни ташкил этган зарраларнинг кинетик энергияси ҳам ортади; ҳажми dV га катталашганида зарралар орасидаги тугуниш 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:

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

Системада ўтаётган термодинамик жараёни турига қараб, қонунининг 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, у s ҳарфи билан белгиланади:

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

Энтропия термодинамик система билан ташқи муҳитнинг ўзаро иссиқлик алмашишуви 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 фақат 1865 йил Клаузис кiritган. 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. Нерст (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. Нерст принципи ёки термодинамиканинг учинчи қонуни дейилади.

Модданинг абсолют температураси нолга яқинлашса, моддани ташкил этган зарралар ҳаракати деярли тўхтайдди. Демак, термодинамик системанинг абсолют температураси нолга яқинлашади, аммо мутлақо нолга эришлямайди, яъни модда ҳар қанча ўта паст температурагача совитилганида ҳам зарраларининг 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. Амалиётда 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 йиғиндисини энтальпия дейилади.

Энтальпия энергия ўлчов бирлиги (Жоуль) да ўлча-нади:

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

Тенгламадан кўриниб турибдики, унга кирган катта-ликлар термодинамик системанинг ҳолат функцияси ҳисобланади, шунинг учун i ни ҳам функция кўриниши-да 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 эгалла-ган ўрнини изожаараёнларни ўрганганимизда қараб чи-қамиз.

2.7. Термодинамик жараёнлар

Изожараёнларни ўрганиш асосида ҳар бир термоди-намик жараёнда бажарилган ишни, система ички энер-гиясининг ўзгаришини, сарфланган иссиқлик миқдорини

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

Изохорик жараён. Системанинг узгармас солиштирма ҳажми $V = \text{const}$ да юз берадиган термодинамик (физик ва кимёвий) ҳодисалар мажмуига *изохорик жараён* дейилади. Жараёни тасаввур қилиш ва аниқлаш мақсадида мисол тариқасида цилиндрнинг тенг юқори қисми ва поршень каллагининг юзаси билан чегараланган ҳажм (ёниш камерасига)га иш моддаси (газ ва ҳаво аралашмаси)ни киритиб, поршени 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:

$$P_1 V_1 = RT_1, \\ P_2 V_2 = RT_2.$$

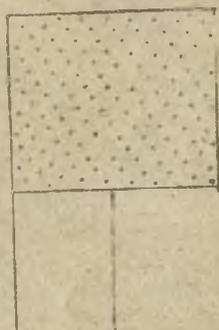
Тенгликларнинг нисбатларидан Шарль қонуни ифодаси ҳосил бўлади, чунки $V_1 = V_2 = \text{const}$.

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

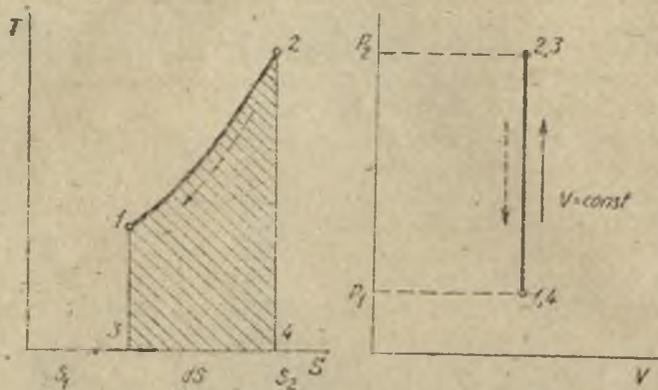
Демак, изохорик жараёнларда босимлар нисбати абсолют температуралар нисбатларига тенг бўлади, яъни босим узариши бу жараёндаги абсолют температура узаришига тўғри мутаносибдир.

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

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



1-расм. Узгармас 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 сизими орқали ифодалаймиз.

Маълумки, бир киломоль модда массасини 1° иситиш учун зарур бўлган иссиқлик миқдори шу модданинг иссиқлик сизими 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 содалаштирамиз:

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

ёки

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

чунки $\frac{P}{T} = \frac{R}{V}$.

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

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

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

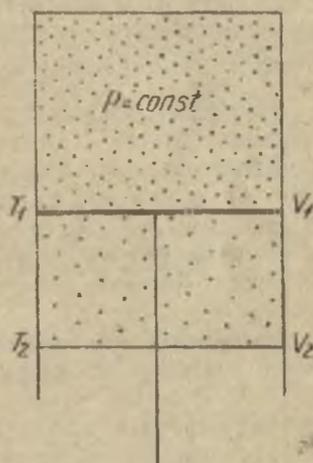
Бу тенгликни интеграллаб, газ ҳолатининг охириги ўзгариши учун энтропия ўзгарувчанлиги ифодасини ҳосил қиламиз:

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

Изохорик жараёнда $V = \text{const}$ бўлганлиги учун тенгликнинг ўнг томонининг иккинчи қисми полга 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. Ҳазармас 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 (ёпиш 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 қонуни-нинг ифодасини ҳосил қиламиз:

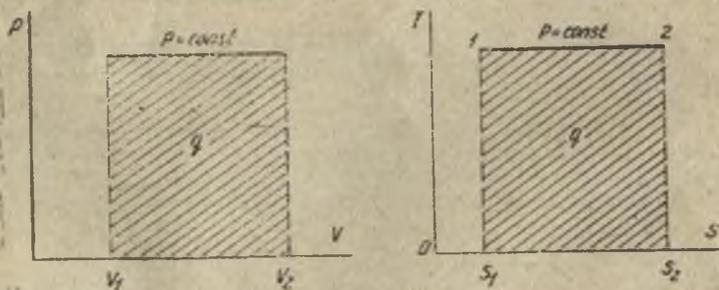
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{ёки} \quad V_1 T_2 = V_2 T_1. \quad (48)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

$$S_2 - S_1 = C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{T_2}{T_1} = (C_V + R) \ln \frac{T_2}{T_1} = C_1 \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (51)$$

Майер тенгламаси $C_p - C_V = R$ дан фойдаланиб, моляр иссиқлик сизимлари айирмаси $\mu C_p - \mu C_V = \mu R$ дан $R_0 = \mu R = R_0 = 8314$ Ж/моль·К.

Изобарик жараёндаги термодинамик системанинг бажарган ишининг катталигини жараён бошланишидаги ва охиридаги ҳажмлар айирмасининг босимга кўнайтмаси 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° булса, изобарик жараёнда термодинамик системанинг бажарган иши универсал газ доимийси қийматига тенг булади:

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

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 буг машиналарида, дизель двигателларида ва қозонларнинг ўтхоналарида учрайди.

Термодинамик системага узатилган иссиқлик миқдорини энталпия орттирмаси тушунчасидан фойдаланиб аниқлаймиз.

Системага узатилган иссиқлик миқдорини бирор ички 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 системага 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:

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

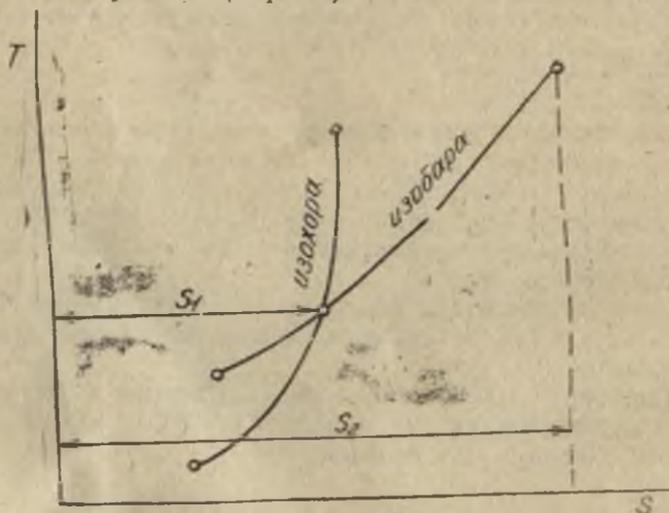
Термодинамик системага узатилган иссиқлик миқдори $P = \text{const}$ бўлганда, $VdP = 0$ бўлади. Шунинг учун энтальпия қийматининг катталиги иссиқлик миқдорига тенг, яъни

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

Демак, системага узатилган иссиқлик миқдори энтальпиянинг ўзгаришига тенг экан.

TS — диаграммада изохора ва изобаранинг жойлашуви.

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



5-расм. Изохора ва изобаранинг TS координатада жойлашуви.

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

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

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

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

TS — диаграммалар айланма жараёнлардаги термодинамик ҳодисалар таҳлилида кенг қўлланилади.

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

Изотермик жараён

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

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

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

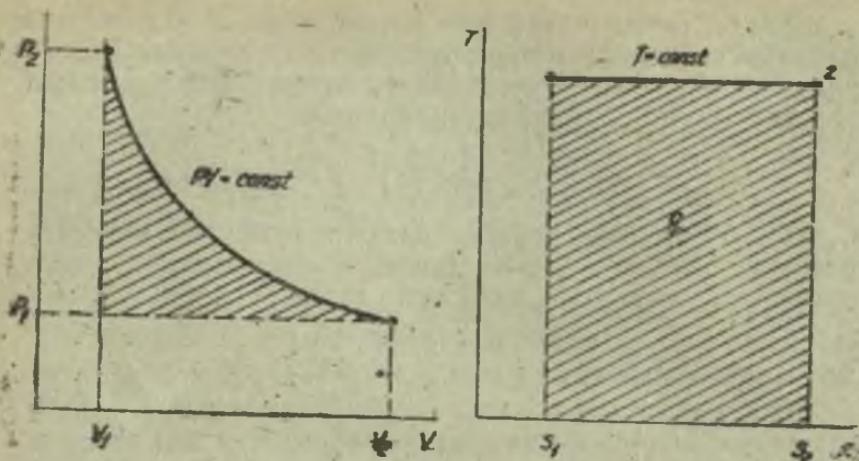
$T = \text{const}$ бўлганлиги учун $T_2 = T_1$. Бойль-Мариотт қонунининг ифодаси система ҳолат тенгламаларининг нисбатидан топилади:

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

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

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

Бу тенглик изотермик жараён асосида қараб чиқилса,



6-расм. Изотермик жараёнинг 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 ҳажминини ўзгартириб, ташқи таъсир кучига қарши механик иш бажаришга сарфланади:

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

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 $\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$ боғлиқликни назарга олиб, (62) тепгликни босим орқали ифодалаш мумкин:

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

ёки

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

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

Жисмининг 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. Соддалаштириш ва тенглама моҳиятини билиш мақсади (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 ўтказди ва қайтаради. Бунга мисол қилиб музни, қорни ва шишани келтириш мумкин. Муз ва қор учун $A = 0,95 - 0,98$ бўлса, шиша учун $A = 0,94$.

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

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

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

$$E_{\text{эф}} = RE_T + E.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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-расмда қуриниб турибдики, жисмнинг температураси орттирилса, унинг нур тарқатиш жадаллигининг максимуми кеска тўлқин томонга силжийди. Бу қонуниятни В. Вин 1893 йили кашф этган ва унинг математик ифодасини берган:

$$\lambda_{\max} = 0,0028989/T \quad (131)$$

ёки

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

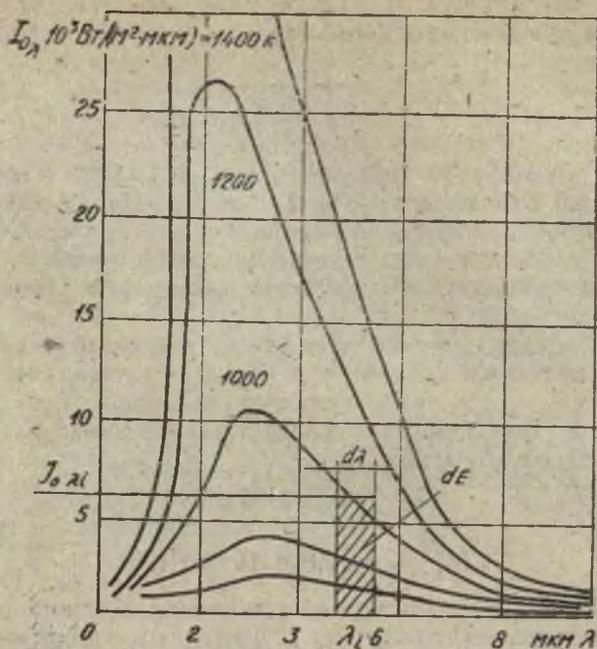
Бу В. Виннинг силжиш қонуни дейилади. Силжиш қонунига мувофиқ жисмлар нур қуринишида тарқатадиган электромагнит тўлқинларнинг жадаллиги ҳар хил температурада турлича бўлади. Масалан, электр иситкичининг $T = 1100$ К бўлганда, у $\lambda_{\max} = 3 \cdot 10^{-6}$ м бўлган тўлқин узунлигини нурлантиради,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

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

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

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

Демак, абсолют қора жисмнинг бирлик юзадан вақт бирлиги ичида нур тарқатиш қобилияти (ҳамма тўлқин 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 $C_0 = \varepsilon_0 \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — абсолют қора жисмнинг нур тарқатиш қобилияти.

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

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

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:

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

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 коэффициентиغا нисбати жисм табиатига боғлиқ бўлмайди ва у абсолют қора жисмнинг шу температурада чиқарган нур энергиясига тенг булар экан. Жисм узидан қанча кўп нур чиқарса, шунчасини ютади, яъни ютган ва чиқарган нурнинг тулқин узунликлари бир хил бўлади:

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

Кулранг жисмнинг нур ютиши иссиқлик манбаига ва узининг температурасига боғлиқ бўлмайди. Жисм сиртига перпендикуляр йуналишда 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 $\varepsilon = \frac{E}{E_0}$ нисбатдан кўринадики, жисмининг қоралик даражаси, яъни абсолют қора жисмга бошқа жисмининг нур ютиш ва чиқариш хусусияти жиҳатидан яқинлашуви орқали уни термодинамик нуқтан 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 тулароқ фойдаланилмайди. Ўтхонадаги ўзаро параллел сиртларнинг иссиқлик алмашинувини қуйидагича ифодалаш мумкин:

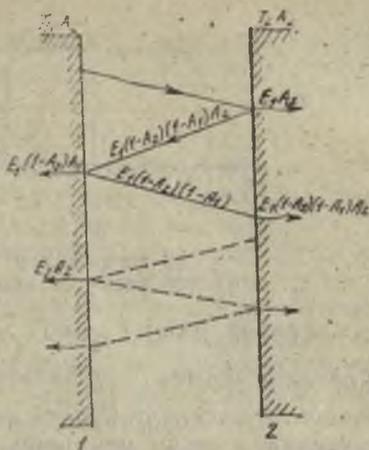
$$q = SC_0 \varepsilon_k \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

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

4.5. Нур воситасида иссиқлик алмашинувида экранларнинг қўлланилиши

Нур иссиқлиги энергияси оқимининг жаддаллиги 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). Ёруғлик 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 техникасида кенг қўлланилади. Масалан, алюминий ва унинг қотишмаларидан тайёрланган пардалар, алюминий упаси иссиқлик техникасида қўлланилади. Бунга асосий сабаб, алюминий упасидан тайёрланган пардалар иссиқлик нурларини юқори даражада қайтаради ва ютади, яъни ҳам испиткичдан, ҳам ташқаридан келадиган иссиқлик нурларини ютади ҳамда тарқатади. Амадда технологик жараёнда бундай пластинка (парда) ларни тайёрлаш мумкин. Уларнинг



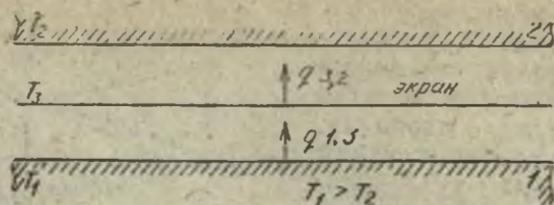
17-расм. Икки параллел сиртларнинг нур иссиқлик алмашинуви.

қоралик даражаси $E_{к.э} = \frac{\sigma}{\sigma_0}$ (абсолют кулранг жисм нур тарқатиш коэффициентининг абсолют қора жисм нур тарқатиш коэффициентига σ_0 га 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 энергиясининг орттиригандан 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 $E_1 = E_2 = \epsilon_{к.э} = \epsilon$ бўлсин. Унда, албатта $T_1 > T_2$ бўлади. Иссиқ ва совуқ сиртлар оралигидаги экраннинг пардасимонлигини эътиборга олсак, у ҳолда экраннинг иккала сиртидаги температуралар бир



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

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

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

Экрандан иккинчи деворга узатилган иссиқлик миқдори қуйидагича ифодаланади:

$$q_{2,2} = \epsilon_k C_0 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right]. \quad (141)$$

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

$$\left(\frac{T_3}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right]. \quad (142)$$

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 ифодасини ҳосил қиламиз:

$$q_{1,2}^0 = q_{1,3} = q_{3,2} = \frac{1}{2} \left\{ \epsilon_2 C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \right\} \quad (143)$$

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 учоқ ҳамда камераларда ёқилгини 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 куплиги ёки ёниш жараёнида уларнинг ҳосил бўлишидир. Сув буғу ва карбонат ангидрид ёқилгининг ёнишидан ҳосил бўлиши маълум даражада нур иссиқлиги алмашинувини жадаллаштиради, маълум миқдорда сусайтиради. Газларнинг аксарияти маълум тўлқин узунликдаги нурларни чиқаради, яъни чиққан нур кенг оралиқдаги тўлқин узунликларини қамрамадан, аниқ узунликлардаги тўлқинлардан ташкил топади. Газлар тарқатган спектрининг тор оралиқдаги тўлқин узунликларидаги энергияни ютади ва чиқаради. Тарқалган нур спектрининг кўзга кўринадиган қисмида карбонат ангидрид ва сув буғи нур чиқармайди ва ютмайди. Бу газлар тарқатган нур спектрининг узун тўл-

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

Атмосфера таркибидаги углерод икки оксиди (CO_2) миқдори йил сайини маълум даражада кўпайиб бориши эҳтимоллиги ҳозирги кунда сир эмас. Бунга асосий сабаб инсон техникадан, саноат кўрхоналаридан туғри фойдалана олмаяпти, яъни ёқилғининг тўла ёниши таъминланмаяпти. Атмосферадаги карбонат ангидрид гази қисқа тұлқинли нурларни ёмон ва узун тұлқинлисини яхши ютади. Бундай ҳодиса иқлимнинг илиқ бўлиши ва «иссиқхона» эффектнинг пайдо бўлишига олиб келиши мумкин.

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

Газ ўзини ўраб турган муҳитга тарқатган нур оқимининг зичлигини юқорида қараб чиқилган нур тарқатиш жараёнларига 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

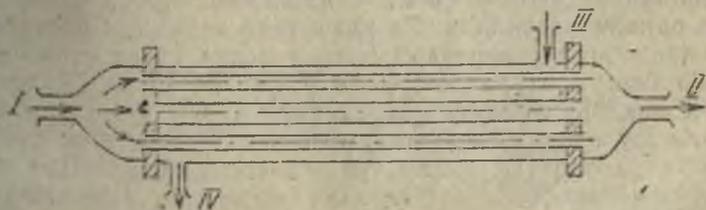
Иссиқлик элтувчи модда (сув, буғ, ҳаво, антифриз, мойлар ва ш. к.) ни иситиш ёки совитишда турли хил қурилма (мосламалар)дан фойдаланилади. Бундай қурилмага радиатор (лат. radio — нур тарқатаман), конденсатор (лат. condensa — зичлайман, суюқлаптираман), ҳар хил трубалар тўплами ва ш. к. лар мисол бўла олади. Иссиқлик ташувчи модданинг иссиқлиги иссиқлик алмашинув асбоблари девори ёки иссиқ модданинг совуқ моддага аралашини 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 олиндиган), 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 илқ сув билан аралаштирилади, сунгра 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.

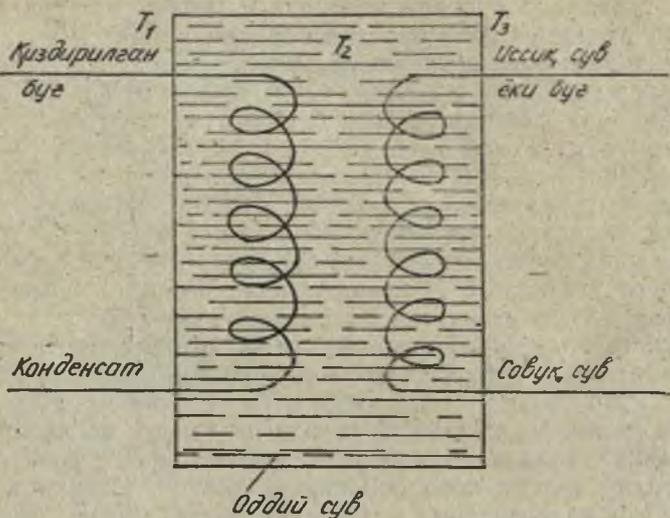
Рекуператив иссиқлик алмаштиргичда атмосферага чиқиб кетадиган газлар иссиқлигидан фойдаланилади. Бунда иссиқлик миқдори совиткичга оралиқ қаттиқ девор орқали узатилади. Иссиқлик ташувчи ва совиткич йўналишига қараб туғри, тескари, кесинган, аралаш оқимли ва сиртларнинг геометрик шаклига кўра ясси, юмалоқ,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

Регенератив иссиқлик алмашинувида атмосферага (циклга қайтарилаётган буғ) чиқарилиб юбориладиган газ (ёниш маҳсулоти) таркибидаги иссиқлик миқдоридан янгитдан киритилаётган газ, буғ, сув, ёқилғи, ёнилғи ва ҳаво аралашмасини иситишда қулланилади. 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 ғилофли рекуператив иссиқлик алмаштиргич: I — сув буғи; II — илқ сув (конденсат); III — иситиладиган модда; IV — иситилган модда.



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

сиқбардош (шамот, магнезит) ғиштлар териб чиқилади. Иссиқ газ оқими аввал иссиқбардош ғиштларга асосий иссиқлик миқдорини беради, сунгра атмосферага ёки бошқа иссиқлик алмаштиргичга йуналтирилади. Ғиштдаги иссиқлик металл листга, у эса суюқликка иссиқликни узатади. Оралиқ иссиқлик ташувчи муҳит қаттиқ девор, суюқлик ёки буғ булиши мумкин. Атом реакторининг биринчи берк контурида иссиқликни ташувчи (совиткич) сифатида оғир сув ишлатилади (20-расм), унинг актив зонасидаги иссиқлик шу сув ёрдамида ташқарига чиқарилади. Контур берк бўлганлиги сабабли, ташқи иссиқлик алмаштиргич резервуаридаги сувга иссиқликнинг асосий қисми спиралсимон қувур деворлари орқали узатилади. Уэ навбатиде, 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 испувчи билан исувчи моддалар ўртасида юпқа қаттиқ девор булади. 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:

$$q_1 = i - i_2 = m_1(C_p' t_1 - C_p'' t_2), \quad (145)$$

бунда q_1 — системага келтирилган тулиқ иссиқлик миқдори;

m — иссиқлик элтувчи массасининг сарфи; c_p' ва c_p'' ўзгармас босим остида иссиқлик элтувчи модданинг мос равишда t_1 ва t_2 температуралардаги иссиқлик сизимлари.

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

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

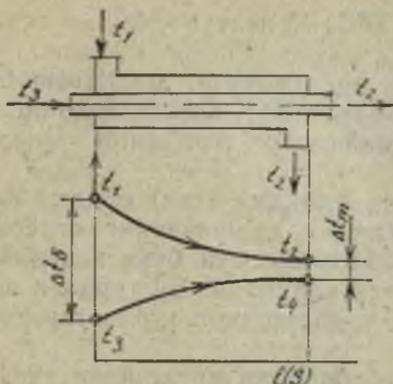
бунда η — асбобнинг ФИК.

Совиткич қабул қилган иссиқлик миқдорини энтальпия айирмаси сифатида ёза оламиз:

$$q_2 = i_3 - i_4 = m_2(C_p' t_3 - C_p'' t_4)$$

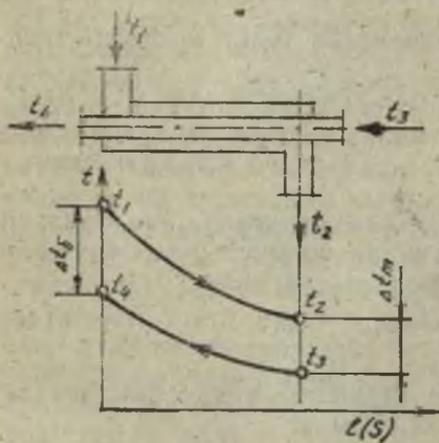
ёки

$$q_2 = \eta q_1 = \eta(i - i_2) = \eta m_1(C_p' t_1 - C_p'' t_2), \quad (147)$$



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

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



22-расм. Иссиқлик элткичининг иссиқлик алмашинуви асбобда тескари оқимли ҳаракати схемаси, t ва t нинг боғланиш диаграммаси.

бунда t_1 ва t_2 — иссиқлик элтувчи модданинг асбобга киришидаги ва ундан чиқишидаги температура-лари; t_3 ва t_4 иссиқликни қабул қилувчи модданинг асбобга киришидаги ва ундан чиқишидаги температура-лари.

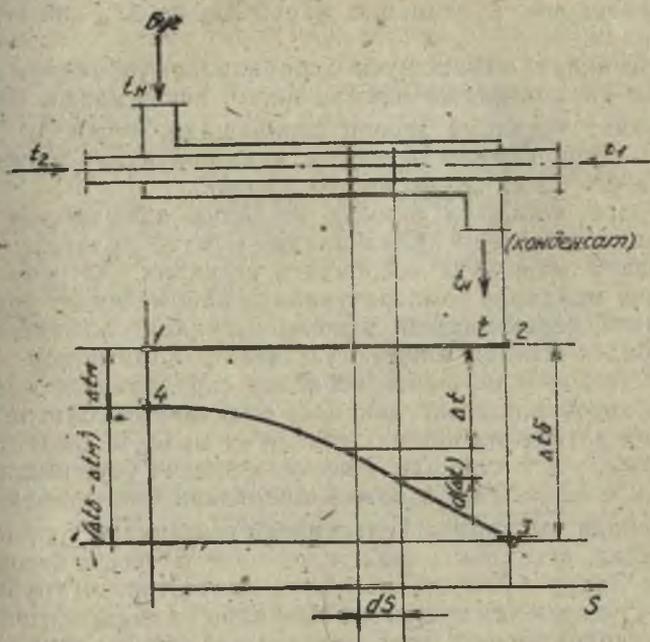
Иссиқлик элтувчининг температураси пасайиб борса, иссиқлик ютувчининг температураси кўтарилиб боради. Иссиқлик элтувчи билан иссиқлик ютувчи моддалар оқимлари параллел бўлганда иссиқлик бирида камайса, иккинчисида ортади (21-расм).

сик модданинг совуқ моддага узатган иссиқлик миқдорини тақрибан қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

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

α_1 ва α_2 — иссиқ ва совуқ суюқлик оқимининг иссиқлик бериш коэффицентлари; λ — иссиқлик утказувчанлик коэффиценти; l — юққа девор қалинлиги;



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

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

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

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

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_m қийматлар ўзгаради.

Иссиқлик алмашинуви асбобларидан купчилик 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 қараи).

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. Сунгра 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 сунг, 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 иссиқликчи ютувчи моддаларининг иссиқлик алмаштиргичдан чиқишидаги температураси маълум бўлиши шарт. Ҳисоблаш ишларида ҳозирги кунда албатта ЭҲМ дан фойдаланилади.

V б о б. 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 ёқилғи узидан иссиқлик чиқаради. Ёқилғига қуйидаги талаблар қўйилади: ёниш вақтида куп миқдорда иссиқлик чиқариш; ёниш маҳсулотида табнатга зарар етказадиган моддалар миқдорининг кам бўлиши; тез ва тўла ёниши; қазиб олиш арзон бўлиши ва қайта ишлаш ҳамда транспортда бир жойдан иккинчи жойга кучиришнинг осон бўлиши. Ёқилғи қазиб олиниши ёки тайёрланишига кўра табиий ва сунъ-

ий бўлади. Табиатда ишлатишга тайёр ҳолда мавжуд бўлган ёқилғилар табиий ёқилғилар дейилади. Қазиб олиннадиган тошқумир, ёнувчи сланецлар, торф, нефть, газ, ўтин, қишлоқ хўжалиги ишлаб чиқариши чиқиндилари табиий ёқилғи ҳисобланади. Табиатдаги ёқилғиларни ёки умуман моддаларни қайта ишлаш натижасида олиннадиган 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 олиннадиган газлар киради.

Ёқилғи қаттиқ, суюқ ва газ ҳолатида бўлади. Қаттиқ ёқилғига тошқумир, 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, тошқумир қазиб олишда олиннадиган 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. Бу кимёвий элементлар ва улар бирикмаларининг миқдори турли хил ёқилғида турлича бўлади. Масалан, нефть ва унинг маҳсулотлари таркиби асосан углерод ва водороддан ташкил топган.

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

Газдаги водород ва углероднинг умумий миқдори 0,3 дан 95% гача. 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.

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

ёқилгининг иш қисми

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

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

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

5-жадвал

Қаттиқ ва суюқ ёқилғининг таркибий қисми

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

Ёнувчи газнинг таркибий қисми

Газ тури	Қуруқ газ ҳажмидаги модда миқдорлари, %							
	СН ₄	Н ₂	СО	С ₂ -Н ₂	О ₂	СО ₂	Н ₂ Ѕ	Н ₂
Табий (Бу-хоро)	94,9	—	—	3,8	—	0,4	—	0,9
Кокс гази (то-залянган)	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
Суялтирилган газ	4	қолгани бошқа газлар: пропан 79%, этан 6%, водород, изобутан 11%.						

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

5.2. Ёқилғи турлари

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

Ёнувчи масса таркибига кирган кимёвий элементлар реакцияга киришида (ёнишида) ажралиб чиқадиган иссиқлик миқдори ҳамма элемент учун бир хил эмас. 1 кг углерод тўла ёнганда СО₂ 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 кслород билан тўла реакцияга ки-

риша олмаганлигидан заҳарли углерод оксиди CO ҳосил бўлади. Ёқилғидаги олтингугуртнинг реакцияга киришидан эса сульфид ангидриди SO_2 ҳосил бўлади. У ёқилғи таркибидаги намликдан вужудга келган сув буғи билан 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 парчаланиши натижасида енгил суюқ маҳсулотлар олинади. Мазут $84\text{—}86\%$ гача углерод (ёқишга яроқли) ва $10\text{—}12\%$ водороддан ташкил топган бўлиб, у мотор ёқилғиси ёки қозон қурилмаси ёқилғиси сифатида ишлатилади.

Газ ёқилғиси, асосан табиий газ бўлиб, унинг таркиби метан (ботқоқ гази) CH_4 , водород H_2 , азот N_2 , юқори даражадаги углерод бирикмалари CH , углерод оксиди CO , карбонат ангидриди CO_2 дан иборат. Бу газларнинг миқдори газ копининг ҳаммасида ҳам бир хил эмас. Турмушда ишлатиладиган газ тозалангандан сунг, 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 тушунчаси киритилган. Иш ёқилғисининг бирлик массаси тўла ёнганда ажралган иссиқлик миқдори ёниш иссиқлиги дейилади. Ёниш иссиқлигининг ўлчови кЖ/кг ёки кЖ/м^3 . Ёқилғининг ёнишида ажраладиган иссиқлик миқдори юқори ($q_{\text{ю}}^n$) ва қуйи (q^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 ($q_{\text{ю}}^n$) иссиқлик ажралиш дейилади. Ёқилғининг бирлик массаси ёнганда унинг таркибидаги намлик ҳамда водороднинг кислород билан реакцияга киришиши жараёнида ҳосил бўлган намлик ҳисобга олинган ҳолатда ажралган иссиқлик миқдори қуйи иссиқлик ажралиш дейилади. Шунинг учун бу исроф эътиборга олинганда ҳисоблар тўғри бўлади. Масалан, 1 кг водород кислород билан реакцияга киришиши жараёнида 9 кг сув ҳосил бўлади. Табиийки, ҳар қандай ёқилғи таркибида ва ёниши 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, $q_{\text{ю}}^n$ билан $q_{\text{к}}^n$ орасидаги боғланишни қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

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

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

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

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

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

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

$$q_g^u = 10^6 (12,8CO + 10,8H_2 + 35,8CH_4 + 56C_2H_2 + 59,5C_2H_4 + 63,4C_2H_6 + 91C_3H_8 + 120C_4H_{10} + 144C_4H_{12}).$$

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

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

7-жа д в а л

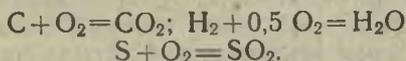
Ёқилғиларнинг q_k^u иссиқлик ажратиши

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

5.3. Ёқилғининг ёниши ва ортиқча ҳаво коэффициентлари

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 олтингугуртнинг тўлиқ реакцияга кириши учун 32 кг кислород керак бўлади, бунда 64 кг SO_2 ҳосил бўлади; 2 кг водороднинг ёниши учун 16 кг кислород зарур бўлади, шунда 18 кг сув буғи ҳосил бўлади ва ш.к.

Ёқилғининг ёнишида асосий оксидловчи модда сифатида кислород ёки атмосфера ҳавоси олинади. Ёқилғининг тула 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 ёқилғининг 1 кг тўлиқ ёниши учун зарур бўлган кислород миқдори қуйидаги тенгликдан топилади (кислород-ёқилғи нисбатидан):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

8-жадвал

Ёқилғи ёниш температурасининг α_x коэффициентга боғлиқлиги

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

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

5.4. Ёниш маҳсулоти ва унинг таркиби

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

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

Амалда ёниш камераси (ўтхона)га киритилган ёқилғи массаси билан ҳаво (оксидловчи) массасининг 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 $V_{н.г.}$ ҳажми ҳақиқий зарур бўлган V_x ҳажмдан кичик бўлади. Шунинг учун ҳам $V_{н.г.} > V_x$ шартини асоси-

да айрим ҳисоб-китобларни 10—25% хатолик 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 $0,79 \alpha_x \cdot V_x$ — 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 тўтунга 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:

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

$$= 0,0163 (C^u - 0,375 S_{0+к}),$$

бунда $S_{0+к}$ — ёнувчи олингугуртнинг органик ва колчедон қисми; 12 ва 32 — углерод ва олингугуртнинг 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 таркибини назарий ҳисоблаб зичлаш 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. Утхона қурилмалари ва уларда ёқилғини ёқиш усуллари

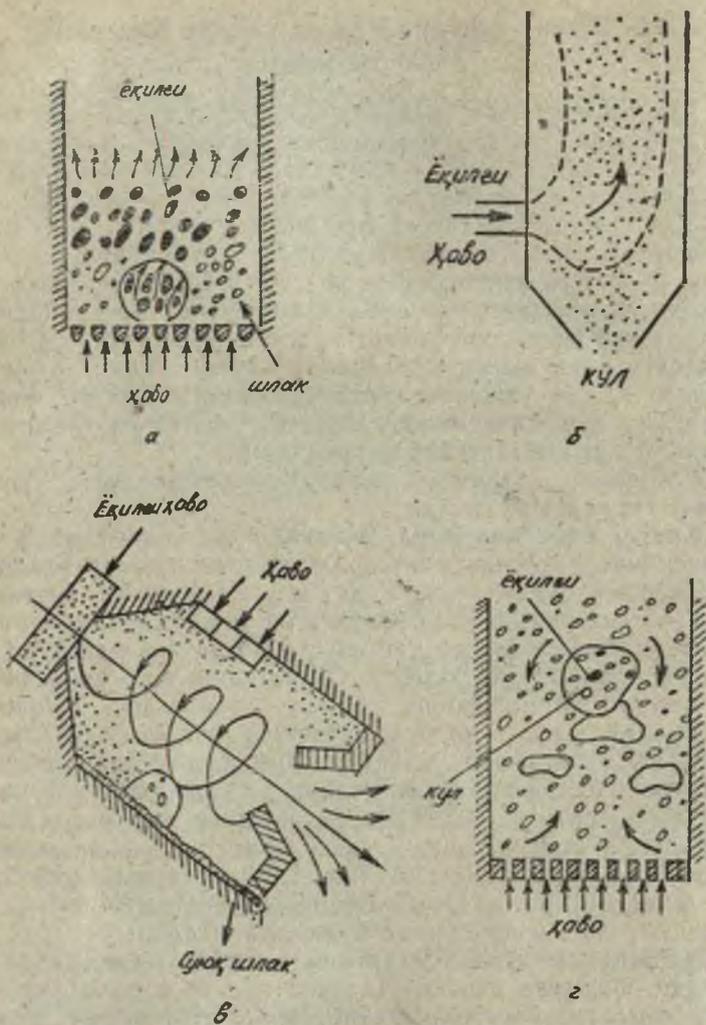
Ёқилғининг ёниш жараёни кетадиган қурилма утхона дейилади. Ёниш жараёнининг боришини таъминлайдиган ва бошқарадиган ускуналар мажмуи утхона қурилмаси дейилади. Қойструкциясига кўра утхонада қаттиқ, суёқ ва газ ёқилғилари ёқилади. Қаттиқ ёқилғи табиатда қандай пайдо бўлган бўлса, шундайлигича, бўлақлаб кукун ҳолига келтириб ёқилиши мумкин. Утхона қурилмаларини лойиҳалашда энг аввал ёқилғининг тежаб ёқилишига, ёниш маҳсулотидagi тутун ва оксидловчи ҳаво оқими йўллариининг тўғри ташкил қилинишига ҳамда утхонани ишга тушириш, ишлатиш ишларининг механизациялашганлигига ва автоматлаштирилишига асосий эътибор қаратилади.

Утхоналар қатламли, камерали (машъалали, уюрмали) турларга бўлинади.

Қаттиқ ёқилғини ёқиш. Ёқилғини қатламли ёқиш утхонасининг асосини панжарали чўғдон ташкил этади. Панжарали чўғдон устига маълум қалинликда қаттиқ ёқилғи текис жойлаштирилади ва панжара остидан атмосфера ҳавоси оқими табиий равишда ёки мажбурий ёқилғи оралаб ўтиб туради. Оксидловчи газ (атмосфера ҳавоси) қаттиқ ёқилғи билан таъсирлашиб ёнишни таъминлайди ва ҳосил бўлган аланга ҳисобига иссиқлик энергияси ҳамда ёниш маҳсулотлари ҳосил бўлади. Ёниш маҳсулоти билан ёқилғи зарралари атмосферага учиб чиқиб кетмаслиги ва тўлиқ ёниши ҳамда кўпроқ иссиқлик ажралиши учун утхонада ҳосил бўлган газ оқимининг кутарилиш кучи ёқилғи бўлақчасининг оғирлик кучидан кичик булиши керак. Ёқилғи бўлақчаларининг ўлчами 20—30 мм дан кичик бўлмаслиги лозим.

Панжарали чўғдон ёқилғини тутиб турибгина қолмасдан, ёқилғига ҳавони ўтказиш, кул ва шлакни кулхона томонга узлуксиз ўтказиб туриш вазифасини ҳам бажаради. Чўғдондаги ҳамма тешик ва тирқишларнинг кўндаланги кесимлари йиғиндис панжаранинг *жонли кесими* дейилади. Панжарали чўғдон ўлчамлари ёқилғи тури ва унинг бўлақларининг катта-кичиклигига мос равишда танланади.

Чўғдон, асосан чўяндан қўйиб ишланади ва юзаси катта бўлганда, у бир неча бўлақдан ташкил топади. Утхона чўғдони горизонтал, қия зинапояли, тебранма зина



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

напояли (Тейлор схемаси), ҳаракатланувчан занжирли (горизонтал ёки қия) қилиб жойлаштирилади. Утхона қандай қурилганлигига ва ёқилғи турига қараб чўғдон қўзғалмас ёки махсус механизмлар таъсирида тебранадиган, илгарилама-айланма ҳаракат қиладиган бўлиши

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

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

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

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

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

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

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

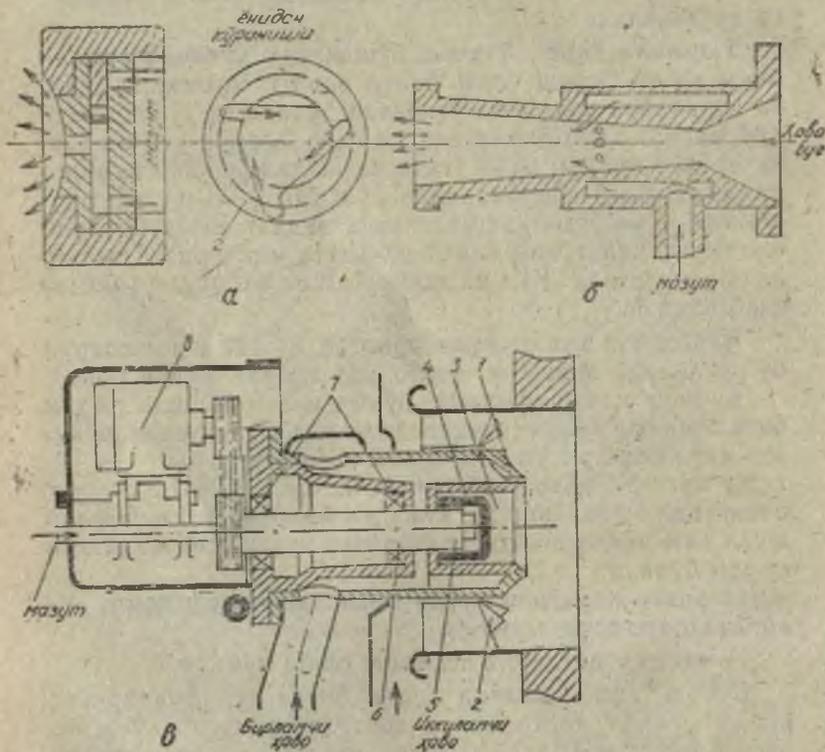
в) ёниш жараёнини тўла механизациялаштириш ва автоматлаштириш мумкин;

г) паст қувватларни осонгина олиш мумкин.

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

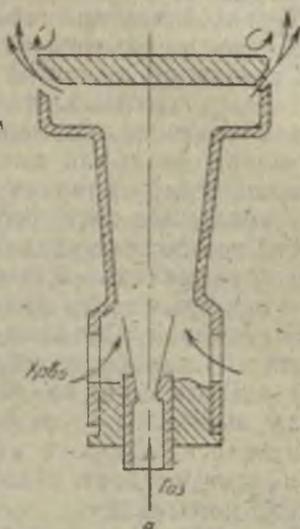
атмосферага учиб чиқадди ва атроф-муҳитни ифлослан-тиради.

Суяқ ва газ ёқилгиларини ёқишда махсус мослама-лар — горелка ва форсунка (ингл. fogse — дам бермоқ) қўлланилади. Горелка ва форсункаларнинг тузилиши ка-мера, ўтхоналарнинг қуввати ва уларнинг турига қараб ҳар хил бўлади. Суяқ 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. Суяқ ёқилгилар ёқилганда улар форсунка ор-қали камерага пуркалади. Ёқилгини форсунка майда зарраларга айлантириб, камерага тўзгитиб пуркайди ва пуркалган ёқилги ҳаво билан яхши аралашиб, тўлиқ ёнади.

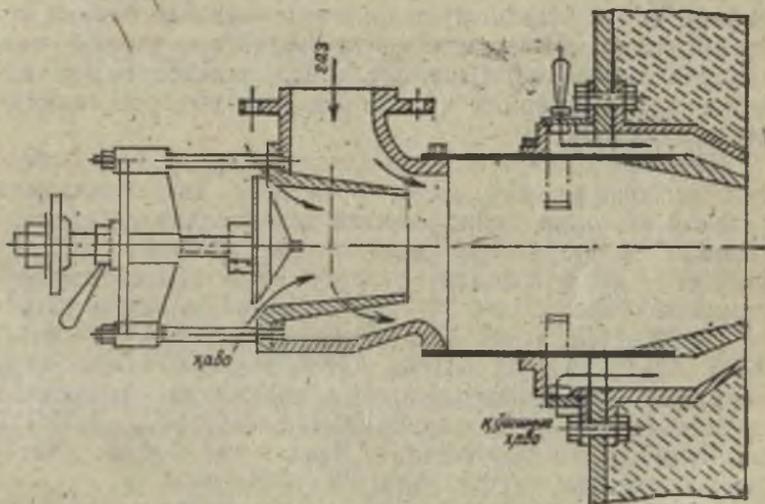


25-расм. Форсунка турлари: а) механик; б) пневматик; в) ротацион.

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



Газ ёқилғисини ёқишда узига 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 утхоналарида 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 аралаштиригич вазифасини бажарганлигидан унда иш ёқилғиси (газ ва ҳаво аралашмаси) ҳосил бўлади. Утхона ичида жойлашган горелканинг тешикли қисмидан иш аралашмаси камерага киради ва ёнади. Газ ёқи ҳаво оқимининг миқдори заслонка (тўсиқ) ва клапанлар ёрдамида ростланади.

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

Ички ёнув двигателларида (ИЕД) ёқилғи сифатида нефтни қайта ишлаш йўли билан олинадиган бензин, керосин, соляр мойи 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 мойи; реактив двигателларда керосингазойль фракциялари ишлатилади. Бензин (франц benzine — хушбўй модда) углерод ва водород бирикмаларидан иборат бўлиб $30-205^{\circ}\text{C}$ қайнайди. Унинг зичлиги $\rho = 700-800 \text{ кг/м}^3$. Нефздан олинадиган А-66, А-72, А-76, АН-91, АИ-92, АИ-93, АИ-98 маркали бензинлар карбюраторли двигателларда қўлланилади. Авиацияда сифати юқорироқ бўлган Б-100/130, Б-95/130, Б-31/115 маркали ёқилғи ишлатилади. Бензин автомобиль двигателида энг кам сарфланади: 260 г/кВт·соат.

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

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

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

Керосин (юнон. Керос — мум) — суюк углеводородлар аралашмаси бўлиб, реактив ва дизель двигателларининг ёқилғиси ҳисобланади. Керосин нефтни туғри 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	Оғирлик бўйича таркиби				Солитлиги маънасидаги, Н/ж*	Иссиқлик чиқариш хусусияти, кал/кг	150°C да 1 атм ҳавонинг назарий сарфи, м ³ /кг
	C, %	H, %	O + N, %	S, %			
Бензин	85,0	15,0	—	—	0,70	10200	12,5
Керосин	85,5	14,0	0,5	—	0,82	10300	12,5
Бензол	91,0	7,5	1,0	0,5	0,88	9600	11,1
Соляр мойи	85,5	12,2	1,5	0,8	0,82	10000	11,8
Спирт	52,0	13,0	35,0	—	0,80	6000	7,6

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

6.1. Ички ёнув двигателлари ҳақида умумий тушунча ва уларнинг таснифи

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

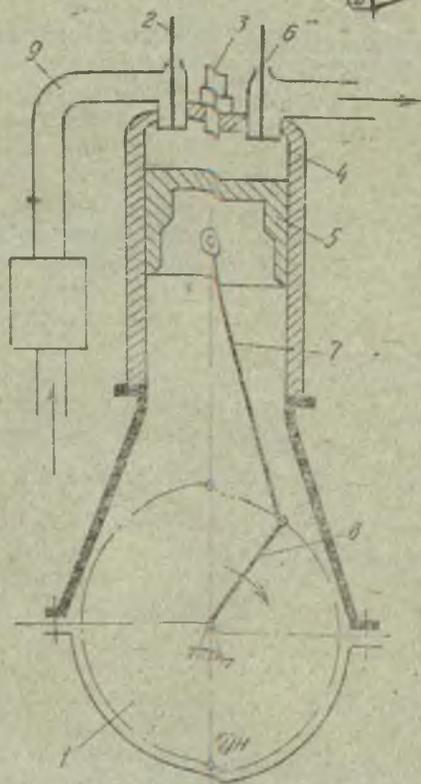
Ички ёнув двигателлари ёқилғи турига қараб, газ ёқилғисида (газ двигатели), суюқ ёқилғида (бензин, соляр мойи, керосин, лигроин ва ҳ. к), биңар (суюқ ва газ) ёқилғида ишлайдиган двигателларга бўлинади. Иш циклига қараб икки ва тўрт тактли; ёқилғининг камерага киритилишига қараб босимли ва босимсиз; иш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

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

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

ёниши натижасида ишлайдиган ИЕД нинг такомиллаш-
ган конструкцияси 1899 й. Петербургда ясалади. Кейин-
чалик компрессорсиз дизель двигателини 1901 йилда
Г. В. Тринклер ва 1910 йилда Я. В. Мамин яратадиган.
Дизель двигателларининг назарияси тўлароқ ўн
ши даврида, унинг конструкциялари ҳам тако
борди.

Дизель двигатели тежамли бўлган
кенг тарқала бошлади. Ҳозирги вақтда
двигателнинг солиштирма ёқилғи



27-расм. Поршеньли ИЕДнинг принци-
ал схемаси: 1 — қар- Днинг принци-
тиш ва чиқариш ва- ал схемаси:
дириш свечаси; 2 ва 6 — қари-
анлари; 3 — ўт ол-
5 — пор-
7 — шатуи; 8 — кривошини;
9 — қариш трубаси.

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

Иш қилайдиган газодизель двигателлари ҳам mavjud. Ёниш жараёни двигателлар тежамли ишланганлиги, кам маълум қиёфланганлиги, ишга тушириш осонлиги, ишонч-оладиган иссиқ мустаҳкамлиги ҳамда узоқ муддат ишлаши, тегили (ИЕД) хайли транспортда етакчи ўринни эгаллай-лар цикл давомида хари у кичик ва катта қувватли электр кечадиган поршеньли (кВт дан 20 МВт гача) ҳам ишлати-қиладиган, махсус

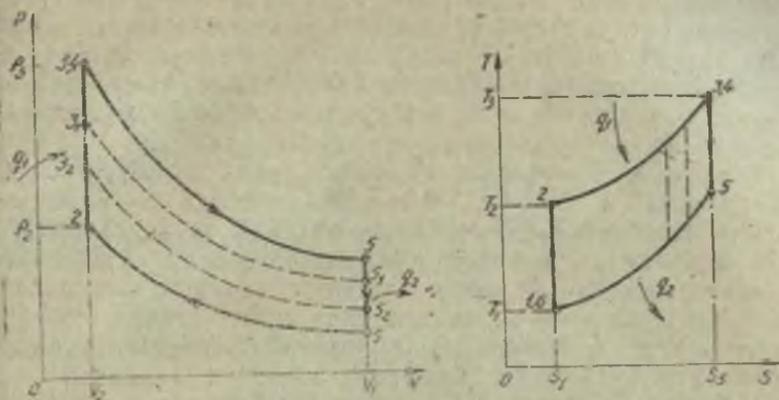
махсус ИЕД ёниш принципиал схемаси 27-расмда келтирил-ган. Поршеньли ИЕД нинг асосини цилиндр 4 ва ун-га киритилган поршень 5 ташкил этади. Поршень кривошип-шатунли механизм орқали тирсак валига ёниш маҳсули газлари вужудга келтирган босим кучини узатади. Цилиндрлар блокининг остки қисмига тирсак вали, устки қисмига тирсак вали, устки қисмига кири-тиш 2 ва чиқариш 6 клапанлари жойлаштирилган ци-линдр қаллаги ўрнатилади. Цилиндрлар блоки қалла-гига карбюраторли двигателларда свеча 3, дизель дви-гателларида эса форсункалар ўрнатилади. Поршень ци-линдрда илгариланма-қайтма ҳаракат қилади. Цилиндр-да 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 ёқилғисининг сиқилиш даражаси поршеннинг ци-линдрдаги ҳолатига боғлиқ ва қуйидагича ифодаланади:

$$\varepsilon = V_k \left(1 - \frac{V_u}{V_k} \right) \quad (167)$$

6.2. Ички ёнув двигателлари циклида кечадиган термодинамик жараёнлар

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



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

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

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

Ҳар бир тактда поршеннинг цилиндрдаги ҳолати тўғрисида батафсил тўхталмаймиз.

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

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

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

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

Демак, иш ёқилғининг сиқилишини, яъни поршенниң сиқилиш даражасини PV — диаграмма асосида қуйидагича ифодалаш мумкин.

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

бунда V_1 ва V_2 — цилиндрниң тула иш ва ёниш камераси ҳажмлари, м^3 .

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

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

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

рилган иш мусбат ва манфий ишларнинг йиғиндисига, яъни нуқталар $V_1-O-P_3-4-1-V_1$ билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Унда фойдали иш қуйидагича ифодаланади:

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

Отто циклининг термик ФИК қуйидагича ифодаланади:

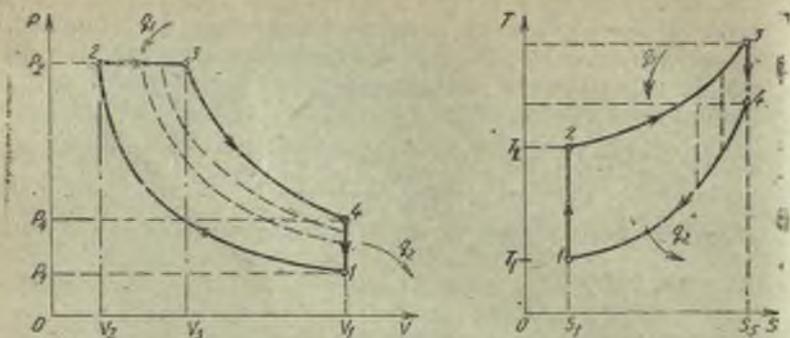
$$\eta_i = 1 - \frac{1}{\kappa^{n-1}}, \quad (170)$$

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

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

бунда $P_1 = 0.09$ МПа; $T_1 = 323$ К; $n_1 = 1.40$. Поршень ЮЎН етганда, яъни сиқилиш тактининг охирида q_1 иссиқлик миқдори киритилади (сиқилган ҳаво температураси ёқилғининг ўз-ўзидан ёпиш температурасидан юқори бўлган $T = 1000-1200$ К га етказилади ёки электр учқунин чақнайди). Поршень каллаги ва ёпиш камераси деворлари билан чегараланган ҳажмда ёнаётган иш ёқилғисининг ёпиш маҳсулот босимини $P = \text{const}$ да сақлаб туриш учун жуда тез бўлмаса-да, поршень ҚЎН 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 ёпиб бўлгандан сўнг, адиабата



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

тик кенгайётган ёниш маҳсулотининг босими таъсирида поршень ЮН дан ҚУН га томон ҳаракатланади (нуқталар 3—4 оралиғи). Бу кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш бажаради. Ёниш маҳсулотидagi қолдиқ иссиқлик энергияси q_2 тутуи 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 уетида бажарилган манфий, яна сиқиш тактининг иши $V_1—O—P_2—2—1—V_1$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Циклнинг бажарган фойдали иши эса юқорида келтирилган тўла юзадан манфий иш юзасини айирмаси $1—2—3—4—1$ га тенг.

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

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

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

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

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

Ёниш маҳсулоти адиабатик кенгайиниш 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 ифодаловчи коэффициент-

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

ганлигидан $\delta = \frac{V_4}{V_3}$ кўринишида ёза оламиз. Циклнинг термик фойдали иш коэффициентини адиабатик сиккиш ва кенгайиш жараёнларидаги адиабата кўрсаткичи, ҳамда коэффициентлар ρ ва ϵ орқали қуйидагича ёзиш мумкин:

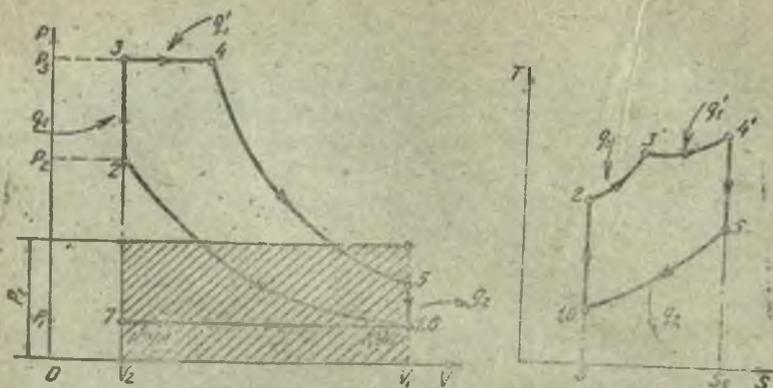
$$\eta_t = 1 - \frac{\rho^{\kappa} - 1}{\kappa(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\epsilon^{\kappa - 1}} \quad (172)$$

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

Циклга $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ бўлганда аралаш (кетма-кет) иссиқлик киритилиши (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 сиккиш тактида ўз параметрларини нуқта 1 га нисбатан нуқта 2 гача адиабата бўйича ўзгартариб боради, яъни термодинамик система мувозанатда бўлмайди. Сиккиш



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 маҳсулотиниң босими ва температураси нуқта 3 ҳолатига етади. Чунки ёниш $V = \text{const}$ ҳолатида кечади. Изохора бўйича ёниш содир бўлганда (нуқталар 2 ва 3 оралиғи) қабул қилинган иссиқлик миқдори q ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

Ёқилғи изохора бўйича тўлиқ ёниб улгурмасдан унга q_1' иссиқлик миқдори киритилади. Ёниш жараёниниң давом и изобара бўйича кечади, яъни тўлиқ ёнмасдан қолган ёқилғи $P = \text{const}$ остида ёндирилади. Поршень ЮУН да бўлганлиғи сабабли у ёқилғи тўлиқ ёниб бўлгандан сунг ёниш маҳсули адиабата ($dq = 0$) бўйича кенгайиб поршени 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 ҳажминиң олдиндан кенгайиши Дизель циклидагидай бўлади. Босимниң ортиш даражаси $\lambda = \frac{P_3}{P_2}$ ҳам Отто циклидагидай бўлади.

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

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

Юқоридаги фикрлар асосида циклнинг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин.

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

6.3. ИЕД индикатор иши қуввати ва ФИК

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

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

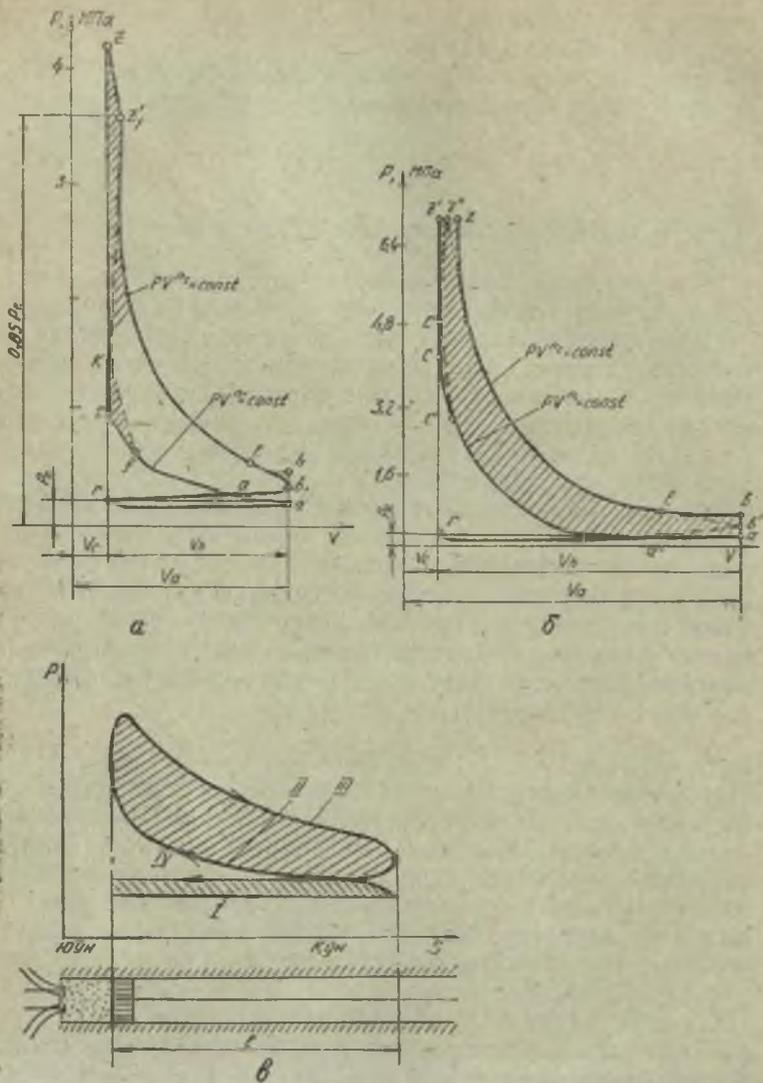
Индикатор диаграмма асосида двигателнинг индикатор иши A_i аниқланади. Унинг қиймати $a-a'-f-k-z_1'-e-b_1-a$ нуқталар билан чегараланган (31-расм, а) юзага сон қиймати жиҳатидан теги. Ҳар қандай ИЕД да ёниш маҳсулоти — тутун ҳосил бўлади. Агар газларнинг ҳосил бўлишига сарфланган иш ҳам ҳисобга олинса,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

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

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

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

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

Дизель двигателнинг 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 двигателнинг 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 двигателнинг бажарган иши

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

Ёпиш маҳсулоти адиабатик кенгайиш жараёнида системанинг бир неча параметрлари ўзгариши мумкинлиги асосида $z-b$ нуқталар оралиғида бажарилган ишнинг 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:

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

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

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

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

Тула бажарилган индикатор иш цикли жараёниларида бажарилган ишларнинг алгебраик йиғиндисига тенг, яъни

$$A_1 - P_c V_c = \left[(p - 1) + \frac{\lambda p}{n_2 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right] \quad (180)$$

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

$$N_{ia} = \frac{2n}{\tau} P_1 V_h = \frac{2n}{\tau} A_1, \quad (181)$$

бунда $\frac{2n}{\tau}$ — двигателнинг 1 секундадаги иш цикли сони:

n — тирсак валининг айлашлар частотаси, айл/с;
 τ — циклдаги поршень йўлининг сони; $A_1 = P_1 V_h$ — двигателнинг индикатор иши (бунда, P_1 — ўртача индикатор босим, Па; $V_h = \frac{\pi d^3}{4} l$ — цилиндрнинг иш ҳажми; d — цилиндр диаметри; l — поршень йўли, м).

Цилиндр сони i бўлганда индикатор қуввати қуйидагича ифодаланади:

$$N_i = \frac{2i}{\tau} P_1 V_h. \quad (182)$$

Бу тенгламани ҳисоблашларда қўллаш осон бўлиши ва қувватни кВт чиқариш учун P_1 ни МПа да, V_h ни литрда, n ни айл/мин.да ифодалаб, қуйидаги кўринишга келтирамиз:

$$N_i = \frac{2i}{\tau} \cdot \frac{P_1 V_h}{60} i. \quad (183)$$

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

$$N_i = \frac{2i}{4} \cdot \frac{P_1 V_h}{60} i = \frac{n \cdot i \cdot P_1 V_h}{120}. \quad (184)$$

Икки тактли ИЕД лари учун (183) тенглама қуйидаги куринишга 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 курсатадиган катталик бўлиб, циклнинг бажарган тўла иши A_i ни шу циклда ёқилган ёқилги ажратган жами иссиқлик миқдори q га нисбати билан ифодаланади:

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

Ёқилғининг бирлик массаси ёнганда циклда бажарилган индикатор иш орқали ИЕД нинг индикатор фик ни ёзиш мумкин.

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

Бунда q_k^u — ёқилги 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 — масштабнинг ҳар бир миллиметрга мос келадиган босим, мм/МПа.

Агар двигателнинг қуввати N_i ва вақт бирлиги (соат) давомида сарфланган ёқилги 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 $N_i = \text{const}$; $n = \text{const}$; $P = \text{const}$) ишлашни таъминланган ҳолда ҳисобланган (пазарий) ёқилги миқдори, кг/соат. Унда юқоридаги тенгламалар асосида ИЕД индикатор фик ни қуйидагича ифодалаймиз:

$$\eta_{II} = \frac{1}{q_k^u \cdot q_i} \quad (190)$$

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_{II} қуйидаги ифодадан топилади:

$$\eta_{II} = \frac{3.6 \cdot 10^3}{q_k^u \cdot q_i} \quad (191)$$

Газ двигателларида ёқилғи сарфи m^3 да ўлчаниб η_{II} юқоридагилардан фойдаланиб ёзилади,

$$\eta_{II} = \frac{1}{q_k^u \cdot V_i} \quad (192)$$

бунда q_k^u ва V_i ларнинг ўлчов бирлиги мос равишда Ж/м³ ва м³/Ж да ифодаланadi. q_k^u ва g_i амалий ҳисоб-китобларда, мос равишда МЖ/м³ ва м³/кВт·соатда ифодаланганлиги учун η ни қуйидагича ёзамиз:

$$\eta_{II} = \frac{3.6}{q_k^u \cdot V_i} \quad (193)$$

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 ифодаланadi:

$$N_{эф.} = N_i - N_m \quad (194)$$

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:

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

Уртача эффектив $P_{эф}$ босим индикатор босим билан механик исроф учун булган босим айирмасига тенг, яъни

$$P_{эф} = P_i - P_m. \quad (197)$$

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

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

бунда i — цилиндрлар сон.

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 шинг эффектив фик ни аниқлашда энг аввал ёнишда ҳосил булган иссиқлик миқдоридан ва ёқилгининг солиштирама эффектив сарфидан қандай фойдаланганлиги билиб олинади. 1 кг ёқилгининг ёнишида ажралган иссиқлик миқдорини эффектив иш орқали ифодалаш мумкин:

$$A_{эф} = A_i - A_m. \quad (200)$$

Демак, ИЕД шинг 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.

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

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

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

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

$$\eta_{эф} = \frac{\alpha l_0 \gamma_m \rho_i}{q_n'' \cdot \tau_V \rho_N} = \frac{\alpha \cdot l_0}{q_n'' \cdot \rho_c \cdot \tau_V} P_{эф}. \quad (204)$$

ИЕДларнинг механик ФИК ва цилиндрдаги уртача эффектив босим қийматлари

ИЕД тури	$P_{эф.}$ МПа	η_m
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 турт тактли дизель	0,7—2,0	0,8—0,9
Тезюарар икки тактли дизель	0,4—0,75	0,7—0,85

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

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

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

$$g_{эф.} = \frac{P_k \eta_v}{\alpha_4 P_{эф.}} \quad (206)$$

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

$$g_{эф.} = \frac{3,6 \cdot P_k \cdot \eta_v \cdot 10^3}{\alpha_4 \cdot I_0 \cdot P_{эф.}} \quad (207)$$

Албатта, ёқилғи тури ўзгаришидан $g_{эф.}$ ва $\eta_{эф.}$ қийматлар бошқачарақ кўринишга келади. Масалан, газ ёқилғисиде ишлайдиган ИЕД нинг эффектив фик $\eta_{эф.}$ ва ёқилғининг солиштирма эффектив сарфи $V_{эф.}^*$ қуйидаги кўринишда ифодаланади:

$$\eta_{эф.}^* = \frac{371,15 \cdot M \cdot T_k \cdot P_{эф.}}{\eta_v \cdot g_k^* \cdot P_k} \quad (208)$$

ва

$$V_{эф.}^* = \frac{9700 \eta_v \cdot P_k}{M \cdot T_k \cdot P_{эф.}} \quad (209)$$

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

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

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

$$q_{\text{эф.}}^{\text{г}} = 9700 \frac{\tau_{\text{в}} \cdot P_{\text{к}} \cdot q_{\text{к}}}{M \cdot T_{\text{к}} \cdot P_{\text{эф.}}} \quad (210)$$

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

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

11-жадвал

ИЕДларнинг солиштирма ёқилги сарфи ва ФИК

ИЕДнинг тури	$\tau_{\text{и}}$	$\tau_{\text{эф.}}$	$g_1 \cdot \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{соат}}$	$g_{\text{эф.}} \cdot \frac{\text{г}}{\text{кВт}\cdot\text{соат}}$
Карбюраторли автомобиль двигатели	0,28—0,39	0,25—0,33	245—300	300—325
Тезюар 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

Маълумкй, двигателнинг ёниш камерасига киритилган ёқилғининг ёнишидан ҳосил бўлган иссиқлик миқдори тулалигича фойдали ишга 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 ёқилғидан қай даражада фойдаланиш мумкинлигини билиш зарур. Шу сабабли иссиқлик баланси тенгламаси тузилади:

$$q_{\text{у}} = q_{\text{эки}} + q_{\text{с}} + q_{\text{г}} + q_{\text{т.в}} + q_{\text{м.л}} + q_{\text{қол.}} \quad (211)$$

бунда $q_{\text{у}}$ — двигателга маълум иш тартибида киритилган ёқилғининг умумий иссиқлик миқдори; $q_{\text{эки}}$ — двигателнинг эффектив ишига эквивалент бўлган иссиқлик миқдори; $q_{\text{с}}$ — совитувчи муҳитга узатилган иссиқлик миқдори; $q_{\text{г}}$ — тутунинг двигателдан олиб чиққан иссиқлик миқдори; $q_{\text{т.в}}$ — тула ёнмаган ёқилғи ҳисобига сарф бўлган иссиқлик миқдори; $q_{\text{м.л}}$ — мойлаш мойла-

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

ИЕД га киритилган тула иссиқлик миқдорига нисбатан унинг ташкил этувчиларининг фойдаларда ифодалаш мумкин:

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

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

Унда

$$Q_{\text{экс}} + Q_c + Q_r + Q_{\text{т.э}} + Q_{\text{мо.э}} + Q_{\text{о.э}} = 100\% \quad (213)$$

У ҳолда M_c ни кг/с, q_c ни Ж/кг да ифодаласак, 1 с да сарф бўлган иссиқлик миқдорини қуйидагича ёзиш мумкин:

$$q_y = q_K^u M_c^u, \quad (214)$$

бунда M_c — сарф бўлган ёқилғи массаси.

Двигателнинг эффектив қувватига тенг бўлган иссиқлик миқдори ифодасини қуйидагича ёзамиз:

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

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

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

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

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

$$q_r = M_c (m_2 \mu C_p t_r - m_1 \mu C_p t_0), \quad (217)$$

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

моляр иссиқлик сифмлари. J кмоль·с, t_r — газларнинг иш бажаргандан кейин чиқиб кетадиган труба ортидаги температураси, °С; t_0 — цилиндрга киритиладиган янги иш ёқилғисини температураси, °С.

$\alpha > 1$ бўлганда тула ёнмаган ёқилғига сарфланган иссиқлик миқдори $q_{т.е}$ ни махсус ҳисобламасдан, унинг қийматини кунчилик ҳолларда $q_{қол}$ га қўшиб юбориб қуйидаги ифодадан аниқланади:

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

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

$$q_{т.е} = (\Delta q''_{хим})_{хим} \cdot M_{е}. \quad (219)$$

бунда

$$(\Delta q''_{хим})_{хим} = A(1 - \alpha)V_H = (228 - 383) \cdot 10^6.$$

V_H — назарий ҳисобланган ҳаво ҳажми. $q_{қол}$ пинг улчов бирлиги Ж/с; $q_{моп}$ — мойнинг сувга узатган иссиқлик миқдори бўлиб, мой совиткичада ўлчаб аниқланади.

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

12-жадвал

Двигатель тури	$\eta_{кв} = \eta_{кв}$	q_c	q_r	$q_{т.е}$	$q_{қол}$
Электр учқуни билан ут 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 куришиб 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 босими орттириш мумкин. Чунки цилиндрдаги иш аралашмаси зичлиги ρ ортиши билан унга мос равишда $P_{эф}$ ҳам ортади, ўз навбатида, ИЕД нинг литраж қуввати кўтарилади. Двигателларда пуфлаш жараёнидаги механик қаршиликлар пуфланмагандаги ҳолатга нисбатан ортади, ammo 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:

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

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

Пуфлашда сиқич тактининг охирида ҳаво температураси ва босими ортади. Карбюраторли двигательларда бу ҳолат детонация (франц. *detoner* — портлаш)га сабаб бўлганлигидан бу турдаги двигательларда пуфлаш кенг тарқалган. Пуфлаш усули дизель двигательларида қўлланилса, детонациянинг вужудга келиш хавфи йўқолади, чунки цилиндрга киритилаётган ҳаво босими $P_{кир}$ ортганда детонацияли ёниш кузатилмайти. Бунда дизель двигатели литраж қувватининг ортишига имкон яратилади. Булардан ташқари, дизель двигателининг бошқа параметрлари ҳам яхшиланади. Мана шу ижобий кўрсаткичлар автомобиль ва тракторда дизель двигательларининг кенг қўлланишига асосий сабаб бўла олади. Пуфлаш усули билан автотракторларда дизель двигательлари қўлланилганда улардаги босим $P_{эф}$ ни 30% гача кўтариш (наст даражадаги пуфлаш) мумкин. Юқори даражадаги ўтиш хоссасига эга бўлган дизель двигательларида эффектив босимни 40—50% гача орттириш мумкин. Пуфлаш компрессорли, турбокомпрессорли ва аралаш (уйғунлаштирилган) юригмали бўлади.

6.7. Ташқи ёнув двигательлари

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

га айлантириб берувчи иссиқлик машинаси. Бундай двигателни инглиз ихтирочиси Р. Стирлинг яратган (1816 й.) Купчилик адабиётларда ТЁД ни Стирлинг двигатели деб юритишади. Стирлинг двигатели қиздирилган ҳавонинг иссиқлик энергиясини 10—20 МПа босим остидаги гелий (He^1) ёки водород (H^1) га регенерация йўли билан узатиш ҳисобига ишлайди. Бу двигателнинг асосий иш жисмлари берк бўшлиқда жойлашган.

Гелий ёки водород берк бўшлиқда (атмосфера ҳавоси ўрнига гелий ёки водород тулдирилган ҳажм) 10—20 МПа босим остида бўлади. Бу берк ҳажмни регенератор иккига ажратиб туради. Унинг юқориги (иссиқ) ва насткни (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. ТЁД ҳам тўрт тактли (сиқиш, қиздириш, иш йўли ва совитиш) бўлиб, унинг назарий цикли иккита изотермик ва иккита изохорик жараёнлардан ташкил топади.

ТЁД нинг ФИК худди Карно циклиникидай қуйидаги тенгликдан аниқланади:

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

Стирлинг двигателининг индикатор диаграммаси эллипс шаклида. ТЁД 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 ТЁД лари 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 мажмуаси куч қурилмалари дейилади. Фойдаланиладиган энергия турига кура 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* госсa — 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) киради.

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 айланадиган ҳолат уридли бўлганда, бундай буғ тўйинган буғ дейилади. Тўйинган буғ температурасини орттирганимизда, сув молекулаларининг томчисига ягона молекула даражасигача майдаланиб аввал қиздирилган, сунгра ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади.

Техник эҳтиёжларни таъминлаш учун зарур булган 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 ёқилги ёқилиб, асосан сув буғи ҳосил қилинади, сунгра бу буғ яна қиздирилиб, иш бажарадиган даражадаги параметрларгача етказилади.

7.2. Буғ-куч қурилмасининг назарий цикли

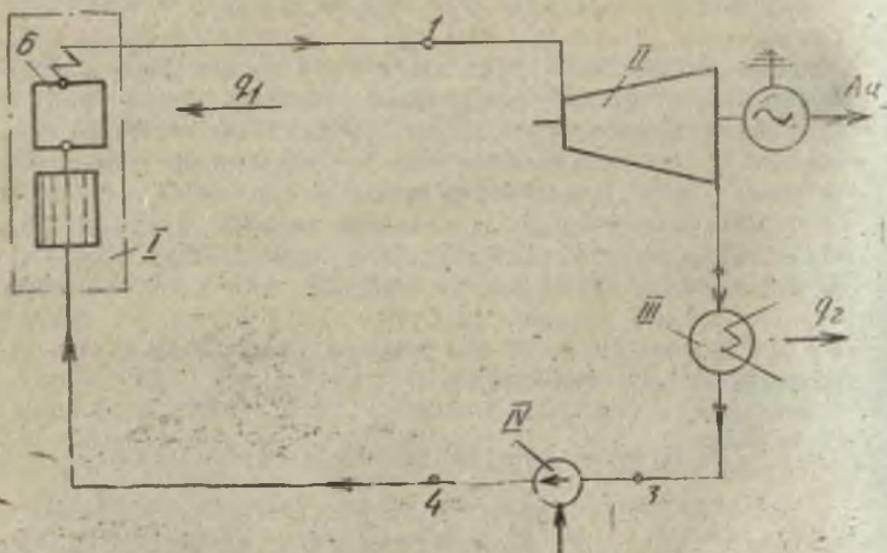
Буғ-куч қурилмалари қозон агрегати, буғ турбинаси, конденсатор, насос, электр генератор ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган. Қозон агрегати, ўз навбатида ўчоқ, буғлатиш сиртлари, буғ қиздиргичлар

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

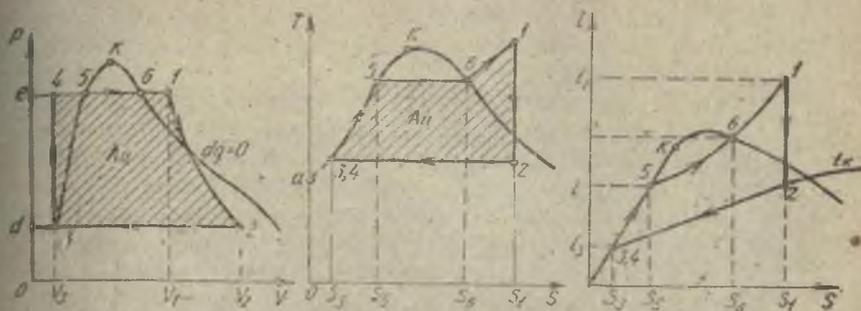
Буг-куч қурилмаларида ишлатиладиган иш жисми — сув буғи параметрларининг ўзгаришини қараб чиқамиз.

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

Ренкин цикли қуйидагича кечади: қозон қурилмаси (I) дан юқори босим ва температурадаги қиздирилган буг буғ турбинаси (II) га узатилади. Шунда буг ташқаридан ортқича иссиқлик миқдорини олмасдан ($dq=0$) буг 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. Буг 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 фашидан маълумки, насоснинг ҳайдаш каналидаги босим унинг сўриш қисмидагидан катта бўлади. Шунинг учун диаграммада нуқталар 3 ва 4 оралиғида босим ортади, ҳажм ўзгармас бўлади.



32-расм. Ренкин циклининг буг-куч қурилмаси.



33-расм. Ренкин циклининг PV, TS ва iS диаграммалари.

Демак, сув буги 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 эkan.

Реал шароитларда, насосдан ўтган сув албатта экономайзердан ўтиб, сўнгра қозон агрегатига қуйилади. Қозон агрегати ўтхоналарида ёқилган ёқилгининг ёпиш маҳсулоти ташқарига олиб чиқиб кетаётган, фойдаланилмаётган қолдиқ иссиқлик миқдоридан самарали фойдаланиш мақсадида, тутун йулларига экономайзер ўрнатади. Тутун ўзидаги қолдиқ иссиқликни экономайзер орқали утаётган конденсатга беради ва шу қолдиқ иссиқлик (тутундаги) яна қозон агрегатига қайтарилади. Шунда сув қолдиқ иссиқлик ҳисобига ўз ҳажминин, температурасини ўзгармас босим остида ўзгартиради (4 ва 5 нуқталар оралиғи, 33-расм а, б).

Қозон агрегатининг ўтхонасида ёқилган ёқилги ажратган асосий иссиқлик миқдори қозонга қуйилган сувга берилади. Бу сув аввал экономайзер орқали утиш 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 буг ўз ҳажминин ортиради, яъни қизийди. Бу қиздирилган бугнинг параметрларини иш бажарадиган даражагача кўтариш учун қўшимча иссиқлик миқдори киритилади. Бундай жараён қозон агрегатининг буг қиздиргич қисмида амалга

оширилади. Шунда қизиган буг ўта қиздирилган буг 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 буғнинг абсолют температураси билан унинг энтропияси орасидаги боғланиш ифодаланган (33-расм, б). Жараёнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, 1 кг буғ бажарган фойдали ишнинг катталиғи Рейкин циклининг бажарган ишига тенг экан. Бу фойдали ишнинг қиймати P_v диаграммасидагидек T_s диаграммасида ҳам юзалар айирмасидан аниқланади, яъни $A = 0a45612S_10 - 0a32S_10 = 356123$ бўлади. Бунда $0a561S_10$ юза эса буғнинг кенгая бошлаган ҳолатини, яъни 1 нуқта энтальпиясига тенглигини характерлайди. Худди шундай $0a32S_10$ юза эса буғнинг кенгайиб бўлгандан кейинги ҳолатини, яъни 2 нуқта энтальпиясига тенглигини ифодалайди. Шунинг учун 1 ва 2 нуқталар энтальпияларининг айирмаси циклининг бажарган ишига тенг бўлади:

$$A_n = i_1 - i_2 \quad (222)$$

Демак, энтальпиянинг ўзгариши учун 3 ва 4 нуқталар оралиғида сувнинг ҳажми ўзгармасдан босими ортади. Бу босимнинг ортишига сарф бўлган иш $d34ed$ нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади. Бу ишни босимлар айирмаси орқали ифодалаш мумкин:

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

Иш A_n нинг қиймати асосий ишга нисбатан жуда кичик бўлганлигидан уни нога тенглаштириши мумкин.

Шундай қилиб, қозон қурилмасига қайтарилган кондендатдан янги иссиқлик миқдори яна ташқаридан киритилади ва сув шу иссиқлик ҳисобига буғга айланади, сўнгра қиздирилган ва ўта қиздирилган буғга айлантирилиб, буғ турбинасига узатилади (нуқталар 4 ва 1 оралиғи, 33-расм, а). Бу нуқталар оралиғида босим ўзгармас, ҳажм эса ўзгарувчан бўлади. Бундай идеал цикл Ренкин цикли дейилади. Цикл бажарган ишнинг ифодаси юқорида келтирилган бўлиб, у мусбат ва манфий ишларнинг алгебраик йиғиндисига тенг. Лекин бундай идеал цикл бўлмайди.

Ренкин циклининг (идеал цикл) термик фик цикл

бажарган ишнинг шу циклга киритилган иссиқлик миқдорига нисбатига тенг:

$$\eta_k = \frac{A_k}{q_1} \quad (224)$$

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, циклнинг ФИК ни энтальпиялар айирмалари нисбатлари кўришида ёзиш мумкин:

$$\eta_k = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_3} \quad (226)$$

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 сифими 4,1868 кЖ/кг·К эканлигини эътироф этсак, у ҳолда η_k ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\eta_k = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - 4,1868 t_k} \quad (227)$$

Ренкин циклида иш бажариб бўлган бугда қолган иссиқлик миқдорининг 60—70% совиткичга узатилади. Бунда қолдиқ иссиқлик миқдорининг совиткичга узатишдаги термик ФИК 30—40% га яқин. Маълумки, циклда ишлайдиган турлин-туман қурилмалар ва асбоб-ускуналарда иссиқлик сарфланади.

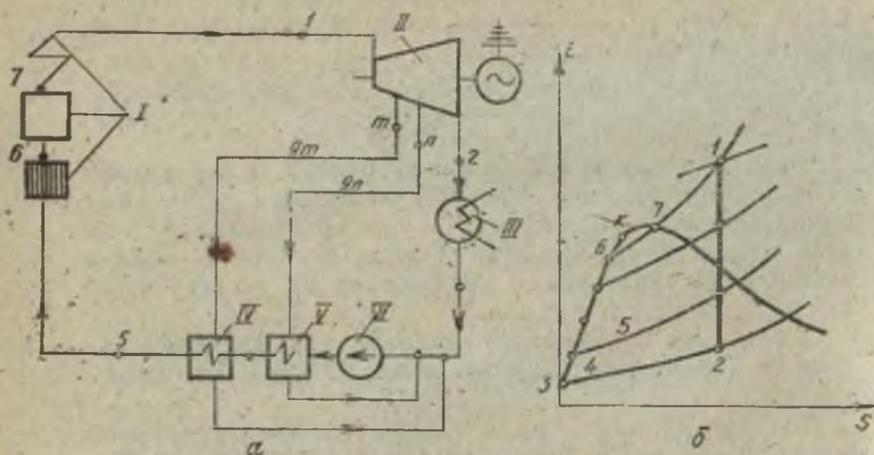
Замонавий буғ куч қурилмалари ўта мураккаб бўлишига қарамасдан уларнинг ФИК 90—98% ни ташкил қилади.

Буғ куч қурилмаларида қўлланиладиган турбиналар буғ иссиқлигиндан ўз босқичларида фойдаланиш даражасига қараб, буғдаги ишга айланмасдан қолган иссиқлик миқдоридан тўлароқ фойдаланиш мақсадида *регенерация* циклига эга бўлган қурилмалар ҳам қўлланилади.

Бундай қурилмаларда буғ турбинада иш бажариб бўлганидан сунг бугнинг маълум қисми турбинанинг бирор босқичидан ажратилиб қозон агрегатига узатилаётган янги совуқ сувни шу ажратилган буғ билан қиздиришда қўллаилади. Бунга регенерация цикли дейлади. Регенерация (лот. regeneratio — тиклаш) — совиткичга чиқиб кетаётган иссиқлик миқдорини янгитдан узатилаётган бирламчи иш моддасига (сув, буғ сув аралашмаси, газ ёки ҳаво оқими, ёқилғи ва ёқилғи-ҳаво аралашмаси) киритишдан иборат бўлган усул (34-расм).

Қурилманинг қисмларида кечадиган термодинамик жараёнлар Ренкин циклидан мутлақо фарқ қилади. Шунинг учун буғ-куч қурилмасининг регенерация цикли усулида сув қозон қурилмасига олдиндан иситиб берилганлиги сабабли қурилманинг термик ФИК Ренкин циклиникидан катта бўлади.

Демак, совиткичга чиқариладиган иссиқлик миқдоридан самаралироқ фойдаланилганда регенератив буғ куч қурилмасининг ФИК ортади. Регенератив циклли куч қурилмасининг iS — диаграммасидан шундай 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 буғ-куч қурилмаси ва унинг iS диаграммаси: I — қозон қурилмаси; II — буғ турбинаси; III — конденсатор; IV — конденсат насоси; V ва VI — регенерация қурилмалари.

ритилса, системанинг энтропияси ўзгарувчан бўлади. Бу ҳолатда 1 ва 2 нуқталар оралиғида иссиқлик миқдори иш бажаради, шунинг учун унинг энтропияси ўзгармайди. Демак, 2—3—4—5—6—7—1 нуқталар оралиғида иш моддаси (сув буғи — термодинамик система) ҳолати, энтропияси ва энтальпияси ўзгарувчан бўлади. Бунга асосий сабаб системага (сув, буғ-сув конденсати, буғ, қиздирилган буғ) ташқаридан маълум миқдордаги иссиқлик миқдори киритилади ва ундай чиқарилади.

Демак, регенерация циклига эга бўлган буғ куч қурилмасининг термик ФИК ни қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_t = \frac{A}{Q_1} \quad (228)$$

Буида A — циклнинг тўла бажарган иши;

$$Q_1 = I_1 - 4, 1868 t_5$$

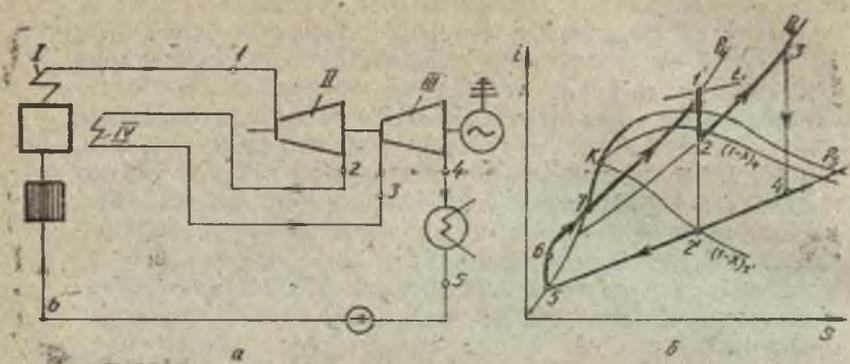
системага киритилган иссиқлик миқдори бўлиб, у энтальпиянинг ўзгаришига тенг.

7.3. Оралиқ буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмаси

Бир неча турбинада ё унинг босқичида иш бажариб бўлган буғнинг намлиги ортиб кетганида, буғнинг параметрларини ростлаш мақсадида, оралиқ буғ қиздиргичли усул қўлланилади. Буғ намлигининг ортиб кетиши турбинанинг ёмон ишлашига ва унинг қисмларини тезроқ заанглаб ишдан чиқишига сабаб бўлади. Бу камчиликни тuzатиш мақсадида биринчи турбинада иш бажариб бўлган, ammo намлиги юқори бўлган буғ қайтадан қозон агрегатига 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 биятга ўқда жойлашган иккита мустақил буғ турбинаси, иккиламчи буғ қиздиргичдан ташкил топган бўлиб, бошқа турдаги буғ-куч қурилмаларидан фарқ қилади.

Буғни қайтадан қиздириб, уни такроран ишлагандиган буғ-куч қурилмасининг PV ва TS диаграммалари юқорида қараб чиқилган циклларникига ўхшаш бўлсада, айрим ўзгаришларга эга. Оралиқ буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмаси циклида содир буладиган термодинамик жараснларнинг iS — диаграммаси 35-расм, б да



35-расм. Оралиқ буғ қиздиргичли буғ-куч қурилмасининг схемаси ва iS диаграммаси.

келтирилган. Циклнинг iS — диаграммасидан кўришиб 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 кўришиб 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 аднабатик кенгайиб ўтган буғ энтальпиялари ўзгаришларининг йиғиндиси насосдан ўтадиган конденсат энтальпиялари ўзгаришидан катта бўлади. Тула фойдали ишни 1—2 ва 3—4 нуқталар оралиғида бугнинг кенгайишида бажарган ишига тенглаштириш мумкин ва бу иш оддий циклда 1 ва 4 нуқталар (32-расм, а; PV диаграммаси) оралиғидаги ишдан катта. Шунинг учун оралиқ буғ қиздириш услубига эга бўлган буғ-куч қурилмалари қўлланилади.

7.4. Бинар циклли буғ-куч қурилмаси

Иш жисми сифатида иккита моддадан фойдаланиладиган ва улар мутлақо бир-бирига аралашмайдиган ҳаmda мустақил циклларга эга бўлган иссиқлик-куч қурилмаси бинар (лот. binarius — қуш) циклли 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 $T=1673,15$ К, шу нуқтадаги босим $P=980 \cdot 10^5$ Па. Иссиқлик алмаштиргичда (конденсатор) симоб юқори температурада ҳам, тўйиниш ҳолатига ($T=498,35$ К) ўта олади. Сув бундай хоссага паст температурада ($T=306,03$ К) ўтади. Сув буғини қайтадан қиздириш температураси $T=873,15$ К, бундан юқори температураларга қиздиришга қўлланилган ўтга чидамли материаллар бардош бера олмайди. Оқибатда сув буғининг юқори температураларидан фойдаланиб бўлмайди. Бу камчиликни тугатиш мақсадида бинар циклли куч қурилмаларидан фойдаланилади. Схемадан кўриниб турибднки, иссиқлик бирламчи берк контурдан (иш жисми—симоб) иккинламчисига (иш жисми—сув буғи) махсус қурилма — симоб турбинасининг конденсаторида регенератив иссиқлик алмашинуви орқали келтирилади. Симобли конденсатор тўйинган сув буғининг қозони вази-фасини бажаради. Тўйинган сув буғи симобли конденсаторда ҳосил бўлгандан сўнг, яна қўшимча симобли турбина контуридаги қозон қурилмасининг буғ қиздиригичида иссиқ газ оқими ёрдамида қиздирилиб, босими ва температураси керакли қийматларга етказилади. Шундан кейин иккинчи берк контурдаги буғ турбинасига узатилади. Турбинада, буғ кенгайиб иш бажариш жа-

раёнида, иссиқлик алмашинуви ҳисобига суюқликка айланади. Ҳосил бўлган сув, яъни конденсат, сув насоси ёрдамида симоблиг конденсаторга узатилади. Унда буғланиб бўлгандан сунг буғ қиздиргич орқали буғ турбинасига узатилади. Цикл такрорланади.

Бинар циклнинг TS диаграммасини қараб чиқамиз: биринчи берк контурининг бажарган иши $1-2-3-4-1$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлиб, система (симоб)нинг термодинамик параметрлари сув бугиникига нисбатан юқори, масалаи, нуқта 3 нинг абсолют температураси нуқта 3' никидан кагга, яъни $T_3 > T_3'$.

Циклнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл T_1-T_2 температуралар оралиғида содир булади ва 1 кг сув бугининг бажарган иши $3-4-5-1-2-3$ нуқталар ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Масалаи, Карно цикли нуқтан пазаридан қаралса, шу температуралар ўзгаришида бажарилган иш сон қиймати жиҳатидан 36123 нуқталар ҳосил қилган тўртбурчак юзага тенг булар эди. Реинки циклнинг Карно циклига яқинлашувини билнш учун гоҳо шу циклларда бажарилган ишларнинг нисбатлари аниқланади. Бу нисбатдан ҳосил булган коэффициент циклнинг карнолаштириш коэффициенти дейилади:

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

1 кг сув бугини симоб қозонининг буғ қиздиргичида қиздириш учун сарф бўлган иссиқлик миқдори симоб-сув бинар системасининг энтальпиялари айирмалари йиғиндиси кўринишида ифодаланади:

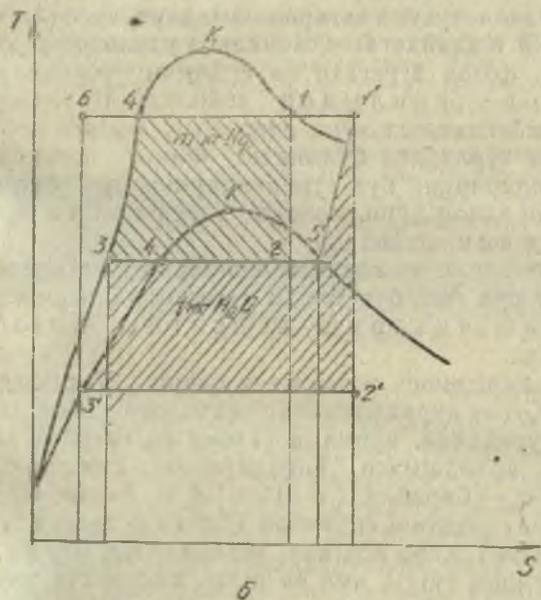
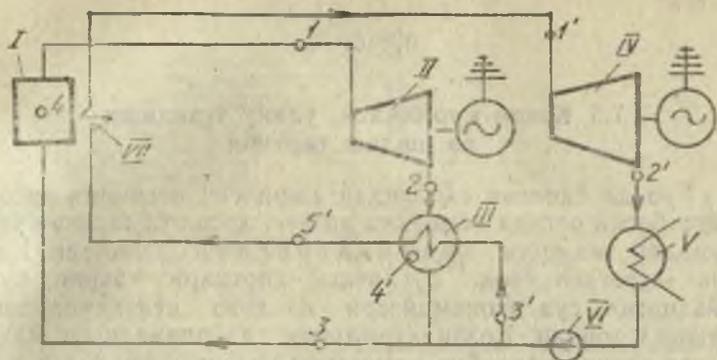
$$q_1^{\text{бн}} = m(i_1 - i_3) + (i_1 - i_3) \quad (231)$$

Бинар циклда бажарилган ишни симоб турбинасида ва буғ турбинасида иш жисмларининг адиабатик кенгайишидаги энтальпиялари ўзгаришларининг йиғиндиси кўринишида ифодалаш мумкин:

$$A_{\text{ц}}^{\text{бин.}} = i_3 - i_1 \quad (232)$$

Бинар циклнинг термик ФИК қуйидагига тенг:

$$\eta_1^{\text{бин.}} = \frac{A_{\text{ц}}^{\text{бин.}}}{q_1} \quad (233)$$



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

Бинар циклнинг термик ФИК бошқа циклларникидан катта:

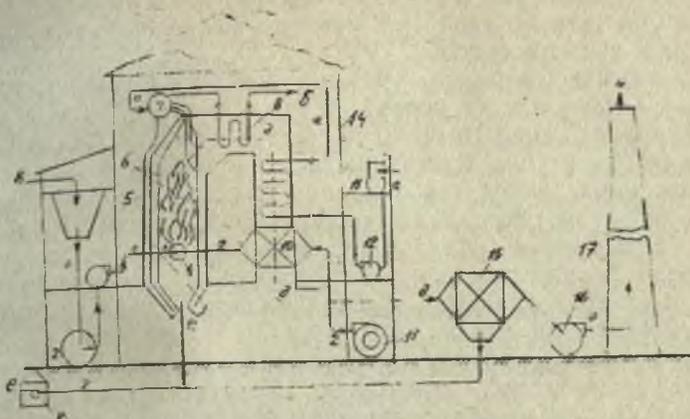
$$\eta_t^{\text{бин.}} > \eta_t.$$

7.5 Қозон қурилмаси, унинг тузилиши ва ишлаш тартиби

Учоқда ёқилган ёқилгидан ажралган иссиқлик ҳисобига босим остида иссиқ сув ва буғ ҳосил бўладиган ускуналар мажмуи қозон агрегати дейилади. Қозон агрегати ўчоқ, буғлатиш сиртлари — экран, буғ қиздиргич, сув экономайзери ва ҳаво иситкичлардан ташкил топади. Қозон қурилмаси тайёрланадиган маҳсулот турига кўра *буғ қозонлари* ва *сув иситадиган қозонларга* бўлинади. Технология жараёнларининг чиқиндиларини ёқиб ёки металлургия заводларидан ва домна печларидан чиққан тутун-газ аралашмалари иссиқлигидан фойдаланиб ишлайдиган қозонларга *утилизатор* қозони дейилади. Қозон агрегати ва ёрдамчи ускуналар мажмуи қозон қурилмаси дейилади. Қозон қурилмалари ишлатилишига кўра *энергетик*, *ишлаб чиқариш* ва *иситиш* турларига бўлинади. Фақат иссиқлик электр станцияларининг буғ турбиналарини буғ билан таъминлайдиган қозон қурилмалари энергетик қозон қурилмаси дейилади.

Саноатни ва аҳоли яшайдиган жойларни ҳамда идораларни иссиқ сув ёки буғ билан таъминлайдиган қозонлар ишлаб чиқариш ва иситиш қозонлари дейилади.

Қозон қурилмасининг схематик тасвири 37-расмда келтирилган. Қозон қурилмасининг технологик схемасидан кўриниб турибдики, қурилма ўтхона ва тутун йўли, иссиқ сув-буғ аралашмаси йиғиладиган цилиндрсимон ёпиқ идиш — барабан ($h=0,9\div 1,8$ м, $l=35\div 40$ м, $P=20$ МПа гача), иситиш сиртлари (босим остидаги сув ёки буғ трубалари), ҳаво иситкич, экономайзер, буғ қиздиргич, кул туткич, тутун, кул ва шлак чиқарувчи мосламалар, мўри ҳамда ёрдамчи асоб-ускуналардан ташкил топган. Иситиш сиртларига босим остида ҳаракатланадиган сув ва буғ трубаларидан ташқари ўтхона экрани (ўтхона девори бўйлаб жойлаштирилган трубалар дастаси), буғ қиздиргич ва сув экономайзери киради. Қозон қурилмасини енгиллаштириш ва унинг иситиш сирт-



37-расм. Қозон қурилмасининг технологик схемаси: а — сув йўли; б — қиздирилган буғ йўли; в — ёқилғини ўтхонага узатиш йўли; г — ҳаво оқимининг ҳаракатланиш йўли; д — ённи маҳсулотини ташқарига чиқариш йўли; е — ўтхона ва кул туткидан чиққан шлак ва кулни ташқарига чиқариш йўли; 1 — ёқилғи бункери; 2 — кўмир майдалайдиган тегирмон; 3 — тегирмон вентилятори; 4 — горелка; 5 — қозон агрегатининг ўтхонаси ва тутун-газ йўлларининг кесимда кўриниши; 6 — трубалардан ташкил топган экран (ўтхона экрани); 7 — цистернасимон идиш (барабан); 8 — буғ қиздиргич; 9 — сув экономайзери; 10 — ҳаво иситкич; 11 — дсаэрацияли 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 иснтилиши 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 алмашиниш усулида узатилади. Шунинг учун ўтхонанинг бу қисми конвекция шах-

т а с и дейилади. Тутун газларининг температураси конвекция шахтасидан ўтиш вақтида 800—900 К дан 300—400 К гача пасаяди.

Ўтхона деворининг ички қисмига ўтга чидамли ғиштлар (иссиқбардош шамот, динас, магнезит ва ш. к.) терилади. Ташқи томонидан металл қоплама билан ўралади. Бу ўтхона мустаҳкамлигини оширибгина қолмасдан, унинг ичига девор орқали ортиқча ҳавонинг сўрилишиндан ва газларнинг ташқарига чиқишиндан сақлайди.

Сув буғини ҳосил қилишда махсус конструкциядаги қозон қурилмаларидан — сув тайёрлаш, буғ қиздиргич, буғ генераторларидан фойдаланилади. Ҳосил қилинган буғ ёрдамида бир ва кўп босқичли (қувватига қараб) буғ турбинаси электр генераторидан фойдаланиб, электр энергияси ишлаб чиқарилади. Ишлатиб бўлинган буғнинг қолдиқ иссиқлигидан тўла фойдаланиш мақсадида иссиқлик конденсатор орқали чиқарилиб истеъмолчига (турар жой бинолари, саноат корхоналари, маиший хизмат идоралари, мактаб, касалхона, боғча ва ш. к.) узатилади. Истеъмолчилар қўллаган иситиш аппаратлари ўз навбатида совиткич вазифасини ҳам бажаради. Ишлатилиб бўлинган буғнинг асосий қисми конденсаторда иссиқлик алмашинуви натижасида совитилиб, сувга айлантирилади ва у насос ёрдамида яна қозон агрегати-га ёки буғ генераторига қайтарилади.

Қозон қурилмасининг асосий ёқилғиси сифатида тошкўмир, торф, нефт ва унинг оғир фракциялари, домна ва табний газ, ёнувчи сланецлар ишлатилади. Айрим куч қурилмаларида иссиқлик энергияси манбаи сифатида қуёш энергиясидан, актиноидлар гуруҳидаги уран, плутоний элементларининг занжирли ядро реакцияси вақтида ажраладиган иссиқлик энергиясидан фойдаланади.

Қозон қурилмасига ёқилғи махсус ёқилғи сақланадиган омбороналардан турли-туман узаткичлар орқали майдалаб ёки бутунлигича, махсус қўшимчалар қўшиб ё қўшмасдан бункерга узатилади. Қаттиқ ёқилғини чанг ҳолатигача майдалаб, ёқиладиган қозон қурилмасини қараб чиқайлик. Унинг технологик схемаси 37-расмда келтирилган. Кўмир омборхонада майдаланганидан сўнг, узлуксиз ҳўл кўмирни қабул қилувчи ёқилғи бункери 1 га ва ундан кўмир тегирмони 2 га йўналтирилади. Тегирмонда тайёрланган чангсимон кўмир махсус вентилятор 3 ҳосил қилган ҳаво оқими ёрдамида,

трубопровод орқали, қозон қурилмаси биноти 14 ичида жойлашган ўтхона 5 нинг горелкаси 4 га узатилади. Ёнишни тўла таъминлаш мақсадида иситкич 10 орқали атмосфера ҳавоси иситилиб пуфлаш вентилятори 13 ёрдамида горелкага узатилади. Қозонни сув билан таъминлайдиган цилиндрсимон барабан 7 га сув деаэрация (юнотча *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 буги, ўтхона экрани 6 вазифасини бажарувчи трубаларда ҳосил бўлади ва босим остида барабан 7 га ўтади. Трубаларда ҳосил бўлган қуруқ тўйинган буг барабан орқали ўта қиздиргич 8 га ва ундан истеъмолчига узатилади.

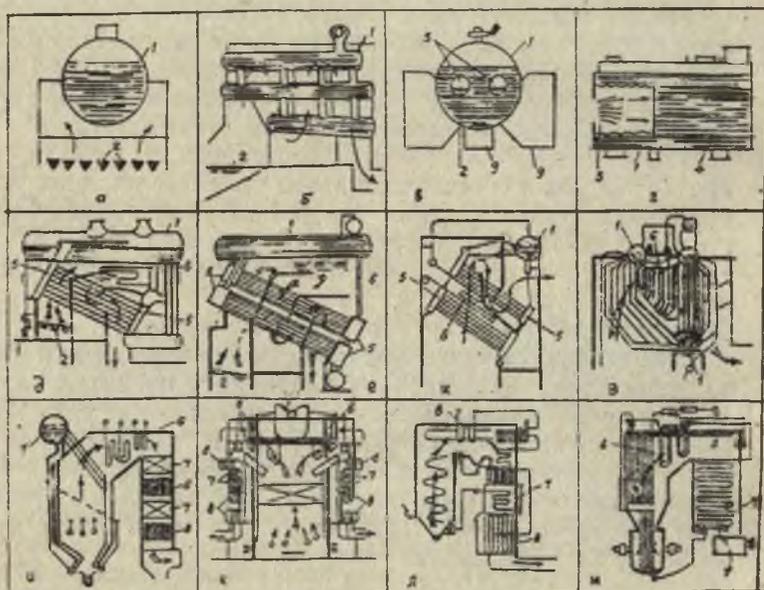
Ёқилғининг ёнишидан машғалали аланга пайдо бўлади ва унинг температураси 1700—1800 К га етади. Бу юқори температурали аланга ўтхона ичида унинг девори бўйлаб вертикал жойлашган труба сиртларини ялаб иситиши натижасида унинг температураси 1200—1300 К гача пасаяди. Тутун газлари ўтхонанинг юқори қисмида газ йўлида жойлашган бугни 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 чуқинди 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. Буг қозонлари

Иссиқлик энергиясига саноат, маиший хизмат, идоралари ва аҳоли яшайдиган турар жойларда талаб ортган сайин буг ва иссиқ сув тайёрлайдиган қозонлар тузилиши ва уларда тайёрланадиган буг параметрлари

ўзгариб борди. Энг аввал, буғ қозонининг тузилиши содда, ишончли ва хавфсиз ишлаши, уни тайёрлашга металл кам сарфланиши ва ФИК юқори бўлишига эътибор берилди. Янги турдаги буғ қозонлари лойиҳаланди, сўнгра қурилди ва синаб кўрилди (38-расм). Тайёрланадиган буғ босими атмосфера босимидан юқори бўлган ҳамма турдаги қозонларда ёқилгининг ёнишида ажралиб чиққан иссиқлик миқдоридан самарали фойдаланиш масаласи асосий масаладир. Тузилиши жиҳатидан улар бир-бирдан фарқланса-да, уларнинг вазифаси битта—буғ тайёрлашдан иборат. Масалан, оддий цилиндрсимон буғ қозони икки йўналишда такомиллаштирилган: а) *газ труба*ли, яъни буғланадиган сув ичидан катта диаметрдаги 2—3 та ўт қувурлари ўтиб, унинг охири кичик диаметрли тутун қувурларига ажралади;



38-расм. Буғ қозонларининг турлари: а — цилиндрсимон; б — батареяли; в — ўт труба; г — ўт ва тутун труба; д — камерали горизонтал сув труба; е — камерали горизонтал (В. Г. Шухов лойиҳаси) сув труба; ж — икки тарамли қия труба; з — сув труба-лари қия жойлашган; и — сув труба П шаклида жойлашган; к — сув труба вертикал жойлашган Т-симон қозон; л — тўғри оқимли (Л. К. Рамзи 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 тўплам-тўплам қилиб жойлаштирилган кичик диаметрли горизонтал, қия (12° гача бурчак остида) ва вертикал сув қувурли қозонлар яратилди. Бу сув қувурларининг пастки учи коллекторга, юқори учи барабанга бирлаштирилиши натижасида буғ йигувчи 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 булган босимдаги буғни истеъмолчига стказиб беради.

7.6. Сув-буғ тайёрлаш ва сув иситиш қозонларидаги жараёнлар

Қозонларга сув тайёрлаб беришдан асосий мақсад қозонга узатиладиган сувни қайта ишлаш йўли билан унинг физик хоссаларини яхшилаш, қозон агрегатининг иш унумини ва самарадорлигини оширишни таъминлашдан нборат. Маълумки, табиатдаги сувда турли-туман кимёвий элементлар ва уларнинг тузлари эриган ҳолда учрайди. Буларга сув газлари, минерал тузлар, органик моддалар, қаттиқ (қум) зарралар кирди. Бу моддаларнинг сувда бўлиши қозон деворларини тез занглади, уларда қаттиқ чўкма—қуйқа (қасмоқ) қолади. Натижада қозоннинг иш унуми пасайиб кетади ва тезда чнқади.

Масалан, сувда эриган газлар (кислород ва карбонат ангидрид) металлни кучли занглади, қаттиқ зарралар қозон бушлигининг фойдали ҳажмини эгаллайди ва

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

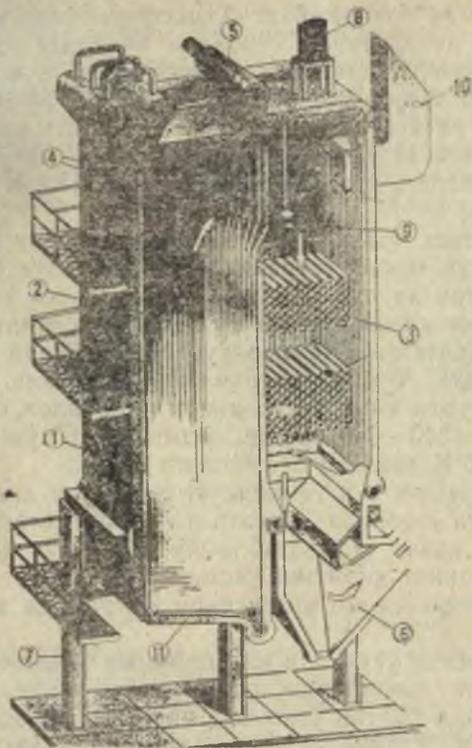
Сувнинг қаттиқ ёки юмшоқлиғи, унинг таркибидаги кальций ва магний тузлари $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, CaSO_4 , MgSO_4 , CaCl_2 , MgCl_2 ва ш. к. миқдори билан баҳоланади. Масалан, 1 мг экв/л сувнинг қаттиқлик бирлиги бўлиб, 1 л сувдаги магний (12,16 мг) ёки кальций (20,04 мг) миқдори олинади. Кальций ва магний миқдори кимёвий анализ йўли билан аниқланади. Сувнинг қаттиқлиги таркибидаги Ca^{2+} ва Mg^{2+} ионлари миқдорига қараб ўзгаради. Сувнинг қаттиқлиги икки хил: сувда Са ва Mg сульфатлари эришдан *нокарбонат* қаттиқлик ҳосил бўлади. Худди шундай, сувда Са ва Mg бикарбонатлари эришдан *карбонат* қаттиқлик пайдо бўлади. Дарё ва кўл сувининг қаттиқлиги 0,1—0,2 мг·экв/л, ер ости, дегиз ва океан сувиники 80—100 мг·экв/л. Сув таъминотидаги сувнинг қаттиқлиги 7 мг·экв/л гача етади.

Сувнинг қаттиқлигини пасайтириш (юмшатиш) учун қозонларга сувни узатишдан аввал, унга сода, натрий фосфат, айрим ҳолларда бошқа тузлар қўшилади. Шунда Са ва Mg қўшилган моддалар билан кимёвий реакцияга киришиб, CaCO_3 , MgCO_3 , $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$ тузларини ҳосил қилиб қозон тубига чуқади ва сув юмшайди. Сувни юмшатишнинг *ионит* усули қўлланилганда, унга сувда эримайдиган табiiй ва сунъий материаллар қўшилади. Масалан, сульфат кислотаси билан ишлов берилган кўмир, сунъий 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—экрaн; 3—конвектив оқим йулидаги қувурлар дастаси 4—Фестон (оқим йулидаги эгри қувурлар); 5—коллектор; 6—бункер; 7—сич; 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 булиб, 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 ёқилгиси сифатида, таркибида олтингугурти кам бўлган мазут ишлатилса, сув температураси $T = 340 - 345$ К дан, олтингугурт кўп бўлганда эса 380—385 К дан кам бўлмаслиги керак.

Қайтган иссиқ сув температураси турли хил таъсирлар ҳисобига юқорида кўрсатилган қийматлардан паст бўлса, унга аввал қозондан тайёр иссиқ сув қўшилади, сўнгра қозоннинг киритиш қисмига узатилади. Сув иситиш қозонининг схематик тасвири 39-расмда келтирилган.

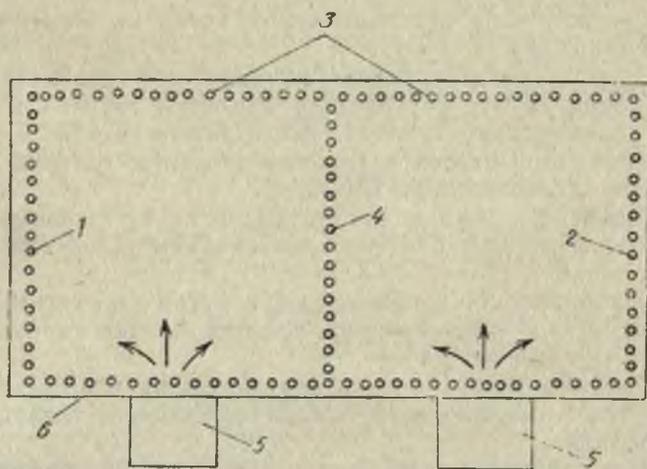
Буғ қозонлар ўтхонали ва ўтхонасиз бўлиши мумкин: ўтхонали буғ қозонларда ҳамма асбоб-ускуналар жойлаштирилади. Ўтхонасиз буғ қозонлари турига қозон утилизаторни киритиш мумкин (39-расм). Бу қозон утилизаторда, асосан ёниш маҳсулоти таркибидаги тутун газлари иссиқлигидан фойдаланилади.

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

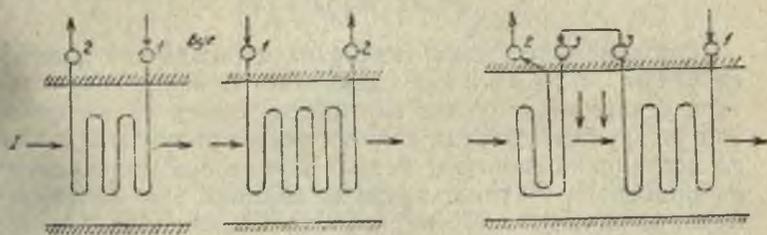
Буғ тайёрловчи экран (трубалар) билан иссиқлик алмашинуви, хусусан ўтхонада, радиация (нурли) иссиқлик алмашинуви инфрақизил нурланиш ҳисобига устувор бўлади. Экранда, ёниш вақтида ҳосил бўлган аланга билан контактлашгандаги иссиқлик алмашинуви асосий ҳисобланмайди. Ёниш маҳсулоти билан ўтхонанинг чиқиш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

Ўтхона ичидаги буғ 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 вазифасини 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 кссими): 1—4 экран трубалари; 5—горелкалар; 6—ўтхона танаси.



41-расм. Горизонтал тутун-газ йулида 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 мустақкамлиги 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 ўта қиздирилган буғ тайёрлашда диаметри 22—54 мм ли металл трубалар ўтхонада жойлаштирилади ва ёқилги алангасининг бевосита таъсири ҳисобига уларда ўта қиздирилган буғ ҳосил бўлади.

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

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

Тайёрланадиган буғ параметрлари ва унинг сарфи бир текис сақланади, бу билан истеъмолчи 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

Суюқликнинг ташқи таъсир натижасида газ ҳолатига ўтиши бўғланиш 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 молекулаларининг кинетик энергияси ортади. Молекуланинг мувозанат ҳолатидаги кинетик энергияси унинг q иссиқлик миқдорини ютгандан кейинги кинетик энергиясидан анча кичик бўлгандагина суюқлик газ ҳолатига ўта бошлай-

ди, яъни бугланади. Аксинча, булганда конденсация ҳодисаси кузатилади. Сууюқлик сиртидан қанча молекула узилиб чиқиб газ ҳолатига ўтса ва худди шунча молекула конденсацияланиб сууюқлик ҳолатига қайтса, бундай ҳодиса тўйиниш ҳолати деб қабул қилинган, яъни буғ сув билан мувозанатда бўлади. Сууюқлик билан динамик мувозанатдаги буғ тўйинган буғ дейилади. Сууюқликнинг эркин сирти устидаги бушлиқни тўйинтирадиган буғ қисми нам буғ дейилади. Тўйинган нам буғда майда сув томчилари бўлади.

Сууюқликка узатиладиган иссиқлик миқдори ортиб бориши билан унинг температураси ҳам кўтарилади ва сууюқлик молекулаларининг газ ҳолатига ўгиши кузатилади. Натижада жадал равишда буғ пуфакчалари пидиш деворларида сууюқлик ҳажмида пайдо бўлади ва катталашиб сууюқлик сиртига қалқиб чиқиб ёрилади. Бундай ҳодиса қайнаш дейилади.

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

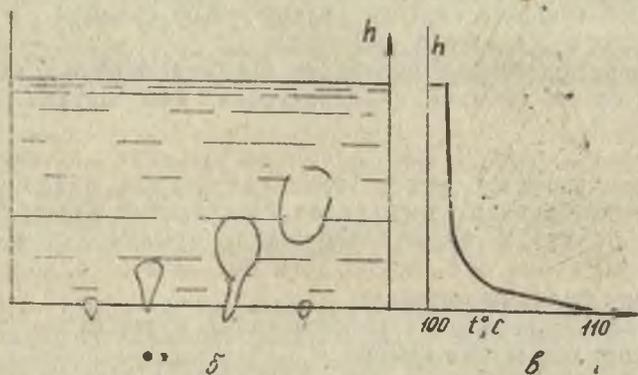
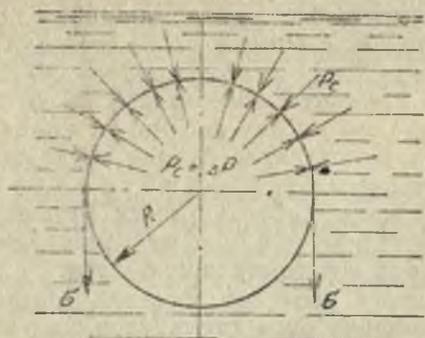
Ҳосил қилинган нам буғга яна қўшимча иссиқлик миқдори узатилса, унинг таркибидаги жуда майда сув томчилари буғ ҳолатига ўтади ва тўйинган қуруқ буғ ҳосил бўлади. Буғнинг қуруқлик ва намлик даражаси тўйинган қуруқ буғ таркибидаги буғ ва сув томчилари миқдори билан баҳоланади.

Буғнинг қуруқлик даражаси қанча катта бўлса, уни ишлатиш ҳам шунча қулай.

Тўйинган қуруқ буғни яна қиздирсак, у ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади, яъни сууюқлик 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 тула газ ҳолатига ўтади, яъни тўйинган қуруқ буғ ҳосил бўлади.

Жадал буғланиш ўзгармас босим ($P = \text{const}$) ости-



42-расм. Сув буғининг PV диаграммаси.

да содир бўлганда жараён ҳам изобарик, ҳам изотермик бўлади ($b-d$ ва $b'-d'$ нуқталар оралиғи).

Тўйинган қуруқ буғга q иссиқлик миқдори киритилса, унинг параметрлари ўзгаради, яъни T ва V ортади, чунки жараён $P = \text{const}$ да содир бўлади. Тўйинган буғ d ва d' нуқталардан ўнг томонда ўта қиздирилган буғ ҳолатига ўтади.

Сув сирти устидаги босим бир хилда тутилмаса, b ва d нуқталар аста-секин бир-бирига яқинлашиб, K (критик) нуқтада маълум босим ва ҳажмда устма-уст тушади. Критик нуқтадан чап томонда сув буғи таркибида майда сув томчилари бўлган ўта қизиган буғ ҳолатида бўлади; шу K нуқтадан ўнг томонда сув буғи

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

Сув буғини ўрганиш ва ундан фойдаланишда изохорик, изобарик, изотермик ва адиабатик жараёнлар ўринли бўлади.

7.9. Сув буғи ва уни тайёрлашдаги асосий термодинамик жараёнлар

Содир бўладиган термодинамик жараёнларни билмасдан туриб сув буғидан буғ-куч қурилмаларида самарали фойдаланиб бўлмайди. Бу жараёнларни қисқагина қараб чиқамиз.

Изохорик жараён. Ўзгармас ҳажмда ($V = \text{const}$) жойлашган сув буғига иссиқлик миқдори узатиб, бу тўйинган буғни тўйинган қуруқ ва ўта қиздирилган буғга айлантириш мумкин. Лекин, ҳар қандай температурадаги буғни совутганимизда конденсацияланиш даврида суюқ фаза миқдори ортиб борса-да, буғ 100% суюқликка айланмасдан суюқлик устида маълум миқдорда буғ қолади. Шунинг учун изохорик жараённинг PV диаграммаси нолдан бошланмайди (43-расм, 1 ва 2 нуқталар оралиғи).

Ҳар қандай паст босимда ҳам суюқлик сирти устида маълум миқдордаги тўйинган буғ бўлади.

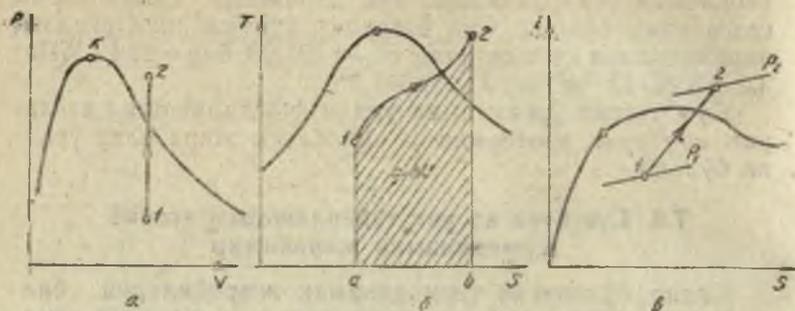
Демак, термодинамиканинг биринчи қонунига мувофиқ $V = \text{const}$ бўлганда сув буғининг бажарган иши $A = 0$ бўлади. Буғга узатилган q иссиқлик миқдори унинг ички энергиясининг ўзгаришига сарф бўлади:

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

ёки

$$q = (i - PV)_2 - (i - PV)_1.$$

Сув буғининг TS диаграммасидан кўришиб 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 (г) диаграммалари.

Изобарик жараён. Ўзгармас босим остидаги буғга ташқаридан q иссиқлик киртилса, унинг V , T параметрлари ўзгариши натижасида буғ иш бажаради ва унинг сон қиймати a b нуқталар билан чегараланган юзага тенг бўлади.

Сарфланган иссиқлик миқдори a b нуқталари ҳосил қилган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг бўлади (144-расм, а, б). Бу иссиқлик миқдори буғнинг ички энергиясини ўзгартирибгина қолмасдан фойдали иш ҳам бажаради:

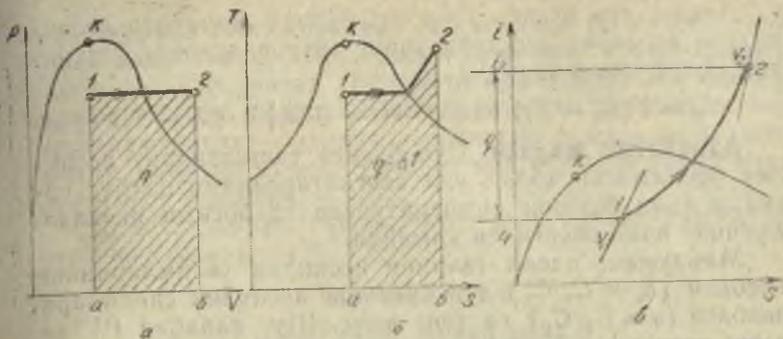
$$q = \int_1^2 dq = \int_1^2 di = i_2 - i_1 \quad (235)$$

ёки

$$q_1 = u_2 - u_1 = (i - PV)_2 - (i - PV)_1, \\ [A = P(V_2 - V_1)] \quad (236)$$

Сув буғига узатилган иссиқлик миқдорининг ютилиши натижасида тўйинган ҳўл буғнинг қуруқлик даражаси аввалига ортади, сунгра бу қуруқ буғ қуруқ ҳолатдан ўта қиздирилган даражага ўтади. Бунда, албатта буғнинг температураси кўтарилиб боради.

Изотермик жараён. Сув буғининг температураси ўз-

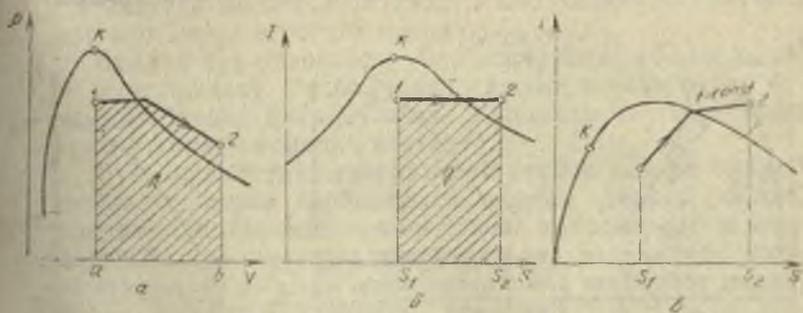


44-расм. Сув буғининг изобарик жараёндаги PV (а), TS (б) ва iS (в) диаграммалари.

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.

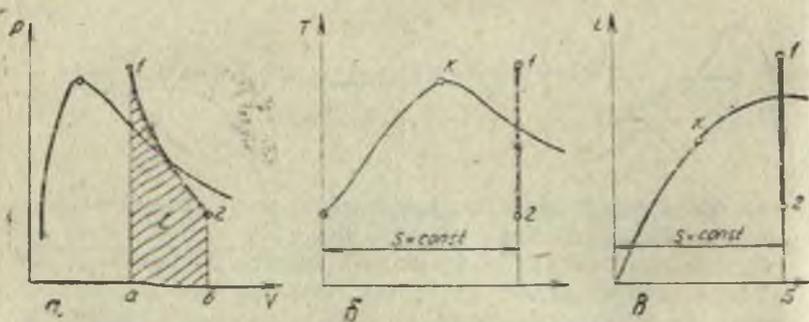
Демак, сув буғига $T = \text{const}$ бўлган жараёнда келтирилган иссиқлик миқдори унинг энтропиясининг ўзгаришига сарфланар экан:

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

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

Маълумки, идеал газнинг иссиқлик сиғимларининг нисбати ($k_r = C_p/C_v$) сув буғининг иссиқлик сиғимлари нисбати ($\kappa = C_p/C_v$) га тенг эмас. Шу сабабли $PV^\kappa = \text{const}$ тенгламасини буғнинг аниқ соҳаларига жорий қилиш мумкин. Чунки адиабата кўрсаткичи κ ҳар ҳол қийматларни қабул қилади. Масалан, ўта қиздирилган буғ соҳаси учун C_p/C_v нинг ўртача қиймати $\kappa = 1,3$ бўлса, нам буғ соҳасидаги қиймати $\kappa = 1,035 - 0,1 x$ 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:

$$dq = du + dA$$

$$dA = -du, \text{ чунки } dq = 0$$

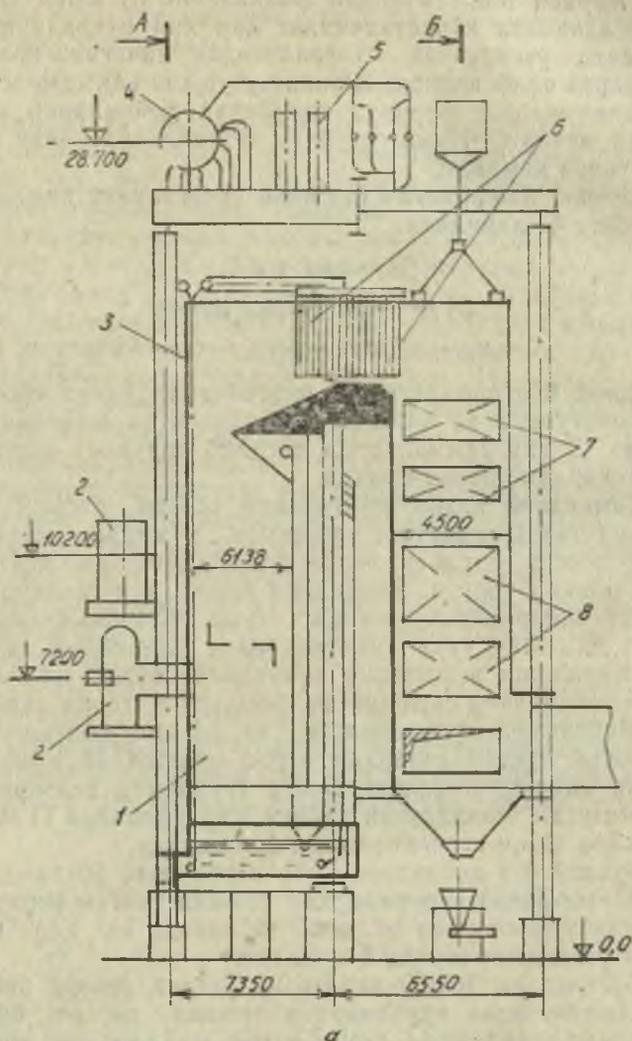
$$A = u_1 - u_2 = (i - FV)_1 - (i - PV)_2. \quad (239)$$

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

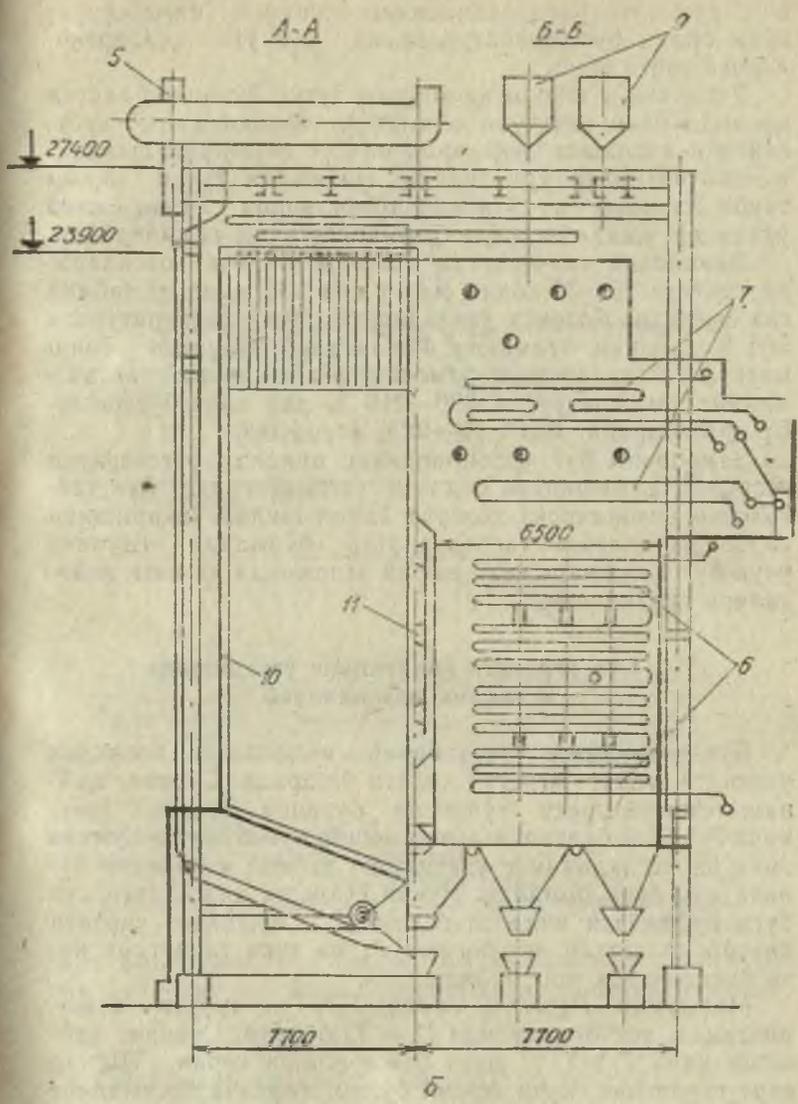
Замонавий қозон агрегатлари асосан табиий ёки сунъий газда, мазутда, чангсимон кўмирда ишлайди. Улар асосан, барабан, экран сув иситкич, ҳаво иситкичдан ташкил топган. Замонавий қозон агрегатларининг ишлаб чиқарадиган буғининг сарфи 400—450 т/соат, босими 25,5 МПа гача, температураси 700—850 К га етади. 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 экранни (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 экранни ёки шифтнинг радиацияли буғ ўта қиздиргичи дейилади. Буғ ўта қиздиргичининг яна бир қисми труба пардаси ҳисобланади. Ўта қиздиргичнинг 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 — кўпдаланг кесими; 1 — ўтхона; 2 — горелка; 3 — экран — буғ қиздиргич; 4 — барабан; 5 — циклонлар; 6 — буғ қиздиргич пардалари; 7 — буғ қиздиргичнинг коивектив 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 тулиқ ялаб ўтади ва жадал иссиқлик алмашинувини таъминлайди.

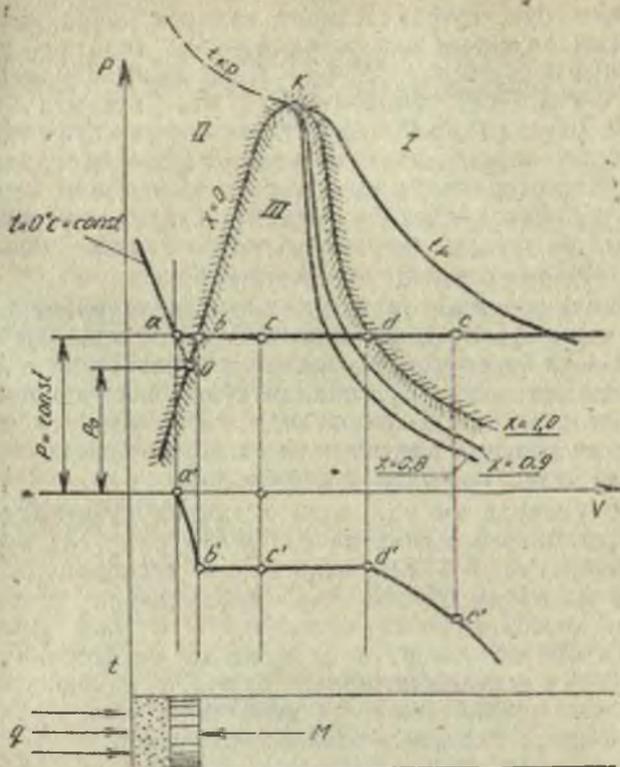
Замонавий газ-музутда ишлайдиган буғ қозонларида соатига 25—30 тонна мазут ёки 30 минг м³ табиий газ ёқилади. Қозонга узатиладиган сув температураси 500 К дан кам бўлмайди. Ишлатилиб бўлинган ёниш маҳсулоти газларининг атмосферага чиқарилаётган қисмининг температураси 390—410 К дан паст бўлмайди. Бу 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 яратилапти.

7.1. Сув агрегати ҳолатининг ўзгаришида иссиқлик алмашинуви

Буғ қозонидаги сувга бирор миқдордаги иссиқлик узатилса, унинг агрегат ҳолати ўзгаради. Сувнинг қайнаш температураси тўйинган буғники $T_{т.б.}$ га тенг, яъни $T_c = T_{т.б.}$ бўлганда сув ҳажмида буғ бўлиши мумкин эмас ва иссиқликнинг узатилиши табиий конвекция бўйича рўй бера олмайди. Чунки суюқлик ҳажмидаги сув буғи пуфакчаси ичидаги босим P_n пуфакча сиртига таъсир қилаётган сув босими P_c ва сирт таранглик кучи йиғиндисига тенг бўлади.

Маълумки, $P_n > P_{т.б.}$ бўлса, $T_n > T_{т.б.}$ шarti бажарилганда, ҳеч бўлмаганда $T_n = T_c$ бўлади. Сувнинг қайнаши учун $T_c > T_{т.б.}$ шарт бажарилиши керак. Шунда сирт таранглик кучи асосий бўлиб, пуфакча босимининг орттирмасига қайнаш боғлиқ бўлади, яъни ΔP қанча катта бўлса, сув шунча тез қайнайди. Шунда $\Delta T_c = T_c - T_{т.б.}$ ҳам катта бўлади. 48-расмдан кўриниб турибдики, буғ пуфакчаси кесимининг периметри бўйлаб



48-расм. Қайнаётган сув ичидаги пуфакчага таъсир этувчи кучлар (а), қиздирилаётган идиш сиртидаги микроөриқларда сув буги пуфакчаларининг пайдо бўлиши (б) ва қайнаётган сув қалинлиги бўйича температуранинг тақсимланиши (в).

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 таранглиги кучи; R — пуфакчанинги ички радиуси, м.

Демак, буг пуфакчасининг радиуси қанча кичрай-тирилишидан қатъи назар, маълум $R_{кр}$ (критик радиус) да пуфакча ичидаги $P_c + \Delta P$ босимлар йиғиндисини 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 қушилиб кетади. Таҳлилдан шундай фикр келиб чиқади: *пуфаклар радиуси нолдан бошланганда, суюқлик ҳеч вақт қайнамаган бўлар эди.*

Сувнинг қайнаши бу, албатта, сув газларининг ажралиши, яъни буг пуфакларининг пайдо бўлишидан бошланади. Сув буғи учун $R_{кр}$ маъжуд эмас. Чунки сув буғи пуфакчаси ҳосил бўлганидан сунг унга ташқаридан иссиқлик узатилиши натижасида унинг радиуси ортиб боради ва маълум вақтдан сунг 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 алмашинувини 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 буг парда пайдо бўлади. Шундай ҳолат ўринли бўлганда иссиқ сирт билан суюқлик ўртасида буг пуфакчалари орқали иссиқлик алмашинуви ва буг ҳосил бўлиши жадаллашади. Лекин, буг пуфакчаларининг иссиқлик ўтказувчанлиги ёмон бўлганлигидан буг пардаси иссиқлик алмашинувиға тўсқинлик қилади. Иссиқ сирт температураси жуда кўтарилиб (1000°C) кетиши оқибатида аппаратлар ишдан чиқиши мумкин. Шунинг учун буг парда ҳосил бўлишиға йўл қўйилмайди. Бундай ҳолатда, у қозонға келтириладиган иссиқлик миқдорини кескин камайтириш зарур бўлади. Бу эса қозон агрегатига зўр келади. Шунинг учун буг пуфакчали қайнаш жараёни ўринли бўлишини таъминлаш мақсадида, махсус тажрибада аниқланган эмпирик форму-

лалардан фойдаланиб, иссиқлик узатиш коэффициентни α ҳисобланади.

Масалан, сув буғининг босими 0,1—0,3 МПа оралиғида бўлганда иссиқлик узатиш коэффициентини

$$\alpha = 0,38q^{0,2} p^{1,5}, \quad (242)$$

деб қабул қилиш мумкин.

Сув буғидаги q иссиқлик миқдори бошқа муҳитга узатилганда (ўтказилганида) у совийди, натижада конденсация ҳодисаси (буғнинг сувга айланиши) устувор бўлади. Бу ҳолат сув буғининг температурасига нисбатан иссиқлик алмаштиргич сирти температураси кичик бўлганда ($T_{т.б.} > T_{и.л.}$) содир бўлади. Конденсация икки хил — томчисимон ва пардасимон бўлади. Симоб буғи ёки идиш деворини ҳўлламайдиган суюқликларда томчисимон конденсация кузатилади. Идиш деворини ҳўллайдиган суюқликларда пардасимон конденсация ўринли бўлади. Пардасимон конденсация ҳаётда ва техникада кўпроқ учрайди.

Иссиқлик алмаштиргич сиртидаги температура $T_{и.л.}$ тўйинган буғ температурасига тенг. Конденсацияловчи сирт температураси қанча паст бўлса, конденсатнинг ҳосил бўлиши жадаллашади.

Сув буғининг суюқликка айланиш жараёнидаги иссиқлик алмашинувида иссиқлик узатиш коэффициенти $\alpha = 5000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ атрофида бўлади. Идиш деворининг юқорисидан пастки қисми томон конденсат (ҳосил бўлган сув) қалинлиги ортиб боради. Аммо пардасимон конденсация ўринли бўлганда идиш деворининг юқори қисмида иссиқлик узатилиши яхши бўлса, пастки қисмида ёмонлашади. Пардасимон қатламда иссиқлик алмашинуви жадаллашиш ўрнига секин-аста сусаяди, чунки парда қалинлашиб боради.

Конденсатнинг ламинар оқиб тушиш жараёнидаги маҳаллий иссиқлик узатиш коэффициентини В. Нуссельт конвектив иссиқлик алмашинуви учун қуйидагича ифодалаган:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{r \rho g^{2,3}}{4\lambda(T_{т.б.} - T_g)x}}, \quad (243)$$

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

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

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

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

$$\bar{\alpha} = 0,729 \sqrt{\frac{r p^2 g \lambda^3}{\mu (T_{г.б.} - T_g) d}} \cdot \epsilon_T, \quad (245)$$

бунда

$$\epsilon_T = \left[\left(\frac{\lambda g}{\lambda} \right)^3 \cdot \left(\frac{\mu}{\mu_g} \right)^{11} \right]^8 \text{ — тузиш коэффициенти.}$$

7.11. Буғ қозонининг иссиқлик баланси ва ФИК

Буғ қозонига бериладиган иссиқлик миқдори сарфланганига тенг, яъни $q_{кел} = q_{сарф}$ бўлиши керак. Иссиқлик баланси тенгламаси, одатда 1 м³ сууюқлик ёки газ, 1 кг қаттиқ ёқилғининг муътадил (нормал) шароитда (273,15 К; 0,1030 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:

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

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

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

$$q_{ф.и} = C_e T_e; \quad q_{с.х} = \alpha_{о.х} V_n C_x \cdot T_{с.х}; \quad (247)$$

$$q_{б.и} = g_{б.с} (i_б - 2750),$$

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; $V_{н.}$ — 1 кг ёки 1 м³ ёқилғининг ёниши учун зарур бўлган ҳавонинг назарий ҳисобланган ҳажми; $\alpha_{с.х}$ — ортиқча ҳаво коэффициенти; $g_{б.с}$ — пуфланадиган буғнинг солиштирма сарфи (масалан, ўтхонада мазут ёқилганда 1 кг мазутга 0,3 кг буғ пуркалади); i_6 — сув буғининг энтальпияси, кЖ/кг; 2750 кЖ/кг — чиқиб кетаётган аниқ температурали ($T=400-410$ К) газлар таркибидаги сув буғининг энтальпияси.

Юқорида келтирилган тенгламадаги $q_{с.х}^e$ ва $q_{н.и.}$ — иссиқлик миқдорларида ёқилғининг ёниши жараёнида сув буғининг конденсацияланишида ажраладиган иссиқлик эътиборга олинмаган. Келтирилган баланс тенгламасида ҳавонинг келтирилган иссиқлик миқдори ҳам ҳисобга олинмаганлигига асосий сабаб атмосферага чиқарилиши зарур бўлган иссиқликни ҳаво қайтариб ўтхонага узатади, деб фараз қилинади.

Баланс тенгламасидаги $q_{ф.и.} + q_{с.х} + q_{н.и.}$ йиғинди $q_{с.х}^e$ га нисбатан жуда кичик бўлганлиги сабабли уларни айрим тақрибий ҳисоблашларда эътиборга олинмаса ҳам бўлади. Унда (216) тенглама қуйидаги кўринишга келади:

$$q_{кел} = q_{н.и.} \cong q_{с.х}^e.$$

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

q_3 — ёқилғининг тўла ёнмаслигилан юзага келадиган исроф;

q_4 — механик жиҳатдан тўла ёнмасликка олиб келадиган исроф;

q_5 — тутуннинг конвектив йўлларидаги исрофи;

q_6 — қозон агрегатидан ташқарига чиқариладиган шлак иссиқлиги ҳисобига бўладиган исроф.

Демак, қозоннинг иссиқлик баланси тенгламасини қуйидагича ёзиш мумкин:

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

Қозонга келтирилган тўла иссиқликни 100% деб олинса,

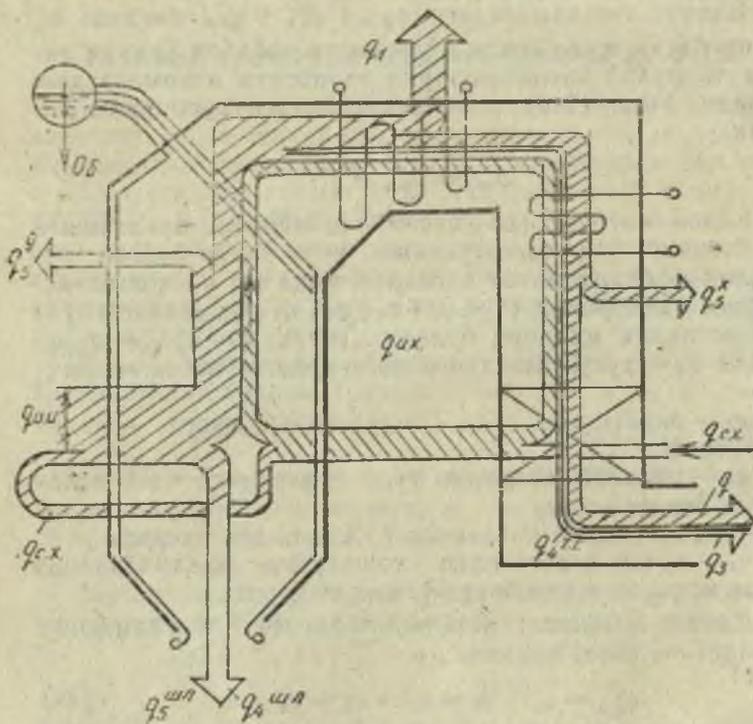
у ҳолда баланс тенгласини қуйидагича ифодалаш мумкин.

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

Буг қозонидаги иссиқлик балансини схематик усулда тасвирлаш мумкин (49-расм).

Схематик тасвирдан маълумки, $q_{н.х}$ — иссиқ ҳаво оқимидаги иссиқлик миқдори ёниш маҳсулидан олинган, ёпиқ контур бўйича ҳаракатланган иссиқлик энергиясидир, Албатта, бу иссиқлик тутун газларидан олиниб яна ўтхонага ҳаво орқали қайтади. Буг қозони агрегатининг ўзига сарф бўладиган иссиқлик миқдорини ҳисобга олмасдан ҳисобланган ФИК қозоннинг брутто ФИК дейилади.

$$\eta_{с.б} = \frac{q_1 \cdot 100}{q_{н.х}} = Q_1 \quad (250)$$



49-расм. Буг қозонининг иссиқлик балансн.

$$\epsilon_{\text{ки}} \quad \eta_{\text{к.б}} = 100 - (Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6), \quad (251)$$

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:

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

бунда D — қозон агрегатининг иш унуми; $D_{\text{п.с.}}$, $D_{\text{т.б.}}$ ва $D_{\text{и.г.к.б.}}$ — 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; $i_{\text{и.б.к.}}$ — иккиламчи буғнинг киришдаги энтальпияси; i' ва i'' — тўйинган буғ ва қозон сувининг энтальпияси $i''_{\text{и.б.к.}}$ — иккиламчи буғнинг чиқишидаги ва i — иккиламчи буғнинг кириш қисмларидаги энтальпиялари; B — ёқилғи сарфи, у қуйидагича аниқланади:

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

Қозоннинг ФИК (250) баланс теңламаси натижалари асосида ҳисобланади. Қозон агрегатининг лойиҳадаги ФИК теңлама (251) дан топилади. Бу ҳисоблашларда, албатта q_1 синаладиган лойиҳадаги қозон агрегати учун шунга ўхшашларида аниқланган натижалардан олинади.

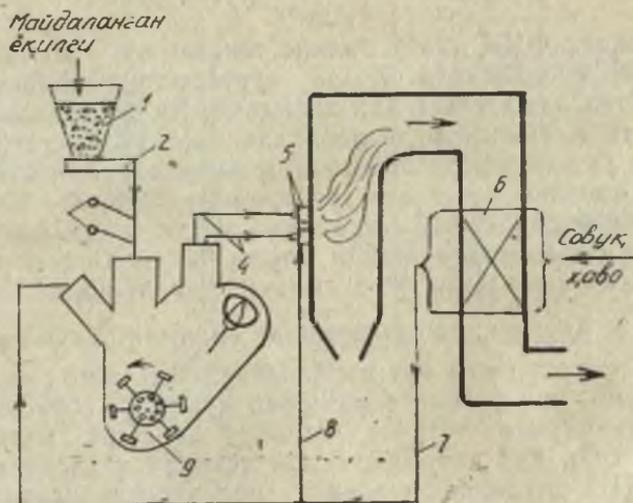
Замонавий қозон агрегатларининг ФИК 90—95% атрофида бўлиб, улар саноатнинг турли соҳаларини буғ ва сув билан таъминлайди ҳамда буғ турбинаси билан ҳамкорликда электр энергияси ишлаб чиқаради.

7.12. Қозон қурилмаларининг ёрдамчи ускуналари

Бу ускуналарга қаттиқ 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 қочма ВТИ скруббери, электр филтрлар) 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 узатилишини ҳамда узатиш миқдорини турғун 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 ёнишдан 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.

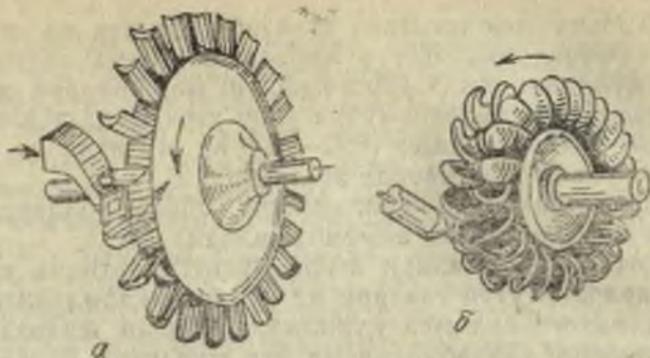
Қозон қурилмалари атроф-муҳитга ортиқча миқдорда зарарли тутун газлари ва кулни чиқармаслиги учун улар махсус ёрдамчи қурилмалар билан жиҳозланади. Ёқилғининг таркибий қисми ўта мураккаб бўлганлигидан уни мутлақо тўла ёқиб бўлмайди. Натижада тутун газлари билан атмосферага заҳарли маргимуш (As), фторли бирикмалар, ванадий бирикмалари, азот оксиди, олтингугурт оксиди, карбонат ангидриди ва кул зарралари чиқарилади. Бу зарарли газлар инсоният ва тирик организмга, ўсимликлар, ҳайвонот оламига, санъат обидаларига салбий таъсир кўрсатади.

Ҳар йили жаҳонда органик ёқилғиларнинг ёқилишидан атмосферага ўртача 100 млн. т кул ва 150 млн. т карбонат ангидрид гази чиқарилади. Масалан, майда антрацит ёқиладиган қуввати 950 т/соат бўлган буғ генератори мўрисидан бир кечаю кундузда 60 тоннагача азот оксиди атмосферага чиқарилади. Шунинг учун қозон қурилмаларининг муътадил 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) буг турбиналари.

си буг турбинаси дейилади. Ҳосил қилинган энергия бошқа турдаги энергияга ёки механик энергияга (ишга) айлантирилади.

Италиялик олим Д. Бранка буг турбинаси моделига хос бўлган буг ғилдирагини 1629 йилда яратган, унда буг оқимининг кинетик энергияси уйғотган импульс куракли ғилдиракни айлантиришга сарфланган.

Эрампздан олдинги даврда, Герон Александрийский томонидан бугнинг реакция кучи ҳисобига айланадиган шар шаклидаги асбоб яратилган. У «Герон шари» деб юритилади. Бранка ғилдираги ва Герон шари ҳеч қаерда қўлланилмаса-да, улар буг энергиясини механик энергияга айлантириш мумкинлигини исботлаб берганлар.

Кейинчалик буг энергиясини механик энергияга айлантириш бўйича кўпгина олим ва ихтирочилар иш олиб бордилар. Масалан, инглиз ихтирочиси Жеймс Уатт 1774 й. ишга яроқли буг машинасини яратди. Ундан олдинроқ 1766 й. буг машинасининг қисмларини И. И. Ползунов ясаган эди.

Сув бугининг кинетик энергиясини механик энергияга айлантириш мумкинлигини швед муҳандиси Г. П. де-Лаваль 1888 й. (биринчи буг турбинаси) исботлади (53-расм, а). Шундай қилиб, буг турбинаси яратилгандан сўнг, уни такомиллаштириш тадқиқотлари ривож топди. Натижада бир, икки, уч ва кўп босқичли буг турбиналари яратилди (52-расм).

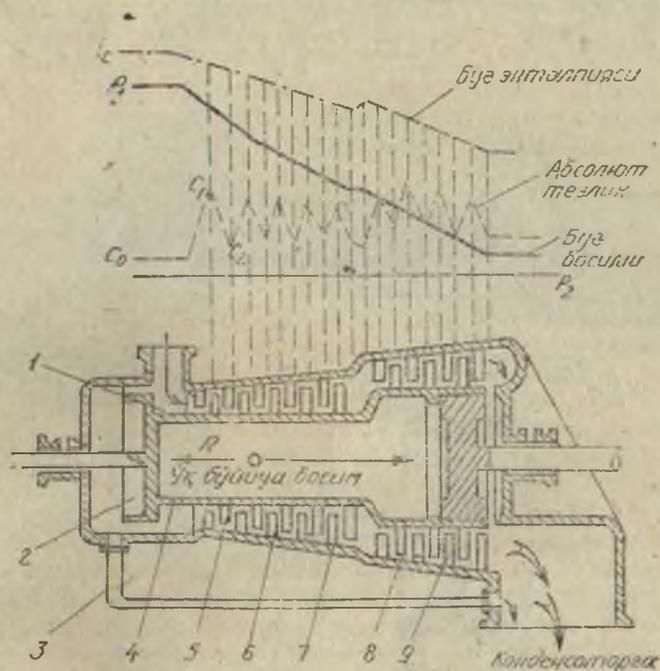
Бугнинг потенциал энергиясини (Бранка ва де-Лаваль услубига асосан) механик энергияга айлантирувчи буг турбинаси актив турбина дейилади. Буг-

нинг потенциал энергияси бугнинг соплода, йўналтирувчи аппаратда ва кураклар оралигида тез кенгайишидан 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.

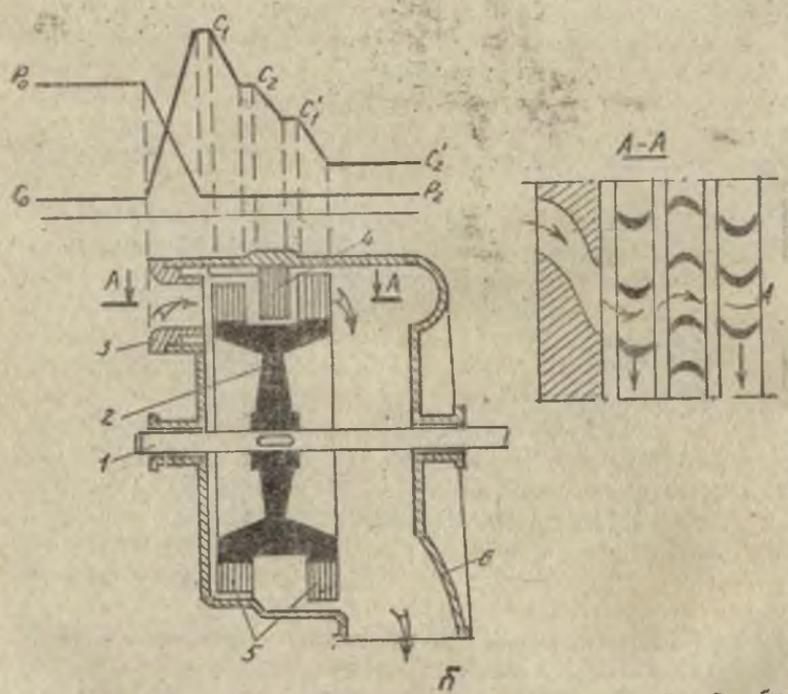
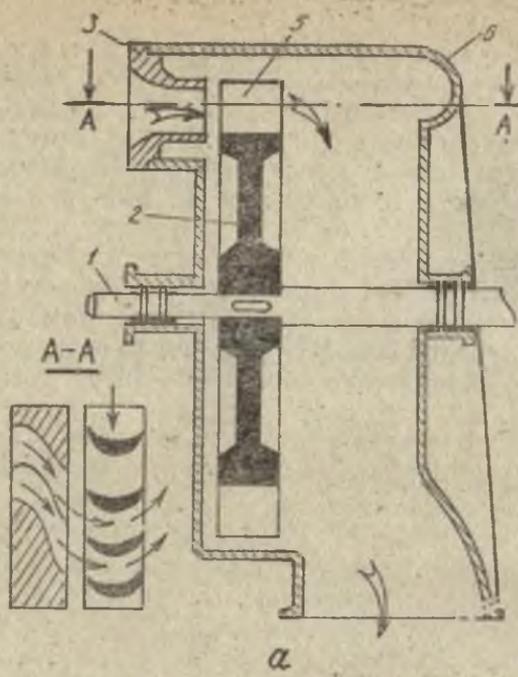
Кейинчалик буғ турбиналарининг номинал қуввати 60 МВт, босими 12,8 МПа га етказилган, у кўпчилик иссиқлик электр станцияларида қўлланилади. Замонавий турбиналарнинг қуввати 1200 МВт дан ишлаб кетган. Турбина роторининг айланишлар сони 2000—50000 айл/мин оралигида.

Буғ турбиналарида кечадиган иссиқлик жараёпларининг турига қура, уларни қуйидаги гуруҳларга бўлиш мумкин.

Конденсацион турбиналар (босими ростланадиган ва



52-расм. Урта қувватдаги реактив буғ турбинаси кесимининг схематик тасвири.



53-расм. Актив буғ турбиналарнинг схематик тасвири: а — бир босқичли де-Лаваль турбинаси; б — икки босқичли турбина.

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

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

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

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

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

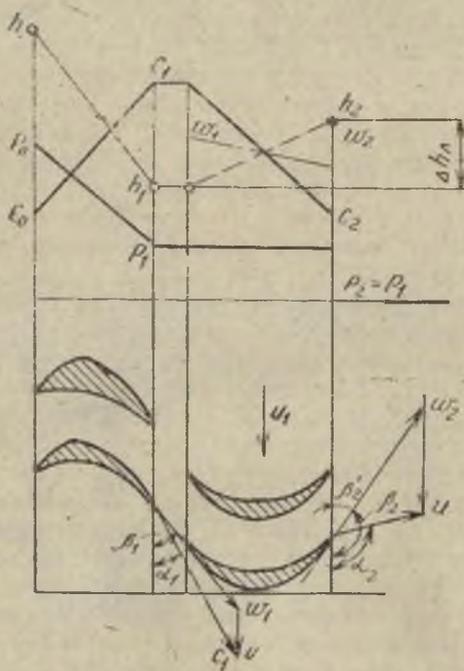
Буғ турбиналари бир, икки ва кўп босқичли ҳамда мос равишда паст, ўртача ва юқори босимли бўлади.

Буғ турбинаси, буғни ҳалқасимон киритилиш камераси 1, сингллаштириш поршени 2, бирлаштирувчи буғ трубаи 3, ротор барабани 4, иш кураклари 5 ва 8, йўналтирувчи кураклар 6 ва 9, тапа 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 турбинаи вал 1, кураклар 5, маҳкамланмайдиган диск 2, буғнинг кириш канали ҳисобланган сопло 3, турбина тапаси 6 ва босқичли турбиналарда эса қўшимча йўналтирувчи кураклар 4 дан ташкил топган. Иш бажарувчи куракларда иссиқликнинг пасайиши Δt_k ни маълум тезликка мос келувчи имконияти бўлган иссиқликнинг пасайиши Δt_u га нисбати билан ўлчанадиган катталиқ буғ турбинаси босқичининг асосий тавсифи бўлиб ҳисобланади ва у *босқич реактивлиги* дейилади:

$$\Omega = \frac{\Delta i_k}{\Delta i_m} \quad (254)$$

Агар $\Omega=0$ бўлса, имконияти бўлган пессиклик пасайишнинг 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 (54-расм). Агар $\Omega=1$ бўлса, унда имконияти бўлган иёсиқликнинг пасайиши фақат турбина куракларида юз беради. Бундай жараён ўринли бўлганида турбина реактив дейилади.

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



54-расм. Турбина босқичидан буғ оқимиинг ўтиш кинематикаси.

Турбинанинг актив босқичида буг бирданига бир ё бир неча сопло 3 га йўналтирилади. Соплода буг ўзининг тезлигини маълум даражада орттирганидан кейин иш кураклари 5 га бориб урилади ва ўз импульсини беради. Иш бажариб бўлган буг чиқариш трубаси орқали чиқарилади. Турбина танаси 6 ичидаги вал 1 га куракли ротор 2 ўрнатилган. Бугнинг ташқарига чиқиб кетишидан сақлаш мақсадида куракли ротор махсус лабиринт валининг боши ва охирига ўрнатилган. Де-Лаваль турбинасида, буг битта босқичда ишлаганилиги сабабли, унинг тезлиги кураклардан чиқишда ортади. Масалан, киришдаги босими 1 МПа, температураси 780 К бўлган бугнинг ишлаши натижасида унинг босими 10 кПа га тушади. Бунда иссиқлик 980 кЖ/кг гача пасаяди. Бу турбина куракларидан буг зарраларининг 1400 м/с тезликда учиб чиқишига тўғри келади.

Демак, турбина ротори дискининг гардишидаги тезлиги 700 м/с бўлиши талаб этилади. Чунки гардишдаги айланма тезлик бугнинг оқиб чиқиш тезлигининг ярмига тенг бўлганда турбина юқори ФИК эга бўлади. Лекин турбина деталлари бундай тезликка бардош бера олмайди. Тақрибан 300 м/с атрофидаги тезлик турбина учун 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 буг турбиналарининг биринчи босқичида икки чамбаракли Кертис дискдан фойдаланилади. Икки чамбаракли Кертис дискининг ўрта қисми очиқ бўлиб, уни турбина танасида (статор) жойлашган йўналтирувчи кураклар тўлдиради ва бугни куракларга буриб йўналтириб узатиш вазифасини бажаради. Бундай усул қўлланилганда турбинанинг ФИК ортади.

Актив турбиналар босим босқичли, тезлик босқичли ҳамда аралаш (ҳам босим ва ҳам тезлик) босқичли турларга бўлинади. Босқичлар оралиғи диафрагма билан ажратилган. Иш кураклари ўрнатилган диск ягона умумий валга маҳкамланган.

Буг турбиналарининг ҳаммасига ҳам босим остидаги юқори температурали буг сопло орқали киритилади.

Қундаланг кесими S бўлган соплота 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 турли хил ҳолатлардаги газ ва буғлар учун ўзгаради. Масалан, мўътатил 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).

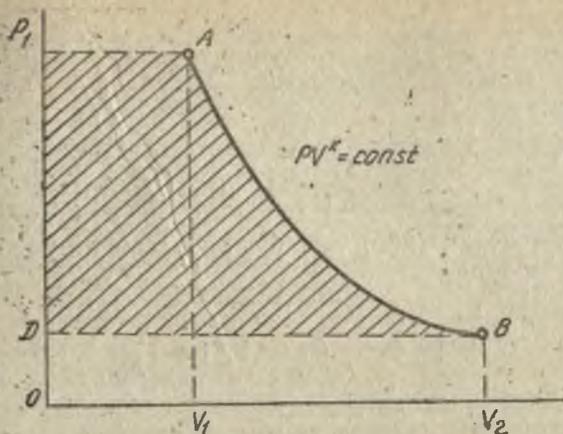
Буғнинг адиабатик кенгайиши PV диаграммадан кўришиб турибди, буғ кенгайиши жараёнида унинг ҳажми V_1 дан V_2 гача ва босими P_1 дан P_2 гача ўзгарибгина қолмасдан, мос равишда унинг температураси, энтропияси ҳам ўзгаради (55-расм).

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 қиймаги жиҳатидан буғнинг кинетик энергиясига тенг. Чунки буғ соплодан кейин турбина куракларидан оқиб чиқиши жараёнида тезлигини бирор C_0 дан C_1 гача ўзгартиради. Бу кинетик энергиянинг ўзгаришини қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\frac{C_1^2}{2g} - \frac{C_0^2}{2g} = S_1, \text{ яъни } S_1 = P_1 AB V_2 OP_1. \quad (255)$$

Буғнинг адиабатик кенгайишида бажарган иши ABV_2V_1A юза S_2 га 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 соплора 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

$S = P_1 A B D P_1$; $S_1 = P_1 A V_1 O P_1$; $S_2 = A B V_2 V_1 A$; $S_3 = D E V_2 O P$
 бўлганлиги асосида юзаларнинг алгебранк йиғиндиси 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:

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

Адиабатик жараёндан маълумки, ҳажмлар нисбатларига онд қуйидаги тенгламадан:

$$P_1 V_1^\kappa = P_2 V_2^\kappa \text{ ёки } \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}}$$

фойдаланиб жараёнда қатнашаётган буғнинг кенгайишидаги кинетик энергиясини қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

Охириги тенглик (260) дан буғ заррасининг учиб чиқиш тезлигини топамиз:

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

Буғ турбинасининг маълум вақт давомида сарфлаган буғ миқдори ишлатилиб бўлинган буғнинг солиштирма оғирлигига, буғ оқиб чиқадиган қувур кесимининг юзасига ва буғ оқими тезлигига боғлиқ:

$$G = S_{V_2} C_2 = S \frac{C_1}{V_2}. \quad (262)$$

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

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

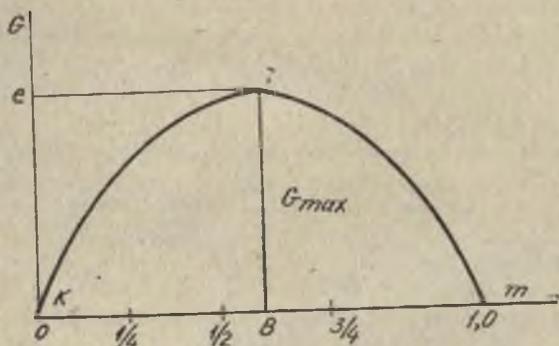
Сарф тенгласига V_2 ва C_1 қийматларини қўйиб, мумкин: агар $P_2/P_1 > 1$ шарт бажарилса, у ҳолда ташқи босим P_2 ички босим P_1 дан катта бўлади, яъни буғ оқиб чиқмайди; агар $P_2/P_1 = 1$ бўлса, у ҳолда $G = 0$ бўлади ва нисбат P_2/P_1 нинг камайиши билан G ортиб боради; агарда $P_2/P_1 = 0$, яъни $P_2 = 0$ бўлса, у ҳолда турбинадан ташқарида абсолют бўшлиқ ҳосил бўлиши мумкин. Демак, сарф $G = 0$ бўлади. Лекин, мантиқан таҳлил қилинса, бундай бўлиш эҳтимоллиги йўқ. Чунки турбинадан ташқаридаги босим йўқ даражада бўлганда, буғ албатта жуда катта тезликда оқиб чиқиши керак. Аммо назарий жиҳатдан қаралса, буғ ташқарига оқиб чиқа олмасдан унинг сарфи нолга яқинлашади. Бундай бўлиши учун ташқи босим турбинада иш бажараётган буғ босимидан катта бўлиши керак. Амалий тажриба натижалари шуни кўрсатадики, маълум шартлар бажарилганда, яъни $P_2/P_1 = 1$ ва $P_2/P_1 = 0$ бўлганда, сарф нолга тенг бўлган қийматлар қабул қилинади. Лекин, бу нолга тенг қийматлар оралигида, албатта ҳеч бўлмаганида,

битта энг катта қийматни қабул қилиши керак (56-расм). Келтирилган график шаклидаги тасвир P_2/P_1 нисбатга асосланган сарфнинг ўзгариш қонуниятни бўлиб, у тўнқарилган 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 Вансел ва Сен-Венан томонидан гипотеза таклиф этилган: чиқиш кесимидаги газ ёки буғ босими ҳамма вақт ҳам ташқи муҳит босимига тенг бўла олмайди. Демак, турбина соплосининг чиқиш қисмидаги P_2 босим маълум қийматларгача ташқи муҳит босимига тенг бўлса-да, ташқи муҳит 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 босими яна ҳам пасайтириб борганимизда, график юқорига қараб ўсмайди, яъни P_2 ортмайди ва OK чизиғи бўйлаб ўзгармасдан қолади. Натижада $G = \text{const}$ бўлади.

Критик ҳолат (k нуқта) учун сарф тенгламасини $P_2 = P^k$ бўлганлиги учун қуйидагича ёза оламиз:

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

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 буғ	1,135	0,577	3,23	1,990
Ўта қиздирил- ган буғ	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

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

булади.

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 буғ оқими-
нинг босими ташқи муҳит босимига тенг булади ва сарф
критик қийматга етмайди. Аксинча, яъни $P_2 < P_k$ бўл-
ганда, чиқариш кесимидаги газ ёки буғ оқимининг бо-
сими ташқи муҳит босимига тенг булади 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
қийматини охириги тенглик (265) дан олиб қўйилади ва
айрим алмаштириш ҳамда ўзгартиришлардан сўнг C_k
ва G_{\max} ифодаси ҳосил қилинади:

$$C_k = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} P_1 V_1};$$

$$G_{\max} = S \sqrt{2g \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \frac{P_1}{V_1}} \quad (266)$$

Бу тенгламаларни яна ҳам соддалаштириш учун айрим коэффицентлар билан радикал остидаги узгармас купайтувчилар алмаштирилиб улар илдиз остидан чиқарилади:

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

Буғ ёки ҳаво учун критик ҳолатдаги коэффицентлар юқоридagi 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) сопола ва иш кураклари деворларига буғ оқимининг ишқаланиши, уюрмалар ҳосил бўлиши натижасида оқимнинг кинетик энергияси исрофи. Ишқаланишсиз оқимга нисбатан бу энергия жараён охирида иссиқлик энергиясига айланиб иш буғи энтальпиясини орттиради;

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

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

г) буғнинг намлиги ҳисобига, турбинанинг охири 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 турбиначининг қуввати ва ФИК

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

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

Буғ турбиначи нисбий индикатор ФИК ни, унинг ички исрофлари ҳисобга олинганда, қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_i = \frac{N_t}{N_0}. \quad (268)$$

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

$$\eta_{\text{мех}} = \frac{N_{\text{эф}}}{N_1}. \quad (269)$$

Замонавий буғ турбиналарининг η_i ва $\eta_{\text{мех}}$ 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 мукаммаллашган технологик услубларсиз такомиллашган саноат ишлаб чиқаришини 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 булган турбиналар қурилмоқда. Бундай қувватдаги турбиналарга узатиладиган иш буги температураси $T=800-850$ К, босими $P=23,5-25,5$ МПа атрофида бўлади. Иш бажариб булган буг температураси 300—400 К, босими 3—7 кПа атрофида бўлади.

IX. 606. ГАЗ ТУРБИНАСИ

9.1. Газ турбинасининг таснифи, тузилиши ва ишлаш тартиби

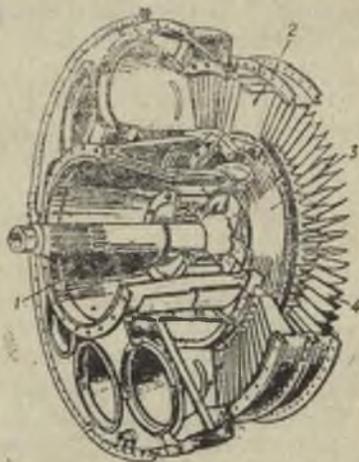
Юқори босим ва температура остидаги ёниш маҳсули (газ) энергиясини кураклар ёрдамида ротор валининг механик энергиясига айлантирувчи иссиқлик машинаси газ турбинаси дейилади. Актив ва реактив газ турбиналари бўлади.

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

Газ турбинаси вал 1, статорда жойлашган сопло аппаратиининг йўналтирувчи кураклари 2, турбина диски (лаппак) 3 ҳамда роторнинг иш кураклари 4 дан ташкил топган. Сопло аппаратиининг 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

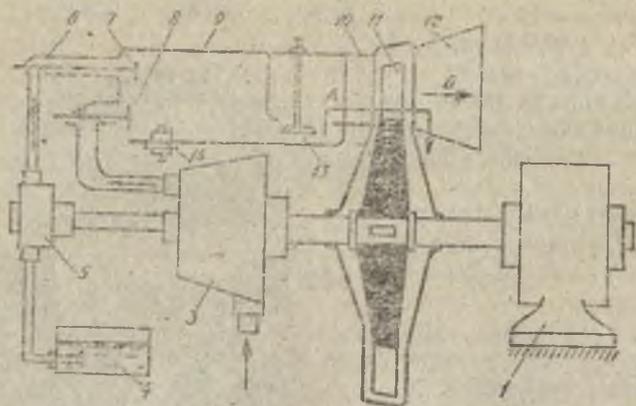


57-расм. Бир босқичли газ турбинаси.

турбиналари қурилмаларининг асосий ташкил этади ва иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантиришда кенг қўлланилади. Газ турбиналари ҳам буғ турбиналаридай бўлиб, фақат уларда буғ урнига ёниш маҳсулоти — тутун асосий иш жисми ҳисобланади. Газ турбинасида газ зарраларининг кинетик энергияси механик энергияга (ҳаракат миқдорининг сақланиш қонунига мувофиқ) айланади. Тутун газлари босимнинг потенциал энергияси соплда кинетик энергиянинг ортишига олиб келса, кинетик энергия роторнинг механик энергиясига айланади.

9.2. Газ турбиналари қурилмалари ва уларнинг циклидаги термодинамик жараёнлар

Газ турбинасининг таркибий қисми ёниш камераси 6, ёниш маҳсулоти оқимидаги иссиқлик энергиясини механик энергияга айлантирувчи газ турбинаси 2, атмосфера ҳавосини сўриб ва сиқиб узатувчи компрессор 3, ёқилғи насоси 5 ва бак 4, электр генератори 1, сопл 11, ёниш камераси 9 ва бошқа ёрдамчи қисмлардан ташкил топган (58-расм). Тузилиши ва ёқилғининг ёқилиш услубига кўра, газ турбинаси қурилмаси (ГТҚ) таркибига электр свеча, иш моддаси (ҳаво ва ёқилғи) ни ёниш камерасига киритиш ҳамда ёниш маҳсулини камерадан чиқара



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

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

Газ турбиnasi қурилмасидаги турбина, электр генератори, ҳаво компрессори ва ёқилғи насоси ягона умумий валда жойлаштирилади. Иш ёқилғисининг $V = \text{const}$ 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 оралиги) ва аниқ параметрга (T , P , V) эга бўлгандан сўнг аввал ҳавони киритиш, кейин ёқилғини киритиш клапанлари очилиб ёниш камерасига мос равишда, сиқилган ҳаво ва ёқилғи узатилади. Шунда ҳосил бўлган иш ёқилғисига ташқаридан q_1 иссиқлик миқдори киритилади, яъни свеча контактлари орасида электр учқун чакнайди. Шу электр учқун q_1 иссиқлик манбай ҳисобланади ва иш ёқилғисини ёндиради. Бу ёниш натижасида ёниш камерасидаги босим кескин ортади (PV — диаграммада 2 ва 3 нуқталар оралиги). Иш ёқилғиси тўла (камида 95%) ёнгандан 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 оралиги) 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 оралиги). 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.

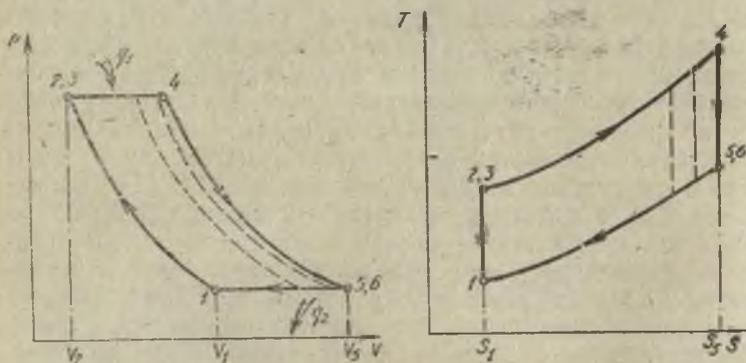
Циклнинг бажарган фойдали иши 1—2—3—4—1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатдан тенг.

Циклнинг TS — диаграммасидан кўришиб 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.

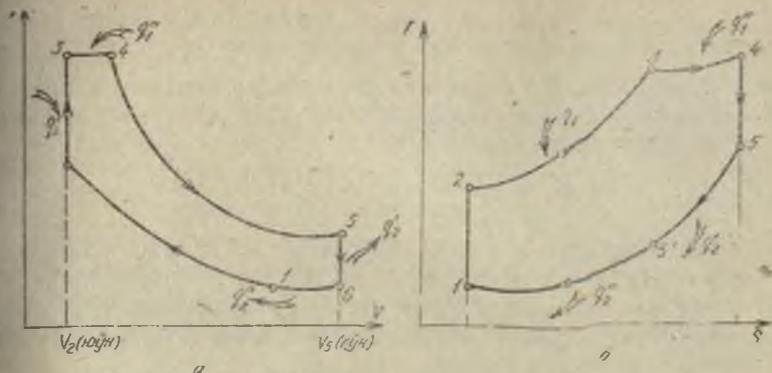
Демак термодинамик системадан иссиқлик чиқарилганида ёки унга киритилганида система энтропияси ва абсолют температураси ўзгарувчан бўлади.

ГТҚ келтирилган тўла иссиқлик миқдорини ишга айлантириш мураккаб физик ва кимёвий, 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 жисмини 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.

ташқил топади ва уларнинг диаграммалари PV ва TS координаталарда ифодаланади. Циклининг термик ФИК ни аниқлашда умумлаштирилган цикл диаграммаларидан фойдаланилади. Масалан, иш жисмининг сиқилиши адиабатик жараён ($dq=0$) деб қабул қилинади. Иш жисмига иссиқлик миқдори (q ва d_1) $V=\text{const}$ ёки $P=\text{const}$ бўлганда ҳамда кетма-кет аввал изохорик, кейин изобарик жараёнларда келтирилади деб қаралади. Иш жисмининг иш бажариши учун унинг кенгайиши адиабатик ($dq=0$) жараён деб қаралади. Қолдиқ иссиқлик миқдори q_2 иш жисмидан $V=\text{const}$ бўлган ҳолатда чиқарилади. Тўлалигича иш жисмидан чиқмасдан қолган иссиқлик миқдори (q_2') $P=\text{const}$ бўлганда ундай чиқарилади, деб фарз қилинади.

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

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \text{ — сиқиниш даражаси;}$$

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

$$\rho = \frac{V_1}{V_2} \text{ — ҳажмнинг дастлабки кенгайиш даражаси;}$$

$$\lambda_p = \frac{P_3}{P_0} \text{ — босимнинг пасайиш даражаси;}$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_1}{V_2} \text{ — ҳажмнинг қисқариш даражаси.}$$

$q_1 = q_1' + q_1''$ — 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 сифими ва ҳолатлардаги температуралар орқали иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned} q_1 &= C_v (T_3 - T_2) + C_p (T_1 - T_3) \\ q_2 &= C_v (T_3 - T_4) + C_p (T_4 - T_1) \end{aligned} \quad (270)$$

Циклга келтирилган ва уйдан чиқарилган иссиқлик миқдорларини цикл параметрлари орқали ҳисоблаш учун албатта цикл ҳолатларига мос қелувчи ҳамма нуқталар температураларини 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, жараёнини унинг ҳолат параметрлари орқали ифодалаш мумкин, яъни

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

ёки

$$T_2 = T_1 \varepsilon^{\kappa-1} \quad (271)$$

Худди шундай $V = \text{const}$ жараёни учун қуйидагини ёзиш мумкин:

$$\frac{T_3}{T_1} = \frac{P_1}{P_2} = \lambda,$$

буидан

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

(271) даги T_2 қийматини (272) га қўйсақ

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

ҳосил бўлади.

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

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{V_1}{V_3} = \rho \quad (274)$$

ёки

$$T_4 = \rho T_3$$

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

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

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

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{V_5}{V_1} = \varepsilon_v,$$

ёки

$$T_5 = \varepsilon_v T_1. \quad (277)$$

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

$$T_5 = \lambda_p \varepsilon_v T_1. \quad (278)$$

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

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

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

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

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 қонуни 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:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{C_v(T_p - 1)}{(\gamma - 1) + \kappa^3(\rho - 1)} \cdot \kappa(\epsilon_v - 1) \quad (282)$$

Умумлашган циклниң бажарган иши q_1 ва q_2 айирмасидан топилади:

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

ёки

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

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, соддалаштирилиб иссиқлик миқдорлари q_1 ва q_2 ни аниқлаб, улар асосида ГТҚ ниң ФИК аниқланади:

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

бунда $\lambda = P_3/P_2$ — босимниң ортиш даражаси;

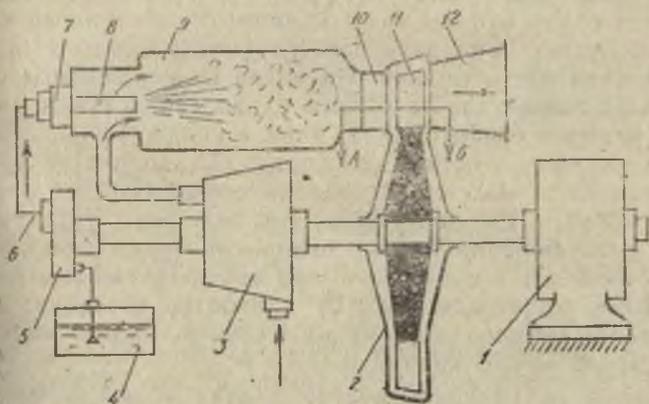
$$\epsilon = \pi = P_2/P_1 = \frac{V_1}{V_2} - \text{сиқиш даражаси.}$$

Демак, юқорида келтирилган ГТҚ си циклиниң Т диаграммасидан кўриниб турибдики, унинг термк ФИК атмосфера ҳавосиниң компрессорда сиқилиш даражасига ва ёниш камерасидаги иш моддасиниң ёниш маҳсули ҳосил қилган босиминиң ортиш даражасига боғлиқ бўлар экан.

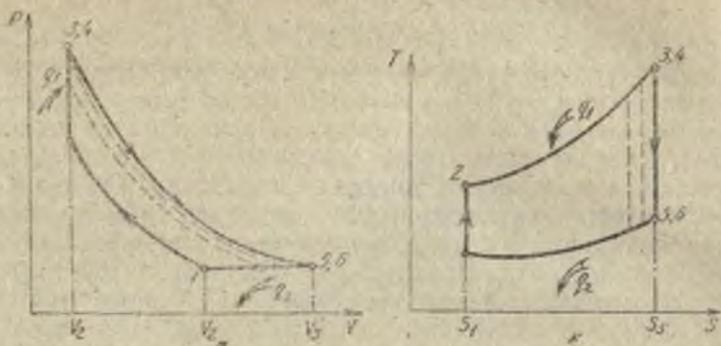
9.3. Иссиқлик $P = \text{const}$ да узатиладиган газ турбинаси қурилмаси (ГТҚ)

Газ турбинаси қурилмаси циклида иш ёқилгиси ўзгармас босим остида ёқилганда циклга ташқаридан иссиқлик миқдори келтирилмайди. Бундай турдаги циклда ёниш камерасидаги юқори температурали сиқилган ҳавога ёқилги 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 ФИҚ ни бир хил қийматда сақлаш учун албатта ёниш камерасидаги босим ўзгармас бўлишини таъминлаш керак. Буни амалга ошириш учун, биринчидан, компрессордан узатиладиган сиқилган ҳавонинг термодинамик параметрлари ва миқдори бир хил сақланади; иккинчидан, ёқилги насоси узатадиган ёқилги миқдори ҳам ҳаво миқдорига мос равишда ростланади.

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



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



61-расм. Еқилғи $P = \text{const}$ булганда ёнадиган ГТК циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

Мазкур қараб чиқилаётган циклниң PV ва TS диаграммаларидан кўришиб турибдики (61-расм), иш жисми аввал компрессорда адиабатик сиқилади (шу жараён ёқилғи насосида ҳам содир бўлади), сўнгра унга q_1 иссиқлик миқдори келтирилади. Шу иссиқлик миқдори келтиришда ёниш камерасидаги босим ($P = \text{const}$) сақланади. Киритилган иссиқлик иш ички энергияси ҳисобига пайдо бўлади, яъни компрессорда сиқилган ҳаво қизиб, унинг температураси ёқилғиниң 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 сўнг ҳосил бўлган ёниш маҳсули адиабатик кенгайиб (3—4 нуқталар оралғи, PV диаграмма) иш бажаради. Циклниң бажарган фойдали ишини диаграммалардан аниқласак, у 1—2—3—4—1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Бу адиабатик кенгайиш даврида иш жисми ташқи муҳит билан иссиқлик алмашмайди деб, фараз қилинади.

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

Термодинамик циклда ёқилғи $P = \text{const}$ ёнганлиги, яъни киритилганлигини ва қолдиқ иссиқлик q_2 совиткичга чиқарилганлиги ҳисобга олинса, босимниң 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 булар экан. Шу сабабли умумлашган цикл учун ёзилган ФИК тенгламасини тўғридан-тўғри қўллаб бўлмайди, чунки $\lambda = \lambda_p = 1$.

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

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\kappa-1}} \cdot \frac{\epsilon_p - 1}{\rho - 1}. \quad (286)$$

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

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

Шунинг учун айрим ўзгартиришларни амалга оширамиз.

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

бунда

$$\frac{V_3}{V_2} = \rho; \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\epsilon}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \epsilon; \quad \frac{P_1}{P_2} = \lambda = 1;$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\kappa} = \epsilon^{\kappa} \text{ тенглиги асосида}$$

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

ёзамиз.

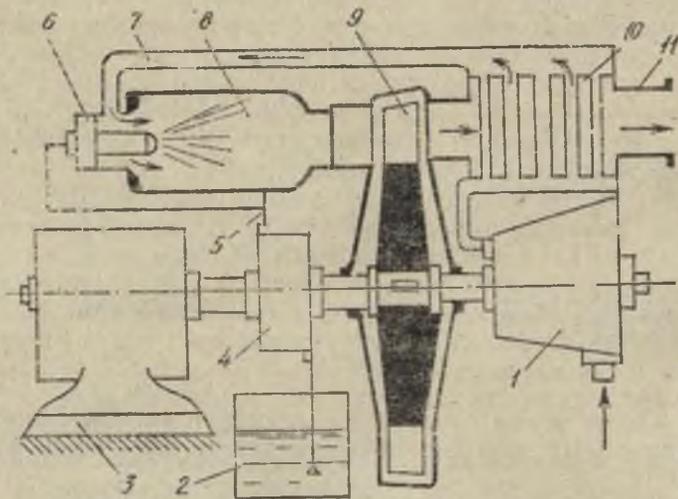
Юқорида келтирилган тенгликларни эътиборга олиб, термик ФИК тенгламасини қуйидагича ифодалаш мумкин:

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

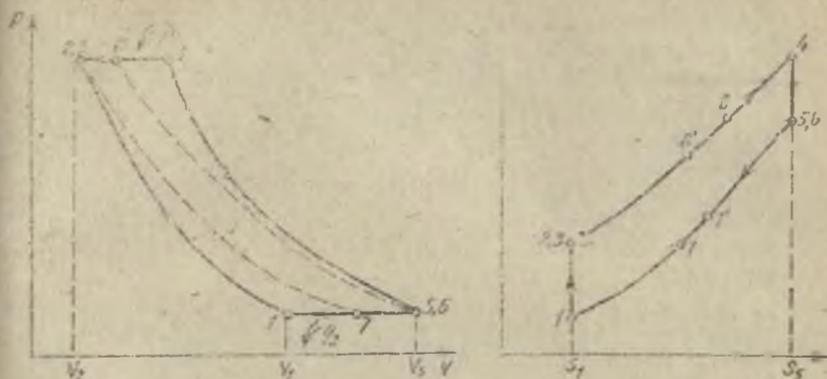
Ҳақиқатан ҳам ГТҚ циклининг η_t катталиги ҳавопи компрессорда сиқилиш даражаси ϵ га боғлиқ булар экан.

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 нуқтаи назаридан системанинг параметрлари, киритилган иссиқлик dq ҳисобига бошқа қийматларни қабул қилади (2 ва 3 нуқталар оралигида 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 — ёқилги баки ва насоси; 3 — электр генератор; 5 — ёқилги трубаси; 6 — форсунка; 7 — сиқилган ҳаво трубаси; 8 — ёниш камераси; 9 — газ турбинаси; 10 — регенерация бўлмаси; 11 — соплло.



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 берилмаса ҳам ёқилғи ёнади.

Амалда компрессорга сўрилган ҳаво унда сиқилишни нағижасида 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 тугун газлари газ турбинаси кураклари билан таъсирлашиб

адиабатик кенгаяди 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 кураклари билан таъсирлашиб утган 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 ишнинг катталиги 1—2—3—6—1 нуқталар билан чегараланган юзга сон қиймати жиҳатидан тенг. Регенерация услубига эга бўлган циклнинг бажарган иш ёқилғи $V = \text{const}$ ва $P = \text{const}$ да ёнган оддий циклларникига нисбатан катта булар экан. Бунга асосий сабаб регенерация услуби билан қўшимча иссиқлик миқдорини иш моддасига киритилишидир.

Регенерация бўлмасида тутун газларидаги иссиқлик тўлиқлигича компрессордан ҳайдалган ҳавога узатилмади. Агарда шу ҳавога жами иссиқлик регенерация йўли билан ўтказилса, яъни тўлиқ регенерация ўринли бўлса, $T_7 = T_2$ ва $T_5 = T_8$ бўлади (узлукли 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 ифодаланлади:

$$q_1 = C_1(T_4 - T_3) \quad (289)$$

Совиткичга чиқарилган иссиқлик миқдори

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

Унда тўлиқ регенерацияли циклнинг термик ФИК қуйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_k = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_4 - T_3} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_1 - T_3} \quad (290)$$

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

$$\eta_k = 1 - \frac{1}{\rho} = 1 - \frac{T_1}{T_3} \quad (291)$$

Юқоридаги η тулиқ регенерация ўринли бўлгандагина туғри. Маълумки, ҳеч қандай иссиқлик машинасидаги иссиқлик микдори иссиқлик алмашинуви жараёнида совиткичга тулиқ узатилмайди. Бу TS диаграммадан аниқ, чунки $T_7 > T_7$. Регенерация бўлмасда ҳаво T_8 гача қиздирилиш даврида у T_7 гача совийди. Шунинг учун регенерацияли циклнинг термик ФІК 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. Тулиқ регенерация ўринли бўлса, $\sigma = 1$. Шунинг учун тулиқ регенерация ўринли бўлмаганлигидан регенерацияли цикл ФІК 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:

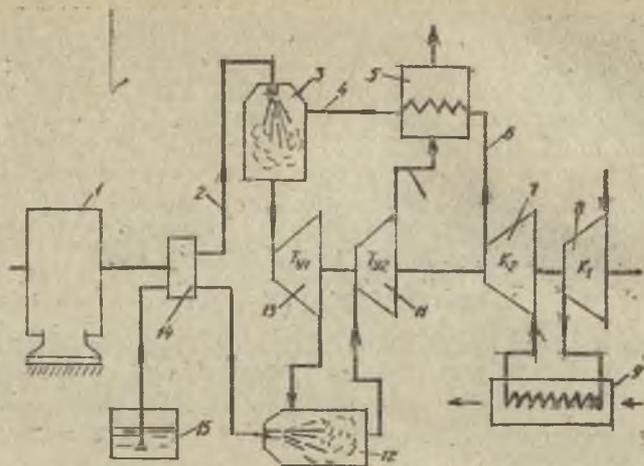
$$q_2 = C_p[T_3 - T_1 - \sigma(T_8 - T_2)].$$

Демак, унда регенерацияли циклнинг ФІК.

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

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

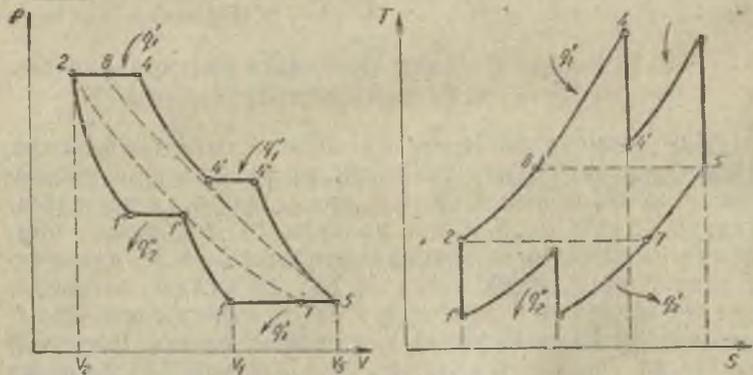
Иш жисмига иссиқлик $P = \text{const}$ остида берилганда, ҳаво босқичма-босқич сиқиладиган ва босқичли регенерация қўлланилган ГТҚ ёқилғи 2, сиқилган ва қиздирилган ҳаво 4 ва 6, ёниш маҳсули 10, трубалар, бирламчи ва иккиламчи ёниш камералари 3 ва 12, компрессорлар 7 ва 8, турбиналар 13 ва 11 ҳамда регенерация 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-расм. Иссиқлик циклга $P = \text{const}$ бўлганда узатиладиган босқичли сиқини, ёниш ва регенерацияли ГТҚнинг схематик тасвири.

рилган. Иссиқлик бундай ГТҚ нинг ҳар бир босқичига $P = \text{const}$ остида киритилади ҳамда зарур бўлса сиқилган атмосфера ҳавоси совитилади ($1'$ ва $1''$ нуқталар оралиғи) ёки регенерация усули билан иссиқлик иш моддасига узатилади (65-расм, PV диаграммадаги 1 ва 2 нуқталар оралиғи).

Термодинамик цикл куйидагича кечади: атмосфера



65-расм. Иссиқлик $P = \text{const}$ бўлганда циклга узатиладиган босқичли сиқини, ёниш ва регенерацияли 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 ёқилғининг ёниш температурасидан юқори бўлганлиги сабабли унга пуркалган ёқилғи бирданига 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 ёнгадан сўнг ҳосил бўлган ёниш маҳсулоти газ турбинасига нуналтирилади. 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 куракларини юқори температура (2300 К) дан ҳимоялаш мақсадида ёниш маҳсулини газ турбинасига киритишдан олдинроқ унга совуқ атмосфера ҳавоси қўшилади (бу схематик тасвирда кўрсатилмаган) ва температураси 1000—1400 К гача пасайтирилади. Бу қўшилган совуқ ҳаво ёниш камерасининг биринчи босқичида ёниш маҳсулоти газлари билан аралашиб қизийди, сўнгра турбинанинг биринчи босқичида иш бажариб ундан чиқади ва ёниш камерасининг иккинчи босқичига киради. Унда янги киритилган ёқилғи билан кимёвий реакцияга киришади, яъни ёпади. 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 нуқталар оралиги) қолган қисми эса атмосферага чиқарилади. Цикл такрорланади.

Циклнинг PV ва TS диаграммаларидан кўришиб турибдики, кечадиган термодинамик жараёнлар, асосан иккитадан адиабатик сиқилиш ва кенгайиш ($1-1'$, $1''-2$ ва $4-4'$, $4''-5$ нуқталар оралиги). иккитадан изобарик сиқилиш ва кенгайиш ($1'-1''$, $5-1$ ва $2-4$, $4'-4''$ нуқталар оралиги) дан иборат экан.

Циклнинг TS диаграммасидан кўришиб 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.

Ёкилган босқичли ёнадиган, ҳаво босқичли сиқиладиган ва совитиладиган, регенерацияли иссиқлик алмашинувига эга бўлган ҳамда q_1 ўзгармас босим остида циклга киритиладиган ГТҚ циклининг бажарган иш юқориди қараб чиқилган ($V = \text{const}$, $P = \text{const}$) циклларикига нисбатан юқори бўлади. Бунга асосий сабаб ёшилгининг тула 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 кўришиб турибдики, $7-1''$ ва $8-4''$ нуқталар оралигидаги жараёнлар бир хил бўлиб, йуналишлари қарама-қарши бўлганлиги учун улардаги энтропиянинг ўзгарувчанлиги тенг қийматли бўлади. Шу сабабли $\Delta S_{8-4''} = \Delta S_{7-1''}$ бўлади. Унда η_c ни қуйидагича ёзиш мумкин:

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

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

$$\eta_c = 1 - \frac{1}{\lambda^{\kappa-1}} \quad (295)$$

9.6. ГТҚ нинг татбиқи

Охирги 24—30 йил мобайнида ГТҚ хусусан транспорт ва энергетикада кенг қўлланила бошланди. Энергетикада қўлланиладиган ГТҚ лари асосан узлукли, 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.

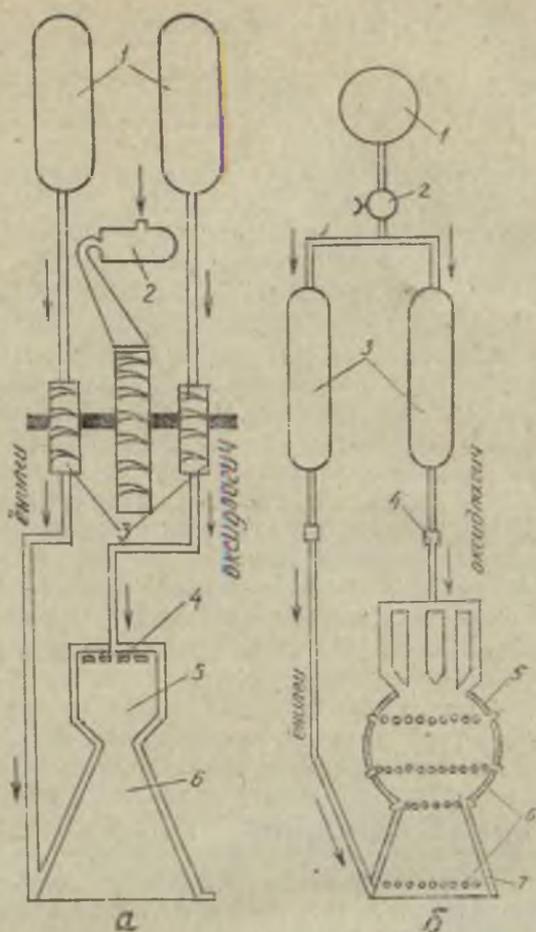
Денгиз кемаларидаги энергетик ГТҚ асосий энергия манбаи ҳисобланади ва уларнинг қуввати 30 кВт дан 10 МВт гача бўлади. Кимёвий, нефтни қайта ишлаш, металлургия, атом энергетикаси ва ш. к. ишлаб чиқариш соҳаларида кенг қўлланилади. Нефтни ҳайдашда, газ магистрalli трубаларида, турли хил компрессорларни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

Замонавий турбореактив, турбовинтли реактив самолётларни, узоқ сафарда 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

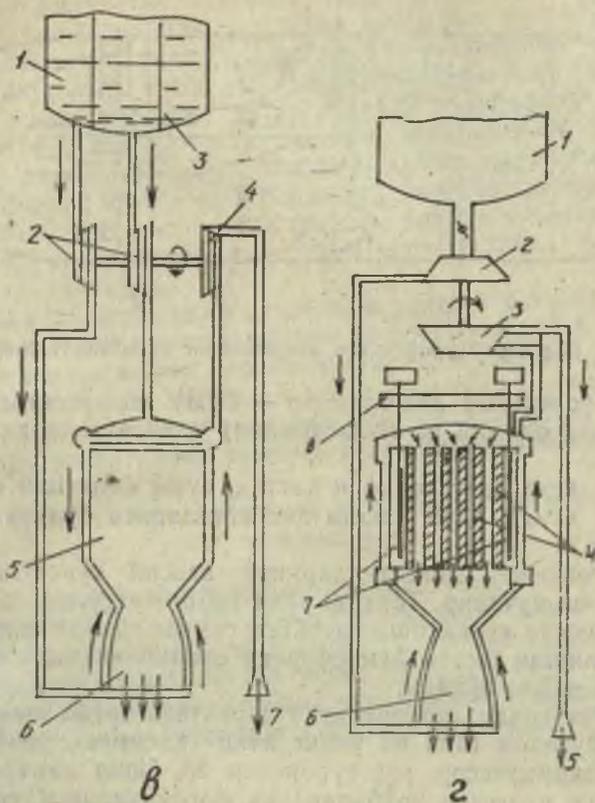
10.1. Реактив двигателларнинг таснифи, турлари, тузилиши, ишлаш тартиби

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



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

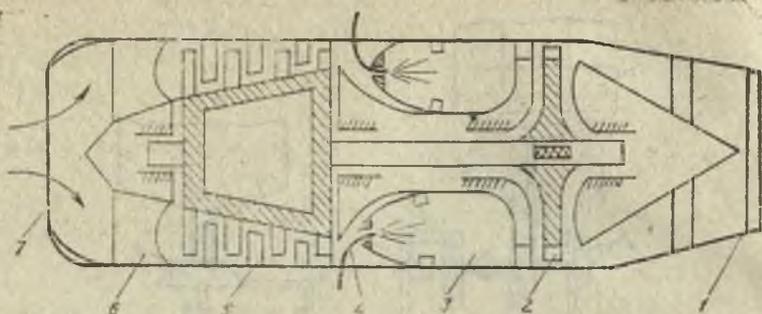
лик, кимёвий, ядро, электр, қуёш энергияларининг таъсири натижасида иш жиcми оқимининг кинетик энергияси пайдо бўлади.



66-расм Давоми. *a* — кимёвий ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ оксидловчи бак, 2 — насослар, 3 — суюқ ёқилги баки, 4 — турбина, 5 — ёниш камераси, 6 — соплло, 7 — турбиналарни ҳайдаш канали; *b* — ядро ракета двигателининг схематик тасвири; 1 — суюқ водород, 2 — насос, 3 — турбина, 4 — иссиқлик ажратувчи элементлар, 5 — турбинанинг ҳайдаш канали, 6 — соплло, 7 — бошқариш стерженлари, 8 — ҳимоя экранни.

Реактив двигателларда атмосфера ҳавосининг ишлатилишига кўра, улар икки хил бўлади: атмосфера ҳавосидаги кислороддан оксидловчи сифатида фойдаланадиган 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, суяқ 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 натижа-сида пайдо бўлади.

Энг содда турбореактив двигатель труба шаклидаги диффузорли тана ва унинг ички қисмига ўрнатилган турбокомпрессор, газ турбинаси 28, ёниш камераси 3, ёқилғи узатувчи трубалар ва форсункалар 4, сопло 18 дан ва бошқа ёрдамчи ускуналардан ташкил топган (67-расм). Ҳаво компрессори билан газ турбинаси бир валга маҳкамланган.

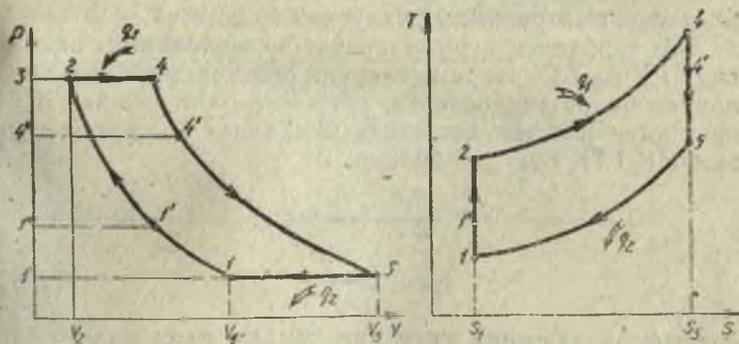
Атмосфера ҳавоси диффузор 7 орқали турбокомпрессор 5 га узатилади, унда ҳаво сиқилади. Шу сиқилган босим остидаги ҳаво турбокомпрессорнинг ҳайдаш труба-си орқали ёниш камераси 3 га ўтади, шу вақтнинг ўзида ёқилғи насосидан ҳайдалган ёқилғи ҳам труба 4 орқали камерага форсункалар ёрдамида пуркалади. Шунда ҳаво билан ёқилғи кимёвий реакцияга киришиб катта миқдордаги иссиқлик ажралади ҳамда ёниш маҳсулотининг ҳажми ва температураси ортади. Температуранинг 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 дейлади.

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. Айнан зарур параметрларга етган қизиган ҳаво ёниш камерасига кириши билан унга ёқилғи пуркалади ва кучли ёниш содир бўлади. Ёниш камерасидаги иш моддаси $P = \text{const}$ бўлганда ёнади ва ёниш маҳсулоти кенгайди (2—4 нуқталар оралиғи). Ўзгармас босим остидаги ёниш маҳсулоти энг охирига етгандан сўнг, ёниш камерасидан чиқиб, аввал турбина кураклари билан (4—4' нуқталари оралиғи) таъсирлашиш жараёнида кенгайди. Бу адиабатик кенгайиш кейин соплода давом этади (4—5 нуқталар оралиғи) ва асосий иш бажарилади. Ёниш маҳсулоти таркибидаги қолдиқ q_2 иссиқлик миқдори совиткичга (атмосфера ҳавосига) чиқарилади. Бу жараён изобарик бўлади (5—1 нуқталар оралиғи).

Демак, реактив двигателлар циклидаги термодинамик жараёнлар иккита адиабата (1—2 ва 4—5 нуқталар оралиғи) ва иккита изобара (2—4 ва 5—1 нуқталар оралиғи) дан ташкил топар экан. Реактив двигателларнинг турига мувофиқ уларнинг PV ва TS диаграммалари бир-бирдан 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 пикидай 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.

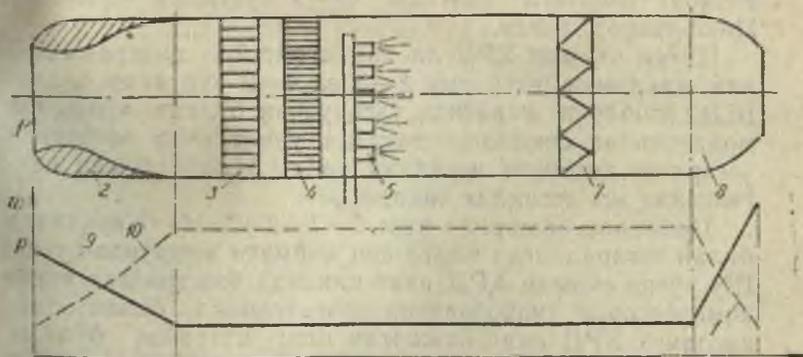
10.3. Тўғри оқимли ҲРД ва уларнинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар

Тўғри оқимли ҲРД диффузор 1, суйрилагич 2, уярма ҳосил қилувчи панжаралар 3 ва 4, форсункалар 5, ёниш камераси, стабилизатор 7 ва сопло 8 дап ташкил топган (69-расм).

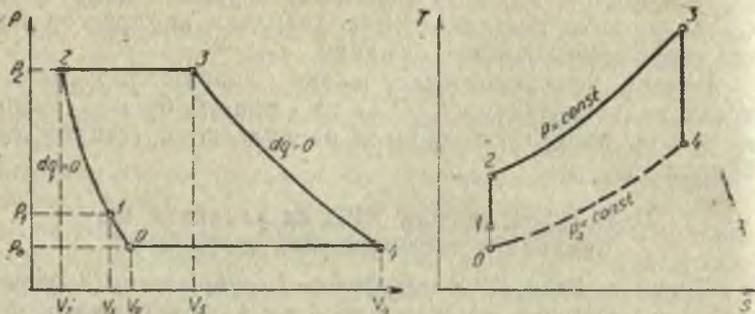
ҲРДларининг айрим конструкцияларида стабилизатор сопло билан ёниш камераси чегарасида жойлаштирилади.

Тўғри оқимли ҲРДлари циклидаги термодинамик жараёнлар ҳам турбореактив двигателларникига ўхшаш.

Циклнинг PV ва TS диаграммаларидан кўриниб турбидики, 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. Товуш тезлигига уча оладиган тўғри оқимли ҲРДнинг схематик тасвири.



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

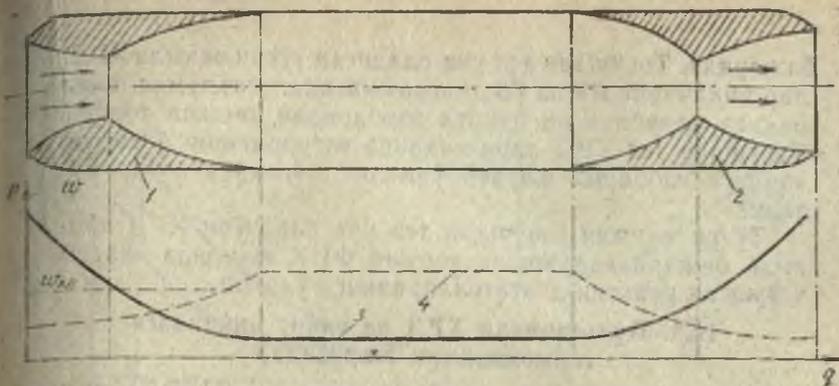
боришини таъминлаш мақсадида сиқилган ҳаво уюрмали оқим ҳосил қилувчи панжаралардап ўтказилиб, ёниш камерасига ўзгармас ($P = \text{const}$) босимда узатилади. Бу қизиган ҳавога ёқилғи форсункалар 5 орқали пуркалади. Шунда кимёвий реакция жадал боради. Ёниш маҳсулстининг температураси ортади, лекин босим $P = \text{const}$ 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 кенгаяди (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.

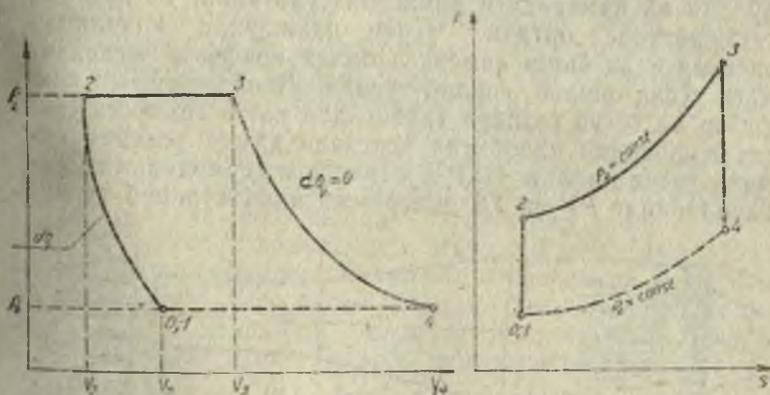
Циклнинг бажарган иши 0—1—2—3—4—0 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатидан тенг. Шу тўғри оқимли ҲРД нинг циклида бажарилган ишни компрессорли турбореактив двигателники билан таққосланса ҲРД нинг бажарган иши каттароқ бўлади. ҲРД конструкцияси жиҳатидан анча содда ва унга кам металл сарфланади.

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



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

лоси ўзига хос геометрик шаклда бўлади. Чунки, диффузоргача дастлабки сиқилиш ҳодисаси говушдан тез реактив двигателларда бўлмайди. Унинг ўрнига диффузор ва соплонинг конуссимон киритиш ва чиқариш каналлари кенгроқ, уларнинг ўрта қисми торроқ қилиб ясаллади. Бундай ўзгартириш ҳаво оқимининг босим ва температурасини ёниш камерасигача раvon кўтарилишини, система ички энергиясининг ортиши ҳисобига таъминлайди. Ёниш камерасида ёқилғи ва ҳаво аралашмаси $P = \text{const}$ да ёқилади ва сақланади. Ёниш маҳсулоти нинг температураси соплогача текис ортиб боради. Соплода адиабатик кенгайиш жараёнида ёниш маҳсулоти иш



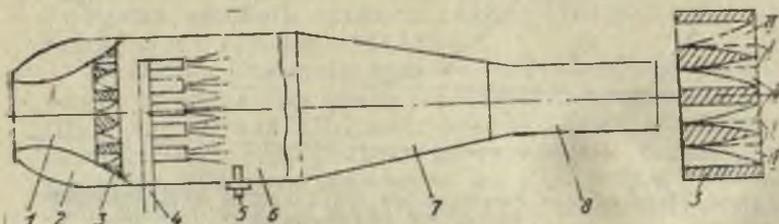
72-расм. Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҲРД циклининг PV ва TS диаграммалари

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

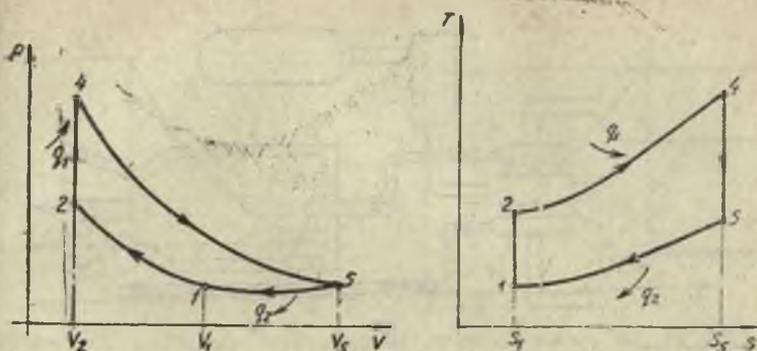
Тўғри оқимли товушдан тез уча оладиган ҲРД циклида бажарилган иш ва термик ФИК юқорида қараб чиқилган реактив двигателларникига ўхшаш.

10.4. Пульсацияли ҲРД ва унинг циклидаги термодинамик жараёнлар

Пульсацияли ҳаво-реактив двигатели (ПҲРД) ҳам компрессорсиз реактив двигатель бўлиб, у асосан диффузор 1, суйралигич 2, клапанли панжара 3, ёқилғини пурковчи форсункалар 4, ўт олдириш свечаси 5, ёниш камераси 6, конфузор 7 ва тутун газлари трубаси 8 дан ташкил топган (73-расм). ПҲРД циклида жараён қуйидагича кечади: диффузорда сиқилиб босими ва температураси ортган атмосфера ҳавоси, ёниш камерасига бир меъёрда узатиб турилмасдан, махсус клапанлар панжараси ёрдамида узлукли узатилади. Шунда ёниш камерасидаги ҳавога форсункалар орқали ёқилғи пуркалади ва ҳаво билан аралашиб иш моддаси ҳосил бўлади. Иш моддаси свеча контактлари орасида ҳосил бўлган электр учқуни, яъни ташқаридан киритилган q_1 иссиқлиги ҳисобига портлаб ёнади. Ёниш $V = \text{const}$ да содир бўлади ва камерадаги ёниш маҳсулотининг босими ва температураси ортади. Чунки, панжарали клапанлар системаси ва ёниш камераси билан конфузор чегарасидаги тўсиқ очилиб, ёпилиб туради. Ёниш маҳсулоти конфузор ва тутун газлари трубасидан катта тезликда ўтиши жараёнида адиабатик кенгаяди ҳамда реакция кучини ҳосил қилади. ПҲРД циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммасидан кўриниб туриб-



73-расм. Пульсацияли ҲРДнинг схематик тасвири



74-расм. ПХРД циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

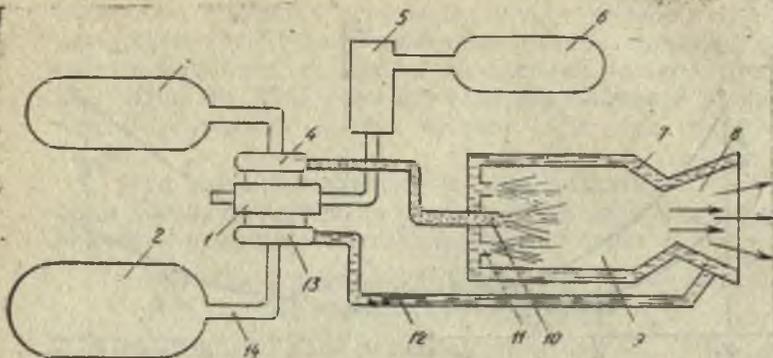
дики, цикл иккита адиабата, биттадан изохора ва изобарадан ташкил топган (74-расм).

ПХРД нинг диффузорига оқиб кирган ҳаво аввал унинг олд қисмида, сўнгра суйрилагичда адиабатик сиқилади (1—2 нуқталар оралиғи). Сиқилган ҳаво ёниш камерасига клапанлар панжараси орқали киритилгандан кейин унга ёқилғи пуркалади ва улар аралашиб иш ёқилғиси ҳосил қилади (2—3 нуқталар оралиғи). Ташқаридан иссиқлик, свеча контактлари орасида ҳосил бўлган учқун сифатида, ёқилғига киритилади ва у портлаб ёнади (3—4 нуқталар оралиғи). Ёниш камераси ҳамма томондан ёпиқ бўлганлигидан ёниш жараёни изохорик бўлади. Шунда ёниш маҳсулотининг босими ва температураси ортади. Шундан сўнг конфузор 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)

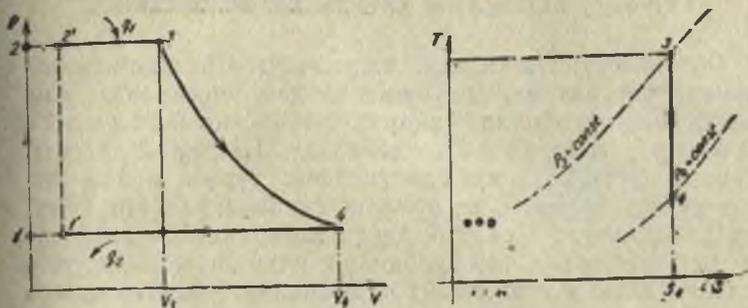


75-расм. Сууюқ ёқилғида ишлайдиган РДнинг схематик тасвири.

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, фотоп 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 грамдан бир неча юз тоннагача боради. РД бир ва бир неча босқичдан ҳамда бошқариш системаларидан тузилган.

РД лари ишлатилишига кўра ҳарбий, метеорологик (об-ҳавони кузатиш), космик турларга бўлинади. РД ларнинг асосий қисмини ёниш камераси 9, сопло 8, камерани совитувчи ракета «ғилофи» 7 ташкил этади. Ёқилғи ва оксидловчи идишлар 3 ва 2, уларнинг насослари 4 ва 13, турбина 1 ва унинг редуктори 5, иш моддаси 6 ҳамда ёқилғини оксидловчи 14 ва совитувчи 12 ни узатувчи трубалар, ёқилғи 10 ва оксидловчи 11 форсункалардан иборат аппаратлар РД нинг олд қисмида жойлашган.

РД нинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар иккита изобара ва битта адиабатадан иборат. Чунки ёниш камерасига узатилган иш ёқилғиси ҳажми унинг ёниш маҳсулоти ҳажмига тенг. Шунинг учун иш ёқилғисининг сиқилишга сарфланган иши эътиборга олинмайди (сууюқ ёқилғи сиқилмайди, оксидловчи идишда сиқил-



76-расм. PV 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 ётади. Ёниш маҳсулоти ўз ҳажмини маълум параметрларгача ўзгармас босим остида, 2—3 нуқталар оралиғида ўзгартиради, сўнг соплота 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). PV циклининг бажарган иши асосан ёниш маҳсулининг адиабатик кенгайишида унинг энтальпиясининг ўзгаришига тенг бўлади, яъни

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

$$PV \text{ циклининг ФИК } \eta_{\text{ц}} = \frac{A_{\text{ц}}}{q_1} = \frac{i_3 - i_4}{q_1}$$

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

$$\text{Унда } \eta_{\text{ц}} = (i_3 - i_4) / (i_3 - i_2). \quad (298)$$

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

$$\eta_{\text{ц}} = \frac{v^2}{2q} \quad (299)$$

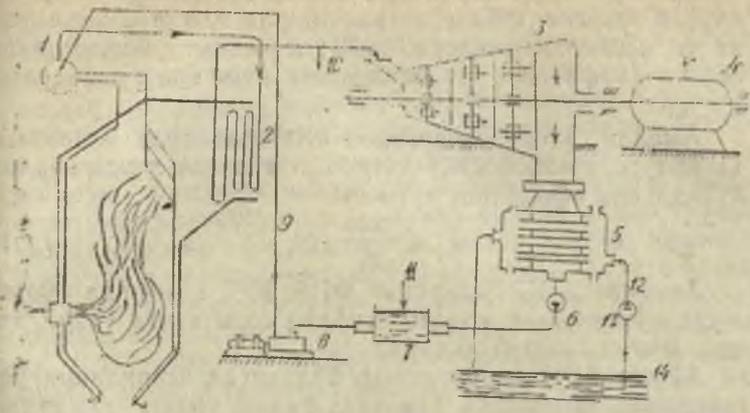
XI боб. ИССИҚЛИК ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРИ

Органик ёқилғи ёнганда ажраладиган иссиқлик энергиясини ўзгартириш натижасида ҳам иссиқлик, ҳам электр энергияси ишлаб чиқарадиган иссиқлик электр станцияси дейилади. Иссиқлик электр станция (ИЭС)лар иш ёқилғисининг турига кўра: қаттиқ, суюқ, газсимон ва аралаш ёқилғиларда ишлайдиган станциялар; иссиқлик двигателларининг турига кўра: буғ турбинали, газ турбинали, ички ёнув двигателли (дизель электр станцияси) станциялар; истеъмолчига узатадиган энергияси турига қараб: конденсацияли электр станциялари ва иссиқлик электр марказлари; қувват бериш услубига мувофиқ: асосий таъминловчи (йил давомида узлуксиз ишлайдиган) ва тифиз (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 энгил sanoat, металлургия комбинатлари жойлашган жойларда кўпроқ қурилади. Ҳозирги вақтда уларнинг 2,4—3,6 ГВт дан юқори қувватлари қурилмоқда. ИЭС ларга дунёда ишлаб чиқариладиган электр энергиясининг 80% тўғри келади.

11.1. Конденсацияли электр станцияси (КЭС)

Бундай электр станцияси фақат электр энергиясини ишлаб чиқаришга мўлжалланган бўлади. КЭС истеъмолчи билан фақат электр энергияси орқали боғланган бўлиб, у аҳоли яшайдиган нуқталарда, sanoat марказларида ва ёқилғи қазиб олинadиган 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 труба; 12 — конденсаторга узатиладиган созуқ сув труба; 13 — марказий насос; 14 — сув ҳавзаси.

сидаги электр станциялари билан биргалликда 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. Буғининг бошланғич босими 13—14 МПа, температураси $T=830—850$ К бўлади. Такмиллашган КЭС ларда буғининг параметрлари $P=16—25$ МПа, $T=800—900$ К га етади.

КЭС лар (ГРЭС) асосан блокли бўлади, яъни буғ 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. КЭСнинг ўзига сарфланадиган (электр двигателларни, насосларни ва ш. к. ёрдамчи асбоб-ускуналарни юритишга) энергияни ҳисобга олмаганда брутто ФИК қуйидагича ифодаланади:

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

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

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

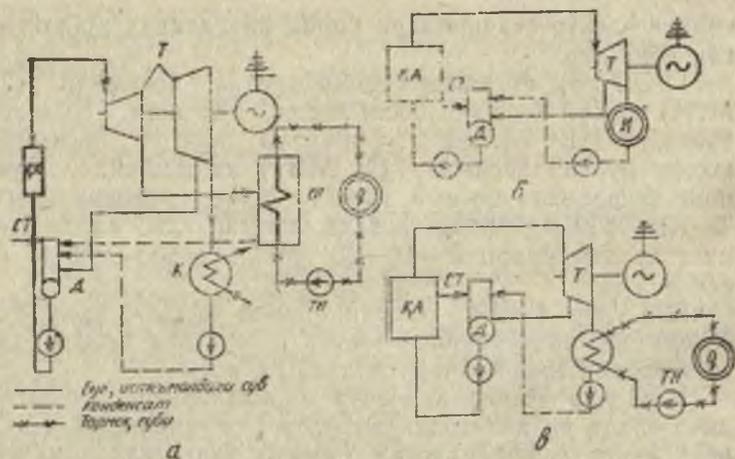
$$\eta_{бр} = \frac{3600}{q_c} \cdot W_s. \quad (301)$$

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

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

11.2. Иссиқлик электр маркази (ИЭМ)

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



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

станциялар бўлиб, улар катта саноат марказларида ва шаҳарларда қурилади. ИЭМ ларда ёқиладиган 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 иситгичлар, калориферлар, буғлатгичлар, автолав) конденсатор вазифасини бажаради ва ҳосил бўлган конденсат имконияти борича ИЭМ га қайтарилди. 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 ёпиш иссиқлигига қўшайтмасига нисбати орқали ифодаланади:

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

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 $\eta^{\text{б}}$ ва $\eta^{\text{н}}$ қуйидагича ифодаланади:

$$\eta^{\text{б}} = \frac{W_{\text{и.ч.}}^{\text{я}}}{B_{\text{э}}^{\text{н}} \cdot q_{\text{к.и.б.}}^{\text{э}}}; \quad \eta^{\text{н}} = \frac{W_{\text{и.ч.}}^{\text{я}}}{B_{\text{н}}^{\text{н}} \cdot q_{\text{к.ч.б.}}^{\text{э}}}. \quad (303)$$

бунда $w_{\text{и.ч.}}^{\text{я}}$ — йиллик ишлаб чиқарилган электр энергияси миқдори, кЖ; $B_{\text{э}}^{\text{н}}$ ва $B_{\text{н}}^{\text{н}}$ — йил давомида электр ва иссиқлик энергияларини ишлаб чиқаришга сарфланган ёқилғи миқдорлари; $B_{\text{э}} = B - B_{\text{н}}$ 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 тулалигича фойдаланилади, деб фараз қилинади.

ИЭМнинг 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 қурилмақда.

11.3. Магнитогидродинамик (МГД) генератор

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

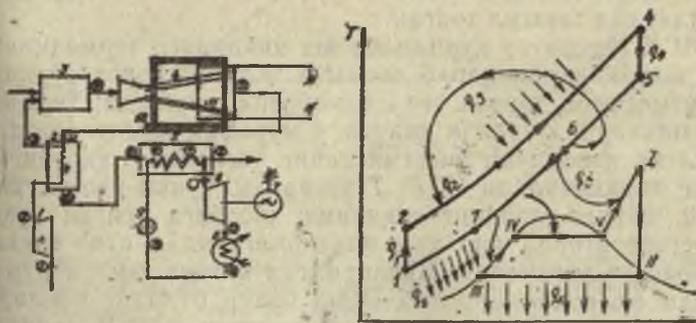
* 1990 йилгача бўлган маълумот ва у ўзгариб туради.

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

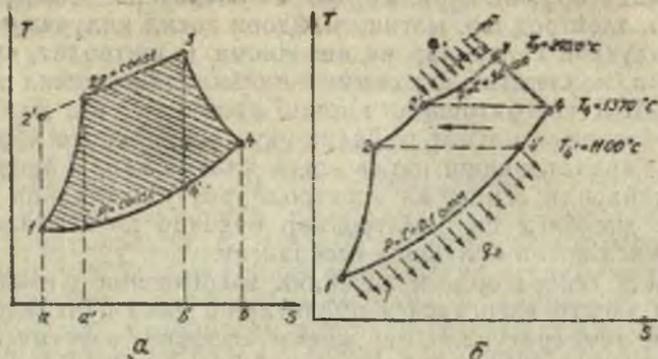
МГД генератордаги иссиқлик энергиясини тўғридан-тўғри электр энергиясига айлантириш икки йўналишда: юқори температурали иш жисми иссиқлик энергиясини электр энергиясига (қозон қурилмаси, электр генератори ишлатмасдан) айлантириш; иш жисмининг иссиқлик, кимёвий, ядро, термоядро, бўғлиқ энергияларини физик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

Иссиқлик энергиясини электр энергиясига машинасиз айлантиришда 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.



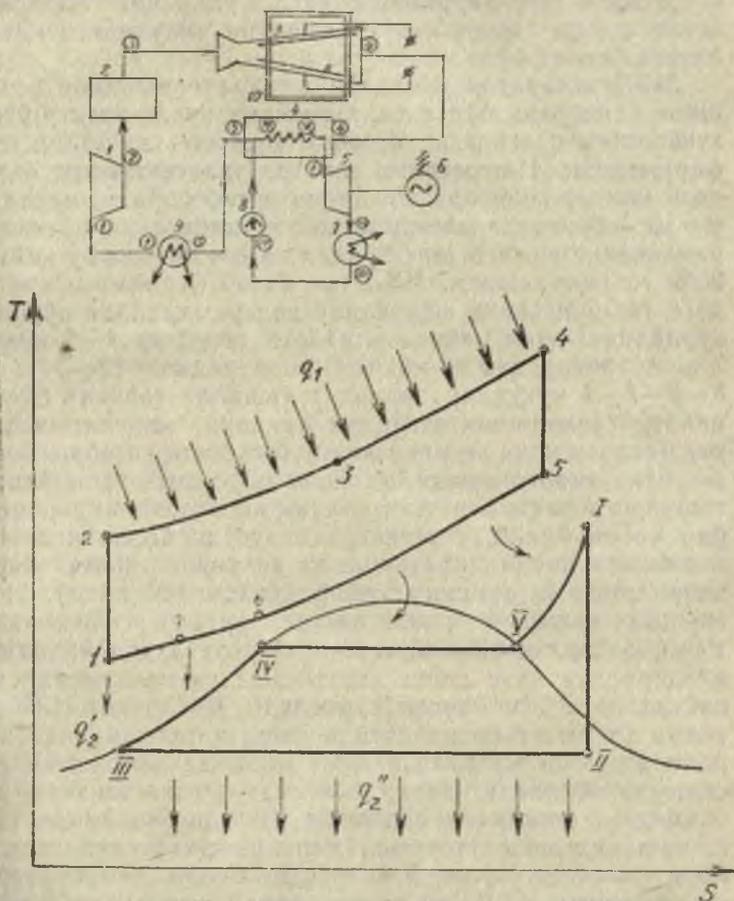
80-расм. Очiq (а) ва берк (б) схемали МГД — генератор қурилмаси реал циклларининг TS диаграммалари.

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 нишг 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 генератори 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 исingan 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 циклидаги 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 йуналтирилади. Унда ташқи магнит майдони таъсирида ионлашган газ оқими тезланиш олиб тезда адиабатик кенгаяди. 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 оқимдаги 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 кенгаяди (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 булган ёниш маҳсули (ионлашган газ-плазма) таркибидаги зарраларнинг кишетик энергияси, яъни температураси жуда юқори булади, чунки улар фақат зарядини бериш даврида уз 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 йули билан сиқилган атмосфера ҳавосига ва буғ турбинаси циклига ўтказилади. Шунда ҳам иш жисми аралашмасини ҳосил қилувчи сиқилган ҳаво температурасини яна орттиради ва ёпиқ цикли 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 нуқтаи назаридан иш бажариб булган иссиқ газ оқими қолдиқ иссиқлик миқдори ҳисобига қўшимча иш бажаради, чунки бу газ оқими тўла кенгайиб иссиқлигини узатиб булган 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 алмашинуви улгурмаган қолдиқ иссиқлик миқдори буғ генераторига ёниш маҳсулотидан ўтганда ва атмосферага чиқарилганда цикл энтропияси ўзгарувчан (2—3—4 ва 5—6—7—1 нуқталар оралиғи) булади. МГДГ қурилмасининг буғ турбинали иссиқлик куч қурилмаси қисми циклининг TS диаграммаси юқорида сув буғи учун қўлланилган қурилмалар циклиникига ўхшаш. МГД генераторнинг бажарган иши ионлашган газ (плазма) оқимининг МГД

генератор каналига киришидаги ва ундан чиқишидаги энтальпиялари айирмасидан аниқланади:

$$A = \Delta i = i_k - i_c \quad (304)$$

Плазма назарияси анчагина мураккаб бўлса-да, Максвелл, Фарадей, Ленц, Дебай, Гиббс-Гельмгольц, Нернст, Стефан-Больцман, Лебедев П. Н. тадқиқотлари натижаларини унга қўллаб i_k ва i_c аниқланади. Албатта, плазма параметрлари P, V, T, S, i эркин энергия функциясига кирувчи катталиклар деб қаралади.

Плазма оқими икки, уч ва кўп компонент (таркибий қисм) лардан ташкил топиши мумкин. Шунинг учун плазма параметрларини аниқлашда ҳар бир компонент улушларининг йиғиндиси олинади. Юқоридагилар асосида (исботсиз) МГД генератордаги плазма энтальпиялари қуйидагича ифодаланади:

$$i_k = \frac{1}{\mu_k P_k} \sum_1^n i_{ik} P_{ik}; \quad i_c = \frac{1}{\mu_c P_c} \sum_1^n i_{ic} P_{ic}, \quad (305)$$

$$\text{у нда } \mu_k = \frac{1}{P_k} \sum_1^n \mu_{ik} \cdot P_{ik} \text{ ва } \mu_c = \frac{1}{P_c} \sum_1^n \mu_{ic} \cdot P_{ic},$$

$\mu_i, P_i i_i$ — плазма компонентларига мос равишда уларнинг молекуляр оғирлиги, босими ва энтальпияси.

Агар плазма оқими мувозанатлашган деб қабул қилинса, унинг энтропияси МГД генераторнинг киришида ва чиқишида ўзаро тенг бўлади, яъни $S_k = S_c$. Унда плазма параметрларидан P ва T ўзгариши эҳтимоллиги мавжуд бўлади. Лекин МГД генератор каналидаги плазма оқимининг босими ўзгармас, чунки жараён изобарик. Шу сабабли МГД генераторга кираётган ва ундан чиқаётган оқим температуралари айирмасидан энтальпия ўзгарувчанлигини аниқлаш мумкин:

$$\Delta i = \int_{T_k}^{T_c} C_p dT = C_p (T_k - T_c), \quad (306)$$

бунда $C_p = \left(\frac{di}{dT} \right)_p \cong \frac{\Delta i}{\Delta T}_p$ — плазма оқимининг T_k ва T_c

оралигидаги ўртача иссиқлик сизими.

Биз юқорида таъкидладикки, МГД — генератордан ўтаётган плазма оқими адиабатик кенгайди, у ҳолда температуралар нисбатини шу жараён учун ёза оламиз:

$$\frac{T_k}{T_r} = \left(\frac{P_r}{P_k} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Унда, МГД генератор иши қуйидагича ифодаланади:

$$A = \Delta i = \frac{\kappa-1}{\kappa} RT_r \left[\left(\frac{P_k}{P_r} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right]. \quad (307)$$

МГД генератор қурилмаси циклидаги ФИК ни аниқлашда, албатта унинг ҳар бир жараён кечадиган қисмларига берилган (ёки ҳосил бўлган) ва ундан чиқадиган иссиқлик миқдорларини ҳисобга олиш шарт. Чунки компрессорда ҳаво сиқилганида, ёниш камерасидаги кимёвий реакциянинг боришида, МГД генератор каналидаги ионлашган газ (плазма) нинг электр ўтказувчанлиги натижасида ва ташқи муҳитга иссиқликнинг чиқишида ҳамда регенерация (иссиқлик алмашинуви) да пайдо бўлган ва чиқарилган иссиқлик миқдорлари ҳисобга олинса, МГД генератор қурилмаси циклининг ФИК қуйидагича ифодаланади:

$$\eta_t = \frac{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) - (q_5 + q_6)}{(q_1 + q_2 + q_3 + q_4)}, \quad (308)$$

бунда $q_1 = C_p (T_r - T_k) (1 - \eta_k)$ — компрессорда сиқилган атмосфера ҳавосининг қизишда вужудга келган иссиқлик миқдори; T_k ва T — ҳавонинг компрессорга кириши ва чиқишидаги температуралари; η_t — компрессорнинг ФИК; $q_2 = C_p (T_3 - T_2)$ — регенерация вақтида сиқилган атмосфера ҳавосига келтирилган иссиқлик миқдори; $T_2 = T_r$ — регенерация бўлмаси киришидаги сиқилган ҳаво температураси; T_3 — регенерациядан чиққан, сиқилган ва қиздирилган ҳаво температураси; $q_3 = C_p (T_4 - T_3)$ — ёниш камерасидаги кимёвий реакция ҳисобига пайдо бўлган иссиқлик миқдори; T_3 ва T_4 — ёниш камерасига узатилган сиқилган ҳамда қиздирилган ҳаво ва ёниш маҳсулининг ёниш камерасини чиқишидаги температуралари; $q_4 = C_p (T_4 - T_5)$ — МРД генератор каналидаги плазма оқимининг электр ўтказувчанлиги ҳисобига пайдо бўлган иссиқлик; T_4 ва T_5 — МГД генератор каналига кираётган ва ундан чиқадиган ионлашган газ (плазма) оқимининг температуралари; η_3 — МГД генераторнинг электр ишлаб чиқариш ФИК;

$q_5 = C_p (T_4 - T_5) \frac{1 - (\eta_3 - \xi)}{\eta_3 - \xi}$ — 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 охириги температуралари.

МГД генератор қурилмаси циклининг аниқ нуқталаридаги температуралар орқали унинг ФИК ифодаланганда, $\eta_c = \eta_s = 1$ ва $\xi = 0$ шарт қабул қилиниб, $q_1 = q_6$ қийматини (257) тенгламага қўйиб, сўнгра ихчамлаб қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_1 - T_2}. \quad (309)$$

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:

$$\eta_{it} = \frac{m(i_4 - i_3) - (i_2 - i_1)' + (i_1 - i_{11})}{m(i_1 - i_3)}, \quad (310)$$

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 — генераторниқига 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 муътадил ва ундан

паст ҳолатгача тушади. Цикл такрорланади. Берк контурли МГД генератор қурилмаси циклининг TS диаграммасидан кўриниб турибдики, цикл иккита адиабатик 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 буладиган термодинамик жараёнлар тўғрисида юқорида батафсил тўхталиб ўтганмиз.

МГД генератор қурилмаси берк контури циклининг ФИК энталпиянинг ўзгарувчанлиги орқали ифодалаш мумкин:

$$\gamma_{it} = \frac{m [(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)] - (i_1 - i_{111})}{m (i_3 - i_2)}, \quad (311)$$

бунда $m = (i_1 - i_{111}) : (i_4 - i_5) \cdot 0$

$\mu_{бр}$ — 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 катталиги температура градиентига ва ток кучига мутаносиб бўлади (Томсон эффекти). Бу эффектларнинг математик ифодалари қуйидагича ёзилади:

$$\begin{aligned}
 dE &= \alpha dT; \\
 dq &= \Pi dl; \\
 dq &= \tau dl \frac{\partial T}{\partial x} dx.
 \end{aligned}
 \tag{312}$$

бунда α — иссиқлик ЭЮК коэффициентини бўлиб, γ ўтказгич материалга боғлиқ; Π — Пельтье коэффициентини; τ — Томсон коэффициентини; x — ўтказгич узунлиги; I — ток кучи; E — иссиқлик ЭЮК.

Зеебек эффектини 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 қуйндагича ифодалаш мумкин:

$$\begin{aligned}
 q_1 &= I^2 R t - q'; \\
 q_2 &= I^2 R t + q'',
 \end{aligned}
 \tag{313}$$

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 оралиғида бўлиб, материал хусусиятларига боғлиқ. Бу эффект асосида яратилган ярим ўтказгичли қиздиргич 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:

$$q = \tau (T_2 - T_1) I t,
 \tag{314}$$

бунда $T_2 - T_1$ — температуралар фарқи; I — ўтказгичдан

ўтаётган ток кучи; τ — Томсон коэффициентлари; t — токнинг ўтиш вақти.

Бу эффект 1856 йилда Томсон лорд Кельвин Уильям томонидан аниқланган бўлиб, термоэлектр (иссиқликни тўғридан-тўғри электрга айлантириш) ҳодисаларида қўлланилади.

Юқорида қисқагина таърифланган учала эффектлардан маълум бўладики, улар ўтказгич учлари оралиғида 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

$$\alpha_{1-2} = (\tau_1 - \tau_2) + \frac{d\Pi_{1-2}}{dT} \text{ бўлади.}$$

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:

$$(\tau_1 - \tau_2) - \frac{\Pi_{1-2}}{T} + \frac{d\Pi_{1-2}}{dT} = 0. \quad (318)$$

чунки $\frac{\Pi_1}{T_1} - \frac{\Pi_2}{T_2} = d\left(\frac{\Pi_{1-2}}{T}\right) = \frac{d\Pi_{1-2}}{T} - \frac{\Pi_{1-2}}{T} dT.$

Демак, юқоридагилар асосида Пельтье коэффициентини 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:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{T} (\tau_1 - \tau_2), \quad (320)$$

чунки

$$\frac{\partial \Pi_{1-2}}{\partial f} = \alpha_{1-2} + T \frac{\partial \alpha_{1-2}}{\partial T}.$$

Юқорида қаралаётган эффектларга қайтмас термодинамик жараёнларни татбиқ этиб ҳамда Жоуль иссиқлиги ва иссиқлик ўтказувчанлиги эътиборга олинганда келтирилган эффектлар тенгламаларини яна ҳам аниқроқ ифодалаш мумкин.

Термоэлементнинг берк занжири учун Ом қонуни, яъни ток кучи ифодасини ёзамиз:

$$I = \frac{E}{R + r}, \quad (321)$$

бунда E — занжиридаги ЭЮК; R ва r — занжирнинг ташқи ва ички электр қаршиликлари.

Занжирдаги ЭЮК занжирда қўлланилган ўтказгич турига ва унинг температурасига боғлиқ бўлади. Шунинг учун уни температуралар оралиғи T_1 ва T_2 га мос равишда ёзамиз:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} \alpha(T) dT. \quad (322)$$

Агар $\alpha = \frac{\alpha_1(T_1) + \alpha_2(T_2)}{2}$ бўлса, у ҳолда

$$E \cong \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{бўлади.}$$

Шунинг учун занжирдаги иссиқлик ЭЮК қийматини Ом қонуни ифодасига қўйиб ва $m = \frac{R}{r}$ юкланиш даражасини (нагрузка) белгилаб, қуйидагини ҳосил қиламиз:

$$I = \frac{\alpha(T_1 - T_2)}{r(m + 1)}. \quad (323)$$

Энди, иссиқлик ЭЮК ҳосил бўладиган занжирнинг фойдали қувватини ва контакт учларидаги потенциаллар айирмасини ёзамиз:

$$N = I^2 R = \frac{\alpha^2 (T_1 - T_2)^2 \cdot m}{r(m + 1)^2},$$

$$V = \frac{\alpha(T_1 - T_2) \cdot m}{(m + 1)}. \quad (324)$$

Электр занжирининг бир қисмидаги иссиқлик ЭЮК нинг термик ФИК, конвекция ва нурли иссиқлик ўтказувчанликлар ҳисобга олинмаса, уни қўйидагича ифодалаш мумкин:

$$\eta_i = \frac{N}{\sum_k q_{\text{сарф}}} = \frac{N}{q_n(T_1) + q_{\text{исс}} - 0.5 q_{\text{ж}} \pm \Delta q_{\text{т}}}, \quad (325)$$

бунда $q_{\text{исс}}$ — иссиқлик ўтказувчанлик (контакт) бўйича узатилган иссиқлик миқдори; q_n , $q_{\text{ж}}$ ва $q_{\text{т}}$ — мос равишда Пельтье, Жоуль ва Томсон иссиқлик миқдорлари бўлиб, улар қўйидагича ифодаланади:

$$q_n(T_1) = \Pi I = \alpha T_1 I = \frac{\alpha^2 T_1 (T_1 - T_2)}{r(m+1)};$$

$$0.5 q_{\text{ж}} = 0.5 I^2 r = \frac{\alpha^2 (T_1 - T_2) \cdot 0.5}{2 r T_1 (m+1)^2};$$

$$\Delta q_{\text{т}} = I \int_{T_2}^{T_1} \tau''(T) dT - I \int_{T_1}^{T_2} \tau'(T) dT = I \int_{T_2}^{T_1} (\tau'' - \tau') dT,$$

агарда $\alpha(T_1) = \alpha(T_2) = \alpha_{\text{ср}}$

тенглик эътиборга олинса, у ҳолда Томсон иссиқлиги бошқача кўринишда ифодаланади, яъни:

$$\begin{aligned} \Delta q_{\text{т}} &= I \int_{T_2}^{T_1} \left(-T \frac{d\alpha}{dT} \right) dT \cong I T_{\text{ср}} \int_{T_2}^{T_1} (-d\alpha) = \\ &= I T_{\text{ср}} [\alpha(T_1) - \alpha(T_2)] = 0. \end{aligned}$$

$$q_{\text{исс}} = k(T_1 - T_2) = (\lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2) \frac{1}{e} (T_1 - T_2), \quad (326)$$

бунда k — иссиқлик элементининг иссиқлик ўтказувчанлиги.

Юқорида келтирилган эффектлар асосида ясалган иссиқлик электр генераторларининг улчами 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-

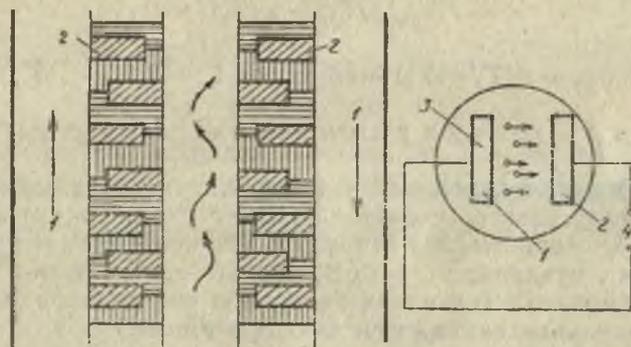
нератордир. Термоэмиссион (therme — иссиқлик, emission — чиқармоқ) ҳодисаси Ричардсон эффектига, яъни иссиқлик таъсирида эмиссион токнинг ҳосил бўлишига асосланган бўлиб, иссиқлик энергиясини тўғридан-тўғри электр энергиясига айлантирувчи генераторларда қўлланилади. Энг содда иссиқлик электрон ўзгартгич бири-бирига жуда яқин жойлаштирилган иккита металл сиртлардан иборат бўлиб, уларнинг бири электронлар оқими (қиздирилган сирт) ҳосил қилса, иккинчиси шу электронларни қабул қилади. Тузилиши жиҳатидан диод лампага ўхшаш (82-расм).

Қиздириладиган металл сиртлар катод, электронларни қабул қилувчи сиртлар эса анод дейилади. Катод қиздирилганда маълум температурагача унинг сиртидан учиб чиқадиган электронлар сони ортиб боради, сўнгра тўхтади, яъни занжирда тўйиниш токи ҳосил бўлади.

Ҳосил бўлган эмиссион тўйиниш токнинг қиймати-ни ҳисоблашда Ричардсон-Дёшман теңгласидан фойдаланилади, яъни

$$j_s = \frac{I}{S} \bar{\Delta} B T^2 e^{-\frac{A}{kT}}, \quad (327)$$

бунда I — ток кучи; S — электронлар чиқадиган металл сиртнинг бирлик юзаси; B — назарий ҳисоблаб аниқланган ($1,2 \cdot 10^6 \text{ а/м}^2 \cdot \text{град}^2$) кўпайтирувчи — эмиссия доимийси; A — электроннинг ўрғанилаётган 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 тулқин учун потенциал тўсиқнинг 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 камайди, 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:

$$q_k = I\varphi_k + I(V_{\text{тирк}} + \varphi_a + V_R - \varphi_c) + W_T + q_{\text{исроф}};$$

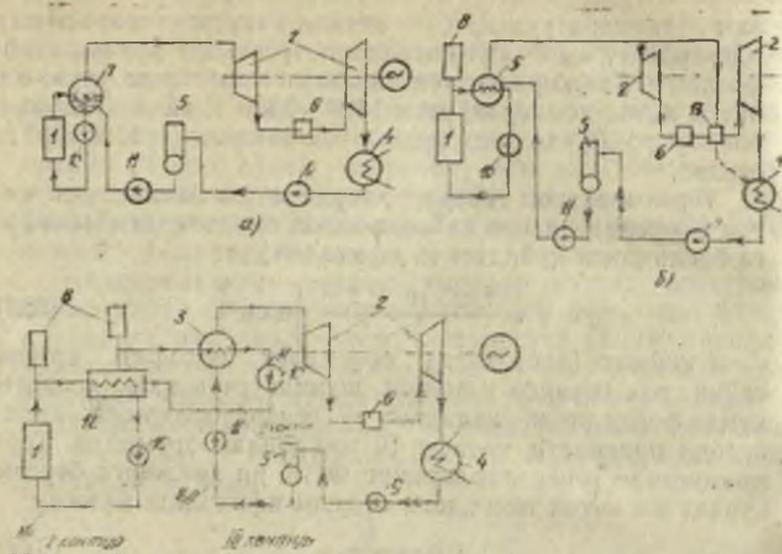
φ_k ва φ_a — катод ва аноднинг чиқариш потенциаллари;

$V_{\text{тирк}}$ — 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. Буига Воронеж, Белоярск, Санкт-Петербург, Шевченко, Кольск,



83-расм. Бир ва кўп контурли АЭС схемаси: а — бир контурли; б — икки контурли; в — уч контурли; 1 — атом реактори; 2 — буғ турбинаси; 3 — буғ генератори; 4 — конденсатор; 5 — деаэратор; 6 — сепаратор; 7 — буғ тўпланувчи идиш, 8 — ҳажми тўлдиргич; 9 — 10, 11 — конденсат, совиткич ва таъмиловчи насослар; 12, 13 — оралиқ иссиқлик алмаштиргич ва буғ қиздиргич.

Курск АЭС ларини, атом музёарлари ва камалари («Саванна», «Бобкок-Вилкокс» ва ш. к.) мисол бўла олади.

Табиатда уран-235 изотопининг миқдори 0,72%, уран-238 ники 99,274%, уран-234 ники эса 0,006% ташкил қилади. АЭС ларда атом реакторида кечадиган бошқариладиган занжирли ядро реакцияси вақтида, асосан уран-233, уран-235, плутоший-239 атомлари ядроларининг парчаланиши натижасида иссиқлик энергияси ажраллади. Ядро реакциясида ажралган иссиқлик миқдори иссиқлик ташувчи (гелий, оғир сув, суюқ натрий) га узатилади, у биринчи берк контурда, яъни реактор ва ташқи иссиқлик алмаштиргич оралиғида насос ёрдамида мажбурий ҳаракатлантирилади. АЭСнинг иккинчи контуридаги жараёнлар ИЭС ларидагидай кечади.

Атом электр станцияларининг сув-сув энергетик реактори (ССЭР), суюқ металл энергетик реактори (СМЭР) мавжуд бўлиб, улар сув, суюқ металл ва су-юлтирилган газлар билан совитилади.

Энергетикада, транспортда ва космонавтикада (Топаз) иссиқлик энергиясининг манбаи сифатида ҳар хил қувватдаги атом реакторлари қўлланилади.

Атом реакторлари нейтронларнинг спектрига кўра тезкор, иссиқлик ва оралик, яъни тез нейтронлар (100 кэВ) энергияси иссиқлик ҳаракати энергияси (0,025 эВ) га тенг бўлган нейтронлар ва энергияси 1 эВ дан бир неча кэВ гача бўлган нейтронлар таъсирида занжирли ядро реакцияси борадиган турларга бўлинади.

Атом реакторларининг иш моддаси ядро ёқилғиси бўлиб, уларга занжирли реакция вақтида парчаланадиган табиий уран-235 (иссиқлик нейтронларида парчаланadi) ва сунъий уран-233, плутоний-239 (тез нейтронларда парчаланadi) киради. Сунъий ядро ёқилғисининг ҳам ашёси деганда торий-232 ва уран-238 тушупилади. Чунки, бу ядролар биттадан нейтрон ютади ва иккитадан бета заррасини чиқариб бошқа турдаги кимёвий элементга, яъни

$\text{Fh}^{232} + n' \rightarrow \text{X}^{233} \rightarrow 2\beta \rightarrow \text{U}^{233}$ ва $\text{U}^{238} + n' \rightarrow \text{X}^{239} \rightarrow 2\beta \rightarrow \text{Pu}^{239}$ айланади.

Ядро куч қурилмаларининг асосини атом реактори ташкил этади. Ядро куч қурилмалари электр энергиясини ишлаб чиқаришда (АЭС), музёра, сув ости кемаларида, самолётларда, локомотивларда, ядро реактив двигателларида қўлланилади.

АЭС ларда асосан электр ва иссиқлик энергиялари 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 идиш бўлиб, унинг ичига иссиқлик ажратувчи элементлар, бошқариш стерженлари, совиткич модда ҳамда нейтронларни қайтаргич маълум тартиб-қонда 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 заижирили 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 босиқли 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. Кўпчилик икки контурли АЭС ларнинг биринчи контурида иссиқлик ташувчи вазифасини огир 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 ФИҚ 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.

Замоनावий АЭС ларида 1 млн. кВт·соат электр энергияси ишлаб чиқариш учун ўртача 200 г уран элементи ядро реакцияси вақтида ёқилади. Худди шунча миқдордаги электр энергиясини ИЭС ишлаб чиқариш учун тақрибан 400 т. кўмир ёқиш керак бўлади.

Ҳозирги даврда совуқ минтақаларда АИЭМ (атом иссиқлик электр марказлари) ишляпти. Бунга Россия территориясида жойлашган Чукотка, Билинск станцияларини мисол қилиш мумкин. АЭС лари ишлаб чиқараётган электр энергияси унча арзон бўлмаса-да, ёқилги 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 қабристонидан 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 (Чернобиль, 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 ёқилги 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 счимини 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 енгил кимёвий элемент — водород изотопларини, яъни дейтерий ва тритийни бир-бирига қўшиш (синтез қилиш) натижасида радиоактивликдан озод бўлган энергияни олишдан иборат.

Термоядро реакцияси экзотермик бўлганлиги учун реакция вақтида катта миқдорда иссиқлик энергияси ажралади.

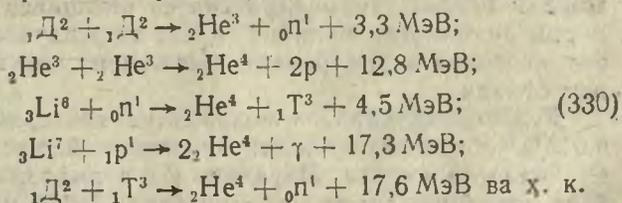
Синтез реакциясини амалга ошириш учун қўшилиши керак бўлган кимёвий элементлар ядроларини бир-бирига ядро кучлари таъсир этадиган даражадаги масофагача, яъни $r_n = 10^{-15}$ м яқинлаштириш керак. Ядролар мусбат зарядли эканлиги ҳисобга олинса, албатта улар ўртасида бир-бирини итарувчи кулон кучи мавжуд. Уларни 10^{-15} м масофагача яқинлаштириш учун албатта бу кулон кучининг потенциал тўсигини енгувчи энергияни синтезланувчи изотоплар ядролари ташқаридан олиши шарт. Бундай энергия иссиқлик энергияси ҳисобланади.

Инсоният Ерда атом бомбасини, сўнгра водород бомбасини кетма-кет портлатиб, бир неча миллион градус температурани олиш мумкинлигини исботлади.

Демак, енгил элементлар изотопларининг ядроларининг температураси 100 млн. К (10 кэВ)* ва ундан юқори бўлгандагина синтез реакциясини амалга ошириш мумкин экан.

Бундай юқори температурани ҳосил қилиш муаммоси бундан 36 йил муқаддам пайдо бўлган эди. Температура ортиб борган сайин ядроларнинг қўшилиши (синтез) реакцияси жадаллашиб боради ва қўшилишлар сони ортади, кейин сусаяди.

Синтез реакцияларини қуйидагича ёзиш мумкин:



* 1 кэВ = $1,16 \cdot 10^7$ К.

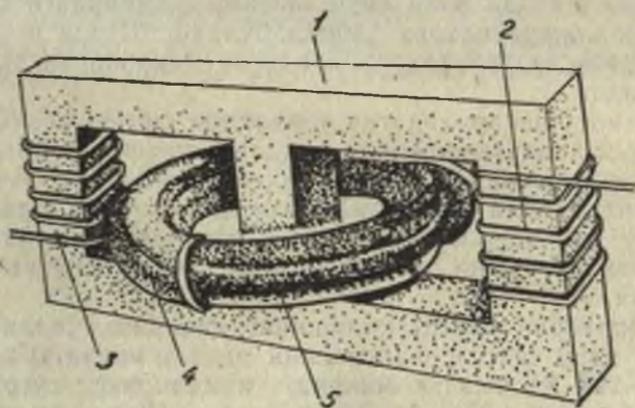
Плазманинг ички энергияси E дан термоядро синтез реакцияси энергияси E_c катта, яъни $E_c > E$ бўлиши учун плазма температураси камида 10 кэВ ва бир сантиметр куб (1 см^3) плазма ҳажмида 10^{14} та синтез реакцияси юз бериши керак. Бундай шарт термоядро реакцияси физикавий критерийси чегараси, яъни Лоусон критерийси дейилади.

Плазмани тутиб туриш ва синтез реакциясининг узлуксизлигини таъминлаш масаласи анчагина мураккаб бўлса-да, у уч йўналишда давом этмоқда: магнит майдони ёрдамида плазма ипи тороид камерасида тутиб турилади. Плазмадан электр токини ўтказиш йўли билан плазма ипи атрофида кучли магнит майдони ҳосил қилинади. Бу майдон плазма ипини сиқади, натижада унинг температураси бир неча ўн млн. К га етади.

Магнит майдони ёрдамида плазмани тороидал камерада тутиб туришнинг физик асосини академиклардан Л. А. Арцимович ва М. А. Леонтович таклиф қилган ва асослаганлар (84-расм).

Ҳозирги вақтда термоядро синтез реакцияси «ТО-КАМАК» қурилмаларида амалга оширилган бўлиб, уни бошқариш вақти секунднинг улушларини ташкил қилади.

Лазер ёрдамида термоядро синтез реакциясини бошқариш йўналиши 1960 йили академик Н. Г. Басов ва



84-расм. Тороид шаклидаги камера: 1 — темир ўзак; 2 — бирламчи чулғам; 3 — иккиламчи чулғам; 4 — тороид камераси; 5 — плазма ипи.

проф. О. Н. Крохинлар томонидан таклиф қилинган эди. Ҳозирги кунда термоядро синтез реакциясини амалга ошириш мақсадида айрим қурилмаларда бу усул қўлланилмоқда.

Лазер ёрдамида термоядро синтез реакциясини амалга оширишда лазер нури импульс шаклида дейтерий-тритий «таблетка» сига йўналтирилади. Шунда, бу таблетканинг юқори қатлами ўта қисқа вақтда, яъни 10^{-8} секунд оралиғида, унинг температураси бир неча миллион градусга етади. Натижада, таблетка қатламида термоядро микропортлашлари содир бўлади. Бу термоядро микропортлашларида ажралган иссиқлик шу қадар катта бўладики, термоядро синтез реакцияси амалга ошириладиган термоядро реактори деворлари, ускуналари бундай иссиқликка чидамайди. Плазмани тутиб туриш ва уни термоядро реактори деворидан изоляциялашда кучли магнит майдонидан фойдаланилади.

Ҳосил қилинган микропортлаш термоядро синтез реакциясининг ёндирилиши ҳисобланади. Бу реакция вақтида енгил элементлар ядроларининг қўшилиши (синтези) содир бўлади. Натижада бу портлашларда ўта катта босим таъсирида таблетка сиртидаги зарралар жуда ҳам катта тезликка эришиб, термоядро ёқилғисини (дейтерий-тритий таблеткаси) сиқади ва қиздиради. Бу микропортлашлар даврий содир бўлиши (йўналтирилган лазер импульсига мос равишда) эътиборга олинса, у худди ички ёнув двигатели циклидаги термодинамик жараёнларга ўхшаш бўлади. Шунда иссиқлик энергияси даврий такрорланадиган микропортлашларда ажралади.

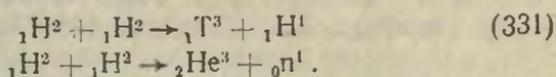
Аммо бошқариладиган термоядро синтез реакциясига сарфланадиган энергия миқдори, ҳозирги кундаги илмий тадқиқотларда, синтез вақтида ажралган энергиядан катта, яъни иқтисодий жиҳатдан зарарга ишламоқда, чунки ядролар ўртасидаги ўзаро итариш (кулон) кучларини енгил амалий тадқиқотларда осон бўлмаяпти.

Ядроларни синтез қилишнинг яна бир йўналиши — совуқ ядро синтез реакциясини паст температураларда (291—293 К) амалга ошириш мумкинлиги туғрисида 1948 йил академик А. Д. Сахаров «Мезомолекулалар ДДМ ва ДТМ ҳосил қилганда енгил ядролар синтези содир бўлади» деб айтган эди. 1989 йили америкалик олимлар Флейшман ва Понс ҳамда тадқиқотчилар гу-

руҳи (Жоунс) электролиз вақтида енгил элементлар синтези содир бўлишини эълон қилади, яъни оғир сувни электролиз қилиш вақтида осциллограммадаги табиий шовқинга—табиий йўл билан пайдо бўладиган нейтрон оқимининг шовқинига нисбатан асбоблар ёрдамида қайд этилган нейтронлар сони кўпроқ бўлиши кузатилган. Бундай натижаларни тадқиқот тажрибаларида Флейшман, Понс, Жоунс (АҚШ, Юга штати), Р. Н. Кузьмин ва Б. Н. Швилкин (Россия, МДУ) кузатганлар.

Совуқ ядро синтез реакциясининг физик механизми тўлалигича яратилган эмас. Фақат бу олимларнинг айримлари водород атомини қабул қилиш, ютиш эҳтимоллиги юқори бўлган палладий, титан, тантал, цирконий, ерда кам учрайдиган элементлар, ванадий қотишмасидан ясалган катод ҳамда платинадан анод сифатида фойдаланган.

Дейтерийнинг мусбат иони палладийга электролиз вақтида электролитдан (LiD 0,1 моль/л) $\sim 1,6$ mA/cm^2 ток ўтганда 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.

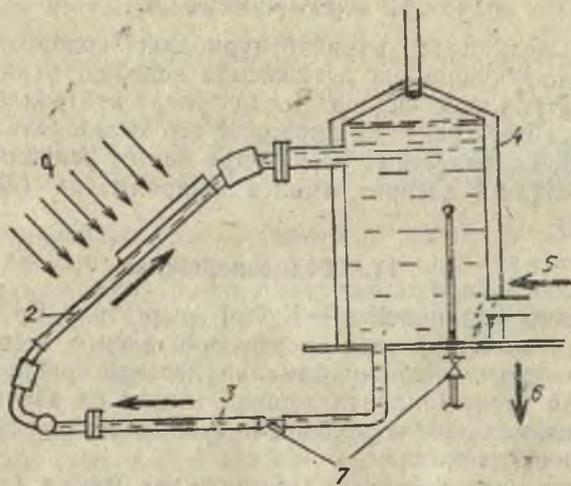
Дунёда биринчи гелиоэлектр станцияси 1912 йили

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 м^2 Ер юзасидан 1 кВт электр энергияси ҳосил қилиш мумкин. Чунки, Ерга Қуёшдан $1,57 \cdot 10^{18}$ кВт соат энергия бир йил давомида келиб тушади. Аммо, ҳозирги кунда Қуёшдан келадиган ёруғлик нури (радиация) энергиясини электр энергиясига айлантирувчи асбоб-ускуналарнинг ФИК анча паст (10—12% кремний кристали).

Қуёш нурини электр энергиясига айлантиришда, асосан яримўтказгичлардан олтингугурт — галлий кремний кристали ($p-n$ ўтказувчанлик, ФИК 6%), аморф, кремний, галлий арсениди (ФИК 33—34%) ва ҳоказолардан фойдаланилади. Кремний кристалининг температураси ортиши билан унинг ФИК камаяди, масалан, $T = 291 - 193 \text{ К}$ да ФИК 28—30% бўлса, 373 К да 12—15%.

Ерда гелиоэлектр станцияларни Қуёшли кунлар кўп буладиган 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 утирмасдан Қуёш энергиясидан тўғри фойдаланиш мумкин бўлади.

Ерга тушаётган Қуёш нурини линза ва кўзгулар ёрдамида бир нуқтага тўплаш йўли билан гелиоқурилмаларнинг самарадорлигини орттириш мумкин. Бундай гелиоқурилмалар иморатларни иситишда, чорвадорлар утовларида, кичик қувватли насосларни ишлатишда, лабораторияларда қўлланилмоқда (85-расм).

Космик аппаратларнинг асосий электр манбаи Қуёш батареялари ҳисобланади. Шундай бўлса-да, катта қувватли гелиоэлектр станцияларни кoinотда жойлаштириш лойиҳалари истиқболли деб бўлмайди.

Ўзбекистонда Қуёш электр станциясини қуриш лойиҳаси ишланмоқда. Бундай ҚЭС лари Хоразм ва Бухоро вилоятларида қад кўтаради. Бу гелиоэлектр станцияларнинг қуввати 100 МВт атрофида бўлиб, ҳар бири 200 гектар майдонни эгаллайди.

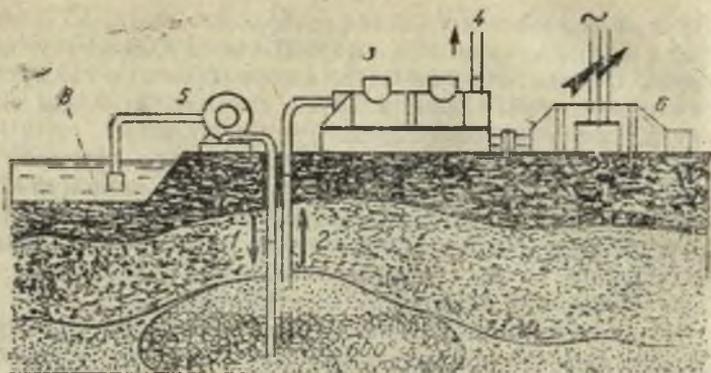
Ўзбекистон Республикасида (Паркент тумани) «Қуёш» деб номланган кучли гелиомарказ ишланмоқда. Унда Қуёш нури энергиясини тўплаб юқори температура-ларда суюқланган қотишмалар олинмоқда.

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 (Туркманистон, 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 турбинаси; 4 — иш бажариб бўлган буғ; 5 — сув насоси; 6 — электр генератор; 7 — ернинг юқори температурали қатламидаги суғий ҳавзаси; 8 — сув ҳавзаси.

вурдан олинadиган иссиқ сув буғи асосий иш жисм ҳисобланади (86- расм). Ер мантиясига яқинлашган сайин, Ер қобиғининг температураси ортиб боради. Масалан, Ер юзидан 2000—3000 м чуқурликдаги жисмлар температураси 370—380 К дан юқори бўлади.

Ер ости сувлари турли хил йуллар билан бу иссиқ қатламларга тушиб, унда буғга ёки иссиқ сувга айланиб, Ер юзасида иссиқ булоқлар ҳосил қилади. Бундай қайноқ булоқлар аксарият ҳолатларда вулқонлар атрофида пайдо бўлади. Масалан, Курил—Камчатка тизмасида бундай қайноқ булоқлар жуда кўп.

Замонавий геотермал станциялари Доғистонда (Избербаш шаҳри), Камчаткадаги Паужетск дарёси водийсида ишлаб турибди.

Доғистонда геотермал-иссиқлик станцияси бир суткада 10.000 м³ иссиқ сув ($t=60-70^{\circ}\text{C}$) беради.

Паужетск дарёси водийсидаги геотермал электр станциясининг қуввати 5 МВт, қуйи Кошелск геоИЭС дан олинadиган қувват 94 МВт.

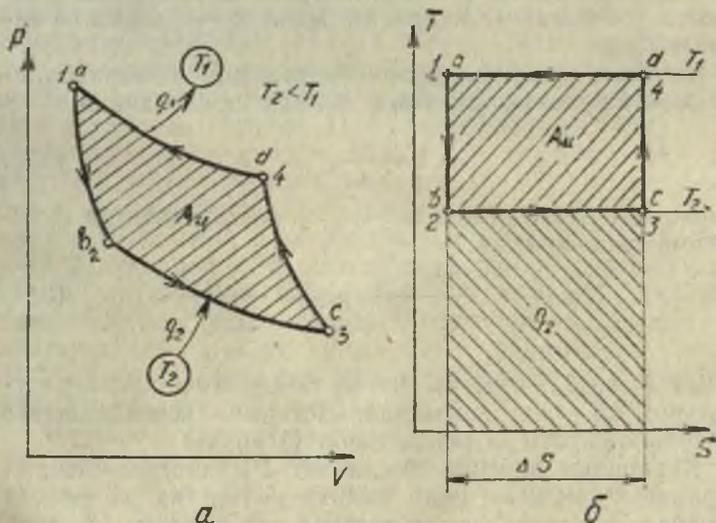
Температураси унча юқори ($40^{\circ}-60^{\circ}\text{C}$) бўлмаган шифобахш булоқлар Марказий Осиёда ҳам жуда кўп жойларда учрайди. Улар асосида иссиқлик энергетикасининг кам қувватли манбаларини ташкил қилиш мумкин.

12.1. Идеал совиткич қурилмаси ва унинг иш циклидаги термодинамик жараёнлар

Совиткич машиналарнинг ишлаш принципи термодинамиканинг иккинчи қонунига асосланган бўлиб, уларда иш жисми температурасининг атроф-муҳит температурасидан пасайишидан иборат, яъни жисмдан иссиқлик миқдори ташқи муҳитга чиқарилади. Модданинг температураси кичик бўлишини таъминлаш учун албатта иш бажарилади. Бу қурилмаларда совуқ элитич 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 дейилади. Идеал циклга совиткич машиналарнинг реал циклари солиштирилиб, уларнинг иқтисодий жиҳатдан самарадорлиги аниқланади.

Карнонинг совитиш цикли (87-расм) дан кўриниб турибдики, совитувчи моддага иссиқлик миқдори совитилувчи жисмдан изотерма ($T = \text{const}$) бўйича узатила-



87-расм. Карно совитиш циклининг PV ва TS диаграммалари.

ди (2 ва 3 нуқталар оралиғи). Бу жараён давомида иш жисми (реал шароитда сув буги, аммиак, карбонат ангидрид, фреон-12 ва ш. к.) босими ўз ҳажмини ошириши ҳисобига пасаяди. Иш жисми ҳажми кенгайиб борган сари унинг температураси пасаяди, яъни иш жисми совийди. Шундан сўнг иш жисми адиабатик ($dq \approx 0$) сиқилади. Бу сиқилиш жараёнида маълум миқдорда иш бажарилади ва иш жисми температураси кўтарилади яъни исийди (3 ва 4 нуқталар оралиғи).

Исиган иш 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 совийди. Натижада ташқи муҳитдаги ортиқча иссиқлик миқдорини ютади. Цикл такрорланади.

Совитиш циклининг бажарган иши 1—2—3—4—1 нуқталар билан чегараланган юзага сон қиймати жиҳатдан тенг, яъни

$$A_{\text{ц}} = q_1 - q_2, \quad (332)$$

бунда q_1 — иш моддасидан совитувчи жисмга узатилган иссиқлик миқдори; q_2 — совитилувчи жисмдан иш моддасига узатилган иссиқлик миқдори; A — циклниң бажарган иши.

Совитиш машиналарининг иқтисодий самарадорлиги совитиш коэффициенти ξ орқали ифодаланади:

$$\xi = \frac{q_2}{A_{\text{ц}}}. \quad (333)$$

Карнонинг совитиш цикли учун ξ коэффициенти қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{q_2}{A_{\text{ц}}} = \frac{\Delta S \cdot T_2}{\Delta S \cdot (T_1 - T_2)} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}, \quad (334)$$

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 суyuқлик ўз ҳажмини кескин кенгайтирганда совийди. Советкичларда шу эффектдан фойдаланилади.

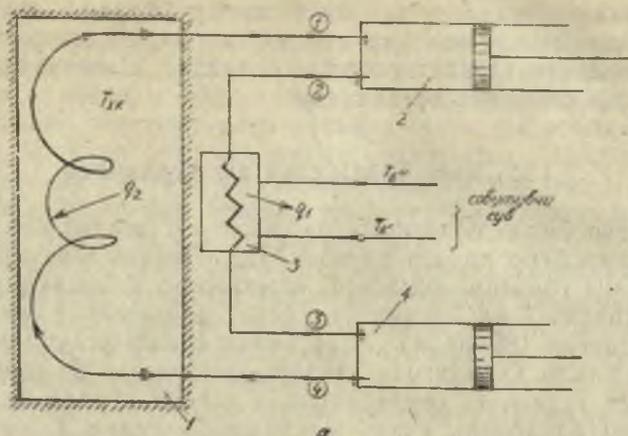
12.2. Ҳаво билан совитиш қурилмаси

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 диаграмма), яъни

$$q_1 = q + A_{ц} \quad (335)$$



88-расм. Ҳаво билан совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б ва б' — ҳаво билан совитиш қурилмаси циклидаги термодинамик жараёнларнинг PV ва TS диаграммалари.

Совитиш циклининг коэффициентини TS диаграмма орқали қуйидагича 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—4 нуқталар оралигида ҳаво адиабатик сиқилади ва кенгайди. Шунинг учун эътиборга олиб ҳаво температуралари нисбатини қуйидагича ифodalаш 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

$$\xi = \frac{1}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right) - 1} = \frac{1}{\frac{T_2}{T_1}(-1)} \quad (337)$$

Демак, компрессорнинг ҳайдаш клапанидан ўтган сиқилган ҳаво температураси қанча кичик бўлса ёки ҳаво двигателнинг 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:

$$q_0 = 10^3 \cdot \xi$$

Ҳаво билан совитиш қурилмалари учун $q_0 = 950 - 1250$ кЖ/МЖ атрофида 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 гоҳи совитиш агенти деб ҳам юритилади. Бундай газлар ноль градусдан паст температураларда тўйиниш нуқтасига эга бўлади.

Сиқилиш ҳисобига совитувчи қурилмаларда қўлланиладиган совитиш агентлари термодинамика нуқтаи назаридан 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 талаб қилинади.

Бундай талабларга тўлиқ жавоб берадиган совитиш агенти, яъни идеал газ топилганича йўқ. Лекин шунга яқинроқлари совитиш қурилмаларида қўлланилмоқда (15-жадвал).

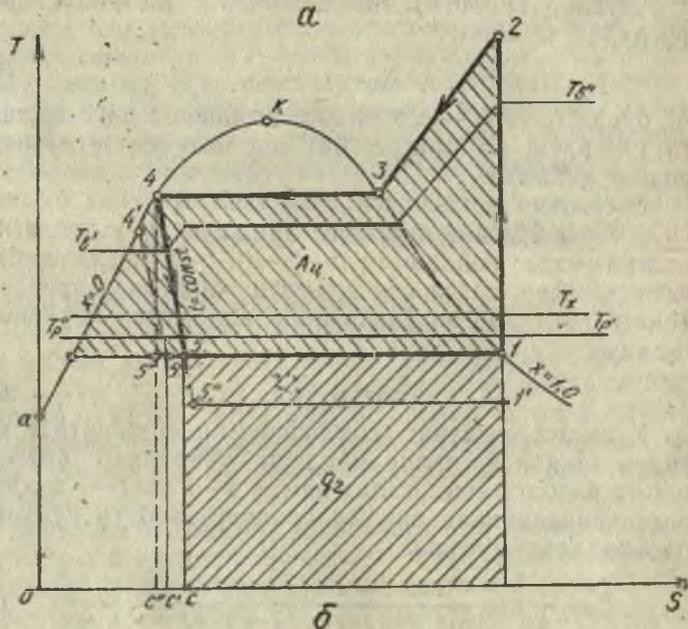
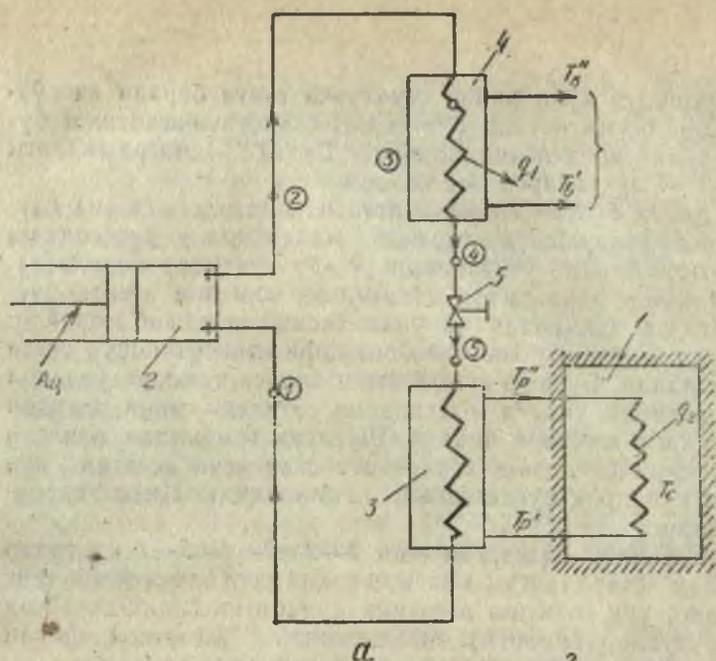
Сиқилган буғ билан совитадиган қурилма совитиш хонаси 1, компрессор 2, буғлаткич 3, конденсатор 4 ва ростловчи (дросселли) вентиль 5 дан ташкил топган (89-расм). Сиқилган буғ билан совитадиган қурилмада юз берадиган термодинамик жараёнларнинг TS диаграммасидан кўриниб турибдики (89-расм), цикл совитувчи агент (иш моддаси)ни компрессорга сўриш ва уни аднабатик ($dq=0$) 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, H ₂ O	-99,64	0,017	0,00287
2	Аммиак, NH ₃	-33,4	7,28	2,91
3	Карбонат ангидрид, CO ₂	-78,9	50,9	26,4
4	Олтингугурт ангидрид	-10,3	2,75	1,015
5	Метил хлориди, CH ₃ Cl	-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 буғнинг босими атмосфера босимидан катта, температураси эса маъфий ишорали бўлади (1 нуқта, 89-расм). Сўрилган буғ 2 нуқтагача аднабатик сиқилади ва унинг температураси совитувчи сув температурасидан катта бўлади. Сиқилган буғ ўзининг ички энергиясини ортиши ҳисобига исийди. Демак, $T > T_c$ ортиқча иссиқликни совитувчи агент конденсатор (совиткич) 4 да иссиқлик



89-расм. Сиқилган буғ билан совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б — сиқилган буғ билан совитиш қурилмаси циклининг $T\mathcal{S}$ диаграммаси.

алмашинув йўли билан совитувчи сувга беради ва ўзгармас босим остида ($P = \text{const}$) совитувчи агентнинг буғи тулиқ 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 циклининг 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 чизиги $T_p' - T_p''$ бугланиш чизиги $2-1$ га қанча яқинлашиб келса, совитиш хонаси 1 дан шунча кўп иссиқлик миқдори чиқаётганлигини билдиради. Совитиш хонаси 1 даги температуранинг янада пасайтириш мақсадида гоҳо қурилмага қўшимча совитиш системаси қўшилиши мумкин. Бунда системадан (совитиш хонаси) чиқадиган q_2 ортади ва қурилманинг иқтисодий самарадорлиги кўтариллади, 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 температуранинг атрофмуҳит температурасига нисбатан тушириш мумкин бўлади. Чунки ана шу температурада шўр сув музлай бошлайди.

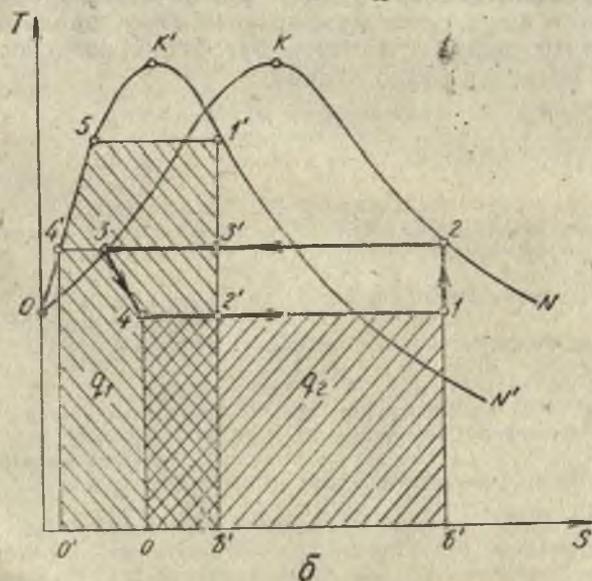
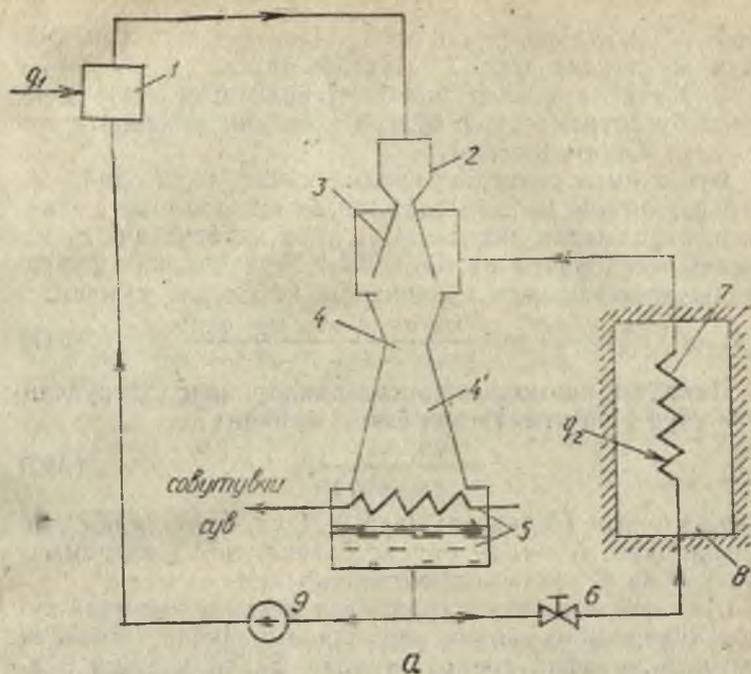
Буғ оқимли совитиш қурилмаси буғ қозони 1 , эжектор (франц. *ejecteur*, *ejecter* — отмоқ), оқимли насос 2 (эжектор ўз навбатида Лаваль сопласи 3 ва конфузори-диффузори 4 дан иборат), конденсатор 5 , дросселлаш вентили 6 , буғлаткич 7 , совитиш хонаси 8 , конденсатори 9 дан ташкил топган (90-расм).

Буг оқимли совитиш қурилмасининг иш цикли қуйидагича: қозон 1 дан буг оқими эжекторга оқиб киради, у ердан де-Лаваль соплоси 3 орқали ўтаётганда ўз параметрларини (босими, температураси ва ҳажмини) ўзгартириши натижасида буг оқими зарраларининг тезлиги товуш тезлигидан катта бўлади. Буг бундай кенгайгандан сўнг у эжекторнинг аралаштиргич қисмига буғлаткич 7 дан сўрилган температураси пастроқ буг билан биргаликда конфузур 4 да адиабатик сиқилади (1—2 нуқталар оралиғи). Бу сиқилган аралашманинг температураси унинг ички энергияси ҳисобига ортади. Бундаги сиқилиш худди компрессордагидай бўлади. Конфузурдан чиққан аралашма диффузур 4' да бирдан кенгайиб совийди. Бу совийиш 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). Буг қозонида узлуксиз буг ҳосил бўлиши учун эжекторга узатилган буг миқдорига тенг бўлган конденсат суюқлик насоси 9 орқали қозонга ҳайдалади. Цикл такрорланади.

Демак, буг 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 бугга мос келади. $OK'N'$ эгри чизиқдаги 1'—2' нуқталар оралиғи бурнинг де-Лаваль соплосидан оқиб чиқишига мос келса, 2'—3' нуқталари оралиғи конфузур-диффузурда g' кг бугнинг сиқилишини билдиради. 3'—4' нуқталарга g кг бугнинг 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-расм. Буг оқимли совитиш қурилмаси: а — қурилма схемаси; б — циклининг 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:

$$\xi = \frac{q_2}{q_1} = \frac{\text{юза } a-4-1-s-a}{\text{юза } a^1-4^1-5^1-6^1-a}. \quad (341)$$

Циклдаги иш моддаси энтальпияларининг ўзгарувчанлиги учун ξ ни қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\xi = \frac{i_1 - i_4}{g(i_1' - i_4')}, \quad (342)$$

бунда $i_1 - i_4$ — TS диаграммадаги 1 ва 4 нуқталар энтальпиялари; $i_1' - i_4'$ — бир кг буғнинг (TS диаграммадаги) $1'$ ва $4'$ нуқталари энтальпиялари.

Буғ оқимли совитиш қурилмаси циклидан шундай хулоса чиқариш мумкинки, термодинамиканинг иккинчи қонунига мувофиқ температуралар фарқи мавжуд бўлганда фойдали ишни олиш мумкин экан. Бу қурилмада температуралар фарқи қозондаги буғ билан конденсатордаги сув ўртасида пайдо бўлади.

АДАБИЁТ

1. Баскаков А. П., Берг Б. В. и др. Теплотехника. — М., «Энергоиздат», 1982, 262 с.
2. Дрижаков Е. В., Козлов Н. П. и др. Техническая термодинамика. — М., «Высшая школа», 1971, 472 с.
3. Политехника лугати (махсус муҳаррир Т. Р. Рашидов, 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. Гелиотехника. — М., «Наука», «Энергия»: «Экономика, техника, экология», 1988/4, 8 с.
12. Солнечная и тепловая. — М., «Знание», «Наука и жизнь», 1987/6, 54 с.
13. Кириллин В. А., Сичев В. В., Шейндлин А. Е. Технический термодинамика. — Т., «Ўқитувчи», 1979, 512 б.
14. Михеев М. А., Михеев И. М. Основы теплосредачи. — М., «Энергия», 1977, 343 с.
15. Рышкин В. Я. Тепловые электрические станции. — М., «Энергия», 1976, 447 с.
16. Шляхин П. Н. Паровые и газовые турбины. — М., «Энергия», 1974, 224 с.
17. Архангельский В. М., Вихерт М. М. и др. Автомобильные двигатели. — М., «Машиностроение», 1977, 591 с.
18. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. — М., «Высшая школа», 1981, 400 с.
19. Колодина М. В. «Энергетические ресурсы мира», № 1, 1959.
20. Ребани К. К. Энергия, энтропия, среда обитания. — М., «Знание», «Физика»: новое в жизни, науке, технике, 1985/4, 64 с.
21. Ястержемский А. С. Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1960.

S I ning asosiy birliklari

Катталик	Улчов бирлиги	Улчов бирлигининг		
		номланиши	белгиланиши	
			узбекча	халқаро
Узунлик	L	метр	м	m
Масса	M	килограмм	кг	kg
Вақт	T	секунд	с	s
Электр токининг кучи	I	ампер	A	A
Термодинамик температура	⊙	кельвин	К	К
Модда миқдори	N	моль	моль	mol
Ёруғлик кучи	J	кандела	кд	cd

Унга каррали ва улушли 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	Т	T
$1\ 000\ 000\ 000 = 10^9$	гига	Г	G
$1\ 000\ 000 = 10^6$	мега	М	M
$1\ 000 = 10^3$	кило	к	k
$100 = 10^2$	гекто	г	h
$10 = 10^1$	дека	да	da
$0,1 = 10^{-1}$	деци	д	d
$0,01 = 10^{-2}$	санти	с	c
$0,001 = 10^{-3}$	милли	м	m
$0,00000 = 10^{-6}$	микро	мк	μ
$0,00000000 = 10^{-9}$	нано	н	n
$0,000000000000 = 10^{-12}$	пико	п	p
$0,0000000000000000 = 10^{-15}$	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 тенгلامаси	14

II боб. Термодинамиканинг биринчи қонуни

2.1. Системанинг ички энергияси	16
2.2. Модданинг кенгайишида бажарилган иш	19
2.3. Модданинг иссиқлик сифими.	20
2.4. Термодинамика биринчи қонунининг талқини.	23
2.5. Энтропия	24
2.6. Энтальпия	25
2.7. Термодинамик жараёнлар	26
Изохорик жараён	27
Изобарик жараён	30
TS — диаграммада изохора ва изобаранинг жойлашуви	32
Изотермик жараён	33
Адиабатик жараён	35
PV ва TS диаграммаларда изотерма ва адиабатанинг жойлашуви	39
Политропик жараён	40

III боб. Термодинамиканинг иккинчи қонуни

3.1. Айланма цикл	45
3.2. Карно цикли	48
3.3. Термодинамика иккинчи қонунининг талқини	51

IV боб. Иссиқлик ўтказувчанлик

4.1. Иссиқликнинг узатилиши ва алмашинуви	52
4.2. Иссиқлик ўтказувчанлик	52
4.3. Конвектив иссиқлик алмашинуви	56
4.4. Нур иссиқлиги алмашинуви	62

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. Ёқилғи

5.1. Ёқилғи ва унинг хоссалари.	78
5.2. Ёқилғи турлари.	81
5.3. Ёқилғининг ёниши ва ортиқча ҳаво коэффицентини.	
5.4. Ёниш маҳсули ва унинг таркиби	85
5.5. Ўтхона 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 эффектив қуввати ва ФИК	110
6.5. ИЕД нинг иссиқлик баланси	
6.6. Пуфлаш ва унинг двигателларни ишлаб чиқаришдаги аҳамияти	113
6.7. Ташқи ёнув двигатели	115
	116

ИККИНЧИ ҚИСМ

ИССИҚЛИК КҶЧ 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. Оралиқ 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 турбиначининг 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. Тургр 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. Гелноэнергетика	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
<i>Адабиёт</i>	247

ЖУРАҚУЛ НУРМАТОВ
НУРИДДИН АББОСОВИЧ ҲАЛИЛОВ
УТКИР ҚАРШИЕВИЧ ТОЛИПОВ

ИССИҚЛИК ТЕХНИҚАСИ

(уқув қўлланма)

Тошкент «Уқитувчи» 1998

Муҳаррир Д. Аббосова

Расмлар муҳаррири Ф. Некқадамбоев

Техник муҳаррирлар: Э. Вильданова, С. Турсунова

Мусаҳҳих М. Иброҳимова

ИБ № 7308

Теришга берилди 28.05.98. Босишга рухсат этилди 26.10.98. Бичими 84×108^{1/32}. Кегли 10 шпонсиз. Литературная гарнитураси. Юқори босма усулидабосилди. Шартли б. т. 13.44. Шартли кр.-отт. 11.26. Нашр. т. 11.26. Тиражи 3000. Буюртма № 2004.

«Уқитувчи» нашриёти қошидаги «Зиё-Ношир» кичик шўъба корхонаси. Тошкент. Навоий кўчаси, 30. Шартнома № 11—98.

Ўзбекистон Республикаси Давлат матбуот қўмитасининг 1-босма хонасида босилди. 700002. Тошкент, Сағбон кўчаси, 1-берк кўча, 2-уй. 1998 й.

Н 87

Нурматов Ж. ва бошқ.

Иссиқлик техникаси: Олий ўқув юртлари талабалари учун ўқув қўлланма/Ж. Нурматов, Н. А. Ҳалилов, У. Қ. Толипов. — Т.: «Ўқитувчи», 1998. — 256 б.

1.1.2 Автордош.

ББК 31.3я7

1997—1998 йилда «Ўқитувчи» нашриётининг
умумтехника таҳририятида қўйидаги китоблар
нашр этилди.

1. Панкратова В. А. Тикувчиликдан ишлаб чиқариш таълими асослари.
2. Юсуфбеков Н. Р., Муҳамедов Б. Э., Гуломов Ш. М. Технологик жараёнларни бошқариш системалари.
3. Каминский М. М., Каминский В. М. Автоматлаштириш асбоблари ва тизимларини монтаж қилиш.
4. Литвинова И. Н., Шахова Я. А. Аёллар уст кийимини тикиш.
5. Шебеко Л. П. Электр-газ алашгасида пайвандлашга ўргатиш.
6. Лепав Д. А. Қир ювиш машиналарини таъмирлаш.
7. Никулин Н. В. ва б. Радиоматериаллар ва радиокомпонентлар.
8. Бутейкис Н. Г., Жукова А. А. Унда қандолат маҳсулотлари тайёрлаш технологияси.
9. Абдуқуддусов О. Қишлоқ хўжалик машиналари фанидан дарс ишланмалари.
10. Горячев В. П., Неелов В. А. Қошинлаш ишлари.
11. Жамилов М. М. Металл кесиш станоклари курсидан лаборатория ишлари.

1997—1998 йилда «Ўқитувчи» нашриётининг
умумтехника таҳририятида қуйидаги
луғатлар нашр этилди

1. Раҳимбоев Ф. М. Гидротехникадан русча-ўзбекча қисқача изоҳли луғат.
2. Раҳимбоев Ф. М., Холиқулов С. И. Сув хўжалигига оид русча-ўзбекча-французча луғат.
3. Раҳимбоев Ф. М. Сув хўжалигига оид русча-ўзбекча-инглизча луғат.

Н

