

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ
БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ**

**Қ.И. Сәтбаев атындағы
Қазақ ұлттық техникалық университеті**

Жоғары технологиялар және тұрақты даму институты

Жалпы және теориялық физика кафедрасы

Б.А. Байтімбетова

**МОЛЕКУЛАЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ
ТЕРМОДИНАМИКА.
ФИЗИКАЛЫҚ ПРАКТИКУМ**

Университеттің Ғылыми-әдістемелік
кеңесі оқу құралы ретінде ұсынған

Алматы 2012

ЖОК 536: 539.1 (075.8)

Байгімбетова Б.А. Молекулалық физика және термодинамика. Физикалық практикум. –Алматы: ҚазҰТУ, 2012. 217 бет.

Сурет –88. Кесте –26. Қосымша - 1. Әдебиеттер тізімі 18 атау.
ISBN 978-601-228-335-8

Оқу құралы университеттің барлық мамандықтарында оқитын студенттердің жалпы физика курсының молекулалық физика және термодинамика бөлімі бойынша зертханалық жұмыс жасауларына арналған. Студенттер зертханалық жұмыстарды жасай отырып, молекулалық физика және термодинамиканың негізі заңдары мен ұғымдарын жүйелі түрде түсініп, білімдерін тереңдете түсуге мүмкіндік алады.

ЖОК 536: 539.1 (075.8)

Пікір жазғандар: *А.Ж. Тұрмұхамбетов* – физ.-мат. ғыл. докт.,
профессор, ҚазҰТУ;

Т.С. Көшерев – физ.-мат. ғыл. докт.,
профессор, АТУ;

Б.А. Ақанаев – физ.-мат. ғыл. канд., профессор,
әл-Фараби ат. ҚазҰУ.

ISBN 978-601-228-335-8

© ҚазҰТУ, 2012 ж.

© Байгімбетова Б.А, 2012 ж.

КІРІСПЕ

Оқу құралы жалпы физика курсының “Молекулалық физика және термодинамика” бөлімінен барлық мамандықтарда оқитын студенттердің зертханалық жұмыстар жасауына арналған.

Ұсынылып отырған оқу құралының өзектілігі барлық жұмыстар заманауи үлгідегі (“ВЛАДИС” инновациялық орталығы, Ресей) физикалық қондырғыларда жасалынуымен байланысты, бұрын ҚазҰТУ-да мұндай күрделі үлгідегі жұмыстар жүргізілмеген.

Оқу құралының қолжазбасындағы материалды жеткізу деңгейі молекулалық физика және термодинамика саласындағы ғылым мен білімнің заманауи жетістіктеріне сәйкес.

Ұсынылып отырған оқу құралының көмегімен студенттерге молекулалық физика және термодинамика бөліміндегі негізгі заңдар мен ұғымдарды түсіну мақсатында тәжірибе жасап, тереңірек меңгеруіне ықпал жасалында, осыған орай студенттерге физика заңдарын іс жүзінде қолдана білуіне көмектесу мақсаты көзделген. Бұл оқу құралы оқу-әдістемелік кешеннің қосымшасы ретінде құрастырылды.

Зертханалық жұмыстар ЛКТ–2, ЛКТ–3, ЛКТ–5 және ИСТ–4 термостат өлшеу жүйесімен жасалынады. Бұл заманауи үлгідегі кешендер мынадай модульдер мен блогтардан тұрады: «Металдардың жылу өткізгіштігі», «Газдардың жылу өткізгіштігі», «Газдардың қасиеті», «Газ-сұйықтық», «Газдық калориметр», «Балласты калориметр», «Капилляр-вискозиметр», «Автоклав-манометр», «Компрессор», «Резонатор», «Пеш-термостат», «Молекула өлшемі» және дроссельдер, баллондар мен құралдар блогы.

Студенттер бұл заманауи кешендердің көмегімен молекулалық физика және термодинамика саласынан сұйықтықтың, газдың, қатты денелердің қасиеттерін және

газдардағы процестерді зерттеуге тәжірибе жүргізіп машықтанады. Бір кешенде бірнеше зертханалық жұмыстар жасауға мүмкіншілік бар.

Ұсынылып отырған оқу құралында студенттер жаңа құрал-жабдықтардың жұмыс жасау принципімен танысып, қондырғылардың сұлбасын өз бетінше жинап тәжірибе жасай алады.

Зертханалық зерттеулер заманауи физикалық қондырғымен жасалатындықтан, студенттердің ғылымға деген қызығушылығын, ұжыммен жұмыс жасау дағдысын қалыптастырады.

Оқу құралында зертханалық жұмыстың мақсаты, тәжірибе нәтижелерін өңдеу, тәжірибенің нәтижесінде алынған физикалық шамалардың қателіктерін есептеу, тәжірибенің негізгі қорытындысын тұжырымдау әдістері қарастырылған. Зертханалық жұмыстарды жасамас бұрын студент сол зерттелінетін құбылыс немесе процестердің теориясын оқып және қондырғының жұмыс жасау тәртібімен мұқият танысып, қондырғы сұлбасын жинағаны жөн.

Оқу құралында Типтік бағдарламаға сәйкес жалпы физика курсының «Молекулалық физика және термодинамика» бөлімі бойынша 15 зертханалық жұмыстардың мазмұны келтірілген.

Зертханалық жұмыстарды жасау және оны қорғауға дайындалу үшін соңғы жылдары электронды ресурстар кеңінен қолданылып жатыр. Осыған орай, құрал соңында мынадай электронды ресурстарға сілтемелер берілді: EqWorld физика-математика саласынан кітапхана (<http://eqworld.ipmnet.ru>), Википедия электронды энциклопедиясы (<http://ru.wikipedia.org>) және ғылыми электронды кітапханалар (<http://www.physic.kz>, <http://elibrary.ru>, <http://www.mccme.ru/free-books>, <http://window.edu.ru>). Құрал соңындағы қосымшада заттардың тығыздықтары, газдардың, қатты денелердің және сұйықтықтардың тұрақтылары берілген.

Оқу құралы студенттердің заманауи қондырғылармен танысып, өз бетінше тәжірибе жүргізуге машықтануына мүмкіндік береді.

ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЗЕРТХАНАЛЫҚ КЕШЕНДЕРДІ (ЛКТ –2, ЛКТ –3, ЛКТ –5) СИПАТТАУ

Жұмыстың мақсаты: термодинамикадан зертханалық кешенді (ЛКТ–2, ЛКТ–3 және ЛКТ–5) қондырғылармен, олардың жұмыс істеу принциптері және ИСТ–4 термостатының өлшеу жүйесімен танысу.

Құралдар мен жабдықтар: ЛКТ–2, ЛКТ–3 және ЛКТ–5 зертханалық кешендері, ИСТ–4 өлшеу жүйесі, «Пеш-термостат» модулі, «Металдың жылу өткізгіштігі» модулі, «Газдардың қасиеті – №1» блогы, «Газдардың жылу өткізгіштігі» модулі, "Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы, «Балласты калориметр» модулі және құралдар блогы.

1. Теориялық кіріспе

1.1. ЛКТ–2, ЛКТ–3 және ЛКТ–5 термодинамикалық зертханалық кешендерді қолдану

ЛКТ – қысқартылған түрде «Лабораторный комплекс термодинамики», яғни термодинамикадан лабораториялық (зертханалық) кешен дегенді білдіреді. Әрбір ЛКТ кешенді түрде құрастырылған қомақты (стол үстіне орналастырылған) микрозертхана болып табылады. ЛКТ–2 кешенде термодинамика және молекулалық физика саласында 17 дербес жұмыс жасалса, ЛКТ–3 кешенде 5 тақырып бойынша, ЛКТ–5 негізінде 4 тақырып бойынша тәжірибелер жүргізуге мүмкіндік бар. Айта кету керек, ЛКТ-5 кешені ЛКТ-2 қаңқасында жинақталған.

«ИСТ–4» құралы тәжірибе барысында өлшеулер жүргізетін аспаптарды қоректендіретін электр тогының көзі болады және заттардың темодинамикалық қасиеттерін, яғни таңдап алынған тұрақты температурада өлшеуді қамтамасыз етеді.

ЛКТ–2 зертханалық кешені мынадай жұмыстарды жасауға мүмкіндік береді:

1. Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау.
2. Ыдысты өздігінен және суытқыштың көмегімен суыту.

3. Судың меншікті булану жылуы мен меншікті жылуsыйымдылығын анықтау.

4. Жеңіл балқитын заттардың меншікті балқу жылуы мен энтропия өзгерісін анықтау.

5. Металдардың жылуsыйымдылығын анықтау.

6. Диэлектриктердің жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.

7. Металдардың жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.

8. Бойль-Мариотт заңын зерттеу және қолдану.

9. Беттік керілудің температураға тәуелділігін зерттеу.

10. Температура ауқымындағы сұйықтықтың тұтқырлығын зерттеу.

11. Судың фазалық тепе-теңдік қисығы.

12. Капиллярдан аққан ауаның тұтқырлығы.

13. C_p/C_v қатынасын температура ауқымындағы резонанс әдісімен зерттеу.

14. Дақ ауданы арқылы молекуланың өлшемін анықтау.

15. Қызған қыл сым әдісімен ауаның жылуөткізгіштігін анықтау.

16. Ауадағы газ диффузиясын зерттеу.

17. Қызған ағын әдісімен ауаның C_p жылуsыйымдылығын анықтау.

ЛКТ–3 зертханалық кешенінде мынадай жұмыстарды жасауға болады:

1. Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау.

2. Ыдысты өздігінен және суытқыштың көмегімен суыту.

3. Судың меншікті булану жылуы мен меншікті жылуsыйымдылығын анықтау.

4. Меншікті балқу жылуымен жеңіл балқитын заттардың энтропия өзгерісін анықтау.

5. Металдардың жылуsыйымдылығын анықтау. ЛКТ–5 зертханалық кешенінде мынадай жұмыстарды жасауға болады:

1. Газдағы изотермдік процесті зерттеу және қолдану.

2. Газдың C_p/C_v қатынасын Клеман – Дезорм әдісімен анықтау.

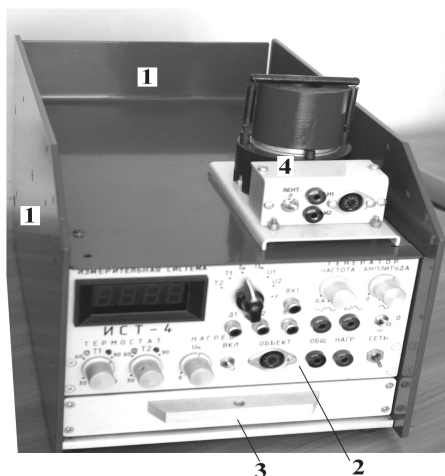
3. Капиллярдан аққан ауаның тұтқырлығын зерттеу.

4. Газдың ламинарлық және турбуленттік ағысын зерттеу.

1.2. ЛКТ–2, –3 зертханалық кешендерінің құрылымы және жұмыс істеу принципі

ЛКТ–3 қондырғысы екі қабатты топтамадан құралған кешен (1-сурет). Төменгі қабат өлшеу нәтижелерін алуға арналған.

Онда ИСТ–4 (2) өлшеу жүйесі және құрал блогы орналасқан (3) (1-сурет). Жоғарғы қабат жұмыс жасау зонасы (4). Онда "Пеш-термостат" функционалды модулі орналасқан.



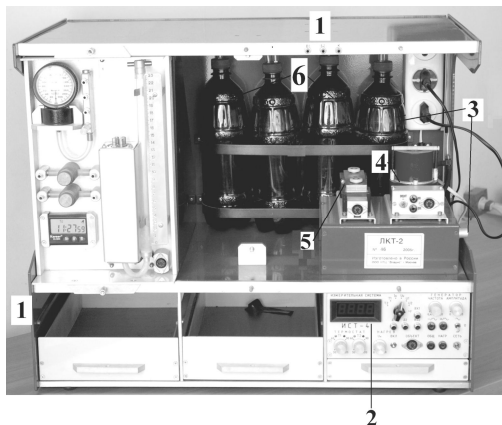
1-сурет. ЛКТ–3 термодинамикадан зертханалық кешенінің сыртқы түрі

ЛКТ–2 зертханалық кешенінің барлық элементтері үш қабатты қаңқада (каркас) орналасқан (2-сурет). Төменгі қабатта өлшеу нәтижелері алынады. Онда ИСТ–4 (2) өлшеу жүйесі және құрал блоктары, компрессор (3) мен баллондар блогы (6) орналасқан.

Ортадағы қабат жұмыс жасау зонасы. Онда "Пеш-термостат" функционалды модулі (4) мен "Металдың жылуөткізгіштігі – 02" модулі (5) орналасқан.

Басқа модульдер жылжымалы блоктың ішінде бекітілген. Жұмыста қолданылмайтын модульдер блоктың төменгі

кабатында орналасқан. Жұмысқа керекті модульдер блоктың ортасына вертикаль орналастырылады. Жоғарғы қабат – сөре, оған керекті заттарды қояды.



2-сурет. ЛКТ–2 термодинамикадан зертханалық кешенінің сыртқы түрі

Қаңқаның артқы қабырғасына электр қоректендіргіш желі (розетка) орналасқан. Каркастың оң жағында жерлестіру клеммасы орнатылған.

Компрессордің қызметі 90 мл/с шығыны мен 30 кПа ауа ағынын айдауға арналған. Компрессор қысым лүпілін реттеу мақсатында шамамен 1л балласты көлеммен жабдықталған. Балласты көлемнен кейін ауа "К" – деп белгіленген қаңқаның алдыңғы жағын бекітілген штуцерге келіп түседі.

Кешеннің ішкі жағындағы қабырғада әрқайсысының көлемі шамамен 1л болатын үш баллондар блогы (3) орналасқан. Баллондар блогы штуцермен (екі баллон біріккен, үшіншісі – жеке тұр) жоғарыдағы балка каркасына бекітілген. Баллондар блогы "Б1" және "Б2" түрінде белгіленген. Керек кезде баллондарды ұшайыр мен манометрдің көмегімен қиыстыруға болады, мысалы, екі блоктың орнына 3 литрлік бір көлемді баллонды немесе кешен саймандарынан қосымша баллондарды блокқа қолдануға болады.

1.2.1. ИСТ–4 термостаттың өлшеу жүйесінің жұмыс істеу принципі

ИСТ–4 өлшеу жүйесінің панелінде сұлбаның элементтері мен басқару және бақылау элементтері көрсетілген (3-сурет).

"СЕТЬ" – қоректендіру көзіне қосу тумблері.

"H1" – 4-разрядты сандық көрсеткіш (индикатор). Оның жарқырауы қондырғының ток көзіне қосылғанын білдіреді және оның S1 өлшеу түрлерінің көрсетулерін қолмен бұрап отырып анықтайды.

"T1" – 0,1 градус дәлдігі бар ($^{\circ}\text{C}$ –пен алғанда) D1 датчик жүйесіне жалғанған зерттелінетін жүйенің температурасы;

"T2" – 0,1 градус дәлдігі бар ($^{\circ}\text{C}$ –пен алғанда) D2 датчик жүйесіне жалғанған жүйенің температурасы;

"In" – миллиампермен алынған қыздырғыштың қоректендіру тогы («минус» таңбасын елемеуге болады);

"Un" – вольтпен алынған қоректендіру кернеуі;

"U1" – 1 мВ дәлдікпен және 2000 мВ дейін шегі бар BX1 кірісіне берілген тұрақты немесе айнымалы кернеудің орташа модулі;



3-сурет. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің алдыңғы панелі

"U2" – 0,01 В дәлдікпен және 20 В өлшеу шегі бар BX2 кірісіне берілген тұрақты немесе айнымалы кернеудің орташа модулі;

"F" – герцпен берілген (400-2000 Гц) оқшауланған коректендіру көзіндегі генератордың жиілігі.

"D1", "D2" – температура датчигі үшін термометрдің кірістері («Тюльпан» түріне ұқсас ұяшық). Бұл кірістер «ОБЪЕКТ» қосқышы контактысына параллель жалғанған. Әрбір кіріске тек бір ғана датчик жалғанады немесе D1/D2 ұяшығы немесе "ОБЪЕКТ" қосқышы арқылы жалғанады. Термометр өлшеу түрлеріне қарай көрсетілген "T1" немесе "T2" жағдайындағы датчик температурасын өлшейді. Егер бір кіріске бір мезгілде екі датчик қосылса, онда ол жұмыс режимі болып есептелінбейді, термометр дұрыс емес температураны көрсетпейді (шектен тыс теріс). Датчиктің болмауы жүйенің шектен тыс жоғары температурада тұрғанын көрсетеді.

BX1 – 0-ден 2В-қа дейінгі ішкі кернеу үшін вольтметрдің кірісі («Тюльпан» ұяшығы). Вольтметрдің дисплейі милливольтпен U1 орташа кернеу модулін көрсетеді. Вольтметрдің ішкі кедергісі 50 кОм.

BX2 – 0-ден 2В-қа дейінгі ішкі кернеу үшін вольтметрдің кірісі («Тюльпан» ұяшығы). Вольтметрдің дисплейі вольтпен U1 орташа кернеу модулін көрсетеді. Вольтметрдің ішкі кедергісі 500 кОм.

"ТЕРМОСТАТ" – "T1" және "T2" температураларды шектеуші блок. Егер қыздыру процесінде T1 немесе T2 температурасы D1 немесе D2 датчиктерінің бірінде көрсеткен $T1_{\text{көрсет}}$ немесе $T2_{\text{көрсет}}$ мәнге жетсе (мысалы 70^0), онда жүйедегі қыздырғыштың коректендіру кернеуі сол деңгейден ары қарай көтерілмейді де көрсетілген температураны ұстап тұрады (термотұрақтандыру режимі), ал егер температура датчигі көрсетілген мәннен асып кетсе, онда жүйе қыздыруды тоқтатады.

Егер $T1 < T1_{\text{көрсет}}$ болса, онда реттегіштің жанындағы "T1" жасыл көрсеткіші (индикатор) жанады, егер $T1 > T1_{\text{көрсет}}$ болса, онда реттегіштің жанындағы "T1" қызыл көрсеткіші (индикатор) жанады. Термотұрақтандыру режимінде екі көрсеткіш (индикатор) жанады. "T2" реттегіш көрсеткішінің де (индикатор) жұмыс жасауы "T1" реттегіші тектес.

T1 температурасын тұрақты ұстап тұру үшін "T1" реттегішін T1-нің көрсеткен мәніне қою керек, ал "T2" реттегішін температураның максимал мәніне қою керек (120°C).

T2 температурасын тұрақты ұстап тұру үшін "T2" реттегішін T2-дің көрсеткен мәніне қою керек, ал "T1" реттегішін температураның максимал мәніне қою керек (120°C).

Жүйенің кез келген датчигінің болмауы шектен тыс жоғары температураны көрсетеді және қыздырғыштың қоректендіруін тоқтатады. *Егер бір датчик қолданылса, онда екінші датчиктің кірісін тығын тетігімен тығындап қою керек (разъем-заглушка). Егер датчиктер жұмыс барысында қолданылмаса, онда екі "Д1" және "Д2" -нің кірістерін тығындап қою керек.*

"НАГРЕВ" – қыздырғышты басқару блогы.

"НАГР" және "ОБЦ" – «ОБЪЕКТ» қосқышына параллель жүргізілген шығыс.

"УН" – 0–24В шектегі қыздырғыштың қоректендіру көзін реттейтін кернеу. 20 В-қа дейінгі кернеуді ішкі вольтметр өлшейді, аса жоғары кернеуді ОБЦ/НАГР ұяшығындағы сыртқы вольтметрмен өлшейді.

"ВКЛ" – қыздырғыштың қоректендіру желісін қоректендіру көзімен жалғау.

"ОБЪЕКТ" – объектіні қосу тетігі. (ИСТ-4 өлшеу жүйесінің артқы жағында да бар).

Қосқыш контактыларының белгіленуі:

- 1 – Д1 датчигі;
- 2 – жалпы таза (жалпы датчиктер, түйіндер корпусы);
- 3 – контактыға (6) сәйкес "+ 12 В"-тық қоректендіру көзі;
- 4 – Д2 датчигі;
- 5 – контактыға (6) сәйкес "- 12 В"-тық қоректендіру көзі;
- 6 – жалпы күшті қосу;
- 7 – қыздырғышты қоректендіру көзі.

"ГЕНЕРАТОР" – оқшауланған қоректендіру көзі.

"ЧАСТОТА" – 400–2000 Гц аралығында айнымалы кернеудің жиілігін реттегіш.

"АМПЛИТУДА" – 0–20В аралығында оқшауланған қоректендіру көзінің шығыс кернеуінің амплитудасын реттегіш.

"=0/~" – тұрақты, нөл немесе айнымалы 400–2000 Гц жиілігі бар шығыс кернеуге қоятын тумблер. Егер тұтқа ортасында тұрса, онда коректендіру көзі сөндірілгенін білдіреді. "—/~", "+/~" – тоқсыз көздің шығыстары.

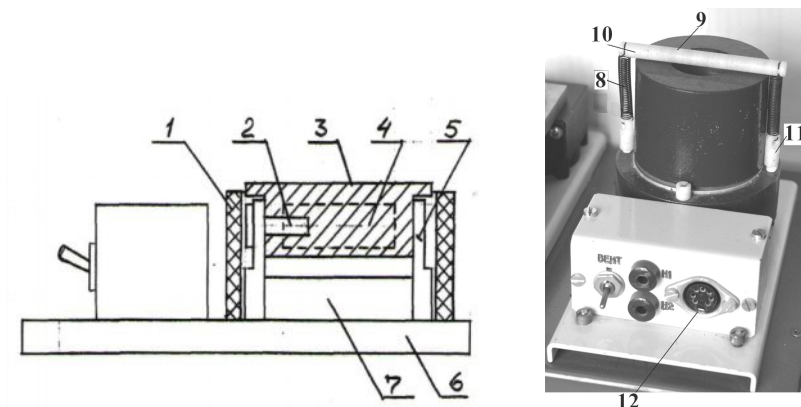
ИСТ-4 өлшеу жүйесінің артқы панелінде (4-сурет) 1 – ток көзі желісінің кірісі мен екінші қосқыш «ОБЪЕКТ» бар, 2 – компьютерге жалғайтын қосқыш (контроллер), 3 – желілік сақтандырғыштар, 4 – коректендіру көзіне қосатын желі (розетка), 5 – желілік өткізгіштерді сақтайтын орын, 6 – жермен қосатын клемма орналасқан.



4-сурет. ИСТ-4 өлшеу жүйесінің артқы панелі

1.2.2. «Пеш-термостат» модулі

«Пеш – термостат» модулі пештен (3), аяғы (5) бар құралдың (6) негізі болып қондырылған жылуоқшауланған қаңқамен (1) айнала қапталған. Пештің ішіне екі жылу өткізетін элемент (4) және температура датчиктері (2) орналастырылған. Пеш желдеткішпен (7) суытылады (5-сурет).



5-сурет. «Пеш-термостат» модулі

Пештің жылу өткізетін элементінің кедергісі 10 Ом, коректендіру көзінің максимал кернеуі – 20В, максимал қуаты – 40Вт.

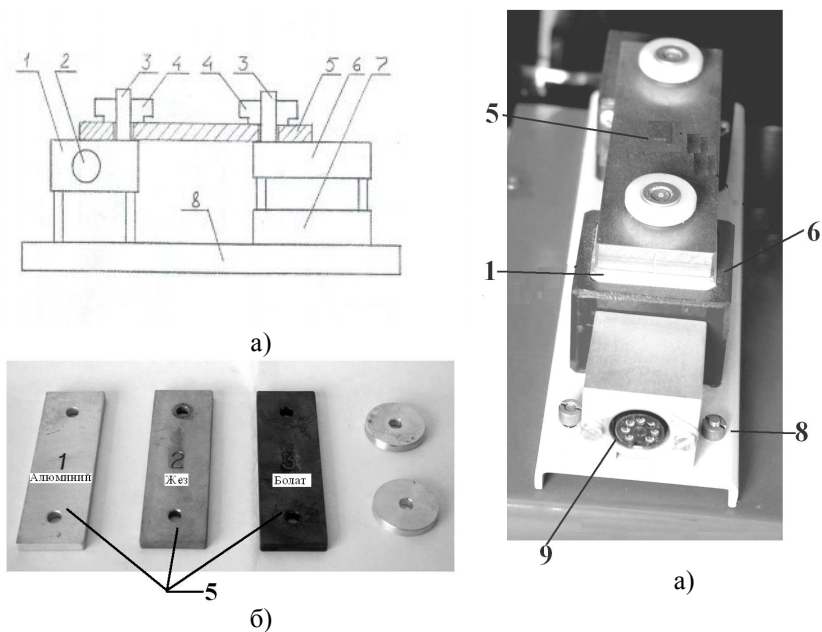
Зерттелетін (қыздырылатын) нысан пешке орналас-тырылады және оны екі серіппемен (10) екі жағынан білік арқылы (9) бекітіп қояды. Серіппе 11 екі *штырьмен* бекітілген және керек кезінде оны алып тастауға болады. Нысанға жылуды қорғайтын қаңқа (8) кигізеді. Қосқыш (12) арқылы модуль ИСТ–4 өлшеу жүйесіне жалғанады. "ВЕНТ" тумблерімен желдеткіш қосылады.

"Н1" мен "Н2" ұяшықтары қыздырғышпен параллель қосылады және керек кезінде қыздырғыштан бөлінген қуатты дәл анықтауға және қыздырғыштағы кернеуді *өлшеуге* қолданылады (ИСТ–4 өлшеу жүйесіндегі вольтметр кабель өткізгішіндегі кернеудің төмендеуін ескермейді, қуатты анықтауда шамалы қателік болуы мүмкін).

1.2.3. «Металдың жылуөткізгіштігі» модулі

«Металдың жылуөткізгіштігі-02» модулі жылу шығаратын элементі (2) бар қыздырғыштан (1) және желдеткіші (7) бар радиатордан (6) тұрады (6-сурет). Зерттелетін үлгілер немесе

металл пластиналар (5) қыздырғышқа бекітіледі және бұранда (4) мен винттің (3) көмегімен радиатор мен қыздырғышқа бекітіледі. Винттер ішінде температура датчиктері бар: радиаторда Д2 және қыздырғышта Д1 орналастырылған. Бұрандалар қыздырғышпен датчиктерге жылулық контактыны өткізеді және үлгілер немесе пластиналардың соңғы шетін суытуды қамтамасыз етеді. Модульдің барлық элементтері (8) жақсылап бекітілген. Қыздырғыш, желдеткіш және датчиктер қосқышпен (9) ИСТ-4 өлшеу жүйесіне жалғанады.



6-сурет. «Металдың жылуөткізгіштігі – 02» модулі:

а – модульдің сұлбасы б – металл үлгілер мен алюминийден жасалған шайба

Үлгінің жылуөткізгіштігін анықтау үшін қыздыру қуаты мен 60 мм қашықтықтағы үлгінің екі нүктесінің қалыптасқан температура айырымын өлшеу керек (бұл үлгісі бар Д1 және Д2 датчиктердің нүктелермен түйісуінің арасындағы эффективті

кашықтық). Үлгідегі жылулық қуатты анықтау үшін қоршаған орта қуатының шығынын анықтау керек. Ол үшін қыздырғыштағы үлгінің орнына алюминий шайбалы сақина бекітіледі (диаметрі 30 мм, қалыңдығы 5 мм), сонан соң жылуөткізгішті өлшеу режиміне сәйкес T1 температурада қыздырғышты термотұрақтандыру керек. Қыздырғыштағы үлгі арқылы жылу алмасу болмаған кезде, бізге қажетті тұрақтанған температураны ұстап тұрған кернеу мен ток күші арқылы қуат анықталынады.

Үлгі мен пластиналарда нөмір көрсетілген, оның қандай материалға сәйкес екені құрал құрамындағы тізімде көрсетілген. Осылай құралдағы кез келген үлгіні зерттеуге болады.

Металл үлгілері

Алюминий пластинасы	"1", көлденең қимасының ауданы $S=4,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Жез пластинасы	"2", көлденең қимасының ауданы $S=4,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Болат пластинасы	"3", көлденең қимасының ауданы $S=5,7 \times 30 \text{ мм}^2$
Тот баспайтын болат пластинасы	"4", көлденең қимасының ауданы $S=7,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Жылу шығынын өлшейтін шайба диаметрі 30 мм, қалыңдығы 5 мм.	

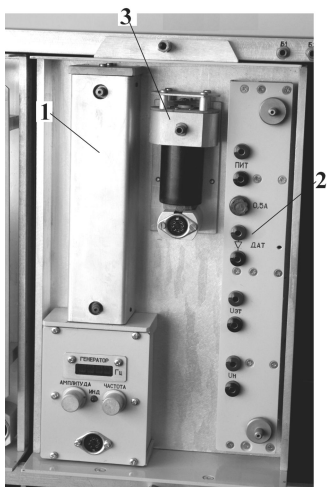
1.2.4. «Газдардың қасиеті – №1» блогы

«Газдардың қасиеті – №1» блогы «Резонатор-04» модулі (1), «Газдардың жылу өткізгіштігі – 06» модулі (2) және «Газдық калориметр – 07» модульдарынан (3) тұрады (7-сурет).

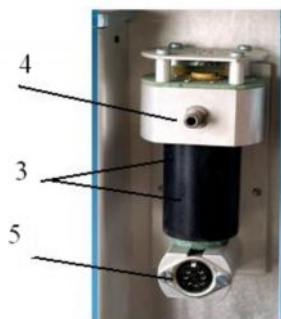
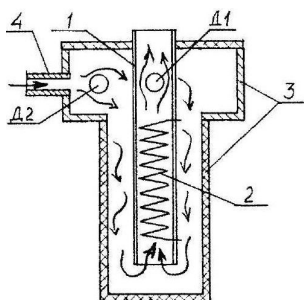
«Газдық калориметр – 07» модулі (8-сурет) қызған ағын әдісімен ауаның жылуsыйымдылығын өлшеуге арналған. Ол қыздырғыш (2) ішінде орналасқан жылуалмасу құбырынан (түтікшелі спираль) (1) және температура датчигінен Д1 тұрады. Құбыр температура датчигінің Д2 жанындағы штуцермен (4) корпуска (3) бекітілген. Қондырғының электр сұлбасы 9-суретте

көрсетілген. Барлық тізбектер СГ-7 типті ұяшық –қосқышқа (5) жинақталған, осы қосқыш арқылы модуль ИСТ-4 өлшеу жүйесіне қосылады. Модульге штуцер арқылы белгілі газ шығынының шамасы бар (dV/dt) зерттелінетін газ жіберіледі.

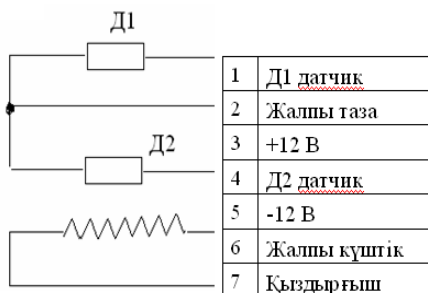
Белгілі қыздыру қуаты кезіндегі газ ағынының кірісі мен шығысының температура айырымын өлшеген соң, газдың жылусыйымдылығы анықталады.



7-сурет. «Газдардың қасиеті – №1» блогы

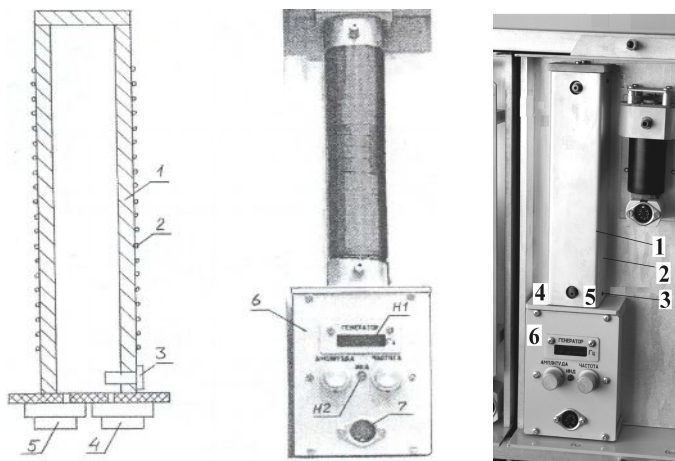


8-сурет. «Газдық калориметр – 07» модулі



9-сурет. «Газдық калориметр» модулінің сұлбасы

«Резонатор-04» модулі металл құбыр (1) мен пульттен (6) тұрады. Құбырдың бір жағы тығынмен жабылғанда, ал екінші жағы динамик (4) және микрофоннан (5) тұрады (10-сурет). Құбыр қыздырғыш орамамен (2) оралған. Құбырға температура датчигі (3) бекітілген. Динамик гармоникалық сигналдың генераторына, микрофон резонанс көрсеткішіне (индикатор) қосылған (екеуі де пульт құрамына кіреді). Ораманың кедергісі 12–14 Ом, ал максимал кернеуі – 20 В.



10-сурет. «Резонатор-04» модулі

Резонатор пульті амплитуда мен жиілікті реттейтін генератордан (700–3000 Гц), Н1 4-разрядты сандық көрсеткіштен, Н2 резонанс көрсеткішінен (жарық диод), жиілік пен амплитуданы реттегіш тұтқадан және алмастыру мүшесінен тұрады.

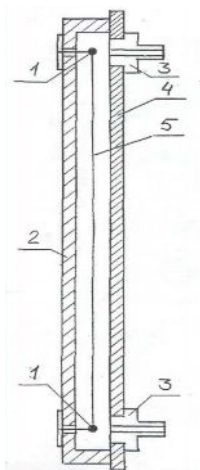
Барлық құралдарды ток көзімен қоректендіру қосқыш (4) арқылы жүзеге асады, ИСТ–4 өлшеу жүйесі «Термостат» қосқышына кабель арқылы жалғанады. Сигнал жиілігін өзгерте отырып, резонанс жиілігі анықталынады. Ол дыбысты күшейту мен Н2 резонанс көрсеткішінің көмегімен жүзеге асады, ал жиілік мына өрнекпен есептеледі:

$$\nu = \frac{n\nu_{\text{дыб}}}{2Ln}$$

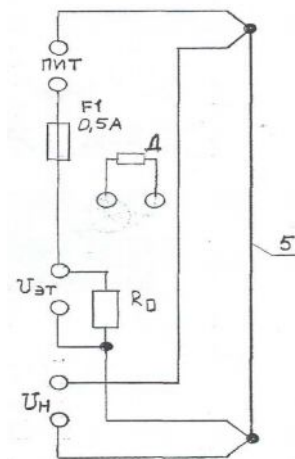
мұндағы $n=1, 2, \dots$, $\nu_{\text{дыб}}$ – дыбыс жылдамдығы, $L = 180$ мм – құбыр ұзындығы.

1.2.5. «Газдардың жылуөткізгіштігі» модулі

«Газдардың жылуөткізгіштігі – 06» модулі (11-сурет) қызған қыл сым әдісімен ауа мен басқа газдардың жылуөткізгіштігін анықтауға, сонымен бірге жылуөткізгіштіктің өзгеруі арқылы ауадағы газ диффузиясының коэффициентін бағалауға арналған. Торап панельге (4) орналастырылған. Металл қыл сым (никель негізіндегі қорытпа) (5) корпустағы (2) цилиндрлік канал осіндегі вертикаль ұстын (1) арасына жүргізілген. Канал тығындармен (3) жабылған. Корпусқа температура датчигі (Д) орнатылған. Жалғау сұлбасы 12-суретте көрсетілген. Қыл сым панель модуліндегі " U_H " ұяшығына қосылған және « $U_{\text{эт}}$ » ұяшығына жалғанған R_0 эталонды резистор өткізгішпен тізбектей қосылған. Қоректендіру көзі «ПИТ» ұяшығына қосылады. R_0 кедергі мен қыл сымдағы кернеуді өлшеп, қыл сым кедергісін және онда ағып жатқан жылу қуатын анықтаймыз. Өткізгіш көзіндегі кедергі нәтиже қателіктеріне әсер етпейтіндей етіп сұлба (кедергіні өлшеу төрт зонды әдіспен жүргізіледі) құрылған.



11-сурет. "Газдың жылуөткізгіштігі – 06 модулі"



12-сурет. Жалғау сұлбасы

Қыл сымның кедергісі бойынша оның температурасы анықталады. Қыл сым пен корпустың температура айырымы жылулық қуатқа пропорционал екенін біле отырып, газдың жылуөткізгіштігін табамыз.

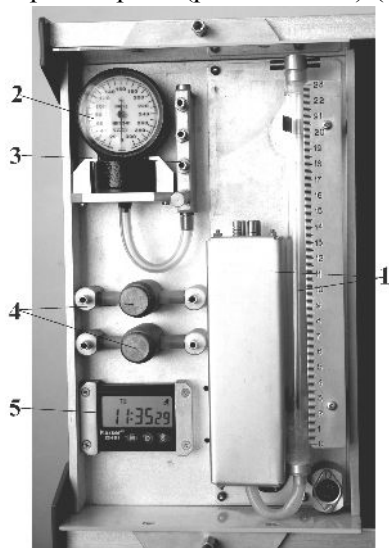
Қыл сым диаметрі $d=0,10$ мм, каналдың эффективті диаметрі $D=12$ мм, қыл сымның ұзындығы $L=240$ мм, қыл сымның кедергісі $R=2,5...3,5$ Ом, қыл сымның температуралық кедергі коэффициенті ($^{\circ}\text{C}$ кезінде) $\alpha=5,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, эталонды резистордың кедергісі $R_0 = 10,0$ Ом.

Ұсынылған токтың өзгеру ауқымы: бөлме температурасында қыл сымның кедергісін өлшеу үшін 30-50 мА және жылуөткізгіштікті өлшеу үшін 150 - 400 мА болуы керек. Қыл сым арқылы жүретін максимал ток 0,5 А, ал максимал қуат 1 Вт-тан аспауы керек.

1.2.6. "Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы

"Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы «Автоклав» модулінен (1) 300 мм.сын.бағ. (40 кПа), манометрден (2),

тармақтардан (разветвитель) (3), штуцері (4) бар краннан және секундомерден (5) тұрады (13-сурет).



13-сурет. "Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы

"Автоклав-манометр-05" модулі (14-сурет) қаныққан су буы қысымының температураға тәуелділігін зерттеу, сұйықтықтың беттік керілу коэффициентін, газдың тұтқырлығын, температура ауқымын да сұйықтықтың тұтқырлығын, газ шығыны мен қысымды өлшеу үшін қолданылады.

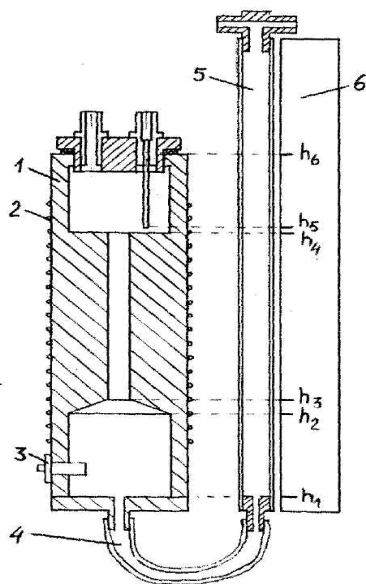
Автоклавтың негізгі бөлігі диаметрі 6,0 мм дөңгелек каналмен байланысқан жоғарғы және төменгі қуыстары бар құбырдан (1) тұрады. Құбырда қыздырғыш

орама (2) бар.

Құбырға температура датчигі (3) орнатылған. Автоклавтың қуыстары сұйықтық деңгейі мен құралдың сипаттамалық нүктелерінің координатасы есептелінетін сызғыш (6) бойымен орналасқан өлшеу құбыры (5) бар шлангымен (4) жалғанған.

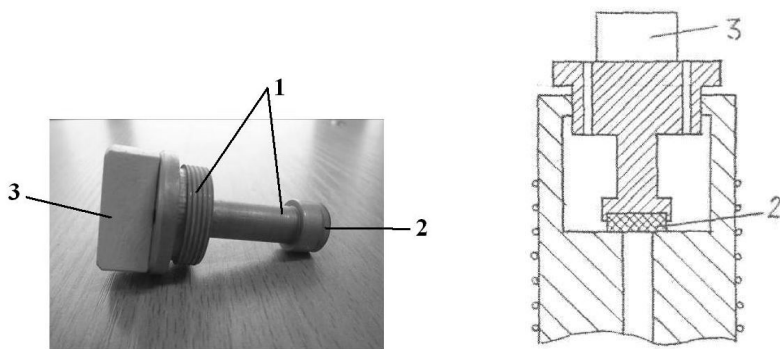
Сызғыш шкаласы бойынша автоклав деңгейлерінің сипаттамалық координаталары:

Құбырдың төменгі деңгейі	$h_1 = 10 \text{ мм}$
Төменгі қуыстың жоғарғы деңгейі	$h_2 = 25 \text{ мм}$
Каналдың төменгі деңгейі	$h_3 = 30 \text{ мм}$
Каналдың жоғарғы деңгейі	$h_4 = 95 \text{ мм}$
Ұзын капиллярдың төменгі қабырғасының деңгейі	$h_5 = 100 \text{ мм}$
Құбырдың жоғарғы деңгейі	$h_6 = 130 \text{ мм}$
Өлшеу құбырының көлденең қимасы	$S = 86,3 \text{ мм}^2$



14-сурет. "Автоклав-манометр – 05" модулі

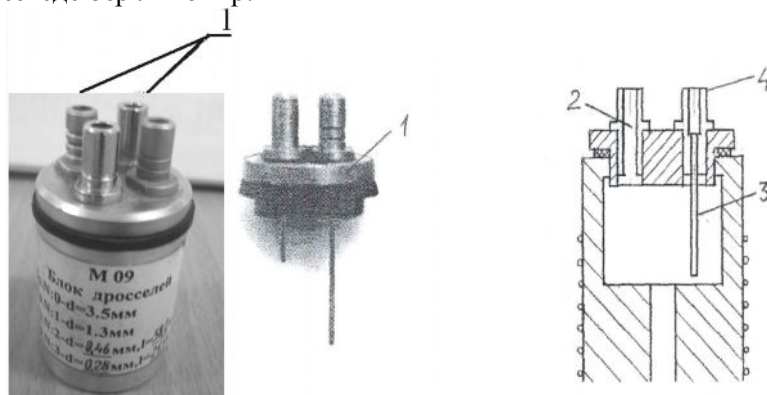
Автоклав құбырының жоғарғы жағы келесідей құралдармен керек кезінде жалғанады: тығын (15-сурет), дроссельдер блогы (16-сурет) немесе капилляр-вискозиметр (17-сурет).



15-сурет. Тығын

Резеңке дискілі (2) калибрленген каналдың жоғарғы жағы тығынмен (1) тұмшаланған. Тығын бұрауға ыңғайлы болу үшін пластмасса тұтқадан (3) жасалған (әдетте, автоклав өте ыстық болады). Автоклав құбырының жоғарғы қуысына дроссельдер блогы бекітіледі (16-сурет). Оған кіретіндей етіп, капилляр (3), яғни калибрленген тесік тектес дроссель (2) орнатылады.

Дроссельдер пневможүйеге штуцер арқылы бекітіледі. Штуцерде дроссель нөміріне сәйкес белгілер саны көрсетілген. Дроссель штуцеріндегі №:0 – қиғаш бөліктерсіз, №:1 – бір қиғаш бөлігі бар және т.с.с. Дроссельдер параметрлері төмендегі кестеде беріліп отыр.

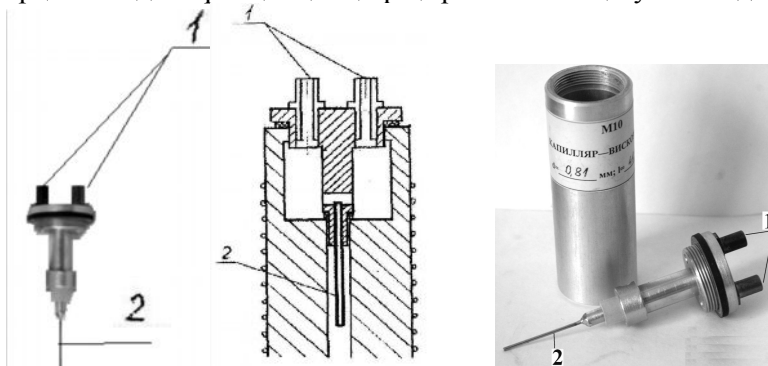


16-сурет. «Дроссельдер блогы» модулі

Дроссель нөмірі	Капилляр диаметрі, мм	Қуыс (саңылау) диаметрі, мм	Капилляр ұзындығы, мм
№:0		3,5	
№:1		1,0	
№:2	0,46		38,2
№:3	0,29		29,5

Автоклав құбырының жоғарғы қуысына (17-сурет) екі штуцері бар (1) капилляр-вискозиметр (2) бекітіледі. Капилляр-вискозиметрдің диаметрі $d=0,81\text{мм}$ және ұзындығы $l=41,5\text{мм}$

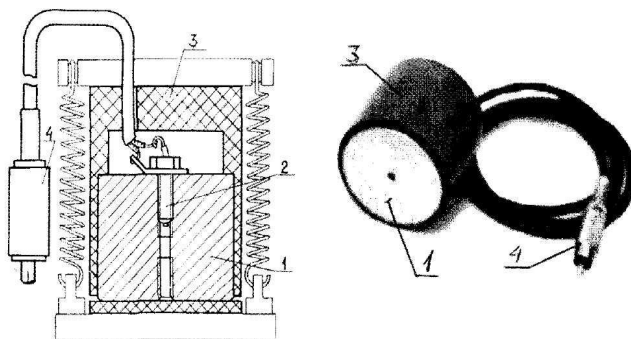
тең. Автоклавың жоғарғы қуысынан уақыт бойынша капилляр арқылы аққан сұйықтың тұтқырлығын анықтауға болады.



17-сурет. “Капилляр-вискозиметр – 10” модулі

1.2.7. «Балласты калориметр – 03» модулімен танысу

“Балласты калориметр-03 модулі” (18-сурет) диэлектриктердің жылуөткізгіштігін өлшеуге арналған. Ол алюминий цилиндрден (1), температура датчиктерінен (2) және қабықтан (кожух) (3) тұрады. ИСТ-4 өлшеу жүйесіндегі Д2 датчик кірісі қосқышпен (разъем) (4) жалғанады.



18-сурет. “Балласты калориметр – 03” модулі

Алдымен бос пешті 60–80⁰С температураға дейін қыздырып, термотұрақтандырыңыздар. Сосын зерттелетін нысанды (диск) қызған пешке орналастырыңыздар, яғни нысанның төменгі жағында тұрақты жоғары температура орнығады. Пластинаға балласты калориметрді кигізіп, серіппесі бар білікпен (стерженьмен) бекітіп қояды. Үлгінің үстіңгі және төменгі бөлігінің (бетінің) өзгерген температурасын 30–60с уақыт интервалында жазып отырады. Үлгі қызған пешпен тікелей түйісіп тұрғандықтан, зерттелетін дененің төменгі бөлігінің (бетінің) температурасы өте тез қызады. Жылуөткізгіштік мынадай тендеумен анықталынады:

$$\lambda = C \frac{T_{k2} - T_{k1}}{S(T_0 - T_{k1})\Delta t} h \quad (1)$$

мұндағы h – зерттелетін нысанның қалыңдығы, S – оның табанының ауданы, T_0 – пеш температурасы, Δt – калориметрдің бастапқы (T_{k1}) және соңғы (T_{k2}) өлшенген температурасына кеткен уақыт интервалы. Балласты калориметрдің параметрлері: жылусыйымдылық $C=125\text{Дж/К}$, цилиндр табанының ауданы $S = 18,0 \text{ см}^2$.

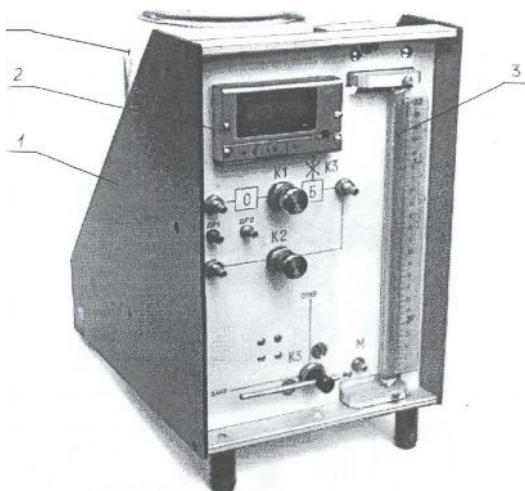
1.2.8. Құралдар блогы

Құрал блогы (19-сурет) мынадай заттардан тұрады:

- кернеу өзгерісін өлшейтін және зерттелетін нысанның температураларын бақылайтын (термопаралар кіре алатындай қуысы бар металл үлгілер және пеш) М-838 мультиметрден;
- 0,01 с уақыт аралығын ажырата алатын секундомерден.

1.3. ЛКТ-5 зертханалық қондырғы және оның жұмыс істеу принципі

Кешеннің барлық элементтері (19-сурет) екі қапталдан және алдыңғы панельден тұратын қаңқаның ішінде орналасқан.



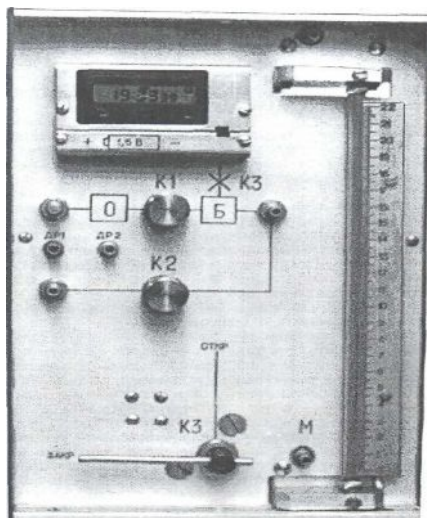
19-сурет. ЛКТ – 5 зертханалық кешен

Басқару тұтқалары элементтерді өзара жалғау сұлбасы орналасқан панельдің алдыңғы жағына шығарылған (20-сурет).

Кешеннің негізгі элементтері – 3,25л көлемді 4 баллон болып табылады (19-сурет). Сабы құрал панеліне шығарылған баллон кранмен жабдықталған. Қауіпсіздік ережелерін сақтау мақсатында, жұмыс барысында баллонға қалың матадан жасалған қап кигізіп қояды.

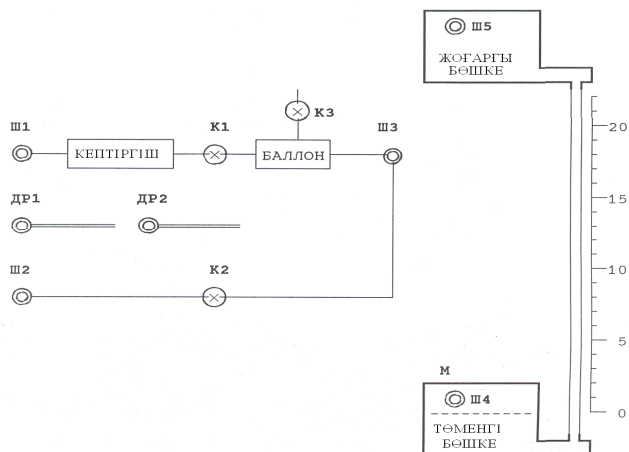
Алдыңғы панельге жетпей серіппемен бекітіліп тұратын құрғатқыш (силикагелі бар шыны баллон) қондырылған. Жұмыс қабілеті бар силикагельдің түсі – қою қоңыр, ал жұмсалынған (дымқыл) силикагель – ашық сары немесе ақ болып келеді.

Силикагельді қайта қалпына келтіру үшін алдымен құрғатқышты қондырғыдан суырып алу керек, ол үшін: шлангының жетуіне қарай құрғатқышты серіппеден алып, шлангымен жалғанған қақпақты бұрап баллонды босату керек. Сосын силикагельді қыздырғыш пеште немесе табада $150^{\circ} \pm 20^{\circ}\text{C}$ температурада 20 мин. ұстап тұру керек. Силикагельді баллонға салып, аузын қақпақпен жауып, құрғатқышты серіппенің астына бекітіп қояды.



20-сурет. ЛКТ-5 кешенінің алдыңғы панелі

Дифференциалдық су манометрі мөлдір түтікшемен жалғанған төменгі және жоғарғы бөшкелерден тұрады (21-сурет).



21-сурет. Пневможүйенің сұлбасы

Манометрдегі сұйықтық деңгейін өлшеу үшін түтікшеге ұзындығы 22 мм, дәлдігі 1мм сызғыш бекітіліген. Өлшеуді дәлірек жүргізу үшін лупа қолданылады. Манометрдің қуысына Ш4 штуцерді жалғап, қысымды өлшейді.

Егер Ш5 штуцер атмосфера жаққа қарай ашылса, онда осы қуыста манометр атмосферадан жоғары қысымды өлшейді. Егер Ш5 штуцерін бір қуыспен жалғаса, онда қуыстардағы қысымдар айырымын манометр өлшейді. Түтікшенің көлденең қимасының ауданы $S_1 \approx 0,2 \text{ см}^2$ бөшкенің көлденең қимасының ауданынан ($S_2 \approx 12,6 \text{ см}^2$) көп есе кіші, осы кездегі сызғыш бөлігінің құны шамамен 1 мм су бағанына (10 Па) тең. Сызғыш 1 миллиметр көрсеткішіне тең (10,16 Па) су бағанының қысымдар айырымы $(1+S_1/S_2)$ мм сәйкес келеді. *Егер есептеу барысында қысым емес, олардың қатынасы немесе қателік шамамен 2% -тей алынса, онда ол бұл нақтылық маңызды емес.*

Сұйықтықтың (су) бастапқы деңгейі қарама-қарсы жақтағы сызғыш шкаласының нөлдік бөлігінен бастап, төменгі бөшкеге Ш4 штуцер арқылы шлангысы бар резеңке грушамен құйылады. Осы штуцер арқылы сұйықтық құйылып алынады немесе Ш4 штуцер бөшкенің ортасынан төмен болғанда қондырғыны қабырға жаққа жайластырып, артық сұйықтықты сорып алып, сұйықтыққа арналған каналдан ауа көпіршіктерін кетіру керек, сосын грушаның көмегімен бірнеше рет кішкентай бөшкедегі қысымды түсіру және көтеру керек.

Жоғарғы бөшке сақтандырғыш қызметін атқарады: ол төменгі кішкентай бөшкеде қысым шекті мәнінен асып кеткен жағдайда өзіне суды қабылдап алады. Манометрдің жұмыс атқару қабілетін қайта қалпына келтіру үшін, Ш5 штуцер арқылы жоғары бөшкеге ауа жіберіп, оны үрлеу керек. Сұйықтық шайқалу үшін манометрді сумен қамтамасыз етіп отыру керек.

Сағат-таймер 2 (19-сурет) 0,01 с дәлдікпен уақыт интервалын өлшеуге қолданылады. Секундомермен жұмыс істеу үш басқышпен жүзеге асады. "MODE" басқышы жұмыс режимін таңдау болып табылады. "СЕКУНДОМЕР" режимінде сағаттың жоғары бөлігіндегі дисплейде жазу көрсетіледі.

"Секундомер"-дегі "ADVANCE" басқышы кезек-кезек уақыт есебін көрсетіп, тоқтатып отырады. Егер дисплей қорытынды уақытты көрсетпесе, онда өлшенген қосынды уақыт интервалы шығады. "SET" басқышы уақыт есебін басқанда дисплей көрсетілімін есіне сақтап бекітеді. Бұл басқышты қайта басқанда дисплейдің көрсетілуі ары қарайғы уақыт есебімен сәйкес болады. "SET" басқышы *тоқтаған уақыт есебінде* нөлге келтіріледі және дисплейді іске қосады.

Панельде баллон (4) (19-сурет) «Б» таңбасымен белгіленген. Үлкен көлденең қимасы (1 см^2 шамамен) бар КЗ кран ішінде ауасы бар баллонмен жалғанады және баллондағы газ қысымын тез арада жіберіп отырады. Баллон кранының ұстағышы алдыңғы панельде орналастырылған. "Ашу" жағдайынан "ЖАБУ" жағдайына келу үшін тұтқаны бұрайды немесе секундомердің "ADVANCE" басқышына параллель қосылған микроайырып-қосқышты (микрпереключатель) кері жібереді. Бұл кранның ашық немесе жабық күйіндегі өлшеу уақытының нәтижесі болып табылады.

Құрғатқыш панельде О таңбасымен белгіленген. Кешеннің элементтері синтетикалық материалдан жасалған шлангымен жалғанған. К1, К2 крандары сәйкес шлангалармен бекітіледі. Зерттелетін газ Ш1 штуцер арқылы баллонға жіберілген кезде газдағы ылғал кетеді. Егер құрғату керек болмаса, онда газ Ш2 штуцер арқылы жіберіледі. Ш3 штуцер арқылы суы бар манометр баллонмен (Ш4 штуцер) немесе баллондағы қысымды өлшеу үшін сыртқы манометрмен жалғанады. ДР1 және ДР2 дроссельдер түтікшедегі газдың ағыс түрлерін зерттеуге немесе ауа тұтқырлығын өлшеуге арналған. Олар жұқа түтікше-капиллярға желімдеп жабыстырылған штуцер тектес болып келеді.

Капиллярдың өлшемдері:

ДР1 дросселі: диаметрі = 0,47 мм, ұзындығы = 40 мм.

ДР2 дросселі: диаметрі = 0,27 мм, ұзындығы = 30 мм.

ЛКТ – 5 зертханалық кешенінде келесі құрал-жабдықтар бар:

40 кПа манометр (300 мм сын.бағ.) жеткілікті жоғары қысым керек болғанда қысымды өлшеуге қолданылады, мысалы түтікшеде газдың турбулентті ағысы болуы үшін. Манометр жұмыс жасау үшін оны қаңқаның алдыңғы жағындағы екі тесікке іліп қояды.

Пластмассалы баллон – Бойль-Мариотт заңын тексеру және қолдану кезінде балласты сыйымдылық ретінде алынады. Баллондар көлемі мензуркадан оның сумен толғанын анықтайды. Газдалған сусындардан бастап әртүрлі көлемді сусындар баллондарынан *штуцері бар қалпақты* жасауға болады. Баллонды сумен толтырып және оған 0,4 атм. қысымға дейін ауа жіберіледі, сонда баллонның көлемі 0,3% ары қарай көтерілмейді. Сондықтан біздің тәжірибедегі газ көлемі тұрақты деп есептелінеді.

ҚЫЗДЫРҒЫШТЫҢ ПАЙДАЛЫ ӘРЕКЕТ КОЭФФИЦИЕНТІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: қыздырғыш қуатының шығынын, жылу сыйымдылығын және пайдалы әрекет коэффициентін (ПӘК) екі түрлі әдіспен анықтап, алынған нәтижелерді өзара салыстыру.

1. Теориялық кіріспе

1.1. Пайдалы әрекет коэффициенті

Пайдалы әрекет коэффициенті (ПӘК) – энергия тасымалданғанда немесе түрлендіру кезіндегі жүйенің эффективтік сипаттамасы. ПӘК жүйенің пайдалы энергиясының жұмсалған энергияға қатынасымен анықталады.

$$\eta = Q_{\text{най}} / Q_{\text{тол}} . \quad (1)$$

Бұл жұмыста пайдалы энергия $Q_{\text{най}}$ зерттелетін жүйені қыздыруға кеткен энергия мөлшеріне тең шама. Толық

жұмсалған энергия $Q_{\text{тол}}$ жүйенің (пештің) электр тізбегінен алған энергия мөлшеріне тең.

Ортаны жылытуға және тағы басқа әрекеттерге кеткен энергияның шығыны бар болғандықтан ПӘК әрқашан бірден кіші. Осыған сәйкес ПӘК жұмсалған энергияның үлесі, яғни дұрыс бөлшекпен немесе процентпен өрнектеледі және өлшемі жоқ шама болып табылады.

Біртекті тізбек бөлігінен ток өткенде электр өрісі жұмыс жасайды. Тізбектен Δt уақыт ішінде $\Delta q = I\Delta t$ заряд өтеді. Қарастырып отырған бөліктегі электр өрісінің жұмысы:

$$\Delta A = (\varphi_1 - \varphi_2)\Delta q = \Delta\varphi_{12} I\Delta t = UI\Delta t, \quad (2)$$

мұндағы $U = \Delta\varphi_{12}$ – кернеу, I – ток күші, Δt – жұмыс жасау барысындағы уақыт аралығы. Кедергісі R өткізгіштен, күші I ток өтсе, электр тогының жұмысы ΔA -ға тең болып, бұл жұмыс өткізгіште бөлініп шығатын жылу Q шамасына тең болады.

Ток жұмысының жылуға айналу заңын бір-біріне тәуелсіз Дж.Джоуль мен Э.Ленц тәжірибе жүзінде тағайындаған, сондықтан бұл заң Джоуль-Ленц заңы деп аталады.

$$Q_{\text{жұм}} = \Delta A = UI\Delta t = I^2 R\Delta t. \quad (3)$$

Электр тогының қуаты Δt уақыт интервалында жасаған ΔA ток жұмысының сол уақытқа қатынасымен анықталады:

$$P_{\text{жұм}} = \frac{\Delta A}{\Delta t} = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (4)$$

СИ жүйесінде электр тогының жұмысы Джоульмен (Дж), ал қуат Ватпен (Вт) өлшенеді.

Ыдысы (тигелі) бар пешті қыздыруға кеткен энергияны пайдалы энергия деп есептейміз. Ол мына формуламен есептелінеді:

$$Q_{\text{пай}} = C_0 \cdot \Delta T, \quad (5)$$

мұндағы C_0 – жүйенің жылусыйымдылығы, яғни жүйені 1 градусқа қыздыруға кеткен энергия мөлшері, ал ΔT нақты температура интервалы.

Пайдалы қуат:

$$P_{най} = \frac{Q_{най}}{\Delta t} = \frac{C_0 \Delta T}{\Delta t} . \quad (6)$$

Енді (1) формуладан ПЭК төмендегідей анықталады:

$$\eta = \frac{Q_{най}}{Q_{жұм}} \cdot 100\% = \frac{P_{най}}{P_{жұм}} \cdot 100\% .$$

Екінші жағынан пайдалы қуатты былай есептеуге болады:

$$P_{най} = P_{жұм} - P' , \quad (7)$$

мұндағы P' – қоршаған ортадағы жылудың шашырауымен байланысты қуаттың шығыны.

1.2. Екі рет қыздыру әдісі

Жоғарыда келтірілген өрнектерді қуаттың шығынын анықтауға қолдануға болады. Ол үшін (6) және (7)-ден

$$Q_{най1} = (\Theta_1 - \Theta') \cdot \Delta t_1 = C_0 \Delta T \quad (9)$$

өрнекті аламыз. Бұл формуланың құрамында әзірге белгісіз C_0 бар. C_0 жүйе сыймдылығын анықтау үшін екінші рет тәжірибе жасаймыз (осыған байланысты әдістің аты «екі рет қыздыру»). Тәжірибенің теориялық өрнегі былай жазылады.

$$Q_{най2} = (P_2 - P') \cdot \Delta t_2 = C_0 \Delta T , \quad (9')$$

Бұл формулалардағы $Q_{най2}$, $Q_{най1}$ – (5) өрнекпен анықталған қондырғының объективтік көрсеткіші, яғни олар

өзара тең: $Q_{nai2} = Q_{nai1}$, ал Δt_1 және Δt_2 – бірінші және екінші ретті қыздырудағы уақыт интервалдары, ал ΔT – температуралар интервалы, C_0 – жүйенің жылуsыйымдылығы.

Бұл теңдеулер жүйесін (9) шеше отырып, P' қуаттың шығыны мен жүйенің C_0 жылуsыйымдылығын анықтаймыз:

$$P' = \frac{P_1 \cdot \Delta t_1 - P_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2}, \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{(P_1 - P_2) \cdot \Delta t \cdot \Delta t_2}{(\Delta t_1 - \Delta t_2) \cdot \Delta T}. \quad (11)$$

мұндағы $\Delta T = T_{соң} - T_{бас}$ – температуралар интервалы, $T_{соң}$ – тигельдің соңғы температурасы, $T_{бас}$ – тигельдің бастапқы температурасы. $\Delta t_1, \Delta t_2$ – уақыт интервалдары, $\Delta t_1 = t_{lсоң} - t_{lбас}$, $\Delta t_2 = t_{2соң} - t_{2бас}$.

2. Эксперименталдық бөлім

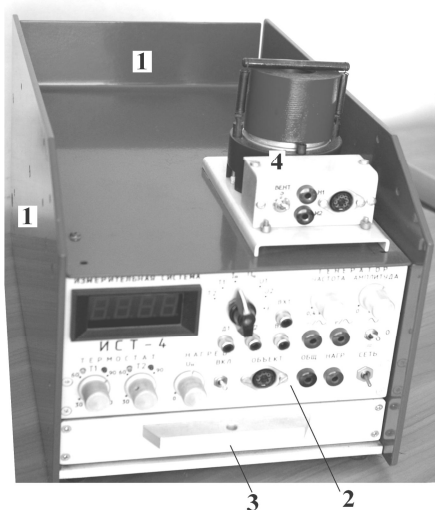
2.1. Екі рет қыздыру әдісімен пеш параметрлерін өлшеу

Тәжірибе ЛКТ–3 зертханалық кешенінде (1-сурет) немесе ЛКТ–3 зертханалық кешеніндегі «Пеш-термостат» модулінде орындалады.

1. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «Объект»-ін пешпен қосқыш (разъем) арқылы жалғаңыздар.

2. Жылулық контакты болу үшін пештің үстіне 2–3 тамшы глицерин тамызыңыздар (4-сурет) және термостаттың пешіне бос тигельді қойыңыздар. Тигельге жылуоқшауланған қабықты (кожух) кигізіңіздер. Серіппесі бар білікпен тигельді бекітіп қойыңыздар (2-сурет).

3. "=0/~" тумблерден айнаымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайын қосыңыздар.



1-сурет. ЛКТ-3
зертханалық кешен



2-сурет. Тигель мен



3-сурет. Тығын
жылу оқшауланған қаңқа

4. «Г1» термостат реттегішін максимал 120°C -қа және Д2 датчик қосқышына тығынды бекітіп қойыңыздар (3-сурет).

5. Қыздырғыштағы кернеуді өлшеу үшін ИСТ-4 панелінде ВХ2-дағы кернеу желісіне ұшы қызыл және қара қосқыш өткізгіш сымды “Н1” және “Н2” пештегі ұяшықтарға

жалғаныздар, бұл қыздырғышта бөлінетін қуатты дәл анықтау үшін қажет. «Сеть» және «Вкл» қосқыштарын жоғары көтеріңіздер.

6. Пешке 5–6 Вт кернеу берген соң, I_0 ток пен U_0 кернеуді өлшеп, пешті қыздырған кездегі

$$R=U_0/I_0$$

кедергіні анықтаңыздар (мысалы, пеш кедергісін анықтау үшін: $U=5\text{В}$, $I=0.456\text{А}$, $R=11\text{Ом}$).

7. Тізбек кедергісі R белгілі болса, кернеуді (U_H) алдын ала беріп, қыздыру қуатын

$$P=U^2/R$$

табыңыздар. Сонымен қатар I_{H1} және I_{H2} өлшеңіздер. Бірінші қыздыруды $P_1 = 20\text{Вт}$ қуат кезінде жүргізсек, онда $U_{H1} = \sqrt{20 \cdot R}$ тең. Ол шамамен $U_{H1} = 14\text{--}15\text{В}$ болады. Екінші қыздыруды $P_2 = 30\text{Вт}$ қуатта жүргізсек, онда $U_{H2} = \sqrt{30 \cdot R}$ тең және шамамен $U_{H2} = 17\text{--}18\text{В}$ болады. Мұндағы P_1 және P_2 (4) өрнек арқылы анықталатын жұмсалған қуаттар.

8. Қыздыру қуатын $P_1 = 20\text{Вт}$ -қа сәйкес етіп, аралығы 20^0 -тан пеш температурасының уақытқа тәуелділігін өлшеңіздер, ол үшін 7.п. көрсетілген U_{H1} кернеуді қыздырғышқа қосу керек. Токтың мәнін I_{H1} өлшеп алыңыздар. Тәжірибе нәтижелерін 1 - кестеге жазыңыздар.

9. Пешті екінші қыздыруға дайындау үшін желдеткішті қосып, пешті суытыңыздар.

10. Пешті қыздыру үшін U_{H2} кернеу беріңіздер, бұл кездегі қуат $P_2 \sim 30\text{Вт}$. 8 пункттегі өлшеуді қайталаңыздар: секундомерді қосыңыздар, пеш температурасы берілген мәнге жеткендегі t_2 уақыт моменттерін анықтап отырыңыздар. Токтың I_{H2} мәнін анықтаңыз. Өлшеу нәтижелерін 1-кестеге жазыңыздар.

1-кесте

Бос тигелі бар пеш параметрлерін анықтау
 $P_1 \approx 20 \text{ Вт}$, $P_2 \approx 30 \text{ Вт}$, $T_{\text{бөлме}}$ - бөлме температурасы

$t^\circ\text{C}$	t_1 с	t_2 с	U_{H1} В	I_{H1} А	P_1 Вт	U_{H2} В	I_{H2} А	P_2 Вт	Δt_1 с	Δt_2 с	P' Вт	C_0 Дж/К	η %
$T_{\text{бөл}}$	0	0											
40									xx	xx	xx	xxxx	xxx
60													
80													
100													

11. (10) және (11) өрнектер арқылы пештің жылу-сыйымдылығын және пайдасыз қуаттың шығынын есептеңіздер. Ол мына өрнекпен анықталады: $P_1 = I_{H1} U_{H1}$, $P_2 = I_{H2} U_{H2}$. Нәтижелерді кестеге жазыңдар. P' қуаттың шығыны мен C_0 жүйенің жылу-сыйымдылығы температураға тәуелді айнымалы шамалар екеніне назар аударыңыздар.

12 Жоғарыдағы (7) және (8) өрнектер арқылы жүйенің П.Ә.К. анықтаңыздар. Нәтижелерді кестеге жазыңыздар.

Бұл жұмыста $P_{\text{жұм}}$ – P_1 бірінші қыздырудағы немесе P_2 екінші қыздырудағы қуат.

Қуаттың шығыны пештің үстіне қойып, қыздырған заттың пішініне байланысты, сондықтан алынған C_0 мен P' мәндерін осыған ұқсас тәжірибе нұсқаларына пайдалануға болады.

2.3. Термотұрақтандыру әдiсi

Бұл әдiсте пеш температурасы тұрақты болған кездегi қуаттың шығыны тiкелей өлшенедi. Тәжiрибенi жүргiзу 2.1 бөлiмдегiдей.

1. 2.1 – бөлiмнiң 1–5 пункттерiн қайталаңыздар.

2. $P \approx 20$ Вт қуат болатындай $U_H = \sqrt{20 \cdot R}$ кернеу берiңiздер.

Ол шамамен $U_{H1} = 14-15$ В болады.

3. «Т1» реттегiшпен пешке $t_1=40^\circ\text{C}$ температура берiп, аралығы 20^0 -тан пеш температурасының уақытқа тәуелдiлiгiн өлшеңiздер. Пеш температурасы тұрақтанып (қызыл және жасыл индикаторлар жануы керек) жылуоқшаулану кезiнде температура таралуы үшiн 1 минут күтiп тұру керек, сонан соң t_1 температурасындағы термотұрақтандыру жүйесiнде U_{H1} кернеу мен I_{H1} токтың мәнiн өлшеңiздер. Температураның кейiнгi мәнiне өтiңiз. «Т1» реттегiшпен (регулятор) пешке 60°C , 80°C және 100°C температурларды кезекпен-кезек берiңiздер. Нәтижелердi 2-кестеге жазыңыздар.

4. Қыздырғыштың қуатын анықтаңыздар, бұл $P'_1 = I_{H1} U_{H1}$ өрнегiмен анықталады. Бұл режимдегi қыздырғыштың қуаты – қуаттың шығынына тең.

2-кесте

Бос тигелдiң өздiгiнен және желдеткiш көмегiмен суытудағы қуаттың шығынын анықтау

$t_1, ^\circ\text{C}$	$U_{H1}, \text{В}$	$I_{H1}, \text{А}$	$P'_1, \text{Вт}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$U_{H2}, \text{В}$	$I_{H2}, \text{А}$	$P'_2, \text{Вт}$	dP'/dt Вт/К
40								
60								
80								
100								

5. Желдеткішті қосып пешті суытыңыздар (ол 0,5–2 градусқа дейін сууы керек), сонан соң t_2 жаңа температураға жеткенге дейін тосыңыздар. 1–4 пункттерді қайталаңыздар. Сонан соң t_2 температурада термотұрақтандыру жүйесі кезіндегі U_{H2} кернеу мен I_{H2} токтың мәнін өлшеңіздер. Температураның кейінгі мәніне өтіңіздер. «Т1» реттегішпен (регулятор) пешке 60°C, 80°C және 100°C температураларды кезекпен беріңіздер. Осы температурада қыздырғыштың қуатын анықтаңыздар, бұл $P_2' = I_{H2} U_{H2}$ өрнегімен анықталады. Бұл режимдегі қыздырғыштың қуаты – қуаттың шығынына тең. Нәтижелерді 2 кестеге жазыңыздар.

6. 2.1 – бөлімдегі қуаттың шығыны мен 2.2 – бөлімдегі пешті өздігінен және желдеткіш көмегімен суытудағы қуат шығындарының температураға тәуелділік графигін кескіндеңіздер.

СУДЫҢ МЕНШІКТІ БУЛАНУ ЖЫЛУЫ МЕН МЕНШІКТІ ЖЫЛУСЫЙЫМДЫЛЫҒЫН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: қайнау кезіндегі судың меншікті булану жылуын және судың меншікті жылусыйымдылығын анықтау.

Құралдар мен жабдықтар: ЛКТ–3 зертханалық кешені, ИСТ–4 термостаттың өлшеу жүйесі, «Пеш-термостат» функционалды модулі, тығын, стақан, жылудан оқшауланған қаңқа, пеш, желдеткіш, температура датчиктері, қосқыш (разъем), секундомер.

1. Теориялық кіріспе

1.1. Жылусыйымдылық

Дененің жылусыйымдылығы – деп оның температурасын 1К өзгерту үшін жұмсалатын жылу мөлшеріне тең шаманы

айтады. Анықтамаға сәйкес жылусыйымдылық термодинамикалық шама ретінде мынадай тендеумен өрнектеледі:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right) = \frac{\delta Q}{dT}, \quad (1)$$

мұндағы δQ – жүйеге берілген және оның температурасын dT шамаға өзгертетін жылу мөлшері.

$\Delta Q/\Delta T$ қатынасы орташа жылусыйымдылық, ал $\delta Q/dT$ – лездік жылусыйымдылық деп аталады.

Мұндағы δQ күй функциясының толық дифференциалы бола алмайды, ол процеске, яғни жылу өтетін жолға тәуелді болады, демек жылусыйымдылық да жүйенің екі күйінің арасындағы өту жолына тәуелді.

Дененің меншікті жылусыйымдылығы – деп оның бірлік массасының температурасын 1К көтеру үшін керекті δQ жылу мөлшеріне тең шаманы айтады.

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (2)$$

Мольдік жылусыйымдылық бір моль заттың температурасын 1К көтеру үшін керекті жылу мөлшеріне тең δQ шаманы айтады.

$$C = \frac{\delta Q}{v dT} = c \cdot M, \quad (3)$$

мұндағы $v = m/M$ – заттың моль саны, M – заттың бір молінің массасы, m – заттың массасы.

Жылусыйымдылықтар үш түрде анықталады: дененің жылусыйымдылығы [Дж/К], меншікті жылусыйымдылық [Дж/(кг·К)] және мольдік жылусыйымдылық [Дж/(моль·К)]. Төменде келтірілген барлық өрнектерде жылусыйымдылықтың мольдік шамасы қолданылған.

Термодинамиканың 1-ші бастамасынан ($\delta Q = dU + p dV$), газ көлемі тұрақты болғанда ($V = \text{const}$) оның ішкі энергиясын белгілі шамаға өзгертуге жұмсалатын $(\delta Q)_V$ жылу мөлшері

қысым тұрақты болған жағдайда ($P=\text{const}$) қажет (δQ) жылу мөлшерінен аз екені байқалады:

$$(\delta Q)_v = dU,$$

$$(\delta Q)_p = dU + pdV.$$

1 моль газдың температурасын dT шамаға арттыруға керек болатын жылу шамасы:

$$\delta Q = C dT,$$

мұндағы C – мольдік жылусыйымдылық, $C=vc$, мұндағы c – меншікті жылусыйымдылық, v – заттың молярлық мөлшері.

Жылусыйымдылық әртүрлі шарттарға сәйкес төмендегідей есептеледі:

а) тұрақты көлем кезінде:

$$C_v = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_v = \left(\frac{dU}{dT} \right)_v; \quad (4)$$

б) тұрақты қысым кезінде:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \left(\frac{dU}{dT} \right)_p + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p; \quad (5)$$

в) тұрақты температура кезінде (изотермдік процесс $T=\text{const}$, $dT=0$):

$$C_T = \infty; \quad (6)$$

г) адиабаттық процесс кезінде (сыртқы ортамен жылу алмасусыз өтетін процесс, яғни $dQ=0$):

$$C_{\text{ад}} = 0. \quad (7)$$

Тұрақты қысым кезіндегі жылусыйымдылықтың тұрақты көлем кезіндегі жылусыйымдылыққа қатынасы термодинамикада үлкен рөл атқарады. Ол гректің γ әріпімен белгіленеді:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} . \quad (8)$$

Бұл қатынас адиабаттық процесс өрнектерінде жиі қолданылады.

1.2. Майер теңдеуі

C_v мен C_p арасындағы байланысты анықтайық.

Газдың бір молі үшін $pV = RT$, бұл өрнектен $p\left(\frac{dV}{dT}\right)_p = R$ тең екені анықталады. Сондықтан (4), (5) формулалардан, соңғы қатысты ескерсек, мынадай нәтиже аламыз:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT}\right)_p = \left(\frac{dU}{dT}\right)_p + p\left(\frac{dV}{dT}\right)_p = C_v + R$$

$$C_p = C_v + R . \quad (9)$$

Бұл өрнек Майер теңдеуі деп аталады. Газдың универсал тұрақтысы R -дің физикалық мағынасы: 1 моль газдың температурасын 1К арттырған кезде жасалатын жұмысқа тең шама.

1.3. Бір атомды газдың жылусыйымдылығы

Молекула-кинетикалық теориядан ілгерімелі қозғалыстың $\bar{\varepsilon}$ орташа кинетикалық энергиясы мен T абсолют температурасы арасындағы қатынас туындайды:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT \quad (10)$$

мұндағы k – Больцман тұрақтысы.

Бір атомды идеал газдың бір молінің ішкі энергиясы N_A Авогадро санын бір молекуланың орташа энергиясына көбейткенге тең болады:

$$U = \frac{3}{2} k N_A T = \frac{3}{2} R T. \quad (11)$$

Температура ΔT -ға өзгергенде ішкі энергияның өзгеруі:

$$\Delta U = \frac{3}{2} R \Delta T = C_V T \quad (12)$$

ΔU мен ΔT арасындағы пропорционалдық коэффициент көлем тұрақты болған жағдайдағы жылусыйымдылыққа тең:

$$C_V = \frac{3}{2} R = 12,47 \text{ Дж} / \text{моль} \cdot \text{К}. \quad (13)$$

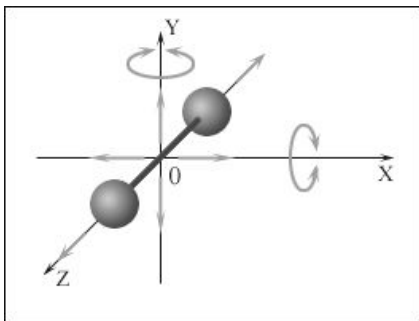
$$\text{Демек,} \quad C_P = \frac{3}{2} R + R = \frac{5}{2} R. \quad (14)$$

Бұл қатыс бір атомды молекуладан тұратын газдар үшін (гелий, неон, аргон) тәжірибе жүзінде дәлелденген. Бірақ, екі атомды (оттегі, азот) және көп атомды (көмірқышқыл газ) газдар үшін бұл қатыс тәжірибе нәтижелерімен үйлеспейді. Мұндай үйлеспеушілік, екі және көп атомды газдардың орташа кинетикалық энергиясын есептеу үшін тек ілгерімелі қозғалыс энергиясын ғана емес, молекуланың тербелмелі және айналмалы қозғалыс энергияларын да есепке алуы керек екендігін көрсетеді.

1.4. Көп атомды газдардың жылусыйымдылығы

Екі атомды газдың моделін 1-суреттен көруге болады. Молекула бес тәуелсіз қозғалыс жасауы мүмкін: X, Y, Z осьтері бойымен үш ілгерімелі қозғалыс пен X және Y осьтерін айнала екі айналмалы қозғалыс. Тәжірибе екі атомның массалар центрі жатқан Z осі бойындағы айналуы өте жоғары температурада ғана қозатынын көрсетеді. Бөлме температурасында Z осіне

сәйкес айналу кинетикалық энергияға айтарлықтай үлес қоспайды.



1-сурет. 2 атомды молекуланың моделі

Сондықтан бір атомды молекула 3 ілгерімелі еркіндік дәрежеге, ал «қатаң» байланыстағы 2 атомды молекула 5 еркіндік дәрежеге ие болады (3 ілгерімелі, 2 айналымды).

Классикалық статистикалық физикада еркіндік дәреже бойынша энергияның тең үлестірілу теоремасы дәлелденеді:

- егер молекулалар жүйесі T температура кезінде жылулық тепе-теңдікте болса, онда орташа кинетикалық энергия барлық еркіндік дәрежелер бойынша тең үлестіріледі немесе бөлінеді және молекуланың ілгерімелі және айналымды қозғалыстарының әрбір еркіндік дәрежесіне $\frac{1}{2}kT$ энергия тура келеді.

Бұл теоремадан газдың молярлық C_p және C_v жылу сыйымдылықтары мен олардың қатынастары γ былай жазылатыны шығады:

$$C_v = \frac{i}{2}R, \quad C_p = C_v + R = \frac{i+2}{2}R, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (15)$$

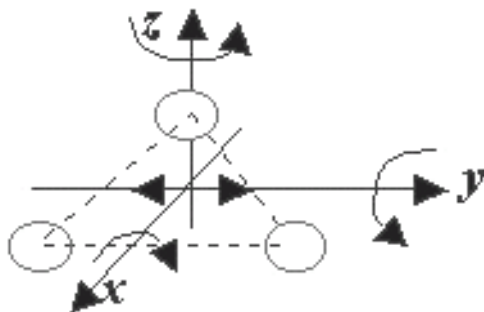
мұндағы i – газдың еркіндік дәрежесінің саны.

Бір атомды молекуладан тұратын газдар үшін $i = 3$, сондықтан:

$$C_V = \frac{3}{2}R, \quad C_P = \frac{5}{2}R, \quad \gamma = \frac{5}{3} = 1,66. \quad (16)$$

Екі атомды молекуладан тұратын газдар үшін $i = 5$ тең.

$$C_V = \frac{5}{2}R, \quad C_P = \frac{7}{2}R, \quad \gamma = \frac{7}{5} = 1,4. \quad (17)$$



2-сурет. 3 атомды молекуланың моделі

Көп атомды молекуладан тұратын газдар үшін:
 $i = 3$ ілгерімелі + 3 айналмалы = 6 .

$$C_V = 3R, \quad C_P = 4R, \quad \gamma = \frac{4}{3} = 1,33. \quad (18)$$

Қалыпты жағдайда көптеген газдардың тәжірибе жүзінде анықталған жылусыйымдылықтары жоғарыда келтірілген өрнектермен жақсы үйлеседі. Бірақ жылусыйымдылықтың классикалық теориясы толығымен қанағаттарлық болып есептелмейді. Теория мен тәжірибенің арасында қарама-қайшылықтың бар екеніне мысалдар көп. Бұл үйлеспеушілік классикалық теория молекуланың ішкі қозғалысымен байланысқан энергияны толығымен есепке ала алмайтындығымен түсіндіріледі.

1.5. Сұйықтық және қатты денелердің жылусыйымдылығы

Еркіндік дәреже бойынша энергияның тең үлестіру теоремасын қатты денедегі бөлшектердің жылулық қозғалысына да қолдануға болады. Кристалдық тор құрамындағы атомдар тепе-теңдік жағдайда тербеліс жасайды. Бұл тербелістердің энергиясы қатты дененің ішкі энергиясы болып табылады. Кристалдық тордағы әрбір атом үш өзара перпендикуляр бағытта тербеледі. Нәтижесінде әрбір атом 3 тербелмелі дәрежеге ие. Гармоникалық тербеліс кезінде орташа кинетикалық энергия орташа потенциалдық энергияға тең. Сондықтан тең үлестіру теоремасына сай әрбір тербелмелі еркіндік дәрежеге орташа энергиядан kT келсе, ал 1 атомға $3kT$ -дан келеді. Қатты дененің 1 молінің ішкі энергиясы мынадай:

$$3N_A kT = 3RT. \quad (19)$$

Сондықтан қатты күйдегі заттың мольдік жылусыйымдылығын мына шамаға тең деп есептеуге болады:

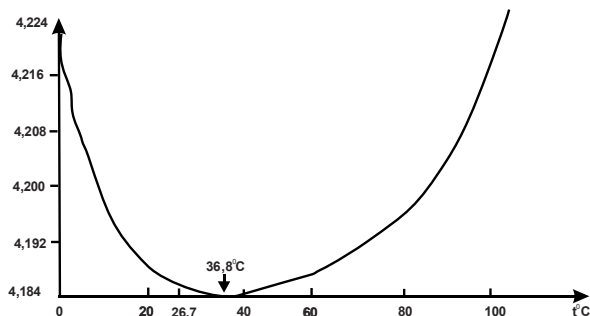
$$C = 3R = 25,12 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}.$$

Бұл қатыс Дюлонг-Пти заңы деп аталады. Қатты денелер көлемінің өзгеруі өте аз шама болғандықтан, олардың тұрақты қысымдағы жылусыйымдылығының тұрақты көлемдегі жылусыйымдылығынан айырмашылығы елеулі болмайды. Тәжірибе көптеген қатты денелердің (химиялық элементтердің) мольдік жылусыйымдылығы бөлме температурасында $3R$ -ге жақын екенін көрсетті.

Бірақ төменгі температураларда теория мен тәжірибенің арасында біраз айырмашылық бар екені байқалды. Бұл еркіндік дәреже бойынша энергияның тең үлестіру гипотезасының жуық екенін білдіреді. Тәжірибеде анықталған жылусыйымдылықтың температураға тәуелділігі тек кванттық тұрғыда ғана түсіндіріледі.

1.6. Судың жылусыйымдылығы

Судың жылусыйымдылығы басқа заттармен салыстырғанда 5–30 есе жоғары (тек сутегі мен аммиактың жылусыйымдылығы судың жылусыйымдылығынан жоғары). Сынап және сұйықтық судан басқа барлық денелерінің меншікті жылусыйымдылықтары температура өскен сайын артады. Судың меншікті жылусыйымдылығы 0°C -тан 37°C температура интервалында төмендейді, сонан соң арта бастайды (3-сурет). Сондықтан судың жылусыйымдылығы 37°C шамасында минимал мәнге жетеді. Бұл адам денесінің қалыпты температурасы болып табылады. $36,6\text{--}37^{\circ}\text{C}$ температурада адам организмінде күрделі биохимиялық зат алмасуы интенсивті болады. Сонда осы температура кезінде адам организмі тиімді энергетикалық күйде болады. Судың жоғары меншікті жылусыйымдылығы қыста және жазда, күндіз және түнде күрт төмендеуінен сақтайды. Сондай-ақ, Жердің барлық континенттері гигант реттегішпен, өзіне тән термостатпен – әлемдік мұхит суымен қоршалған.



3-сурет. Судың жылусыйымдылығының температураға тәуелділігі

Сондықтан жазда әлемдік мұхит Жердің қызып кетуіне жол бермейді, ал қыста континентті жылумен тұрақты қамтамасыз етіп отырады.

1.7. Фазалық өту

Фазалық өту – заттың бір фазадан (күйден) екінші фазаға (күйге) өтуі.

Фазалық өтудің бірінші және екінші текті түрлері болады:

- бірінші текті фазалық өтулерде тығыздық, ішкі энергия және басқа термодинамикалық сипаттамалар секірмелі түрде өзгереді, сонымен қатар белгілі бір мөлшердегі жылу (фазалық өту жылуы) жұтылады немесе бөлінеді;

- екінші текті фазалық өтулерде термодинамикалық функциялар үзіліссіз өзгереді, ал жылу бөлінбейді және жұтылмайды.

Бірінші текті фазалық өтуге конденсация, яғни заттың газ тәрізді күйінен сұйықтық күйге ауысу процесі жатады. Конденсация жылу бөлінумен қоса жүреді. Конденсация жылдамдығы сұйықтықтың беті аудан бірлігі арқылы уақыт бірлігінде будан сұйықтыққа өтетін молекулалар санымен анықталады.

Булану – бірінші текті фазалық өту: заттың сұйықтық күйінен газ тәрізді күйіне ауысуы. Жабық ыдыстағы булану тұрақты температурада сұйықтық пен газ тепе-теңдікке ие болғанша созылады. Бұл кездегі қысым қаныққан бу қысымы деп аталады. Сұйықтық жабық ыдыстың жартысына дейін құйылсын делік. Кез-келген температурада сұйықтық ішінде көрші молекулалармен байланыстарын үзе алатын, яғни сұйықтықтан ұшып шығатын энергиясы байланыс энергиясынан артық болатын, молекулалар кездеседі. Сонымен қатар, ыдыс ішінде қалған көлемді алып тұрған буда сұйықтыққа қайтып оралып және кері шыға алмайтын молекулалар да болады. Сондықтан жабық ыдыста әр уақытта екі процесс жүреді: булану және конденсация (будағы молекулалардың сұйықтыққа қайтып түсуі конденсация деп аталады). Сұйықтықтан шыққан молекулалар саны сұйықтыққа қайтып түскен молекулалар санына тең болғанда, сұйықтық пен газ тәрізді фазалар арасында динамикалық тепе-теңдік орнайды. Бұл күйді газ қанығуға жетті деп атайды.

Қаныққан бу қысымы температураға тәуелді: температура жоғарылаған сайын сұйықтықтан ыршып шығатын молекулалар энергиясы жоғары болады, нәтижесінде қаныққан бу тығыздығы артады.

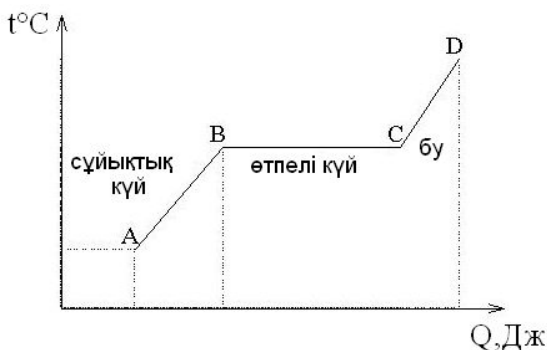
Бу қысымы оның температурасы мен тығыздығына пропорционал екендігі белгілі, яғни қаныққан бу қысымы температура жоғарылаған сайын артады және ол көлемге тәуелді емес. Бұл берілген (фиксированный) температурада жабық ыдыс ішінде орналасқан бір-бірімен теңескен сұйықтық пен будан тұратын қаныққан жүйеде бу қысымы сұйықтық пен будың салыстырмалы мөлшеріне тәуелді емес екендігін білдіреді.

Егер тұрақты температурада ыдыс көлемін ұлғайтсақ, сұйықтықтың біраз бөлігі қосымша буланады: егер ыдыс көлемін кішірейтсек, будың біраз бөлігі конденсацияланады, бірақ қандай болғанда да, қаныққан бу қысымы өзгермейді.

Нақты жағдайларда сұйықтықтар ашық ыдыста қыздырылады, яғни оларға сыртқы қысым әсер етеді. Егер қаныққан бу қысымы осы температурада сыртқы қысымнан кіші болса, онда сұйықтық ішінде пайда болған көпіршіктер сұйықтық бетіне жете алмайды және жарылады. Температура жоғарылаған сайын қаныққан бу қысымы ішкі қысымға тең болып, қайнау температурасына жетеді. Бұл жағдайда газ көпіршіктері сұйықтық түбінен оның бетіне жетеді де, сұйықтық қайнай бастайды. Сұйықтықты қыздыруды жалғастырсақ, ол буға түгелімен айнамайынша температурасын өзгертпейді (4-сурет). Барлық энергия молекулалар арасындағы байланысты үзуге және оларды газ күйіне айналдыруға (қайнау температурасының өзгермеуінде) кетеді. Сондықтан берілген (фиксированный) температура кезінде сұйықтықтың барлық көлемінің булануын қайнау (қайнау температурасында) деп атайды. Буға айналуының өзгешелігі, ол кез келген температурада тек беттен басталады.

Егер сұйықтықты суытатын болсақ, айтылған процестердің бәрі суыту кезінде кері ретте жүреді.

Алдымен газ төмен температурада суынады, бұл процесс конденсациялану нүктесіне (температурасына) жетпейінше болады, сосын сұйылу басталады.



4-сурет. Сұйықтық-бу фазалық өту кезіндегі температуралық тәуелділік

Конденсация кезінде молекулалар арасындағы өзара тартылыс күштері жоғарыдан жылулық энергияны тарта бастағаннан, газ сұйықтыққа айнала бастайды – «конденсацияланады». Бұл кезде сұйықтық – газ жүйесінің температурасы өзгермейді.

Осы кезде меншікті жылу конденсациясы деп аталатын жылу бөлінеді, ол дәлме-дәл жасырын меншікті булану жылуына тең. Яғни, белгілі сұйықтық массасын буландыруға жұмсаған энергия қанша болса, сонша бу өз энергиясын конденсация кезінде кері сұйықтыққа жылу түрінде береді.

Егер меншікті булану жылуын r , буланған сұйықтық массасын m , булануға кеткен жылу мөлшерін Q деп белгілесек, онда:

$$Q = r \cdot m. \quad (19)$$

2. Тәжірибелік қондырғы

Жұмыс ЛКТ–3 зертханалық кешенінің "Пеш-термостат" модулінде орындалады. Тәжірибелік қондырғы төмендегі 5–7-суреттерде көрсетілген.

1 – екі қабатты қаңқада орналасқан ЛКТ–3 зертханалық кешен, 2 – ИСТ–4 термостаттың өлшеу жүйесі, 3 – құралдар блогы, 4 – "Пеш-термостат" функционалды модулі.

2.1. Судың булану жылуы мен жылусыйымдылығын анықтау

1. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «ОБЪЕКТ»-тісімен пешті қосқыш арқылы (разъем) жалғаңыздар.

2. "=/0/~" тумблерден айнаымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайына қосыңыздар.

3. Д2 датчик қосқышына (разъем) тығынды бекітіңіздер. «Т1» термостат реттегішін максимал (120°C) температураға қойыңыздар.

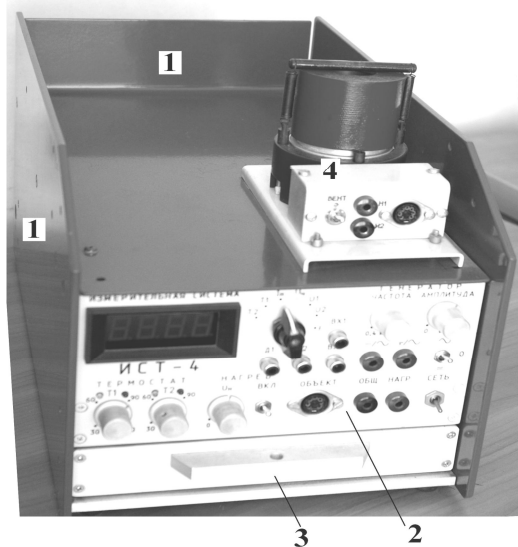
4. Қыздырғыштағы кернеуді өлшеу үшін ИСТ-4 панелінде ВХ1-дағы кернеу желісіне ұшы қызыл және қара қосқыш өткізгіш сымды “Н1” және “Н2” пештегі ұяшықтарға жалғаңыздар, бұл қыздырғышта бөлінетін қуатты дәл анықтау үшін қажет.

5. "Сеть" және "вкл" тумблерлерін жоғарғы жағдайға келтіріңіздер.

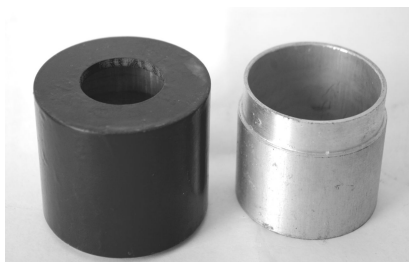
6. Мензурканың көмегімен $V_1=30-40$ мл суды өлшеңіздер. Оны тигельге құйыңыздар. Жылулық контакты болу үшін пештің үстіне 2–3 тамшы глицерин тамызыңыздар және суы бар тигельді пештің үстіне қойыңыздар. Жылудан қорғайтын қаңқаны тигельге кигізіңіздер (6-сурет) Серіппесі бар білікпен тигельді бекітіп қойыңыздар.

7. «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» атты жұмыстың нәтижелерін пайдаланып, $P=30-40$ Вт-тан 100°C-қа дейін $P \approx 35$ Вт тұрақты қуатта қыздырыңыздар. Ол үшін $U_H = \sqrt{35 \cdot R}$ (немесе $U_H = \sqrt{40 \cdot R}$) қыздыру кернеуін беріңіздер, мұндағы R – «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысынан алынған пеш кедергісі.

8. Суды қыздырғандағы уақытқа байланысты температураны өлшеңіздер. Ол үшін 20 градустағы жүйе температурасының қаншалықты өскенін қадағалап отырыңыздар. Тәжірибе нәтижелерін кестеге жазыңыздар. Әрбір температура интервалы үшін қыздырғандағы U_H қоректену кернеуі, I_H қоректену тогының мәндерін және t – берілген температураға жету уақытын кестеге жазып отырыңыздар.



5-сурет. ЛКТ-3 зертханалық кешен



6-сурет. Тигель мен жылуоқшауланған қаңқа



7-сурет. Тығын мен стакан



9. Су қайнау температурасына жеткенде, $t_{\text{қай}}=20$ минут қайната тұрыңыздар. Мензурканың көмегімен қалған судың көлемін өлшеңіздер. Сосын қайнаған судың Δm массасын мына өрнекпен анықтаңыздар:

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V = \rho(V_1 - V_2),$$

мұндағы V_1 – судың қайнағанға дейінгі алғашқы көлемі,
 V_2 – қалған судың көлемі, ΔV – қайнаған судың көлемі, $\rho=1,0 \text{ г/см}^3$
 – судың тығыздығы.

1-кесте

Судың булану жылуы және жылусыйымдылығын анықтау

Осы тәжірибеде өлшенеді				«Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысынан алынған параметрлер		Есептеу нәтижелері		
T° С	t, мин-с	U _н , В	I _н , мА	C ₀ , Дж/К	P', Вт	C, Дж/К	C _{су} , Дж/К	c _{су} , Дж/ К·кг.
40								
60								
80								
100	Қайнаудың басы (басталуы)							
100	Қайнаудың аяғы (аяқталуы)							

10. Су құйылған тигельдің C жылусыйымдылығын анықтаңыздар:

$$C = (U_H \cdot I_H - P') \Delta t / \Delta T, \quad (20)$$

мұндағы Δt – суы бар тигельді ΔT градус қыздыруға кеткен уақыт интервалы, P' – әрбір температура интервалы үшін «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысынан анықталған қуаттың шығыны.

Тигель мен тигельге құйылған суы бар пештің жылусыйымдылығын анықтаңыздар:

$$C = (U_H I_H \cdot - P') \Delta t / \Delta T,$$

мұндағы Δt – суы бар тигельді ΔT градус қыздыруға кеткен уақыт интервалы, P' – әрбір температура интервалы үшін «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысынан анықталған қуаттың шығыны.

11. Судың C_{cy} жылусыйымдылығын анықтаңыздар:

$$C_{cy} = C - C_0, \quad (21)$$

мұндағы C_0 – әрбір температура интервалы үшін «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысынан анықталған тигелі бар пештің жылусыйымдылығы.

12. Судың c_c меншікті жылусыйымдылығын анықтаңыздар:

$$c_c = C_{cy} / m_1 = C_{cy} / \rho V_1 \quad (22)$$

13. Қайнау кезіндегі судың r булану жылуын анықтаңыздар:

$$r = (U_H I_H - P') \Delta t_{\text{кай}} / \Delta m, \quad (23)$$

мұндағы $\Delta t_{\text{кай}}$ – судың қайнау уақыты (~20 минут), P' – 100°C -тағы қуаттың шығыны.

14. c_c және r тәжірибе нәтижелерін кестелік мәнмен салыстырыңыздар. Кестелік мән: $c_{cy} = 4,24 \text{ Дж}/(\text{г}\cdot\text{K})$.

МЕТАЛДАРДЫҢ ЖЫЛУСЫЙЫМДЫЛЫҒЫН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: жылусыйымдылық теориясын игеру, металдардың меншікті жылусыйымдылығын анықтау (алюминий, болат, жез).

Құралдар мен жабдықтар: ЛКТ-3 зертханалық кешен, ИСТ-4 термостаттың өлшеу жүйесі, "Пеш-термостат" функционалдық модуль, тығын, жылуоқшауланған қаңқа, пеш, желдеткіш, температура датчиктері, қосқыш (разъем), секундомер.

1. Теориялық кіріспе

1.1. Жылусыйымдылық

Дененің *жылусыйымдылығы* деп оның температурасын 1К өзгерту үшін жұмсалатын жылу мөлшеріне тең шаманы айтады:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, \quad (1)$$

мұндағы δQ – денеге берілген жылу мөлшері, dT – дене температурасының өзгеруі.

Заттың бірлік массасының жылусыйымдылығы меншікті жылусыйымдылық деп аталады:

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (2)$$

Заттың бірлік молінің жылусыйымдылығы мольдік жылусыйымдылық деп аталады:

$$C_M = \frac{\delta Q}{\nu dT}, \quad (3)$$

мұндағы $\nu = m / M$ – моль саны, m – заттың массасы, M – мольдік масса.

Заттың жылусыйымдылығы Дж/К-мен, меншікті жылусыйымдылық Дж/кг·К-мен, ал мольдік жылусыйымдылық Дж/моль·К-мен өлшенеді.

Денеге берілген жылу мөлшері процестер түріне байланысты болса, онда дененің жылусыйымдылығы осы процестермен анықталады. Мысалы, газдар үшін $C_p > C_v$ (C_p – қысым тұрақты болғандағы жылусыйымдылық, C_v – көлем тұрақты болғандағы жылусыйымдылық).

Қатты денелерді қыздырған кезде, оның көлемі елеулі өзгере қоймайтындықтан, олардың C_p тұрақты қысымдағы жылусыйымдылығының тұрақты C_v көлемдегі жылусыйымдылығынан айырмашылығы өте аз болады.

1.2. Қатты денелер жылусыйымдылығының классикалық теориясы

Классикалық теорияға сай қатты дене бөлшектері (атомдар, иондар) қатаң тәртіппен орналасады және бір-бірімен әсерлесу күштерімен байланысып, кристалдық тор түйіндерінде тепе-теңдік жағдайда болып, өте аз шамада тербелуі мүмкін. Бұл тербелістердің энергиялары (кинетикалық және потенциалдық) қатты дененің температурасын анықтайтын ішкі энергия болып табылады. Демек, қатты дененің тербелген бөлшектерінің жиынтығын осциллятор ретінде қарастыруға болады. Массасы m бөлшек квазисерпімді күштердің әсерінен гармоникалық тербеліс жасайды (мысалы, серіппеге ілінген жүк).

Қатты денеге берілген жылудың әсері бөлшектің тербеліс энергиясының ұлғаюына алып келеді. Қатты дене бөлшектері бір-бірімен өзара әрекеттесетіндіктен, бөлшектердің тербелісі бір-біріне тәуелді болады. Бірақ жоғарғы температураға жуық температурада шамамен әрбір бөлшектер бір-біріне тәуелсіз тербеледі деп есептеуге болады.

Жалпы алғанда кристалдық тор түйіндеріндегі бөлшектердің тербелісі әртүрлі бағытта жүреді, бірақ кез келген тербелісті өзара перпендикуляр бағыттағы үш құраушыға жіктеуге болады. Сондықтан қатты денедегі әрбір бөлшектің үш тербелмелі еркіндік дәрежесі бар (үш өлшемді классикалық гармоникалық осциллятор).

Қатты денелердің жылусыйымдылығын классикалық теория негізінде анықтауда еркіндік дәрежелер бойынша энергияның тең үлестірілу заңы жатыр, яғни тербелмелі қозғалыстың бір еркіндік дәрежесіне келетін орташа энергия мынадай өрнекпен сипатталады: $\bar{\varepsilon}_{mol} = kT$ ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – Больцман тұрақтысы).

Бір бөлшектің $3kT$ орташа энергиясын мольдегі атомдар N_A (N_A – Авогадро саны) санына көбейтіп, заттың бір молінің ішкі энергиясын табуға болады:

$$U = 3kT \cdot N_A = 3RT, \quad (4)$$

мұндағы $R = k \cdot N_A = 8,314$ Дж/моль · К – газдың универсал тұрақтысы.

Бұдан қатты дененің мольдік жылусыйымдылығы мынадай:

$$C_M = \frac{dU}{dT} = 3R. \quad (5)$$

Бұл өрнектен қатты дененің бір молінің жылусыйымдылығы температураға тәуелсіз тұрақты шама екендігі байқалады.

Тәжірибе жүзінде тағайындаған осы тұжырым Дюлонг және Пти заңы деп аталады. Бұл заң бөлме және одан да жоғарғы температураларда көптеген заттар үшін жуықтаған түрде тәжірибе нәтижелеріне сәйкес орындалады.

Классикалық тұрғыдан металдардың жылусыйымдылығы $3R$ -ден көп болуы керек. Металдардағы өткізгіштік электрондарының ілгерлемелі қозғалысы үш еркіндік дәрежесіне ие, олардың әрбіріне $kT/2$ энергиядан тура келеді.

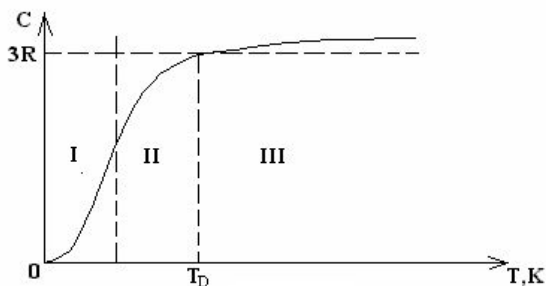
Егер еркін электрондар саны атомдар санына тең болса, онда еркін электрондар өз үлесін металдың ішкі энергиясына қосады $U_3=3kTN_A/2=3RT/2$, осыған байланысты металдың жылусыйымдылығы мына шамаға артар еді: $C_3 = dU_3/dT = 3R/2 = 1/5 R$, яғни оның жылусыйымдылығы 50%-ға өседі.

Шындығында олай емес, өйткені Дюлонг және Пти заңы металдар үшін дұрыс. Бұл қайшылық металдардағы электронды газдың тозғындалғанымен түсіндіріледі (Ферми – Дирактың кванттық статистикасымен сипатталады). Жоғарғы температура аймағында олардың шамалы бөлігі ғана термиялық қозады (1%-тен аз), ал қалған электрондар жылуды жұтпайды. Сондықтан электрондық газдың жылусыйымдылығы кристалдық тордың жылусыйымдылығына қарағанда өте аз ($10^{-2} R$), яғни оның үлесін ескермеуге болады.

Дюлонг және Пти заңы тәжірибе жүзінде бөлме температурасына жақын температураларда тағайындалған. Бірақ, төмен температуралар аймағындағы зерттеулер, барлық қатты дененің жылусыйымдылығы температура төмендегенде кенеттен азайып кететіндігін көрсетті және абсолют нөлге жақын аймақта диэлектрлік кристалдар үшін T^3 -ке пропорционал өзгереді, ал металдар үшін T -ға пропорционал.

Қатты дененің жылусыйымдылығы кенет азаятын күйге сәйкес температураны Дебай температурасы (T_D) деп атайды. Ол температураның мәні әр заттың меншікті сипаттамасы болады. Жылусыйымдылықтың температураға тәуелділігі 1-суретте көрсетілген.

Қатты дененің жылусыйымдылығының классикалық теориясы (соның ішінде Дюлонг және Пти заңы) төменгі температураларда орындалмайтынын тәжірибе нәтижелері көрсетті. Тәжірибе нәтижелері мен теорияның арасындағы қайшылық еркіндік дәреже бойынша энергияның тең үлестіру заңының жуық екенінен және оның төменгі температураларда орындалмайтынынан туады.



1-сурет. Жылуsыйымдылықтың температураға тәуелділігі:
 I – Дебай заңы аймағы; II – өтпелі аймақ; III – Дюлонг және Пти заңының аймағы

1.3. Эйнштейннің жылуsыйымдылық теориясы

Тәжірибеден байқалған қатты дененің жылуsыйымдылығының температураға тәуелділігі (1-сурет) кванттық тұрғыдан түсіндіріледі. Эйнштейн ұсынған модельге сай кристалл N атомдар жүйесінен тұрады, олардың әрбірі кванттық гармоникалық осциллятор болып табылады. Осциллятордың энергиясы $h\nu$ -ге еселі болып, тек дискретті мәндерді ғана қабылдайды, яғни $\varepsilon = nh\nu$, мұндағы $n = 1, 2, 3, \dots$, ν – осциллятор тербелістерінің жиілігі.

Классикалық теорияға карағанда берілген температурада бір өлшемді кванттық осциллятордың орташа энергиясы немесе тербелмелі қозғалыстың бір еркіндік дәрежесіне келетін орташа энергиясы температураға ғана емес ν жиілікке де тәуелді:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (6)$$

Кристалдағы N атомдардың барлығының тербелісі бір-біріне тәуелсіз бірдей ν жиілікпен тербелсе, онда классикалық теория бойынша $3N_A \cdot kT$ мәнінің орнына бір мольдің ішкі энергиясын мына түрде жазуға болады:

$$U = 3N_A \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (7)$$

ал жылусыйымдылық былай есептеледі:

$$C = \frac{dU}{dT} = 3N_A \cdot k \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \cdot \frac{e^{\frac{h\nu}{kT}}}{\left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)^2}. \quad (8)$$

Егер $kT < h\nu$ (бұл жағдай бөлме температурасынан төмен температурада болуы мүмкін) болса, шамамен $e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \cong e^{\frac{h\nu}{kT}}$ деп алуға болады, олай болса (8) өрнектен жылусыйымдылықты мына түрде жазуға болады:

$$C = 3R \cdot \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}}. \quad (9)$$

Егер $T \rightarrow 0$ ұмтылса: $\frac{h\nu}{kT} \rightarrow \infty$ және $e^{-\frac{h\nu}{kT}}$ нөлге дейін,

$\frac{h\nu}{kT}^2$ шексіздікке дейін өсуіне қарағанда, жылдамдық кемиді,

яғни $\left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \cdot e^{-\frac{h\nu}{kT}} \rightarrow 0$ ($e^{-\frac{h\nu}{kT}} \rightarrow 0$ өзгерген болса, $\left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2$ қарағанда жылдамырақ кемиді). Сондықтан $T \rightarrow 0$ кезінде жылусыйымдылық C нөлге ұмтылып, тәжірибе нәтижелеріне сәйкес келеді.

Егер $kT \gg h\nu$ (бұл бөлме температурасынан жоғары температурада болуы мүмкін) болса, онда $e^{\frac{h\nu}{kT}}$ өрнегін қатарға жіктеуге болады:

$$e^{\frac{h\nu}{kT}} = 1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots \quad (10)$$

және бұл жағдайда (8) өрнек былай жазылады:

$$C = 3R \left(\frac{h\nu}{kT} \right)^2 \cdot \frac{1 + \frac{h\nu}{kT}}{\left(1 + \frac{h\nu}{kT} - 1 \right)^2} = 3R \cdot \quad (11)$$

Осылай теориялық жолмен Эйнштейн жылусыйымдылықтың температуралық өзгерісін түсіндіре алды. Бірақ, өте төменгі температуралар аймағындағы тәжірибе нәтижелерінің теориядан айтарлықтай ауытқуы бұл теорияда өз түсініктемесін ала алмады.

1.4. Дебайдың жылусыйымдылық теориясы

Дебай Эйнштейннің негізгі идеяларын сақтап қала отырып, қатты дененің жылусыйымдылығы туралы теорияны түпкілікті дамытты. Ол кристалдағы бөлшектердің жеке тербелістерін сипаттаудан бұрын олардың ұжымдық қозғалысын қарастырды. Дебай кристалдық тордың түйіндеріндегі атомдардың тербелісі бір-біріне тәуелді екендігін ескерді. Бөлшектер арасындағы күшті байланыстың әсерінен олардың бірінің тепе-теңдік жағдайынан ауытқуы көрші бөлшекке беріледі және денеде серпімді толқын түрінде кристалдың бүкіл бөлшектерін қамтитын ұжымдық қозғалыс пайда болады. Сондықтан кристалл $3N$ (N – кристалл түзетін бөлшектер саны) еркіндік дәрежеге ие кеңістіктік-реттелген жүйе болып табылады. Мұндай жүйеде ν_i дискретті жиілігі бар $3N$ типті қарапайым қалыпты тербеліс (немесе мода) деп аталатын тербеліс бар.

Кристалда бір мезгілде бір-біріне тәуелсіз, мейлінше мүмкін болатын қалыпты тербелістер таралады. Егер қатты

денеде тербелiс жиiлiгiнiң бiкiл жиынтығы (спектр) бар десек, онда спектр кейбiр ν_{max} максимал жиiлiкпен шектеледi:

$$\nu_{max} = \frac{\nu_{\phi}}{\lambda_{min}}, \quad (12)$$

мұндағы ν_{ϕ} – серпiмдi толқынның фазалық жылдамдығы, λ_{min} – тор периодымен өлшенетiн минимал толқын ұзындығы.

Дебай бойынша әрбiр серпiмдi толқынның энергиясы тек дискреттi түрде $\pm h\nu$ шамасына өзгередi, яғни оның кванттық сипаттамасы байқалады.

Егер бiр еркiндiк дәрежеге келетiн kT орташа энергия $h\nu_{max}$ максимал энергиядан асса, ($kT > h\nu_{max}$) онда берiлген қатты денеде жиiлiгi кез келген тербелiстер қозуы мүмкiн. Егер $kT \ll h\nu_{max}$ болса, онда жоғарғы жиiлiктi тербелiстер қоза алмайды. Серпiмдi толқындардың кванттық сипаты байқала бастайтын температуралық шекара Дебай температурасы деп аталады және ол мынадай қатынастан анықталады $kT_D = h\nu_{max}$:

$$T_D = \frac{h\nu_{max}}{k}. \quad (13)$$

T_D температурасы қатты дене бөлшектерiнiң арасындағы байланыс күштерiнiң шамасына тәуелдi және оның параметрi болып табылады. 1-кестеде кейбiр заттар үшiн T_D -нiң мәндерi берiлген.

Өте төмен температуралар ($T=0K$ -ге жақын) аймағында негiзiнен энергия кванты $h\nu \ll kT$ шартпен анықталатын жиiлiктерi төмен қалыпты тербелiстер қозады.

1-кесте

Кейбiр заттар үшiн Дебай температурасы

Зат	Pb	Au	Ag	Zn	Al	Fe	Si	C
T_D , K	95	165	225	308	418	467	1160	2000

Бұл жағдайда қалыпты тербелiстердiң орташа энергиясының мәнін мына түрде табуға болады. (6) өрнектiң бөлiмiн (10) өрнектегi бiрөлшемдi кванттық осциллятордың

орташа энергиясын қатарға жіктеп және жіктелудің екі мүшесін ғана аламыз:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \approx \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} \approx kT. \quad (14)$$

Осыған орай, қарастырылып отырған төменгі температуралар аймағында әрбір қалыпты тербелістің орташа энергиясы T -ға пропорционал өсетінін көреміз:

$$\bar{\varepsilon}_m \sim T. \quad (15)$$

Бұл өсу T жоғарылаған сайын қалыпты тербелістердің қозу дәрежесінің артуының салдарынан болады. Сонымен қатар, өте төменгі температура аймағында T -ның жоғарылауы Z саны T^3 пропорционал өсетін жаңа қалыпты тербелістерді және барлық жаңа қозуларды тудырады.

$$Z \sim T^3. \quad (16)$$

Сондықтан да $T=0$ К-ге жақындағанда кристалл энергиясы температура өскен сайын екі механизмнің әсерінен T^4 пропорционал өседі:

$$U_{\text{тор}} \sim T^4, \quad (17)$$

ал жылуsыйымдылық – T^3 -ке пропорционал:

$$C \sim T^3. \quad (18)$$

(18) қатыс өте төменгі температуралар аймағында орындалатын Дебай заңын бейнелейді.

Қатты денелерде Дебай температурасы кезінде v_{max} жиілігі бар тербелістермен қоса қалыпты тербелістердің барлық спектрі қозады. Сондықтан ары қарай температура (T_D жоғары) өскен сайын жаңа қалыпты тербелістер пайда болмайды. Осыған орай, жоғарғы температуралар аймағында ($T > T_D$) қатты дене энергиясының өзгеруі қалыпты тербелістердің қозуынан

болады. Егер $\bar{\varepsilon}_m \sim T$ (бірінші механизм) болса, онда температура артқан сайын заттың ішкі энергиясының өсуі T -ға пропорционал болады:

$$U_{\text{тор}} \sim T, \quad (19)$$

ал жылуsыйымдылық T температураға тәуелді болмауы керек:

$$C = \frac{dU_{\text{тор}}}{dT} = \text{const}. \quad (20)$$

(20) қатынас тәжірибе жүзінде жеткілікті жақсы орындалатын Дюлонг және Пти заңы деп аталады.

Өте төменгі және өте жоғарғы температура аймағының арасында орташа температура деп аталатын Дебай заңынан Дюлонг және Пти заңына өтетін кең аймақ жатыр.

2. Эксперименталдық бөлім

Жұмыс ЛКТ-3 зертханалық кешенінің "Пеш-термостат" модулінде орындалады. Тәжірибе қондырғысы төмендегі 2–3-суреттерде көрсетілген.

1 – екі қабатты қаңқада орналасқан ЛКТ–3 зертханалық кешен, 2 – ИСТ-4 термостаттың өлшеу жүйесі, 3 – құралдар блогы, 4 – "Пеш-термостат" функционалды модулі.

2.1. Пештің C_0 жылуsыйымдылығы мен қуатының P' шығынын анықтау

1. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «ОБЪЕКТ»-тісін пешке қосқыш (разъем) арқылы жалғаңыздар.

2. "=/0/~" тумблерден айнымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайын қосыңыздар.

3. «T1» термостат реттегішін максимал (120°C) температураға қойыңыздар. D2 датчик қосқышына (разъем) тығынды бекітіңіздер.

4. Қыздырғыштағы кернеуді өлшеу үшін ИСТ–4 панелінде VX2-дағы кернеу желісіне ұшы қызыл және қара қосқыш

өткізгіш сымды “Н1” және “Н2” пештегі ұяшықтарға жалғаңыздар, бұл қыздырғышта бөлінетін қуатты дәл анықтау үшін қажет.

5. "Сеть" және "вкл" тумблерлерін жоғарғы жағдайға қойыңыздар.



2-сурет. ЛКТ-3 зертханалық кешен



3-сурет. Тығын

6. Қыздыру пешінің кедергісін біле отырып («Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмыста анықталған), U_H кернеуді алдын ала беріп, кедергіні анықтаған соң қыздыру қуатын $P = U^2/R$ осы теңдікпен анықтаймыз. Бірінші қыздыруды $P_1=12\text{В}$ қуат кезінде жүргізсек, онда $U_{H1} = \sqrt{12 \cdot R}$. Екінші қыздыруды $P_2=20\text{Вт}$ қуатта жүргізсек, онда $U_{H2} = \sqrt{20 \cdot R}$.

7. $P_1=12\text{Вт}$ қыздыру қуаты кезінде қыздырғышқа б.п. есептелген U_{H1} кернеуді беріп, бірінші қыздыруды жүргізіңіздер.

8. 20 градус интервалда пеш температурасының уақытқа тәуелділігін өлшеңіздер. Ол үшін секундомерді қосып, пеш

температурасы берілген мәнге жеткенде t_1 уақытты қадағалаңыздар. U_{H1} мен I_{H1} -нің көрсеткен мәндерін қадағалап отырыңыздар. Әрбір температура интервалындағы қыздыру параметрлерінің нәтижелерін 1-кестеге жазыңыздар: U_{H1} – қыздыру кернеуін, I_H – қыздыру кезіндегі ток күшін, t – уақытты, T – пеш температурасын.

9. Пешті екінші қыздыруға дайындау үшін желдеткішті қосып, пешке салқын үлгіні немесе басқа суық нысанды қойып, пешті суытыңыздар.

10. Пешті екінші рет қыздыру үшін 6.п. есептелген U_{H2} кернеуін беріңіздер, бұл кездегі қуат $P_2 \sim 20\text{Вт}$.

2-кесте

Пеш параметрлерін анықтау $P_1 \approx 12\text{Вт}$, $P_2 \approx 20\text{Вт}$. $t_{\text{бөл}}$ – бөлме температурасы

$t, ^\circ\text{C}$	t_1, c	t_2, c	$U_{H1}, \text{В}$	$I_{H1}, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_{H2}, \text{В}$	$I_{H2}, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$\Delta t_1, \text{c}$	$\Delta t_2, \text{c}$	$P_{\text{бөл}}, \text{Вт}$	$C_0, \text{Дж/К}$
$t_{\text{бөл}}$	0	0							xx	xx	xx	xxxx
40												
60												
80												
100												

11. 8-пункттегі өлшеуді қайталаңыздар: секундомерді қосыңыздар, пеш температурасы берілген мәнге жеткендегі t_2 уақыт моменттерін қайталаңыздар. Қуатты нақты анықтау үшін U_{H1} мен I_{H1} -нің көрсеткен мәндерін жазып отырыңыздар. Тәжірибе нәтижелерін 2-кестеге жазыңыздар.

12. Екі процедурада да Δt° бірдей температура интервалында P' қуаттың шығынын бірдей десек, онда тигелі бар пешті қыздырғандағы пайдалы жылуды былай табуға болады:

$$\begin{aligned} Q_{\text{тол1}} &= (P_1 - P') \cdot \Delta t_1 = C_0 \Delta t^\circ ; \\ Q_{\text{тол2}} &= (P_2 - P') \cdot \Delta t_2 = C_0 \Delta t^\circ , \end{aligned} \quad (21)$$

мұндағы Δt_1 және Δt_2 – бірінші және екінші ретті қыздырудағы уақыт интервалдары, ал Δt° осы кездегі температура интервалы, C_0 – жүйенің жылусыйымдылығы.

(21) теңдеулер жүйесін шешу арқылы, P' қуаттың шығыны мен жүйенің C_0 – жылусыйымдылығын табамыз:

$$P' = \frac{P_1 \cdot \Delta t_1 - P_2 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2} , \quad (22)$$

$$C_0 = \frac{(P_1 - P_2) \cdot \Delta t \cdot \Delta t_2}{(\Delta t_1 - \Delta t_2) \cdot \Delta t^\circ} . \quad (23)$$

$$P_1 = U_{H1} \cdot I_{H1} \approx 12 \text{ Вт}, \quad P_2 = U_{H2} \cdot I_{H2} \approx 20 \text{ Вт}. \quad (24)$$

Есептеу нәтижелерін кестеге жазамыз. P' қуаттың шығыны мен C_0 – жүйенің жылусыйымдылығы температураға тәуелді айнымалы шамалар екенін ескеріңіздер.

2.2. Металдың жылусыйымдылығын анықтау

1. Пешті суытыңыздар. Жылулық контактысы болу үшін пештің үстіне 2–3 тамшы глицерин тамызыңыздар. Жылу оқшауланған қабықты тигельге кигізіңдер. Серіппесі бар білікпен тигельді бекітіп қойыңыздар (4-сурет).

2. 30Вт қуат кезінде үлгіні бөлме температурасынан 100°C -қа дейін қыздырыңыздар. Қыздыруды 30 Вт ($U_H = \sqrt{30 \cdot R}$) қуат

кезінде $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ температураға дейін қыздырыңыздар. Ол үшін пешке $U_H = \sqrt{30 \cdot R}$ қыздыру кернеуін беріңіздер.



4-сурет. Металл үлгілер

3. Үлгі температурасының уақытқа тәуелділігін өлшеңіздер. Ол үшін секундомерді қосыңыздар, пеш температурасы берілген мәнге жеткендегі t_2 уақыт моменттерін қайталаңыздар. Температура бойынша қадам 20 градус. Қуатты нақты анықтау үшін U_H мен I_H -нің көрсеткен мәндерін жазып отырыңыздар. Тәжірибе нәтижелерін 3-кестеге жазыңыздар.

4. Жүйе конфигурациясы «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмысқа өте ұқсас, сондықтан екінші қыздыруды жасамай-ақ, P' қуаттың шығын нәтижелерін сол жұмыстан алуға болады. Тәжірибе нәтижелерін 3-кестеге жазыңыздар.

Металл мен жалпы пештің жылусыйымдылығын есептеу өрнегі мынадай:

$$C = \frac{(U_H \cdot I_H - P')\Delta t}{\Delta T}. \quad (25)$$

P' қуаттың шығын мәнін «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмыстан алыңыздар. Қуаттың шығын мәнінің температураға тәуелділік қисығын тұрғызғанға пайдаланған ыңғайлы.

5. Металл үлгісінің жылусыйымдылығын анықтау:

$$C_l = C - C_o. \quad (26)$$

3-кесте

$P \approx 30$ Вт қыздыру қуаты кезінде металл үлгісінің
жылусыйымдылығын анықтау

T, °C	t ₁ , мин-с	t ₂ , мин-с	Δt_c	U_H , В	I _H , А	P Вт	P', Вт	C, Дж/К
Бөлме	00	00						
40								
60								
80								
100								

6. Металл үлгісінің меншікті жылусыйымдылығын анықтаңыз-дар және оны кестелік нәтижелермен салыстырыңыздар:

$$c=C_l/m, \quad (27)$$

мұндағы m – 4-кестеде мәні берілген үлгі массасы.

7. Егер «Қыздырғыштың пайдалы эрекет коэффициентін анықтау» жұмыс дұрыс шықпаса, онда қуаттың шығынын анықтау үшін 10–12 Вт қуатта осы үлгіні қосымша тағы да қыздыру керек.

Сонда (22) және (23) өрнектер үшін есептеу теңдеулері мынадай:

$$P' = \frac{P_1 \Delta t_1 - P_2 \Delta t_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2}, \quad C = \frac{(P_2 - P_1) \Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{\Delta T (\Delta t_1 - \Delta t_2)}.$$

8. Екі басқа металл үлгілерінің жылусыйымдылығын анықтау үшін 1-8 пункттерді әрбіріне жеке-жеке қайталаңыздар.

4-кесте

Металл үлгілердің массасы

Металл	Алюминий	Жез	Болат
Масса, г	191,3	591,8	564,0

5-кесте

40–60 °C температура интервалындағы металдардың меншікті жылусыйымдылығы

Металл	Алюминий	Болат	Жез
Меншікті жылусыйымдылық, Дж/г·K	0,88	0,46–0,50	$C_{\text{мен}}=0,38$

БОЙЛЬ-МАРИОТТ ЗАҢЫН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ҚОЛДАНУ

Жұмыстың мақсаты: Бойль-Мариотт заңын тәжірибе жүзінде тексеру, осы заңды белгісіз көлемді табуға қолдану.

1. Қысқаша теориялық кіріспе

1.1. Бойль-Мариотт заңы

Бойль-Мариотт заңы – негізгі газ заңдарының бірі. 1662 ж. ирландтық физик, химик және философ Роберт Бойль және Бойльге тәуелсіз 1676 ж. француз физигі Эдма Мариотт ашқан, осы ғалымдардың құрметіне Бойль-Мариотт заңы деп аталған.

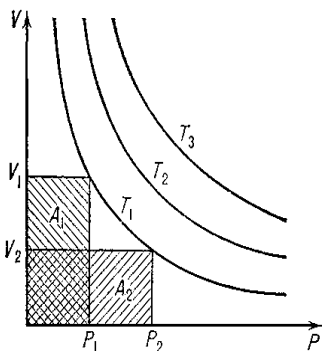
Заң Менделеев-Клапейрон $\frac{pV}{T} = const$ заңының дербес түрі.

Егер $T=const$ болса, онда процесс изотермдік (тұрақты температура кезінде өтетін) болады. Сонда,

$$pV = const \text{ немесе } p_1V_1 = p_2V_2, \quad (1)$$

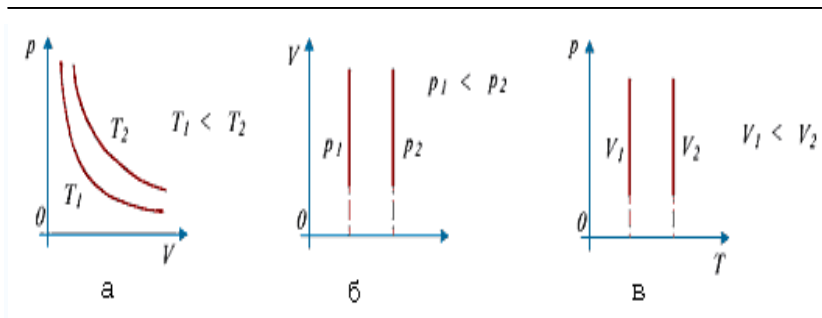
мұндағы p_1, p_2, V_1, V_2 – кезіндегі берілген газ массасының изотермдік процестің басындағы және аяғындағы қысымдары мен көлемдері.

Бойль-Мариотт заңының тұжырымдамасы: температура мен масса тұрақты болса, идеал газдың қысымы мен көлемінің көбейтіндісі тұрақты болады. Бұл заңның графигі 1- суретте көрсетілген.



1-сурет. Тұрақты T температура кезінде массасы берілген идеал газдың p қысымының V көлемге тәуелділігі. $T_3 > T_2 > T_1$

Газ қысымының оның көлеміне тәуелділігі қисық сызық түрінде (гипербола) кескінделеді және ол изотерма («изо»-бірдей, тең) деп аталады. Әртүрлі температураға әртүрлі изотермдер сәйкес келеді. Жоғарғы температураға сәйкес изотерм төменгі температурадағы изотермнен жоғары жатады. T_1, T_2, T_3 изотермдері әртүрлі гиперболалар түріне ие, A_1 мен A_2 аудандары C тұрақтысына тең (1-сурет).



2-сурет. pV , VT , pT координаталарындағы изотермдік процестің графигі

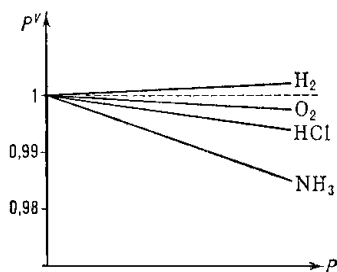
2-суретте Бойль-Мариотт заңы әртүрлі координаталар жүйелерінде кескінделген. Суретке қарағанда, PV координаталарында изотерм гипербола болса, VT , PT - жүйелерінде T температура өсіне перпендикуляр түзу сызық болады.

Бойль-Мариотт заңы газдың кинетикалық теориясынан туындайды және тек идеал газдар үшін орындалады, яғни молекулалар өлшемі олардың арақашықтығымен салыстырғанда әлдеқайда аз және молекулааралық әсерлесу жоқ деп ұйғарылады.

(1) теңдеуге бағынатын газ идеал газ деп аталады. Идеал газ дегеніміз абстракция болып табылады. Кез келген нақты газдың тығыздығы азайған сайын, оның қасиеттері идеал газға жақындай түседі.

Ауа, азот, оттегі секілді кейбір газдар бөлме температурасында және атмосфералық қысым кезінде идеал газға өте жақын болады. Осы жағдайды 3-суреттен байқауға болады.

Әсіресе, гелий мен сутегі газдары өздерінің қасиеттері бойынша идеал газға таяу.



3-сурет. Бойль-Мариотт заңының нақты газдар заңдылықтарынан ауытқуы. Пунктир $pV=C$ сызығына сәйкес

Ал, нақты газдар үшін молекулалар өлшемі мен олардың бір-бірімен әсерлесуін елемеуге болмайды. 2 б,в-суретте көлем – температура (VT) және қысым – температура (pT) координата-сындағы изотермдік процестің графигі көрсетілген. Мұнда изотерма температура осіне перпендикуляр түзу сызық болып табылады.

Сондықтан Бойль-Мариотт заңы жуықталып алынған заң болып табылады. Нақты газ тығыздығы неғұрлым аз болған сайын, яғни неғұрлым көлемі үлкен болған сайын (1) теңдеуге дәлірек бағынады. Бойль-Мариотт заңы температураның онша төмендемей, қысымның онша жоғарыламай тұрған кезінде орындалады.

1.2. Тәжірибені орындау әдісі

Қысымы p_1 газ орналасқан көлемі V_1 ыдысты қысымы p_2 газ толтырылған көлемі V_2 ыдыспен жалғастырсақ, екі көлемдегі газдар араласып, бірдей және тұрақты температура болған жағдайда, Бойль-Мариотт заңын (1) сәйкес ыдыстарда төмендегідей ортақ қысым қалыптастырады:

$$p(V_1 + V_2) = p_1V_1 + p_2V_2$$

немесе

$$p = \frac{p_1V_1 + p_2V_2}{V_1 + V_2}, \quad (2)$$

Осыған сәйкес, мысалы, бірінші ыдыстағы қысым өзгерісі мынаған тең:

$$p - p_1 = \frac{(p_2 - p_1) \cdot V_2}{V_1 + V_2}. \quad (3)$$

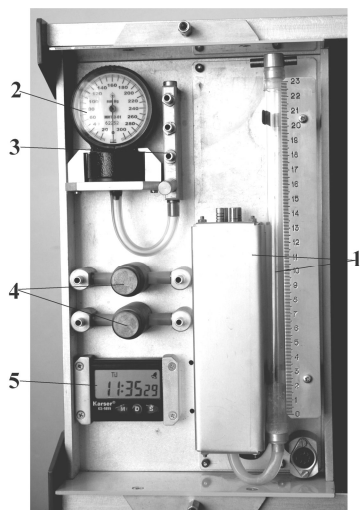
(2) мен (3) қатынастары толық қысым үшін дұрыс, өйткені тәжірибедегі өлшенген қысым атмосфералық қысымнан асып кетеді.

2. Эксперименталдық бөлім

2.1. Керекті блоктармен танысу

Жұмыс көпфункционалды ЛКТ-2 зертханалық кешенінде орындалады. Тәжірибе қондырғысы төмендегі 4-суретте көрсетілген.

"Газ-сұйықтық -№2" және баллондар блогы «Автоклав» модулінен (1), манометрден (2), тармақтардан (разветвитель) (3), штуцері бар краннан (4) және секундомерден (5) тұрады.



4-сурет. "Газ-сұйықтық – №2"
блогы

Кешеннің ішкі жағындағы қабырғаға әрқайсысының көлемі шамамен 1л болатын үш баллондар блогы бекітілген. Блок шығысы (екі баллон біріккен, үшіншісі – жеке тұр) штуцермен алдыңғы беттегі жоғарыда балка каркасына бекітілген және "Б1" және "Б2" белгіленген. Керек кезде баллондарды ұшайыр мен манометрдің көмегімен қиыстыруға болады, мысалы, екі блоктың орнына 3 литрлік бір көлемді баллонды немесе комплект саймандарынан қосымша баллондарды блокқа қолдануға болады.

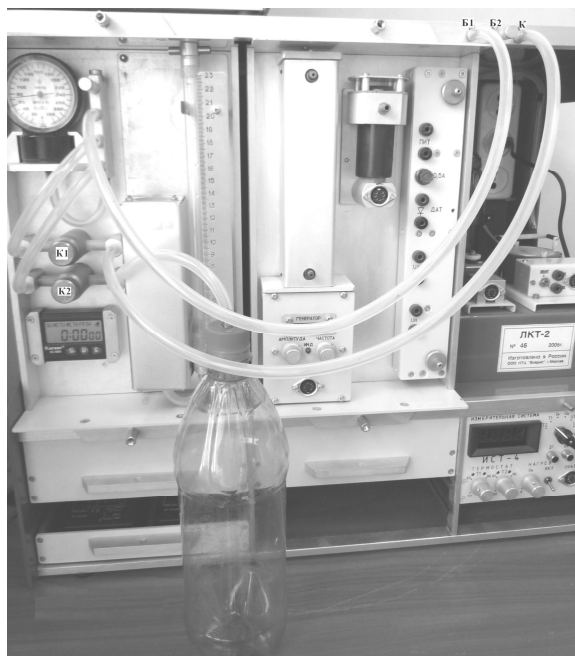
Баллондар параметрі B_1 : 1,05 литр, B_2 : 2,16 литр.

2.2. Бойль – Мариотт заңын тексеру

1. Манометр тармақтарында (разветвитель) 4 шығыс бар. Силикон шлангтардың көмегімен V_1 көлемді ("Б1" және "Б2" баллондардағы ауаның температурасы T_1 бөлме температурасына тең) "Б1" немесе "Б2" баллондар блогын манометр тармағының екінші шығысына, тармақтың үшінші шығысына K1 кранның оң жағындағы ұшын, тармақтың төртінші шығысына K2 кранның оң жағындағы ұшына жалғаңыздар (5-сурет). Манометр тармағының қалған бір шығысын тығынмен тығындап қойыңыздар. Манометр "Б1" немесе "Б2" баллондардағы қысымның 0 мм.сын.бағ. екенін көрсетеді, бірақ баллондағы ауа қысымы атмосфералық қысымға тең. Бұл манометр дәл қысымды емес, атмосфералық қысымнан жоғары қысымды көрсетеді деген сөз.

2. K2 кранның сол жағындағы шығысына V_2 көлемі белгілі қосымша баллонды жалғаңыздар. Бұл баллондағы ауа қысымы p_2 атмосфералық қысымға және T_2 температураға тең (қосымша баллондағы температура бөлме температурасына тең болу үшін баллонды қолмен ұстауға болмайды, тек басынан ұстаған дұрыс).

3. K1 кранның сол жағындағы ұшына силикон шлангының көмегімен компрессорды жалғаңыздар. K1 кранды ашыңыздар, бұл кезде компрессор манометрмен және "Б1" немесе "Б2" баллондар блогымен жалғанады.



5-сурет. Тәжірибе қондырғысы

4. Компрессорды қосыңыздар. К1 ашық кран арқылы ауа "Б1" немесе "Б2" баллондар блогына жіберіледі. "Б1" немесе "Б2" баллондар блогына p_1 қысым 130 мм.сын.бағ. жеткенге дейін ауаны айданыздар, ал $P_2 = 0$. (Ескерту: $P_2 = 0$ болуы, манометр атмосфералық қысымнан жоғары қысымды көрсететінін білдіреді).

5. Компрессорды өшіріп, К1 кранды жабыңыздар. Осы кезде компрессор толығымен жабылады да оған ауа қайта бармайды.

6. К2 кранды ашыңыздар. Сонда "Б1" немесе "Б2" баллондар блогы қысымы p_1 газ орналасқан көлемі V_1 ыдыс пен қысымы p_2 газ толтырылған көлемі V_2 ыдыс жалғастырылады, да P қысым тұрақтанады. 1-2 минуттан кейін тұрақтанған P -ның

көрсеткен мәнін жазып алыңыздар. Осы мән $P_{\text{тәж}}$ қысым болып табылады.

7. Алынған тәжірибе нәтижелерін жоғарыдағы (2) формуламен тексеріңіздер. Ол үшін осы формуламен қысымның теориялық мәнін, 6 пункттен алынған эксперименталды нәтиже мәнімен салыстырыңыздар.

Өлшенген шамалар ретінде атмосфералық қысымнан асқан қысымды қолданыңыздар (сондықтан $P_2 = 0$). V_1 және V_2 мензуркамен өлшенеді немесе қондырғының құжатында берілген мәндер қолданылады.

$V_1 = \text{___ л; } V_2 = \text{___ л; } P_1 = 140 - 200 \text{ мм. сын. бағ.; } P_2 = 0.$

$P_{\text{тәж}} = \text{___ мм. сын. бағ. } P_{\text{теор}} = (p_1 V_1 + p_2 V_2) / (V_1 + V_2) = \text{___ мм. сын. бағ.}$

2.3. Ыдыстың белгісіз көлемін анықтау

Егер V_1 және P_1 , P_2 мен P қысымдары белгілі болса, онда (2) формуламен V_2 табуға болады:

$$V_2 = \frac{V_1(P_1 - P)}{P - P_2}$$

2.2 – бөлімдегі қондырғы (5 - сурет) қолданылады.

1. Осы бөлімдегі 1-6 пунктті қайталаңыздар.
2. (4) формуламен V_2 көлемді есептеңіздер.
3. V_2 көлемді құжаттағы нәтижелермен тексеріңіздер.

$V_1 = \text{___ л; } P_1 = 140 - 200 \text{ мм. сын. бағ.; } P_2 = 0; P = \text{___ мм. сын. бағ}$

$$V_2 = \frac{V_1(P_1 - P)}{P - P_2} = \text{___ л. } V_2 \text{ (құжат бойынша)} = \text{___ л.}$$

2.4. Сусыма (сыпучих) материалдардың "таза" көлемін анықтау

Бұл мәселе ауыл шаруашылық өнімдердің (мысалы, бидай), құрылыс материалдарының (мысалы, гипс) т. б. сусыма материалдардың тығыздығын анықтау үшін өзекті. р тығыздықты анықтау үшін, материал бөлшектерінің арасындағы ауа жолақтарын есепке алмай, материалдардың "таза" көлемін өлшеу керек. Ол үшін тәжірибені екі рет қайталау қажет: алдымен бос ыдыстың V_2 көлемін өлшеп, сосын сусыма материалмен жоғарыға дейін толған ыдыстың V_2' көлемін өлшеңіздер. Материалдың ізделініп отырған көлемі:

$$V = V_2 - V_2' . \quad (5)$$

Таза көлемді анықтау үшін 2.2 – тәжірибедегі қондырғы (5-сурет) қолданылады.

1. Бос ыдысты пайдаланып 2.2 – бөлімдегі 1-6 пунктті қайталаңыздар.

2. Алынған тәжірибе нәтижелерін пайдаланып, (4) формуламен V_2 бос ыдыстың көлемін есептеңіздер.

3. Осы ыдысты сусыма материалмен толтырып, 1-6 пунктті қайталаңыздар.

4. Алынған тәжірибе нәтижелерін пайдаланып, (4) формуламен V_2' сусыма материалмен толған ыдыстың көлемін есептеңіздер.

5. (5) формуланы пайдаланып, сусыма материалдың "таза" көлемін есептеңіздер.

Бос ыдыстың көлемін анықтау

$V_1 = \underline{\hspace{1cm}}$ л; $P_1 = 140 - 200$ мм. сын. бағ.; $P_2 = 0$; $P = \underline{\hspace{1cm}}$ мм. сын. бағ.

$$V_2 = \frac{V_1(P_1 - P)}{P - P_2} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ л.}$$

Сусыма материалмен толған ыдыстың көлемін анықтау

$V_1' = \underline{\hspace{1cm}}$ л; $P_1' = 140 - 200$ мм. сын. бағ.; $P_2 = 0$; $P' = \underline{\hspace{1cm}}$ мм. сын. бағ.

$$V_2' = \frac{V_1(P_1 - P)}{P - P_2} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ л.}$$

Сусыма материалдың "таза" көлемін анықтау

$$V = V_2 - V_2' = \underline{\hspace{1cm}} \text{ л.}$$

2.5. Манометр мен шлангтың "паразит" көлемін анықтау

(2)–(4) өрнектермен есептеулер жүргізгенде нәтиже дәлдігіне манометр мен жүйенің әр бөліктерін қосатын шлангтардың қосынды көлемінің әсері бар. Есептеу нәтижесіне түзету енгізу үшін сол көлемді (арнаулы әдебиетте «паразиттік» деп атайды) анықтау қажет.

Манометр мен шлангтың "паразит" көлемін анықтау үшін, баллондар блогын тармаққа жалғамау керек (сәйкес тармақ шығыстарын тығынмен тығындап қою керек), сонда V_1 -бұл өлшенетін манометр және шлангтың "паразит" көлемі болып табылады. Егер V_1 – аз болса, онда белгілі V_2 көлем де шамалы болады. Тәжірибе соңында манометр шкалаларының шекті диапазонында қысым қалу үшін (20 мм.сын. бағ бастап), К2 кранға кішкентай көлемді баллон жалғанады. V_2 -нің аз мәнін алу үшін, ауқымды көлемді ыдысты суға толтырып және одан мензуркамен 100–150 мл суды төгіп тастайды. Бастапқы қысым манометр шкаласының жоғарғы шекті деңгейінде (240-300 мм.сын.бағ.) қалыптасады немесе қолданылатын компрессор үшін мүмкін максимал қысым. (2) теңдеуден V_1 "паразит" көлемді табамыз.

$$V_1 = \frac{V_2(P - P_2)}{P_1 - P}. \quad (6)$$

1. 2.2 – тәжірибедегі қондырғы (5-сурет) қолданылады, бірақ тәжірибе 2.2 бөлімдегіден өзгешелеу. К1 және К2 крандарды манометрдің тармақтарына жалғаңыздар. Тармақтардың қолданылмайтын шығыстарын тығынмен тығындап қойыңыздар. (Баллондар блогын манометрдің тармақтарына қоспаңыздар!).

2. Манометр тармақтарына К1 мен К2 кранды жалғаңыздар. Тармақтардың басқа екі шығысын тығынмен тығындап қойыңыздар. (Баллондар блогын тармаққа жалғамаңыздар!).

2. К2 кранды жауып, К1 кранды компрессорға жалғаңыздар.

3. Баллондар блогын қолданылатын компрессор үшін мүмкін максимал P_1 қысымға дейін ауамен толтырыңыздар.

4. Ауқымды көлемді ыдысты сумен толтырыңыздар және одан 100-150 мл суды мензуркамен құйып алыңыздар. Құйып алынған су көлемі бұл – V_2 . Бұл баллонды К2 кранмен жалғаңыздар, өйткені мұнда P_2 атмосфералық қысым кезіндегі ауа бар.

5. К2 кранды ашыңыздар. 1–2 минут күтіп, P қысымды жазып алыңыздар.

6. (6) тендеуді пайдаланып, манометр мен шлангтың "паразит" көлемін табыңыздар.

$V_2 =$ _____ мл (мензуркамен өлшенеді).

$P_1 =$ _____ мм. сын. бағ.; $P_2 =$ _____ мм. сын. бағ.; $P =$ _____ мм. сын. бағ.

$$V_1 = \frac{V_2(P - P_2)}{P_1 - P} = \text{_____ мл.}$$

C_p/C_v ҚАТЫНАСЫН ТЕМПЕРАТУРА АУМАҒЫНДА РЕЗОНАНС ӘДІСІМЕН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: әртүрлі температурадағы ауаның дыбыс жылдамдығын акустикалық резонанс әдісімен өлшеу және ауа үшін c_p/c_v анықтау.

Құралдар мен жабдықтар: «Газдардың қасиеті» блогы, ИСТ–4 өлшеу жүйесі, «Резонатор–04» модулі, генератор, қыздырғыш орама, қосқыш (разъем).

1. Теориялық бөлім

1.1. Газдардың жылуsыйымдылығы

Дененің *жылуsыйымдылығы* – деп оның температурасын 1К өзгерту үшін жұмсалатын жылу мөлшеріне тең шаманы айтады. Анықтамаға сәйкес жылуsыйымдылық термодинамикалық шама ретінде мынадай теңдеумен өрнектеледі:

$$C = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T} \right) = \frac{\delta Q}{dT}, \quad (1)$$

мұндағы δQ – жүйеге берілген және оның температурасын dT шамаға өзгертетін жылу мөлшері.

Мұндағы δQ күй функциясының толық дифференциалы бола алмайды, ол тек процеске, яғни жылу өтетін жолға тәуелді болады, демек жылуsыйымдылық та жүйенің екі күйінің арасындағы өту жолына тәуелді. Жылуsыйымдылығы үш түрде анықталады: дененің жылуsыйымдылығы [Дж/·К], меншікті жылуsыйымдылық [Дж/(кг·К)] және молярлық жылуsыйымдылық [Дж/(моль·К)]. Төменде келтірілген барлық өрнектерде жылуsыйымдылықтың молярлық шамасы қолданылған.

Молярлық және меншікті жылуsыйымдылықтардың арасындағы байланыс:

$$C = Mc,$$

мұндағы C – молярлық жылуsыйымдылық, c – меншікті жылуsыйымдылық, M – заттың бір молінің массасы.

Жылуsыйымдылық:

а) тұрақты көлем кезінде:

$$C_V = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V \quad (2)$$

б) тұрақты қысым кезінде:

$$C_p = \left(\frac{\delta Q}{dT} \right)_p = \left(\frac{dU}{dT} \right)_p + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p \quad (3)$$

өрнектерімен есептеледі.

(2) және (3) теңдеулерінен қысым тұрақты болғандағы молярлық C_p жылуsыйымдылығы мен көлем тұрақты болғандағы C_v жылуsыйымдылығын байланыстыратын Майер теңдеуін алуға болады:

$$C_p - C_v = R, \quad (4)$$

мұндағы R – идеал газдың бір молінің температурасын тұрақты қысымда 1К арттырған кезде жасалынатын жұмысқа тең газдың универсал тұрақтысы $R=8,314$ Дж/(моль·К).

Тұрақты қысым кезіндегі жылуsыйымдылықтың тұрақты көлем кезіндегі жылуsыйымдылыққа қатынасы термодинамикада маңызды мағынаға ие. Ол γ әріпімен белгіленеді:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}. \quad (5)$$

Адиабаттық көрсеткіш деп аталатын γ шаманы газ молекулаларының еркіндік дәрежесімен байланыстыруға болады.

Еркіндік дәреже саны i молекуладағы атомдар санымен және олардың арасындағы байланыс сипатымен анықталады. Бір атомды газ үшін $i = 3$; екі атомды газ үшін $i = 5$ (қатаң байланыс), үш атомды газ үшін $i = 6$ (серпімді байланыс); үш және одан да көп атомдарды молекулалар үшін $i = 6$ (қатаң байланыс, сызықсыз молекула).

Сонда C_p , C_v және γ үшін былай жазуға болады:

$$C_V = \frac{i}{2}R, \quad C_p = C_V + R = \frac{i+2}{2}R, \quad \gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (6)$$

Бір атомды молекуладан тұратын газ үшін ($i = 3$)

$$C_V = \frac{3}{2}R, \quad C_p = \frac{5}{2}R, \quad \gamma = \frac{5}{3} = 1,66. \quad (7)$$

Екі атомды молекуладан тұратын газ үшін ($i = 5$)

$$C_V = \frac{5}{2}R, \quad C_p = \frac{7}{2}R, \quad \gamma = \frac{7}{5} = 1,4. \quad (8)$$

Көп атомды молекуладан тұратын газ үшін ($i = 6$)

$$C_V = 3R, \quad C_p = 4R, \quad \gamma = \frac{4}{3} = 1,33. \quad (9)$$

Газ молекулаларының еркіндік дәреже санына ғана тәуелді болатын $\frac{C_p}{C_V}$ қатынасын тікелей анықтайтын әдістер бар.

1.2. Пуассон теңдеуі

$\frac{C_p}{C_V} = \gamma$ қатынасы газдардағы адиабаттық процесті

сипаттайтын Пуассон заңының өрнегіне кіреді:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (10)$$

Сондықтан γ шама *адиабат көрсеткіші* деп аталады. Қоршаған ортамен жылу алмасу болмайтын процесс *адиабаттық процесс* деп аталады.

Осындай процесс жылу өткізбейтін қабырғалармен қоршалған жүйеде өтеді. Мүлдем жылу өткізбейтін қабырғалар болмайтындықтан, нақты процесс адиабаттық процеске жуықтайды. Егер процесс жеткілікті дәрежеде тез өтсе, жүйе қоршаған ортамен жылу алмасып үлгере алмайды, яғни жылу оқшаулану болмаған кезде де, оны адиабаттық процесс деп есептеуге болады (мысалы, газдың тез сығылуы немесе ұлғаюы кезінде).

Адиабаттық процесс кезіндегі термодинамиканың бірінші бастамасы мынадай түрде жазылады ($\delta A = 0$):

$$\delta A = -dU = -C_V dT, \quad (11)$$

яғни адиабаттық ұлғаю кезінде газ ішкі энергия қорының өзгерісі нәтижесінде ғана жұмыс жасайды. Адиабаттық ұлғаю температураның төмендеуімен, ал адиабаттық сығылу температура жоғарылауымен өтеді.

1.3. Ауаның адиабат көрсеткішін дыбыс жылдамдығы бойынша өлшеу әдісі

Сұйықтықтар мен газдар өз пішіндерін үнемі сақтамағандықтан, оларға пішіндік серпімді емес, тек көлемдік серпімділік тән қасиет. Сондықтан ондай орталарда көлденең ұйытқулар байқалмайды, тек бойлық ұйытқу таралады.

Серпімді ортадағы бойлық ұйытқудың таралу жылдамдығы (дыбыс толқындары бойлық толқындарға мысал бола алады) ρ орта тығыздығы мен оның серпімді қасиеттерімен анықталады.

Бойлық толқындарының таралуын, көрнектірек болу үшін қатты ортада қарастырайық (одан зерттеліп отырған құбылыстың физикалық мағынасы өзгермейді).

Қатты біліктегі (стержень) бойлық толқын жылдамдығы мынадай:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (12)$$

мұндағы E – білік материалының серпімділік модулі (Юнг модулі), ρ – білік тығыздығы.

Юнг модулі мына (Гук заңы) өрнекпен анықталады:

$$\sigma = -E \frac{dl}{l}, \quad (13)$$

мұндағы $\sigma = F/S$ – кернеу, яғни білік (стержень) қимасының бірлік ауданына түсірілген күш, ал dl/l – түсірілген кернеу тудыратын стерженнің салыстырмалы ұзаруы.

Газдарда дыбыс толқындарының өтуі кезіндегі салыстырмалы ұзару рөлін көлемнің салыстырмалы өзгеруі dV/V атқарады, ал σ кернеуді толқын өтуі кезінде пайда болатын қысымның өзгерісі бейнелейді. Қысымның өзгеруінен көлем де өзгереді. Осы жағдай газдарда Юнг модулі рөлін атқаратын шаманы табуға көмектеседі.

Серпімді ортада бөлшектердің аз механикалық тербелістерінің таралуы дыбыс (акустикалық) толқындары болып табылады. Газ тектес орталарда дыбыс толқындарының өтуі, газдың жеке бөліктерінің қысымының өзгеруіне алып келетін газдың макроскопиялық көлемдерінің периодтық сығылуы мен сиреуін тудырады.

Дыбыс толқынындағы орта бөліктерінің деформациясын сипаттайтын термодинамикалық заң дыбыс толқындарының v толқын жиілігіне тәуелді.

Инфрадыбыстық аймаққа сәйкес келетін аз жиіліктер кезінде ($v \leq 16 \text{ Гц}$) орта бөлшектерінің тербеліс периоды жеткілікті дәрежеде жоғары, сондықтан газдың сығылуы мен сиреуі баяу өтеді және газдың барлық бөліктері біркелкі температураға ие болады (изотермдік процесс).

Толқын жиілігі жеткілікті дәрежеде жоғары болғанда ($v \gg 16 \text{ Гц}$), ортаның сығылуы мен сиреуі, яғни тығыздық тербелісі онымен байланысқан температура тербелісі тез жүреді және газдың жылуөткізгіштігі аз болатындықтан, осындай процестер үшін жылу алмасу ешқандай рөл атқармайды.

Дыбыс толқындарындағы ауа бөлшектерінің қойылуы мен сұйылуының арасындағы температура айырымы теңесіп үлгере алмайды, сондықтан газдардағы дыбыстың таралуын адиабаттық процесс деп санауға болады. Олай болса, жиіліктері үлкен дыбыс толқындарындағы газ деформациясы адиабаталық процесс болып табылады және Пуассон теңдеуімен сипатталады. Бұл жағдай өз кезегінде γ адиабат көрсеткішінің бойлық дыбыс толқындарының $v_{\text{дыб}}$ таралу жылдамдығына тәуелділігін алуға мүмкіншілік береді.

Пуассон өрнегін (10) дифференциалдайық:

$$v_{\text{дыб}} \gamma \cdot p \cdot V^{\gamma-1} dV + V^{\gamma} dp = 0, \text{ бұдан } \gamma dV/V = - dp/p.$$

Осыдан dp үшін келесі өрнекті аламыз:

$$dp = -\gamma \cdot p \cdot \frac{dV}{V}. \quad (14)$$

(14) – өрнектегі dp , (13) – өрнектегі σ кернеудің рөлін, ал газ көлемінің салыстырмалы dV/V өзгеруі dl/l салыстырмалы ұзару рөлін атқарады, сонда (14) – өрнекті (13) – өрнекпен салыстыра отырып, газдар үшін Юнг модулін табамыз.

$$E = \gamma p. \quad (15)$$

Сондықтан, (12) өрнекке ұқсас, газдардағы дыбыс жылдамдығы мынадай өрнекпен сипатталады:

$$v_{\text{дыб}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p}{\rho}}. \quad (16)$$

Бұл өрнек газдардағы дыбыс жылдамдығы үшін Лаплас өрнегі деп аталады. Идеал газ күйінің теңдеуін пайдаланып, Лаплас өрнегін келесі түрде жазуға болады:

$$v_{\text{дыб}} = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (17)$$

мұндағы $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ – ауаның мольдік массасы, $R = 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$,

Сонымен, егер газдардағы дыбыс жылдамдығын өлшесек, онда γ мәнін де есептеуге болады:

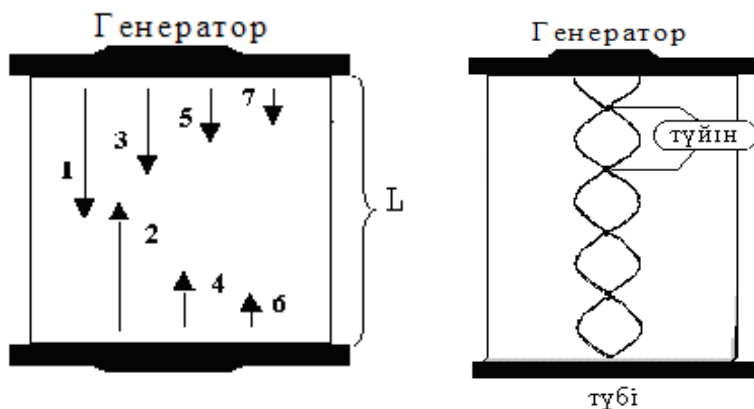
$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{M}{RT} v_{\text{дыб}}^2. \quad (18)$$

Қалыпты жағдайда ауаны екі атомды газ деп қарастыруға болады (құрамындағы азот пен оттегі 96 %). Сондықтан (18) формуламен есептелген тәжірибелік γ шаманы теориялық (8) нәтижемен ($\gamma = 1,4$) салыстырған дұрыс.

1.4. Тәжірибелік қондырғы мен жұмысты өлшеу әдісі

Дыбыс жылдамдығы бойынша жылусыйымдылықтардың γ қатынасын анықтау үшін резонанс әдісі қолданылады. Бұл әдіс бойынша толқынның белгілі ұзындықтарында тіркелінетін дыбыс тербелістері амплитудасының кенеттен күшеюі (резонанс құбылысы) құбырда орналасқан микрофон қабылдаған сигналдың күшеюі түрінде байқалады. Ары қарай жылдамдық дыбыс толқынының белгілі ұзындығы мен жиілігі арқылы анықталады.

Жұмыста дыбыс толқынының көзі құбырдың бір ұшында орналасады, толқын құбыр осі бойымен таралады. Құбырдың екінші ұшынан көп қайталанатын шағылысулар нәтижесінде өзара қарама-қарсы бағыттарда жүретін толқындар пайда болады. Осындай толқындар саны шекті, өйткені ортадағы әрбір шағылу мен таралу кезінде толқын энергиясы жоғалады. Тәжірибенің сұлбасы 1-суретте беріліп отыр. Мұндағы генератор- жиілігі таңдап алынған дыбыстар тудыратын толқын көзі.



1-сурет. Цилиндрлік құбырдың ауа кеңістігіндегі дыбыс толқындарының таралу сұлбасы

Бір бағытта жүретін толқынды қарастырайық. Егер 1 және 3 толқындар арасында $\Delta\varphi_1=\alpha$ фазалар айырымы болса, онда 1 мен 5 толқындар арасында $\Delta\varphi_2=2\alpha$, 1 мен 7 толқындар арасында $\Delta\varphi_3=3\alpha$ және т.с.с. фазалар ығысуы пайда болады. Құбырдағы дыбыс тербелістері барлық шағылған толқындардың қабаттасуынан тұрады, сондықтан өзара күшею (акустикалық резонанс) мүмкін болады, егер $\Delta\varphi$ фазалар айырымы 2π еселі болса, барлық қалған жағдайларда толқындар әртүрлі фазалар ығысуына ие және нәтижесінде толқындардың өзара қабаттасуы бір-бірін біртіндеп немесе толығымен жояды. Акустикалық резонанс кезінде 1 мен 3 толқындар арасында жүріс айырымы толқын ұзындығының бүтін санына тең болады:

$$L = 2L = n\lambda, \quad \text{мұндағы } n - \text{кез келген бүтін сан.}$$

Сондықтан, егер құбыр ұзындығы жарты толқын ұзындығының бүтін санына тең болса,

$$L = \frac{n\lambda}{2} \quad (19)$$

онда құбырда дыбыс тербелістері амплитудасының кенеттен артуы – резонанс пайда болады. Сонда дыбыс жылдамдығы мынадай өрнекпен есептелінеді:

$$v_{\text{дыб}} = \lambda \cdot \nu. \quad (20)$$

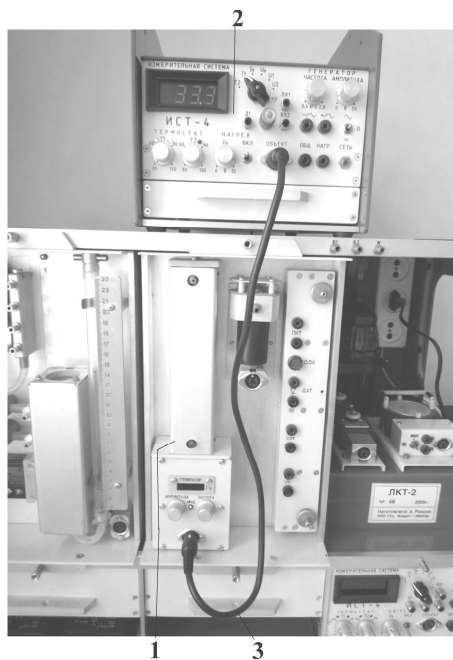
(19) өрнекті ескерсек, онда:

$$v_{\text{дыб}} = 2L \frac{\nu}{n}. \quad (21)$$

2. Эксперименталдық бөлім

Жұмыс көпфункционалды ЛКТ-2 зертханалық кешенінде орындалады. Осы кешендегі «Газдардың қасиеті» блогы төмендегі 2- суретте көрсетілген.

1 – «Резонатор – 04» модулі, 2 – ИСТ–4 өлшеу жүйесі, 3 – қосқыш (разъем).



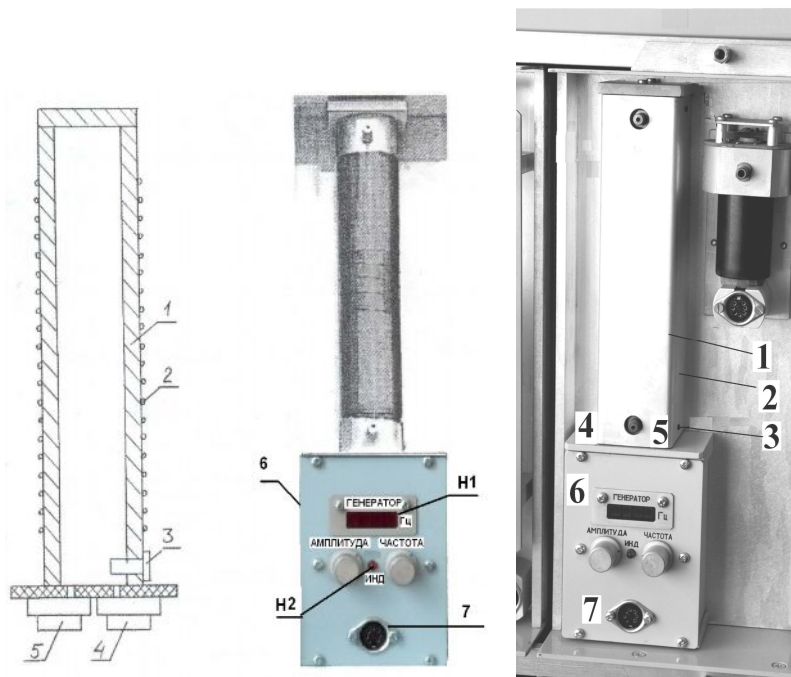
2-сурет. Тәжірибе қондырғысы

2.1. «Резонатор» модулі қондырғысы

"Резонатор – 04" модулі металл құбыр (1) мен пульттен (6) тұрады. Құбырдың бір жағы тығынмен тығындылған, ал екінші жағында динамик (4) пен микрофон (5) орналасқан (3-сурет). Құбыр қыздырғыш орамамен (2) оралған. Құбырға температура датчигі (3) бекітілген. Динамик гармоникалық сигналдың генераторына, микрофон – резонанс көрсеткішіне (индикатор) қосылған (екеуі де пульт құрамына кіреді). Ораманың кедергісі 12 – 14 Ом, ал максимал кернеуі – 20 В.

Резонатор пульті амплитуда мен жиілігі (700–3000 Гц) реттелетін генератордан, Н1 4-разрядты сандық көрсеткіштен, Н2 резонанс көрсеткішінен (жарық диод), жиілік пен амплитуданы реттегіш тұтқадан және алмастыру аспабынан тұрады. Барлық құралдарды ток көзімен қоректендіру қосқыш

(7) арқылы жүзеге асады, ИСТ – 4 өлшеу жүйесі «Термостат» қосқышына кабель арқылы жалғанады.



3-сурет. «Резонатор» модулі

Дыбыс жиілігінің өзгеруіне байланысты резонанстық жиілік дыбысты күшейту және Н2 резонанс көрсеткішінің көмегімен анықталады. Жиілік (21) формула көмегімен есептеледі:

$$v = \frac{v_{\text{дыб}} n}{2L}, \quad \text{мұндағы } n=1, 2, \dots,$$

$v_{\text{дыб}}$ – дыбыс жылдамдығы, $L = 180$ мм – құбыр ұзындығы, n – толқындар саны.

2.2. Жұмыстың орындалу тәртібі

1. «Газдардың қасиеті – №1» блогын жұмыс зонасы кар-касына қондырыңыздар (2-сурет).

2. «Резонатор» модулінің қосқышын (разъем) ИСТ-4 «Объект» қосқышымен жалғаңыздар.

3. Д2 кірісін тығынмен тығындандызыдар. «Т1» термостаттың реттегішін максимал температураға (120°C) қойыңыздар.

4. ИСТ–4 термотұрақтандырудың (термостаттың) өлшеу жүйесін қосыңыздар: "=0/~" тумблерден айнымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайына қосыңыздар. "Нагрев" тумблерін қоспаңыздар.

5. ИСТ–4 бұрандасының көмегімен T_1 жағдайына қойып, құбырдағы ауаның температурасын өлшеңіздер және 1-кестеге жазыңыздар.

1-кесте

Дыбыс жылдамдығы $v_{дыб}$ мен адиабата көрсеткішін γ анықтау. Жұмыс құбырының ұзындығы $L = 0,18$ м

t_1 , °C	Резонанс нөмірі n	V_n , Гц	$v_{дыб}$, м/с	$\langle v_{дыб} \rangle$, м/с	$\Delta v_{дыб}$, м/с	ε , %	γ_n	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma$	ε , %
Бөлме	1									
	2									
	3									
40	1									
	2									
	3									
60	1									
	2									
	3									
80	1									
	2									
	3									
100	1									
	2									
	3									

6. Жиілік реттегішті жайлап айналдыра (3-сурет) отырып, бірінші резонансты табыңыздар. Резонанс кезінде дыбыстың күшеюі болады, ал H_2 шамы максимал жарық болып жанады. Кестеге $n=1$ кезіндегі бірінші резонанстық жиілікті жазыңыздар.

7. Дыбыс жиілігін өсіре отырып, $n=2$ кезіндегі екінші резонанстық жиілікті, ары қарай $n=3$ үшінші резонанстық жиілікті табыңыздар. Кестеге екінші және үшінші резонанстық жиіліктерді жазыңыздар.

8. Қыздырғышты қосып ("вкл" тумблерін – жоғарғы жағдайға қойыңыздар), T_1 термостатты $\approx 40^\circ\text{C}$ -қа қойыңыздар, сонда екі шамы жанады: жасыл және қызыл (бұл температураның тұрақтанғанын білдіреді), T_1 температураның көрсетуін жазыңыздар.

9. Жаңа температура кезіндегі 3–4 пункттерді қайталаңыздар. Кестеге үш гармоника кезіндегі резонанстық жиіліктерді жазыңыздар.

10. T_1 термостат көмегімен құбыр температурасын кезек-кезек жуықтап $\approx 60^\circ\text{C}$, $\approx 80^\circ\text{C}$, $\approx 100^\circ\text{C}$ температураларға жеткізіңіздер. Термотұрақтандырудың жұмысы тұрақтаған кезде температураның әрбір мәні үшін жиілік реттегішін айналдыра отырып (3-сурет), кезек-кезек үш гармоника кезіндегі резонанстық жиіліктерді табыңыздар.

11. (21) өрнек бойынша $v_{\text{дыб}}$ дыбыс жылдамдығын, ал барлық жүргізілген тәжірибелер үшін (18) өрнек бойынша γ -ны есептеңіздер.

12. Әрбір температурадағы үш резонанс үшін дыбыс жылдамдығы $\langle v_{\text{дыб}} \rangle$ мен $\langle \gamma \rangle$ -ның орташа мәнін анықтаңыздар.

13. Әрбір өлшеу сериясы үшін өлшеу нәтижелеріне математикалық өңдеу жасаңыздар.

МЕНШІКТІ БАЛҚУ ЖЫЛУЫ МЕН ЖЕҢІЛ БАЛҚИТЫН ЗАТТАРДЫҢ ЭНТРОПИЯ ӨЗГЕРІСІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: меншікті балқу жылуын анықтау, жеңіл балқитын заттардың балқуы мен қыздыру кезіндегі энтропия өзгерісін анықтау.

Құралдар мен жабдықтар: ЛКТ–3 зертханалық кешен, ИСТ–4 термостаттың өлшеу жүйесі, "Пеш-термостат" функционалды модулі, тығын, стакан, жылу оқшауланған қаңқа, пеш, желдеткіш, температура датчиктері, қосқыш (разъем), секундомер.

1. Қысқаша теориялық кіріспе

1.1. Фазалық диаграмма

Термодинамикалық жүйенің кем дегенде бір параметрінің секірмелі өзгеретін беттермен шектелген зат мөлшеріне тәуелсіз физикалық және химиялық қасиеттері біртекті бөліктерінің жиынтығын фазалар деп атайды.

Басқа сөзбен айтқанда фаза – гетерогендік жүйенің гомогенді бөлігі. Бір компонентті жүйеде әрбір фаза әртүрлі агрегатты күйде немесе заттың әртүрлі полиморфты модификациясында бола алады. Көп компонентті жүйеде фаза әртүрлі құрам мен құрылымға ие.

Әдетте, заттың термодинамикалық фазаларының жиынтығы агрегаттық күй жиынтығына қарағанда едәуір бай, яғни бір заттың агрегаттық күйі әртүрлі термодинамикалық фазада бола алады. Сондықтан агрегаттық күйлер терминдерімен затты сипаттау мүмкін емес (дөрекі), яғни ол әртүрлі физикалық жағдайларды толығымен ажырата алмайды.

Заттың газ тектес күйінде ешқандай реттілік жоқ. Осыған орай, газ тектес күйде кез келген зат бір ғана термодинамикалық фазада бола алады.

Бір сұйықтықтың әртүрлі термодинамикалық фазалары болуы мүмкін, бірақ ол көп жағдайда бірден аспайды.

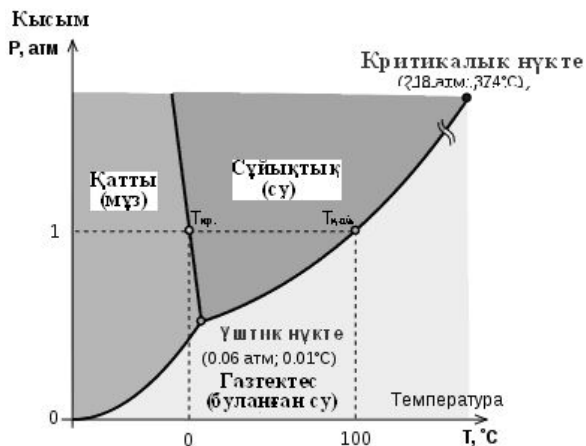
Қатты күйдегі зат бірнеше фазаларда болуы мүмкін, олардың кейбірінің құрамы бірдей болып, ал құрылымы әртүрлі болуы мүмкін (*полиморфты модификациялар, аллотропия* (түрліше)). Мысалы, мұздың фазалық диаграммасына қарағанда ол әртүрлі қысым мен температурада 12-ге жуық термодинамикалық фазада бола алады.

Механикалық және жылулық тепе-теңдік күйде бола алатын термодинамикалық жүйедегі фазалар күйін термодинамикадағы фазалардың тепе-теңдігі деп атаймыз. Жүйеде заттың барлық фазалары бірдей температураға ие болса, оны жылулық тепе-теңдік деп атайды. Түйісетін фазалардың шекара бөлігінің жан-жағындағы қысымдарының теңдігін механикалық тепе-теңдік деп атайды.

Судың фазалық диаграммасында (1-сурет) әртүрлі термодинамикалық фазалар белгілі аймақтарды қамтиды. Әртүрлі термодинамикалық фазаларды бөліп тұрған сызықтар фазалық өту сызықтары деп аталады. Егер зат қандай да бір аймақ ішіндегі нүктеде орналасса, онда ол толығымен осы термодинамикалық фазада жатыр. Егер заттың күйі фазалық өту сызығының бір нүктесінде болса, онда термодинамикалық тепе-теңдіктегі заттың бір бөлігі осы фазада, ал қалған бөлігі басқа фазада жатыр.

Қысым немесе температураның баяу (адиабаттық) өзгерісі кезінде зат фазалық диаграммадағы нүктенің қозғалысымен сипатталады. Егер осы нүкте өзінің қозғалысында термодинамикалық фазаларды бөліп тұратын сызықтардың бірін қиып өтсе, онда заттың физикалық қасиеттері секіrmелі түрде өзгеріп, фазалық өту құбылысы байқалады.

Фазалардың барлығы толығымен бір-бірінен фазалық өту сызығымен бөлінбейді. Кейбір жағдайларда бұл сызық критикалық нүктемен аяқталып, үзіліп кетуі мүмкін. Осы кезде бір фазадан екінші фазаға өту секіrmелі өту емес, фазалық өту сызығын айналып өтетін біртіндеп өту болады.



1-сурет. Судың фазалық диаграммасы

Фазалық диаграммадағы үш фазалық өту сызығының қиылысатын нүктесі үштік нүкте деп аталады. Әдетте, балқу, қайнау және сублимация (буға айналу) сызықтар тоғысатын нүкте заттың үштік нүктесі деп есептелінеді, бірақ та жеткілікті үлкен фазалық диаграммаларда бірнеше үштік нүктелер болуы мүмкін. Үштік нүктедегі термодинамикалық тепе-теңдік күйіндегі зат жарым-жартылай барлық үш фазада да болуы мүмкін.

1.2. Фазалық өту

Фазалық өту – заттың бір фазадан екінші фазаға өтуі.

Фазалық өтудің түрлері:

- бірінші текті фазалық өтулер кезінде тығыздық, ішкі энергия және басқа термодинамикалық сипаттамалар секірмелі түрде өзгереді, сонымен қатар белгілі бір мөлшердегі жылу (фазалық өту жылуы) жұтылады немесе бөлінеді;
- екінші текті фазалық өтулер кезінде термодинамикалық функциялар үзіліссіз өзгереді, ал жылу бөлінбейді де, жұтылмайды да. Екінші текті фазалық өту кезінде тығыздық пен

ішкі энергия өзгермейді, олай болса мұндай фазалық өту көзге көрінбейді. Жылуsыйымдылық, жылулық ұлғаю коэффициенті, т.б шамалар сияқты термодинамикалық потенциалдың екінші туындылары секіrmелі өзгереді.

Бірінші текті фазалық өтулердің өте кең тараған түрлері:

- балқу мен қатаю,
- булану мен конденсация,

Екінші текті фазалық өтулердің өте кең тараған түрлері:

- жүйенің критикалық нүкте арқылы өтуі;
- металдар мен қоспалардың асқын өткізгіштік күйге өтуі;
- сұйықтық гелийдің асқын күйге өтуі.

Заманауи физика үшінші немесе одан да жоғарғы текті фазалық ауысуларға ие жүйелерді зерттеп жатыр.

Термодинамикалық фазаларға бөліну – заттың агрегаттық күйлер бойынша бөлінуіне қарағанда күйдің өте ұсақ классификациясы болып табылғандықтан, фазалық ауысу кез келген агрегаттық күйдің ауысуымен жүзеге аспайды. Бірақ та агрегаттық күйдің кез келген ауысуы фазалық өту болып табылады.

1.3. Балқу және кристалдану

Заттың кристалдық күйден сұйықтық күйге өтуі – заттың балқуы болып табылады. Балқу кезінде жүйе энергия бөліп шығармайды, керісінше – қоршаған ортадан энергия жұтады. Жұтылған энергия кристалдық торды бұзуға жұмсалады. Осындай процестерді бірінші текті фазалық өту деп атайды. Заттың балқуы әр заттың өзіне тән температурасына өтеді.

Кристалл денелердің балқуы жүретін температура – балқу температурасы деп аталады. Көптеген қатты денелердің балқу температурасы сыртқы қысым жоғарылаған сайын артады. Заттың балқуы жылуды жұту арқылы жүреді және меншікті балқу жылуымен сипатталады.

Балқу температурасында заттың бірлік массасын қатты күйден сұйықтық күйге айналдыру үшін қажетті энергия мөлшері меншікті балқу жылуы деп аталады.

Әдетте, кез келген зат газ, сұйықтық және қатты үш күйдің тек бірінде ғана болады. Осы шарттың әрбіріне молекула немесе атомдарының арасындағы белгілі бір байланыс энергиясымен сипатталатын, молекулалар және атомдар арасындағы өзіндік байланыс құрылымы сәйкес келеді. Бұл құрылымды өзгерту үшін жылулық энергияның сырттан ағуымен тасымалданады (мысалы, қатты заттың балқуы) немесе энергияның шығыны (мысалы, кристалдану кезінде) болуы керек.

Қатты денелерде молекулалар мен атомдар қатаң кристалдық немесе аморфты құрылыммен байланысқан. Аз ғана қыздырудың нәтижесінде олар өздерінің маңайында тербеле бастайды (неғұрлым температура жоғары болса, соғұрлым тербеліс амплитудасы да жоғары болады). Затты қыздырған сайын молекулалар қаттырақ теңселе бастайды, яғни өз орнынан ыршып шығып, «еркін қозғалыс» күйіне ауысқанша қыздырыла береді. Бұл қатты дененің балқуы немесе сұйықтыққа айналуы деп аталады. Қатты дененің сұйықтық күйге көшуі әр зат үшін белгілі бір температурада өтеді де, балқу жылуы дейтін жылу мөлшерін жұмсауды қажет етеді. Заттың балқуына жұмсалған энергияны балқу жылуы деп атайды.

Балқу жылуы мынадай өрнекпен есептелінеді:

$$Q = \lambda m \quad (1)$$

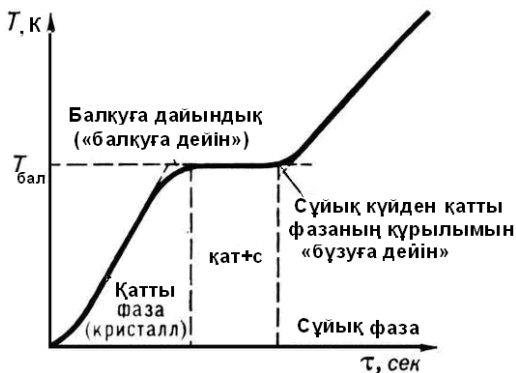
мұндағы λ – меншікті балқу жылуы, m – балқыған заттың массасы.

2-суретте қатты дененің балқу нүктесіне өту кезіндегі температура өзгерісінің қисығы көрсетілген. Затты қыздыру барысында балқу нүктесіне дейін атомдар (молекулалар) өзінің шектелген аумағында қатты шайқала бастайды және қосымша жылулық энергияның келуі қатты дене температурасының өсуіне алып келеді. Бірақ қатты дене температурасы балқу температурасына жеткенімен, белгілі бір уақыт аралығында, жылу келіп тұрғанның өзінде оның күйі өзгеріссіз қалады, өйткені қатаң молекулааралық байланысты үзу үшін жылулық энергия мөлшері жеткілікті болуы керек. Яғни, заттың қатты

күйден сұйықтық күйге фазалық өту процесінде температураның жоғарылауынсыз энергия жұтылады, өйткені жұтылған энергия молекулааралық байланысты үзуге кетеді.

Кристалдану – бірінші текті фазалық ауысу; заттың сұйықтық күйден қатты күйге өтуі; заттың кристалдануы балку температурасына тең температурада жүреді.

Сұйықтықтың қату температурасына дейін сууы (балку нүктесіндегі тең температура) кристалдану процесінің басталғанын білдіреді. Кристалдану – зат температурасының өзгеруінсіз сыртқа жылулық энергияны беру процесі. Балку кезінде қоршаған ортадан қанша жылулық энергия алынса, кристалдану кезінде соншама энергия бөлініп шығады.



2-сурет. Балку кезіндегі дене температурасының өзгеруі

Сублимация (құрғақтау) (лат.тілінен аударғанда “sublimo” – жоғары көтеремін, құрғатамын) – 1 текті фазалық ауысу: заттың қатты күйінен тікелей газ күйіне ауысу (сұйықтық күйден аттап өтіп). Қарапайым тұрмыстық мысал: ілінген су киім аязда кебеді. Алдымен ондағы су кристалданып мұзға айналады, сосын күн сәулесінің әсерінен мұздың микроскопиялық кристалдары сұйықтық фазасын айналып өтіп буланады. Тағы басқа бір мысал: рок-концерттерде «құрғақ мұз» (мұздалған CO_2 көміртетігінің қос тотығы) түтіндету пердесі құрылғысы

үшін қолданылады. Ол сұйықтық фазасын айналып өтіп, ән салып тұрған музыканттарды бүркелеп, тікелей ауада буланады. Заттың қатты күйінен тікелей газ күйіне ауысуы кезінде сублимация энергиясы жұмсалады.

1.4. Энтропия

Энтропия түсінігін алғаш рет Рудольф Клаузиус 1865 жылы енгізді. Ол қайтымды процесс кезіндегі термодинамикалық жүйе энтропиясының өзгерісін ΔQ жалпы жылу мөлшері өзгерісінің T абсолют температураға қатынасы түрінде анықтады:

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

Бұл өрнек тек изотермдік процесс (тұрақты температурада өтетін) үшін қолданылады. Квазистатикалық процестер үшін (2) өрнектің жалпылаған түрі мынадай болады:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}, \quad (3)$$

мұндағы dS – энтропия (дифференциал) өзгерісі, ал δQ – шексіз аз жылу мөлшерінің өзгерісі. Дифференциалы $\delta Q/T$ болып табылатын күй функциясы энтропия деп аталады. Келтірілген термодинамикалық анықтама тек квазистатикалық процестерге ғана (үзіліссіз, бірінің артынан бірі қалыптасатын тепе-тең күйлер жиынтығы) қолданылады. Энтропия күй функциясы болып табылатындықтан, теңдіктің сол жағында оның толық дифференциалы тұр. δQ жылудың шексіз аз мөлшері, процесс функциясы болатындықтан, оны толық дифференциал деп есептеуге болмайды.

Олай болса, энтропия еркін аддитивті тұрақтыға дейінгі дәлдікпен анықталады. 1911 жылы Макс Планк термодинамиканың үшінші бастамасын, одан бұрын Нернст ұсынған, температура абсолют нөлге ұмтылу кезінде барлық денелердің энтропиясының нөлге айналу шарты түрінде тұжырымдады:

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0. \quad (4)$$

(4) – өрнек энтропияның абсолют мәнін анықтауға мүмкіндік береді. Термодинамиканың үшінші бастамасынан жүйенің температурасы мен энтропиясының арасындағы тура байланыс байқалады: яғни жүйенің температурасы абсолют нөлге дәл тең болмайды, абсолют нөл температураға тек асимптотикалық түрде жақындауға болады. Сондықтан кейде термодинамиканың үшінші бастамасын абсолют нөл температураға жете алмау принципі деп те тұжырымдайды.

Больцман статистикалық физикаға энтропия анықтамасын жүйе күйінің w термодинамикалық ықтималдығы арқылы енгізді. Күй функциясы болып табылатын энтропия физикалық жүйенің микрокүйінің ықтималдығын сипаттайды және Больцман формуласы деп аталатын мынадай өрнекпен анықталады

$$S = k \ln w, \quad (5)$$

мұндағы k – Больцман тұрақтысы, w – термодинамикалық ықтималдық (немесе статистикалық салмақ), яғни нақты күйді қалыптастыратын микрокүйлердің саны.

Жүйе неғұрлым реттелген болса, соғұрлым макрокүйді жүзеге асыратын микрокүйлердің саны аз болады. (5) өрнек энтропияны көрнекті түрде түсіндіріп береді: энтропия жүйенің ретсіздігін сипаттайды.

1.5. Затты қыздыру және балқыту кезіндегі энтропия өзгерісі өрнегінің қорытылуы

Термодинамикалық ықтималдық, олай болса энтропия да жүйенің күй параметрлерінің функциясы болып табылады. Заттың балкуы және кристалдануы кезінде, оның энтропиясы өзгеруі керек.

Жылулық әсерлесу кезіндегі энтропияның өзгеруін есептеу әдістері келтірілген жылу мөлшерін өлшеуге негізделген. Келтірілген жылу мөлшері – деп жүйе алмасатын элементар

жылу мөлшерінің осы алмасу процесі кезіндегі Т абсолют температураға қатынасын айтады (3- өрнек).

Жүйенің А күйден В күйге қайтымды өту кезіндегі энтропияның толық өзгеруі (3) өрнекті интегралдаумен анықталады:

$$S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T}. \quad (6)$$

Денені балку температурасына дейін қыздырып, сосын оның балку кезіндегі энтропия өзгерісін екі кезеңге бөліп есептеуге болады: $1 \rightarrow 2$ – қыздыру, $2 \rightarrow 3$ – балқыту.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = \int_1^2 \frac{\delta Q_1}{T} + \int_2^3 \frac{\delta Q_2}{T} = \int_1^2 \frac{mcdT}{T} + \int_2^3 \frac{\lambda m}{T_2} = mc \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda m}{T_2} \quad (7)$$

мұндағы T_1 – дененің бастапқы температурасы, T_2 – дененің балку температурасы, L – дененің меншікті балку жылуы, m – дене массасы.

Қыздыру мен балқыту кезінде дененің энтропиясы өседі – жүйе шамалы реттелген күйге өтеді, суу мен кристалдану кезінде дене энтропиясы кемиді – жүйе біршама реттелген күйге өтеді. Осыған орай энтропияны жүйедегі ретсіздік өлшемі деп есептеуге болады.

2. Тәжірибелік қондырғы

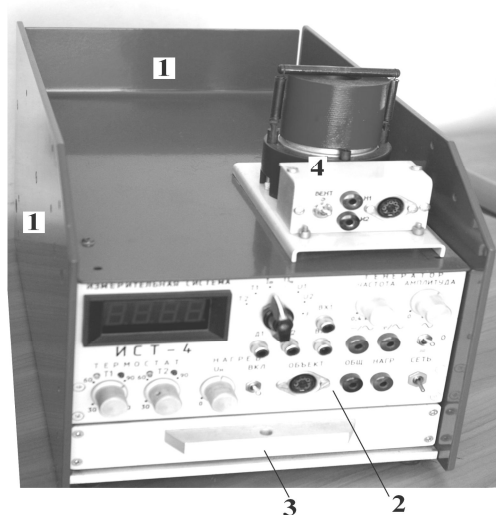
Зерттелетін зат: парафин (немесе стеарин), Розе қорытпасы (массасы бойынша 50% Bi, 28% Pb және 22% Sn).

Жұмыс көпфункционалды ЛКТ-3 зертханалық кешенінің "Пеш-термостат" модулінде орындалады, бұл кешенмен әртүрлі тәжірибелерді жасауға болады. Тәжірибелік қондырғы төмендегі 3–5-суреттерде көрсетілген.

1 – екі қабатты қаңқада орналасқан ЛКТ–3 зертханалық кешен, 2 – ИСТ-4 термостаттың өлшеу жүйесі, 3 – құралдар блогы, 4 – "Пеш-термостат" функционалды модулі.

2.1. Кристалдану мен балқу температурасын анықтау

1. Зерттелінетін затты (шамамен 30 мл) тигельге салыңыздар.



3-сурет. ЛКТ-3 зертханалық кешен



4-сурет. Тигель мен жылу-
парафин оқшауланған қаңқа



5-сурет. Розе қорытпасы
және тығын



2. Электронды таразының көмегімен тигельді өлшеп, М-заттың массасын анықтаңыздар: $M = m_2 - m_1$, мұндағы m_2 – заты бар тигельдің массасы, $m_1 = 60,0 \pm 0,5$ г (бос тигельдің массасы).

3. Термостаттың пешіне зат салынған тигельді қойыңыздар. Жылулық контакты болу үшін пештің үстіне 2–3 тамшы глицерин тамызыңыздар. Жылу оқшауланған қабықты тигельге кигізіңдер. Серіппесі бар білікпен тигельді бекітіп қойыңыздар.

4. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «Объект»-ін пешпен қосқыш (разъем) арқылы жалғаңыздар.

5. Айнымалы кернеу беріңіздер, ол үшін тумблерді "=/0/~" жағдайына қойыңыздар.

6. Қыздырғыштағы кернеуді өлшеу үшін ИСТ–4 панеліндегі ВХ2 кернеу желісіне ұшы қызыл және қара қосқыш өткізгіш сымды "Н1" және "Н2" ұяшықтары бар пешке жалғаңыздар, ол қыздырғышта бөлінетін қуатты нақты анықтайды. Д2 датчикке тығынды (заглушка) тығындап қойыңыздар. Т1 реттегішін максимал температураға қойыңыздар.

7. Сеть" және "вкл" тумблерлерін жоғарғы жағдайға қойыңыздар.

8. «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмыстың нәтижелерін қолданып, қыздыруды $P=30\text{--}40$ Вт тұрақты қуатта 120°C -қа дейін жүргізіңдер. Ол үшін қыздырғыштағы кернеуді $U_H = \sqrt{30 \cdot R}$ ұстап тұру керек (немесе $U_H = \sqrt{40 \cdot R}$), мұндағы R – «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» жұмыстан алынған пеш кедергісі).

9. Температураның уақытқа тәуелділігін анықтаңыздар. Розе қорытпасы үшін температура қадамы: 90°C температурадан төмен болғанда 10 градус және $90\text{--}120^{\circ}\text{C}$ диапазонда 2 градус. Секундомерді 30°C – 40°C температура кезінде қосыңыздар. Пеш температурасы берілген мәнге жетуге кеткен t уақытты қадағалаңыздар. Қыздыру қуатын нақты анықтау үшін температураның әрбір интервалындағы параметрлерді 1-кестеге мұхият жазып отырыңыздар: U_H – қыздырғыштың қоректендіру кернеуін, I_H – қыздырғыштың қоректендіру тогын, t – берілген T температураға жету уақытын.

10. Қыздыру кезіндегі температураның уақытқа тәуелді 1-ші қисығын тұрғызыңыздар (Сіздер алған қисық 2-суретке ұқсау керек). Қисықтан үлгінің $T_{\text{бал}}$ балку температурасын анықтаңыздар.

11. «Нагрев» ажыратқыш көмегімен 120°C -қа жеткенде қыздыруды тоқтатып, желдеткішті қосыңыздар. Тәжірибе нәтижелерін 2-кестеге жазыңыздар. Уақытты қадағалай отырып, уақыт бойынша қызу және суу кезіндегі температураның тәуелділігін тұрғызыңыздар. Үлгінің кристалдану температурасын анықтайтын, суыту кезіндегі температураның уақытқа тәуелділік екінші қисығын тұрғызыңыздар.

1-кесте

Үлгінің қызуы мен балкуы

T °C	t, мин- с	U_H , В	I_H , А	P, Вт	№2 жұмыстан алынады		Q, Дж	C, Дж/К	с, Дж/(К·кг)	ΔS , Дж/К	λ , Дж/К
					P' Вт	C_0 Дж/К					
40	0-00										
50											
60											
70											
80											
90											
92											
94											
96											
98											
100											
102											
104											
106											
108											
110											
112											
114											
116											

12. Қыздыру мен суыту кезіндегі қисықтарды салыстырыңыздар.

Үлгінің сууы

T°С	t, мин-с
120	0-00
118	
116	
114	
112	
110	
100	
98	
96	
94	
92	
90	
80	
70	
60	
50	
40	

2.2. Үлгінің жылусыйымдылығын және қыздыру кезіндегі энтропия өзгерісін анықтау

1. Жүйе температурасын ΔT -ға өсіру үшін үлгіге мынадай жылу мөлшерін әкелу қажет:

$$Q = (P - P_0) \cdot \Delta t_{\text{бал}} - C_0 \Delta T,$$

мұндағы P – қыздыру қуаты, P^j – берілген температура диапазонындағы қуаттың шығыны (бұл шама мәндері «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» тақырыбындағы жұмыстан алынады), $\Delta t_{\text{бал}}$ – үлгінің қызу уақыты, C_0 – бос тигелі бар пештің жылусыйымдылығы: бұл шама мәндері «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» тақырыбындағы жұмыстан алынады). Нәтижелерді 1-кестеге жазыңыздар.

2. Температураның әртүрлі интервалдары үшін үлгінің жылуsыйымдылығын мына өрнекпен есептеңіздер: $C=Q/\Delta T$, меншікті жылуsыйымдылық мынадай: $c=C/M$. Алынған нәтижелерді талдаңыздар.

3. Қыздыру кезіндегі энтропия өзгерісін мынадай өрнекпен есептеңіздер:

$$\Delta S = Mc \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Есептеу нәтижелерін 1-кестеге жазыңыздар.

2.3. Үлгінің балқуы кезіндегі энтропия өзгерісі мен меншікті балқу жылуын анықтау

1. Балқу жылуын $Q_{бал}$ анықтау үшін бірінші қисықтан "жазық" балқуды белгілеп алып, үлгінің $\Delta t_{бал}$ балқу уақытын есептеңіздер.

2.Төмендегі өрнекті пайдаланып, балқу жылуын есептеңіздер:

$$Q_{бал} = (P - P') \cdot \Delta t_{бал}$$

мұндағы P – қыздыру қуаты, P' – берілген температура диапазонындағы қуаттың шығыны (бұл шама мәндері «Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау» тақырыбындағы жұмыстан алынады), $\Delta t_{бал}$ – үлгінің балқу уақыты. Нәтижелерді 1- кестеге жазыңыздар.

3. Меншікті балқу жылуын мына өрнекпен анықтаңыздар:

$$\lambda = Q_{бал} / M ,$$

мұндағы M – зерттелген үлгінің массасы.

4. Балқу кезіндегі энтропия өзгерісін мынадай өрнекпен есептеңіздер:

$$\Delta S = Q_{бал} / T_{бал} .$$

Есептелген нәтижелерді 1-кестеге жазыңыздар

МЕТАЛДАРДЫҢ ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК КОЭФФИЦИЕНТІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: жылуөткізгіштік құбылысының жалпы заңдылықтарын зерттеу, металдардың жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.

1. Теориялық кіріспе

1.1. Жылу алмасудың түрлері

Физикалық тасымалдау процестері, оның ішінде жылу алмасу процесі физикалық жүйеде жүреді. Сондықтан алдын ала физикалық жүйеге, оған сыртқы ортадан түскен шарттарға термодинамикалық тұрғыдан сипаттама беру қажет. Қарастырылып отырған жүйеге қарағанда сыртқы шарттар жүйемен өзара әсерлескен денелердің жалпыланған q_i координаталарымен беріледі. Әрбір нақты есеп үшін сыртқы параметр ретінде әрқилы физикалық шамалар алынуы мүмкін.

Жүйенің ішкі күйі бір жағынан сол жүйенің қасиеттеріне, екінші жағынан сыртқы шарттарға тәуелді ішкі параметрлердің жиынтығымен анықталады.

Бөлініп алынған физикалық жүйенің сыртқы денелермен өзара әсерін жалпыланған A_i күштерімен сипаттауға болады. Егер өзара әсерлесу барысында сыртқы денелердің орны өзгерсе, онда жүйе шамасы мынаған тең

$$dW = \sum A_i q_i \quad (1)$$

жұмыс істеген болады. Жұмыс істеу нәтижесінде жүйенің ішкі параметрлері өзгереді. Егер қарастырылып отырған жүйенің ішкі параметрлерінің өзгерісі тек сыртқы денелердің орын ауыстыруына ғана тәуелді болса, ондай жүйені адиабаталық шектелген жүйе дейді. Мұндай жүйелер үшін (1) формуламен анықталған жұмыс жүйенің ішкі энергиясының өзгеруіне тең болады:

$$-dE = -dW + dQ \quad (2)$$

Жалпы жағдайда жүйенің ішкі энергиясы тек қана жұмыс жасаудың әсерінен емес, оған қоса сырттан келетін жылу әсерінен де өзгереді:

$$dE = -dW + dQ,$$

немесе интегралдық түрде:

$$E_1 - E_2 = -\int_1^2 dW + \int_1^2 dQ, \quad (3)$$

мұндағы 1 және 2 индекстер жүйенің бастапқы және соңғы күйлерін белгілейді. (2) термодинамиканың бірінші бастамасының математикалық өрнегі болып саналады.

Тепе-теңдік термодинамикасында жүйенің тек бастапқы және соңғы күйлері қарастырылады. Басқаша айтқанда, жүйе бір күйден екінші күйге өткенде ішкі энергияның жалпы өзгеруі – жүйенің істеген жұмысы деп есептеледі.

Тепе-теңдікте емес термодинамикада процестердің барысы зерттеледі. Әсіресе жылу әкелудің немесе шығарудың локальдық сипаттамаларына көңіл бөлінеді. Жалпы жүйенің бір бөлігіне әкелінген жылу, жүйенің бүкіл бойына тарайды. Бұл құбылысты жылу алмасу процесі деп атайды. Жылу алмасу процесі тасымалданатын шама-жылу энергиясы E мен сол тасымалданатын шаманың ағыны $\vec{j}$ -жылу энергиясының ағыны арқылы сипатталады:

$$\vec{j} = \vec{v} \cdot E, \quad (4)$$

мұндағы $\vec{v}$ – энергия тасымалдау жылдамдығы. Егер сыртқы денелердің кеңістіктегі орны тұрақты болса, біраз уақыттан кейін кез келген жүйенің күйі ішкі параметрлердің бастапқы мәндеріне тәуелді болмай, тек сыртқы шарттарға тәуелді болады. Мұндай күйді – жүйенің термодинамикалық тепе-теңдік күйі дейді, ал осындай тұрақталу уақыт аралығын релаксация уақыты дейді. Тұрақталу уақыт аралығында

тасымалдау процесінің нәтижесінде ішкі параметрлер теңестіріліп бүкіл жүйе үшін бір деңгейге келеді. Қарастырылып отырған жүйенің қасиеттеріне, онда жүріп жатқан тасымалдау процестерінің түріне байланысты теңестірілетін ішкі параметр әртүрлі болуы мүмкін. Ал жылу алмасу процесінде, яғни термодинамикада ондай параметр- температура. Сонымен жылу алмасу процесін зерттеу барысында негізгі мақсат

$$\vec{j} = f(T) \quad (5)$$

заңдылығын анықтау болады. Бұл байланыстың ерекшеліктері жылу тасымалдаудың төмендегідей үш мүмкіншілігімен сипатталады.

Біріншіден, жылу энергиясын микроскопиялық бөлшектермен (молекула, ион, электрон) тасымалдау – жылуөткізгіштік деп аталады. Екіншіден, жылуды макроскопиялық көлемдердің қозғалысы кезінде тасымалдау – конвективтік жылу алмасу деп аталады. Конвекция оны тудыратын күштердің табиғатына байланысты ерікті және еріксіз болуы мүмкін.

Жылу алмасудың үшінші түрі – радиациялық жылу алмасу - денелердің электромагниттік толқындарды шығару, шағылу, өткізу, жұту қабілетіне байланысты. Электромагниттік толқындарды жұту қабілеті бар ортамен кездескенде, толқынның энергиясы ортаның жылу энергиясына айналады. Тәжірибеге қарағанда жылу ағыны, жүйенің температурасы жоғары бөлігінен температурасы төмен бөлігіне бағытталған.

1.2. Газдардағы жылуөткізгіштік

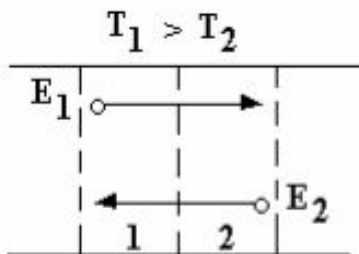
Газдардағы жылуөткізгіштік құбылысы мына түрде түсіндіріледі: жылудың берілуін ішкі энергияның тасымалдануы ретінде қарастырамыз. Диффузия құбылысын қарастырғанымыздай, температурасы T_1 және T_2 болатын екі қабырғалары параллель ыдыстың ішінде газ орналасқан болсын (1-сурет). Біз стационар жағдайды қарастырамыз. Температура айырымы аса үлкен емес деп алып, газ тығыздығының өзгеруін

ескермейміз, яғни газ молекулаларының концентрациясы барлық жерде бірдей. Бірақ $T_1 > T_2$ болғандықтан, сол жақтан оң жаққа өтетін молекулалардың кинетикалық энергиясы біршама артық болады. Сонымен ішкі энергияның тасымалдануы жүреді де, бұл жылу алмасу құбылысы деп аталады. Әрбір қабаттағы молекулалар қабат температурасына тәуелді әртүрлі орташа кинетикалық энергияға ие. Молекулалар ілгерілемелі қозғала отырып, бір қабаттан екінші қабатқа энергияны тасымалдап, үздіксіз өтіп отырады.

Егер қандай да бір молекула 1 қабаттан 2 қабатқа өткенде (1-сурет) 2 қабатқа энергияны тасымалдайды

$$E_1 = \frac{i}{2} k T_1, \quad (6)$$

мұндағы i – молекуланың еркіндік дәреже саны, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К–Больцман тұрақтысы, T_1 – 1 қабат температурасы.



1-сурет. Газдардағы жылуөткізгіштің жылу тасымалдау механизмі

Молекула 2 қабаттан 1 қабатқа өткенде тасымалдайтын энергия: $E_2 = \frac{i}{2} k T_2$. Егер $T_1 > T_2$, онда 2 қабат энергиясы артады, 1 қабатта кемиді. Сондықтан да молекуланың ілгерілемелі хаустық қозғалысы кезінде газдар арасындағы қабаттарда ішкі энергиясының тасымалы болып отырады, яғни жылу тасымалы температураның төмендеуіне әкеліп соғады.

1.3. Диэлектриктердегі жылуөткізгіштік

Қатты диэлектриктердегі жылуөткізгіш механизмі тепе-теңдік нүктесі (жазықтығы) айналасында атомның немесе молекуланың жылулық тербелісіне байланысты. Жоғары температура аймағында зат бөлшектері аса үлкен энергияға ие және үлкен амплитудамен тербеліс жасайды. Бөлшектер бір-бірімен серпімді күштер арқылы байланысқан болғандықтан бөлшек тербелісінің амплитудасының өсуі көрші бөлшек тербелісінің амплитудасының өсуіне әкеліп соғады. Нәтижесінде затта дыбыс жылдамдығымен тарайтын жылулық тербеліс энергиясын тасымалдайтын серпімді толқын пайда болады. Жылулық толқынның таралу механизмі дыбыстық толқынның таралу механизміне ұқсас, сондықтан оларды акустикалық деп атайды.

Кристалдық тордағы жылулық толқын теориясын 1912 ж. Дебай ұсынған. Оның негізінде энергияны кванттау идеясы жатыр. Осыған сәйкес ν жиілігі бар толқын (серпімді толқын энергиясы) таралатын тор энергиясы тек қана дискретті мәндерді қабылдайды:

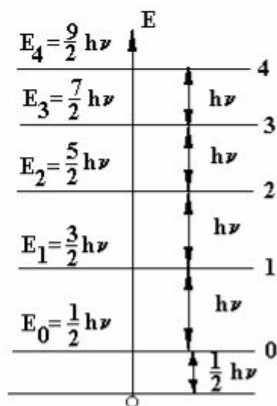
$$E = (n + \frac{1}{2})h\nu, \quad (7)$$

мұндағы $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ -кванттық сан, h – Планк тұрақтысы.

Бұл энергия мәндері энергетикалық деңгейлер түрінде 2-суретте кескінделген. Тордың минимал энергиясы $n=0$ деңгейіне және $\frac{1}{2}h\nu$ тең (нөлдік энергия деп аталады).

Бұл бөліктің немесе тордың жылулық тербелісінің энергия квантын фонон деп атайды. Тордың козу деңгейіне орай фонондарды төменгі деңгейге түсіреді. Егер тор энергиясы үшінші деңгейге сәйкес келсе (2 -сурет), онда энергия $E = (3 + \frac{1}{2})h\nu$ тең. Бұл кезде тор әрбірінің энергиясы $E=h\nu$ тең үш бірдей фононды шығарады. Берілген T

температурада бірдей ε энергиясы бар фонондардың орташа саны:



2-сурет. Кристалл торының энергиялық деңгейлері

Жылулық тербеліс кезінде тордан энергияның ең кіші бөлігі шығарылады және жұтылады, берілген энергетикалық деңгейден көрші жақын деңгейге өтеді. Ол энергия мынаған тең:

$$E = h\nu. \quad (8)$$

$$N(\varepsilon) = \left(e^{\frac{\varepsilon}{kT}} - 1 \right)^{-1}, \quad (9)$$

мұндағы e – натурал логарифм, k – Больцман тұрақтысы.

Жоғарыдағы (9) теңдеуде $T=0$ кезінде фонондар жоқ, ал температура жоғарылаған сайын фонондар саны жылдам өседі. Кристалдарда бір мезгілде әртүрлі ν жиілігі бар бір-бірімен әлсіз байланысқан толқындар таралады, бұл толқындар әртектес фонондарға сәйкес болады. Басқа сортты (басқа энергиясы бар) фонондардың орташа саны да (9) теңдеумен анықталады.

Фонондарды термиялық қозған қатты дененің ішінде дыбыс жылдамдығымен еркін таралған газ фонондарымен толтырылған ыдыс ретінде қарастыруға болады.

Бірақ фонондардың әдеттегі бөлшектерден ерекшелігі, олар вакуумда өмір сүре алмайды. Фонондар үшін орта қажет, ол орта кристалл болып табылады. Осыған ұқсас бөлшектерді квазибөлшектер деп атайды. Фононды газ ұғымын пайдаланып, кристалл денелердегі жылуөткізгіштігін (тордың жылу өткізгіштігі) мына түрде түсіндіруге болады. Дененің температурасы жоғары бөлігінде фонондар тығыздығы (4) теңдеуге сәйкес көп, фонондар температурасы (тығыздығы аз) төмен жерде қозғалып, бүкіл дене бойымен тығыздығын

теңестіруге ұмтылады. Осылай қозғалған фонондар ыстықтан суыққа өткенде жылу тасымалдайды.

Дыбыс жылдамдығына тең фонондардың қозғалыс жылдамдығы жоғары (10^3 м/с шамасында) болса, онда қатты денелерде жылу өте тез таралар еді. Бірақ фонондардың – фонондарда шашырауы, нәтижесінде фононның орташа еркін жүру жолы аз (температураның төмендеуінен) болады. Энергия тасымалын түсіндіретін бұл механизм оның тез тасымалдауына мүмкіншілік бермейді. Сондықтан қатты диэлектриктерде жылуөткізгіштік аз болады.

1.4. Металдардың жылуөткізгіштігі

Зерттеу нәтижелері металдардың жылу өткізгіштігі диэлектриктерге қарағанда жоғары екендігін көрсетеді. Бұл құбылыс металдарда фонондардан басқа идеал газ атомдарына ұқсас электронды газ түзетін валентті электрондардың да жылу тасымалдайтынымен түсіндіріледі. Металдың электронды жылуөткізгіш механизмі газдың жылу өткізгіш механизміне ұқсас. Валентті электрондар тор түйінімен соқтығысу арасында үлкен қашықтықта ұшып, бір жерден екінші жерге энергияны тасымалдайды. Таза металдардағы электронды жылуөткізгіш торлық жылу өткізгіштерден көп. Жоғарғы температурада торлық жылуөткізгіштік (фонондық) электрондық жылуөткізгіштіктің 1–2 % құрайды.

Жалпы жағдайда қатты денелерде екі негізгі жылуөткізгіштік механизмі бар: еркін электрондар (электронды жылуөткізгіштік $\lambda_{эл}$) және атомдардың тербелістері (фононды немесе торлық жылуөткізгіштік $\lambda_{фон}$) арқылы жылу тасымалдау.

$$\lambda = \lambda_{эл} + \lambda_{фон} . \quad (10)$$

Фононды жылуөткізгіш диэлектриктерге, ал электронды жылуөткізгіштік металдарға тән. Диэлектриктер мен металдарға қарағанда шалаөткізгіштердегі жылу тасымалдау құбылысы өте күрделі. Мұнда аталған екі жылуөткізгіштік механизмі орындалады, сонымен қатар қоспалардың әсері мен

экситондардың жылу тасымалдауы мен басқа факторлар сөз етіледі.

Экситон (ағыл. *excitation-қозу*) нақты өмір сүретін квазибөлшек. Экситон - электр заряды мен массасын тасымалдамайтын, кристалдағы квантты электрондар қозуын көшіреді. Металдардағы торлық жылуөткізгіш мына өрнекпен сипатталады:

$$\lambda_{\text{фон}} = 2,41 r c_v (E \cdot \rho)^{1/2}, \quad (11)$$

мұндағы r – атомдар арасындағы қашықтық; c_v – меншікті изохорлық жылусыйымдылық; E – Юнг модулі; ρ – тығыздық.

Металдардың электронды жылу өткізгішінің температураға тәуелділігі мынадай заңдылықтардан тұрады:

- $\lambda_{\text{эл}} \sim T$, $T = 0\text{K}$ -ге жақын температурада;
- $0 < T \ll \Theta_D$, $\lambda_{\text{эл}} \sim 1/T^2$ орташа төменгі температуралар аралығында;

- $T \gg \Theta_D$, $\lambda_{\text{эл}} \sim \text{const}$ жоғарғы температурада.

Берілген қатты дененің тербеліс модаларының бәрі қозатын температура $\Theta_D = \hbar \nu_{\text{макс}} / k$ ($\nu_{\text{макс}}$ – қатты дене атомдары тербелісінің максимал жиілігі, k – Больцман тұрақтысы) Дебай температурасы деп аталады. Ары қарайғы температураның өсуі жаңа тербеліс модаларына әкеліп соқпайды, ал сондағы бар амплитуданың өсуін тудырады, яғни тербелістің орташа энергиясы температура өскен сайын артады. Дебай температурасы заттың қасиетіне байланысты. Көптеген қатты денелер үшін ол $100\text{K} \div 1000\text{K}$ -ге тең, бірақ бериллий ($\Theta_D = 1440\text{K}$) және алмас үшін ($\Theta_D = 2230\text{K}$) ол атомаралық байланыс қатаңдығының жоғарылауына ұқсас. Θ_D константасы жуық шамамен шекті көрсетеді, одан төменде квантты эффектілер туралы сөз етіледі.

Электронды жылуөткізгіштік жоғары температурада өте жақсы орындалады. Металдардың жылуөткізгіштігі шала өткізгіштермен салыстырғанда жоғарғы екендігі электронды жылуөткізгіштікпен түсіндіріледі. Аса төменгі температурада

торлық жылуөткізгіштік орындала бастайды, ал төменгі температурада торлық жылуөткізгіштік өте аз болып, электронды жылуөткізгіштік орындала бастайды.

1.5. Жылулық кедергі

Жылуөткізгіштік құбылысын қарастыру барысында екі түсінік енгізіледі: γ меншікті электр өткізгіштік және $\rho = 1/\gamma$ меншікті электр кедергісі.

Жылуөткізгіштік құбылысына ұқсас λ жылуөткізгіштік шамасынан бөлек жылулық кедергі $\omega = 1/\lambda$ деген ұғымды енгізуге болады.

Газдарда жылу молекулалар қозғалысымен тасымалданса, ал кристалдарда фонондар қозғалысымен тасымалданады. Нәтижесінде торлық жылу кедергі кристалдық тор ақауларындағы (коспалар) фонондардың шашырауымен, электрондар мен басқа фонондар арқылы жүзеге асады. Электронды жылу кедергісі электрондар, фонондар, коспалар, ақауларда электрондардың шашырауымен жүзеге асады.

1.6. Фурье заңы

Жылуөткізгіштік – дененің температура айырмасы бар нүктелері арасында бір нүктеден екінші нүктеге жылу энергиясын жеткізу қасиеті; дененің температурасы жоғары жақтан температурасы төмен жағына қарай жылу өткізу қабілеті. Егер ортада температура градиенті бар болса, онда жоғары температуралық аймақтан төменгі температуралық аймаққа жылу тасымалданады. Жылу тасымалдау жылдамдығы жылуөткізгіштіктің әсерінен $\partial T / \partial n$ температура градиенті мен жылу ағыны арқылы өтетін S ауданға пропорционал және ортаның жылуфизикалық сипаттамасы λ - жылуөткізгіштік коэффициентіне тәуелді. Фурье гипотезасына орай жылу тасымалдау жылдамдығын сандық қатынас арқылы өрнектеуге болады:

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \cdot S. \quad (12)$$

Минус таңбасы термодинамиканың екінші бастамасына орай, жылу ағыны температураның төмендеу бағытына қарай бағытталғанын білдіреді. Егер $\vec{n}$ нормал векторының абсолют мәнінің өсу бағытында температура төмендесе, онда $\partial T / \partial n$ градиенті теріс болады. (7) қатынас Фурьенің жылуөткізгіштік заңы деп аталады. Егер аудан квадрат метрмен, температура Кельвинмен, ал жылу ағыны Ваттпен берілсе, онда λ -ның өлшем бірлігі Вт/(м·К) болады.

$$\lambda = \rho v_{\text{зв}} \langle l_{\text{фон}} \rangle c_v / 3, \quad (13)$$

мұндағы ρ – тығыздық, c_v – тұрақты көлем кезіндегі жылу сыйымдылық, $v_{\text{дыб}}$ – қатты дененің дыбыс жылдамдығы, $\langle l_{\text{фон}} \rangle$ – фонондардың орташа еркін жүру жолы.

Жылуөткізгіштік коэффициентін теориялық жолмен есептеуге болмайды. Сондықтан әртүрлі материалдардың жылуөткізгіштік коэффициенті туралы мәліметтер тәжірибе нәтижелері негізінде алынған. Көп жағдайда тәжірибенің негізі жылу ағыны мен берілген заттың температура градиентін өлшеу болып табылады. Осыдан барып жылуөткізгіштік коэффициенті мынадай өрнекпен анықталады:

$$\lambda = \frac{|q|}{|\text{grad} T|}. \quad (14)$$

(14) өрнектен бірге тең температуралық градиент кезінде бірлік уақытта изотермиялық бет арқылы өтетін жылуөткізгіштік коэффициенті сандық түрде жылу мөлшеріне тең.

Көптеген материалдар үшін жылуөткізгіштік коэффициенті тұрақты шама болып табылмайды, ол тек температураға тәуелді болады. Әдетте, бұл тәуелділікті белгілі температура интервалында сызықтық функциямен аппроксимациялауға болады, мысалы $273\text{K} \leq T \leq 373\text{K}$

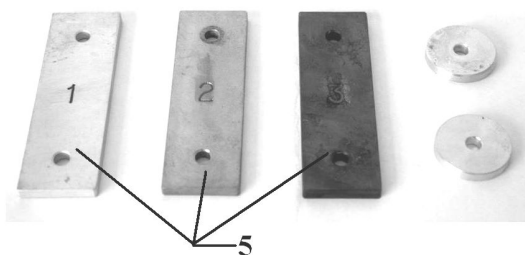
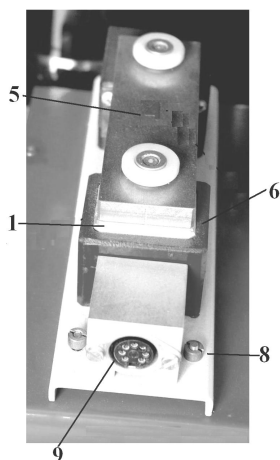
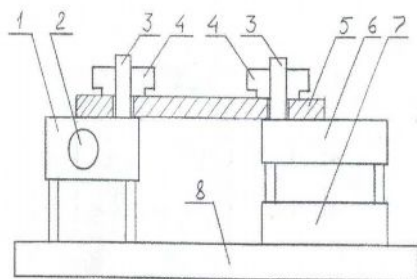
$$\lambda(T) = \lambda_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)], \quad (15)$$

мұндағы λ_0 – T_0 сипаттамалық температурсына сәйкес жылуөткізгіштік коэффициентінің, α_0 – тәжірибе жүзінде анықталынатын эмпирикалық тұрақты, (кестеден алынады).

1.7. «Металдардың жылуөткізгіштігі – 02» модулімен танысу

“Металдың жылуөткізгіштігі – 02 модулі” (3-сурет) 2 жылу шығаратын элементі бар қыздырғыштан (1) және желдеткіші (7) бар радиатордан (6) тұрады. Зерттелетін үлгілер-металл пластина (5) қыздырғышқа бекітіледі және бұранда (4) мен винттің (3) көмегімен радиатор мен қыздырғышқа бекітіледі. Винттер ішінде температура датчиктері бар: радиаторда Д2 және қыздырғышта Д1 орналастырылған. Бұрандалар қыздырғышпен датчиктерге және суыған үлгі-пластинаның шеттерін де жылулық контактымен қамтамасыз етеді. Модульдің барлық элементтері негізгі тұрақта (8) орналасқан. Қыздырғыш, желдеткіш және датчиктер (9) қосқышпен ИСТ-4 өлшеу жүйесіне жалғанады.

Үлгінің жылуөткізгіштігін анықтау үшін қыздыру қуаты мен 60 мм қашықтықтағы үлгінің екі нүктесінің қалыптасқан температура айырымын өлшеу керек (бұл үлгісі бар Д1 және Д2 датчиктердің нүктелермен түйісуінің арасындағы эффективті қашықтық). Үлгідегі жылулық қуатты анықтау үшін қоршаған орта қуатының шығынын анықтау керек. Ол үшін қыздырғыштағы үлгінің орнына алюминий шайбалы сақина бекітіледі (диаметрі 30 мм, қалыңдығы 5 мм), сонан соң жылуөткізгішті өлшеу режиміне сәйкес T_1 температурада қыздырғышты термотұрақтандыру керек. Қыздырғыштағы үлгі арқылы жылу алмасу жоқ кезде, бізге қажет тұрақтанған температураны ұстап тұрған кернеу мен ток күшін өлшеп, қуатты анықтайды.



3-сурет. «Металдың жылуөткізгіштігі – 02» модулі

Үлгі мен пластиналарда нөмір көрсетілген, оның қандай материалға сәйкес екені оқу құралы құрамындағы тізімде көрсетілген. Осылай құралдағы кез келген үлгіні зерттеуге болады.

2. Жұмыстың орындалу тәртібі

1. «Металдың жылуөткізгіштігі – 02» модуліндегі зерттелетін пластинаны пештің үстіне қойыңыздар. Жылулық контакт болу үшін пеш мен радиатор үстіне 2–3 тамшы және бұрандамен түйіскен пластиналар арасына 1 тамшы глицерин тамызыңыздар.

2. Модульді *ИСТ-4*-ке жалғаңыздар. *ИСТ-4* қосқанда модуль радиаторының маңындағы желдеткіш автоматты түрде

қосылады. " $\infty/\sim$ " тумблерден айнаымалы кернеу беріңіздер, ол үшін " $\sim$ " (айнаымалы) жағдайына қойыңыздар.

3. Термостаттың "Т1" реттегішін 70°C -қа қойыңыздар.

4. "Сеть" және "вкл" тумблерлерін жоғары жағдайға келтіріп, қыздырғышты қосыңыздар.

5. Пеш қыздырғышының кедергісін анықтаңыздар. Пешке 5–6Вт кернеу береміз де, I_0 ток пен U_0 кернеуді өлшеп, пешті қыздырған кездегі $R=U_0/I_0$ кедергіні анықтаңыздар. Тізбек кедергісі R белгілі болса, кернеуді (U_H) алдын-ала беріп, керекті қыздыру қуатын $P=U^2/R$ анықтаңыздар.

6. Қыздыру қуатын белгілеңіздер: алюминий білігі үшін – 14–16 Вт, латун мен болат үшін – 8–10 Вт. Ол үшін қыздыру кернеуі алюминий білік (стержень) үшін $-U_{H1}=\sqrt{14 \cdot R}$, ал латун мен болат үшін $-U_H=\sqrt{8 \cdot R}$ болады.

7. T_1 температура датчигінің көрсетуін қадағалап отырыңыздар. T_1 температура 70° -тан төмен болғанда жасыл индикатор жанып тұрады. Ал T_1 температура 70° -тан асқанда қызыл индикатор жанады. Екі индикатордың жануын күтіңіздер: қызыл және жасыл – бұл температураның тұрақтанғанын білдіреді. T_1 температура тұрақтанғаннан кейін, оның көрсетуін жазып алыңыздар.

8. Температураны (қара бұрағышпен) "Т1" жағдайына қойғанда, сандық индикатор пластинаның ең ыстық температурасын көрсетеді, ал температураны "Т2" жағдайына қойғанда, сандық индикатор пластинаның ең суық температурасын көрсетеді. 1–3 минут аралығында T_1 мен T_2 -ің мәндерін жазып алыңыздар. T_2 -нің тұрақтануын күтіңіздер (T_2 - ің өсуі минутына 0,2 градустан аспау керек, бұл 10–20 минуттан кейін болады). $\Delta T=T_1-T_2$ теңдігімен температураның тұрақтанған мәндерін табыңыздар.

9. U_H пен I_H -тің көрсеткен мәндерін жазып, ΔT температураның тұрақтанған мәндеріне сәйкес қыздыру қуатын мынадай формуламен анықтаңыздар:

$$P = U_H \cdot I_H$$

10. Қуаттың шығынын P' анықтаңыздар. Ол үшін пластинаны шайбаға ауыстырыңыздар, пешті T_1 -дің тұрақтанған мәніне жақын T_1' температурасына термотұрақтандырыңыздар. U_H' пен I_H' -тің көрсеткен мәндерін жазып, қуаттың шығынын $P' = U_H' \cdot I_H'$ анықтаңыздар.

$T_1' = \underline{\hspace{1cm}} \text{ } ^\circ\text{C}$, $U_H' = \underline{\hspace{1cm}} \text{ В}$, $I_H' = \underline{\hspace{1cm}} \text{ мА}$, $P' = U_H' \cdot I_H' = \underline{\hspace{1cm}} \text{ Вт}$.

11. Датчиктер арасындағы қашықтықты және пластинаның көлденең қимасының ауданын біле отырып, материалдың жылуөткізгіштік коэффициентін мынадай формуламен анықтаңыздар:

$$\lambda = \frac{(P - P') \cdot h}{S(T_1 - T_2)}, \quad (16)$$

мұндағы T_1 – қызған үлгінің температурасы (қыздырғышпен жанасқан), T_2 - суыған үлгінің температурасы (радиатормен жанасқан), $h=60$ мм датчиктер арасындағы қашықтық.

1-кесте

Металдың жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау

t , мин-с	T_1 , $^\circ\text{C}$	T_2 , $^\circ\text{C}$	ΔT , $^\circ\text{C}$	U_H , В	I_H , мА	P , Вт	λ , Вт/м·К
0-00							
1-							
3-							
5-							
7-							
9-							
11-							
13-							
16-							
20-							

Металл үлгілерінің параметрлері	
Алюминийлі пластина	"1", көлденең қимасының ауданы $S=4,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Жез пластина	"2", көлденең қимасының ауданы $S=4,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Болат пластина	"3", көлденең қимасының ауданы $S=5,7 \times 30 \text{ мм}^2$
Тот баспайтын болат пластина	"4", көлденең қимасының ауданы $S=7,9 \times 30 \text{ мм}^2$
Жылу шығынын өлшейтін шайба диаметрі 30 мм, қалыңдығы 5 мм.	

ДИЭЛЕКТРИКТЕРДІҢ ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК КОЭФФИЦИЕНТІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: қатты диэлектриктің жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.

1. Теориялық кіріспе

Егер қатты дененің әртүрлі бөліктерінде температура айырымы болатын болса, онда газдар мен сұйықтықтарда жылу температурасы жоғары бөліктен температурасы төмен бөлікке тасымалданады.

Қатты дененің газдар мен сұйықтықтардан айырмашылығы, онда конвекция болмайды, яғни жылумен бірге зат массасы тасымалданбайды. Сондықтан қатты денелерде жылу алмасу тек жылуөткізгіштікпен жүзеге асады.

Қатты денелердегі жылу алмасу механизмі ондағы жылулық қозғалыс нәтижесінде болады. Қатты дене жылулық тербеліс жасайтын атомдар немесе молекулалар жиынтығынан тұрады. Дененің температурасы жоғары аймақта бөлшектің жылулық тербелісі интенсивтірек болады. Бірақ бұл тербелістер бір-біріне тәуелді емес, өйткені бөлшектер бір-бірімен серпімді

күштермен байланысқан. Бөлшектердің тербелісінің күшеюі серпімді байланыс әсерінен (дыбыс жылдамдығы бар) басқа бөлшектерге беріледі. Денедің тербеліс энергиясын тасымалдайтын толқын пайда болады. Мұндай тербелістің таралуы жылу ауысуын жүзеге асырады.

Кез келген заттарда жылу тасымалдау мөлшері бірдей сипатталады. Егер бірлік аудан қимасы арқылы бірлік уақытта оның бетіне перпендикуляр q жылу мөлшері тасымалданса, онда ол температура айырымына тәуелді Фурьенің тасымалдау теңдеуі арқылы анықталады:

$$q = \lambda \frac{dT}{dx}, \quad (1),$$

мұндағы dT/dx – x осі бағытындағы температура градиенті, ал q шамасы жылу ағыны деп аталады (жылудың - таралу бағытына перпендикуляр бірлік аудан арқылы бірлік уақытта тасымалданатын жылу мөлшері, λ жылуөткізгіштік коэффициенті деп аталады. Мұндағы " – " температура градиентінің төмен температурадан жоғары температураға, керісінше жылу ағынының жоғары температуралы нүктеден төменгі температуралы нүктеге бағытталуын білдіреді.

1.1. Фонондар

Кванттық теорияның көмегімен қатты денелердің жылуөткізгіштік коэффициентін жуықтап шешуге болады.

Кванттық теория қатты денелерде дыбыс жылдамдығымен тербелетін жалған (фиктивті) бөлшектер-фонондар таралуын қарастырады. Кванттық физикада әрбір бөлшек тербеліс жиілігі мен Планк тұрақтысы көбейтіндісіне тең энергиямен сипатталады. Фонон энергиясы $h\nu$ (h – Планк тұрақтысы) тең. Энергиясы $nh\nu$ күйді қарастыратын болсақ, бұл күйде $h\nu$ энергия мен $\hbar\vec{k}$ импульске ие (мұндағы $\vec{k}$ – толқындық вектор) n квазібөлшектер – фонондар бар.

Егер фонондар туралы көзқарасты қолдансақ, онда кристалл атомдарының тербеліс энергиясын жеке фонондар

энергиясының қосындысынан тұрады деп есептейміз. Фонондардың нақты бөлшектерден негізгі ерекшелігі, олар кристалдың тек ішінде ғана бола алады. Фотондар, электрондар немесе басқа бөлшектер сияқты фонондар вакуумда өмір сүре алмайды. Бірақ олар негізгі сақталу заңдарына бағынып, кристалл кеңістігінде энергия мен импульс тасымалдайтын бүтін спині (бозондар) бар кванттық нақты бөлшектер сияқты болады. Абсолют нөл температурада фонондар саны өте аз, температураның артуына байланысты, сызықты емес күрделі заңдылықпен олардың саны артады (төменгі температура кезінде температура кубына пропорционал).

Қатты денені ішіне газ фонондары толтырылған ыдыс ретінде қарастырайық. Бұл газ өте жоғары емес температураларда идеал деп есептелінеді. Газ температурасы жоғары болмаған кезде бұл фонондарды идеал газ молекулалары ретінде қарастыруға болады. Кәдімгі газдар сияқты фонондық газдарда жылу тасымалдау атом торларымен фонондардың соқтығысуы арқылы жүзеге асады деп есептесек, фонондар үшін идеал газдардың жылуөткізгіштік коэффициентін есептеу теориясын пайдалануға болады. Сондықтан қатты денелердің жылуөткізгіштік коэффициенті мынадай:

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho c_v l_\phi v_\phi \quad (2)$$

мұндағы ρ – дене тығыздығы, c_v – меншікті жылусыйымдылық, ал v_ϕ – фонондардың орташа жылдамдығы, яғни дыбыс жылдамдығы. Фонондардың еркін жүру жолының l_ϕ ұзындығын есептеу өте күрделі. Егер λ , c_v және v_ϕ кристалдар үшін тәжірибе нәтижелері белгілі болса, онда l_ϕ табуға болады. Кварц пен ас тұзы үшін 273 К температурада фонондардың еркін жүру жолының ұзындығы шамамен $4 \cdot 10^{-9}$ м және $2,3 \cdot 10^{-9}$ м тең.

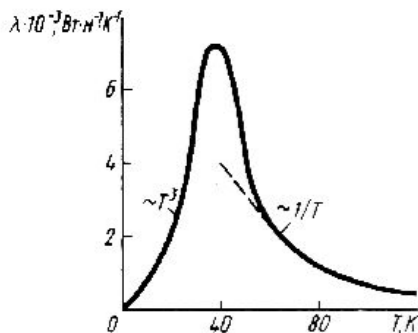
Жоғары температура аймағында c_v температураға T мүлде тәуелді емес. Өйткені фонондардың бір-біріне шашырауы байқалады, еркін жүру жолының ұзындығы фонондардың n_ϕ концентрациясына кері пропорционал. $n_\phi \sim T$ болса, жылуөткізгіштік коэффициенті температураға кері пропорционал болуы тәжірибемен үйлеседі.

Температура төмендегенде фонондар концентрациясы да азаяды, нәтижесінде олардың еркін жүру жолының ұзындығы өсіп, кристалл өлшемінің мәніне дейін жетеді. Дебай теориясына сай төменгі температурада меншікті жылу сыйымдылық келесі теңдеумен анықталады:

$$c_V = \frac{12\pi^4}{5M} kT \left(\frac{kT}{h\nu_{\max}} \right)^3, \quad (3)$$

мұндағы M – заттың бір молінің массасы, k – Больцман тұрақтысы, $\nu_{\max}$ – серпімді тербелістердің шекті жиілігі.

Сонымен төменгі температуралар аймағында жылу-өткізгіштік коэффициенті T^3 пропорционал және ол тәжірибе нәтижелерімен үйлеседі. 1-суретте жасанды сапфирдің жылу-өткізгіштік коэффициентінің температураға тәуелділігі көрсетілген.



1-сурет. Жасанды сапфирдің жылуөткізгіштік коэффициентінің температураға тәуелділігі

1.3. Жылуөткізгіштік коэффициентін өлшеу

Жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау үшін (1) теңдеу бойынша уақыт бірлігінде дененің бірлік көлденең қимасы арқылы ағатын q жылу мөлшері мен дене бойындағы температура градиенті арқылы анықтауға болады.

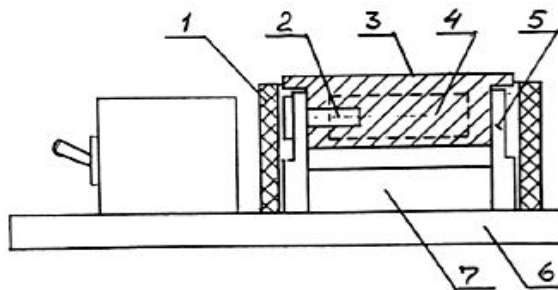
$$\lambda = - \frac{q}{dT/dx} . \quad (4)$$

Жылусыйымдылықты өлшеудегі сияқты бұл өлшеулерді жүргізгенде біршама қиындықтар кездеседі. Екі жағдайда жылу мөлшері мен температура өзгерісін анықтау қажет. Бұл жағдайларда жылу мөлшері толық анықталмайды, яғни оның сыртқа кеткен бөлігі есепке алынбайды. Жылуөткізгіштік зерттелініп отырған денеде барлық жылу ол арқылы берілмейді, жылудың біразы бүйір қабырға жақтары арқылы қоршаған ортаға беріледі, сондықтан жылуөткізгіштікті өлшегенде басты назарды кеткен қателіктерге аударған жөн.

1.4. Қондырғы сипаттамасы және өлшеу әдісі

Диэлектриктерде жылуөткізгіштік процестерін зерттеу үшін «Пеш-термостат» модулі қолданылады (2-сурет).

«Пеш-термостат» модулі жылу қорғайтын қабықпен (кожух) қоршалған (1) және негізгі тұраққа бекітілген пешке (5) орналастырылған аспаптан (6) тұрады. Пешке екі жылу беретін элемент (4) және температура датчигі (2) орналастырылған. Пештің асты желдеткішпен (7) салқындатылады. Зерттелетін (қыздырылатын) нысан пеште орналастырылады, суық калориметрмен қысылады және екі серіппесі бар білікке нықтап бекітіледі.

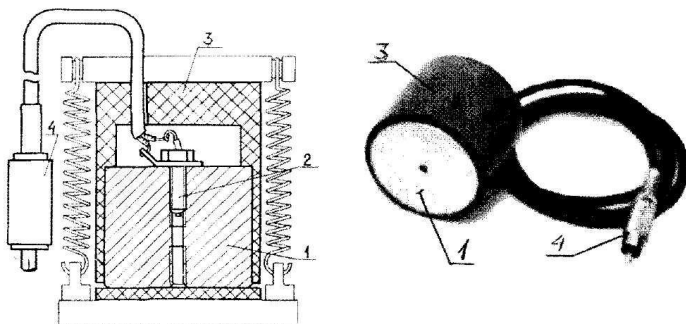


2-сурет. «Пеш-термостат» модулінің сұлбасы

1.5. «Балласты калориметр – 03» модулімен танысу

«Балласты калориметр – 03» модулі (2-сурет) диэлектриктердің жылуөткізгіштігін өлшеуге арналған. Ол алюминий цилиндрден (1), температура датчиктерінен (2) және қабықтан (кожух) (3) тұрады. ИСТ-4 өлшеу жүйесіндегі Д2 датчик кірісі қосқышпен (разъем) (4) жалғанады.

Алдымен бос пешті 60-80⁰С (T₀) температураға дейін қыздырып, термотұрақтандырады.



3-сурет. «Балласты калориметр – 03» модулі

Сосын зерттелінетін нысанды (диск) қызған пешке қояды, яғни нысанның төменгі жағы тұрақты жоғары температурада болады.

Оның үстіне балласты калориметрді орналастырып, серіппесі бар білікпен бекітіп қояды. Нысанның жоғары бөлігінде біртіндеп өсе бастаған температураның көрсетуін жазып отыру керек. Қызған пешпен тікелей түйісіп тұрғандықтан, зерттелетін дененің төменгі бөлігінің (бетінің) температурасы өте тез қызады.

Осындай жағдайда нысан арқылы өткен жылу мөлшері:

$$Q = \lambda \frac{T_0 - T_{kl}}{h} S \cdot \Delta t, \quad (5)$$

мұндағы h – зерттелетін нысанның қалыңдығы, S – оның табанының ауданы. Бұл жылу мөлшері үлгінің жоғары бөлігінің және калориметрдің T_{k1} температурадан T_{k2} температураға дейін қызуына алып келеді, яғни жылу мөлшерін келесі түрде жазуға болады:

$$Q = C (T_{k2} - T_{k1}), \quad (6)$$

мұндағы C – калориметрдің жылусыйымдылығы. Жылу-өткізгіштік коэффициенті үшін (5) мен (6) өрнектерден төмендегі формуланы аламыз:

$$\lambda = C \frac{T_{k2} - T_{k1}}{S(T_0 - T_{k1}) \Delta t} h, \quad (7)$$

мұндағы T_0 – пеш температурасы, Δt – калориметрдің бастапқы (T_{k1}) және соңғы (T_{k2}) өлшеген температурасына кеткен уақыт интервалы немесе $\Delta t = t_{\text{оас}} - t_{\text{сон}}$ (сәйкесінше,

$\Delta T_k = T_{k2} - T_{k1}$, T_{k1} – калориметрдің бастапқы және T_{k2} – калориметрдің соңғы температуралары).

Балласты калориметрдің параметрлері: жылусыйымдылық $C=125$ Дж/К, цилиндр табанының ауданы $S = 18,0$ см². Қондырғы нөмірі калориметрдің жоғарғы қабырғасына жазылған.

2. Эксперименталдық бөлім

1. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «ОБЪЕКТ»-ін пешке қосқышпен (разъем) жалғаңыздар.

2. Жылулық жанасу болу үшін пештің үстіне 2 тамшы глицерин тамызыңыздар (3-сурет) және термостаттың пешіне балласты калориметрді қойыңыздар. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің Д2 кірісін калориметр датчигімен жалғаңыздар. Алдымен T_0 пеш температурасы мен $T_{к0}$ калориметр температурасын өлшеңіздер. Сандық индикаторды датчикке қосып, пеш температурасын өлшеу

«Т1» қосқышы арқылы жүзеге асады. Сандық индикаторды датчикке қосып, калориметр температурасын өлшеу «Т2» қосқышы арқылы жүзеге асады. $\delta T = T_0 - T_{к0}$ айырымы температураны өлшеудегі жүйелік қателікті береді.

1-кесте

Диэлектриктің жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау
 $T_0 = \text{___}^\circ\text{C}$, $T_{к0} = \text{___}^\circ\text{C}$, $C = 125 \text{ Дж/К}$, $S = 18,0 \text{ см}^2$

№	t, мин.	$T_0, ^\circ\text{C}$	$T_{к}, ^\circ\text{C}$	$\frac{\Delta T_k}{\Delta t}, \text{ К/с}$	$\lambda, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\lambda_{ср}$	$\Delta\lambda$	$\varepsilon, \%$
0								
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

3. Пештен калориметрді алып, калориметр мен пештегі глицеринді *майлықпен* сүртіп алыңыздар.

4. Қондырғыны ток көзіне қосып, (тумблердегі «сеть»-ті жоғары жағдайға келтіріңіздер) пеш қыздырғышын қосыңыздар (тумблердің «вкл»-ін жоғары жағдайға келтіріңіздер). Үсті бос пешті 70°C температураға дейін термотұрақтандырыңыздар. («Т2» термотұрақтандыру реттегішін $60\text{--}80^{\circ}\text{C}$ температураға қойыңдар). Сол кезде температура реттегішінің жанындағы шам жасыл болып жануы керек. Тұрақтану (термотұрақтандыру) режиміне өту үшін 5–7 минут уақыт кетеді, ол нысан температурасының өсуі тоқтап термотұрақталады. Сол кезде температура реттегішінің жанындағы қызыл және жасыл екі индикатор жанады.

5. Диэлектрлік диск диаметрін мен оның қалыңдығын өлшеңіздер. Ең алдымен шамалы жылу өткізгіштігі бар дискіні таңдаңыздар (пенопласт, картон, ағаш). Пешке глицерин жақпай тұрып, осы материалдардың ылғал жұтқыштығын ескерген жөн.

6. Қызған пеш плитасына диэлектрик үлгіні (пластинканы) қойып, оның жоғары жағына суық калориметр кигізіңіздер және серіппесі бар білікпен бекітіп қойыңыздар.

7. Пеш пен калориметр температурасын әрбір 60 секунд сайын 10 минут аралығында өлшеңіздер. Ол үшін ауыстырғышты кезек-кезек «Т1» (сандық индикатор пештің температура датчигіне жалғанады) немесе «Т2» жағдайына (сандық индикатор калориметрдің температура датчигіне жалғанады) ауыстырып өлшеу керек. Нәтижелерді кестеге жазыңыздар.

8. (7) теңдеуді пайдаланып, үлгінің λ жылуөткізгіштігін анықтаңыздар.

9. Пешті өшірмей, серіппе мен білікте бекітіліп тұрған калориметрді босатыңыздар. Калориметр мен зерттелген диэлектрлік дискіні алыңыздар.

ЕСКЕРТУ: бұл заттар өте ыстық болуы мүмкін, сондықтан пештен алғанда қолмен ұстауға болмайды.

Калориметрді бөлме температурасына дейін суытыңыздар. 2–8 пункттерді барлық дискілер үшін қайталаңыздар. Жылуөткізгіштігі төмен ылғал жұтқыш материалдарды зерттеп болған соң, текстолит пен шыны дискілеріне өту керек.

Жылуөткізгіштігі жоғары материалдармен жұмыс жасағанда пеш пен балласты калориметрдің жылулық контактысы жақсы болу керек, ол үшін пешке 1–2 тамшы глицеринді тамызған жөн.

10. Барлық өлшеулерді жүргізіп болған соң, «вкл» тумблерін төменгі жағдайға келтіріп пешті өшіріңіздер де қондырғыны сөндіріңіздер. Пеш суыған соң, глицерин қалдықтарын жақсылап сүртіңіздер.

(7) теңдеумен барлық зерттелген материалдар үшін жылуөткізгіш коэффициентін есептеңіздер.

11. Алынған нәтижелерге статикалық өңдеу жасаңыздар.

Балласты калориметрдің параметрлері: $C=125 \text{ Дж/К}$, $S=18,0 \text{ см}^2$

Диэлектрлік үлгілердің параметрлері:

Картонды диск	диаметрі	51,7	мм,
қалыңдығы 3,5мм			
Пенопласты диск	диаметрі	52,0	мм,
қалыңдығы 2,22мм			
Текстолитті диск	диаметрі	51,6	мм,
қалыңдығы 3,14мм			
Шыны диск	диаметрі	45,0	мм,
қалыңдығы 4,53мм			

ҚЫЗДЫРЫЛҒАН ҚЫЛ СЫМ ӘДІСІМЕН АУАНЫҢ ЖЫЛУӨТКІЗГІШТІК КОЭФФИЦИЕНТІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: қыздырылған қыл сым әдісімен ауаның жылуөткізгіштік коэффициентін тәжірибе жүзінде анықтау.

1. Қысқаша теориялық кіріспе

1.1. Жылу алмасудың түрлері

Кез келген термодинамикалық жүйе, оның күйінен ғана тәуелді қосалқы U ішкі энергия қорына ие. Жүйенің ішкі энергиясы бөлшектердің (молекулалар, атомдар, атомдағы электрондар, ядродағы нуклондар) сан түрлі қозғалыстары энергиясынан және олардың бір-бірімен әсерлесу энергиясынан тұрады. Молекулалар мен атомдар құрамы өзгермейтін термодинамикалық процестерде жүйенің ішкі энергиясы оның температурасы мен көлемі арқылы өрнектеледі, яғни $U = f(T, V)$.

Егер әртүрлі денелер немесе бір дененің әртүрлі бөліктерінің температуралары бірдей болмаса, онда олардың арасында ішкі энергияның алмасуы болады. Бұл процесс жылу алмасу деп аталады, ал жылу алмасу кезіндегі берілген ішкі энергия мөлшері жылу деп аталады.

Жылу алмасу өздігінен болады және термодинамиканың екінші заңына сәйкес жылу барлық уақытта қаттырақ қыздырылған денеден аз қыздырылған денеге берілуімен сипатталады.

Жылу алмасудың үш түрі бар – жылулық сәулелену, конвекция және жылуөткізгіштік. Жылулық сәулеленуде энергия бір денеден екінші денеге электромагниттік толқындар арқылы беріледі, сондықтан шоқтық жылу алмасу қандайда бір ортада ғана емес, вакуумда орналасқан екі денелер арасында болуы мүмкін. Жылулық сәулелену негізінен спектрдің инфрақызыл алқабына келеді, яғни $0,74$ мкм-ден 10^3 мкм-ге дейінгі толқын ұзындықтарына.

Конвекция – заттың қозғалысына байланысты өтетiн жылу тасымалы. Конвекция газдар мен сұйықтықтарда жүредi.

Конвекциялық жылу алмасуда аз тығыздыққа ие ортаның көп қызған бөлiгi жоғарыға көтерiледi, ал суықтары төменге түседi. Зат тасымалымен қатар энергия тасымалы да жүредi, ол жоғары дәрежеде жылу алмасу процесiн үдетедi.

Егер қыздыруды төменнен бастаған жағдайда, конвекция тек газдар мен сұйықтықтарда ғана болады.

Жылуөткiзгiштік – бұл дененiң бей-берекет қозғалатын бөлшектерiмен жүзеге асырылатын, дененiң қаттырақ қызған бөлiгiнен азырақ қызған бөлiгiне (немесе денеге) энергия тасымалдау процесi болып табылады. Газдарда, сұйықтықтарда және қатты диэлектриктерде осындай бөлшектер атомдар мен молекулалар болып табылады.

Бiрақ энергия тасымалдаудың атомды-молекулалық сипаты барлық денелерде жылуөткiзгiштiң ерекше сипаты болып табылады. Әртүрлi агрегатты күйлердегi жылуөткiзгiштік механизми атомдар мен молекулалардың жылулық қозғалыс сипатының әртүрлiлiгiне байланысты.

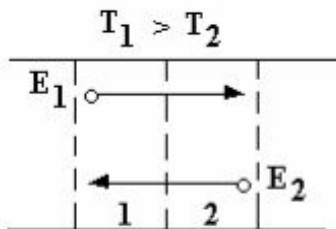
Нақты жылулық процестерде, ереже бойынша, жылу алмасу бiр мезгiлде үш әдiспен жүзеге асады.

1.2. Газдардағы жылуөткiзгiштік

Газдардағы жылуөткiзгiштік механизми келесiдей: әрбiр қабаттағы молекулалар қабат температурасына тәуелдi әртүрлi орташа кинетикалық энергияға ие. Молекулалар iлгерiмелi қозғала отырып, бiр қабаттан екiншi қабатқа энергияны тасымалдап, үздiксiз секiрiп отырады. Егер қандай да бiр молекула 1 қабаттан 2 қабатқа өтетiн болса (1-сурет), онда ол 2 қабатқа энергия тасымалдайды:

$$E_1 = \frac{i}{2} kT_1, \quad (1)$$

мұндағы i – молекуланың еркіндік дәрежесінің саны, k – Больцман тұрақтысы, T_1 – 1 қабат температурасы.



1-сурет. Газдардағы жылуөткізгіштің жылу тасымалдау механизмі.

Молекула 2 қабаттан 1 қабатқа өткенде, осы қабатқа

$$E_2 = \frac{i}{2} kT_2 \quad (2)$$

энергия тасымалдайды. Егер $T_1 > T_2$ болса, онда 2 қабаттың энергиясы артады, 1 қабаттың энергиясы кемиді. Олай болса, молекулалардың ілгерімелі бей-берекет қозғалысы газ қабаттарының арасындағы ішкі энергияның алмасуына, яғни температураның төмендеу бағытындағы жылу тасымалына алып келеді.

1.2. Фурье заңы

Жылуөткізгіштің негізгі заңына (Фурье заңына) сәйкес ОХ (q_x) осі бойындағы жылу ағынының тығыздығы, кері таңбамен алынған (dT/dx) температура градиентіне пропорционал:

$$q_x = -\lambda \frac{dT}{dx}. \quad (3)$$

Формулаға қарағанда оның өлшем бірлігі [Вт/м·К]. Жылуөткізгіштік коэффициенті λ дененің табиғатына, құрылымына тәуелді және әр затқа тәуелді меншікті физикалық шама. Сонымен қатар жылуөткізгіштік коэффициенті қысымға, ылғалдылыққа, температураға т.б. факторларға тәуелді. Осылардың ішінде жылуөткізгіштік коэффициенті темпера-

тураға тәуелділігі өте маңызды екені түсінікті. Ол сан жағынан жылу ағынының тығыздығына, яғни температура градиенті бірге тең кезінде, бірлік уақытта жылу тасымалдау бағытына перпендикуляр бірлік аудан арқылы өтетін жылу мөлшеріне тең шама.

Идеал газ моделі үшін жылуөткізгіштік коэффициенті мынаған тең:

$$\lambda = \frac{1}{3} n l_{cp} \rho c_V = \frac{2}{3\pi} \frac{\sqrt{\pi m k T}}{\pi \sigma^2} c_V, \quad (4)$$

мұндағы n – газ молекулаларының жылулық қозғалысының орташа жылдамдығы, l_{op} – молекулалардың еркін жүру жолының орташа ұзындығы; ρ – газ тығыздығы; c_V – тұрақты көлем кезіндегі газдың меншікті жылусыйымдылығы; m – газ молекуласының массасы; k – Больцман тұрақтысы; T – абсолют температура; σ – молекуланың эффективті диаметрі. Нақты теория мынадай нәтижеге алып келеді:

$$l_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{n \sigma^2}, \quad u = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}, \quad (5)$$

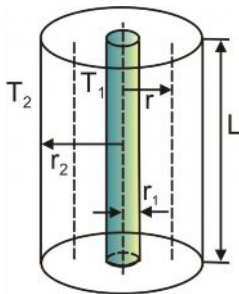
мұндағы n – молекулалар концентрациясы немесе бірлік көлемдегі молекулалар саны. Соңғы екі тендеуден $l \cdot \rho$ көбейтіндісі қысымға тәуелсіз екені көрініп тұр, ал $u \sim \sqrt{T}$ және ол да қысымға тәуелсіз, сондықтан, жылуөткізгіштік (жылуөткізгіштік коэффициенті) қысымға тәуелсіз және шамамен температураның квадрат түбіріне тура пропорционал өседі. Тәжірибе қатты зарядталмаған газдар үшін бірінші қорытындыны дәлелдейді. Біздің жағдайымызда бұл $\lambda \ll (r_2 - r_1)$ шартына алып келеді, ол қолданған қондырғыда ауа үшін атмосфералық қысымда жақсы орындалады.

Бір мезгілде тәжірибе температура жоғарылауымен λ -ның өсетін дәлелдейді, бірақ та ауа үшін 0.5 дәреже көрсеткіші біршама төмендеу болып табылады. Жеңіл газдар ауыр газдарға қарағанда жоғары жылуөткізгіштікке ие болатындығын көруге болады. Осы қорытындыны тәжірибе растайды.

Мысалы, оттегінің қалыпты жағдайдағы жылуөткізгіштігі $0,024 \text{ Вт/(м·К)}$ болса, сутегінікі – $0,176 \text{ Вт/(м·К)}$ тең.

1.3. Қыздырылған қыл сым әдісі

Газдардың жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау үшін қолданылатын қыздырылған қыл сым әдісін Шлейермахер (1888 ж.) ұсынған және ол келесідей түрде түсіндіріледі.



2-сурет. Қыздырылған қыл сым әдісі

Вертикаль орналасқан екі r_1 және r_2 радиусты коаксиаль цилиндрлер арасындағы кеңістік зерттелетін газбен толтырылады (2-сурет). Олардың біреуі (әрқашанда сыртқы) электр тогымен қыздырылады, ал екіншісі T_2 температурасы өзгермейтіндей етіп суытылады.

Ішкі цилиндр ретінде электр тогы ағатындай қарапайым қыл сымды алуға болады және ол қыздырғыш рөлін де атқарады. Қыздырғышты қосқаннан кейін біраз уақыттан соң $T_1 > T_2$ болса, қыл сым температурасы өзгермейтін күй орнығады. Газдағы температураның таралуы $T(r)$ ($r_1 \leq r \leq r_2$) уақыт өтуімен өзгермейтін стационарлық режим қалыптасады.

$T(r)$ таралуына негізгі әсер ететін жылуөткізгіштік пен конвекция. Жүргізілген тәжірибе шартында сәуле шығару рөлін ескермейміз.

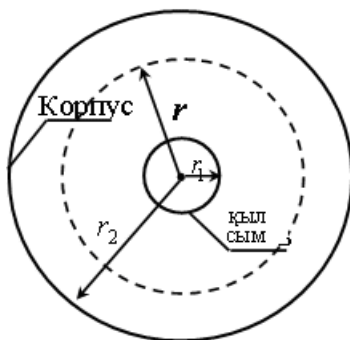
Конвекция вертикаль орналасқан цилиндрлер $\text{grad } T \perp \mathbf{g}$ жағдайында кез келген температура айырымында әр уақытта

болып тұрады. Бірақ та кейбір температура айырымының шекті мәнінде шектелген $(T_1 - T_2) < (T_1 - T_2)_n = \Delta T_n$ шексіз ұзын цилиндрдегі конвекциялық ағынды сипаттағанда, ол $T(r)$ температура өрісіне әсер етпейді. Осы шарттарда $T(r)$ температураның таралуы мен ішкі және сыртқы цилиндр арасындағы жылу алмасу интенсивтілігі таза жылу-өткізгіштікпен анықталады.

Нақты жағдайларда цилиндрлер L ұзындығы, $L/(r_1 - r_2)$ неғұрлым ұзын болса, онда соғұрлым жоғарыда сипатталған шарттар жақсы орындалады. Біз қолданылатын қондырғыда ол шамамен $\approx 40 \gg 1$ тең. Егер $\Delta T = (T_1 - T_2) / \Delta T_n$ -нен көп болса, онда конвективті қозғалу сипаты лезде өзгеріп (ΔT_n аймағында конвективті қозғалыс орнықсыз болады) және $T(r)$ температура профилі таза "жылуөткізгіштен" ерекше болады.

Конвекция цилиндрлер арасындағы жылу алмасу интенсивтілігіне қосымша үлес қосады. Сондықтан конвекция рөлін ескермейтін болсақ, онда $(T_1 - T_2) < \Delta T_n$ шартын сақтап қалу керек.

Сыртқы цилиндр қабықшасына қарай бағытталаып қызған қыл сымдағы жылу ағынын қарастырайық (3- сурет). Қыл сымды қыздырғанда цилиндрлер радиусы бойымен температура градиенті пайда болады.



3-сурет. Түтікшенің көлденең қимасы

Жылу берілетін аудан қызған қыл сымы бар коакциал цилиндр бетінің ауданына тең. Осыдан dQ жылу ағыны кез келген цилиндрлік қабықша аралығы r ($r_1 < r < r_2$) және $S = 2\pi rL$ ауданы бар тік цилиндр арқылы жылудың сейілуін ескермей анықтауға болады:

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi rL \cdot dt, \quad (6)$$

мұндағы L – радиусы R цилиндр ұзындығы, dt – уақыт интервалы, $\frac{dT}{dr}$ – радиал бағыттағы температура градиенті, λ – жылуөткізгіштік коэффициенті.

Радиусы r ішкі цилиндрлік бет арқылы жылу ағынының қуаты үшін (6) өрнекті аламыз. Анықтама бойынша жылу ағынының қуаты келесі өрнекпен анықталады:

$$P = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi Lr. \quad (7)$$

Алынған дифференциалдық теңдеуді айнымалыларды бөлу әдісімен шешеміз:

$$P \frac{dr}{r} = -\lambda 2\pi L dT.$$

$P = \text{const}$ болғандықтан, сол жағын қыл сымның r_1 радиусынан түтікшенің r_2 радиусына дейін, ал оң жағын $T_H = T_1$ қыл сым температурасынан T_2 корпус (дене) қабырғасының температурасына дейін интегралдаймыз. Таңбаларын ескеріп алатынымыз:

$$P \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = 2\pi L \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT, \quad P \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi L \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT, \quad P = \frac{2\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT. \quad (8)$$

Тәжірибе корпус қабырғасының тұрақты T_2 температурасында жүргізіледі. Бұдан қыл сымнан бөлінетін электр қуаты dP өскенде, оның температурасының dT_1 -ге өсуіне алып келеді. Сондықтан (8) өрнектен шығатыны:

$$dP = -\frac{2\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \lambda(T_1) dT_1 \quad (9)$$

Қыл сымға жақын маңда ауаның жылу өткізгіштігі қыл сым температурасымен анықталады. Қыл сым температурасы dT_1 артқанда, корпус қабырғасына қосымша dp қуат тасымалдау қыл сымға жақын маңдағы ауа қабатының жылуөткізгіштігімен анықталады. (9) теңдеуден алатынымыз:

$$\lambda(T_1) = \frac{\ln \frac{r_1}{r_2}}{2\pi L} \cdot \frac{dP}{dT_1} \quad (10)$$

Туындыны анықтау үшін тәжірибе нәтижелері бойынша табатын $P = f(T_1)$ тәуелділікті білу қажет.

Қыл сымды қыздыру қуатына тең жылу ағынының қуаты: $P = I^2 R$, мұндағы I – қыл сымдағы ток, R – қыл сымның кедергісі. Қыл сымдағы ток эталонды резистордағы токқа тең:

$I = U_0 / R_0$, мұндағы U_0 – эталонды R_0 резистордағы кернеу.

Қыл сым кедергісі R мына қатынаспен анықталады:

$$I = \frac{U_0}{R_0} = \frac{U_H}{R}, \text{ осыдан}$$

$$R = \frac{R_0 U_H}{U_0} \quad (11)$$

Қыл сым температурасы кедергінің температураға тәуелділігімен анықталады:

$$R = R'(1 + \alpha T), \quad (12)$$

мұндағы R' – 0°C кезіндегі кедергі.

T_1 бастапқы температура кезіндегі R_1 қыл сым кедергісін өлшейміз және T ізделініп отырған температурадағы R кедергіні табамыз:

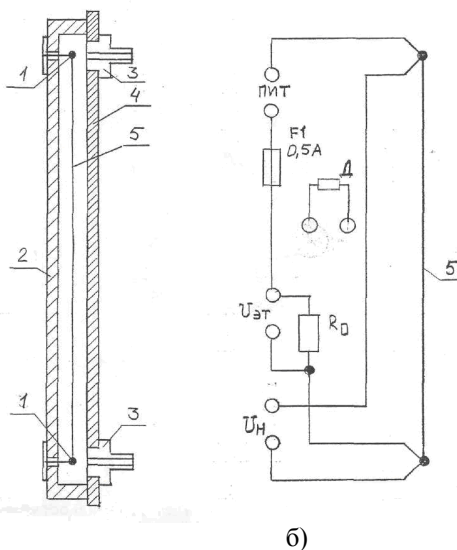
$$T = T_1 + \frac{R - R_1}{R_1} \cdot \frac{1 + \alpha T_1}{\alpha} \quad (13)$$

α – қыл сым кедергісінің температуралық коэффициенті.

1.4. "Газдардың жылуөткізгіштігі" модулімен танысу

«Газдардың жылуөткізгіштігі – 06» модулі (3-сурет) қызған қыл сым әдісімен ауа мен басқа газдардың жылуөткізгіштігін анықтауға, сонымен қатар жылуөткізгіштіктің өзгеруіне байланысты ауадағы газ диффузиясының коэффициентін бағалауға арналған. Торап панельге (4) орналастырылған. Металл қыл сым (никель негізіндегі қорытпа) (5) корпустағы (2) цилиндрлік канал осіндегі тұрғызғыш (1) арасына жүргізілген. Канал тығындармен (3) жабылған. Корпусқа Д температура датчигі орнатылған.

Жалғау сұлбасы 5-суретте көрсетілген. Қыл сым модуль панеліндегі ұяшығына " U_H " қосылған. Қыл сыммен қатар « $U_{эТ}$ » ұяшығына жалғанған R_0 эталонды резистор қосылған. Қоректендіру көзі "ПИТ" ұяшығына қосылады. Қыл сым мен R_0 кедергідегі кернеуді өлшеп, қыл сым кедергісін және онда ағып жатқан жылудың қуатын анықтаймыз. Өткізгіш көзіндегі кернеу нәтиже қателіктеріне әсер етпейтіндей етіп сұлба (кедергіні өлшеудің төрт зонды әдісі қолданылған) құрылған.



5-сурет. а) "Газдардың жылуөткізгіштігі" модулі. б) Жалғау сұлбасы

Қыл сым кедергісі бойынша оның температурасы анықталады. Қыл сым мен корпусстың температура айырымы жылулық қуатқа пропорционал екенін біле отырып, газдың жылуөткізгіштігін табамыз.

2. Эксперименталдық бөлім

1. Жұмыс зонасына "Газдардың қасиеттері – №1" блогын орнатыңыздар. 5б-суретте келтірілген сұлба бойынша «Газдардың жылуөткізгіштігі – 06» модулінің қоректендіру көзіне қосыңыздар («ПИТ», «НАГР» ұяшықтарын және «ОБЩ»-ті ИСТ-4-ға жалғаңыздар.

2. Модульдің D температура датчигін ИСТ-4-ті D1 кірісіне жалғаңыздар.

«T1» термостат реттегішін максимал (120°C) температураға қойыңыздар. D2 датчик қосқышына (разъем) тығынды бекітіңіздер.

3. " U_H " және " U_T " ұяшықтарын, вольтметр режимінде жұмыс жасайтын мультиметрге жалғаңыздар.

4. " $=/0/\sim$ " тумблерден айналымы кернеу беріңіздер, ол үшін " $\sim$ " жағдайына қосыңыздар.

5. Мультиметрмен қыл сымдағы U_H (" U_H " ұяшығы) кернеу мен R_0 эталонды резистордағы U_0 кернеуді өлшеңдер. Мультиметрдің өлшеу шегіндегі көрсету 3 мәнді цифрдан аспайтындай етіп таңдаңыздар.

6. 4-разрядты сандық индикатордың көрсетуімен температураны өлшеңіздер.

7. Қыл сымның диаметрі $d=0,10$ мм, каналдың эффективті диаметрі $D=12$ мм, жіп ұзындығы $L=240$ мм, қыл сым кедергісі $R=2,5...3,5$ Ом, қыл сым кедергісінің температуралық коэффициенті (0°C кезінде) $\alpha=5,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, эталонды резистор кедергісі $R_0 = 10,0$ Ом.

Ұсынылған ток диапазоны: бөлме температурасында қыл сым кедергісін өлшеу үшін – 30–50 мА және жылуөткізгіштікті өлшеу үшін 150–400 мА. Қыл сымдағы максимал ток 0,5 А, болса максимал қуат 1 Вт.

Қыл сымдағы ток: $I = U_0 / R_0$

Қыздырылған қыл сымның қуаты: $P = I^2 R$

Кедергінің температураға тәуелділігі:

$$R = R'(1 + \alpha T),$$

мұндағы R' - 0°C кезіндегі кедергісі.

Қыл сымдағы R_1 кедергіні T_1

Бастапқы температурасы T_1 және кедергісі R болған қыл сымның R_1 кедергісін өлшеп, ізделініп отырған T температураны былай жазамыз:

$$T = T_1 + \frac{R - R_1}{R_1} \cdot \frac{1 + \alpha T_1}{\alpha}$$

Корпус модулінің T_K температурасы мен қыл сымда қалыптасқан температура айырымы арқылы ауаның жылуөткізгіштігі анықталады:

$$\lambda = \frac{P \cdot \ln \frac{D}{d}}{2\pi(T - T_K)L}$$

1-кесте

Ауаның жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау

$U_0, \text{мВ}$	$U_H, \text{мВ}$	$I, \text{мА}$	$R, \text{Ом}$	$P, \text{Вт}$	$T, ^\circ\text{C}$	$T_K, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})\cdot 10^{-3}$

Ауа үшін $\lambda(T)$ кестелік мәндер

Т К	Жылуөткізгіштік $\lambda \cdot 10^{-3}$ Вт/м·К
80	7.5
100	9.3
150	13.8
200	18.0
300	26.2
400	33.8
600	46.9

БЕТТІК КЕРІЛҮДІҢ ТЕМПЕРАТУРАҒА ТӘУЕЛДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыстың мақсаты: сұйықтықтың беттік керілуінің температураға тәуелділігін зерттеу, ауа көпіршіктерінің максимал қысымы әдісін зерттеу.

Құралдар мен жабдықтар: ЛКТ–2 зертханалық кешені, автоклав-манометр, ИСТ–4 өлшеу жүйесі, капилляр, резеңке груша, дөңгелек канал, қыздырғыш орама, кран, сызғыш, штуцер, температура датчигі, шлангы, қосқыш (разъем), секундомер, май құйғыш (воронка).

1. Теориялық бөлім

1.1. Молекулалық күштер

Сұйықтықтар мен қатты денелердің газдардан айырмашылығы, олар конденсирленген күйде болады, яғни заттың атомдары немесе молекулалары бір-бірімен байланыста болады. Жылулық қозғалыстың орташа энергиясы бұл байланысты үзуге жеткіліксіз, өйткені конденсирленген зат өз көлемін сақтайды. Бірақ қатты кристалл денелерден сұйықтықтардың ерекшелігі, оларға ішкі күштер әсер еткенде

олар өздерінің түрін жеңіл өзгертеді, осы кезде олардың көлемі өзгеріссіз қалады.

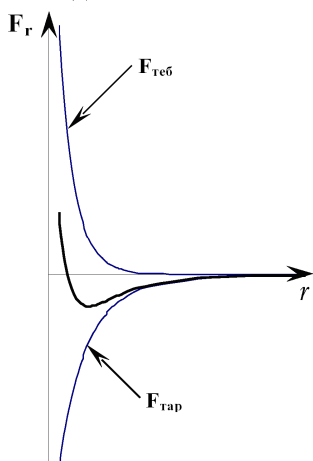
Молекулалардың орташа кинетикалық энергиясы E_k арасындағы қатынас олардың хаосты қозғалысының интенсивтілігінің өлшемі болып табылады және молекулалардың арасындағы өзара әсерлердің E_p потенциалдық энергиясы олардың кеңістікте орналасу ретінің мүмкіндігін анықтайды. Осы энергиялардың қатынасы заттың агрегат күйлерінің түзілуі үшін шешуші фактор болып табылады.

Қатты дене $E_k \ll E_p$ шарты орындалғанда түзіледі (реттеліп), ал газ тәрізді күйде $E_k > E_p$ шарты орындалады (ретсіз). Сұйықтықты қарастырған кезде екі энергияның үлестері өзара шамалас $E_k \approx E_p$, бұл жағдайда жақын аралықтағы молекулалар реттеліп, ал алыстағы молекулалар ретсіз орналасады. Конденсирленген барлық денелердің негізгі ерекшелігі- олардың көлемін шектейтін еркін беттердің болуында. Ыдысқа құйылған сұйықтық көлемі әрқашан газ бен ыдыс қабырғасымен шектеледі (әдетте, сұйықтық бетінде қаныққан бу мен газ тәрізді ауа бар). Сұйықтық бетіндегі молекуланың жағдайы сұйықтық көлемі ішіндегі молекуланың жағдайынан өзгешелеу. Бұл өзгешелік сұйықтық пен газдың (немесе қатты денелердің) әртүрлі тығыздығымен байланысты. Мысалы, қалыпты атмосфералық қысым мен 100°C температура кезінде су тығыздығы $\rho_{\text{сұй}} = 958,4 \text{ кг/м}^3$, ал су буының тығыздығы $\rho_{\text{газ}} = 0,5984 \text{ кг/м}^3$, яғни 1600 есе аз. Бұл бірлік көлемдегі су буының молекуласына қарағанда бірлік көлемдегі су молекуласынан 1600 есе көп (тығыздық молекула массасының молекула концентрациясына қатынасы туындысы) екенін білдіреді. Егер көлем молекулалардың сызықты көлеміне пропорционал екенін ескерсек, онда тура сондай жағдайда бу молекулалары арасындағы қашықтық су молекулалары арасындағы қашықтықпен салыстырғанда $\sqrt[3]{1600} \approx 12$ есе көп.

Осыған ұқсас нәтижелер басқа заттар үшін де орындалады. Бұл кезде қатты және сұйықтық күйдегі заттың молекулалары арасындағы қашықтық ерекшелігі аз (бар жоғы бірнеше процент қана), ал өз кезегінде газдарда олардың арасындағы қашықтық (өте көп емес қысымда) шамамен 10 еседей артық.

Молекулалар арасындағы әсерлесу күші конденсирленген ортаның қасиеттері мен оның түзілуінде ерекше рөл атқарады. Беттік құбылыс кезінде, олар үшін шекаралық ортадағы молекулалық күштердің айырымы ерекше: газ/сұйықтық, газ/қатты дене, сұйықтық/газ.

Молекулалық күштер бірқатар ерекше қасиеттерге ие. Біріншіден, олар молекулалардың эффективті өлшемдерімен шамалас қашықтықта ғана пайда болатын қысқа әсер ететін күштер. Кейбір қашықтықтан бастап (молекулалық әсер радиусы деп аталады) молекулалық әсерлесуді ескермеуге болады.



Молекулалық әсер радиусы 10^{-9} м шамасына тең, біршама молекула диаметрінен онша аспайды. Газдарда молекулалар арасындағы қашықтық, сұйықтықтар немесе қатты денелерге қарағанда шамамен ондаған есе артық. Сондықтан көп жағдайда молекулалық күштер әсерін елемеуге болады.

1-сурет. Тартылыс күші мен ($F_{тар}$), тебу күші ($F_{теб}$) және қорытынды күштердің F_q молекулаларының арасындағы қашықтыққа тәуелділігі

Молекулалық әсерлесу радиусында туындайтын тартылу күші ($F_{тар}$) молекулалар бір-бірімен молекуланың сызықтық өлшеміне шамалас қашықтыққа жақындағанда тебілу күшіне ($F_{теб}$) ауысады; ал қашықтыққа байланысты тартылу күшінен қарағанда әлдеқайда тез кемиді.

Тартылыс күші:

$$F_{\text{тарт}} = \frac{a}{r^7}.$$

Тебу күші:

$$F_{\text{теб}} = \frac{b}{r^{13}}.$$

Қорытынды күш:

$$F_r = \frac{b}{r^{13}} - \frac{a}{r^7},$$

мұндағы a мен b берілген молекуланы сипаттайтын тұрақтылар (1-сурет).

Молекулалық күштер электрлік қасиетке ие, өйткені негізгі үлесін молекулалық дипольдік әсерлесуі береді. Көптеген молекулалар (соның ішінде су молекуласы) электр өрісі жоқ кезде электрлік дипольдік моментке ие. Олар симметриялық емес құрылысы бар полярлық молекулалар деп аталады. Симметриялық молекулалар үшін молекулааралық тартылыс көзі лездік дипольдік әсерлесу болып табылады (бұл эффектiнiң табиғаты – квантты- механикалық).

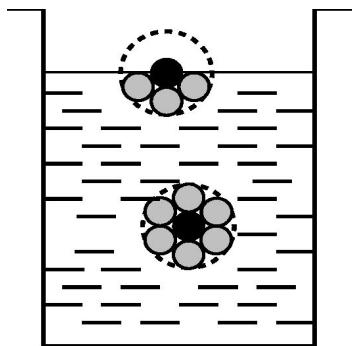
1.2. Беттік керілу

Фазалар арасындағы (сұйықтық/бу) бөліну беті ауыспалы қабат болып табылады, яғни тығыздық сұйықтық тығыздығынан бу тығыздығына дейін өзгереді. Кәдімгі температура кезінде бұл жұқа қабат (оның қалыңдығы бірнеше молекулалық диаметрмен өлшенеді), температура көтерілгенде ауыспалы қабатқа артады.

Беттік қабаттағы молекулалардың жағдайы сұйықтық ішіндегіден өзгеше болады: сұйықтық ішінде оларды тура сондай молекулалар жан-жақтан қоршайды, ал бетке

жақындағанда тек төменгі жақта ғана бірдей көрші молекулалар болады (2-сурет).

Молекулалардың әсерлесуінің потенциалдық энергиясының теріс болуы сұйықтық ішіндегі молекулаға қарағанда беттік қабаттағы молекула үлкен энергияға ие екенін көрсетеді. Сондықтан, беттік қабат екі фазаның молекулааралық әсерлесу айырымынан тұратын артық энергияға ие.



2-сурет. Сұйықтық ішіндегі және бетке жақын молекулалар

Шекаралық бетке жақын орналасқан барлық молекулалардың арасындағы энергиямен олардың сұйықтық ішінде болған кездегі энергияларының айырымы беттік энергия $U_{бет}$ деп аталады (2-сурет).

Әдетте, беттік энергия шекаралық беттің S ауданына пропорционал:

$$U_{бет} = \sigma S. \quad (1)$$

σ коэффициенті беттік керілу коэффициенті (немесе беттік керілу) деп аталады.

Кез келген жүйе ең аз потенциалдық энергиясы бар күйге жетуге ұмтылатыны белгілі. Сондықтан сұйықтық тамшылары (немесе газ көпіршіктері) ауданы ең кіші сфералық бет түрін қабылдайды. Жұқа бет қабатына сұйықтық көлемін қоршаған резеңке тәрізді қабықша әсер етеді. Осы қабатта пайда болған

беттің бойымен бағытталған беттік күштер әрқашан беттік қабықшаны жиыруға тырысады.

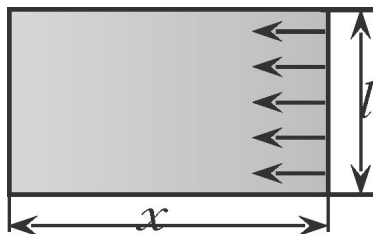
Бірақ, серпімді қабықшамен (пленкамен) салыстырғанда қабықшаның созылуы кезінде сұйықтықтың беттік керілуі ұлғаяды, ал бет ауданының өзгерісі кезінде сұйықтық бетінің керілу шамасы өзгермейді.

«Энергетикалық» анықтамаға орай беттік керілудің «күштік» анықтамасын енгізуге болады.

Беттік керілудің «күштік» анықтамасының физикалық мағынасы: сұйықтық беті контур l ұзындығымен (дымқыл периметрмен) немесе сызықпен бөлінген болса, онда бұл контурға перпендикуляр, оның ауданының кішірею жағына қарай бағытталған және сұйықтық бетінің жанама жазықтығында жатқан (F) беттік керілу күші әсер етеді.

Беттік керілу коэффициенті деп осы күштің контур ұзындығына қатынасы:

$$\sigma = \frac{F}{l} . \quad (2)$$



3-сурет. Рамаға қарай тартылған сұйықтық қабықшасы (пленкасы)

Жоғарыда айтылғандарды суреттеу үшін қарапайым мысалды қарастыруға болады. Бір жағынан (l ұзындығы бар) еркін орын ауыстыра алатын өткізгіш рамадағы сабын қабыршағын (пленкасын) алайық (3-сурет). Жиырылудың нәтижесінде беттің ауданы кішірейеді, өткізгішке қозғалмайтын рама бөлігі тікелей өлшенетін күш әсер етеді.

Бұл күш потенциалдық энергияның күш әсер ететін координата бағытындағы туындысымен анықталады:

$$F_x = -\frac{dU_{\text{бет}}}{dx} = -\sigma \frac{dS}{dx}.$$

Пленканың бір жақ бетінің ауданы мынадай $S = l \cdot x$ болса, онда $F_x = -\sigma \cdot l$ тең.

Бұл күш l қимасына әсер ететін қабықшаның (пленканың) бір жағының беттік керілуіне тең (пленканың екі жағы бар болса, онда l қимасына екі есе көп күш әсер етеді) күш.

Беттік керілу өзара жанасатын орта табиғаты мен олардың күйіне тәуелді. Салыстыратын болсақ (20°C температурада) әртүрлі заттар үшін сұйықтық/бу шекарасындағы беттік керілу коэффициентінің мәндері оқулық соңындағы қосымшада берілген:

Беттік керілу бет қабықшасында пайда болған екі фазаның молекулаларының әсерлесу ерекшелігін сипаттайды. Сондықтан бет қабықшасының (сонымен қатар беттік керілу) жеткілікті және қажетті шарттарының болуы біріншіден конденсация тудыратын молекулалардың тартылу күштерінің болуы, екіншіден шекаралық фазада бұл күштердің шамасының өзгешелігінде. Сұйықтыққа қоспа енгізгенде беттік керілу коэффициентінің шамасы қатты өзгеріске ұшырауы мүмкін. Беттік керілуді кішірейтетін бет бөлімінің фазасында адсорбцияланатын беттік-активті заттар (БАЗ) деп аталатын бір топ класс бар. Су үшін мұндай зат әртүрлі сабындар болып табылады.

Беттік керілудің температураға тәуелділігін қарастырайық. Температура көтерілген сайын бу/сұйықтық шекарасында беттік керілу коэффициентінің төмендеуі байқалады. Бұл температура көтерілген сайын сұйықтық бетіндегі бу тығыздығы артады (булану процесінің күшеюінен), ал сұйықтық тығыздығы кемиді (бірақ, бу үшін соншалықты емес). Нәтижесінде олардың тығыздығының айырымы азаяды, ал шекаралық фазаларда молекулалық әсерлесу айырымы төмендейді.

Төменгі температураларда, егер газдың тығыздығы шамалы болса (сұйықтық тығыздығымен салыстырғанда), онда қабат бетінің молекулалары мен жұптық молекулалардың әсерлесуін

ескермеуге болады. Температура жоғарылаған сайын бұл әсерлесу жақсы біліне бастайды.

Соңында кризистік температурада сұйықтық пен газ фазасының тығыздығы теңескенде, сұйықтық пен бу арасындағы ерекшелік байқалмайды. Осы кезде фазалардың шекара бөлігі жойылып, беттік керілу коэффициенті нөлге тең болады.

1.3. Лаплас теңдеуі

Егер бет бөлімінің фазасы жазық болмаса, онда қисық беттің екі жағынан беттік керілу түзетін қысымдар айырымы пайда болады. Бұл қосымша қысым беттік немесе (Δp) капиллярлық қысым деп аталады. Бұл артық қысымның шамасы беттің қисықтық радиусына тәуелді және *Лаплас теңдеуімен* анықталады:

$$\Delta p = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (3)$$

мұндағы R_1 мен R_2 – қисықтық беттің басты радиустары. Өртүрлі беттер үшін:

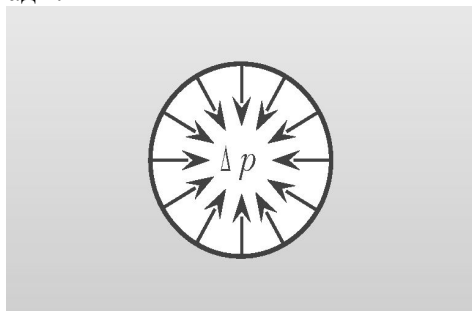
$$\text{жазық} \quad (R_1 = R_2 = \infty) \Rightarrow \Delta p = 0,$$

$$\text{сфералық} \quad (R_1 = R_2 = R) \Rightarrow \Delta p = \frac{2\sigma}{R},$$

$$\text{цилиндрлік} \quad (R_1 = R, R_2 = \infty) \Rightarrow \Delta p = \frac{\sigma}{R}$$

Сұйықтықтың жазық беті үшін бет бойымен бағытталған беттік керілу күштері қосымша қысым тудырмайды: сұйықтық ішіндегі қысым сыртқы қысымға тең. Дөңес бет үшін (мысалы, ауадағы сұйықтық тамшысы) беттің кішіреюі тамшының сығылуына әкеледі және сұйықтық ішіндегі қысым қоршаған ауа қысымынан көп болады. Батыңқы (ойыс) сұйықтық бетінде (сұйықтық ішіндегі газ көпіршіктері) сұйықтық ішіндегі қысым газ көпіршіктерінің ішіндегіден аз болады (4-сурет). Негізінен

артық қысым әрқашан екі түйіскен ортаның бет бөлігі батыңқы жағында болады.



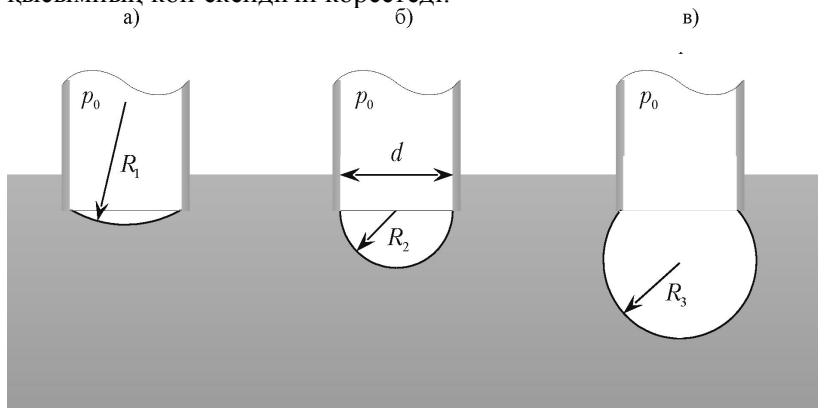
4-сурет. Сұйықтық ішіндегі газ көпіршіктері

1.4. Капиллярлық құбылыстар

Жіңішке түтікшедегі (капиллярдағы) сұйықтықтың көтерілуі (немесе төмендеуі) беттік қысымның, яғни капиллярлық құбылыстың әсері болып табылады. Егер түтік қабырғаларына сұйықтық жұғатын болса (ойыс мениск), онда сұйықтық көтеріледі, егер жұқпаса (дөңес мениск), төмен түседі. Капиллярлық сору топырақтан судың көшу шартын анықтайды, сонымен қатар мұнай мен судың көшуін және олардың мұнайлы қыртыстан өзара ығысуын анықтайды. Капиллярлық күштердің әртүрлі әсері беттік керілу коэффициенттерін анықтаудың әртүрлі өлшеу әдістерінің негізінде жатыр. Бұл жұмыстағы қолданылатын әдіс – зерттелетін сұйықтықтың капилляр ұшындағы үрленген атмосфералық қысымның ауа көпіршіктерінің максимал қысымын өлшеу негізінде беттің үстінде сиреу пайда болатын әдіс. Егер атмосфералық қысым капиллярдағы сұйықтық бетін жартылай сфера сияқты етіп қисайтса ғана, көпіршіктер пайда болады (5б-сурет).

Мұндай бетте капиллярлық қысым максимал болады. 5а, в-суреттерде көпіршіктердің пайда болуы капиллярлық қысымның аз екендігін көрсетеді, ал 5б-сурет қисықтық

радиусының болуынан оларға қарағанда капиллярлық қысымның көп екендігін көрсетеді.



5-сурет. Капиллярдағы ауа көпіршігінің түзілуі

5б-суретте көпіршік ішіндегі p_0 атмосфералық қысым қуыс (7) ішіндегі сұйықтың бетінің p қысымымен, Δp капиллярлық қысыммен және $(h_1 - h_2)$ биіктіктегі сұйықтың бағанының қысымы арқылы өрнектеледі (6-сурет):

$$p + \rho g (h_1 - h_2) + \Delta p = p_0, \quad (4)$$

$$p = p_0 - \rho g (h_1 - h). \quad (5)$$

(4) пен (5) өрнектерден алатынымыз:

$$\Delta p = \rho g (h_2 - h). \quad (6)$$

5б-суреттегі көпіршік ішіндегі капиллярлық қысымды сфералық бет үшін Лаплас (3) теңдеуімен есептеуге болады:

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{d}, \quad (7)$$

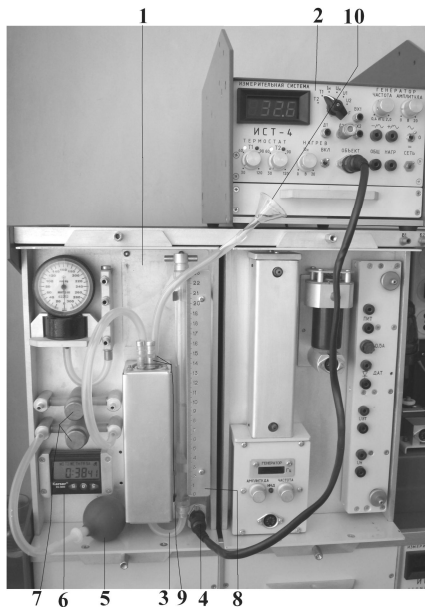
мұндағы d – капилляр диаметрі. (6) мен (7) теңестіріп, мынадай теңдеуді аламыз:

$$\sigma = \frac{1}{4} \rho g d (h_2 - h). \quad (8)$$

d , h_2 біле отырып және көпіршіктің бөліну кезіндегі сұйықтық деңгейінің h биіктігін өлшеп, σ беттік керілу коэффициентін есептеуге болады. Егер 5б -суреттегідей стационарлық күйде h -ты өлшесек, онда (8) өрнек σ беттік керілу коэффициентінің дұрыс мәнін береді. Осы кезде ғана (4) тепе-теңдік орындалады, бірақ бұл күй тұрақсыз (5б-сурет), ол бірден басқа (5в-сурет) күйге өтіп кетеді.

Бұл жұмыста жүйе тепе-теңдікке жақындағанда ғана соңғы көпіршіктің жайлап түзілу уақытында h биіктік өлшенеді, сонда ғана (4) теңдік өте жақсы орындалады.

1.5. Тәжірибелік қондырғы

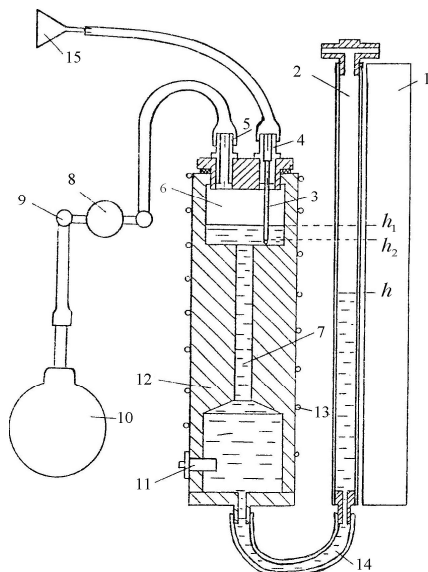


Жұмыс көпфункционалды ЛКТ–2 зертханалық кешенінде орындалады, бұл кешенмен әртүрлі тәжірибелерді жасауға болады. Тәжірибе қондырғысы төмендегі 6-сурет-те келтірілген.

1 – автоклав-манометр, 2-ИСТ–4 өлшеу жүйесі, 3 – шлангы, 4 – қосқыш (разъем), 5 – резеңке груша, 6 – секундомер, 7 – кран, 8 – сызғыш, 9 – штуцер, 10 – су құйғыш (воронка).

6-сурет. Тәжірибелік қондырғысы

Беттік керілуді өлшеуге негізгі модуль «автоклав-манометр» қолданылады (7-сурет).



7-сурет. Беттік керілу коэффициентін өлшейтін «автоклав-манометр»

Автоклавтың негізгі бөлігі дөңгелек (7) каналмен байланысқан жоғарғы және төменгі қуыстары бар (12) құбырдан тұрады (6-сурет). Құбырда (13) қыздырғыш орама бар. Құбырға (11) температура датчигі орнатылған. Автоклавтың қуыстары сұйықтық деңгейі мен құралдың сипаттамалық нүктелерінің координатасы есептелінетін (1) сызғыш бойымен орналасқан (2) өлшеу құбыры бар (14) шлангымен жалғанған.

Автоклав құбырының жоғарғы қуысына дроссельдер блогы орнатылады және оған кіретін мүмкіндік қалдырылып төрт штуцер арқылы бекітіледі. Оның екеуі (бір және үш қиғаш бөліктері бар) тығынмен жабылады. Капиллярдың жоғарғы ұшы (4) штуцер (екі қиғаш бөлігі бар) ашық және (15) май

құйғыш арқылы (воронка) атмосфераға жіберіледі (6-сурет). (5) штуцері (қиғаш бөлігі жоқ) жоғарғы жағы калибрленген тесік болып келеді және (8) кран арқылы (10) резеңке грушамен жалғанады. Өлшеу түтігінің жоғары жағы ашық болады.

1.6. Беттік керілуді өлшеу әдісі

Жұмыстың басында автоклавқа $h_2 = 105$ мм деңгейге дейін су құяды. Грушаның (11) көмегімен ауаны жайлап сорады, осы кезде өлшеу түтігіндегі (2) су деңгейі төмендейді. Белгілі уақыт кезінде капиллярдан (3) атмосфералық қысымның әсерінен сұйықтықта ауа көпіршіктері пайда бола бастайды. Көпіршіктердің пайда болуы жақсы естіледі. Құлағыңызға май құйғышты (воронка) (15) жакындатсаңыз, бастапқы уақыттағы көп мөлшерде көпіршіктердің пайда бола бастағанын жақсы естисіз. Ауасы бар көпіршіктер сұйықтық бетіне қалқып шығып, қуысқа (6) өтеді де, ондағы ауа қысымын өсіреді. Бұл өлшеу түтігіндегі су деңгейінің h алдымен тоқтауына, сонан соң көтеріле бастауына әкеледі. Ауа көпіршіктері пайда бола береді (шу естіп тұрады), бірақ олардың пайда болу жиілігі азаяды, h деңгейінің көтерілу жылдамдығы төмендейді, бұл жүйенің тепе-тең күйге жақындағанын білдіреді.

Беттік керілуді есептеу үшін соңғы көпіршік пайда болған кезіндегі h су деңгейін өлшеу керек. Бұл кезінде біріншіден май құйғыштың (15) көмегімен, екіншіден өлшеу түтігіндегі су деңгейі тұрақтанған кезде анықталады. Бұл тұрақтанған деңгейдің h координатасы өлшеніп, көпіршіктегі артық қысым болып табылады.

Зертханалық кешен өлшеу жүйесінен тұрады, оның көмегімен қыздыру мен сұйықтық температурасын өлшеу жүзеге асады. Температура датчигі ИСТ-4 жүйесіне «Объект» қосқышы арқылы жалғанады. Бұrandаны «T1» жағдайына келтіргенде, сандық индикатор автоклавтағы сұйықтық температурасын көрсетеді. «T1» реттегіш бұrandаның көмегімен 30 °C-тан 120 °C-қа дейін температура диапазонын термотұрақтандыруға болады. Бұл жұмыста суды 90 °C-қа

дейін қайнатады. Егер сұйықтық температурасы «Т1» реттегішпен реттеп қойған температурадан төмен болса, онда сұйықтық қыза береді, мұны реттегіш бұранданың сол жағында орналасқан жасыл индикатор көрсетіп тұрады. Термотұрақтандыру режимінде сұйықтық температурасы тұрақты болып тұрады, бұл кезде екі индикатор да бір мезгілде жанып тұрады: жасыл және қызыл. Егер сұйықтық температурасы «Т1» реттегішпен реттеп қойған температурадан жоғары болса, онда қыздыру автоматты түрде өшеді, бұл кезде тек қызыл индикатор жанады.

2. Эксперименталдық бөлім

2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Жұмыстың басында автоклавқа $h_2 = 105$ мм деңгейге дейін су құяды. Капиллярдың ұшы (3–5) мм суға түсіп тұрады.

2. Автоклав құбырының жоғарғы жағына дроссельдер блогы бекітіледі. Дроссельдер штуцері бір және үш қиғаш бөлігі тығынмен жабылады.

3. Силикон шлангының көмегімен жалғауларды орындаңыздар (6-сурет): екі қиғаш бөлігі бар штуцерді май құйғышы бар (воронка) шлангымен, қиғаш бөлігі жоқ штуцерді кран арқылы резеңке грушамен жалғаңыздар.

4. Кранды (9) жабыңыздар. Қолыңызбен грушаны (10) қыса отырып, оның көлемін барынша кішірейтіңіздер және грушаны осылай ұстап тұрып, оған штуцердегі шлангты кигізіңіздер. Өте ұқыпты болыңыздар: кран (9) бұл кезде жабық болуы керек.

5. (18) май құйғышты (воронка) құлағыңызға жақындатып, (2) өлшеу түтігіндегі h су деңгейі түскенге дейін (9) кранды жайлап ашыңыздар, сонан соң (көпіршік пайда болған соң) ол көтеріледі. Су деңгейін бақылап отырыңыздар және көпіршіктердің пайда болу динамикасын тыңдау көмегімен соңғы көпіршіктің түзілу кезіндегі h_i мәнін жазып отырыңыздар. Нәтижелерді кестеге жазыңыздар.

6. Бөлме температурасында 2- рет h_i өлшеуін жүргізіңіздер. Әр уақытта 3–5 пункттерін орындау алдында шлангыдан грушаны алыңыздар және қатынас ыдыстың екі бағанасындағы су деңгейі теңесу үшін (9) кранды ашыңыздар (6-сурет).

7. ИСТ-4 «Объект»-нің қосқышымен автоклав-манометр қосқышын жалғаңыздар. Д2 датчикті қосқыш-бітеуішпен жабыңыздар.

8. "=0/~" тумблерден айнымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайына қосыңыздар. Сеть" тумблерін жоғарғы қойып, термостат реттегішін «Т1» жағдайына қойыңыздар. Осы кезде бөлме температурасын көрсеткен сандық индикатор жанады. Термометрдің көрсетуін кестеге жазыңыздар.

1-кесте

Беттік керілу коэффициентін анықтау

$t, ^\circ\text{C}$	$h_i, \text{мм}$	$\sigma_i, 10^{-3} \text{ Н/м}$	$\langle \sigma \rangle, 10^{-3} \text{ Н/м}$	$\Delta \sigma_i, 10^{-3} \text{ Н/м}$	$\Delta \sigma, \text{Н/м}$	$\varepsilon, \%$
Бөлме						
30						
50						
70						
90						

9. "Вкл" тумблерімен қыздырғышты қосыңыздар. «Т1» реттегішімен термостатты 30°C-қа қойыңыздар. Реттегіш бұрандамен U_H -ты 10В – 15В қойыңыз. Су қыза бастайды. Белгіленген температураға жеткенде қызыл индикатор жанып, термотұрақтану жүйесі іске қосылады және су температурасын тұрақты етіп ұстап тұрады (осы кезде екі индикатор жанады: жасыл және қызыл).

10. Басқа температураларды орындау кезінде 3–5 пункттерді қайталап, өлшеу түтігіндегі берілген су деңгейінің арасына кеткен уақыттың мәндерін 1- кестеге жазыңыздар.

11. 50°C, 70°C және 90°C шамамен тең температура интервалдарына өлшеу жүргізіңіздер. Нәтижелерді 1- кестеге жазыңыздар.

12. (8) есептеу өрнегін пайдалана отырып,

$$\sigma_i = \frac{1}{4} \rho g d (h_2 - h_i)$$

әрбір өлшеулер үшін σ_i беттік керілу коэффициентін есептеңіздер. Есептеу кезінде мына мәндерді ескеріңіздер: $h_2=105\text{мм}$, $d=0,46\text{мм}$, $g=9,81\text{м/с}^2$. Әрбір температура үшін ρ су тығыздығының мәні төмендегі арнайы кестеде көрсетілген.

13. Әрбір температура үшін $\langle \sigma \rangle$ орташасын табыңыздар.

14. Тікелей өлшеу әдісі бойынша $\Delta \sigma$ -ның абсолютті кателігін есептеңіздер.

15. Барлық есептеу нәтижелерінің мәндерін 1- кестеге жазыңыздар.

16. Миллиметрлік қағазға беттік керілу коэффициентінің температураға тәуелділігін салыңыздар.

Дроссельдің параметрлері:

Дроссель №:0 тесік диаметрі 3,5 мм

Дроссель №:2 капилляр диаметрі 0,46 мм, ұзындығы 38,2 мм

Әртүрлі температура үшін ρ су тығыздығы

Температура, $t^{\circ}\text{C}$	4	20	30	50	70	90
Су тығыздығы, ρ , кг/м^3	1000	998	996	988	978	965

СУДЫҢ ФАЗАЛЫҚ ТЕПЕ-ТЕҢДІГІН ЗЕРТТЕУ

Жұмыстың мақсаты: қайнау кезіндегі судың меншікті булану жылуын анықтау.

1. Теориялық бөлім

1.1. Термодинамикалық фаза

Термодинамикалық фаза – дегеніміз басқа фазадан қасиеті секіре өзгертін бетпен шектелген құрамы және қасиеті біртекті термодинамикалық жүйенің бөлігі.

Басқа сөзбен айтқанда фаза – гетерогендік жүйенің гомогенді бөлігі. Бір компонентті жүйеде әрбір фаза әртүрлі агрегатты күйде немесе заттың әртүрлі полиморфты модификациясында бола алады. Көп компонентті жүйеде фаза әртүрлі құрам мен құрылымға ие.

Газ әрқашанда бір фазадан тұрады, сұйықтықтың бірнеше құрамы әртүрлі сұйықтық фазадан тұруы мүмкін, бірақ құрамы бірдей екі әртүрлі сұйықтық тепе-теңдікте болуы мүмкін емес. Қатты күйдегі зат бірнеше фазаларда болуы мүмкін, олардың кейбірінің құрамы бірдей болып, ал құрылымы әртүрлі болуы мүмкін (полиморфты модификациялар, аллотропия (түрліше)).

Әртүрлі фазалар молекулалар жинақтылығының әрқилы түрлеріне ие (кристалдық фазалар, әртүрлі кристалдық торлар үшін), сонымен қатар өздерінің сығылғыштық, жылулық ұлғаю

коэффициенттерінің сипаттамалық мәндері және басқа да сипаттамалары бар. Сонымен қатар, әртүрлі фазалар электрлік (сегнетоэлектрлер), магниттік (ферромагнетиктер) және оптикалық қасиеттерге (мысалы, қатты оттегі) ие болуы мүмкін.

1.2. Термодинамикалық фазалар және заттың агрегаттық күйлері

Әдетте, заттың термодинамикалық фазаларының жиынтығы агрегаттық күй жиынтығына қарағанда едәуір бай, яғни бір заттың агрегаттық күйі әртүрлі термодинамикалық фазада бола алады. Сондықтан агрегаттық күйлер терминдерімен затты сипаттау мүмкін емес (дөрекі), яғни ол әртүрлі физикалық жағдайларды толығымен ажырата алмайды.

Термодинамикалық фазаның ауқымды жиынтығы тәртіп бойынша осы немесе басқа да агрегаттық күйге кіретін әртүрлі реттілікпен байланысты.

Заттың газ тектес күйінде ешқандай реттілік жоқ. Осыған орай газ тектес күйде кез келген зат бір ғана термодинамикалық фазада бола алады (молекуланың диссоциациясы немесе ионизациясы тектес фазалық өту анықтама бойынша бір заттан екіншісіне өту).

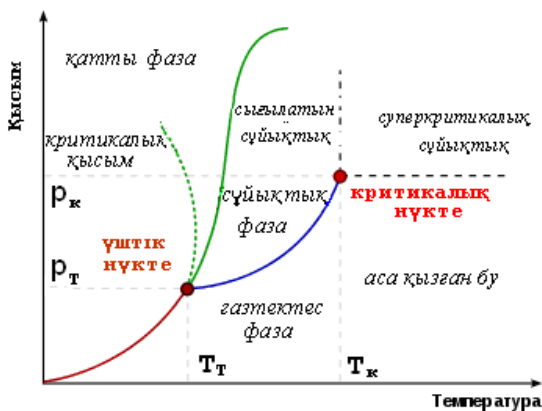
Сұйықтық бағдарлық реттілікке ие, бірақ қатты денелердегі сияқты реттілік тәртіп жоқ.

Нәтижесінде сол сұйықтықта әртүрлі термодинамикалық фаза болуы мүмкін, бірақ олардың мөлшері бірден сирек асады. Мысалы, аса суытылған буда жаңа сұйықтық фазаның пайда болуы. Өзге мысал, асқын аққыштық күйдің сұйықтық гелийге өтуі.

Қатты денелерде электрондар тәртіппен бір орыннан екінші орынға ауысады (трансляциялық) және бағдарлық реттілікке ие. Нәтижесінде қатты денеде тәртіп бойынша жеткілікті күрделі фазалық диаграмма бар. Мысалы, қарапайым зат мұздың фазалық диаграммасы әртүрлі қысым мен температурада 12-ге жуық термодинамикалық фазада бола алады.

1.3. Фазалық диаграмма

1-суретте фазалық диаграмманың типті түрі көрсетілген. Заттың фазалық диаграммасында әртүрлі термодинамикалық фазалар белгілі аймақтарда орналасқан.



1-сурет. Фазалық диаграмманың типті түрі. Нүктелерден құралған сызық судың қалыпсыз (аномальды) күйін көрсетеді:
 P_K – критикалық қысым, T_K – критикалық температура

Әртүрлі термодинамикалық фазаны бөліп тұрған сызық фазалық өту сызығы деп аталады. Егер зат қандайда бір аймақ ішіндегі нүктеде орналасса, онда ол толығымен осы термодинамикалық фазада жатыр. Егер заттың күйі фазалық өту сызығының бір нүктесінде болса, онда термодинамикалық тепе-теңдіктегі заттың бір бөлігі осы фазада, ал қалғаны бөлігі басқа фазада жатыр. Екі фазаның пропорциясы тәртіп бойынша, *жүйе қорының* толық энергиясымен анықталады.

Қысымы немесе температурасының баяу (адиабаттық) өзгерісі кезінде зат фазалық диаграммада нүктенің қозғалысы арқылы сипатталады. Егер осы нүкте өзінің қозғалысында сызықтардың бірін қиып өтсе, онда заттың физикалық қасиеті секірмелі түрде өзгеріп, фазалық өту құбылысы байқалады.

Фазалардың барлығы толығымен бір-бірінен фазалық өту сызығымен бөлінбейді. Кейбір жағдайларда бұл сызық *критикалық нүктемен* аяқталып, үзіліп кетуі мүмкін. Осы кезде бір фазадан екіншісіне өту секіrmелі өту емес, фазалық өту сызығын айналып біртіндеп өту болады. Фазалық диаграммадағы үш фазалық өту сызығының қиылысатын нүктесі *үштік нүкте* деп аталады.

Әдетте, балқу, қайнау және сублимация (буға айналу) сызығы дәл келсе, онда заттың үштік нүктесі дербес жағдай болып табылады, бірақ жеткілікті үлкен фазалық диаграммада бірнеше үштік нүкте болуы мүмкін. Үштік нүктедегі термодинамикалық тепе-теңдік күйіндегі зат жарым-жартылай барлық үш фазада болуы мүмкін.

1.4. Фазалардың тепе-теңдік шарты

Механикалық және жылулық тепе-теңдік күйде бола алатын термодинамикалық жүйедегі фазалар күйін термодинамикалық фазалардың тепе-теңдігі деп атаймыз.

Фазалық тепе-теңдіктің түрлері:

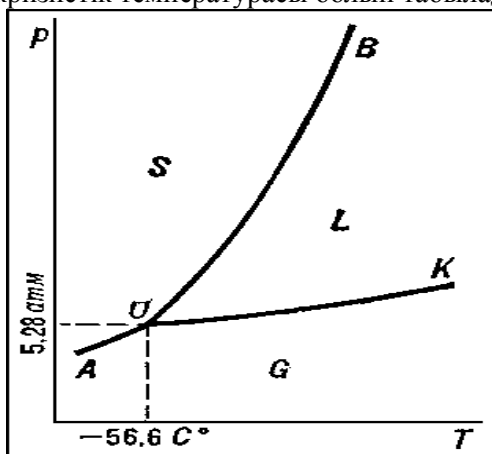
- жүйедегі заттың барлық фазалары бірдей температураға ие болса, онда ол жылулық фаза деп аталады;
- түйіскен фазалардың жан-жақтағы шекара бөліміндегі қысымдардың теңдігі механикалық тепе-теңдік деп аталады. Атап айтқанда, нақты жүйеде бұл қысымдар жуық шамамен беттік керілу құрайтын қысымдар айырымына тең. Қарапайым мысалдар - балқу температурасы кезіндегі мұз бен судың тепе-теңдігі, өзіндегі қаныққан буындағы судың тепе-теңдігі.

Бірдей термодинамикалық айнымалылардың басқа фазалық тепе-теңдік шартындағы тәуелділік қисығы тепе-теңдік сызық (беттегі) деп аталады, ал олардың жиынтығы күй диаграммасы деп аталады.

Күй диаграммасы – тепе-теңдік диаграмма, фазалық диаграмма – жүйенің физика-химиялық күй параметрлерінің арасындағы қатынастың қисықтық кескіні (температура, қысым, т.б) мен оның құрамы. Қарапайым жағдайда жүйе тек бір ғана

компоненттен тұратын болса, онда температура (T), қысым (p) және мольдік көлем (V) үш тіктөртбұрышты координата осінде үш өлшемді кеңістіктің пішіні күй диаграммасы болып табылады. Қолайсыз үлкендігінен көлемдік күй диаграммасын қолдану ыңғайсыз; сондықтан практикада күй диаграммасының проекциясын бір координата жазықтығында, әдетте $p - T$ жазықтығында қолданады.

2-суретте қарапайым мысал ретінде CO_2 көміртегінің қос тотығының күй диаграммасы (масштабпен алынбаған) кескінделген. О нүктесі (үштік нүкте) қатты, сұйықтық және газ тектес үш фазалық тепе-теңдіктен тұрады. О нүктесінде үш қисық қиылысады: OA (құрғақтау қисығы) CO_2 -нің қатты және газ тектес тепе-теңдік күйіне сәйкес, OK (булану қисығы) CO_2 -нің сұйықтық және газ тектес тепе-теңдік күйіне сәйкес, OB (балку қисығы) CO_2 -нің қатты және сұйықтықтың тепе-теңдік күйлеріне сәйкес болады. Бұл қисықтар диаграмма жазықтығын үш фазалар аймағынан тұратын үш өріске бөледі: S қатты, L сұйықтық және G газ тектес. K нүктесі газ бен сұйықтық қасиеттерінің арасындағы айырмашылық жойылатын CO_2 -нің ($31,0^\circ\text{C}$) кризистік температурасы болып табылады.



2-сурет. CO_2 көміртегі қос тотығының күй диаграммасы

1.5. Клапейрон – Клаузиус теңдеуі

Бұл термодинамикалық теңдеу заттың бір фазадан екіншісіне (булану, балқу, сублимация, полиморфтыға айналу, т.б.) өту процесін сипаттайды. Клапейрон – Клаузиус теңдеуіне сәйкес тепе-теңдік процесс кезіндегі фазалық өту жылуы (мысалы, булану жылуы, балқу жылуы) мынадай өрнекпен сипатталады:

$$L = T \cdot \frac{dp}{dT} \cdot (V_2 - V_1), \quad (1)$$

мұндағы T – фазалық өту кезіндегі температура (изотермдік процесс), dp/dT – берілген температуралық өтудегі қысымның температураға туынды мәні, $(V_2 - V_1)$ – заттың бір фазадан екіншісіне өту кезіндегі көлем өзгерісі.

1834 ж. Б.П.Э. Клапейрон ең алғаш рет сұйықтық пен жылулық тепе-теңдігінде тұрған конденсирленген бу үшін Карно циклы анализін қолданып теңдеу жазды, ал 1850 ж. Р. Клаузиус бұл теңдеуді жетілдіріп, оны басқа фазалық ауысуларға қолданды.

Клапейрон – Клаузиус теңдеуін жұтылу немесе жылу бөліну (бірінші текті фазалық ауысу) жүретін кез келген фазалық ауысуларға қолдануға болады және ол фазалық тепе-теңдік шартының негізінде тікелей қорытылып шығарылады.

Клапейрон – Клаузиус теңдеуінің көмегімен тәжірибе жүзінде қиындықпен анықталған булану жылуын есептеуге болады. Бұл теңдеу жиі dp/dT немесе dT/dp салыстырмалы туынды түрінде жазылады:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}. \quad (2)$$

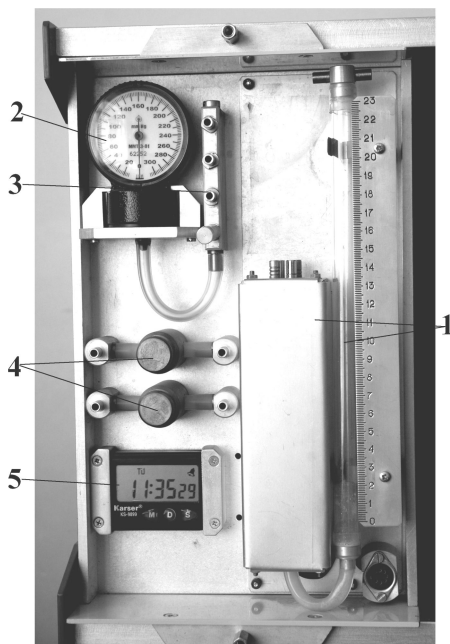
Булану мен сублимация процесі үшін dp/dT T температураның p қаныққан бу қысымының өзгерісі ретінде өрнектелсе, ал балқу мен полиморфты айналу процесі үшін қысым мен температураның ауысу өзгерісімен өрнектеледі.

Басқа сөзбен айтканда Клапейрон — Клаузиус теңдеуі p , T айнымалыларда фазалық тепе-теңдік қисығының дифференциалды теңдеуі болып табылады.

2. Эксперименталдық бөлім

2.1. "Газ-сұйықтық – №2" блогын сипаттау

"Газ-сұйықтық – №2 " және баллондар блогы «Автоклав» модулінен (1) 300 мм.сын.бағ. (40 кПа) манометр (2), тармақтардан (разветвитель) (3), штуцері (4) бар краннан және секундомерден (5) тұрады (3-сурет). "Автоклав-манометр – 05" модулі (4-сурет) қаныққан су буы қысымының температураға тәуелділігін зерттеуге қолданылады.

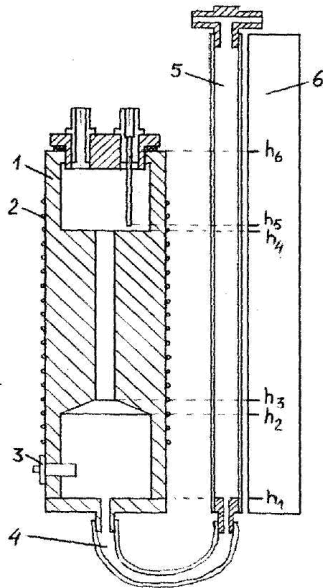


3-сурет. "Газ-сұйықтық – №2" блогы

Автоклавтың негізгі бөлігі диаметрі 6,0 мм дөңгелек каналмен байланысқан жоғарғы және төменгі қуыстары бар құбырдан (1) тұрады. Құбырда қыздырғыш (2) орама бар. Құбырға (3) температура датчигі орнатылған. Автоклавтың қуыстары сұйықтық деңгейі мен құралдың сипаттамалық нүктелерінің координатасы есептелінетін сызғыш (6) бойымен орналасқан өлшеу құбыры (5) бар шлангымен (4) жалғанған.

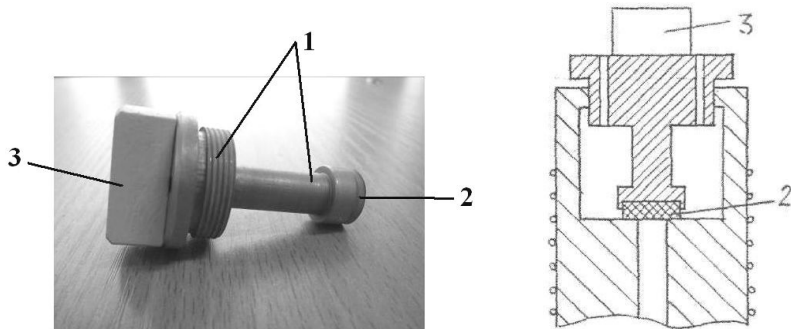
Сызғыш шкаласы бойынша автоклав деңгейлерінің сипаттамалық координаталары:

Құбырдың төменгі деңгейі	$h_1 = -10 \text{ мм}$
Төменгі қуыстың жоғарғы деңгейі	$h_2 = 25 \text{ мм}$
Каналдың төменгі деңгейі	$h_3 = 30 \text{ мм}$
Каналдың жоғарғы деңгейі	$h_4 = 95 \text{ мм}$
Ұзын капиллярдың төменгі қабырғасының деңгейі	$h_5 = 100 \text{ мм}$
Құбырдың жоғарғы деңгейі	$h_6 = 130 \text{ мм}$
Өлшеу құбырының көлденең қимасы	$S = 86,3 \text{ мм}^2$



4-сурет. "Автоклав-манометр" модулі

Автоклав құбырының жоғарғы жағы тығынмен тығындалады. (1) резеңке (2) шайбалы калибрленген каналдың жоғарғы жағы тұмшаланған зат тығын болып табылады. Ол бұрауға ыңғайлы болу үшін пластмасса тұтқадан (3) жасалған (әдетте, автоклав өте ыстық болғанда).



5-сурет. Тығын

2.2. Тәжірибе әдісі

Автоклав корпусының қуысына жоғарғы ұшы арқылы каналдың төменгі ұшының h_3 деңгейінен 3–5 мм жоғары h_0 деңгейіне дейін дистилляцияланған су немесе қайнаған су құйылады (4-сурет). Су каналдың төменгі жақтағы қуысына дейін толады. Каналды тығынмен жапқанда, оның қуысында ауа пайда болады, сол ауаның бастапқы көлемі V_o былай анықталады:

$$V_o = S_o (h_4 - h_0), \quad S_o = 28,3 \text{ мм}^2, \quad (3)$$

мұндағы S_o – каналдың көлденең қимасының ауданы, h_0 – өлшеу түтігіндегі сұйықтықтың бастапқы деңгейі (тығынмен жапқаннан кейін шкаламен анықталады), $h_4 = 95$ мм – каналдың жоғарғы ұшының деңгейі.

Корпусты қыздырғанда оның ішіндегі және онымен бірге (T) жаңа температураға дейін каналда ауа ұлғайып, оған су буы

қосылады. Су қуыстан өлшеу түтігінен жаңа h деңгейіне қарай ығысады. Ығысқан сұйықтық көлемі былай анықталады:

$$V = S (h - h_0), \quad S = 86,3 \text{ мм}^2, \quad (4)$$

мұндағы S – түтік каналының көлденең қимасының ауданы, h – өлшеу түтігіндегі жаңа сұйықтық деңгейі.

Ауа мен оның қосынды p_{cy} және $p_{\bar{cy}}$ қысымы $p_0 = 100$ кПа атмосфералық қысымға тең (дәл өлшеу үшін түтіктегі сұйықтық қысымының бағанын ескерген жөн). Сондықтан,

$$p_{cy} = p_0 - p_{\bar{cy}}.$$

Ауа үшін газ заңының теңдеуін пайдалана отырып:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{p_{cy} (V + V_0)}{T},$$

будың қысымын табамыз:

$$p_{\bar{cy}} = p_0 \left(1 - \frac{TV_0}{T_0(V + V_0)} \right). \quad (5)$$

мұндағы p_0 , V_0 , T_0 – ауаның бастапқы параметрлері, p_{cy} , $V + V_0$, T – ауаның соңғы параметрі, V – ауаны T_0 -ден T қыздырған кездегі ұлғайған көлемі.

Клапейрон-Клаузиус теңдеуінен $\ln p_{\bar{cy}}$ -нің $1/T$ тәуелділігі арқылы булану жылуын анықтауға болады:

$$L = - \left(\frac{R}{M} \cdot \frac{d(\ln p)}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \right), \quad (6)$$

мұндағы $R = 8,31$ Дж/(моль·К), $M = 18$ г/моль – мольдік масса.

2.3. Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Қондырғының жұмыс зонасына "Газ-сұйықтық –№2 " блогын (3-сурет) қондырыңыздар және автоклав қосқышын ИСТ-4 "Объект"-нің қосқышымен жалғаңыздар.

2. Автоклав корпусының қуысына жоғарғы тесігі арқылы каналдың төменгі ұшының $h_0 = 33\text{мм}$ деңгейіне дейін стаканмен дистилляцияланған су немесе қайнаған су құйыңыздар. Компрессордың көмегімен каналды ауа ағынымен толтырыңыздар, сосын тығынмен бұрап қойыңыздар.

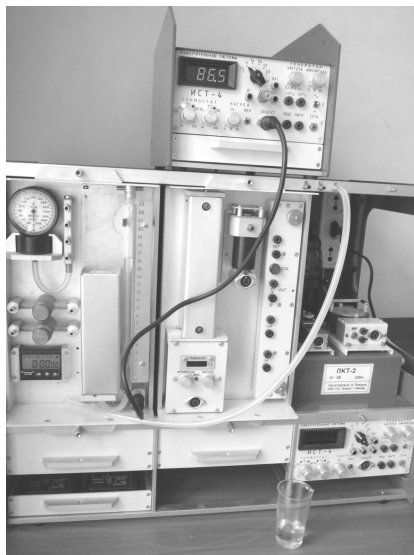
3. " $=0/\sim$ " тумблерден айнималы кернеу беріңіздер, ол үшін " $\sim$ " жағдайына қосыңыздар. "Сеть" тумблерлерін жоғарғы жағдайға қойыңыздар. Д2 датчик қосқышына тығынды бекітіңіздер.

4. Қыздырғышты қоспай тұрып, Т1 бұранданы бұрап бөлме температурасын өлшеп алыңыздар, сонда 4-разрядты сандық индикатор температураны көрсетеді.

5. Қыздырғышты термотұрақтандыру режиміне қойыңыздар ("Вкл" тумблерлерін жоғарғы жағдайға қойыңыздар). Қыздыру кернеуі $U_H=10-15\text{В}$.

6. «Т1» реттегішпен термостатты 30°C -қа қойыңыздар. Термотұрақтандыру режимінде сұйықтық температурасы тұрақты болып тұрады, осы кезде қызыл және жасыл екі индикатор жанады. Егер сұйықтық температурасы реттегішпен қойған «Т1» температурға дейін жетсе, онда қыздырғыш автоматты түрде сөнеді, осы кезде тек қызыл индикатор жанады. Сонан соң қызыл және жасыл екі индикатор бір мезгілде жанады, температураның біртекті таралуы үшін 2 минуттай ұстап тұрыңыздар, осы кезде өлшеу түтігіндегі су деңгейін өлшеңіздер.

7. "Т1" термостат реттегішімен кезек-кезек 40°C , 50°C , ... 80°C температура мәндерін беріңіздер. Белгіленген температураға жеткен соң (бір мезгілде екі қызыл және жасыл лампы жанады) 2 минуттай ұстап тұрып, өлшеу түтігіндегі жаңа су деңгейін өлшеңіздер.



6-сурет. Судың фазалық тепе-теңдік қисығын анықтауға арналған эксперименталды қондырғы

8. 80°C жоғары температура кезінде өлшеу қадамын 2–3 градустан қойып өлшеніздер, яғни "Т1" термостат реттегішімен $\approx 83^{\circ}\text{C}$, 85°C , 87°C ... 95°C температураларына қойыңыздар. Әрбір өлшеуге дейін өлшеу түтігіндегі су деңгейін 2 минуттай ұстап тұрыңыздар. Барлық нәтижелерді кестеге жазыңыздар.

9. (5) өрнектен $p_{\text{бу}}$ су буы қысымын есептеңіздер.

10. $\ln p_{\text{бу}}$ -ның $1/T$ -ға тәуелділігі қисығын тұрғызыңыздар.

Қисықтан $\frac{\Delta(\ln p_{\text{бу}})}{\Delta(1/T)}$ бұрыштық коэффициентті анықтаңыздар.

11. (6) өрнектен судың булану жылуын есептеңіздер.

Есте сақтаңыз!

1. Жүйеге қайнамаған суды құюға болмайды, өйткені нәтижелер мәні бұрмаланып кетеді.

2. Бөлме температурасына жақын температурада тығынмен жапқан кезде қалған бастапқы су буы қысымының нәтижелері бұрмаланып кетеді.

3. Автоклавтың іші тоттанып кетпес үшін, тәжірибе аяқталған соң, суды төгіп автоклавты 80-90 °С температураға дейін қыздырып кептіріңіздер.

1-кесте

$$h_0 = 33\text{мм}, \quad h_4 = 95\text{мм}, \quad S_o = 0,283 \text{ см}^2, \quad V_o = 1,75\text{см}^3$$

$p_{\text{бу}}$ температураға тәуелділігі

$t^{\circ}\text{C}$	T, K	$h, \text{см}$	$V, \text{см}^3$	$p_{\text{бу}}, \text{кПа}$	$\ln p_{\text{бу}}$	$1/T, 10^{-3}\text{K}^{-1}$	$L, \text{МДж/кг}$
Бөлме		3,3					
30							
40							
...							
80							
83							
86							
...							
95							

СҰЙЫҚТЫҚТЫҢ ТҮТҚЫРЛЫҒЫН ТЕМПЕРАТУРА АУМАҒЫНДА ЗЕРТТЕУ

Жұмыстың мақсаты: сұйықтықтың тұтқырлығының температураға тәуелділігін зерттеу.

1. Теориялық бөлім

1.1. Сұйықтықтың тұтқырлығы

Тұтқырлық немесе ішкі үйкеліс – деп ағыс бағытына параллель қозғалған газ немесе сұйықтық қабаттарының арасында ішкі үйкелісті тудыратын құбылыс. Үйкеліс ағыс бағытына перпендикуляр қабаттан қабатқа бағытталып,

молекуланың *импульсті* тасымалдауының нәтижесінде пайда болады.

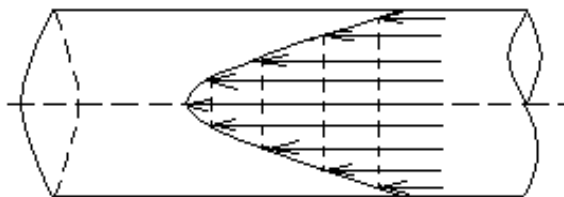
Сұйықтықтың тұтқырлығы – сұйықтықтың барлық қозғалысына әсерін тигізеді. Сондықтан тұтқырлықты білу көптеген практикалық *жағдайларға* қажет: су-, ауа- және мұнай тасымалын жобалау кезінде, организмде қан мен басқа сұйықтықтардың қозғалысын зерттеу кезінде және т.б. Сондықтан тұтқырлық шамасын және оның температураға тәуелділігін өлшеу үшін көптеген әдістер жетілдірілген.

Сұйықтықтың тұтқырлығы газ тұтқырлығынан едәуір өзгеше, шамасы жағынан олар көп және температура жоғарылаған сайын кенеттен төмендейді (газбен салыстырғанда сұйықтықтарда температура жоғарылаған сайын тұтқырлық өседі). Бұл сұйықтық күйдегі тығыз орналасқан (*упакованный*) молекулалар арасындағы әсерлесу жылдамдықпен қабаттар арасындағы ретсіз қозғалған жеке молекулалар соқтығысуының нәтижесінде қозғалыс мөлшерін тасымалдау әсерімен түсіндіріледі. Сұйықтықтың тығыздығы эффективті диапазондағы мұндай күштік өріс әсерінен орташа молекула аралық қашықтықтан айрықша емес. Кейбір шарттарға тәуелді құбыр бойымен тұтқыр сұйықтықтың ағуы ламинарлық (қабаттық) немесе турбуленттік (вихр, құйынды) болып бөлінеді. Ағыс сипаты Рейнольдс саны деп аталатын өлшемсіз шамамен анықталады:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta}, \quad (1)$$

мұндағы ρ – сұйықтықтың тығыздығы; v – ағыстың орташа жылдамдығы (құбыр бойымен); η – сұйықтың тұтқырлық коэффициенті; l – көлденең ағысқа тән өлшем, мысалы, цилиндрлік құбыр қимасының радиусы.

Рейнольдс санының өте аз мәндерінде ламинарлық ағыс байқалады. Кейбір анықталған Re мәнінен бастап критикалық деп аталатын ағыс турбулентті сипатқа ие. Дөңгелек мөлдір құбыр үшін: $Re_{кр.} \approx 2300$.

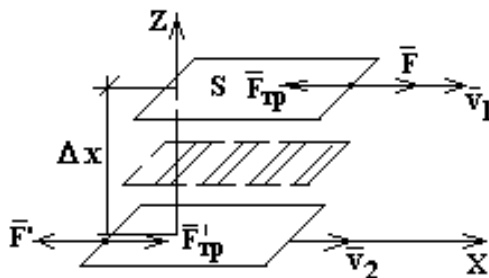


1-сурет. Құбыр ағысымен жылдамдықтың параболалық таралуы

Цилиндрлік құбырдағы сұйықтың ламинарлық ағысы кезінде шекаралық қабат оның қабырғаларына «жабыстандай», сондықтан сұйықтың жеке цилиндр қабаттарының қозғалыс жылдамдығы қабырғадан алшақтағанда артады және осы те максимумға жетеді (1-сурет).

Осы ағыс кезінде құбыр ағысы бойынша жылдамдықтың таралуы параболалық заң болып табылады.

Идеал сұйықтың, яғни үйкеліссіз сұйықтың абстракция болып табылады. Барлық реал сұйықтарға тән нәрсе оның көп, не аз дәрежеде тұтқыр болуы немесе ішкі үйкелістің болуы. Тұтқырлық сұйықтықта болатын қозғалыстың, оны туғызатын себептер әсері тоқтағаннан кейін, біртіндеп бәсеңдейтінінен байқалады.



2-сурет. Δx қалыңдықтағы сұйықтың көлемінің қозғалысы

Осы айтылғандарды түсіндіру үшін Δx қалыңдықтағы сұйықтың көлемі кескінделген 2- суретті қарастырайық. v_1 және v_2 – берілген көлемнің жоғарғы және төменгі бетінің жылдам-

дықтары. ($v_1 > v_2$), S – бет ауданы; S өлшемі Δx -тен едәуір үлкен.

Берілген көлемнің жоғарғы және төменгі беттері әртүрлі жылдамдыққа ие: v_1 және v_2 . Тәжірибе бұл жылдамдықтардың тұрақтылығын сақтап қалу үшін берілген көлемдер бетіне шамасы жағынан анықталған және тұрақты F және F' күштерді түсіру керек екенін көрсетті. Егер күштерді түсіру нәтижесінде жылдамдықтар тұрақты болып қалса, онда олардың әсерінен күштер қарама-қарсы бағытталған және шамасы жағынан тең болып қалыптасады, яғни бұл берілген сұйықтық көлемдерінің қозғалысына кері әсер ететін ішкі үйкеліс күші болып табылады.

Егер сұйықтықтың кез келген жерінен ойша бетке перпендикуляр жазықтық жүргізсек (2 -суреттегі пунктир жазықтық), онда сұйықтықтың осы жазықтық астында жатқан бөлігі $F'_{\text{үйк}}$ үйкеліс күшімен, ал сұйықтықтың төмен жатқан бөлігі өз кезегінде жазықтықтан төмен жатқан бөлігіне $F_{\text{үйк}}$ күшімен әсер етеді. Төменгі қабат жоғарыдағы қозғалысты, ал жоғарыдағы төмендегі қозғалысты үдетеді.

1.2. Ньютон заңы

Ішкі үйкеліс күшінің шамасы Ньютон өрнегімен өрнектеледі:

$$F_{\text{үйк}} = \eta \left| \frac{\Delta v}{\Delta x} \right| \cdot S, \quad (2)$$

мұндағы η – сұйықтықтың динамикалық тұтқырлығы, $\frac{\Delta v}{\Delta x}$

– шамасы жылдамдықтың Z осі бойынша қалай тез өзгеретінін көрсетеді және ол жылдамдық градиенті (дәлірек айтқанда, бұл жылдамдық градиентінің модулі; градиенттің өзі- вектор); S – қабат бетімен жанасатын аудан.

Тұтқырлық коэффициентінің физикалық мағынасы (2) өрнектен туындайды: бірлік жылдамдықтар градиенті кезінде бірлік аудандағы жанасатын бет қабаттарына кері әсер ететін ішкі үйкеліс күші санды түрде тұтқырлық коэффициентіне тең.

$\eta = F$, егер $S = 1 \text{ м}^2$ және $\Delta v/\Delta x = 1 \text{ с}^{-1}$. ЖБЖ тұтқырлық Па·с пен өлшенсе, ал СГС жүйесінде пуазбен $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ Пз}$ өлшенеді.

Сұйықтықтың тұтқырлық коэффициенті η сұйықтықтың табиғатына тәуелді және соңғы экспоненциалдық заң өскен сайын оның температурасы төмендейді.

1.3. Сұйықтық тұтқырлығының температураға тәуелділігі

Сұйықтық тұтқырлығының температураға тәуелділігін түсіндіру үшін оның молекулаларының жылулық қозғалысының сипатын ескерген жөн. Ол негізінен кейбір орташа тепе-теңдік қалыптағы аралықта молекулаларының тербелісінен туындайды, яғни қатты денедегі тепе-теңдік қалыптан өзгеше уақыттық сипатқа ие. Сұйықтық молекулалары бір уақыттық тепе-теңдік қалыптан екіншісіне өту үшін, ол молекулалардағы байланыстарын үзу керек, яғни активтендіру энергиясы деп аталатын ΔW кейбір энергияны жұмсау керек. Егер сұйықтық молекулалары біраз уақыт тепе-теңдік қалыпта болса, онда негізінен қозғалған сұйықтық массасы көрші қабаттардағы молекула аралық күштердің әсерінен жалғасулары температура өскен сайын тым кеміп кетеді.

Я.И. Френкель сұйықтықтарда молекула аралық жылулық қозғалыстың сипатын ескере отырып, сұйықтық тұтқырлығының температураға тәуелділігін мынадай өрнекпен сипаттады:

$$\eta = Ae^{\Delta W/kT}, \quad (3)$$

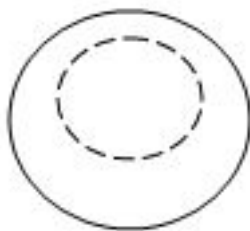
мұндағы ΔW – молекула аралық байланысты үзу үшін керекті активтендіру энергиясы, T – абсолют температура; k – Больцман тұрақтысы, $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$; e – натурал логарифм.

Сұйықтық ағысымен байланысты кейбір есептерді шешуге арналған Ньютон теңдеуін (2) пайдалана отырып, сұйықтықтың тұтқырлық коэффициентін тәжірибе жүзінде анықтауға қолданылатынын нақты сандық заңдылықты алуға болады.

Тұтқырлықты анықтаудың дәл және кең тараған әдістері мыналар: 1) тұтқыр ортада бытыраның түсу жылдамдығын өлшеу негізіндегі әдіс (Стокс әдісі); 2) капиллярдағы сұйықтық ағысының орташа жылдамдығын өлшеу негізіндегі әдіс (Пуазейль әдісі). Соңғысы тұтқырлықты анықтаудың негізгі салыстырмалы әдістеріне жатады.

1.4. Пуазейль әдісі

Радиусы R және ұзындығы l капилляр түтіктің вертикаль бойындағы ауырлық күшінің әсерінен болатын сұйықтықтың ламинар ағысын қарастырайық. 3-суретте құбыр каналының қимасы көрсетілген. Канал бойымен аққан сұйықтың цилиндрлік көлемін белгілеп алайық.



3-сурет. Құбыр каналының қимасы

(2) өрнектен қабырға жағындағы бетіне әсер ететін ішкі үйкеліс мынадай:

$$F = -\eta \cdot 2\pi \cdot r \cdot l \cdot \frac{dv}{dr}$$

мұндағы r – радиус, а l – белгілеп алған цилиндрдің ұзындығы.

Қалыптасқан қозғалыстағы F күш цилиндр негізіндегі Δp гидростатикалық қысым күшінің айырымымен теңгеріледі.

$$-\eta \cdot 2\pi \cdot r l \frac{dv}{dr} = \Delta p \pi \cdot r^2.$$

Сонда $dv = -\left(\frac{\Delta p}{2\eta l}\right) \cdot r dr$ тең. Құбыр қабырғаларындағы

жылдамдықты ($r=R$) нөлге тең деген шартпен осы өрнекті интегралдап, каналдағы ағыс бойынша жылдамдықтардың таралу заңдылығын аламыз.

$$v = \frac{\Delta p}{2\eta l} (R^2 - r^2). \quad (4)$$

Сондықтан t уақытта жіңішке канал арқылы аққан сұйықтың V көлемі мынаған тең:

$$V = \int_0^R v \cdot t \cdot 2\pi \cdot r dr. \quad (5)$$

(4) өрнектен мәнін v қойып және интеграл алсақ, онда мынаны аламыз:

$$V = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8 \cdot \eta \cdot l} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p \cdot t}{128 \cdot \eta \cdot l}. \quad (6)$$

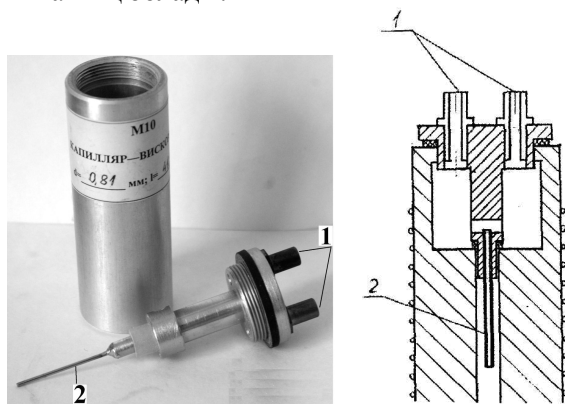
Бұл қатынас Пуазейль заңының өрнегі болып табылады.

1.5. Тәжірибенің орындалу тәртібі

Бұл жұмыста капиллярдағы орныққан сұйықтың орташа жылдамдығын өлшеу барысында сұйықтың тұтқырлығын анықтау үшін Пуазейль әдісі қолданылады. Капилляр ретінде капилляр-вискозиметр қолданылады. Ол (2) капиллярдан және (1) екі штуцерден тұрады.

Жұмыс ЛКТ–2 кешенде орындалады. Тұтқырлықты өлшеу сұлбасы 5-суретте көрсетілген. Сұйықтың тұтқырлығын өлшеу үшін “автоклав-манометр” қолданылады. Автоклавтың негізгі бөлігі диаметрі 6,0 мм дөңгелек каналмен байланысқан жоғарғы және төменгі қуыстары бар құбырдан (3) тұрады. Құбырда қыздырғыш орама (7) бар. Құбырға температура датчигі (8) орнатылған. Автоклавтың қуыстары сұйықтық деңгейі мен құралдың сипаттамалық нүктелерінің координатасы есептелінетін сызғыш (2) бойымен орналасқан өлшеу құбыры (1) бар шлангымен (6) жалғанған. Автоклавтың жоғарғы

қуысы капилляр-вискозиметрмен (5) бекітіледі. Автоклав құбырының жоғарғы қуысына (4-сурет) (1) екі штуцері бар (9,10) капилляр-вискозиметр бекітіледі және бұл қуыс (2) капилляр-вискозиметр автоклавтың басқа бөліктері арқылы жалғанады. (9) штуцермен автоклав құбырының жоғарғы қуысынан резеңке грушаменның көмегі арқылы ауа сорылып алынады. (10) штуцер кранмен жалғанады. Өлшеу түтігінің жоғары ұшы ашық болады.

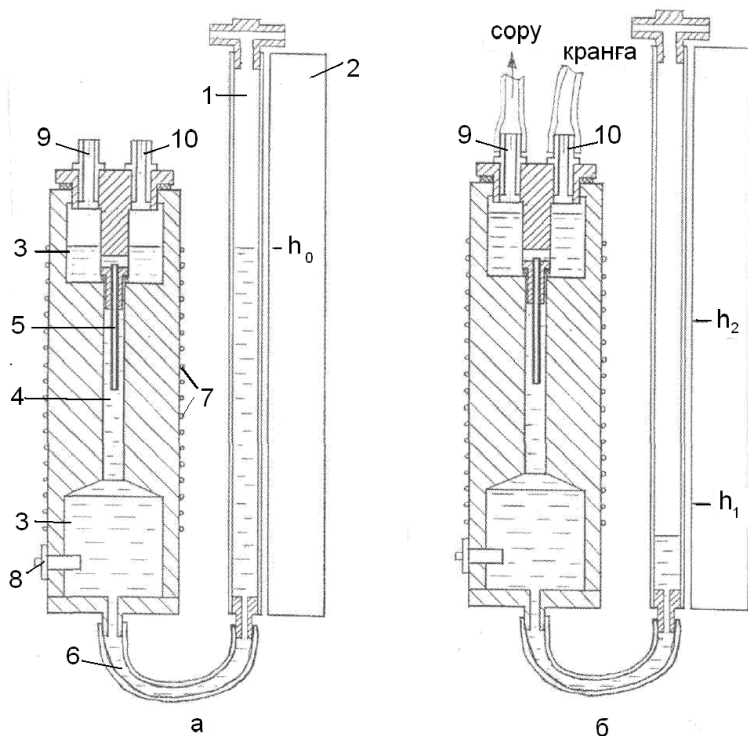


4-сурет. “Капилляр-вискозиметр – 04” модулі

Тұтқырлықты өлшеу сұлбасы 5-суретте көрсетілген. “Автоклав – 05” модуліне $h_0=105$ мм деңгейіне дейін сұйықтық құйылады. Сонан соң капилляр-вискозиметрмен бұрап қояды. Сұйықтықтың мұндай деңгейінде капилляр толығымен автоклавтың ішінде болады (5а-сурет). Өлшеу түтігінің жоғарғы жағы ашық болады.

Силикон шлангылардың көмегімен бір капилляр – вискозиметрдің штуцерін №1 кранға жалғап, осы кранның бір ұшын резеңке грушалы шлангымен жалғанады (6-сурет). Басқа штуцерді №2 кранның бір ұшымен жалғанады және бұл №2 кранды жауып қояды. Өлшеу түтігіндегі h_1 бастапқы таңдап алынғаннан 10 мм төмен грушаның көмегімен автоклавтың жоғарғы қуысындағы ауа сорылып алынады, сонан соң №1

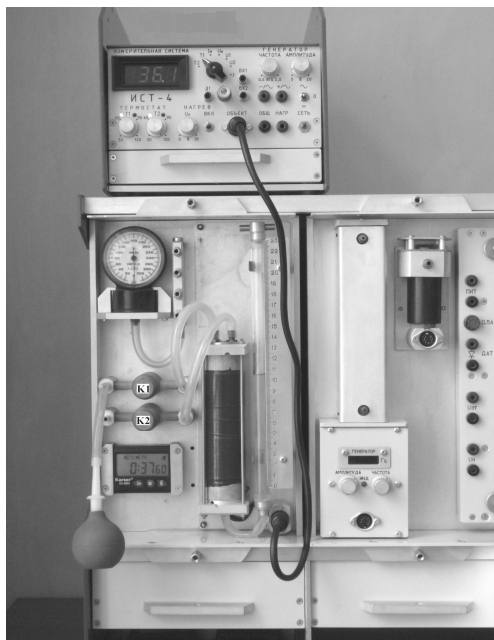
кранды (груша краны) жабады (5б-сурет). Егер екінші кранды ашсақ, онда автоклав қуысындағы қысым көтеріледі және сұйықтық өлшеу түтігіне кері қарай қайтады.



5-сурет. Сұйықтықтың тұтқырлығын өлшеу сұлбасы

Өлшеу түтігіндегі сұйықтықтың жылдамдығы капилляр арқылы аққан сұйықтықтың ағу жылдамдығына байланысты, яғни сұйықтықтың тұтқырлығына байланысты.

h_1 деңгейден белгіленген соңғы h_2 деңгейге дейін сұйықтықтың ағу қашықтығына кеткен Δt уақыт интервалы анықталады. Бұл уақыт сұйықтық тұтқырлығына пропорционал.



6-сурет. Тәжірибені жинау сұлбасы

Егер $\Delta h = h_0 - h$ - өлшеу түтігіндегі қалыпты жағдайдағы сұйықтық деңгейінің ығысуы. Капиллярдың төменгі жағындағы қысымның айырымы мына өрнекпен анықталады:

$$\Delta p = \rho g(h_0 - h)(1 + S/S'),$$

мұндағы S – өлшеу түтігінің ауданы, S' – автоклавтың жоғарғы кең қуысының көлденең қимасының ауданы.

Ұзындығы L және диаметрі d капилляр арқылы сұйықтықтың ағу жылдамдығы: $\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \cdot L \cdot \eta}$, сонда бұдан

$$\frac{dV}{dt} = S \frac{dh}{dt}.$$

Келтірілген қатынастардан өлшеу түтігіндегі сұйықтықтың деңгейі тепе-теңдік қалыпқа мына заңдылықпен жақындайды:

$$h_0 - h = \text{const} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

тұрақты уақытпен

$$\tau = \eta \frac{128 \cdot S \cdot L}{\pi \cdot d^4 \cdot \rho \cdot g \cdot (1 + S/S')},$$

h_1 және h_2 деңгейлер арасындағы сұйықтықтың өту қашықтығына кеткен уақытты анықтап, процестегі тұрақты уақытты табамыз:

$$\tau = \Delta t / \ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}, \quad (7)$$

мұндағы $\Delta h_1 = h_0 - h_1$ және $\Delta h_2 = h_0 - h_2$

Сұйықтықтың тұтқырлығы:

$$\eta = \tau \cdot \frac{\pi d^4 \cdot \rho \cdot g \cdot (1 + S/S')}{128 \cdot S \cdot L}. \quad (8)$$

2. Эксперименталдық бөлім

2.1. Жұмыстың орындалу реті

1. Автоклавтың өлшеу сызығындағы шкала бойынша $h_0=105\text{мм}$ деңгейіне дейін су құйыңыздар. Сонан соң капилляр-вискозиметрмен бұрап қойыңыздар.

2. Силикон шлангылардың көмегімен бір капилляр – вискозиметрдің штуцерін №1 кранға жалғап, осы кранның бір ұшын резеңке грушалы шлангымен жалғаңыздар (6-сурет). Басқа штуцерді №2 кранның бір ұшымен жалғаңыздар. Екі

кранды да жауып қойыңыздар. Өлшеу түтігінің жоғарғы жағы ашық болады.

3. Резеңке грушаны шлангымен жалғап, грушаны қолыңызбен оның көлемін барынша сығып төмендетіңіздер. №1 кранға грушасы бар шлангыны кигізіңіздер (грушаны сығуды ары қарай жалғастыра беру керек).

4. Жайлап №1 кранды (грушасы бар кран) ашыңыздар. Ауа қуыстан грушаға сорылады, ал сұйықтық өлшеу түтігімен ағып автоклав қуысына қарай өте бастайды. Бұл кезде өлшеу түтігіндегі h_1 сұйықтық деңгейі бастапқы берілген деңгейден 20-30 мм төмендейді (6-сурет).

5. Грушамен жалғанған №1 кранды жабыңыздар және атмосферасы бар қуыспен жалғанған №2 кранды ашыңыздар. Сұйықтық бастапқы күйіне қарай қозғалып (өлшеу түтігіндегі h_2 сұйықтық деңгей) аға бастайды. h_1 деңгейден белгіленген соңғы h_2 деңгейге дейін сұйықтықтың ағу қашықтығына кеткен Δt уақыт интервалы секундомермен өлшеңіздер. 3-5 пункттерді әрбір орындаған сайын шлангтан грушаны алыңыздар және жүйені бастапқы күйге келтіріп, нәтижені 3 рет қайталаңыздар. Су деңгейін (105 мм) бастапқы қалыпқа келтіріп отыру үшін капилляр-вискозиметрді ашып, қайта жапқан дұрыс. Нәтижелерді 1-кестеге жазыңыздар. *Ескерту: жұмыс жасау барысында крандарға су кетіп қалмауын қадағалаңыздар!*

6. ИСТ-4 өлшеу жүйесінің «ОБЪЕКТ»-ін автоклав-манометрмен қосқыш (разъем) арқылы жалғаңыздар. Д2 датчик қосқышына (разъем) тығынды (заглушка) бекітіп қойыңыздар.

7. "=/0/~" тумблерден айнымалы кернеу беріндер, ол үшін "~" жағдайын қосыңдар. "Сеть" және "вкл" тумблерлерін жоғарғы жағдайға қойыңыздар. *Термостат реттегішін «Т1» жағдайына қойыңыздар.* Осы кезде бөлме температурасын көрсеткен сандық индикатор жанады. Термометрдің көрсетуін кестеге жазыңыздар.

8. "Вкл" тумблерімен қыздырғышты қосыңыз. «Т1» реттегіш регуляторымен термостатты 30°C-қа қойыңыз. Реттегіш бұрандамен U_H -ты 10В - 15В қойыңыз. Су қыза бастайды. Белгіленген температураға жеткенде қызыл

индикатор жанып, термотұрақтандыру жүйесі іске қосылады және су температурасын тұрақты етіп ұстап тұрады (осы кезде екі индикатор да жанады: жасыл және қызыл).

9. Басқа температураларды орындау кезінде 3-5 пункттерді қайталап, өлшеу түтігіндегі берілген су деңгейінің (h_1 деңгейден белгіленген соңғы h_2 деңгейге дейін) арасына кеткен Δt уақыттың мәндерін 1-кестеге жазыңыздар.

10. 50°C, 70°C және 90°C шамамен тең температура интервалдарына өлшеу жүргізіңіздер. Нәтижелерді 1-кестеге жазыңыздар.

1-кесте

τ тұрақты уақыт пен η тұтқырлық коэффициентін анықтау
 $h_0 = 105 \text{ мм}$, $h_1 = 20\text{--}30 \text{ мм}$, $h_2 = 70\text{--}80 \text{ мм}$.

t_i °C	h_0 мм	h_1 мм	h_2 мм	Δt , с	τ_i , с	$\langle \tau \rangle$, с	$\Delta \tau$, с	ε_i , %	$\eta_i \cdot 10^{-4}$ Па·с	$\langle \eta \rangle \cdot 10^{-4}$ Па·с	$\Delta \eta_i \cdot 10^{-4}$ Па·с	ε_η
Бөлме												
30												
50												
70												
90												

11. (7) есептеу өрнегін пайдаланып, әрбір өлшеу үшін τ_i тұрақты уақытты есептеңіздер. (8) есептеу өрнегін пайдаланып, әрбір өлшеу үшін η_i сұйықтың тұтқырлығын есептеңіздер. Есептеу кезінде мына мәндерді пайдаланыңыздар:

Капиллярдың ұзындығы $L=41,5\text{мм}$, капиллярдың диаметрі $d=0,81\text{мм}$, $g=9,81\text{м/с}^2$.

Өлшеу түтігінің көлденең қимасының ауданы $S=0,863\text{см}^2$, автоклавтың жоғарғы кең қуысының көлденең қимасының ауданы $S'=6,16\text{см}^2$.

Өртүрлі температура кезіндегі ρ судың тығыздығы төмендегі 3-кестеде арнайы көрсетілген.

12. Өртүрлі температура кезіндегі $\langle\tau\rangle$ мен $\langle\eta\rangle$ орташа мәнін анықтаңыздар.

13. Тікелей өлшеу әдісі бойынша $\Delta\tau$ мен $\Delta\eta$ -дың абсолютті қателігін есептеңіздер.

14. Барлық есептеу нәтижелерінің мәндерін 1-кестеге жазыңыздар.

15. Миллиметрлік қағазға сұйықтың тұтқырлық коэффициентінің температураға тәуелділігін салыңыздар.

16. Судың тұтқырлық коэффициентінің кестелік мәні мен тәжірибелік мәндерін салыстырыңыздар.

КАПИЛЛЯРДАН АҚҚАН АУАНЫҢ ТҮТҚЫРЛЫҒЫН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: ауаның динамикалық тұтқырлығын анықтау, молекуланың еркін жүру жолының ұзындығын есептеу, берілген нәтижелер бойынша Рейнольдс санын және ауаның диффузия коэффициентін есептеу.

1. Қысқаша теориялық кіріспе

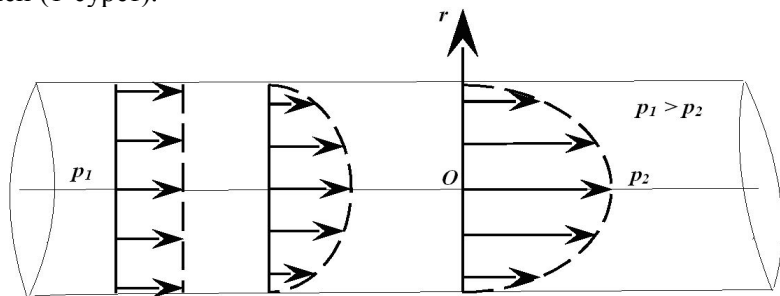
1.1. Тұтқырлық

Идеал сұйықтық, яғни үйкеліс білінбейтін сұйық орта түсінігі абстракция екені ақиқат. Мұны күнделікті тәжірибе дәлелдеп отыр. Барлық реал сұйықтықтар мен газдарға көп не аз дәрежеде тұтқырлық немесе ішкі үйкеліс тән қасиет.

Тұтқырлықты сұйықтықта немесе газда қайсыбір күш әрекетінен пайда болған қозғалыс оның себебі болған күш әрекеті жойылғаннан кейін біртіндеп тоқтағанынан байқауға болады. Тұтқырлықтың (ішкі үйкеліс) сандық сипаттамасы *тұтқырлық коэффициенті (ішкі үйкеліс коэффициенті)* болып табылады.

Газдардың тұтқырлығы молекула – кинетикалық теория тұрғысынан былай түсіндіріледі. Газдың бағытталған қозғалысы кезінде (мысалы, түтікте) газ молекулалары бір мезгілде екі қозғалысқа түседі: хаосты жылулық және бағытталған. Қабырғаға жақын тұрған молекула қабырғамен соқтығысу нәтижесінде өз энергиясын жоғалтады және қозғалысы бәсеңдейді.

Жылулық қозғалыстың әсерінен олар жақын маңайдағы газ қабатына өтіп, олардың да қозғалысын бәсеңдетеді. Осының салдарынан қозғалған молекуланың бағытталған жылдамдығы түтіктің көлденең қимасында әртүрлі нүктеде әрқилы болады екен (1-сурет).



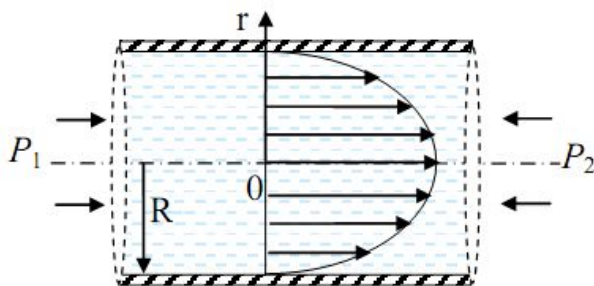
1-сурет. Түтік қимасы арқылы жылдамдықтың таралуы

Ламинарлық ағыс кезінде газ ағынының қабаттарда бір-бірімен араласпай қозғалады және қабат аралығында бағытталған қозғалыс жылдамдығы тұрақты болып қалады.

Дөңгелек қималы цилиндрлік түтікше үшін түтікшенің ұшынан біршама қашықтықта *жылдамдықтың (v) стационарлы таралуы параболалық заң* бойынша қалыптасады:

$$v = \frac{\Delta p}{4\eta L} (R^2 - r^2), \quad (1)$$

мұндағы $\Delta p = p_1 - p_2$ - түтікше ұштарындағы қысымның айырымы, L – түтікше ұзындығы, R – оның радиусы, r – радиалды координата (1-сурет), η – динамикалық тұтқырлық коэффициенті.



2- сурет

Капилляр ұштарында газ ағыны болу үшін қысымның төмендеуін демеп отыру керек. Қысымның төмендеуі неғұрлым көп болса, соғұрлым газ ағыны мен оның жылдамдығы көп болады 2-сурет.

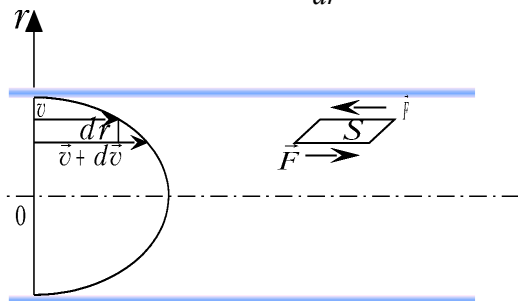
Динамикалық тұтқырлық коэффициентінің физикалық мағынасы ішкі үйкеліс күші Ньютон заңымен түсіндіріледі:

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dv}{dr}, \quad (2)$$

мұндағы (S) – жанасу ауданы, F – екі көрші қабат арасындағы әсерлесу күшінің модулі, $\frac{dv}{dr}$ – радиалды бағытта

бір қабаттан екінші қабатқа өту кезіндегі ағыс жылдамдығының өзгерісін білдіретін біртекті жағдай үшін жылдамдықтар градиенті деп аталатын шама (3-сурет). (2) өрнектен динамикалық тұтқырлық коэффициентін былай өрнектеуге болады:

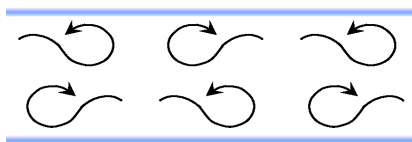
$$\eta = \frac{F}{S \cdot \frac{dv}{dr}}, \quad (3)$$



3-урет. Ішкі үйкеліс күші

Осыдан динамикалық тұтқырлық коэффициенті (өлшем бірлігі $\text{Н} \cdot \text{с} / \text{м}^2 = \text{Па} \cdot \text{с}$.) деп жылдамдық градиенті бірге тең газ қабаттарының өзара жанасқан бірлік ауданына келетін күшке тең шаманы айтады.

Егер қысымның төмендеуі күшейсе, онда ағыс жылдамдығы артады және газ ламинарлық қозғалыстан турбуленттік қозғалысқа өтеді, бөлшектер жылдамдығы ретсіз өзгеріп, қабаттар араласып, құйын пайда болады (3 -сурет).



4-урет. Турбулентті қозғалыс

Газдың (сұйықтықтың) өзгеріс сипатын бағалау үшін *Рейнольдс саны* деп аталатын өлшемсіз шама қолданылады:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot r}{\eta} = \frac{v \cdot r}{\nu}, \quad (4)$$

мұндағы ρ – ортаның тығыздығы, v – ағыстың орташа жылдамдығы, r – сипаттамалық өлшем (диаметр – өңгелек түтікше үшін), η - динамикалық тұтқырлық коэффициенті, $\nu = \eta/\rho$ – кинематикалық тұтқырлық коэффициенті. Ал Рейнольдс саны деп инерциялық күш пен тұтқырлық күш арасындағы қатынасты анықтайтын, тұтқыр сұйықтық пен газ ағысының ұқсастық критерийерінің бірін атайды. Егер Рейнольдс $Re \leq 1000$ тең болса, онда дөңгелек түтіктегі газдың қозғалысы ламинарлық болып табылады.

Егер газды идеал деп есептесек, онда молекула-кинетикалық теориядан динамикалық тұтқырлық коэффициенті үшін мына өрнекті алуға болады:

$$\eta = \frac{1}{3} \lambda \cdot \rho \cdot v, \quad (5)$$

мұндағы λ – көршілес екі соқтығысулар арасындағы молекуланың орташа еркін жүру жолы, $v = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ -

молекуланың жылулық қозғалысының орташа арифметикалық қозғалысы, $R=8,314$ Дж/моль·К – газдың универсал тұрақтысы, M – мольдік масса, T – газдың абсолют температурасы.

Дөңгелек қималы цилиндрлік түтікшедегі газ ағынының ламинарлық қозғалысын $Q = \frac{dV}{dt}$ шығын деп те атайды, яғни бірлік уақытта түтікшенің көлденең қимасы арқылы аққан газ көлемі Пуазейль өрнегімен өрнектеледі:

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta L} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128\eta \cdot L}, \quad (6)$$

мұндағы L , d , R – түтікшенің ұзындығы, диаметрі және радиусы.

1.2. Тәжірибенің орындалу тәртібі

Бұл жұмыста V_0 көлемді баллон ауамен толтырылады, сосын кранды ашады және баллоннан ауа капилляр арқылы атмосфераға қарай ағады. Осы кезде баллондағы қысым төмендейді, капилляр соңындағы қысымның айырымы $\Delta p = p - p_{\text{атм}}$ үздіксіз кемиді. Сондықтан қысымның айырымы ауаның капилляр арқылы ағу уақытына t тәуелді.

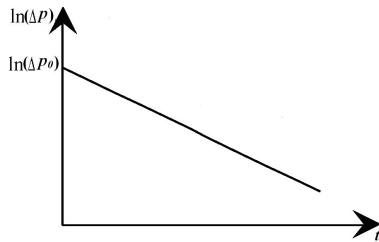
Δp -ның t -ға тәжірибелік тәуелділігі 5- суретте көрсетілген. Бұл қисықты былай өрнектеуге болады:

$$\Delta p = \Delta P_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (7)$$

мұндағы Δp_0 – бастапқы уақыт моментіндегі ($t=0$) қысымның айырымы, ал τ шамасы төменде түсіндіріледі.



5-сурет. Δp -ның t -ға тәуелділігі



6-сурет. $\ln(\Delta p)$ -ның t -ға
логарифмдік тәуелділігі

(7)-ні логарифмдеп, мына өрнекті аламыз:

$$\ln(\Delta p) = \ln(\Delta p_0) - \frac{t}{\tau}. \quad (8)$$

Бұдан $\ln(\Delta p)$ -ның t -ға логарифмдік тәуелділігі түзу сызық болады (6-сурет). (8) өрнектен $\ln(\Delta p_0) - \ln(\Delta p) = \frac{t}{\tau}$ немесе

$$\tau = \frac{t}{\ln(\Delta p_0) - \ln(\Delta p)}.$$

Осы өрнектегі τ шамасын түсіндірейік. Өлшем бірлігі бойынша – уақыт, бірақ дәреже көрсеткішіндегі қатынастың өлшем бірлігі болмау керек. Егер $t = \tau$ болса, онда $\Delta p_0 / \Delta p = e$ ($e \approx 2,72$ – натурал логарифм). Сонымен бастапқы Δp_0 қысым айырымының e есе өшуіне кететін уақыт. τ шамасын релаксация уақыты деп атайды. (7) теңдеуді уақыт бойынша дифференциалдаймыз,

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = -\frac{1}{\tau} \Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{\Delta p}{\tau}. \quad (9)$$

(6) өрнектен динамикалық коэффициентін есептеу үшін

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad \text{және} \quad \frac{dp}{dt}$$

шығындарын байланыстырған жөн.

Капилляр арқылы баллондағы ауаның ағуын тұрақты массасы бар изотермдік газдың ұлғаю процесі ретінде қарастыруға болады. Менделеев-Клапейрон теңдеуі бойынша $pV = \text{const}$. Бұл теңдеуді уақыт бойынша дифференциалдаймыз,

$$p \frac{dV}{dt} + V \frac{dp}{dt} = 0 \quad \text{немесе} \quad \frac{dV}{dt} = -\frac{V}{p} \frac{dp}{dt}. \quad (10)$$

(10) мен (6) теңестіреміз,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \Delta p}{128 \eta \cdot L} = -\frac{V}{P} \frac{dp}{dt}.$$

$p_{амм} = \text{const}$ екенін ескерсек, онда

$$\frac{d(\Delta p)}{dt} = \frac{d(p - p_{амм})}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad \text{тең,}$$

сондықтан (9) өрнектен шығатыны:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{d(\Delta p)}{dt} = -\frac{\Delta p}{\tau}.$$

$V \approx V_0$ екенін ескеріп, (өйткені капилляр ауданы баллон ауданынан көп кіші), ал $p \approx \langle p \rangle$ (p қысым айырымын орташа бақылау уақытындағы $\langle p \rangle$ қысымға алмастыруға болады) тең деп динамикалық тұтқырлық коэффициенті үшін мынадай өрнек аламыз:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \tau \cdot \langle p \rangle}{8 \cdot L \cdot V_0} = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \tau \cdot \langle p \rangle}{128 \cdot L \cdot V_0} . \quad (11)$$

Егер капиллярдағы газдың T температурасы баллондағы T_0 газ температурасынан өзгеше болса, онда газдың капилляр арқылы өткен көлемі $V=V_0 T/T_0$ тең және тұтқырлықты есептеу өрнегі мынадай:

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \langle p \rangle \cdot \tau \cdot T_0}{128 \cdot L \cdot V_0 \cdot T} . \quad (12)$$

Δp -ның үлкен мәндерінде газ ағысы турбулентті. $\ln(\Delta p)$ -ның t -ға тәуелділігі сызықты, бірақ қисаюы шамалы болады. Қисықтың сынығы бойынша ағыс түрінің өзгерісін анықтауға болады. Сонымен қатар ағыс түрін анықтау үшін *Рейнольдс санының* мәні де қажет. Ол үшін $Re = \rho \cdot v \cdot r / \eta$ (4) өрнекті пайдаланамыз.

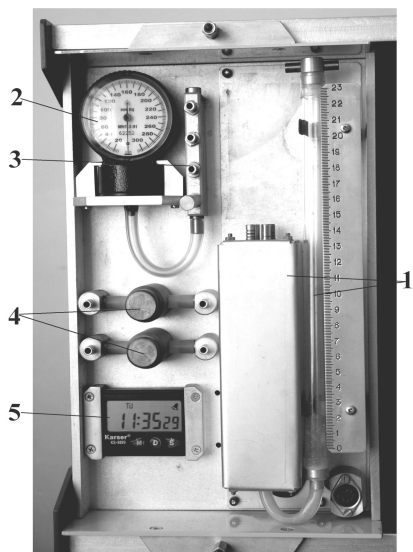
$Re < 1000$ кезінде түтікшедегі ағыс ламинар болады. $\frac{dV}{dt} = \frac{V \pi d^2}{4}$ ескеріп және (4), (6) өрнектерді пайдаланып, *Рейнольдс санын* табамыз:

$$Re = \frac{\rho d^3 \Delta p_0}{64 \eta^2 L} , \quad (13)$$

мұндағы d , L – капиллярдың диаметрі және ұзындығы, v – газдың орташа жылдамдығы, ρ – газ тығыздығы (қалыпты жағдайда $\rho_{аға} = 1,3 \text{ кг/м}^3$), Δp – капилляр ұшындағы қысымның айырымы.

1.3. «Газ-сұйықтық – №2» блогымен танысу

"Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы «Автоклав» модулінен (1) 300 мм.сын.бағ. (40 кПа) манометр (2), тармақтардан (разветвитель) (3), штуцері (4) бар краннан және секундомерден (5) тұрады (7-сурет).



7-сурет. «Газ-сұйықтық – №2» блогы

Автоклав құбырының жоғарғы қуысына дроссельдер блогы бекітіледі (9-сурет). Резеңке дискілі (2) калибрленген каналдың жоғарғы жағы тығынмен (1) тұмшаланған. Тығын бұрауға ыңғайлы болу үшін пластмасса тұткадан (3) жасалған (әдетте, автоклав өте ыстық болады). Оған кіретіндей етіп, капилляр (3), яғни калибрленген тесік дроссель (2) орнатылады. Дроссельдер пневможүйеге (4) штуцер арқылы бекітіледі.

Штуцерде дроссель нөміріне сәйкес белгілер саны жасалынған.

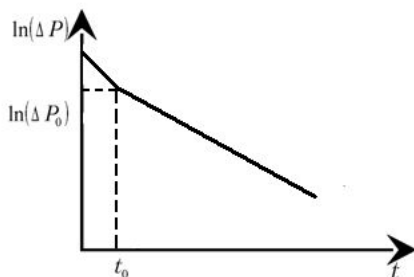
Дроссель штуцеріндегі №:0 – қиғаш бөліктерсіз, №:1 – бір қиғаш бөлігі бар және т.с.с. Бұл жұмыста №:0 (қиғаш бөліктерсіз) және №:3 (үш қиғаш бөлігі бар) дроссельдер қолданылады. №0 дросселі – бұл диаметрі 3,5 мм калибрленген тесік, ал №:3 дросселі – капилляр диаметрі 0,29 мм, ұзындығы 29,5 мм. болып келеді. Қалған қолданылмайтын №:1 және №:2

9-сурет. Дроссельдер блогы модулі

Манометр тармақтарында (разветвитель) 4 шығыс бар. Оның бірінші және екіншісі жалпы көлемі 3,21 литрлік екі баллонмен, үшінші шығысы автоклав қуысымен (№:0 дросселінің 11 штуцері арқылы) және төртінші шығысы K компрессормен ((12) $K1$ кран арқылы) жалғанған. Қолданылатын 15 капилляр (№:3 дросселі) екінші (14) $K2$ кран арқылы атмосфераға жалғанған. Қалған дросселдер мен өлшеу түтігінің жоғарғы жағы 16 тығынмен тұмшаланған.

Алдымен $K2$ кранды жауып, $K1$ ашық кран арқылы компрессорды қосып, $\Delta p = 130$ мм.сын. бағ. қысымға дейін жүйеге ауа айдайды. Сосын $K1$ кранды жабып, компрессорды өшіреді. Егер $K2$ кранды (капилляр) ашсақ, онда ауа капилляр арқылы Δp қысыммен автоклав – манометрге өтеді, ауа атмосфераға ағып манометрдегі Δp қысым төмендейді. Қысымның уақытқа тәуелділігін міндетті түрде жазып отыру керек, оның түрі теориялық тұрғыда гипербола болады (4-сурет).

Ауа ағысының ламинар екеніне көз жеткізу үшін, $\ln \Delta p$ -ның уақытқа тәуелділігін тұрғызу керек (қисықтың үлгісі 5-суретте көрсетілген). Егер қисықта *сынық* (иілім) (10-сурет) болса, онда Δp -ның өте айырымы кезіндегі режим ағыстың турбулентті екенін білдіреді ("а" аймақ). Бұл жұмыстағы пайдаланылған өрнектер ламинарлық ағыс үшін қолданылады десек, нәтижелерді өңдеу барысында "в" аймақ қана есептелінеді.



10-сурет. Ауа ағысының режимі өзгерісіндегі тәуелділік

Қисықта сызықты бөлік қана белгіленеді және уақыт тұрақтысы мына өрнекпен анықталынады: ламинарлық ағыс кезіндегі τ мәні бойынша (12) өрнекпен газдың тұтқырлығы есептелінеді. Егер $Re < 1000$ болса, онда түтіктегі ағыс ламинарлы болады.

$$\tau = \frac{\Delta t}{\Delta(\ln(\Delta p))}. \quad (14)$$

Капиллярдың параметрлерін ($d=0,29$ мм және $L=29,5$ мм) біле отырып, ламинарлық ағыстан турбуленттікке өту кезіндегі $Re_{крит}$ критикалық мәнін есептеуге болады. (13) өрнектен

$$Re_{крит} = \frac{\rho d^3 \Delta p_{крит}}{64 \eta^2 L}, \quad (15)$$

мұндағы $\Delta p_{крит}$ – 10 суреттегі қисыққа сәйкес қысымның айырымы.

Осыған ұқсас тәжірибені 2 кПа қысымға дейін жасау үшін автоклав манометр ретінде қолданылады. Өлшеу түтікшесінің жоғарғы жағы ашық болады. Автоклавқа h_0 -ден деңгейінен 2–4 мм төмен төменгі қуыстың жоғарғы h_2 ($h_2 = 25$ мм) деңгейіне дейін су құяды (7-сурет).

Өлшеу түтікшесіндегі судың h деңгейі 150–200 мм-ге дейін көтерілмейінше жүйеге ауа айдайды. Сосын ауаны капилляр арқылы атмосфераға жіберіп, h -тың уақытқа тәуелділігі жазылып отырылады. $\ln \Delta h = \ln(h - h_0)$ -тың уақытқа тәуелділік қисығы тұрғызылып, τ уақыт тұрақтысы анықталынады.

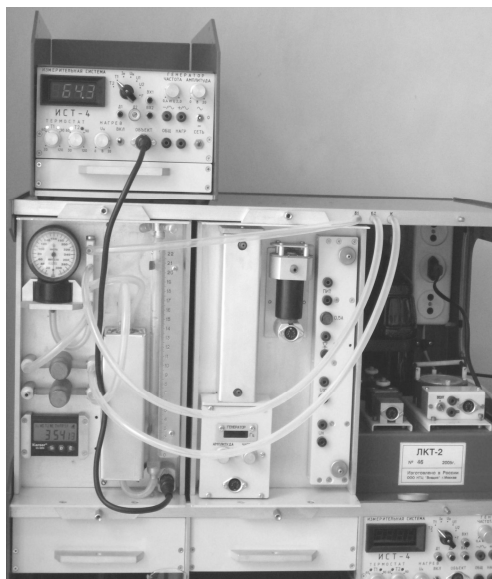
2. Эксперименталдық бөлім

2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі

Бұл жұмысты лаборанттың көмегімен немесе екі студент жасауы керек. Ол үшін бір студент манометр мен секундомердің

көрсетуін бақылап отырады, ал екіншісі 1-кестеге мәндерді жазып отырады.

1. 9 және 11-суреттегі сұлба бойынша кондырғыны жинаңыздар. Ол үшін дроссельдер блогын автоклав түтікшесінің жоғарғы жағына бұрап, орнатыңыздар. Дроссельдің бір және екі қиғаш бөлігін тығынмен тығындап қойыңыздар. Сұлбаны силикон шлангының көмегімен жалғаңыздар.



11-сурет. Газ тұтқырлығының температураға тәуелділігін зерттейтін эксперименталдық кондырғы

2. К2 кранды жауып, К1 кранды ашыңыздар және компрессорды қосыңыздар. $\Delta p=130$ мм.сын. бағ. қысымға дейін жүйеге компрессордың көмегімен ауа ағынын жіберіңіздер. Сосын К1 кранды жауып, компрессорды өшіріңіздер.

3. Қысым айырымының уақытқа тәуелділігін жазып отырыңыздар. Ол үшін К2 кранын ашыңыздар, ауа Δp қысыммен (15) капилляр арқылы өте бастайды және ауа

біртіндеп ашық (14) К1 кран арқылы атмосфераға (сыртқа) ағып манометрдегі Δp қысым төмендейді. (11) тесік арқылы ауа баллондар блогынан автоклавқа өтеді. Осы кезде манометрдегі ауа қысымы төмендейді.

4. 10 мм сын. бағ. интервалымен қысым 120 мм сын.бағ., 110 мм сын. бағ. және т.с.с. төмендегендегі уақыттың көрсетуін жазып алыңыздар. Секундомер экранындағы көрсетулердің барлық нәтижелерін (минутпен, секундпен және секунд бөлігімен, мысалы: 00:57,₂₅) 1-кестенің екінші бағанына жазыңыздар.

5. Секундомердің ортаңғы басқышын бір (немесе екі) рет басып, «00:00,00» нөлдік есепке келтіріңіздер. Сонан соң барлық өлшеуді (2–5 пункт) тағы екі рет қайталаңыздар. Уақытты 1-кестенің үшінші және төртінші бағанына жазыңыздар.

6. ИСТ–4 өлшеу жүйесінің «ОБЪЕКТ»-тісімен автоклав-манометрді қосқыш арқылы (разъем) жалғаңыздар. Д2 датчик қосқышына (разъем) тығынды бекітіңіздер.

7. "=/0/~" тумблерден айнымалы кернеу беріңіздер, ол үшін "~" жағдайына қосыңыздар. "Сеть" тумблерін жоғарғы жағдайға келтіріңіздер. Термостат реттегішін «Т1» жағдайына қойып, бөлме температурасының мәнін 1-кестеге жазыңыздар.

8. "Вкл" тумблерлерін жоғары келтіріп, қыздырғышты қосыңыздар.

«Т1» термостат реттегішін 90–100°C температураға қойыңыздар. «Нагрев» реттегішінің көмегімен кернеуді 10В – 15В келтіріңіздер. Осы кезде автоклавағы ауа қыза бастайды. Беліленіп көрсетілген температураға жеткенде, қызыл индикатор жанып, жүйе тұрақтана бастайды және ауа температурасы тұрақты мәнді ұстап тұрады (ол үшін қызыл және жасыл индикаторлар жануы керек).

9. Басқа температуралармен жұмысты жалғастырыңыздар, ол үшін 2–5 пункттерді қайталаңыздар. Ауа қысымы айырымының уақытқа тәуелділігін осы температураларда анықтаңыздар. Капиллярдан ауаның ағуы кезіндегі қысым айырымының төмендеуі барысындағы ізделініп отырған уақыттың мәндерін 2-кестеге жазыңыздар.

2.2. Өлшеу нәтижелерін өңдеу

1. 120, 110,... мм.сын.бағ. қысымның төмендеуі кезіндегі уақытты секундқа айналдырып, орташасын табыңыздар. Нәтижесін 1 және 2-кестеге жазыңыздар.

2. $\ln(\Delta p)$ мәнін есептеп, мәндерін 1 және 2-кестеге жазыңыздар.

3. $\ln(\Delta p)$ -ның t -ға тәуелділік қисығын тұрғызыңыздар және ол түзу сызық екеніне назар аударыңыздар (5-сурет). Егер қисықта 10-суреттегідей *сынық* (иілім) болса, онда Δp -ның өте күрт төмендеуі кезіндегі режим ағыстың турбулентті екенін білдіреді ("а" аймақ). Келесі есептеулерде тек "в" аймақтағы ламинарлы ағу режиміне сәйкес нәтижелер қолданылады.

4. Қисықтан τ релаксация уақытын анықтаңыздар:

$$\tau = \Delta t / \Delta(\ln \Delta p).$$

τ -дың мәнін 3-кестеге жазыңыздар.

5. (12) өрнек бойынша динамикалық тұтқырлық коэффициентін есептеңіздер:

$$\eta = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \langle p \rangle \cdot \tau \cdot T_0}{128 \cdot L \cdot V_0 \cdot T},$$

мұндағы $d = 0,29$ мм, $L = 29,5$ мм, $V_0 = 3,21$ л, $\langle p \rangle$ - тәжірибе барысындағы орташа қысым. Нәтижелерді 3-кестеге жазыңыздар. η есептеу кезінде барлық шамаларды СИ жүйесіне айналдырыңыздар.

6. Ауаның тығыздығы $\rho = 1,3$ кг/м³ екенін ескеріп, кинематикалық тұтқырлық коэффициентін мына өрнекпен $\nu = \eta / \rho$ есептеңіздер. Нәтижелерді 3-кестеге жазыңыздар.

7. (13) өрнекті қолданып, Рейнольдс санын есептеп, мәндерін 1–2-кестелерге жазыңыздар.

$$\text{Re} = \frac{\rho d^3 \Delta p_0}{64 \eta^2 L}.$$

$T_{\text{бөлме}} = \text{---}^{\circ}\text{C}$ кезіндегі капиллярдан аққан қысымның уақытқа тәуелділігі

Др мм. сын. бағ.	Секундомердің көрсетуі, мин, с, с бөлігі.			$t_{\text{орт}}$, с	$\ln(\Delta p)$	Re
	t_1	t_2	t_3			
120	00:00,00	00:00,00	00:00,00			
110						
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						

8. (5) өрнектегі $\lambda = 3\eta / \rho \cdot v$ молекуланың орташа еркін жүру жолы және $u = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ молекуланың жылулық қозғалысының орташа арифметикалық жылдамдығын есептеңіздер. $R = 8,314$ Дж/моль·К – газдың универсал тұрақтысы, M – мольдік масса, T – газдың абсолют температурасы.

2-кесте

$T=90-100^{\circ}\text{C}$ кезіндегі капиллярдан аққан қысымның уақытқа тәуелділігі

Δp мм. сын. бағ.	Секундомердің көрсетуі, мин, с, с бөлігі.			t_{opt} , с	$\ln(\Delta p)$	Re
	t_1	t_2	t_3			
120	00:00,00	00:00,00	00:00,00			
110						
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						

30-кесте

Ауаның параметрлері. Капиллярдың диаметрі $d=0,29 \cdot 10^{-3}\text{м}$.

Капиллярдың ұзындығы $L=29,5 \cdot 10^{-3}\text{м}$

$T, ^{\circ}\text{C}$	$\tau, \text{с}$	$\eta \cdot 10^{-6}, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^{-6}, (\text{м})^2/\text{с}$	$u, \text{м}/\text{с}$	$\lambda, \text{м}$
Бөлме					
90–100					

ДАҚ АУДАНЫ БОЙЫНША МОЛЕКУЛА ӨЛШЕМІН АНЫҚТАУ

Жұмыстың мақсаты: дақ ауданы бойынша олеин қышқылы молекуласының өлшемін анықтау.

1. Теориялық кіріспе

Молекуланың өлшемін анықтау әдістерінің бірі – сұйықтық шекарасындағы құбылыстарға негізделген. Сұйықтықтың басқа бір ортамен, мысалы сол сұйықтық буымен, басқа сұйықтықпен немесе қатты денемен түйіскен беті сұйықтықтың қалған көлеміне қарағанда ерекше жағдайда болады. Бұл ерекшелік шекаралық беттегі молекулалардың көлемдегі молекулаларға қарағанда басқа сұрыпты молекулалармен әрекеттесуімен байланысты. Сұйықтық бетінің ерекшелігін α беттік керілу коэффициенті сипаттайды. Ол тұрақты температурада сұйықтықтың шекаралық бетін бір өлшемге өсіруге қажет жұмыс мөлшерімен өлшенеді ($[\alpha] = \text{Дж/м}^2$).

Теориядан белгілі болғандай, сұйықтық көлемді шектеуші бетте орналасқан молекулалардың көлем ішіндегі молекулалармен салыстырғанда S шекаралық бет ауданына пропорционал энергиясы болады, яғни ол артық энергияның шамасы былай анықталады:

$$U_{\sigma} = \alpha S. \quad (1)$$

Егер бет ауданы өзгерсе, потенциалдық энергия да өзгереді:

$$dU_{\sigma} = \alpha dS \quad (2)$$

Бет ауданы өзгеру үшін жұмыс істелінеді

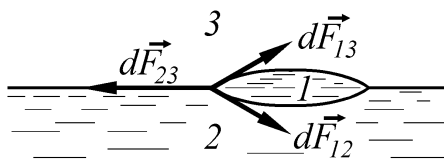
$$dA = -dU_{\sigma} = -\alpha dS. \quad (3)$$

Егер шекаралық бет ауданы тұрақты температурада өзгерсе, бұған қажет беттің еркін энергиясының өзгеруіне тең екені термодинамикадан белгілі:

$$dA = -dF, \quad (4)$$

бұл жерде $F = U - TS$ -еркін энергия, S -энтропия.

Кез келген жүйе тепе-теңдік күйде болуы үшін, оның энергиясы минимальды болуы керек екені белгілі. Біздің қарастырып отырған мәселемізде сұйықтың тепе-теңдік күйде болуы үшін, оның шекаралық беті мейлінше минимальды болуы қажет. Олай болса, қалыпты жағдайда сол беттің ауданын неғұрлым азайтатын күштер бар екені түсінікті. Беттік керілу деп аталатын ол күш бетке жанама бойымен бағытталған болады. Жұқпайтын (2) сұйықтық бетіндегі (1) кішкентай сұйықтық тамшыны қарастырайық (1-сурет).



1-сурет

Тамшыны шектейтін шеңбер бойында 3 орта бар: сұйықтық тамшы (1), сұйықтық бет (2) және ауа (3). Бет бағытымен әрбір екі ортаға осы бетті қысқартатын беттік керілу күші әсер етеді. Дөңгелектің dl кішкене бөлігіне 3 күш әсер етеді: $d\vec{F}_{12}$ – сұйықтық бөлігіндегі шекараға, $d\vec{F}_{13}$ – ауа мен сұйықтық тамшы шекарасына және $d\vec{F}_{23}$ – ауа мен 2 сұйықтық шекарасына. $d\vec{F}_{12}$ пен $d\vec{F}_{13}$ күштері тамшы бетін сфералық түрге келтіруге ұмтылады. $d\vec{F}_{23}$ күші керісінше, тамшыны созуға ұмтылады.

Гидростатикалық қысым күші мен ауырлық күші өте аз болғандықтан, оларды ескермеуге болады.

Сұйықтық тамшысы тепе-теңдікте болу үшін келесі шарт орындалуы қажет:

$$d\vec{F}_{12} + d\vec{F}_{23} + d\vec{F}_{13} = 0 \quad (5)$$

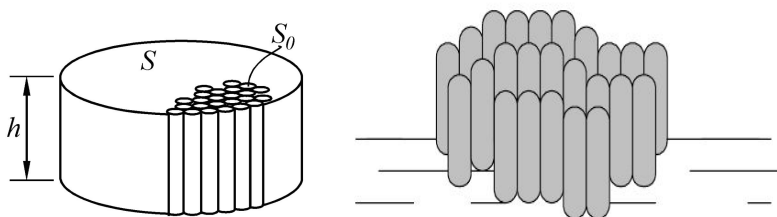
Бұл теңдеуді скаляр түрінде жазсак, тепе-теңдік шарты мына түрде $dF_{23} < dF_{12} + dF_{13}$ орындалады. Бұл жағдайда тамшы өз пішінін сақтап қалады. (1-сурет). $dF = \alpha dl$ екендігін ескерсек, (мұндағы α -беттік керілу коэффициенті) беттік керілу коэффициенттері үшін тепе-теңдік шартты мына түрде жазуға болады:

$$\alpha_{23} < \alpha_{12} + \alpha_{13} \quad (6)$$

Бұл жағдайда тамшы жасымық дәнінің пішініне ұқсас. Егер (6) шарт орындалмаса, онда тамшы мономолекулалық қабат түзеп, бет бойымен ағып кетеді.

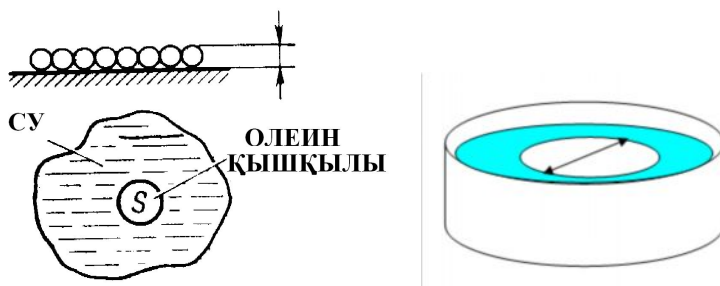
Кейбір сұйықтықтар үшін, мысалы май мен майлы қышқылда ағу құбылысы таза су бетіндегі бірінші тамшы үшін ғана байқалады. Бұл бірінші тамшы су бетін бұлғайды және беттік керілуді азайтқаны сонша, тепе-теңдік мүмкін болмастай күйге әкелуімен түсіндіріледі.

Майлы қышқылдар молекуласы ұзындығынан қатты керілген және олардың түрі эллипсоидты немесе биіктігі h , S_0 көлденең қимасының ауданы S_0 цилиндрге ұқсас. Тәжірибелер, атап айтқанда, Ленгмюр, Дево, Рэлей тәжірибелері, таза су бетінде майлы қышқылдар тамшысы мономолекулалық қабат болып ағатынын көрсетеді (2-сурет).



2-сурет. Таза сұйықтық бетіндегі майлы қышқылдар молекуласының түрі

Ленгмюр мен Дево әдістерімен танысайық. Егер жеңіл буланатын сұйықтықтағы қышқыл ерітінділерінің тамшысы тығындық ұнтакпен немесе талькпен себілсе, онда ерітінді тез буланады да, қышқыл су бетінде мономолекулалық қабат болып ағады. 2б-суретте пайда болған беттік керілу ұнтақты қабыршақтың (пленканың) шетіне «жиырылуға» жинақтайды.



3-сурет. Таза сұйықтық бетіндегі олеин қышқылының дағы

Олеин қышқылы – бір негізді қаныққан карбон қышқылы $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$.

Дақтың S ауданын өлшеу бір молекула ауданы қимасының өлшеумен бірдей

$$S_0 = \frac{S}{N} = \frac{\pi D^2}{4N}, \quad (7)$$

мұндағы S – сұйықтық бетіндегі олеин қышқылы, N – тамшыдағы молекулалар саны, D – дақ диаметрі.

Тамшыдағы молекулалар саны былай анықталады:

$$N = \frac{m_{\text{қыш}}}{M} N_A, \quad (8)$$

мұндағы m – қышқыл тамшысының массасы, M – қышқылдың молекулалық массасы, N_A – Авагадро тұрақтысы.

Сонда жайылған бір молекуланың ауданы мынадай:

$$S_0 = \frac{\pi D^2 M}{4 m_{\text{кыш}} N_A}. \quad (9)$$

Молекула ұзындығын шамамен былай анықтауға болады:

$V = S \cdot l$, мұндағы $V = \frac{m_{\text{кыш}}}{\rho}$ – мономолекулалық қабаттың көлемі, ал ρ – олеин қышқылының тығыздығы, S -дақ ауданы. Сонда:

$$l = \frac{V}{S} = \frac{4 m_{\text{кыш}}}{\rho \pi D^2}. \quad (10)$$

Молекуланың көлденең өлшемін былай табуға болады:

$$d = \sqrt{\frac{S_0}{N}} \quad (11)$$

2. Эксперименталдық бөлім

2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі. 1 әдіс

1. 0.3%-тік олеин қышқылының спирттік ерітіндісін пайдаланыңыздар. Ол этил спирті және олеин қышқылымен дайындалады. 0.3%-тік ерітінді керек болғандықтан:

$$0,3\text{г} + 99,7\text{г} = 100\text{г}$$

мұндағы 0,3г- олеин қышқылы, 99,7г- этил спирті.

20⁰ температурадағы этил спиртінің тығыздығы $\rho = 843 \text{ кг/м}^3$, олеин қышқылының тығыздығы $\rho = 890 \text{ кг/м}^3$. Екі сұйықтықтың тығыздығы шамалас болғандықтан төмендегі формуланы қолдануға болады:

$$\omega = \frac{m_{\text{зат}}}{m_{\text{зат}} + m_{\text{еріткіш}}} \cdot 100\%$$

мұндағы $m_{\text{зат}}$ - олеин қышқылы, $m_{\text{еріткіш}}$ - этил спирті, ал $m_{\text{ерітінді}} = m_{\text{зат}} + m_{\text{еріткіш}}$

2. Ыдысқа толтыра су құйып, бетіне ұнтақ (талык) себіңіздер. Себілген ұнтақ су бетіне жұқа қабат болып, тегіс жайылуы керек.

3. Сұйықтықты өлшейтін арнайы жіңішке әйнек түтікке (бюретка) 0.3%-тік олеин қышқылының спирттік ерітіндісін құйыңыздар және 2-3 мм биіктікте тамызғыштың (пипетка) көмегімен бір тамшы ерітіндіні ұнтақ салынған су бетінің ортасына тамызыңыздар.

4. Тамшы су бетіне жайылған соң, сызғыштың көмегімен екі өзара перпендикуляр бағыттағы тамған дақтың D_1 және D_2 диаметрлерін өлшеніңіздер.

5. Жоғарыдағы 1–3 пунктте қайталап тәжірибені үш рет жасаңыздар, ол үшін ұнтақ салынған ыдысты әрбір тәжірибе жасаған сайын тазалап жуып отырыңыздар. Алынған нәтижелерді төмендегі 1-кестеге жазыңыздар.

Кесте-1

Тәжірибе №	D_1	D_2	$D_{ор}$	ΔD	m_1	m_2	Δm_1	Δm_2	$m_{там}$	$m_{еріт}$
1										
2										
3										
Орташа										

Мұндағы $D_{ор}$ – екі өзара перпендикуляр бағыттағы тамған дақтың D_1 және D_2 диаметрлерінің орташасы, ΔD – өлшенген диаметрлердің абсолют қателігі.

6. Аналитикалық таразының көмегімен шыны немесе алюминийден жасалған бос ыдыстың (бюкс) m_1 массасын және өлшеудің абсолюттік қателігін Δm_1 анықтаңыздар.



4-сурет. «Молекула өлшемі» жинағы

7. Сұйықтықты өлшейтін әйнек түтіктен (бюретка) ыдыстың (бюкс) ішіне 20 тамшы олеин қышқылының спирттік ерітіндісін тамызыңыздар және ыдыспен бірге оның m_2 массасын аналитикалық таразыда өлшеп, өлшеудің абсолюттік қателігін Δm_2 анықтаңыздар. Тамшының массасын төмендегі формуламен есептеңіздер:

$$m_{\text{тамшы}} = \frac{m_2 - m_1}{20}$$

8. Олеин қышқылы құрамындағы ерітіндінің бір тамшысының массасын есептеңіздер:

$$m_{\text{қыш еріт}} = \frac{0,3m_{\text{тамшы}}}{100} = 3 \cdot 10^{-3} m_{\text{тамшы}}$$

9. (7) және (10) пайдаланып, олеин қышқылы молекуласының көлденең қимасының ауданы мен ұзындығын табыңыздар.

№	$l_i, м$	$\langle l \rangle, м$	$\Delta l, м$	$\varepsilon, \%$	$d_i, м$	$\langle d \rangle, м$	$\Delta d, м$	$\varepsilon, \%$
1								
2								
3								
Орташа								

10. Олеин қышқылы молекуласының көлденең диаметрі мен ұзындығының абсолюттік және салыстырмалық қателігін табыңыздар.

2.2. Жұмыстың орындалу тәртібі. 2 әдіс

«Молекула өлшемі» жинағының (комплект) элементтерімен жұмыс жасау үшін, ол студенттің жұмыс үстеліне қойылады. ЛКТ–2 құрамынан қосымша 2–4 литрлік тостақ және сызғыш қолданылады. Әрбір шприц бірғана сұйықтық мөлшерлеу үшін қолданылуы тиіс екенін мұқият қадағалау керек (4-сурет). Шприцтер сызығы (бирка) бойынша ажыратылады.

Су бетіндегі олеин қышқылының ($C_{17}H_{33}COOH$) белгілі мөлшерімен дақ өлшемі анықталады. Олеин қышқылының мольдік массасы $M=282$ г/моль мен тығыздығы $\rho=0,89$ г/см³. Этиль спирті - C_2H_5OH .

Жұмыстың орындалу тәртібі

1. Көлем бойынша $\eta=0.3\%=3 \cdot 10^{-3}$ концентрациялы олеин қышқылының спирттік ерітіндісі дайындалады. Ол үшін:

– №1 шприцпен көлемі $V_1=2$ мл спиртті өлшеп таза флаконға құйыңыздар;

– №2 шприцпен сығылған тамшының V_0 көлемін өлшеу керек, ол үшін флаконнан шприцпен қышқыл сорып алынады және қышқылы бар флаконға 10-40 тамшы кері жіберіледі (шамамен $V_0=5$ мм³). Бұл өлшеу 1 тамшының көлемін анықтау

үшін жүргізіледі.

$N_0 = \eta V_1/V_0$ керекті қышқыл тамшысын спиртті бар ыдысқа тамызып, флаконның аузын жауып, сұйықтықты араластырамыз.

2. Ерітіндідегі тамшы молекуласының санын анықтаймыз:

– №3 шприц көмегімен спиртті қышқыл ерітіндісі тамшысының V_2 көлемін анықтаймыз;

– ерітіндідегі қышқыл тамшысының V көлемін анықтаймыз:

$$V = V_2 V_0 N_0 / V_1$$

– ерітіндідегі тамшының молекулалар санын анықтаймыз:

$$N = \rho V N_A / M$$

мұндағы N_A – Авогадро саны.

3. Су бетіне дөңгелек өте жұқа ұнтақ (талық) қабатын (шамамен 20x20 см бет өлшемі) сеуіп, №3 шприцтен олеин қышқылының спиртті ерітіндісінің тамшысын тамызамыз. Тамшы мономолекулалық қабатпен ағады. Олеин қышқылының ұзын молекулалары тығыз бір-біріне вертикаль орналасады.

4. Сызғышпен дақтың өлшемін өлшендер және S ауданын анықтаңдар.

5. (7) формуламен бір молекуланың көлденең қимасының S_0 ауданын анықтаңыздар.

6. Молекуланың көлденең диаметрін (11) формуламен анықтаңыздар.

7. Дақ қалыңдығына тең молекуланың (10) формуламен ұзындығын анықтаңыздыр.

3-кесте

Нәтижелерді кестеге жазыңдар

V_1 , мл	V_0 , мл	N_0	V_2 , мл	V , мл	N	S_0 , см ²	d , см	l , см
2								

Ескерту! Тәжірибе жасап болған соң, шприцтер мен ыдыстарды сумен жуып, кептіріп қойыңыздар.

ҚОСЫМША

1. Молекулалық физика мен термодинамикадағы негізгі физикалық тұрақтылар

Физикалық шама	Белгісі немесе өрнек	Сандық мәні
Больцман тұрақтысы	$k = R / N_A$	$1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Авагадро тұрақтысы	N_A	$6,0220943 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Газдың универсал тұрақтысы	R	8,31441 Дж(мольК)

2. Заттардың тығыздығы

№	Қатты заттар	ρ , г/см ³	Газдар (қалыпты жағдай үшін)	ρ , г/см ³	Сұйықтықтар	ρ , г/см ³
1	Алтын	19,3	Азот	1,25	Су	1,00
2	Алюминий	2,7	Аммиак	0,77	Глицерин	1,26
3	Күміс	10,5	Ауа	1,293	Майсана майы	0,90
4	Қалайы	7,4	Көмірқышқыл газ	1,98	Сынап	13,6
5	Қорғасын	11,3	Оттегі	1,43	Этил спирті (20°, 100%)	0,789
6	Мыс	8,9	Сутегі	0,09	Этил спирті (20°, 80%)	0,843
7	Мұз	0,916		-	Олеин қышқылы	0,89
8	Платина	21,5		-		-
9	Темір (болат)	7,8		-		-

3. Қаныққан су буының қысымы

°C	Қысым, Па	°C	Қысым, Па	°C	Қысым, Па
0	0,61	25	3,15	60	19,9
5	0,87	30	4,23	70	31,0
10	1,22	35	5,60	80	47,3
15	1,70	40	7,35	90	70,0

20	2,33	50	12,3	100	101,3
----	------	----	------	-----	-------

4. Газдардың тұрақтылары

Газ	Салыстырмалық молекулалық масса	$\gamma = C_p / C_v$	Жылуөткізгіштік, λ , Вт/м·К	Тұтқырлық, η маПа·с	Молекула диаметрі, d , нм	Дыбыс жылдамдығы, м/с (^0C үшін)
He	4	1,67	141,5	18,9	0,20	970
Ar	40	1,67	16,2	22,1	0,35	319
H ₂	2	1,41	168,4	8,4	0,27	1256
N ₂	28	1,40	24,3	16,7	0,37	334
O ₂	32	1,40	24,4	19,2	0,35	315
CO ₂	44	1,30	23,2	14,0	0,40	260
H ₂ O	18	1,32	15,8	9,0	0,30	405
Aya	29	1,40	24,1	17,2	0,35	331

Ескерту: γ , λ және η мәндері қалыпты жағдай үшін берілген. H₂O үшін 100⁰C температурадағы су буының мәндері берілді.

5. Қатты денелер мен сұйықтықтардың тұрақтылары

№	Заттар	Меншікті жылу сыйымдылығы, c , Дж/г·К	Меншікті булану жылуы q , Дж/г	Меншікті балқу жылуы q , Дж/г
1	Су	4,18	2250	-
2	Глицерин	2,42	-	-
3	Сынап	0,14	284	-
4	Спирт	0,90	853	-
5	Алюминий	0,90	-	321
6	Темір	0,46	-	270
7	Мұз	2,09	-	333
8	Мыс	0,39	-	175
9	Күміс	0,23	-	88
10	Қорғасын	0,13	-	25

6. 300 К температурадағы қатты денелердің жылуөткізгіштігінің кестелік мәндері

Материал	Алюминий қорытпасы	Латунь	Қола	Болат
λ , Вт/(м·К)	180. ..210	70. ..120	60. ..80	40. ..48

7. Әртүрлі заттар үшін сұйықтық/бу шекарасындағы беттік керілу коэффициентінің мәндері (20°C температурада)

Зат	Сынап	Су	Глицерин	Бензол	Гексан	Көміртегінің қос тотығы
σ , мН/м	484	$72,75 \pm 0,25$	64	29	18,4	1,16

2-кесте

8. Әртүрлі температурадағы судың тұтқырлық коэффициентінің кестелік мәні

Температура, °C	0	7	27	47	67	87
Судың тұтқырлығы, 10^{-4} Па·с	17,5	14,2	8,2	5,6	4,1	3,2

3- кесте

9. Әртүрлі температурадағы судың тығыздығы

Температура, t°C	4	20	30	50	70	90
Судың тұтқырлығы, ρ , кг/м ³	1000	998	996	988	978	965

ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Лабораторный комплекс ЛКТ -2. Молекулярная физика и термодинамика. Паспорт и техническое описание. -М.: НТЦ ВЛАДИС, 2001. - 65с.
2. Лабораторный комплекс ЛКТ-3. Свойства вещества. Паспорт и техническое описание. -М.: НТЦ ВЛАДИС, 2001.- 25 с.
3. Лабораторный комплекс ЛКТ-5. Процессы в газах. Паспорт и техническое описание. -М.: НТЦ ВЛАДИС, 1998. -15 с.
4. *Матвеев А.Н.* Молекулярная физика. -М.: Высш. шк., 1987. - 358 с.
5. *Трофимова Т.И.* Курс физики. -М.: Высш. шк., 2001. – 146 с.
6. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Т2. -М.: Наука, 1975.
7. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. -М.: Мир, 2002. - 461 с.
8. *Скрипов В.П., Файзуллин М.З.* Фазовые переходы кристалл-жидкость-пар и термодинамические подобие. - М.: Физсатлит, 2003. –160 с.
9. *Гершензон Е.М., Малов Н.Н., Мансуров А.Н.* Молекулярная физика. -М.: АСАДЕМА, 2000. –278 с.
10. Руководство к лабораторным занятиям по физике. /Под ред. Гольдина Л.Л. -М.: Наука, 1973.
11. *Кикоин А.К., Кикоин И.К.* Молекулярная физика. -М.:Наука, 1976.-480 с.
12. *Тұрмұхамбетов А.Ж.* Жылу алмасу теориясының негіздері. Жылу өткізгіштік. Оқу құралы. –Қарағанды: ҚарМУ баспасы, 1996. 140 бет.
13. *Огуцов А.Н.* Лекции по молекулярной физике и термодинамике //http. sites. google. com.
14. *Сулева Л.Б.* Электронный учебник по механике и молекулярной физике. КазНТУ, 2006.
15. *Детлаф А.А., Яворский Б.М.* Курс физики: Учеб. пособ. для втузов. Изд. 4-е, испр. - 718 с. -М: Высш. Шк., 2002 г.

16. Савельев И.В. Жалпы физика курсы. Механика және молекулалық физика. 1том. -Алматы: Мектеп, 2004 г.- 507б.

17. EqWorld физика-математика саласынан кітапхана (<http://eqworld.ipmnet.ru>).

18. Википедия электронды энциклопедиясы (<http://ru.wikipedia.org>).

Ғылыми электронды кітапханалар (<http://www.physic.kz>,
<http://elibrary.ru>, <http://www.mccme.ru/free-books>,<http://window.edu.ru>).

МАЗМҰНЫ

КІРІСПЕ	3
Термодинамикалық зертханалық кешендерді (ЛКТ–2, ЛКТ–3, ЛКТ–5) сипаттау	5
1. Теориялық кіріспе.....	5
1.1. ЛКТ–2, ЛКТ–3 және ЛКТ–5 термодинамикалық зертханалық кешендерді қолдану	5
1.2. ЛКТ–2, –3 зертханалық кешендерінің құрылымы және жұмыс істеу принципі	7
1.2.1. ИСТ–4 термостаттың өлшеу жүйесінің жұмыс істеу принципі	9
1.2.2. «Пеш-термостат» модулі.....	12
1.2.3. «Металдың жылуөткізгіштігі» модулі.....	13
1.2.4. «Газдардың қасиеті – №1» блогы.....	15
1.2.5. «Газдардың жылуөткізгіштігі» модулі.....	18
1.2.6. "Газ-сұйықтық – №2" және баллондар блогы.....	19
1.2.7. «Балласты калориметр – 03» модулімен танысу.....	23
1.2.8. Құралдар блогы.....	24
1.3. ЛКТ–5 зертханалық қондырғы және оның жұмыс істеу принципі	24
Қыздырғыштың пайдалы әрекет коэффициентін анықтау	29
1. Теориялық кіріспе	29
1.1. Пайдалы әрекет коэффициенті.....	29
1.2. Екі рет қыздыру әдісі.....	31
2. Эксперименталдық бөлім.....	32
2.1. Екі рет қыздыру әдісімен пеш параметрлерін өлшеу...	32
2.3. Термотұрақтандыру әдісі.....	36
Судың меншікті булану жылуы мен меншікті жылусыйымдылығын анықтау	37
1. Теориялық кіріспе.....	37
1.1. Жылусыйымдылық.....	37
1.2. Майер теңдеуі.....	40

1.3. Бір атомды газдың жылусыйымдылығы	40
1.4. Көп атомды газдардың жылусыйымдылығы	41
1.5. Сұйықтық және қатты денелердің жылусыйымдылығы	44
1.6. Судың жылусыйымдылығы.....	45
1.7. Фазалық өту.....	45
2. Тәжірибелік қондырғы	48
2.1. Судың булану жылуы мен жылусыйымдылығын анықтау.....	49
Металдардың жылусыйымдылығын анықтау.....	53
1. Теориялық кіріспе.....	53
1.1. Жылусыйымдылық.....	53
1.2. Қатты денелер жылусыйымдылығының классикалық теориясы.....	54
1.3. Эйнштейннің жылусыйымдылық теориясы	57
1.4. Дебайдың жылусыйымдылық теориясы.....	59
2. Эксперименталдық бөлім.....	62
2.1. Пештің C_0 жылусыйымдылығы мен қуатының P' шығынын анықтау.....	62
2.2. Металдың жылусыйымдылығын анықтау.....	65
Бойль-Мариотт заңын зерттеу және қолдану.....	68
1. Қысқаша теориялық кіріспе.....	68
1.1. Бойль-Мариотт заңы.....	68
1.2. Тәжірибені орындау әдісі	71
2. Эксперименталдық бөлім.....	72
2.1. Керекті блоктармен танысу.....	72
2.2. Бойль – Мариотт заңын тексеру.....	73
2.3. Ыдыстың белгісіз көлемін анықтау	75
2.4. Сусыма (сыпучих) материалдардың "таза" көлемін анықтау.....	76
2.5. Манометр мен шлангтың "паразит" көлемін анықтау	77
C_p/C_v қатынасын температура аумағында резонанс әдісімен анықтау.....	78
1. Теориялық бөлім	79
1.1. Газдардың жылусыйымдылығы	79
1.2. Пуассон теңдеуі.....	81
1.3. Ауаның адиабат көрсеткішін дыбыс жылдамдығы	

бойынша өлшеу әдісі	82
1.4. Тәжірибелік қондырғы мен жұмысты өлшеу әдісі	85
2. Эксперименталдық бөлім.....	86
2.1. «Резонатор» модулі қондырғысы	87
2.2. Жұмыстың орындалу тәртібі	89
Меншікті балқу жылуы мен жеңіл балқитын заттардың энтропия өзгерісін анықтау.....	91
1. Қысқаша теориялық кіріспе.....	91
1.1. Фазалық диаграмма.....	91
1.2. Фазалық өту	93
1.3. Балқу және кристалдану.....	94
1.4. Энтропия.....	97
1.5. Затты қыздыру және балқыту кезіндегі энтропия өзгерісі өрнегінің қорытылуы	98
2. Тәжірибелік қондырғы	99
2.1. Кристалдану мен балқу температурасын анықтау	100
2.2. Үлгінің жылусыйымдылығын және қыздыру кезіндегі энтропия өзгерісін анықтау.....	103
2.3. Үлгінің балқу кезіндегі энтропия өзгерісі мен меншікті балқу жылуын анықтау	104
Металдардың жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.....	105
1. Теориялық кіріспе.....	105
1.1. Жылу алмасудың түрлері.....	105
1.2. Газдардағы жылуөткізгіштік.....	107
1.3. Диэлектриктердегі жылуөткізгіштік.....	109
1.4. Металдардың жылуөткізгіштігі.....	111
1.5. Жылулық кедергі.....	113
1.6. Фурье заңы.....	113
1.7. «Металдардың жылуөткізгіштігі – 02» модулімен танысу.....	115
2. Жұмыстың орындалу тәртібі	116
Диэлектриктердің жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.....	119
1. Теориялық кіріспе.....	119

1.1. Фонондар	120
1.3. Жылуөткізгіштік коэффициентін өлшеу	122
1.4. Қондырғы сипаттамасы және өлшеу әдісі	123
1.5. «Балласты калориметр – 03» модулімен танысу.....	124
2. Эксперименталдық бөлім	125
Қыздырылған қыл сым әдісімен ауаның жылуөткізгіштік коэффициентін анықтау.....	129
1. Қысқаша теориялық кіріспе.....	129
1.1. Жылу алмасудың түрлері	129
1.2. Газдардағы жылуөткізгіштік	130
1.3. Фурье заңы.....	131
1.4. Қыздырылған қыл сым әдісі	133
1.5. "Газдардың жылуөткізгіштігі" модулімен танысу.....	137
2. Эксперименталдық бөлім.....	138
Беттік керілудің температураға тәуелділігін зерттеу....	140
1. Теориялық бөлім.....	140
1.1. Молекулалық күштер.....	140
1.2. Беттік керілу	143
1.3. Лаплас теңдеуі.....	147
1.4. Капиллярлық құбылыстар.....	148
1.5. Тәжірибелік қондырғы.....	150
1.6. Беттік керілуді өлшеу әдісі.....	152
2. Эксперименталдық бөлім	153
2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі	153
Судың фазалық тепе-теңдігін зерттеу.....	156
1. Теориялық бөлім	156
1.1. Термодинамикалық фаза.....	156
1.2. Термодинамикалық фазалар және заттың агрегаттық күйлері	157
1.3. Фазалық диаграмма.....	158
1.4. Фазалардың тепе-теңдік шарты.....	159
1.5. Клапейрон – Клаузиус теңдеуі.....	161
2. Эксперименталдық бөлім	
2.1. "Газ-сұйықтық – №2" блогын сипаттау.....	162
2.2. Тәжірибе әдісі	164
2.3. Жұмыстың орындалу тәртібі	166

Сұйықтықтың тұтқырлығын температура аумағында зерттеу.....	168
1. Теориялық бөлім	168
1.1. Сұйықтықтың тұтқырлығы	168
1.2. Ньютон заңы.....	171
1.3. Сұйықтық тұтқырлығының температураға тәуелділігі	172
1.4. Пуазейль әдісі	173
1.5. Тәжірибенің орындалу тәртібі.....	174
2. Эксперименталдық бөлім.....	178
2.1. Жұмыстың орындалу реті.....	178
Капиллярдан аққан ауаның тұтқырлығын анықтау....	181
2. Қысқаша теориялық кіріспе	181
1.1. Тұтқырлық.....	181
1.2. Тәжірибенің орындалу тәртібі.....	186
1.3. «Газ-сұйықтық – №2» блогымен танысу.....	189
2. Эксперименталдық бөлім	192
2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі	192
2.2. Өлшеу нәтижелерін өңдеу.....	195
Дақ ауданы бойынша молекула өлшемін анықтау.....	198
1. Теориялық кіріспе.....	198
2. Эксперименталдық бөлім.....	202
2.1. Жұмыстың орындалу тәртібі. 1 әдіс.....	202
2.2. Жұмыстың орындалу тәртібі. 2 әдіс.....	204
ҚОСЫМША.....	207
ПАЙДАЛАНҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....	210

Оқулық басылым

Байтімбетова Бағила Әбдісаматқызы

**МОЛЕКУЛАЛЫҚ ФИЗИКА ЖӘНЕ ТЕРМОДИНАМИКА
ФИЗИКАЛЫҚ ПРАКТИКУМ**

Оқу құралы

РБ бастығы	<i>З.А. Ғұбайдулина</i>
Редакторы	<i>А.И. Бейсебекова</i>
Компьютерде беттеген	<i>Л.Т. Касжанова</i>

Басуға «__» 2012 ж. қол қойылды

Таралымы 300 дана. Пішімі 60x84 1/16. Шартты баспа табак ____
№ 1 баспаханалық қағаз. Көлемі _____. Тапсырыс __ Бағасы келісімді.

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық университетінің
басылымы, Ақпараттық-баспа орталығы.
Алматы қ., Қ.И. Сәтбаев көшесі 22

ISBN 978-601-228-335-8



9

786012 283358