

Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті

ӘОЖ 536.33, 536.6, 536.629

Қолжазба құқығында

**ҚИСАБЕКОВА ПЕРИЗАТ ӘУЕЛҚЫЗЫ**

**Энергетикалық нысандардың жылу параметрлерін бақылауға арналған  
жылуөлшеуіш құрылғыны әзірлеу және құру**

8D05303 - Жылуфизика және теориялық жылу техника

Философия докторы (PhD)  
дәрежесін алу үшін дайындалған диссертация

Ғылыми кеңесшілер:  
PhD докторы, қауымдастырылған профессор  
Карабекова Д.Ж.  
т.ғ.д., Уман ұлттық университетінің  
профессоры В.Ю. Кучерук

Қазақстан Республикасы  
Қарағанды, 2025

## МАЗМҰНЫ

|                                                                                                                            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР.....</b>                                                                                    | <b>4</b>   |
| <b>КІРІСПЕ.....</b>                                                                                                        | <b>5</b>   |
| <b>1 ЖЫЛУЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ КӨЗДЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ЖЫЛУ<br/>ТЕХНИКАЛЫҚ НЫСАНДАРДЫ БҰЗБАЙТЫН БАҚЫЛАУ<br/>МӘСЕЛЕЛЕРІ.....</b>      | <b>10</b>  |
| 1.1 Қазақстандағы жылу жүйесінің тиімділігін арттыру мәселелері.....                                                       | 10         |
| 1.2 Бұзбайтын бақылау және материалдарды диагностикалау.....                                                               | 12         |
| 1.3 Жылу ағынының тығыздығын өлшеу әдістері және термоэлектрлік<br>түрлендіргіштер.....                                    | 16         |
| 1.4 Жылу ағынын өлшеу құралдары және жылу ағынының бастапқы<br>түрлендіргіштерінің түрлері.....                            | 23         |
| 1.5 Жылу ағынын өлшеуіштердің конструкциялық түрлері.....                                                                  | 32         |
| <b>2 ЖЫЛУ АҒЫНЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУІНІҢ<br/>ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ.....</b>                                            | <b>36</b>  |
| 2.1 Сезімтал элементтердің температуралық өрісі.....                                                                       | 36         |
| 2.2 Жартылай сфералық сезімтал элементі бар датчиктегі жылу<br>процестерін математикалық модельдеу және талдау.....        | 41         |
| 2.3 Датчиктің жылу процестерін модельдеудің сандық сипаттамалары<br>мен нәтижелері.....                                    | 48         |
| 2.4 Кеңістіктік және жартылай кеңістіктік сәулелену өрісінің<br>энергетикалық параметрлері және оларды өлшеу әдістері..... | 52         |
| 2-бөлім бойынша қорытынды.....                                                                                             | 61         |
| <b>3 ЖЫЛУ АҒЫНЫН ӨЛШЕУ ҚҰРЫЛҒЫСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ<br/>ЖАСАУ.....</b>                                                          | <b>62</b>  |
| 3.1 Термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінің негізгі құрылымы.....                                                        | 62         |
| 3.2 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы.....                                                                              | 64         |
| 3.3 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны градуирлеу.....                                                                 | 69         |
| 3.4 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының түрлендіру теңдеуі.....                                                        | 74         |
| 3-бөлім бойынша қорытынды.....                                                                                             | 77         |
| <b>4 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ.....</b>                                                                            | <b>79</b>  |
| 4.1 Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғыны<br>калибрлеу және түрлендіру коэффициентін анықтау.....            | 79         |
| 4.2 Зертханалық жағдайларда жылу ағынын өлшеуге арналған<br>құрылғыны зерттеу.....                                         | 83         |
| 4.3 Жасанды жер қабатындағы жылу желісінен таралатын температура<br>өрісін зерттеу.....                                    | 89         |
| 4.4 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны натуралық<br>жағдайларда апробациялау.....                                      | 95         |
| 4.5 Энергетикалық параметрлерінің өлшеу қателіктері.....                                                                   | 102        |
| 4-бөлім бойынша қорытынды.....                                                                                             | 107        |
| <b>ҚОРЫТЫНДЫ.....</b>                                                                                                      | <b>109</b> |
| <b>ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ.....</b>                                                                                | <b>111</b> |

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>ҚОСЫМША 1.....</b> | <b>120</b> |
| <b>ҚОСЫМША 2.....</b> | <b>121</b> |

## БЕЛГІЛЕУЛЕР МЕН ҚЫСҚАРТУЛАР

- q – жылу ағынының тығыздығы, Вт/м<sup>2</sup>  
Q – жылу ағыны, Вт  
E – шығыс сигналы (мВ)  
 $\alpha$  – термоЭҚК-нің коэффициенті (мВ/°С)  
 $\lambda$  - жылуөткізгіштік коэффициенті (Вт/(м·К))  
k - түрлендіру коэффициенті (Вт/м<sup>2</sup>·мВ)  
T – температура (К немесе °С)  
h,  $\Delta x$  – қалыңдық (м)  
gradT – температура градиенті (К немесе °С)  
S – түрлендіргіштің сезімталдығы (мкВ/Вт·м<sup>2</sup>)  
термоЭҚК – термоэлектр қозғаушы күш  
ББ – бұзбайтын бақылау  
ҰҒА - Ұлттық ғылым академиясы  
ДСТУ – Украинаның ұлттық стандарты  
ЖЭО- жылуэлектр орталығы  
ЖАӨ – жылу ағынын өлшегіш  
НСС - номиналды статистикалық сипаттама  
ПӨК – пайдалы әрекет коэффициенті (%)  
ТБТ - термоэлектрлік батареялы түрлендіргішті  
ТМКн – мыс-константан терможұбы  
ТХК – хромель-копель терможұбы  
ТТК (ТЖК) – темір-константан терможұбы  
ХЭК - Халықаралық электротехникалық комиссия  
NIST - Ұлттық стандарттар және технологиялар институты  
ASTM - Америкалық сынаулар және материалдар қоғамы (American Society for Testing and Materials)  
ГОСТ 30619-98 – Энергияны үнемдеу. Термоэлектрлік жалпы мақсаттағы жылу ағынының түрлендіргіштері  
СТ РК 2.528-2018 – Өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесі. Температура датчиктерінің түрін бекітуге арналған сынақтарды өткізудің үлгілік бағдарламасы  
СТ РК 2.727-2019 – Ылғалдылық пен температура өлшеуіштері. Калибрлеу әдістемесі  
СТ РК 2.430-2017 – Өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесі. Эталондар мен өлшеу құралдарын калибрлеу әдістемесі. Әзірлеу, бекіту және қолдану тәртібі  
СТ РК 2.535-2018 – Өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесі. Температураны өлшеу құралдары. Жалпы техникалық талаптар.  
ISO 9869:2007 – Құрылыс конструкцияларының жылу сипаттамалары. Белгіленген жағдайларда жылу беру коэффициентін анықтау



## КІРІСПЕ

Энергетикалық объектілердің жылу параметрлерін өлшеу және бақылау энергия тиімділігін арттыруда, жұмыстың сенімділігін қамтамасыз етуде және апаттық жағдайлардың алдын алуда маңызды рөл атқарады. Қолданыстағы жылуөлшеу әдістері мен өлшеу құралдары көбінесе жеткіліксіз дәлдікке, сезімталдыққа және инерциялылыққа ие, бұл нақты жылу процестері жағдайында өлшеу нәтижелерінің қателіктеріне әкеледі.

Жылу алмасу процестерін бақылау екі негізгі шаманы, яғни температура мен жылу ағынының тығыздығын өлшеуге негізделген. Температура жылу құбылысының сапалық жағын сипаттайды, яғни денеде жинақталатын немесе берілетін жылу энергиясы тұрғысынан жүйенің күйін анықтайды. Ал жылу ағынының тығыздығы жылу процесінің сандық жағын сипаттайды, яғни белгілі бір бет арқылы уақыт бірлігі ішінде қанша энергия тасымалданатынын көрсетеді. Бұл әртүрлі жүйелердегі жылу алмасу процестерін талдау және оңтайландыру үшін маңызды параметр болып табылады. Температураны өлшеу саласы жақсы дамыған, себебі температуралық өлшеулер қарапайым әрі кеңінен қолданылады, сондай-ақ мұндай өлшеулерге арналған аппаратура мен метрология жүйесі бұрыннан қалыптасқан. Жылу ағынының тығыздығының маңыздылығы оның өнеркәсіпте, энергетикада және басқа да салаларда жылу алмасу процестерін бақылауға және оңтайландыруға мүмкіндік беретін әртүрлі жүйелердегі энергия алмасу үдерістерін дәл көрсетудегі қабілетілігі болып табылады. Теплометрия саласындағы осындай даму жылу процестерін бақылаудың дәлдігі мен тиімділігін арттыру міндетін шешуге бағытталған. Бұл, әсіресе, жылу жоғалтуларын азайту, энергетикалық жүйелердің жұмысын оңтайландыру және қоршаған ортаға жағымсыз әсерді төмендету үшін аса маңызды [1, 2].

Теплометриялық құралдарды әзірлеудің маңызды аспектілерінің бірі – өлшеу дәлдігін арттыру, бұл жылу процестері туралы неғұрлым сенімді деректер алуға мүмкіндік береді. Өнеркәсіпте, энергетикада және жылу процестерін бақылау қажет басқа да салаларда тиімді жұмыс істеу үшін құралдар ұзақ уақыт бойы дәлдігін сақтап, температураның өзгеруі, ылғалдылық, механикалық жүктемелер және химиялық әсерлер сияқты әртүрлі сыртқы факторларға төзімді болуы керек. Құралдардың сыртқы орта жағдайларына төзімділігі мен ұзақ мерзімділігі олардың пайдалану құндылығы мен экономикалық тиімділігіне тікелей әсер етеді. Бұл құрылғыларды жиі жөндеу және калибрлеу қажеттілігін азайтып, пайдалану шығындарын төмендетуге мүмкіндік береді.

Осылайша, жылуөлшеу құралдарының конструкциясын осы талаптарды ескере отырып жетілдіру олардың сенімділігі мен пайдалану ыңғайлылығын арттыруға, әсіресе, жылу энергетикалық жүйелерінің тұрақты жұмысын қамтамасыз ету және әртүрлі салаларда энергия тұтынудың жалпы тиімділігін арттыру үшін аса маңызды.

Бұл диссертациялық жұмыста, жылуөлшеу саласындағы алдыңғы зерттеулер мен әзірлемелердің жалғасы ретінде, негізгі назар жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құралдардың қолданыстағы құрылымдарын одан әрі жетілдіруге және жаңа құрылымдарын жасауға бағытталған. Жұмыста әсіресе құралдың пайдалану және метрологиялық сипаттамаларын жақсартуға баса назар аударылады.

Бұған дейін жылу ағынын өлшегіштің бір модификациясын әзірледік. Алайда, бұл құрылғының негізгі кемшілігі – өлшеу дәлдігінің төмендігі, себебі қоршаған орта параметрлерінің жылуөлшеу блогының сигналына әртүрлі әсер етуі нәтижесінде өлшеу нәтижелері бұрмаланады. Аталған кемшіліктерді ескере отырып, біз жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған жаңа құралды әзірледік.

Осыған байланысты жылутасымалдағыштың бөлетін нақты жылу қуатын және оның басқа да параметрлерін жылу жүйесінің тұтастығын бұзбай жедел өлшеуге мүмкіндік беретін бұзбайтын бақылау әдісін және оны іске асыратын құралдарды әзірлеу өзекті міндет болып табылады.

*Зерттеудің мақсаты* энергетикалық объектілердің жылу параметрлерін бақылауға арналған жылу ағынын өлшейтін термоэлектрлік түрлендіргіштер негізіндегі жылуөлшеу құрылғысының метрологиялық және пайдалану қасиеттерін жақсарту болып табылады.

Қойылған мақсатқа жету үшін келесі *міндеттер* шешілді:

- «Жартылай сфера–цилиндр» күрделі құрылымындағы сезімтал элементтің температуралық өрісін сипаттайтын жылу өткізгіштік теңдеуінің шешімін алу;

- әртүрлі физикалық параметрлердің ( $E$ ,  $Q$ ,  $\alpha$ ) мәндерінде дененің кез келген нүктесіндегі температуралық өрістерді сипаттайтын аналитикалық шешімдерді алу, соның негізінде әртүрлі пайдалану жағдайларында термодатчиктерді жобалау мен калибрлеуді жеңілдетуге мүмкіндік беруге қажетті әмбебап есептеу формулаларын  $T_1(r, \varphi, z, t)$  және  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  алу;

- сезімталдық және дәлдік сипаттамалары жақсартылған жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргіштерінің құрылымын теориялық негіздеу;

- жылу параметрлерін бақылауға арналған жылуөлшеуіш құралдың эксперименттік үлгісін әзірлеу және жасау;

- әзірленген диагностикалық құрылғыны тексеру және оның градуирлеу сипаттамаларын зерттеу үшін аттестациялық стендті әзірлеу;

- әзірленген жылу параметрлерін өлшеуіштің дәлдігін, сенімділігін және тұрақтылығын бағалау бойынша зертханалық және өндірістік жағдайларда эксперименттік зерттеулер жүргізу.

*Зерттеу нысаны:* энергетикалық объектілердің жылулық шамалары мен параметрлерін өлшеу процесі.

*Зерттеу пәні:* жылу ағынының тығыздығын өлшейтін термоэлектрлік түрлендіргіштер негізіндегі жылуөлшеу әдістері мен техникалық құралдары, сондай-ақ олардың метрологиялық қамтамасыз ету жүйелері.

Зерттеу барысында келесі әдістер қолданылды: жылу алмасу және термодинамика теориясының әдістері, математикалық физика әдістеріне негізделген жылу процестерін сандық модельдеу, инженерлік-физикалық және есептеу экспериментінің әдістері, макеттік және зертханалық үлгілерді пайдалана отырып жүргізілген эксперименттік зерттеулер.

Зерттеу жұмысының ғылыми жаңашылдығы:

1. Алғаш рет сфералық және цилиндрлік геометрияны ескеретін жылуөткізгіштік есебінің шешімі алынды. Бұл шешім Бессель функциялары мен Лежандр көпмүшелері арқылы интегралдық түрлендірулерді қолдануға негізделген және сыртқы жылу ағыны әсерінен жартылай сфера төбесі мен цилиндр табаны арасындағы температура айырмасының динамикасын дәл сипаттауға мүмкіндік береді.

2. Алғаш рет температура айырымы ( $\Delta T(t)$ ) есептеу үшін цилиндр табанының температурасын аудан бойынша орташа алу әдісі ұсынылды. Бұл тәсіл нәтижені радиал координатаға тәуелсіз етеді және датчик сигналының бірыңғай мәнін қамтамасыз етіп, модельдің нақты пайдалану жағдайларындағы дәлдігі мен практикалық қолданылуын арттырады.

3. Эталонды жылу ағынын тудыру үшін тек калибрлеу режимінде ғана белсендірілетін және сыртқы құрылғыларды қолданбай құралдың өзін-өзі калибрлеуін қамтамасыз ететін жұқа мыс фольгадан жасалған кіріктірілген қыздырғыш элементін пайдалану.

4. Жылу өткізгіш алюминий пластинасын (жылу өткізгіштігі  $\sim 200$  Вт/м $\cdot$ К) және жылу өткізгіш пастаны интеграциялау, жылу ағынының біркелкі таралуы мен жылу шығындарын азайтуды қамтамасыз етеді (байланыс қабаттарындағы температураның төмендеуі 0,2 °C-ден аз), бұл құралдың жарықшақтар немесе жылу ағуы сияқты ақауларға сезімталдығын арттырады.

5. ТБТ-ті әзірлеуде, оның жұмыс бетіне 5–10% көмір ұнтағы қосылған эпоксидті шайыр құю жылу ағынына сезімталдықты арттыра отырып, шамамен 0,9 жұтылу коэффициентін қамтамасыз етеді.

6. ТермоЭҚК коэффициенті 5,415 мВ/°C жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының әзірленген моделі -30 °C-тан 100 °C-қа дейінгі жұмыс температура диапазонында жылу тасымалдағыштар мен құрылымдардың ақауларын анықтау кезінде жоғары сезімталдық пен дәлдікті қамтамасыз етеді.

Құрылғының әмбебаптығы оның эталондық жылу ағынын тудыру қабілетіне байланысты, бұл оны әртүрлі жағдайларда, соның ішінде далалық жағдайда, калибрлеу мен өлшеулерге арналған икемді құралға айналдырады. Құрылымына қыздырғыш элемент пен термоэлектрлік салқындатқыш кіреді, олар термоэлектрлік батареялық түрлендіргіш арқылы басқарылатын жылу ағынын тудыруға мүмкіндік береді. Бұл құрылғыны тікелей пайдалану орнында, стационарлық зертханалық жабдықты қолданбай-ақ, калибрлеуге мүмкіндік береді.

Қорғауға шығарылған негізгі қағидаттар:

1. «Жартылай сфера-цилиндр» түріндегі сезімтал элементі бар жылу ағыны датчигіндегі температура айырымының ( $\Delta T(t)$ ) аналитикалық есептеу әдістемесі әзірленді. Бұл әдістеме жартылай сфера мен цилиндр шекарасындағы температура мен жылу ағынының үздіксіздігін ескере отырып, жылуөткізгіштік теңдеулерін шешуге негізделген және датчиктің қыздыру динамикасын жоғары дәлдікпен бағалауға мүмкіндік береді.

2. Бұзбайтын бақылау әдісін қолданатын, термоэлектрлік батареялық түрлендіргіші бар және термоЭҚК коэффициенті  $5,415 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$  болатын, әзірленген жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы  $-30^\circ\text{C}$ -тан  $100^\circ\text{C}$ -қа дейінгі температура диапазонында жылу тасымалдағыштағы ақауларды анықтау кезінде жоғары сезімталдық пен дәлдікті қамтамасыз етеді.

3. Әзірленген жылу ағынын өлшейтін құрал жоғары дәлдік пен сенімділікті қамтамасыз етеді, ол  $10$ -нан  $900 \text{ Вт}/\text{м}^2$  дейінгі диапазонда жылу ағыны тығыздығын  $2,408 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$  түрлендіру коэффициентімен және  $3\%$ -дан аспайтын жүйелі қателікпен өлшейді, бұл тәжірибелік зерттеулермен расталып, өнеркәсіптік пайдалану талаптарына сәйкес келеді.

*Диссертанттың жеке үлесі.* Автор жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құралды жобалап, оның құрылымын әзірледі. Жылу ағынының тығыздығын өлшейтін термоэлектрлік түрлендіргішті жасау технологиясын дайындады. Жылу техникалық объектілерді диагностикалауға арналған бұзбайтын бақылау әдістерін зерттеді. Эксперимент нәтижелерін теориялық тұрғыдан талдап, өңдеді. Алынған нәтижелердің талдауы мен жұмыстың қорытындылары жалпы ғылыми жетекшілермен бірлесіп жасалды.

*Жұмыстың ғылыми-зерттеу бағдарламаларымен байланысы.*

Диссертация ғылыми-зерттеу жұмыстарының жоспарларына сәйкес, Қазақстан Республикасының Ғылым және жоғары білім министрлігі тарапынан үйлестірілетін іргелі зерттеулер бағдарламасы бойынша орындалды: «Минералды шикізатты, өндірістік және тұрмыстық қалдықтарды өңдеудің жоғары тиімді технологиясы» (№0 122РК00238, 2022-2024) и «Көмір-су отыны шикізатын алу технологиясын жобалау және жасау» (№ 8837-Ф-25, 2024-2026).

*Жұмыстар мен жарияланымдардың апробациясы.* Жұмыстың негізгі нәтижелері профессор Ж.С.Ақылбаев атындағы инженерлік жылуфизика кафедрасының ғылыми семинарларында және келесідей халықаралық конференцияларды баяндалып, талқыланды: XI-й Международной научной конференции «Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент» (Караганда, 2019); Ninth International Conference «Modern Trends in Science» FMNS-2021 (Болгария, 2021).

*Басылымдар:* Диссертациялық жұмыстың қорытындысы бойынша 11 баспа жұмысы жарияланды: Web of Science және Scopus базасына кіретін журналдарда 4 мақала; ҚР ҒЖБССҚК ұсынған журналдарда 3 мақала; РФДИ деректер базасына кіретін журналдарда 1 мақала; халықаралық конференциялар материалдарында 4 мақала жарияланды және «Жылу ағынын

өлшеуге арналған құрылғы» атты пайдалы моделге патент алынды (№6393, 03.09.2021) (қосымша 1).

*Практикалық құндылығы:* әзірленген құрал жылу желілерін, сондай-ақ өнеркәсіптік және жылуэнергетикалық жабдықтарды диагностикалау үшін пайдаланылуы мүмкін. Зерттеу барысында жасалған зертханалық стендтер физика-техникалық факультетінің студенттері үшін оқу базасы ретінде қызмет етіп, дипломдық және ғылыми-зерттеу жұмыстарын орындауда қолданыла алады.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жылу желілерінде және жылутехникалық объектілерде өндірістік сынақтан өткізілді. Ғылыми-зерттеу және технологиялық жұмыстардың нәтижелері бойынша Қарағанды қаласындағы «Энергосервис LTD» ЖШС кәсіпорынында сынақ актісі рәсімделді (қосымша 2).

*Зерттеу жұмысының құрылымы мен көлемі.* Диссертациялық жұмыстың құрылымы қойылған мақсаттармен айқындалған және кіріспе, төрт бөлім, қорытындыдан тұрады. Жұмыс 121 бет басылған мәтіннен, 42 суретпен, 12 кестемен безендірілген және 118 атаудан тұратын пайдаланылған әдебиеттер тізімін қамтиды.

# **1 ЖЫЛУЛЫҚ СӘУЛЕЛЕНУ КӨЗДЕРІН ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ЖЫЛУ ТЕХНИКАЛЫҚ НЫСАНДАРДЫ БҰЗБАЙТЫН БАҚЫЛАУ МӘСЕЛЕЛЕРІ**

## **1.1 Қазақстандағы жылу жүйесінің тиімділігін арттыру мәселелері**

Жылумен жабдықтау кез келген елдің инфрақұрылымының маңызды салаларының бірі болып табылады, ол суық климат жағдайында жайлы өмір сүруді және кәсіпорындардың үздіксіз жұмысын қамтамасыз етеді. Қысқы экстремалды температуралық жағдайына байланысты Қазақстан Республикасында да бұл сала ерекше өзекті. Демек, жылумен жабдықтау тиімділігінің мәселелері талқылауды қажет ететін өзекті болып қала береді және шешімін табуға кешенді тәсілді талап етеді.

Қазақстан Республикасында жылумен жабдықтау мәселесі елдің климаттық ерекшеліктеріне байланысты стратегиялық маңызға ие. Жылумен жабдықтау мәселелері Қазақстанның заңнамалық және стратегиялық құжаттарында кеңінен қарастырылған. «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы» Қазақстан Республикасының Заңы, Энергетиканы дамытудың мемлекеттік бағдарламасы, «Жасыл» экономикаға көшу тұжырымдамасы және «Қазақстан-2050» стратегиясы сияқты құжаттар жылу сақтаудың маңыздылығын және оны іске асыру жолдарын анықтайды.

Тиімді жылумен жабдықтау Қазақстанның тұрақты дамуының ажырамас бөлігі болып табылады. Климаттың өзгеруі және экономикалық белгісіздік жағдайында инфрақұрылымды жаңғыртуға және озық технологияларды енгізуге ерекше назар аудару қажет. Тек техникалық, ұйымдастырушылық және білім беру шараларын қамтитын кешенді тәсіл ғана жылумен жабдықтаудың тиімділігін айтарлықтай арттыруға, жылу шығындарын азайтуға және халықтың өмір сүру сапасын жақсартуға мүмкіндік береді.

Жылумен жабдықтау саласындағы негізгі мәселелердің бірі - жылу желілерінің тозуы. Қазақстандағы жылу магистральдарының көп бөлігі кеңес заманында салынған және ондаған жылдар бойы күрделі жөндеуден өтпеген. Бұл коррозия, механикалық зақымдану және оқшаулаудың тозуы сияқты құбырлардағы ақаулардың салдарынан айтарлықтай жылу шығындарына әкеледі. Өртүрлі зерттеулерге сәйкес, жылу шығындарының деңгейі 20-30%-ға жетуі мүмкін, бұл жүйенің жалпы тиімділігін айтарлықтай төмендетеді.

Келесі мәселе - құбырлардағы ақаулар. Құбырлар жылу желілерінің негізгі элементі бола отырып, тұрақты техникалық қызмет көрсетуді және ауыстыруды қажет етеді. Құбырлардың тозуы, коррозия және механикалық зақымданулар салдарынан ақаулар пайда болып, жылу шығындары артады және апаттық жағдайлардың қаупі жоғарылайды. Әсіресе, агрессивті ортадағы жер асты суларының әсерінен коррозия процесі жеделдеп, құбырлардың жарылуына әкелуі мүмкін. Бұл жылу шығындарын арттырып қана қоймай, апаттық жағдайлардың қаупін тудырады, бұл жылумен жабдықтауды уақытша тоқтатуға әкелуі мүмкін.

Келесі мәселе - жылу ағыны. Жылу ағыны, яғни желі арқылы берілетін жылу мөлшері, жылумен жабдықтау жүйесі тиімділігінің маңызды аспектісі болып табылады. Жылу желілеріндегі оқшаулау сапасының төмендігі және құрылымдық кемшіліктер жылу энергиясының айтарлықтай мөлшерінің жоғалуына әкеледі. Бұл энергия өндіруге кететін шығындарды ұлғайтып, қоршаған ортаға зиян келтіретін парниктік газдардың шығарындыларын арттырады.

Қазақстанның қазіргі энергетикалық секторында жылу энергетикасы басымдыққа ие, ол елдің жалпы энергия өндірісінің 91%-ын құрайды. Осыған байланысты, жылу энергетикасының тиімді жұмыс істеуі елдің әлеуметтік-экономикалық дамуына тікелей әсер етеді. Алайда, Қазақстандағы 37 ЖЭО-ның орташа тозу деңгейі 65%-ды құрайды, бұл жылумен жабдықтау жүйесінің тиімділігін төмендетеді. Жылыту маусымының ұзақтығы оңтүстік және солтүстік өңірлерде әртүрлі болып келеді, бұл да жылу жүктемесіне әсер етеді. Елдің электрлік қуатының 66,2%-ын қамтамасыз ететін ЖЭО-лардың маңыздылығын ескере отырып, осы сектордың тиімділігін арттыру өзекті мәселе болып табылады [3].

Қазақстан Республикасында жылумен жабдықтау жүйесінің тиімділігін арттыру мақсатында жылу желілерінің жағдайын талдау және жылу шығындарын азайту өзекті мәселе болып табылады. Республика бойынша жалпы ұзындығы 12680 км құрайтын жылу желілерінің 49,2%-ы ауыстыруды қажет етеді, ал орташа тозу деңгейі 57%-ды құрайды. Әртүрлі бағалаулар бойынша, жылу желілеріндегі жылу шығындары 20%-дан 30%-ға дейін жетеді, бұл құбырлардың нашар жағдайымен, жеткіліксіз оқшаулаумен және басқа да техникалық проблемалармен байланысты.

Жылумен жабдықтау секторы, жылу энергиясын өндіруден тұтынуға дейінгі процесте төмен тиімділікпен сипатталады. Қазандықтардың орташа ПӘК-і 75%-ды, ал бүкіл жүйенің ПӘК-і 58%-ды құрайды. Сонымен қатар, жылуды тасымалдау және тарату кезеңінде жылу шығындары 18-42% аралығында болады. Бұл факторлар қоршаған ортаға зиянды әсер ететін жоғары шығарындыларға әкеледі.

Елімізде 2021-2024 жылдар аралығында жылумен жабдықтау саласындағы негізгі проблемалардың бірі жабдықтардың тозуы және ЖЭО-лардағы апаттық жағдайлар болды. Энергетика министрлігінің мәліметтеріне сәйкес, 2023 жылы елдің 12 қаласындағы ЖЭО-лардағы жабдықтардың орташа тозу деңгейі 73%-ға жетіп, инфрақұрылымның критикалық жағдайын көрсетті. Бұл мәселені шешу мақсатында 2024 жылы жүргізілген жөндеу жұмыстары жабдықтардың орташа тозуын 65%-дан 61%-ға дейін төмендетуге бағытталды [4, 5].

Қазақстан Республикасында жылумен жабдықтау жүйесінің тиімділігін арттыру мақсатында кешенді шараларды қабылдау қажет. Бұл шараларға инфрақұрылымды жаңғырту, заманауи технологияларды енгізу және энергия тиімділігін арттыру жатады. Ескі құбырларды коррозияға төзімді және жылу оқшаулау қасиеттері жақсы материалдарға ауыстыру, жылу желілерінің

жағдайын бақылау және диагностикалаудың заманауи технологияларын пайдалану, энергия тиімді қазандықтар мен сорғы станцияларын орнату, сондай-ақ жылу процестерін автоматты басқару жүйелерін енгізу арқылы жылумен жабдықтаудың тиімділігін айтарлықтай арттыруға болады.

Жылумен жабдықтаудың тиімділігін арттыру және жылу энергиясының тапшылығын төмендету мақсатында жылу техникалық қондырғылар мен жылу желілерінің сапасын жедел бақылауға арналған аспаптарды пайдалану, сондай-ақ қолда бар қуаттарда өндірісті жаңғырту және заманауи жылу сақтау әдістерінің мүмкіндіктерін кеңейту өзекті міндет болып табылады.

Жылу желілері мен технологиялық объектілерді техникалық диагностикалаудың тиімділігін арттыру мақсатында қазіргі уақытта бұзбай бақылау әдістері кеңінен қолданылады. Көптеген зерттеулер көрсеткендей, температуралық күйдің процестерін бақылауға және автоматтандырылған тіркеуге негізделген бұзбай бақылау әдістері ең қолайлы болып табылады. Шетел елдерінің тәжірибесі объектілердің және құрылыс құрылымдарының нормативтік жағдайын қамтамасыз етуде бұзбай бақылаудың жылу ағынын өлшеуіштерін тиімді пайдалануға мүмкіндік береді. Бұдан әрі бұзбай бақылаудың және технологиялық процестерді диагностикалаудың қолданыстағы әдістері мен тәсілдері қарастырылады.

## **1.2 Бұзбайтын бақылау және материалдарды диагностикалау**

Бұзбайтын бақылау әдістері инженерия мен өндірістегі маңызды технологиялық бағыттардың бірі ретінде кеңінен қолданылады. Олар материалдар мен құрылымдардың күйін бұзбай немесе олардың функционалдығына әсер етпей тексеруге және бағалауға мүмкіндік береді. Бұл әдістер әртүрлі салаларда, соның ішінде авиация, ғарыш өнеркәсібі, энергетика, құрылыс және көлік салаларында техникалық жүйелер мен бұйымдардың сенімділігін, қауіпсіздігін және ұзақ мерзімділігін қамтамасыз етуге бағытталған. Мысалы, авиацияда ұшақ бөлшектерінің саңылауларын, жарықшақтарын және басқа да ақауларын уақытында анықтау ұшу қауіпсіздігін арттыруға ықпал етеді. Энергетикада ББ әдістері құбыр жүйелері мен жабдықтардың тұтастығын бақылау үшін қолданылады, бұл апаттардың алдын алуға мүмкіндік береді.

ББ – бақылау объектісінің тұтастығын, негізгі жұмыс қасиеттерін және параметрлерін бақылау. ББ әдістері бақылау объектісімен физикалық өрістің немесе заттың өзара әрекеттесуі арқылы бұйымның (объектінің) материалында оны бұзбай (қиратпай) ақауларды анықтауды қамтамасыз етеді. Бұзбайтын бақылаудағы объект ретінде көбінесе бөлшек немесе бөлшектердің қосылуы (дәнекерлеу, желімді қосылыс) болып табылады. ББ уақыт өте келе бақыланатын объект сапасының өзгеруін тікелей немесе жанама сипаттайтын қосымша ақпарат алуға, өндірісте көзге көрінбейтін ақаулары бар ықтимал сенімсіз өнімдерді алып тастауға, ерекше қиын жағдайларда жұмыс істеу үшін ең сенімді үлгілерді таңдауға, оларды уақытында жою үшін көзге көрінбейтін ақаулардың пайда болу себептерін

анықтауға мүмкіндік береді. Бұзбайтын бақылау құрылғыларының көмегімен сыртқы түрін бұзбай-ақ, нормативтік құжаттарға сәйкестігін бастапқы диагностика мен жедел бақылауды жүзеге асыруға болады. Мұндай құрылғыларды қолдану қажеттілігі жылуэнергетикалық жабдықтардың негізгі параметрлерін, жылу желілерінің және құрылыс нысандарының жағдайын, технологиялық объектілерді бақылау сияқты басты міндеттерде туындайды [6-9].

Бұзбайтын бақылаудың негізгі әдістері мен принциптері, олардың сипаттамалары мен кемшіліктеріне қарай келесі түрлерін қарастырамыз.

*Магниттік бақылау* әдістері бақыланатын өнімдерді магниттеу арқылы пайда болатын магнит өрістерін пайдалануға негізделген. Физикалық өрістің объектімен өзара әрекеттесу сипаты бойынша бақылаудың бұл түрі сараланбайды, яғни барлық жағдайларда объектінің магниттелуі қолданылады және магниттік әдістермен бақылауда қолданылатын параметрлер өлшенеді. Негізінен магниттік әдіс ферромагниттік негіздегі ферромагниттік емес жабынның қалыңдығын өлшеу, дефектоскопия және магнит өрісінің қарқындылығына байланысты магниттік өткізгіштік және оның өзгеруі туралы ақпарат алу үшін қолданылады. [10, 11] жұмыстарында бұл әдістің негізгі кемшілігі - өлшеу процесін автоматтандырудың қиындығы және өлшеу нәтижелерінің қоршаған орта жағдайына тәуелділігі.

Бұзбайтын бақылаудың *электрлік әдісі* сыртқы әсер ету (термоэлектрлік әдіс) нәтижесінде бақыланатын объектіде пайда болатын бақыланатын объектімен немесе өріспен өзара әрекеттесетін электр өрісінің параметрлерін тіркеуге негізделген [8, 12-14]. Бұзбайтын бақылаудың электрлік әдістері дефектоскопия, қалыңдықты өлшеу, структуроскопия, объектілердің термометриясы, заттардың құрамын талдау мәселелерін шешуде қолданылады. Электрлік әдістерді тиімді пайдалану бағыттары ретінде мыналарды бөліп көрсетуге болады: илектелген жалпақ металлдардағы қабаттасуларды, құймалардағы ақауларды, сапасыз дәнекерлерді, ақаулы жапсарларды, биметалл пластиналардағы қабаттасуларды, металл бұйымдарындағы сызаттарды, эмаль жабындарының жарылуын анықтау. Электрлік бұзбайтын бақылаудың кемшіліктері бақылау объектісімен байланысу қажеттілігі, өнімнің бетінің тазалығына қатаң талаптар, өлшеу процесін автоматтандырудың қиындықтары және өлшеу нәтижелерінің қоршаған орта жағдайына тәуелділігі болып табылады.

Бұзбайтын бақылаудың *құйынды ток әдісі* құйынды ток түрлендіргішінің электромагниттік өрісінің бақыланатын объектіде келтірілген құйынды токтардың электромагниттік өрісімен өзара әрекеттесуін талдауға негізделген [15-17]. Ол тек электр өткізгіш материалдардан жасалған бұйымдарды, соның ішінде түсті, магнитті емес металдарды (мыс, жез, алюминий және т.б.) бақылау үшін қолданылады. Бұйымдардың геометриялық өлшемдері бақыланады, бұйым материалының химиялық құрамы мен құрылымы, ішкі кернеулер, металдардың электр өткізгіштігінің өзгеруі және олардың магниттік қасиеттері анықталады, ең кішкентай беттік және жер асты

ақаулары (бірнеше мм тереңдікте) анықталады. [18, 19] жұмыстарында құйынды токтар әдісінің кемшілігі - оның тек электр өткізгіш материалдармен шектелуі. Бұл әдіс металдардан, қорытпалардан, графиттен және жартылай өткізгіштерден жасалған бұйымдарды бақылау үшін ғана қолайлы.

Бұзбайтын бақылаудың *оптикалық әдісі* бақыланатын объектімен өзара әрекеттесетін оптикалық сәулелену параметрлерін бақылауға немесе тіркеуге негізделген [13, 20-22]. Бұл өзара әрекеттесу жұтылу, шағылысу, шашырау, дисперсия, поляризация және басқа оптикалық әсерлермен байланысты. Бұл әдіс өнімнің геометриялық параметрлерін өлшеу, беттің күйін бақылау және беттік ақауларды анықтау үшін қолданылады. Бұл әдістің артықшылығы – бақыланатын нысанның материалына тәуелсіз сыртқы бақылау мүмкіндігі. Оптикалық әдістер мөлдір объектілерді бақылау үшін тиімді. Атап айтқанда, олардың көмегімен макро- және микродефектілер, құрылымдық біртектілік бұзылыстары, сондай-ақ ішкі кернеулер анықталады. Дегенмен, [22-24] жұмыстарында оптикалық әдістің бақыланатын параметрлердің шектеулі диапазоны, қоршаған орта жағдайы мен бұйым бетінің тазалығына қойылатын жоғары талаптары бойынша кемшіліктері көрсетілген.

Бұзбайтын бақылаудың *радиотолқынды әдісі* бақыланатын объектімен өзара әрекеттесетін радио диапазонының электромагниттік толқындары параметрлерінің өзгеруін тіркеуге негізделген [13, 22, 25]. Әдетте ұзындығы 1-100 мм аса жоғары жиілікті диапазондағы толқындар қолданылады. Радиотолқындар өте қатты әлсіремейтін материалдардан жасалған бұйымдарды бақылау үшін қолданылады, яғни диэлектриктер (пластмассалар, керамика, шыны талшық), магнитодиэлектриктер (ферриттер), жартылай өткізгіштер, жұқа қабырғалы металл заттар. Бұл әдіс диэлектриктердің дефектоскопиясында, сондай-ақ өткізгіш денелердің беткі жазықтығының күйін зерттеуде қолданылады. Радиотолқынды әдістің кемшілігі металдарға радиотолқындардың енуінің өте аз тереңдігіне байланысты осы әдісті жүзеге асыратын құрылғылардың салыстырмалы түрде төмен ажыратымдылығы болып табылады [26, 27].

Бұзбайтын бақылаудың *акустикалық әдісі* объектіде пайда болатын немесе қоздырылатын серпімді толқындардың параметрлерін тіркеуге негізделген [13, 28-30]. Жоғарыда қарастырылған барлық әдістерден айырмашылығы, мұнда электромагниттік емес, серпімді толқындар қолданылады және тіркеледі, олардың параметрлері тығыздық, анизотропия (әртүрлі бағыттардағы қасиеттердің бірқалыпсыздығы) және т. б. сияқты материалдардың қасиеттерімен тығыз байланысты. Акустикалық әдістің көмегімен жылу техникалық объектілерде зерттеу барысында анықталатын ақауларды, яғни дәнекерлеу жіктеріндегі жарықтар, көпқабатты оқшаулағыш материалдардағы қатпарлар, құйма бұйымдардағы кеуектілік және керамикалық материалдардағы қосындыларды анықтауда қолданылады.

Бұзбайтын бақылаудың *жылулық әдісі* бақыланатын объектілердің жылу немесе температура өрістерінің өзгерістерін тіркеуге негізделген [13, 14, 31-

33]. Жылулық әдіс: температураның өлшенген айырымдарын қайта есептеу арқылы зерттелетін объектінің жағдайын бағалауға, ондағы ақауларды және даму дәрежесін анықтауға; қоршау құрылымдарының термиялық біртекті емес аумақтарын және жобалық деректермен салыстыру арқылы олардың пайда болу себебін анықтауға; спектрдің инфрақызыл диапазонындағы объектілерді тексеру жүргізуге, олардың кез-келген нүктесінде температураны өлшеуге, жылулық процестерінің динамикасын бақылауға; қазандықтар мен жылу станцияларына тексеру жүргізуге, яғни объектінің кез келген нүктесінде жылу ағып кетулерін, ақаулар мен температураны анықтауға; бұйымдардың герметикалық және оқшаулау сапасына бақылау жүргізуге, құрылымдағы ылғалды аймақтарды анықтауға; әртүрлі температуралық-ылғалдылық шарттармен ғимараттың қоршау құрылмаларында сынақ жүргізуге мүмкіндік береді [34].

Бұзбайтын бақылау түрлерінің ішінде жылулық бақылау әдісіне ерекше орын беріледі. Себебі электрондық жабдықтағы бар энергияның 65-95%-ы, соңында жылу энергиясына айналады, бұл параметрдің сапасын, техникалық жағдайын және бөлініп шығатын жылу энергиясын сипаттайтын таңдаудың тиімділігін растайды. Жылу әдісімен бақылаудың басты артықшылығы – бақыланатын объектінің беткі температурасы мен жылу ағыны арқылы ақаулар туралы ақпарат алу мүмкіндігі. Бұл шамалар бұзылулардың жылуфизикалық және геометриялық сипаттамаларының өзгеруімен анықталады. Әдіс объектіні пайдаланудан шығармай, оның техникалық жағдайын жедел диагностикалауға және температуралық жылу өрістерінің біркелкі еместігінің таралуын сапалы анықтауға мүмкіндік береді.

Жылулық бақылау құралдарының жұмыс принципі объектінің жылу өрісінің термодинамикалық сезімтал элементтермен өзара әрекеттесуіне негізделген, нәтижесінде өріс параметрлері (қарқындылық, температура градиенті және басқалары) электрлік сигналға айналады.

Қорытындылай келе, бұзбайтын бақылаудың ұсынылған әдістерін зерттеу барысында барлық материал және ақау түрлеріне оңтайлы жалпы әдіс жоқ екенін атап өтуге болады. Әдісті таңдау міндеттің нақты шарттарымен, соның ішінде материал түрі, ақаудың сипаты және болжамды орналасуы, қажетті тереңдік, жабдықтардың қолжетімділігі және экономикалық шектеулермен анықталады. Көзбен бақылау және акустикалық бақылау беткі ақауларды анықтауға жарамды қарапайым және арзан әдістер болып табылады. Магниттік және құйынды ток бақылау сәйкесінше ферромагнитті және өткізгіш материалдардағы ақауларды анықтау үшін тиімді, бірақ ену тереңдігімен шектеледі. Оптикалық және радиотолқындық бақылау жоғары сезімталдық пен ену тереңдігіне ие, беткі және ішкі ақауларды анықтауға мүмкіндік береді, бірақ олар күрделірек жабдықтар мен білікті мамандарды талап етеді. Акустикалық бақылау нақты уақыт режимінде белсенді ақауларды анықтау қабілетімен ерекшеленеді. Жылулық әдістері, әсіресе инфрақызыл термография, беткі және кейбір ішкі ақауларды зақымсыз анықтаудың артықшылығын ұсынады, бірақ олардың сезімталдығы

материалдың сәулелену қабілеті мен қоршаған орта жағдайларына тәуелді болуы мүмкін. Сондықтан, оңтайлы бұзбайтын бақылау әдісін таңдау барлық факторларды мұқият талдауды және әртүрлі әдістердің мүмкіндіктерін нақты талаптармен салыстыруды қажет етеді.

### **1.3 Жылу ағынының тығыздығын өлшеу әдістері және термоэлектрлік түрлендіргіштер**

Бақылаудың жылулық әдісіндегі құрылғыларда ақаулар туралы ақпарат бақыланатын нысанның температурасы, жылу ағыны және жылу ағыны тығыздығы арқылы тасымалдайды. Олардың мәндері бұзылулардың жылуфизикалық және геометриялық параметрлерінің өзгеруімен анықталады.

Жылу ағыны қарқындылығы туралы ақпарат ғылым мен техниканың басым бағыттарында маңызды рөл атқаратын көптеген міндеттерді шешу үшін аса маңызды. Жылу жағдайын бағалау және өлшеу нәтижелерін салыстыру үшін жылу ағынының меншікті мәні, атап айтқанда, оның беттік тығыздығы ең қолайлы болып табылады. Жылу ағынының беттік тығыздығын, кез келген басқа физикалық шама сияқты, өлшеу бірлігін қамтамасыз ету, ең алдымен, нормативтік базаны (стандарттар, өлшеу әдістемелері және т.б.) қамтуы керек; екінші құрамдас бөлік – өлшем бірлігін белгілі шама мәнімен және онымен байланысты өлшеу қателігімен жүзеге асыру үшін жоғары дәлдіктегі метрологиялық құралдардың – эталондардың болуы, ол әрі қарай салыстыру негізі ретінде пайдаланылуы тиіс.

Теплометрияның нормативтік-әдістемелік базасына келетін болсақ, оның ішінде Техникалық жылуфизика институты қызметкерлерінің де қатысуымен бірқатар құжаттар, соның ішінде ұлттық (ДСТУ 3193-95, ДСТУ 3401-97, ДСТУ 3756-98, ДСТУ ISO 9869: 2007, ДСТУ-П CEN / TS 1159-4: 2010 және т.б.), ГОСТ 30619-98 және мемлекетаралық стандарттар, сондай-ақ жылу шамасын өлшеу әдістері мен құралдарына жалпы талаптарды реттейтін халықаралық (ДСТУ ISO, ДСТУ EN) стандарттарымен үйлестірілген Украина стандарттары әзірленген [35, 36].

Қазақстан Республикасында сондай-ақ жылу өлшемдері саласында ұлттық нормативтік-әдістемелік базаны халықаралық талаптарға сәйкестендіру бойынша белсенді жұмыс жүргізілуде. Бұған өнеркәсіп пен құрылыс салаларында жылу шамаларын дәл және сенімді өлшеуді қамтамасыз ету мақсатында Украина мен халықаралық стандарттарға ұқсас стандарттарды бейімдеу және енгізу кіреді. Қазақстанның негізгі нормативтік құжаттарына, мысалы, СТ РК 2.528-2018, СТ РК 2.727-2019, СТ РК 2.430-2017, СТ РК 2.535-2018 «Температураны өлшеу құралдары. Жалпы техникалық талаптар» және Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігі мен Өнеркәсіп және құрылыс министрлігі бекіткен жылу энергиясы мен жылу тасымалдағышты есепке алу ережелері жатады.

Жылу ағынын өлшеу құрылғысын әзірлеуде халықаралық стандарттар мен жылу өлшеу әдістемелерін, мысалы, ISO 9869 стандартын, сондай-ақ

жылу ағынын өлшеу әдістерін сипаттайтын әдістемелік құжаттарды ескеру қажет [37].

Жылу ағынының метрологиялық қамтамасыздандырылуы мемлекеттік деңгейде АҚШ-та (Ұлттық стандарттар және технологиялар институты (NIST)) және Нидерландыда (TNO Ұлттық ұйымы) белсенді түрде жүзеге асырылуда [37-41]. Мысалы, АҚШ-та жылу өлшеулерінің метрологиялық қамтамасыз шенберінде жылу ағыны датчиктерін калибрлеу әдістерін және техникалық құралдарын реттейтін бірқатар стандарттар (мысалы, ASTM C177, ASTM C1130, ASTM C1132 және т.б.) қолданылады. Жылу ағыны датчиктерінің калибрлеуі жоғары дәлдікті криогендік радиометр (High Accuracy Cryogenic Radiometer, HACR) ретінде қолданылатын ұлттық эталонға сүйене отырып, Гардон және Шмидт-Боелтер типтес радиометрлер мен түрлендіргіштердің өлшеу нәтижелерінің өткізуін қамтамасыз ететін схема бойынша жүргізіледі [41].

Украинада жылу ағынын бақылау құралдарының мемлекеттік эталоны ретінде ҰҒО «Метрология институтында» жасалған ДЕТУ 11-01-96 когерентсіз сәулеленудің энергетикалық жарықтылығының бастапқы эталоны бекітілген [42]. Аталған эталон  $10 \text{ Вт/м}^2 - 105 \text{ Вт/м}^2$  диапазонындағы оптикалық сәуле ағынының тығыздығының бірлігін өлшеу үшін қолданылады. Эталон өлшеу нәтижелерінің орташа квадраттық ауытқуы  $0,25 \cdot 10^{-2}$  -ден аспайтындай және шектелмеген салыстырмалы жүйелік қатесі  $0,3 \cdot 10^{-2}$  -мен сипатталады, бұл ұлттық метрологиялық стандарттарға сәйкестігін растайды [43]. Украинада жылу және күн сәулеленуінің энергетикалық жарықтылығын өлшейтін құралдардың мемлекеттік тексеру схемасын оптикалық-физикалық өлшеулер саласындағы әлемдік деңгейге сәйкес келетін метрологиялық сипаттамалары бар эталон басқарады [44]. Бұл эталон арқылы энергетикалық жарықтылық бірлігі жылу сәулеленуінің абсолюттік қабылдағышы көмегімен беріледі.

Сонымен қатар, бұл аталған стандарттары температураны өлшеу құралдарына қойылатын жалпы техникалық талаптарды, калибрлеу және сынау әдістемелерін тікелей реттейді, бұл жылу ағынын өлшеу құрылғыларының метрологиялық дұрыстығы мен дәлдігін қамтамасыз ету үшін маңызды болып табылады. Олар жылу ағынын өлшеу әдістерін нақты қамтымайды, бірақ сенімді және дұрыс өлшеу құралдарын әзірлеудің негізі ретінде қызмет етеді.

Жылу ағыны – денелер мен нысандар арасындағы температура градиенті салдарынан болатын жылу алмасу процесін сипаттайтын негізгі параметр. Табиғаттағы жылу процестері мен құбылыстарының маңызды сипаттамасы болып табылатын жылу ағынын бақылау және өлшеуге арналған құралдар жылу шығындарының көздерін анықтап, олардың сандық шамаларын анықтауға мүмкіндік береді. Жылу ағыны және оның тығыздығы туралы мәліметтерді алу екі әдіспен жүзеге асырылады. Біріншісі – аналитикалық әдіс, температураны өлшеу мен жылу өткізгіштік теңдеулерінің сандық

шешіміне негізделген. Екіншісі – эксперименттік әдіс, арнайы өлшеу құралдарының көмегімен жүргізілетін өлшеулерге негізделген [45, 46].

Жылу ағынының тығыздығын анықтаудың тікелей аналитикалық әдісі ретінде - градиенттік әдіс қолданылады, оның мәні жылу алмасу бетіндегі температура градиенті арқылы келесі қатынаспен анықталады [47]:

$$q = - \lambda \cdot \text{grad}T = - \lambda \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) ,$$

мұндағы  $q$  – жылу ағынының тығыздығы, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  – қабырға материалының жылу өткізгіштік коэффициенті, Вт/(м·К);  $\text{grad}T$  – изотермиялық бетке перпендикуляр бағыттағы температура градиенті, °С.

Градиенттік әдіс стационарлы және стационарлы емес жағдайларда жылу алмасу беті бойынша температура мен жылулық жүктеме еркін өзгергенде жылу ағынының мәндерін анықтауға мүмкіндік береді. Оның негізгі кемшіліктеріне – жұмыс аймағын дайындаудың қиындығы, есептеулер көлемінің көптігі және алынған ақпаратты метрологиялық аттестаттау арқылы растау мүмкін еместігі, сондай-ақ, эксперимент барысында шекаралық температураны өлшеу және температура өрісін анықтау, температура градиентін температура айырымының және қабырға қалыңдығының қатынасымен алмастыру ( $\text{grad}T \approx \Delta T / h$ ), сонымен қатар қабырға материалының жылу өткізгіштік коэффициентін білу қажеттілігінен туындайтын елеулі қателіктер жатады.

Бастапқы өлшеуші жылу ағынын түрлендіргіші немесе арнайы өлшеу құралдарын қолдануға негізделген жылу ағыны туралы ақпарат алудың эксперименттік жолы практикада тиімдірек болып шықты, өйткені салыстырмалы түрде қарапайым өлшеу әдістерімен бұл құралдарды тек ғылыми зерттеулерде ғана емес, сонымен қатар халық шаруашылығының түрлі салаларындағы технологиялық процестерді бақылау және реттеу кезінде де қолдануға мүмкіндік береді.

Жылу ағынын анықтау үшін көптеген қолданбалы есептерді шешу кезінде әртүрлі эксперименттік әдістер кеңінен қолданылады. Олардың жүйелі сипаттамасы алғаш рет О.А. Геращенконың [44-49] жұмыстарында, кейіннен [50-53] авторлардың жұмыстарында ұсынылды. Алайда, жылу өлшеудің дамуындағы ең маңызды нәтижелер Украина Ғылым академиясының техникалық жылуфизикасы институтында алынды [54-57].

О.А. Геращенконың [48, 49] еңбектерінде жылу ағынын өлшеу әдістерінің жалпы шолуы алғаш рет ұсынылған. Жылу ағынын өлшеудің келесі, яғни калориметрлік, сұйықтық-энтальпиялық, кедергілік, электрометрлік және қосалқы қабырға әдістері ең жиі қолданылатын әдістер болып табылады.

Калориметрлік әдіс сәулелік жылу ағындарын зерттеуде жиі қолданылады, себебі ол сәулелену энергиясын дәл анықтауға мүмкіндік

береді. Жылу ағынының беттік тығыздығы келесі формула бойынша анақталады [58]

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{\Delta l} \left( \frac{d}{d_0} \right)^2$$

мұндағы  $\lambda$  – мыстың жылуөткізгіштігі.

Сұйықтық-энтальпиялық әдіс зерттелетін бетті жуып өтетін сұйықтықтың энтальпия өзгерісіне негізделген. Жылу ағыны сұйықтықтың энтальпиясын өзгертеді. Бұл әдіс каналдар мен түтіктердің ішкі қабырғаларында өлшеулер жүргізу үшін ыңғайлы. Орташа беттік жылу ағынының тығыздығы [59] формуласымен есептеледі:

$$q_c = \frac{G \Delta h - Q_n}{\Delta F}$$

мұндағы  $\Delta h$  – сұйықтықтың энтальпия өзгерісі;  $G$  – оның шығыны;  $Q_n$  – жылуалмасу бетіндегі  $\Delta F$  қарастырылып отырған аумағындағы жылу шығыны.

Электрометрлік әдіс, әдетте, беттік жылу ағынының тығыздығы электрлік қыздыру нәтижесінде пайда болған жағдайларда пайдаланылады. Ішінде сұйықтық қозғалыста болатын канал қабырғасын тікелей электрлік қыздыру арқылы жергілікті жылу ағынының мәнін есептеу үшін формуласын қолдануға болады [59]:

$$q_c = j^2 \rho - q_n - q_m$$

мұндағы  $\rho$  – меншікті электр кедергісі;  $j$  – токтың тығыздығы;  $j^2 \rho$  – қабырғадағы жылу бөліну;  $q_n$  және  $q_m$  – жылулық шығынының және жылудың осьтік шығынының тығыздықтары.

Канал қабырғасын жанама электрлік жылыту кезінде жылу ағынының тығыздығының канал бетіндегі орташа мәнін ғана анықтауға болады

$$q_c = \frac{W - Q_n}{\Delta F}$$

мұндағы  $W$  – ауданы  $\Delta F$  қабырға аумағындағы қыздырғыштың қуаты;  $Q_n$  – жылу шығыны [59].

Қосалқы қабырға әдісі – жылу көзі мен жылу ағынын өлшейтін датчик арасына орналастырылған жұқа, жылу өткізгіштігі жоғары материалдан жасалған «қосалқы қабырғаны» пайдаланатын жылу ағынын өлшеу тәсілі. Қосалқы қабырға температура өрісін теңестіруге және датчик бетінде жылу ағынының біркелкі таралуын қамтамасыз етуге арналған. Бұл әдіс біртекті емес немесе біркелкі қыздырылмаған беттерден жылу ағындарын өлшегенде

өте тиімді, өйткені ол датчикке жеткенде жылу ағынын орташалайды. Бұл әдіс жылу өткізгіштік үшін Фурье заңына негізделген. Жылу көзінен бөлінетін жылу ағыны қосалқы қабырға арқылы өтіп, содан кейін ғана жылу ағыны датчигіне жетеді. Қосалқы қабырғада тіркелген температура градиенті мен оның белгілі жылу өткізгіштік коэффициентінің мәндері жылу ағынының шамасын есептеуге мүмкіндік береді. Қосалқы қабырға, әдетте, жылу өткізгіштігі жоғары және жылу сыйымдылығы төмен материалдан жасалады, бұл тез жылу тепе-теңдігін қамтамасыз ету және жылу ағынының бұрмалануын азайту үшін қажет [48, 53, 60].

Қосымша қабырға әдісінің мәні зерттелетін дененің бетіне жылу ағынының датчиктерін немесе жылуөлшегіштерді орнату болып табылады. Бұл жағдайда датчик жылу ағыны векторы датчиктің жұмыс бетіне перпендикуляр болатындай етіп орналастырылады. Әдетте, мұндай жылуөлшегіштер жұқа пластина түрінде жасалады. Пластина материалы белгілі жылу өткізгіштікке ие, ал пластинаның ішінде температураны немесе температуралар айырмасын өлшейтін терможұптар жүйесі орнатылады. Жылуөлшегіш орнатылған жердегі стационарлы жылу ағынының беттік тығыздығы келесі өрнекпен есептеледі:

$$q = \frac{\lambda \Delta t}{\delta}$$

мұндағы  $\Delta t$  – пластинадағы температура өзгерісі;  $\delta$  және  $\lambda$  – сәйкесінше датчиктің қалыңдығы және жасалған материалының жылуөткізгіштігі.

Шығыс сигналы  $\Delta E$  (термоЭҚК) ол арқылы өтетін жылу ағынына тура пропорционал:

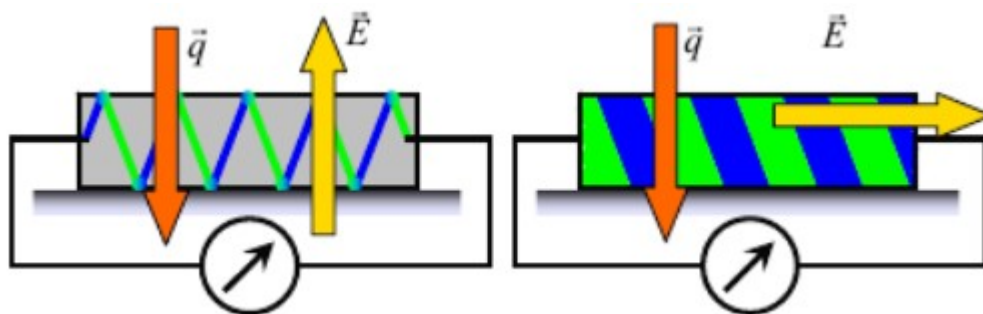
$$q = \frac{\lambda \Delta E}{\alpha \delta} = k \Delta E$$

мұндағы  $k = \frac{\lambda}{\alpha \delta}$  – терможұптардың термоЭҚК коэффициенті және құрылмалық параметрлеріне тәуелді, жылу ағыны датчигінің түрлендіру коэффициенті.  $s = \frac{1}{k}$  шамасы – датчиктің вольт-ваттық сезгіштік. Практикада  $k$  мәнін арнайы градуирлік тәжірибелер көмегімен анықтайды [61].

Түрлі құрылғылар мен механизмдердің жылу режимдерін бақылау барысында жылу ағынының тығыздығын өлшеу қажеттілігі, жылу шығаратын немесе жұтылатын беттермен жанасатын жағдайда жылу ағындарын өлшеуге арналған жылуөлшегіштердің сезгіш элементі ретінде қосалқы қабырға әдісін қолданатын термоэлектрлік батареялық түрлендіргіш пайдаланылады. Термоэлектрлік түрлендіргіштердің көмегімен температура мен жылу ағынын өлшеу әдісі, әртекті өткізгіштерден жасалған тізбекте пайда болатын термоэлектрқозғаушы күштің шамасы осы өткізгіштердің

түйіскен жерлерінің температурасына тәуелді екендігіне негізделеді. Бұл құбылыс Зеебек эффектісі ретінде белгілі [62].

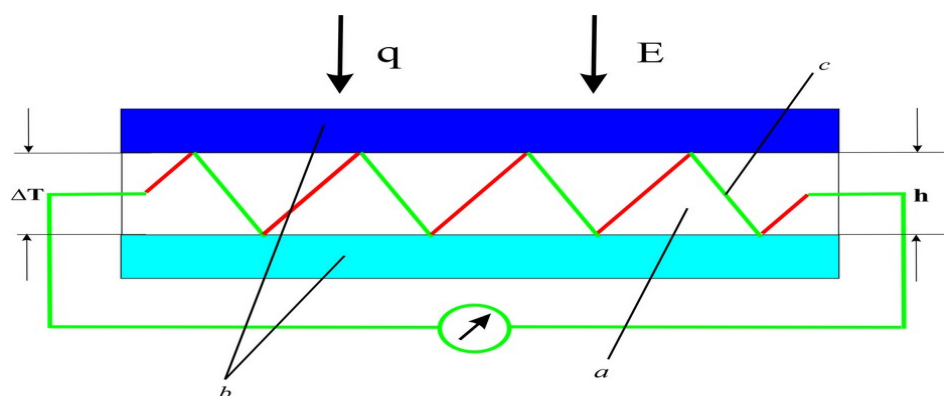
[48, 53] еңбектерінде терможұптардың өлшенетін жылу ағынының бағытына қатысты орналасуына қарай, жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргіштерін жіктеу әдісі ұсынылған. Терможұптары жылу ағынының бағытымен бірдей бағытталған термоэлектрлік түрлендіргіштер «бойлық типті» (1-сурет, а), ал терможұптары жылу ағынының бағытына перпендикуляр орналасқан термоэлектрлік түрлендіргіштер «көлденең типті» (1-сурет, б) деп жіктеледі.



Сурет 1 – Қосалқы қабырға әдісіне негізделген жылу ағынының бойлық (а) және көлденең (б) типті термоэлектрлік түрлендіргіштері [63]

Бойлық типті термоэлектрлік жылу ағыны түрлендіргіштерінің алғашқы үлгілерінің бірі металдан жасалған дара түрлендіргіші болып табылады [64]. Бұл түрлендіргіш өзінің құрылымы бойынша ерекше жалпақ дифференциалды терможұпты бейнелейтін пластинадан тұрады. Ондағы аралық термоэлектрод қосымша қабырға ретінде қызмет етеді [44, 48, 49]. Сезімталдығының төмен болуына байланысты ( $1\text{ мм}$  қалыңдықта  $(1-3) \cdot 10^{-9} \text{ В} \cdot \text{м}^2 / \text{Вт}$ ) бұл термоэлектрлік түрлендіргіштер тек қана жоғары қарқынды жылу процестерін зерттеуде қолданылған.

Әртүрлі пішіні мен өлшемдері бар термоэлектрлік батареялық түрлендіргіштердің жұмыс істеу принципі, бақылау нысанында белгілі бір тұрақты термиялық кедергіде жылу ағыны  $q$  арқылы пайда болатын температура айырымына  $\Delta T$  пропорционал электрлік сигналын  $E$  тудыруға негізделген. Термоэлектрлік батареялық түрлендіргіштің сезімтал элементі  $a$  ретінде қалыңдығы  $h$  және жылу өткізгіштігі белгілі бір мәнге ие материалдық қабат қолданылады, оның бетінде термоэлектрлік батареялық түрлендіргіштердің түйіндері (терможұптар)  $c$  орналастырылған. Қабылдау пластинасы  $b$  зерттелетін нысанмен жылулық байланысқа келтіріледі және сыртқы әсерлерден қорғайды (2-сурет).



Сурет 2 – Термоэлектрлік батареялық түрлендіргіш: а – сезімтал элемент, b – қабылау пластинасы, с – терможұптар

Термоэлектрлік түрлендіргіштерде сезімтал элемент ретінде қолданылатын терможұп, өзара түйіскен екі әртекті өткізгіштен жасалған термоэлектрлік тізбектен құралған. Стандартта терможұптың он екі түріне қойылатын талаптар нормаланған, олардың кейбіреуін 1-кестеден көруге болады [65].

Кесте 1- Терможұптың негізгі типтерінің химиялық құрамы және өлшенетін температуралардың шектері

| Терможұптың типтері        | ХЭК бойынша белгіленуі | НСС бойынша әріптік белгіленуі | Термоэлектродтардың химиялық құрамы, мас. % |                          | Өлшенетін температуралардың шектері, °C |         |              |
|----------------------------|------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|---------|--------------|
|                            |                        |                                | оң                                          | теріс                    | төменгі                                 | жоғарғы | Қысқартылған |
| Мыс-константан ТМКн        | Cu-CuNi                | T                              | Cu                                          | Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe | -200                                    | 350     | 400          |
| Хромель-копель ТХК         | -                      | L                              | Ni+9,5 Cr                                   | Cu+(42-44)Ni+0.5Mn+0.1Fe | -200                                    | 600     | 800          |
| Хромель-константан ТХКн    | NiCr-CuNi              | E                              | Ni+9,5 Cr                                   | Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe | -200                                    | 700     | 900          |
| Темір-константан ТТК (ТЖК) | Fe-CuNi                | J                              | Fe                                          | Cu+(40-45)Ni+1.0Mn+0.7Fe | -200                                    | 750     | 900          |
| Хромель-алюмель ТХА        | NiCr-NiAl              | K                              | Ni+9,5 Cr                                   | Ni+1Si+2Al+2.5Mn         | -200                                    | 1200    | 1300         |
| Платинородий-платинородий  | -                      | B                              | Pt+30Rh                                     | Pt+6Rh                   | 600                                     | 1700    | -            |

2-кестеде терможұптардың әртүрлі типтерінің жұмыс істеуі үшін ұсынылатын атмосфералық жағдайлары және олардың көрсетілген температура аралықтарындағы дифференциалдық сезімталдық көрсеткіштері берілген [66].

Кесте 2 - Ұсынылатын атмосфералық жағдайлары

| Терможұптың типтері | Атмосфералық жағдайлары |         |           | Температура диапазонындағы сезімталдық |               |
|---------------------|-------------------------|---------|-----------|----------------------------------------|---------------|
|                     | Тотықтырғыш             | инертті | вакуумдық | Диапазон, °C                           | dE/dT, мкВ/°C |
| ТМКн (Т)            | ++                      | +       | +         | 0-400                                  | 40-60         |
| ТХК                 | ++                      | +       | +         | 0-600                                  | 64-88         |
| ТХК (Е)             | ++                      | +       | +         | 0-600                                  | 59-81         |
| ТЖК (J)             | ++                      | +       | +         | 0-800                                  | 50-64         |
| ТХА (К)             | ++                      | +       | +         | 0-1300                                 | 35-42         |
| ТНН (N)             | ++                      | +       | +         | 0-1300                                 | 26-36         |

Ескерту. «++» — ұсынылатын атмосфера; «+» — берілген атмосферада пайдалану мүмкіндігі; «-» — ұсынылмаған атмосфера.

Тотықтырғыш атмосфера деп, әдетте, оттегінің көлемі 21% ( $O_2$ ) құрайтын ауа немесе қосымша оттегі бар газ қоспасын түсінеді. Мұндай ортада заттың тотығу процесі жүреді, оның мәні атомдар мен иондардың электрондарды жоғалтуында.

Оттегі атомдарының қосылуы арқылы оксидтің пайда болуы тотығу реакциясының бір мысалы болып табылады. Әлсіз тотығу атмосферасы, газ қоспасында оттегінің ( $O_2$ ) 2-3% мөлшерінде болуымен сипатталады. Тотықсыздандырғыш атмосферада химиялық реакциялар барысында атомдар мен иондар электрондарды қабылдайды. Бұл жағдайда элементтің валенттілігінің төмендеуі орын алады. Тотықсыздандырғыш орталарға мысалдар: құрғақ  $H_2$ ,  $CO$ , көміртегі қосылған газдар, эндогаз, экзогаз, кокстік және домен газдары, диссоциацияланған аммиак, жану камерасынан шығатын газдар. Инертті атмосфера азот ( $N_2$ ), аргон ( $Ar$ ), гелий ( $He$ ) және басқа да инертті газдардың ішінде болады.

Кестеде берілген мәліметтерден мыс-константан және темір-константан терможұптарының жоғары әмбебаптық сипаттамаларына ие екендігін көруге болады. Мыс-константан терможұптары жылу ағынын түрлендіретін термоэлектрлік батареялық түрлендіргіштерде қолдану үшін басым таңдау болуына мүмкіндік беретін артықшылықтарға ие. Мыс-константан терможұбының сезімталдығының жоғары болуы (40–60 мкВ/°C) температураның өзгеруіне, демек, жылу ағынының өзгеруіне тез және тиімді жауап беруді қамтамасыз етеді.

#### 1.4 Жылу ағынын өлшеу құралдары және жылу ағынының бастапқы түрлендіргіштерінің түрлері

Жылу ағыны датчиктерінің құрылымы мен жасалуы - олардың дәлдігін, сезімталдығын және қолданылу саласын анықтайтын маңызды аспект. Датчиктердің әртүрлі типтері өлшеудің әртүрлі принциптеріне негізделген, бұл олардың сипаттамаларына әсер етеді.

Қазіргі кезде жылу ағынын өлшейтін датчиктердің әртүрлі түрлерінің болуы олардың ерекше сипаттамалары мен қолдану аясының әртүрлілігімен сипатталады. Бұл айырмашылықтар, жылу ағынын өлшеу принциптерінің әртүрлілігімен түсіндіріледі. Жұмыс принципі бойынша датчиктерді келесі топтарға бөлуге болады: термоэлектрлік датчиктер (терможұптар, термобатареялар), жылулық кедергісіне негізделген датчиктер, жұқақабыршақты датчиктер және заманауи датчиктер.

Термоэлектрлік түрлендіргіштер немесе термобатареялар, бірнеше терможұптың тізбектей жалғауына негізделген температура мен жылу ағынын өлшеуге арналған тиімді құрал болып табылады. Бұл конструкция жалғыз терможұпты пайдаланумен салыстырғанда температура өзгерісіне сезімталдықты едәуір арттыратын қасиетке ие.

Термоэлектрлік датчиктердің жұмыс принципі Зеебек эффектісіне негізделген. Зеебек эффектісі екі түрлі өткізгіштен (терможұп) тұратын терможұптың дәнекерленген (түйіскен) жерлерінде температура айырымы пайда болғанда тұйық тізбекте термоэлектр қозғаушы күшінің (термо-ЭҚК) пайда болу құбылысы болып табылады [67]. Термо-ЭҚК-нің шамасы қыздырылған және салқындатылған түйіндер арасындағы температура айырмасына тура пропорционал және қолданылатын материалдардың физикалық және химиялық қасиеттеріне байланысты анықталады. Жеке терможұпта осы түйіндер арасындағы температуралар айырымын өлшейді. Ал, термобатареяда сезімталдықты және шығыс сигналын күшейту үшін, әрбір терможұп тудыратын термо-ЭҚК арттырып, терможұптар тізбектей жалғайды.

Қосалқы қабырға принципіне негізделген және өндіріске енгізілген алғашқы жылу өлшеуіш құралдарының бірі Э.Шмидттің таспалы жылуөлшегіші болып табылады [68]. Ол қазіргі уақытта да жылу оқшаулағыш арқылы жылу шығынын өлшеу үшін кеңінен қолданылады. Шмидттің таспалы жылуөлшегішін әзірлеу үшін ұзындығы 600-650 мм, ені 60-70 мм және қалыңдығы 3-5 мм болатын резеңке таспа қолданылады. Таспаларға дифференциалды терможұптар батареясының шамамен 200 түйіні тізбектей орналастырылады, содан кейін беті бір миллиметрлік шикі резеңке қабатымен жабылып, желімделеді. Ток шығарушы өткізгіштер резеңкеге орнатылған клеммалар арқылы шығарылады. Таспаның кіші бүйіржақтарында белдүүлелер арқылы оқшаулағыштың дөңес бетіне керілу арқылы бекітілетін тетік орналасқан. Белдүүлелердің қолайсыз үлкендігі мен инерциялылығына байланысты таспалар жұмыс істеу ыңғайсыз, дегенменде олар кеңінен қолданылады.

Термобатареялар бірқатар артықшылықтары мен кемшіліктерімен сипатталады (кесте 3).

Кесте 3 - Термобатареялардың артықшылықтары мен кемшіліктері

| Сипаттамасы | Артықшылықтары                | Кемшіліктері              |
|-------------|-------------------------------|---------------------------|
| Жұмыс істеу | Қарапайымдылығы, суық түйінді | Тікелей жылу ағынын өлшеу |

|                          |                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                      |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| принципі                 | дұрыс компенсациялау арқылы жоғары дәлдікке қол жеткізу мүмкіндігі және салыстырмалы түрде арзандығы (терможұптар үшін). Ал термобатарейалар, өз кезегінде, үлкен температуралық градиенттерді өлшеу мүмкіндігімен ерекшеленеді. | кезінде қоршаған ортаның (суық түйін) температурасына сезімталдығы және өлшеу дәлдігінің төмендігі, суық түйінді компенсациялауды немесе эталондық өлшеулерді қолдануды міндеттейді. |
| Құрылымы                 | Ықшамдылығы, материалдардың қолжетімділігі.                                                                                                                                                                                      | Термобатарейалардағы күрделі жалғау схемасы жан-жақты зерттеуді талап етуі мүмкін.                                                                                                   |
| Жылу ағынын өлшеу        | Егер температуралар тұрақты және өлшеу нүктелері дұрыс анықталса, онда температура айырымын, сәйкесінше жылу ағынын өлшеу салыстырмалы түрде оңай жүзеге асырылады.                                                              | Жылу ағынын тікелей өлшеу өлшеу нүктелері арасындағы жылу кедергісіне қосымша зерттеу жүргізуді қажет етеді.                                                                         |
| Температуралар диапазоны | Терможұптардың әртүрлі материалдары үшін кең температуралық өлшеу диапазоны (мысалы, хромель-алюмель 1200°C-қа дейін өлшеу мүмкіндігіне ие).                                                                                     | Материалдардың механикалық қасиеттері және химиялық төзімділігі әсерінен шектеулер туындайды.                                                                                        |
| Сезімталдық              | Термобатарейалар терможұптарға қарағанда сезімталдықтың айтарлықтай жоғарылауын көрсетеді.                                                                                                                                       | Жеке терможұптардың (басқа датчиктермен салыстырғанда) төмен сезімталдығы, бұл жылу ағынының таралуының бірқалыпты еместігін түзетуді талап етеді.                                   |

Тізбектей жалғанған терможұптар жиынтығынан тұратын термоэлектрлік түрлендіргіштер (термобатарейалар) күрделі немесе төтенше жағдайлардағы температураны дәл өлшеу қажет болатын әр түрлі салаларда қолданылады. Мысалы: жоғары температуралы пештердегі температураны өлшеу, ғимараттар мен инженерлік құрылыстардың қабырғаларындағы температуралық градиенттерді өлшеу, іштен жану қозғалтқыштары мен басқа жылу қондырғыларында температураны бақылау, әр түрлі жылу алмасу жүйелеріндегі жылу ағындарын өлшеу.

Термобатарейалар жоғары сезімталдық пен жоғары температурадағы жұмыс мүмкіндігіне байланысты жылу параметрлерін дәл бақылауды талап ететін әр түрлі салаларда кеңінен қолданыс табады. Алайда, жылу ағындарын анықтауда термобатарейаларды қолдану жүйенің геометриясын ескеру және тиісті есептеулерді жүргізу маңызды болып табылады. Осы типтегі датчиктермен жүргізілетін өлшеулердің дәлдігі мен нақтылығы жоғарыда айтылған негізгі метрологиялық сипаттамалармен анықталады.

Жылу ағынының жұқа қабыршақты датчиктерінің жұмыс принципі, жартылай өткізгіш материалдардан (мысалы, висмут теллурид, никель) жасалған жұқа қабыршақтардың электрлік кедергісінің температураға

байланысты өзгеруіне негізделген. Жылу ағыны әсерінен пайда болатын қабыршақ температурасының өзгеруі, қабыршақтың электрлік кедергісінің өзгерісін тудырады. Арнайы схемалар арқылы өлшенетін кедергі өзгерісі арқылы жылу ағынының мөлшері анықталады. Басқаша айтқанда, жұмыс істеу принципі жылу ағынын жылу ағынына пропорционал электр сигналына түрлендіруге негізделген. Жұқа қабыршақты датчиктердің бірқатар артықшылықтары мен кемшіліктері 4-кестеде көрсетілген.

Кесте 4 - Жұқа қабыршақты датчиктердің артықшылықтары мен кемшіліктері

| Сипаттамасы              | Артықшылықтары                                                                                                                                                                              | Кемшіліктері                                                                                                                                                                              |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Жұмыс істеу принципі     | Жергілікті температура ауытқуларына жоғары сезімталдық, микрожүйелерге интеграциялану мүмкіндігін қамтамасыз ету, ауа қабаты арқылы жылу ағынын жанаспайтын әдістермен өлшеудің мүмкіндігі. | Тәуелділіктің сызықты емес болуы, сонымен қатар материалдың біртекті болмауы немесе геометриялық факторлардың әсерінен нәтижелердің бұрмалану қаупі, және де ену тереңдігінің шектелгені. |
| Құрылымы                 | Жоғары тығыздыққа қол жеткізу, бір чипте көп арналы датчиктерді орналастыру мүмкіндігінің болуы.                                                                                            | Жұқа қабыршақтарды дайындаудың күрделілігі, механикалық ақауларға сезімталдық қасиеті, материалдың таза болуына жоғары талаптардың қойылуы.                                               |
| Сезімталдық              | Жылу ағынының өзгерістеріне аса жоғары сезімталдыққа ие болуы.                                                                                                                              | Нақты мәндерді анықтау үшін сигналдарды күрделі электрондық өңдеуден өткізудің міндеттілігі.                                                                                              |
| Температуралар диапазоны | Жұмыс диапазонының шектеулі болуы (пайдаланылған материалға байланысты).                                                                                                                    | Материалдың кедергісінің көрсетілген температуралық диапазонда тұрақты әрі болжамды тәуелділік сипатына ие болуы міндетті.                                                                |

Жылу ағынының жұқа қабыршақты датчиктері микроэлектроника және микрожүйелердің өлшеу жүйелерінде, сондай-ақ, жоғары дәлдікті жылу алмасу жүйелерінде және әртүрлі материалдардағы жылу процестерін бақылауда кеңінен қолданыс табады.

Заманауи жылу ағыны датчиктері инновациялық материалдарды, микро-және нанотехнологияларды, жетілдірілген схемалық шешімдерді, сондай-ақ интеллектуалдық деректерді өңдеу алгоритмдерін қолдана отырып, дәстүрлі әдістердің эволюциясы мен интеграциясының нәтижесі болып табылады. Олардың жұмысы көп нүктелі температураны өлшеуге негізделген біріктірілген тәсілдерді, жоғары сезімталдығы мен төмен жылулық кедергісі бар жұқа қабыршақты құрылымдарға негізделген микротехнологияларды, дәлдікті арттыру үшін жылу ағынын жасанды түрде қоздыратын белсенді

жүйелерді және инфрақызыл термография сияқты жанаспайтын әдістерді қамтиды. Осы технологиялардың үйлесімі жылу ағыны датчиктерін ғылыми зерттеулер мен практикалық қолданыстар үшін өте тиімді құралға айналдырды. Заманауи датчиктер бірқатар артықшылықтары және кемшіліктерімен сипатталады (5-кесте).

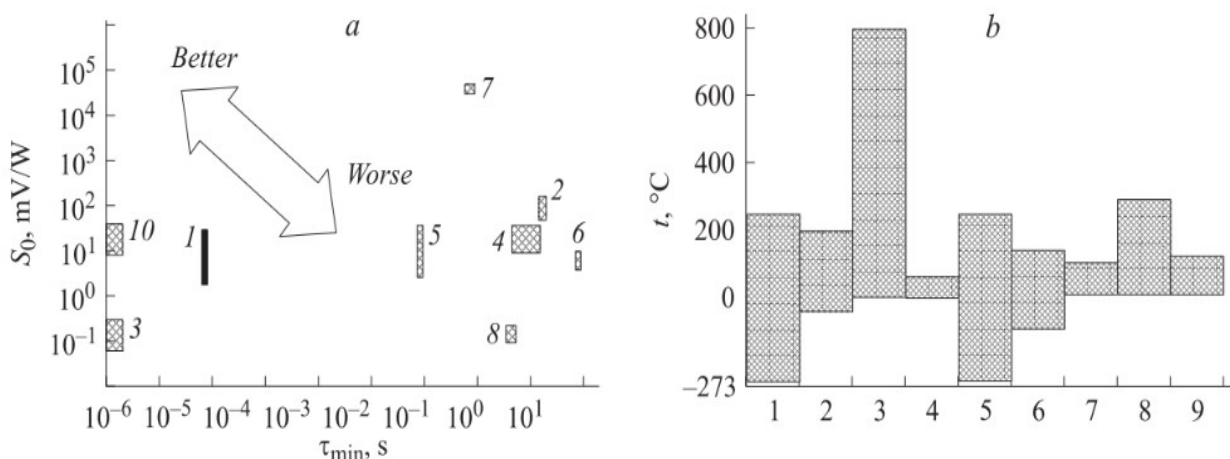
Кесте 5 - Заманауи датчиктердің артықшылықтары мен кемшіліктері

| Сипаттамасы              | Артықшылықтары                                                                                                                                                                                                                                      | Кемшіліктері                                                                                                                    |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Жұмыс істеу принципі     | Құрама және заманауи тәсілдерді қолдану нәтижесінде өлшеудің жоғары дәлдігі мен сезімталдығына қол жеткізуге болады, сонымен қатар, күрделі жағдайларда түйіспесіз өлшеу әдістерін қолданып, қашықтықтан жылу ағынын дәл анықтау мүмкіндігі де бар. | Өндірістік құнының жоғары болуы, калибрлеу үдерісінде қиындықтар болуы және әзірлеу технологиясының күрделілігімен сипатталады. |
| Құрылымы)                | Микроминиатюризациялау, өзге жүйелермен интеграциялануы, өлшеу дәлдігі мен сезімталдығын арттыруға мүмкіндік туғызады.                                                                                                                              | Құрылымның күрделілігі себебінен әзірлеу және тестілеу процесінде қиындықтардың туындауы.                                       |
| Сезімталдық              | Интеллектуалды алгоритмдер мен сигналды өңдеудің жетілдірілген әдістерін қолдану арқылы, жылу ағынының аз ғана өзгерістерінде жоғары сезімталдыққа қол жеткізуге болады.                                                                            | Нәтижелердің сыртқы жағдайлардың әсерінен тәуелді болуының мүмкіндігі.                                                          |
| Температуралар диапазоны | Температура мен жылу ағынын өлшеу диапазоны материалдардың және өлшегіштің типіне байланысты кең диапазонды қамтиды.                                                                                                                                | Қолданылатын материалдың ерекшеліктеріне байланысты кейбір диапазондарда шектеу болуы мүмкін.                                   |
| Бағасы                   | Күрделі материалдар мен технологиялардың қолданылуына орай, өндірістік құнының жоғары болуымен сипатталады.                                                                                                                                         | Құрылымдарының құнына байланысты тәуелділігі.                                                                                   |

Жылу ағынының әртүрлі қолдану салаларына арналған көптеген датчиктері жасалған. [69-76] жұмыстарында заманауи датчиктердің түрлері қарастырылып, артықшылықтар мен кемшіліктері көрсетілген. Мысалы, жоғары жылу ағыны мен температура жағдайында [77] жұмыс авторлары 1000°C дейінгі температурада және мыңдаған Вт/м<sup>2</sup> деңгейіндегі жылу ағынында сезімталдығын сақтай алатын төзімді датчиктер әзірледі. Жоғары температуралық калибрлеу жүйесінің прототипі Вирджиния технологиялық институтының NTHFS датчигін 900 °C дейінгі температурада сәтті сынақтан өткізді, бұл оның жоғары температура жағдайында жылу ағынын өлшеу дәлдігін арттырды.

Жылу ағыны датчиктерін өндіретін шетелдік компаниялардың ішінде «Vatell Corporation», «Captée Enterprise», «Hukseflux Thermal Sensors», «Wuntronic», «Oméga» және басқа да бірқатар компаниялар ерекшеленеді

[78-81]. Аталған өндірушілердің датчиктері беткі температураны бақылауға арналған кіріктірілген құрылғылармен, атап айтқанда, кедергі термометрімен немесе термоэлектрлік түрлендіргішпен жабдықталған. Сонымен қатар, кейбір модельдерде кіріктірілген шағын қыздырғыш бар, ол мерзімді өзін-өзі диагностика жүргізіп, градуирлеу сипаттамасын тексеруге мүмкіндік береді. 3-суретте жылу ағыны датчиктерінің сезімталдығы, жылдам әрекет етуі және жұмыс температурасының диапазоны бойынша салыстырмалы талдауы келтірілген.



Сурет 3 – Жылу ағынын түрлендіргіштердің сезімталдық пен жедел әрекет етуі (а) және жұмыс беттерінің температуралық диапазоны бойынша (б) сипаттамалары: 1 – СПбГПУ ЖАГД, 2 – Украинаның ҰҒА ТЖФИ датчигі, 3 – «Vatell», 4 – «Wuntronic», 5 – «Captec», 6 – «Hukseflux», 7 – Швейцарияның физикалық электроника зертханалары, 8 – «Newport», 9 – «TNO», 10 – «FORTECH HTS» [82]

Графиктерден көрініп тұрғандай, «FORTECH HTS» неміс компаниясының композиттік материалдардан жасалған жылу ағынының анизотропты датчигі ALTP (Atomic Layer Thermo Pile) ең жақсы көрсеткіштерге ие. Оның құрылымы 2 мм қалыңдықтағы негізге шашыратылған қалыңдығы 1 мкм болатын композиттік қабыршақтан тұрады. [83, 84] жұмыстарда шамамен 1 мкс тұрақты уақытқа ие ALTP датчигінің қасиеттері зерттелген және соққы түтігіндегі жылу ағынын өлшеу нәтижелері келтірілген. ALTP датчигін калибрлеу жүргізіліп, вольт-ваттық сезімталдығы анықталды, ол  $69 \text{ мкВ}/(\text{Вт} \cdot \text{см}^2)$  құрады.

«Vatell» фирмасының датчиктері – термиялық бүрку (шашырату) әдістері арқылы жасалатын, қалыңдығы 2 мкм болатын өте жұқа құрылым. Бұл датчиктер  $800^\circ\text{C}$ -қа дейінгі температураларда жоғары қарқынды жылу алмасу жағдайларындағы (ағын тығыздығы  $1 \text{ кВт/м-ден}$  жоғары) өлшеулерді жүргізуде қолданылады. Температуралық өлшемдерді жүргізуге арналған біріктірілген термोजұп құрылымның ерекшелігі болып табылады, мұндай датчиктердің тұрақты уақыты 10 мкс-ден төмен. Датчиктің мұндай төмен жылулық инерциясы оны жылуфизикалық және аэродинамикалық зерттеулердегі тұрақсыз жылу ағындарын өлшеуде қолдануға мүмкіндік

береді. Сонымен қатар, «Vatell» фирмасы арнайы электр өткізгіш бояуы бар төсенішке басып шығару арқылы жасалған датчиктерді ұсынады. Мұндай өлшеу құрылғылары температурасы төмен ( $150^{\circ}\text{C}$ -қа дейін) және әлсіз қарқынды ( $0,1 \text{ Вт/м}^2$  дейін) өлшеулерге арналған. Бұл датчиктердің қалыңдығының аздығы және элементар терможұптардың көп мөлшері ең негізгі айырмашылықтары болып табылады. Датчиктің өлшеу диапозондары: жылу ағыны тығыздығы  $50 \dots 10000 \text{ кВт/м}^2$ , жұмыс температурасы  $620 \dots 1070 \text{ K}$ , ал сумен салқындату датчиктерінде (TG-1000 TG-2000, TG-9000, TGH-2000)  $470 \dots 870 \text{ K}$ , вольт-ваттық сезімталдық  $10^5 \dots 1,5 \cdot 10^6 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$  (TG-1000, TG-2000, TG-9000, TGH-2000 -  $0,0033 \dots 0,2 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ ) (4-сурет).



HFM-6D/H, HFM-7E/H, HFM-7E/L,  
HFM-8E/L, HFM-8E/H

TG-1000,  
TGH-2000

TG-2000,

TG-9000,

Сурет 4 – «Vatell» өндірушісінің датчиктері [81]

«Captée» датчиктері иілгіш пластик қабаттарымен ламинатталып, металл фольгадан жасалған сезімтал элементке ие, тікбұрышты немесе дөңгелек пішінде болуы мүмкін. Бұл датчиктердің ерекшелігі, олардың әртүрлі өлшемдерде шығарылуы, сонымен қатар  $200^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі температураларда  $500 \text{ кВт/м}^2$ -қа дейінгі жылу ағынының тығыздығында өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беруі. «Captée» датчиктерінің бұл қасиеттері, оларды әртүрлі ғылыми және техникалық зерттеулерде тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

Hukseflux (Нидерланды) компаниясының жылу ағыны датчиктері әртүрлі қолдану салаларында сұранысқа ие ететін бірқатар ерекшеліктерімен танымал. Компания өз датчиктерінің метрологиялық сипаттамаларына үлкен мән береді, бұл олардың дәлдігін және сенімділігін қамтамасыз етеді. Hukseflux датчиктерінің ерекшеліктері мен метрологиялық сипаттамалары, оларды ғылыми зерттеулер мен техникалық қолданыстар үшін өте тиімді құралға айналдырады.

Hukseflux датчиктері жоғары өлшеу дәлдігімен, уақыт бойынша көрсеткіштердің тұрақтылығымен және төмен қателіктермен сипатталады. Өндіруші конструкциясы, өлшемдері, температуралық диапазоны және жұмыс жағдайлары бойынша ерекшеленетін датчиктердің кең спектрін

ұсынады. Сонымен қатар, Hukseflux датчиктері ыңғайлы интерфейстермен және цифрлық шығыстармен жабдықталған, бұл олардың әртүрлі бақылау және басқару жүйелеріне оңай интеграциялануына мүмкіндік береді (5-сурет). Датчиктің өлшеу диапазоны: HFP01, HFP01SC, HFP03 датчиктері үшін жылу ағыны тығыздығы -  $2 \text{ кВт/м}^2$ , жұмыс температурасы  $240\ldots 340 \text{ К}$ , вольт-ваттық сезімталдық  $50 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ , датчиктің қалыңдығы 5 мм. Осы қасиеттерінің арқасында Hukseflux датчиктері ғылыми зерттеулер мен техникалық қолданыстарда кең сұранысқа ие.



HFP01, HFP01SC, HFP03



SBG01

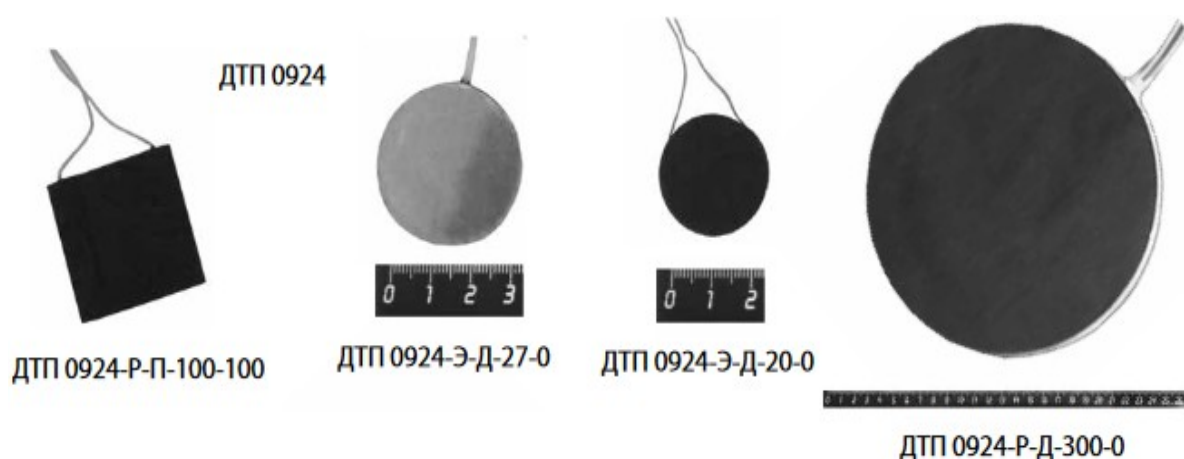


NF01, NF02

Сурет 5 – «Hukseflux» өндірушісінің датчиктері [79]

Ресей кәсіпорындары қоршау құрылыс құрылмалары арқылы жылу ағынының беткі тығыздығын анықтауға арналған бірнеше типті құрылғыларды өндіреді. Мұндай өлшеулер энергетикалық тексерулер кезінде қоршаушы конструкциялардың жылулық кедергісін анықтау үшін қажет. Бұл құрылғыларда қолданылатын жылу ағынының датчиктері әртүрлі конструкцияларға, өлшемдерге және техникалық сипаттамаларға ие.

[85-87] әдебиеттеріне сәйкес, өндірістегі датчиктердің ерекшеліктері, олардың әртүрлі қолданылу аяларына бейімделгенін көрсетеді. Мысалы, «Эталон» ОАҚ ҒӨК-сы екі типті датчиктерді әзірледі: жылу трассаларында зерттеулер жүргізу үшін резеңке негізіндегі иілгіш датчик және құрылыс конструкцияларын тексеру үшін диск тәрізді датчик (6-сурет). Иілгіш датчиктің резеңке негізі оның икемділігін қамтамасыз етеді, бұл оны күрделі геометриялы жерлерде қолдануға ыңғайлы етеді, ал диск тәрізді датчик құрылыс конструкцияларының бетіндегі өлшеулер үшін өте қолайлы. Датчиктің өлшеу диапазоны: жылу ағыны тығыздығы  $2000 \text{ Вт/м}^2$  дейін, жұмыс температурасы  $-30\ldots 50^\circ\text{C}$ , вольт-ваттық сезімталдық  $27 \text{ мкВ} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$ . Өлшеу қателігі — 10%.



Сурет 6 - ДТП 0924 датчиктері [65]

«Интерприбор» ҒӨК (Челябинск қ.) зерттелетін нысандардың бетіндегі жылу ағындарын бақылауға мүмкіндік беретін «Теплограф» құрылғысын өндіреді [64]. «Теплограф» құрылғысына ДТП-1Б датчигі орнатылады, оның жылу ағыны 1000 Вт/м<sup>2</sup>-ге дейін, беткі температурасы -60-тан 80 °С-қа дейін және өлшеу қателігі 6% құрайды. «Теплограф» құрылғысы мен ДТП-1Б датчигінің бұл сипаттамалары оларды әртүрлі ғылыми және техникалық зерттеулерде қолдануға ыңғайлы етеді.

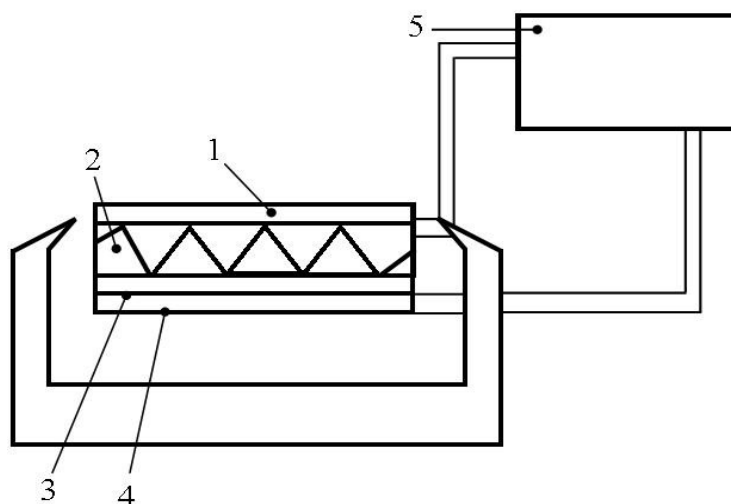
Мұндай ұқсас құрылғыларды Ресейдің басқа да кәсіпорындары өндіреді. Әдетте, оларда жылу ағынының датчигі ретінде 200°С-қа дейінгі температураларда өлшеулер жүргізуге және 2 кВт/м<sup>2</sup>-ге дейінгі жылу ағындарын тіркеуге мүмкіндік беретін ДТП 0924 қолданылады. Бұл датчиктер әртүрлі типті өлшемдерде жасалады, алайда олардың барлығына да жеткілікті үлкен жылулық инерция тән. Осы тектес құрылғылардың арасында ең кең тарағаны – ИТП-МГ4 «Поток» құрылғысы [88].

Нарықта ұсынылған жылу ағыны датчиктерінің көп түрлілігіне қарамастан, тікелей оттың әсерінен жұмыс істеу жағдайларына тек санаулы ғана жылу ағыны датчиктері сәйкес келеді, мысалы, International Thermal Instrument Corp және Vatel Corp компанияларының өнімдері. Аталған жылу ағыны датчиктерін қолдану олардың жоғары бағасы мен импортты алмастыру саясатымен шектеледі.

Жылу ағынын өлшеудің қолданыстағы әдістеріне жүргізілген талдау нәтижесінде, қарастырылған датчиктердің ешбірі қойылған зерттеу міндеттерін шешу үшін қажетті дәлдік, сезімталдық және ықшамдылық талаптарын толық қанағаттандырмайтыны анықталды. Термोजұптар жеткіліксіз сезімталдыққа ие болса, жұқа қабыршақты датчиктер жоғары құнымен және механикалық әсерлерге сезімталдығымен сипатталады. Ал жылу кедергісіне негізделген датчиктерді дайындау және калибрлеу процестері күрделі. Осыған байланысты зерттеу міндеттеріне толық жауап беретін жылу ағыны датчигін жасау қажеттілігі туындайды.

### 1.5 Жылу ағынын өлшеуіштердің конструкциялық түрлері

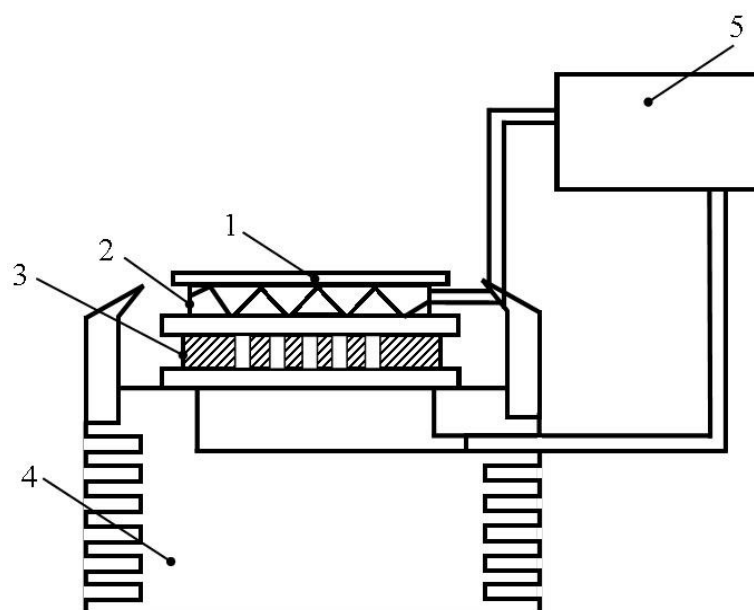
Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінің физика-техникалық факультетінің профессор Ж.С. Ақылбаев атындағы инженерлік жылуфизикасы кафедрасында жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған бірнеше құрылғы модификациялары әзірленді. Бұл алдын ала жүргізілген зерттеулер аталған саладағы тәжірибемізді растап қана қоймай, сонымен қатар осы диссертацияда ұсынылып отырған зерттеудің іргетасын қалады. Алғашқы әзірленген жылу ағынының тығыздығын өлшегішінің ерекшеліктерінің бірі – оның құрамында термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш пен қабылдағыш пластинадан басқа, термотәуелді және қыздырғыш элементтердің болуы [89]. Сондай-ақ термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш қыздырғыш элементпен біріктіріліп, оның «активті» түйіндері қабылдағыш пластинамен, ал «пассивті» түйіндері қыздырғыш элементпен жылу байланыста құрастырылған. 7-суретте жылу ағыны аспабының схемалық бейнесі көрсетілген.



Сурет 7 - Жылу ағыны аспабының схемалық бейнесі: 1 – қабылдағыш пластина; 2 – жылу ағынының термоэлектрлік батареялық қабылдағышы; 3 – қыздырғыш элемент; 4 – термотәуелді элемент; 5 – түрлендіргіш және сигналды өлшейтін электронды блок

Бұл аспаптың жұмыс істеу принципі келесідей, қабылдағыш пластина (1) термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің (2) «активті» түйіндерімен, ал қыздырғыш элемент (3) термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің (2) «пассивті» түйіндерімен жылулық байланыста болады. Термотәуелді элемент (4) қыздырғыш элементпен (3) жылулық байланыста болады, осылайша температуралық байланысты қамтамасыз етеді. Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштен (2) және термотәуелді элементтен (4) шығатын сигналдар электрондық блокқа беріледі, онда өлшеу және деректерді өңдеу жүргізіледі. Бұл өлшегіштің ерекшелігі — термоэлектрлік түрлендіргіштің жоғары сезімталдығын пайдалана отырып, дәл өлшеулерді қамтамасыз етеді.

Жылу ағынының тығыздығы датчигінің келесі модификациясында, қыздырғыш элементтің орнына термоэлектрлік салқындатқыш қолданылады. Оның «суық» түйіндері радиатормен, ал «ыстық» түйіндері жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргішімен тікелей жылулық байланыста болады (8-сурет). Жылу ағыны датчигінің жұмыс принципі термоэлектрлік тоңазытқыш арқылы жіберілетін электр тогының шамасын реттеуге негізделген. Токтың шамасы қабылдағыш пластинаның жылу оқшаулауында ақаулар жоқ аймақта зерттелетін объектімен байланыста болғанда термоэлектрлік түрлендіргіштің шығысындағы сигналды нөлге теңестіруге бағытталған. Сонымен, термоэлектрлік тоңазытқыштың термоэлектрлік түрлендіргіш бағытында тудыратын жылу ағыны реперлік мәнге ие. Жылу оқшаулауында ақаулар бар аймақтардағы жылу ағындары осы реперлік ағынмен салыстырылады [90-92].

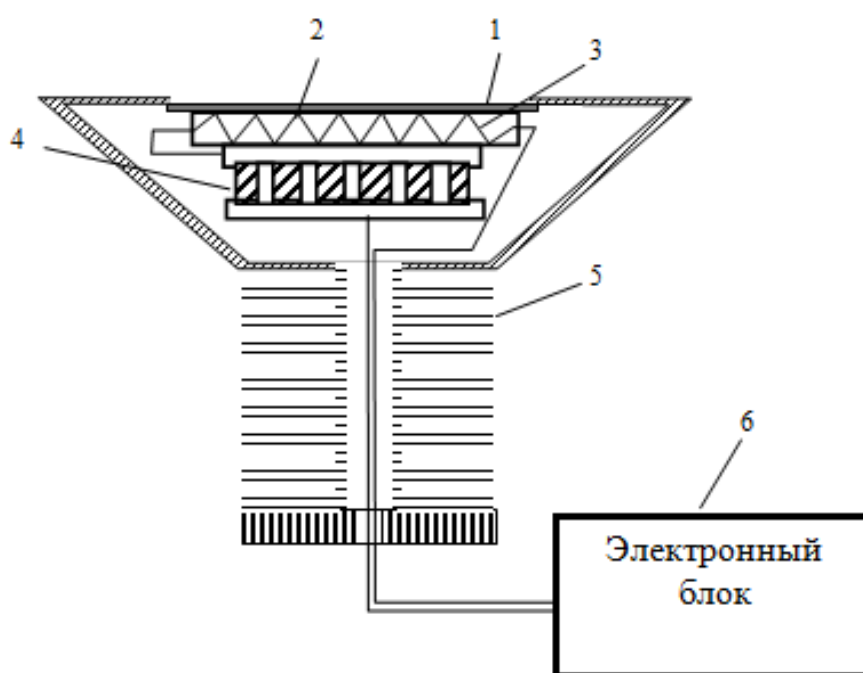


Сурет 8 - Жылу ағынының тығыздығы аспабының схемалық бейнесі: 1 – қабылдағыш пластина; 2 – жылу ағынының термоэлектрлік батареялық қабылдағышы; 3 – термоэлектрлік салқындатқыш; 4 – радиатор; 5 – түрлендіргіш және сигналды өлшейтін электронды блок

Жылу ағынын өлшеуге арналған бұл аспаптар екі арналы дифференциалды схема бойынша жұмыс істейді. Екі арналы схеманың жұмыс істеу барысында термоэлектрлік түрлендіргіш жылу трассасының жылу әсерінен тыс жердегі объект бетінен жылу берілуін бақылайды, бұл объект бетінің өзіндік жылу өрісін ескеруге мүмкіндік береді. Егер энергетикалық шығындардың мәні аномальды жоғары болса, бұл құбырдың жылу оқшаулауының толық немесе ішінара бұзылғанын немесе құбыр материалының механикалық зақымдалғанын білдіреді. Осылайша, ақаулардың пайда болған жерін дәл анықтап, жөндеу жұмыстарын тиімді жүргізуге мүмкіндік береді.

Аталған аспап аналогтарының негізгі кемшілігі, олардың өлшеу дәлдігінің төмендігі болып табылады, бұл қоршаған ортаның әртүрлі параметрлерінің және бір-бірінен 5 метрге дейін қашықтықта орналасқан жылу өлшеу блоктарының сигналдарына әсерінен туындайды. Сонымен қатар, аталған аспаптар екі оператормен жұмыс істеуді қажет етеді, яғни, екі блоктың бір-бірінен белгілі бір қашықтықта бір уақытта қолданылуы өлшеу қателіктерін тудыруы мүмкін.

Келесі модификация ИТП-1М жылу ағыны құрылғысы, ол қабылдағыш пластинаның функциясын атқаратын қыздырғыш элементтен 1, термобатареядан 2, жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінен 3, термоэлектрлік салқындатқыштан 4, радиатордан 5, электронды блоктан 6 тұрады (9-сурет) [93, 94].



Сурет 9 - ИТП-1М жылу ағыны құрылғысының схемалық бейнесі: 1 – қыздырғыш элемент; 2 – термобатарея; 3 – жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргіші; 4 – термоэлектрлік салқындатқыш; 5 – радиатор; 6 – электронды блок

Құрылғының қыздырғыш элементі 1 термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің 2 «активті» түйіндерімен, ал «пассивті» түйіндері термоэлектрлік салқындатқыштың 4 «активті» түйіндерімен жылулық байланыста болады. Термоэлектрлік салқындатқыштың «пассивті» түйіндері радиатормен 5 жылу байланысына түседі, сол мезетте термобатареяның 2 «активті» түйіндері қыздырғыш элемент пен жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргішінің 3 арасына, ал термобатареяның 2 «пассивті» түйіндері қоршаған орта температурасындағы құрылғы корпусымен тікелей жылулық байланыста болады. Шығыс сигнал термобатареядан 2, жылу ағынының

термоэлектрлік түрлендіргішінен 3, қыздырғыш элементтен 1 және термоэлектрлік салқындатқыштан 4 электрондық блокқа 6 беріледі.

Бұл модификацияда пайдалану ыңғайлылығы жағынан алға қадам жасалды, алайда құрылғы көрсеткіштерінің қоршаған орта параметрлеріне жоғары тәуелділігі байқалды, бұл нәтижелердің дәлдігіне теріс әсер етті.

Жоғарыда аталған жылу ағынын өлшеу аспаптардың артықшылықтарын ескеріп, кемшіліктерін жою мақсатында, термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш пен қыздырғыш элементті термоэлектрлік тоңазытқышқа орналастыратын жаңа конструкция әзірлеу мақсаты қойылды. Бұл екі жылу өлшеу блогының функцияларын біріктіруге және өлшеу дәлдігін едәуір арттыруға мүмкіндік берді.

## **2 ЖЫЛУ АҒЫНЫ ҚҰРЫЛҒЫЛАРЫНЫҢ ЖҰМЫС ІСТЕУІНІҢ ТЕОРИЯЛЫҚ НЕГІЗДЕРІ**

### **2.1 Сезімтал элементтердің температуралық өрісі**

Жылу ағынын өлшеуіш аспап әзірлеу және зерттеу сезімтал элементтің температуралық өрісін, яғни берілген шеттік шарттарда белгілі бір пішінді дене үшін жылуөткізгіштігінің дифференциалдық теңдеуін шешуді міндетті түрде қарастыруды талап етеді.

Қабылдағыштың сезімтал элементіне түсетін сәулелену ағыны кеңістік-уақыттық біртекті емес, бұл есептің шеттік шарттарында көрініс табуы керек. Сезімтал элементтің қоршаған ортамен, қабылдағыш корпусымен және т.б. жылу алмасуын ескеру қажет. Қабылдағыштың жұмыс принципі сезімтал элементке сәулеленудің әсерін электр тогының әсерімен алмастыру әдісіне негізделген. Әзірленген жылу ағынын өлшегіштің негізгі ерекшелігі болып табылатын калибрлеу орамасының болуы жылу өткізгіштігінің дифференциалдық теңдеуінде ескерілуі тиіс. Жалпы жағдайда сезімтал элемент көп қабатты болып табылады, бұл оның жылуфизикалық параметрлерінің координаталарға тәуелділігін білдіреді.

Денелерді сәулелік қыздыру есептерін орта температурасының тербелістерінің әсерін сипаттайтын есептермен ауыстыруға болады, яғни денелерді қоршаған орта температурасының тербелістерінің әсерінің дербес жағдайы ретінде қарастыруға болады. Сондықтан температурасы айнымалы ортаға орналастырылған белгілі бір пішінді дененің температуралық өрісін қарастыру қажеттілігі туындайды. Денедегі энергияның жұтылуы заттың белгілі бір қалыңдығында жүреді. Бұл денелерді сәулелік қыздырудың шекаралық есептерін денеде белгілі бір тәсілмен таралған ішкі жылу көздері бар есептермен ауыстыруға мүмкіндік береді.

[95] жұмысында екі беті де бірдей айнымалы жылу ағынымен қыздырылатын шексіз пластина үшін жылуөткізгіштігінің бір өлшемді дифференциалдық теңдеуінің шешімі қарастырылған. Шешуі Фурьенің косинус-түрлендіру арқылы жүргізілген. Пластина бетіндегі жылу ағыны координаталар мен уақыт функциясы ретінде берілген және жылуөткізгіштік теңдеуінде ішкі жылу көздерінің тығыздығы бар жұмыста да осы түрлендіру қолданылған. [96] жұмысында бір беті температурасы айнымалы ортамен жанасатын шектелмеген пластинаның стационарлы емес қызуы есебі қарастырылған. Бұл жағдайда орта температурасының келесі жағдайлары, яғни тұрақты, уақыттың экспоненциалдық функциясы, уақыттың сызықтық функциясы, уақыттың қарапайым гармоникалық функциясы үшін осы есептің шешімдері алынған. Экспоненциалды заң бойынша қыздырылатын ортаға орналастырылған және бірқалыпты таралған тұрақты ішкі көзі бар шектелмеген пластинаның стационарлы емес температуралық өрісі [97] жұмысында қарастырылған. Пластинаның импульстік қыздыруы [98, 99] жұмыстарында, жазық жылу толқындары теориясы арқалы көп қабатты

қабырғаның стационарлы емес температуралық өрісі [100] жұмысында және ең қарапайым пішінді денелердің [101, 102] жұмыстарында қарастырылған.

Егер сезімтал элементтің температуралық өрісін қарастырғанда бүйір бетіндегі жылу алмасуды елемеуге болмаса, онда ең көп таралған сезімтал элемент пішіндері ретінде шектеулі цилиндр немесе параллелепипед үшін шекаралық есепті шешу қажет.

Калибрлеу кезінде ішкі қыздыруы бар сезімтал элементтің көп қабаттылығы шеткілік әсер деп аталатын және сәулелік пен тоқтық қыздыру кезінде сезімтал элементтің қалыңдығы бойынша температура айырмашылығына байланысты пайда болатын қателік себептерінің бірі болып табылады. Алғаш рет бұл қателікті А.К. Ангстрем пиргелиометрлер үшін анықтаған. Сонымен қатар, жазық сезімтал элементті стационарлы қыздыру үшін шеткілік әсер қарастырылғанын атап өткен жөн [103, 104].

Жылу ағынын өлшегіштің сезімтал элементінің температуралық өрісін қарастыру сәулеленудің энергиялық параметрлерін өлшеудің жаңа әдістерін, оның ішінде қабылдағышты градуирлеу немесе калибрлеу және ізделіп отырған шамаларды есептеуге арналған жұмыс формулаларын алуға мүмкіндік береді. Жылу ағынын өлшегіштерді градуирлеу және калибрлеу әдістеріне толығырақ тоқталайық.

Өлшеу нәтижелерін сандық бағалау тек олар арналған зерттелетін объектілердің сәулеленуіне қабылдағыштың сезімталдығын анықтайтын параметрлері белгілі болғанда ғана мүмкін болады. Сезімталдықты анықтау салыстырмалы қабылдағыштарды градуирлеу кезінде жүргізіледі, онда қабылданған сәулелену мөлшері мен тіркеу аспабының көрсеткіші арасындағы байланыс орнатылады [105]. Әдетте градуирлеу нәтижесі олардың спектрлік сезімталдығын, шулар кернеуі мен шығыс сигналының өлшенетін шамаға тәуелділігін және т.б. анықтаудан тұрады.

Аспаптарды градуирлеу кезінде шығыс кернеуінің мәндерінен уақытқа, температураға және қоректендіруші кернеуіне функция болып табылатын сәулеленудің энергиялық параметрлерінің өлшенетін мәндеріне ауысу үшін түрлендіру коэффициенттері немесе түрлендіру көбейткіштері анықталады. Градуирлеу тәжірибе жүзінде жүргізіледі, өйткені түрлендіру коэффициенттерін есептеу арқылы анықтау тек шамамен алынған мәндерді береді. Градуирлеу қисықтарын тұрғызу жылу ағынын өлшегішке бағытталатын сәулелену ағынын, жылу көзінің температурасын өзгерту арқылы жүзеге асырылады.

Өлшем бірлігін жаңғырту және сақтау эталондардың көмегімен жүзеге асырылатыны белгілі. Сәулелену эталонын жасаудың екі жол бар: эталондық жылу көзін және эталондық қабылдағыш әзірлеу. Эталондық жылу көздері ретінде сәулелену ағынының температураға байланыстылығы қатаң сақталатын және сәулеленудің белгілі спектрлік таралуына ие абсолютті «қара дене» модельдері қолданылады. Абсолютті «қара дене» моделінің қуысының тесігінен белгілі бір қашықтықтағы сәулелену тығыздығы оның

температурасы, қуыс тесігінің ауданы және сәулелену қабілеттілігі нақты белгілі болса, анықталуы мүмкін [106].

Қазіргі кезде әртүрлі құрылымды абсолютті «қара дене» модельдері ажыратылады. Олардың ішінде сәулелену қабілеттілігі жоғары көп камералы абсолютті «қара дене» модельдері ерекше орын алады, өйткені олардың беті абсолютті «қара дене» заңдарына сай келетін және сәулелену коэффициенті 0,995 болатын көптеген жеке камералардан тұрады. Кейбір қабылдағыштарды градуирлеу үшін жартылай сфера пішінді «қара дене» қолданылады. Ұзынтолқынды сәулелену бойынша градуирлеу әдістері өте әртүрлі және көп жағдайда белгілі бір аспапқа немесе аспап түріне арналған. Барлық аспаптар үшін қысқатолқынды диапазон ұзындықтарында градуирлеу әдісі бір типті, өйткені сәулелену көзі ретінде әдетте Күн қолданылады.

Сәулелену қабылдағышы бойынша градуирлеу жылу көзі бойынша градуирлеуге қарағанда аз таралған, бұл сезімтал элементтің қаралану түрімен және қабылдағыштарды градуирлеу үшін қолданылатын сәулелену көздерінің қуатымен анықталатын қабылдағыштардың жұмыс істеуінің әр түрлі спектрлік аймағымен түсіндіріледі. Қабылдағыштардың спектрлік сипаттамаларының сан алуандылығы, олардың сәулеленуге жеке әрекетінен (сезімтал элементтің материалы мен құрылымына, оптикалық сүзгілердің болуына, сондай-ақ қарайту түріне тәуелділік) туындайды, бұл әмбебап градуирлеу әдісін жасауды қиындатады. Әртүрлі қабылдағыштар бірдей сәулелену ағынын әр түрлі қабылдайды, бұл әрбір қабылдағыштың спектрлік әрекетіне сәйкес келетін калибрлеу көзін таңдауды талап етеді. Бұл кең спектрлі аспаптар үшін тәжірибеде қиындық тудырады. Қажетті тұрақтылыққа, дәлдікке және динамикалық диапазонға ие әмбебап эталонды қабылдағыш жасаудың күрделілігі де оның жасалуын қиындатады.

Сәулеленудің энергетикалық параметрлерін абсолютті өлшеу кезіндегі ең нақты нәтижелер салыстырмалы калориметрия әдісіне негізделген жылу қабылдағыштар жасау жолымен алынды. Жылу қабылдағыштардың сезімтал элементтерінде жұтылған сәулелену қуаты арқылы түзілген жылу ағындары салыстырылады. Салыстырмалы калориметр әдісінің дербес жағдайы ретінде сәулеленудің сезімтал элементке әсерін электр тогының әсерімен ауыстыру әдісін атап өтуге болады. Алмастыру әдісінің басты артықшылығы – сәулеленудің энергетикалық параметрлерін өлшеу нәтижелері сезімтал элементтің жылуфизикалық сипаттамаларына және аспаптың басқа да құрылымдық бөлшектеріне тәуелді болмайды. Жылу импульсінің әсерінен калориметрлік жүктеменің максималды қызу температурасы бөлініп шыққан энергияға тура пропорционал екені белгілі.

Демек, сәулеленудің энергетикалық параметрлерін өлшеу үшін келесі пішінді сезімтал элементтері бар қабылдағыштарды пайдалануға болады: бір табаны қараланған және екіншісіне термосезімтал элементтер бекітілген шектеулі тұтас немесе қуыс цилиндр; дөңес беті қараланған, ал термосезімтал элементтер цилиндрдің бойындағы температура градиентін

бақылайтын жазық беті шектеулі тұтас цилиндрдің негіздерінің бірімен жылулық байланыста болатын жарты шар; ойыс беті қараланған және термосезімтал элементтер бекітілген жартылай сфера немесе шар тәрізді аймақ.

Жалпы жағдайда сезімтал элементтер көп қабатты болып келеді: қарамен жабындау, калориметрлік жүктеме, термосезімтал элементтер, кезектесіп орналасқан лакты және желімді аралық қабаттар орналасады. Сезімтал элементтер зерттелетін бетке бағытта да, параллель бағытта да біртекті емес. Бірінші жағдайда біртекті еместік сезімтал элементтің көп қабаттылығынан туындайды. Көп қабатты сезімтал элементтің ішіндегі температураны білу сәулелену және электр қыздыру кезінде жылу шығынының эквивалентті еместігінен туындайтын қателікті анықтау үшін қажет, өйткені сәулеленудің энергетикалық параметрлері сәулеленбейтін беттің температурасы бойынша тіркеледі. Сәулеленудің энергетикалық параметрлерін анықтау үшін жұмыс формулаларын алғанда көп қабатты сезімтал элементті сәулеленетін бетке перпендикуляр бағытта бір қабатты элементпен алмастыруға болады. Егер калориметрлік жүктеменің орамдары тығыз оралған болса және көрші орамдар арасындағы жылу кедергісі мен бір орамның жылу кедергісі бірдей реттілікте болса, онда сезімтал элементті сәулеленетін бетке параллель бағытта біртекті деп санауға болады.

Демек, бірінші жуықтауда аспаптың күрделі көп қабатты сезімтал элементінің моделін сәйкес пішінді біртекті сезімтал элементтің қарапайым моделімен алмастыруға болады. Бұл жеңілдету келесі шарттар орындалғанда ғана мүмкін: көп қабатты элементтің әрбір қабатының қалыңдығы сезімтал элементтің сипаттамалы өлшемінен айтарлықтай аз болуы керек; қабаттардың материалдарының термофизикалық қасиеттері (жылуөткізгіштігі, жылу сыйымдылығы) жақын болуы керек; әрбір қабат ішіндегі температура градиенті салыстырмалы түрде аз болуы керек. Бұл шарттар орындалған жағдайда жеңілдетуден туындаған қателік шектелген элементтер әдісі немесе оған ұқсас әдістер арқылы сандық түрде бағалануы мүмкін. Бұл жағдайда сәулеленудің энергетикалық параметрлерін анықтау үшін жұмыс формулаларын біртекті денедегі жылу тасымалдаудың жеңілдетілген моделін пайдаланып аналитикалық жолмен немесе көп қабатты құрылым үшін жылу өткізгіштік теңдеуін толық шешіп, содан кейін нәтижелерді жеңілдетілген модельмен салыстыру арқылы сандық жолмен алуға болады.

Созылыққы көздерден шығатын сәулеленудің энергетикалық параметрлерін өлшеудің кейбір әдістері жазық сезімтал элементі бар қабылдағыштарды пайдалануға негізделген. [106] жұмысында мұндай қабылдағыштың өлшеу қателігі 75%-ға дейін жетуі мүмкін екені көрсетілген. Қателікті азайту үшін сезімтал элементтің орналасу санын көбейту немесе сәулелену көзінің бұрыштық өлшемдерін азайту қажет.

А.А. Гершун [107] жарықты өткізетін ортада жұмыс істейтін, жарық шашырататын материалдан жасалған сфералық сезімтал элементі бар

қабылдағыш кеңістіктік сәулелену қарқындылығын тікелей өлшейтінің көрсетті. Яғни, сфералық сезімтал элементі бар қабылдағыш бір реттік өлшеу барысында кеңістіктік сәулелену қарқындылығы туралы ақпарат алуға мүмкіндік береді.

Сфералық сезімтал элементі бар қабылдағыштың жұмысы калориметриялық әрекет ету принципіне негізделуі мүмкін. Бұл жағдайда сфераның сәулеленуге ұшырайтын беті қара түске боялуы тиіс, ал оның температурасы термосезімтал элементтермен (мысалы, терможұптармен) бақылануы мүмкін. Қабылдағышты калибрлеу үшін сезімтал элементке сәулеленудің әсерін электр тогы тудыратын жылу ағынының әсерімен алмастыру әдісі қолданылуы мүмкін [108].

Денелік бұрышы  $4\pi$  болатын сфералық сезімтал элементті жасау қиын, өйткені қабылдағыштың корпусымен көлеңкеленуі әрдайым дерлік орын алады. Сондықтан әрқайсысының денелік бұрышы  $2\pi$  бір немесе екі жартылай сфералық сезімтал элементті пайдалану анағұрлым қолайлы деп есептеледі. Денелік бұрышы  $2\pi$ -ден аз сәулеленуді өлшеу үшін сезімтал элемент ретінде шар тәріздес пішініндегі элементті қолдануға болады.

Демек, созылған көздердің сәулеленуінің энергетикалық параметрлерін өлшеу үшін сезімтал элементтері келесі пішінде болатын қабылдағыштарды пайдалануға болады: шектелген тұтас немесе қуыс цилиндр пішінді, оның бір табаны қарамен боялып, ал екіншісіне термосезімтал элементтер орналастырылады; жартылай шар пішінді, оның дөңес беті қарамен боялып, ал жазық беті жылулық байланыста болатын шектелген тұтас цилиндрдің бір табанымен байланысқан, термосезімтал элементтер цилиндр бойындағы температура градиентін бақылайды; жартылай сфера немесе шар тәріздес пішінді, оның ойыс беті қарамен боялып, ал ойыс бетіне термосезімтал элементтер орналастырылады, жартылай сфера немесе шар тәріздес пішінді, оның ойыс беті қарамен боялып, ал дөңес бетіне термосезімтал элементтер орналастырылады.

Жалпы жағдайда сезімтал элементтер көпқабатты, яғни қара жабын, калориметриялық жүктеме, термосезімтал элементтер, бірінің артынан бірі орналасқан лак және желім қабаттарынан тұрады. Демек, сезімтал элементтер біртекті емес, сәулеленетін бетке перпендикуляр бағытта да, параллель бағытта да әртүрлі қасиеттерге ие. Бірінші жағдайдағы біртекті еместігі сезімтал элементтің көпқабаттылығымен түсіндіріледі. Көпқабатты сезімтал элемент ішіндегі температураны білу сәулелік және электрлік қыздыру кезіндегі жылулық шығындардың эквивалентсіздігімен байланысты өлшеу қателігін анықтауда қажет. Себебі, сәулеленудің энергетикалық параметрлерін тіркеу сәулеленбейтін беттің температурасы бойынша жүргізілетіндіктен, энергетикалық параметрлерін есептеуге арналған жұмыс формулаларын алу барысында көпқабатты сезгіш элементті сәулеленетін бетке перпендикуляр бағытта бірқабатты сезгіш элементпен алмастыруға болады.

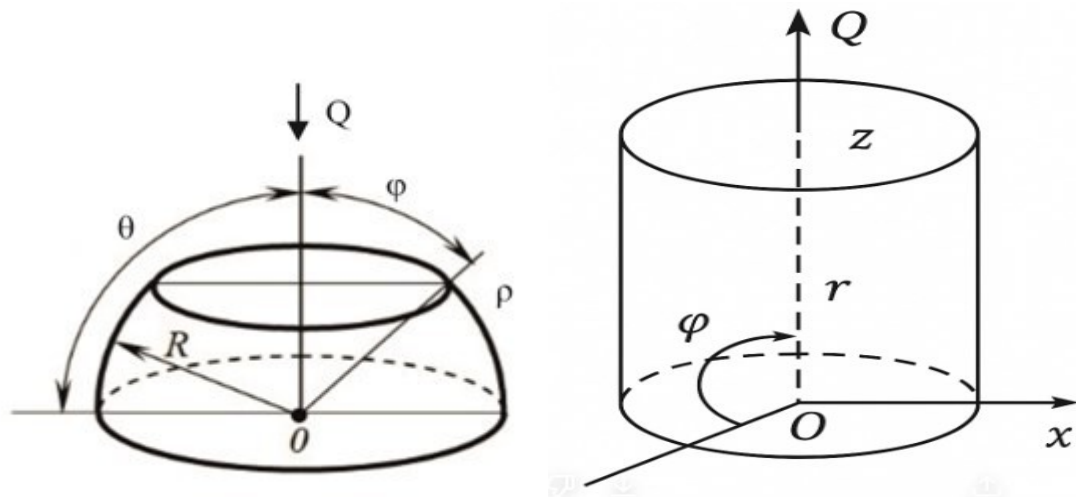
## 2.2 Жартылай сфералық сезімтал элементі бар датчиктегі жылу процестерін математикалық модельдеу және талдау

Сезімтал элементтің моделінің дербес жағдайы ретінде «жартылай сфера–цилиндр» жүйесін қарастырамыз [109]. «Жартылай сфера–цилиндр» құрылымын қолдану оның жылу ағыны датчиктерінде, мысалы, метеорологияда, энергетикада және өнеркәсіпте радиациялық және конвективтік жылу алмасуды өлшеуге арналған датчиктерде қолданылуымен негізделген. Жартылай сфера тәрізді пішін датчикке жылу ағынын кең көру бұрышынан қабылдауға мүмкіндік береді, ал цилиндр механикалық беріктікті және тұрақты жылу әкетуді қамтамасыз етеді. Жартылай сфераның жазық беті шектеулі тұтас цилиндрдің табандарының бірімен жылулық байланысқа ие. Мұндай жартылай сфера мен цилиндрдің үйлесімі әртүрлі бағыттардан келетін жылу ағындарын тиімді тіркеуге мүмкіндік береді. Сыртқы жылу ағынын ( $\eta E + Q$ ) қабылдайтын жартылай сфера өзінің геометриялық пішініне байланысты шағын көлемде үлкен бет ауданына ие бола отырып, сәулелену мен конвекцияға жоғары сезімталдықты қамтамасыз етеді. Сонымен қатар, цилиндрлік бөлігі табан арқылы ( $z = \ell$ ) тұрақты жылу әкетуді жүзеге асырады, бұл жартылай сфераның шыңы мен цилиндрдің табаны арасындағы температура айырмасын тудырады — бұл жылу ағынын өлшеу үшін негізгі параметр болып табылады.

Жартылай сфера сыртқы жылу ағынын  $q(\varphi, \mu, t) = \eta E(\varphi, \mu, t)$  жылу ағынының тығыздығымен сәулелену (мұндағы  $\eta$  — қарайтылған сфералық беттің жұтылу коэффициенті) және датчикті калибрлеуге жылу ағынының тығыздығы  $Q(\varphi, \mu, t)$  электр тогы арқылы қабылдайды. Бұл модельде жалпы жылу ағыны тұрақты және жартылай сфераның сфералық бетіне ( $r = R$ ) әсер етеді деп болжаймыз. Цилиндр механикалық тұрақтылықты қамтамасыз етіп, төсеме рөлін атқарады, сонымен қатар ол жылу әкету қызметін орындайды — жартылай сферадан жылуды қоршаған ортаға немесе термоэлектрлік батареяның суық түйініне жеткізеді. Бұл процесс электрлік сигналды тудыру үшін қажетті температура айырымын  $\Delta T$  береді. Цилиндрде ішкі жылу көздері болмайды. Жартылай сфера-цилиндр арасындағы шекарадағы ( $z = 0$ ) түйіспелік жылулық кедергі нөлге тең деп есептеледі, бұл температураның ( $T_2(r, \varphi, 0, t) = T_1(r, \varphi, 0, t)$ ) және жылу ағынының ( $\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial \mu} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}$ ) үздіксіздігін қамтамасыз етеді. Температуралық өріс жартылай сферада  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  функциясымен және цилиндрде  $T_1(r, \varphi, z, t)$  функциясымен сипатталады (10-сурет). Сыртқы жылу ағынының әсерінен датчиктің қыздыру динамикасын бағалау үшін уақытқа қатысты температура айырымын есептейміз.

Есептеулер жүргізу үшін келесі белгілеулерді енгізейік:  $Q(\varphi, \mu, t)$  — электрлік қыздырудан туындайтын жылу ағынының тығыздығы;  $q(\varphi, \mu, t)$  — жұтылған сәулеленуден туындайтын жылу ағынының тығыздығы;  $E(\varphi, \mu, t)$  — түскен сәулелену қарқындылығы;  $T_1(r, \varphi, z, t)$  — ( $0 \leq r \leq R$ ;  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ;  $0 \leq z \leq \ell$ ;  $t \geq 0$ ) айнымалылардың өзгеру облысына ие

цилиндрдегі температураның таралуын сипаттайтын функция ( $r$  (радиус),  $\varphi$  (азимуттық бұрыш),  $z$  (биіктік) және  $t$  (уақыт) координаталары);  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  – ( $0 \leq r \leq R$ ;  $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ;  $0 \leq \mu \leq \pi/2$ ;  $t \geq 0$ ) айнымалылардың өзгеру облысына ие жартылай сферадағы температураның таралуын сипаттайтын функция, мұндағы  $\mu = \cos \theta$  ( $r$  (радиус),  $\varphi$  (азимуттық бұрыш),  $\theta$  (полярлық бұрыш) және  $t$  (уақыт) координаталары);  $T_c$  - қоршаған ортаның температура;  $\alpha_{1R}, \alpha_{2R}, \alpha_\ell$  - жылу алмасу коэффициенттері.



10-сурет. Жартылай сфера және цилиндр схемасы

Бұл айнымалы теңдеулерде жылу өткізгіштік пен шекаралық шарттар келесі түрге ие болады.

Цилиндр үшін цилиндрлік координаталар жүйесіндегі стандартты жылу өткізгіштік теңдеуі:

$$\frac{1}{a_1} \frac{\partial T_1(r, \varphi, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_1(r, \varphi, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T_1(r, \varphi, z, t)}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T_1(r, \varphi, z, t)}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

мұндағы  $a_1 = \frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1}$  - температура өткізгіштік коэффициент (термиялық диффузия коэффициенті) ( $\lambda_1$  - жылу өткізгіштік,  $\rho_1$  - тығыздық,  $c_1$  - меншікті жылусыйымдылық),  $r$  - радиалдық координата (цилиндрдің осінен қашықтық),  $\varphi$  - азимуттық бұрыш,  $z$  - цилиндр осінің бойындағы координата,  $t$  - уақыт.

Бастапқы шарт (бастапқы уақыт мезетіндегі температураның біртекті таралуы):

$$T_1(r, \varphi, z, 0) = T_c \quad (2.2)$$

$r=R$  шекаралық шарты:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(R, \varphi, z, t)}{\partial r} = -\alpha_{1R} [T_1(R, \varphi, z, t) - T_c] \quad (2.4)$$

$z=l$  шекаралық шарты:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, \varphi, l, t)}{\partial z} = -\alpha_l [T_1(r, \varphi, l, t) - T_c] \quad (2.3)$$

Жартылай сфера үшін:

$$\frac{1}{a_2} \frac{\partial T_2(r, \varphi, \mu, t)}{\partial t} = \frac{1}{\rho^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ r^2 \frac{\partial T_2(r, \varphi, \mu, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial \mu} [(1 - \mu^2) \frac{\partial T_2(r, \varphi, \mu, t)}{\partial \mu}] + \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{\partial^2 T_2(r, \varphi, \mu, t)}{\partial \varphi^2} \right\} \quad (2.5)$$

мұндағы  $a_2 = \frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2}$  - температура өткізгіштік коэффициент (термиялық диффузия коэффициенті) ( $\lambda_2$  - жылу өткізгіштік,  $\rho_2$  - тығыздық,  $c_2$  - меншікті жылусыйымдылық),  $r$  - радиалдық координата (сфераның осінен қашықтық),  $\varphi$  – азимуттық бұрыш,  $\mu = \cos \theta$  –  $\theta$  полярлық бұрышы үшін ауыстырылған айнымалы (теңдеуді ықшамдау үшін),  $t$  - уақыт.

Бұл теңдеуде жартылай сфераның сфералық геометриясы ескеріліп, жылу бөлінуі тек бетінде шоғырланғанын көрсетеді.

Бастапқы шарт:

$$T_2(r, \varphi, \mu, 0) = T_c \quad (2.6)$$

Сфералық беттегі шекаралық шарт ( $r = R$ ):

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(R, \varphi, \mu, t)}{\partial r} = \alpha_{2R} [T_2(R, \varphi, \mu, t) - T_c] + \eta E(\varphi, \mu, t) + Q(\varphi, \mu, t) \quad (2.7)$$

Жартылай сфера-цилиндр шекарасындағы шекаралық шарт ( $\mu = 0$ ,  $\theta = \frac{\pi}{2}$ ):

Температураның үзіліссіздігі:

$$T_2(r, \varphi, 0, t) = T_1(r, \varphi, 0, t), \quad r = r \quad (2.8)$$

Жылу ағынының үзіліссіздігі:

$$-\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, \varphi, 0, t)}{\partial r} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, \varphi, 0, t)}{\partial z}, \quad r = r \quad (2.9)$$

Теңдеулерді шешу үшін Бессель функциялары мен Лежандр көпмүшеліктерін пайдалану арқылы интегралдық түрлендірулер қолданылды.

Цилиндр үшін  $T_1(r, \varphi, z, t)$  функциясына интегралдық түрлендіру қолданамыз:

$$U_1 = \int_0^{2\pi} \int_0^\ell \int_0^R T_1(r, \varphi, z, t) \cos \vartheta(\varphi' - \varphi) \cdot \cos b_n \frac{z}{\ell} J_\vartheta(\eta_k \frac{r}{R}) r dr dz d\varphi \quad (2.10)$$

кері айналдыру формуласы:

$$T_1(r, \varphi, z, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{\vartheta=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{A_n B_k U_{1,nk}(t)}{N_\vartheta} \cos \vartheta(\varphi' - \varphi) \cos b_n \frac{z}{\ell} J_\vartheta(\eta_k \frac{r}{R}) \quad (2.11)$$

мұндағы  $\vartheta = 0$  болғанда  $N_\vartheta = 2\pi$ ,  $\vartheta \geq 1$  болғанда  $N_\vartheta = \pi$ .

$A_n, B_k$  нормалау көбейткіштері

$$\frac{1}{A_n B_k} = \frac{\ell R^2}{4b_n \eta_k^2} (b_n + \sin b_n \cos b_n) \left[ \frac{\alpha_{1R}^2 R^2}{\lambda_1^2} + (\eta_k^2 - \vartheta^2) \right] J_\vartheta^2(\eta_k) \quad (2.12)$$

Жартылай сфера үшін  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  функциясына интегралдық түрлендіру қолданамыз:

$$U_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^R T_2(r, \varphi, \mu, t) \cos \vartheta(\varphi' - \varphi) P_m^p(\mu) (1 - \mu^2)^{p/2} J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r}{R}) r^2 dr d\mu d\varphi' \quad (2.13)$$

кері айналдыру формуласы:

$$T_2(r, \varphi, \mu, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{m=p}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} c_{ms} U_{2,ms}(t) \cos \vartheta(\varphi - \varphi_0) P_m^p(\mu) (1 - \mu^2)^{p/2} J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r}{R}) \quad (2.14)$$

мұндағы нормалау көбейткіші

$$\frac{1}{c_m D_s} = \int_0^1 [P_m^p(\mu)]^2 d\mu \int_0^R [J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r}{R})]^2 dr \quad (2.15)$$

$\eta_k, b_n, m$  және  $\omega_s$  меншікті шамалары сәйкесінше келесі теңдеулерден анықталады:

$$\eta_k J_\vartheta'(\eta_k) + R \frac{\alpha_{1R}}{\lambda_1} J_\vartheta(\eta_k) = 0 \quad (2.16)$$

$$\ell \frac{\alpha_\ell}{\lambda_1} \operatorname{ctg} b_n = b_n \quad (2.17)$$

$$\omega_s J'_{m+1/2}(\omega_s) + \left(\frac{\alpha_{2R}}{\lambda_2} R - \frac{1}{2}\right) J_{m+1/2}(\omega_s) = 0 \quad (2.18)$$

$T_1$  үшін есептеу:

$$\begin{aligned} T_1(r, \varphi, z, t) = & \frac{1}{\pi} \sum_{\vartheta=0}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \{A_n B_k [\exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t) \times \\ & \times \int_0^{2\pi} \int_0^{\ell} \int_0^R \cos \vartheta(\varphi' - \varphi) \cos b_n \frac{z'}{\ell} r' J_{\vartheta}(\eta_k \frac{r'}{R}) d\varphi' dz' dr' + \\ & + \frac{a_1}{\lambda_1} \int_0^t c_1(\tau) \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})(t - \tau)) d\tau] \} J_{\vartheta}(\eta_k \frac{r}{R}) \cos b_n \frac{z}{\ell} \end{aligned} \quad (2.19)$$

мұндағы

$$\boxed{\text{[Blank Box]}} \quad (2.20)$$

Уақыттық интеграл

$$\int_0^t c_1(\tau) \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})(t - \tau)) d\tau \quad (2.21)$$

Егер  $c_1(t) = \text{const}$  болса,

$$\int_0^t c_1(\tau) \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})(t - \tau)) d\tau = c_1 \cdot \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \quad (2.22)$$

$$c_1(t) = T_c \cdot \begin{cases} 2\pi \left[ R\alpha_{1R} J_0(\eta_k) \frac{\ell}{b_n} \sin b_n + \alpha_{\ell} \cos b_n \frac{R^2}{\eta_k} J_{\vartheta+1}(\eta_k) \right], \vartheta = 0 \\ \pi \cos \vartheta \varphi \left[ R\alpha_{1R} J_{\vartheta}(\eta_k) \frac{\ell}{b_n} \sin b_n + \alpha_{\ell} \cos b_n \frac{R^2}{\eta_k} J_{\vartheta+1}(\eta_k) \right], \vartheta \geq 1 \end{cases} \quad (2.23)$$

$T_2$  үшін есептеу:

$$\begin{aligned}
T_2(r, \varphi, \mu, t) = & \frac{1}{\pi} \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{m=p}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \{C_m D_s [\exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t) \times \\
& \times \int_0^{2\pi} \int_0^1 \int_0^R T_c \cos p(\varphi' - \varphi) P_m^p(\mu') \rho'^2 J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r'}{R}) d\varphi' d\mu' dr' + \\
& + \frac{a_2}{\lambda_2} \int_0^t c_2(\tau) \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} (t - \tau)) d\tau] \} P_m^p(\mu) J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r}{R})
\end{aligned} \quad (2.24)$$

мұндағы

$$c_2(t) = R^{3/2} \int_0^1 \int_0^{2\pi} [a_{2R} T_c + \eta E(\varphi', \mu, t) + Q(\varphi', \mu, t)] \cos p(\varphi' - \varphi) P_m^p(\mu) d\varphi' d\mu \quad (2.25)$$

Егер  $c_2(t) = \text{const}$  болса,

$$\int_0^t c_2(\tau) \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} (t - \tau)) d\tau = c_2 \frac{1 - \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t)}{a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2}} \quad (2.26)$$

$$c_2(t) = R^{3/2} \cdot \begin{cases} 2\pi \int_0^1 [a_{2R} T_c + \eta E(\varphi', \mu, t) + Q(\varphi', \mu, t)] P_m^0(\mu) d\mu, p=0 \\ \pi \cos p\varphi \int_0^1 [a_{2R} T_c + \eta E(\varphi', \mu, t) + Q(\varphi', \mu, t)] P_m^p(\mu) d\mu, p \geq 1 \end{cases} \quad (2.27)$$

Жартылай сферамен цилиндр арасындағы температуралардың айырымын  $\Delta T(t)$  есептеу үшін жартылай сферадағы  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  және цилиндрдегі  $T_1(r, \varphi, z, t)$  температура өрістері үшін ұсынылған шешімді пайдаланамыз. Температура айырымы  $\Delta T(t) = T_2(r, \varphi, \mu, t) - T_1(r, \varphi, z, t)$  арқылы анықталады. Мұндағы  $T_2(r=R, \mu=1, \varphi, t)$  - жартылай сфераның шыңының температурасы ( $\mu = \cos \theta = 1$  яғни  $\theta = 0$ ),  $T_1(r, \varphi, z=l, t)$  - цилиндрдің табанындағы температура.

(2.24) теңдеуіне  $r=R, \mu=1$  қоямыз

$$\begin{aligned}
T_2(R, \varphi, \mu=1, t) = & \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{s=1}^{\infty} \{c_m D_s [\exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t) \times I_2 + \\
& + \frac{a_2}{\lambda_2} \int_0^t c_2(\tau) \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} (t - \tau)) d\tau] \} P_m^0(1) R^{-1/2} J_{m+1/2}(\omega_s)
\end{aligned} \quad (2.28)$$

мұндағы  $P_m^0(1) = P_m(1) = 1$ ,  $I_2$  - бастапқы интеграл.

$$I_2 = \int_0^{2\pi} \int_0^R \int_0^1 \Gamma_c \cos p(\varphi' - \varphi) P_m^p(\mu') r'^2 J_{m+1/2}(\omega_s \frac{r'}{R}) d\varphi' dr' d\mu' \quad (2.29)$$

Өрнекті ықшамдайық:

$$\text{азимуттық бөлік: } \int_0^{2\pi} \cos p(\varphi' - \varphi) d\varphi' = \begin{cases} 2\pi, p=0 \\ 0, p \geq 1 \end{cases};$$

$$\text{бұрыштық бөлік ( } p=0 \text{ үшін): } \int_0^1 P_m^0(\mu') d\mu' = \int_0^1 P_m(\mu') d\mu' = \begin{cases} 2, m=0 \\ 0, m \geq 1 \end{cases};$$

$$\text{радиалдық бөлік ( } m=0 \text{ үшін): } J_{1/2}(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi x}} \sin x$$

$$J_{1/2}(\omega_s \frac{r'}{R}) = \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s r'}} \sin(\omega_s \frac{r'}{R})$$

$$r'^2 J_{1/2}(\omega_s \frac{r'}{R}) = r'^2 \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s r'}} \sin(\omega_s \frac{r'}{R})$$

$$\int_0^R r'^2 J_{1/2}(\omega_s \frac{r'}{R}) dr' = \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s}} \int_0^R r'^{3/2} \sin(\omega_s \frac{r'}{R}) dr'$$

$$u = \frac{r'}{R}, r' = Ru, dr' = Rdu \text{ деп алмастырсақ, онда}$$

$$\int_0^R r'^{3/2} \sin(\omega_s \frac{r'}{R}) dr' = R^{5/2} \int_0^1 u^{3/2} \sin(\omega_s u) du.$$

$$\int_0^1 u^{3/2} \sin(\omega_s u) du \text{ интегралы } I(\omega_s) \text{ деп белгіленген, сонда}$$

$$I_2 = 4\pi T_c R^3 \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s}} I(\omega_s), \quad m=0; I_2=0; m \geq 1. \quad (2.30)$$

Цилиндрдегі  $T_1(r, \varphi, z = \ell, t)$  температурасы үшін, (2.19) өрнегіне  $z = \ell$  қоямыз:  $\cos b_n \frac{z}{\ell} = \cos b_n$

Бастапқы интегралды  $I_1$  деп өрнектейміз:

$$I_1 = T_c \int_0^{2\pi} \cos \vartheta(\varphi' - \varphi) d\varphi' \int_0^\ell \cos b_n \frac{z'}{\ell} dz' \int_0^R r' J_\vartheta(\eta_k \frac{r'}{R}) dr' \quad (2.31)$$

Өрнекті ықшамдайық:

азимуттық бөлік:  $\int_0^{2\pi} \cos \vartheta (\varphi' - \varphi) d\varphi' = \begin{cases} 2\pi, \vartheta = 0 \\ 0, \vartheta \geq 1 \end{cases};$

бұрыштық бөлік:  $\int_0^\ell \cos b_n \frac{z'}{\ell} dz' = \ell \int_0^1 \cos(b_n u) du = \ell \frac{\sin b_n}{b_n};$

радиалдық бөлік ( $\vartheta = 0$  үшін):  $\int_0^R J_0(\eta_k \frac{r'}{R}) dr' = R^2 \int_0^1 J_0(\eta_k u) du = R^2 \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k}.$

Сонда

$$I_1 = 2\pi T_c \cdot \ell \frac{\sin b_n}{b_n} \cdot R^2 \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k}, \vartheta = 0; I_1 = 0, \vartheta \geq 1. \quad (2.32)$$

Температура айырымы  $\Delta T$ :

$$\Delta T(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \{c_0 D_s \left[ 4\pi T_c R^3 \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s R}} I(\omega_s) \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t) + \frac{a_2}{\lambda_2} \cdot c_2 \frac{1 - \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t)}{a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2}} \right] J_{1/2}(\omega_s) -$$

$$- \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2}) t)}{a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot J_0(\eta_k \frac{r}{R}) \cos b_n \quad (2.33)$$

### 2.3 Датчиктің жылу процестерін модельдеудің сандық сипаттамалары мен нәтижелері

(2.33) өрнектің екінші қосылғышы ( $T_1$ )  $r$ -ге тәуелді, ал бұл  $\Delta T$ -ны радиус функциясына айналдырады. Бұл практикалық қолдану үшін әрдайым ыңғайлы емес, себебі жылу ағынының датчигі әдетте температуралар айырмасымен байланысты орташа сигнал береді. Сондықтан  $T_1$ -ді  $r$  бойынша (цилиндр табанының ауданы бойынша) орташалау бұл тәуелділікті жояды және бірыңғай  $\Delta T(t)$  мәнін береді.

Цилиндр табанындағы температура ( $z=\ell$ ):

$$T_1(r, \varphi, z = \ell, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2}) t)}{a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot J_0(\eta_k \frac{r}{R}) \cos b_n, \vartheta = 0 \quad (2.34)$$

Цилиндр табанының ауданы бойынша орташалаймыз ( $0 \leq r \leq R, 0 \leq \varphi \leq 2\pi$ ):

$$\langle T_1(r, \varphi, z = \ell, t) \rangle = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^R T_1(r, \varphi, \ell, t) r dr d\varphi \quad (2.35)$$

$\vartheta = 0$  үшін  $T_1$   $\varphi$ -ге тәуелсіз болғандықтан,  $\varphi$  бойынша интеграл:

$$\int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi$$

Радиалдық бөлік:

$$\langle T_1(z = \ell, t) \rangle = \frac{2\pi}{\pi R^2} \int_0^R T_1(r, \ell, t) r dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R T_1(r, \ell, t) r dr$$

$T_1$ -ді қоямыз:

$$T_1(r, \ell, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot J_0(\eta_k \frac{r}{R}) \cos b_n$$

Онда

$$\langle T_1(z = \ell, t) \rangle = \frac{2}{R^2} \int_0^R \left[ \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot J_0(\eta_k \frac{r}{R}) \cos b_n \right] r dr$$

Қосу мен интегралдаудың ретін ауыстырамыз:

$$\langle T_1(z = \ell, t) \rangle = \frac{2}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot \int_0^R J_0(\eta_k \frac{r}{R}) r dr$$

Интегралды есептейміз:

$$\int_0^R J_0(\eta_k \frac{r}{R}) r dr$$

$u = \frac{r}{R}, r = Ru, dr = Rdu$  алмастырсақ,

$$\int_0^R J_0(\eta_k \frac{r}{R}) r dr = \int_0^1 J_0(\eta_k u) (Ru) R du = R^2 \int_0^1 u J_0(\eta_k u) du$$

$$\int_0^1 u J_0(\eta_k u) du = \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k}$$

Онда

$$\int_0^R J_0(\eta_k \frac{r}{R}) r dr = R^2 \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k}$$

$\langle T_1 \rangle$  үшін қорытынды өрнек:

$$\begin{aligned} \langle T_1(z = \ell, t) \rangle &= \frac{2}{\pi R^2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot R^2 \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k} = \\ &= \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})t)}{a_1(\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k} \end{aligned} \quad (2.36)$$

Орташа алынған  $\Delta T(t)$  келесідей өрнектеледі:

$$\Delta T(t) = T_2(r, \varphi, \mu = 1, t) - \langle T_1(z = \ell, t) \rangle$$

$$\Delta T(t) = \frac{1}{\pi} \sum_{s=1}^{\infty} \{c_0 D_s \left[ 4\pi T_c R^3 \sqrt{\frac{2R}{\pi \omega_s R}} I(\omega_s) \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t) + \frac{a_2}{\lambda_2} \cdot c_2 \cdot \frac{1 - \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t)}{a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2}} \right] J_{1/2}(\omega_s) -$$

$$- \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n B_k \left[ T_c + \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2}) t)}{a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k} \right]$$
(2.37)

$\omega_s$  үшін мәнді келесі түрде ықшамдауға болады:

$$\omega_s \cos \omega_s + \left( \frac{\alpha_{2R}}{\lambda_2} R - 1 \right) \sin \omega_s = 0. \quad (2.38)$$

Қатарлар арқылы өрнектесек келесі түрде жазуға болады

$$\Delta T(t) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{c_0 D_s}{\pi} \left[ T_c + \frac{a_2}{\lambda_2} \cdot c_2 \cdot \frac{1 - \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t)}{a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2}} \right] J_{1/2}(\omega_s) -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2A_n B_k}{\pi} \cdot \left[ T_c + \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2}) t)}{a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k} \right]$$
(2.39)

Қыздыру жағдайы үшін ( $T_c$  шегеріледі), онда

$$\Delta T(t) = \sum_{s=1}^{\infty} \frac{c_0 D_s}{\pi} \frac{a_2}{\lambda_2} \cdot c_2 \cdot \frac{1 - \exp(-a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2} t)}{a_2 \frac{\omega_s^2}{R^2}} J_{1/2}(\omega_s) -$$

$$- \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2A_n B_k}{\pi} \cdot \frac{a_1}{\lambda_1} \cdot c_1 \frac{1 - \exp(-a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2}) t)}{a_1 (\frac{b_n^2}{\ell^2} + \frac{\eta_k^2}{R^2})} \cdot \cos b_n \cdot \frac{J_1(\eta_k)}{\eta_k}$$
(2.40)

Алынған нәтижелерді тексеру мақсатында мыстан жасалған жылу ағыны датчигін қарастырайық. Келесі өлшемдер үшін қарастырайық: радиусы  $R=23$  мм, цилиндрдің биіктігі  $\ell=0,05$  м, жылу өткізгіштігі  $\lambda_1=\lambda_2=400 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ , тығыздығы  $\rho_1=\rho_2=8930 \text{ кг} / \text{м}^3$ , меншікті жылу сыйымдылығы  $c_1=c_2=385 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot \text{К}$ , температура өткізгіштік коэффициенті  $a_1=a_2=\frac{\lambda}{\rho c}=\frac{400}{8930 \cdot 385} \approx 1,163 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$ , қоршаған ортаның температурасы

$T_c = 293K (20^\circ C)$ , жылу ағыны  $\eta E + Q = 10000 Bm / m^2$ , жылу алмасу коэффициенті  $\alpha_{1R} = \alpha_\ell = \alpha_{2R} = 5 Bm / m^2 K$ .

Меншікті шамалары:

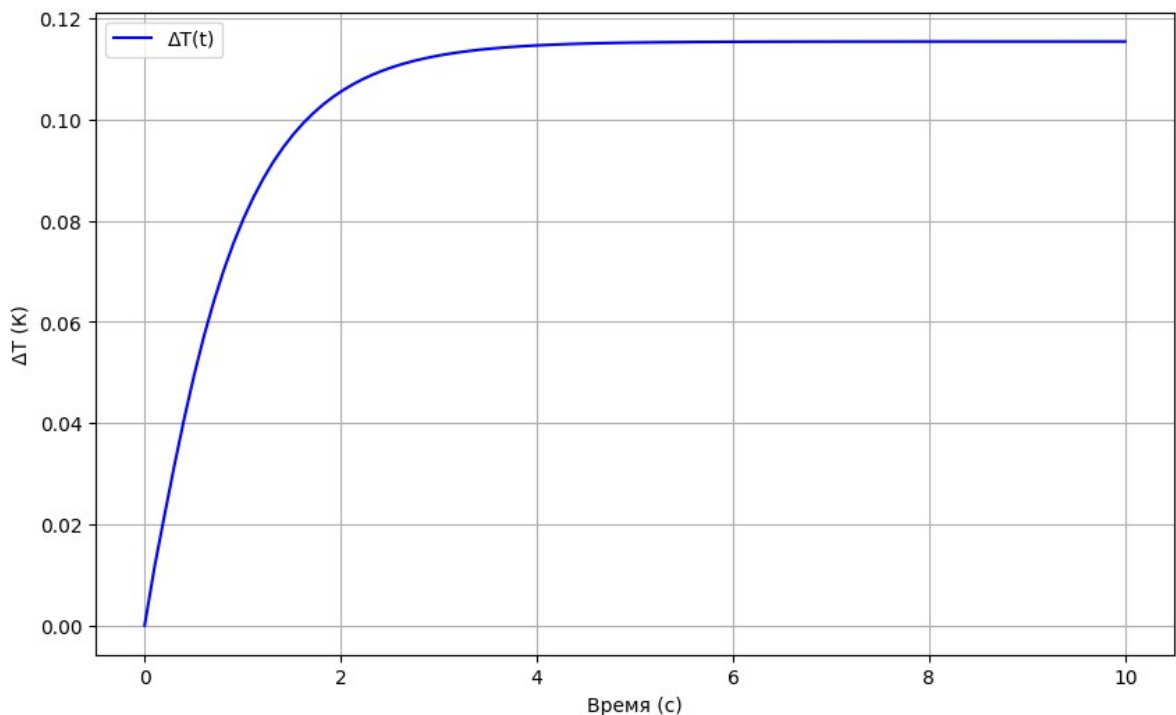
$\eta_k$  үшін (2.16) өрнегі бойынша,  $R \frac{\alpha_{1R}}{\lambda_1} \approx 0,0002875$  кезінде түбірлер нөлге жақын  $J_1(\eta_k)$ :  $\eta_k \approx 5,1356; 8,4172; 11,6198$ .

$b_n$  үшін (2.17) өрнегі бойынша,  $\ell \frac{\alpha_\ell}{\lambda_1} \approx 0,000625$  кезінде, түбірлері  $b_n \approx 1,5708; 4,7124; 7,8540$ .

$\omega_s$  үшін (2.38) өрнегі бойынша,  $R \frac{\alpha_{1R}}{\lambda_1} \approx 0,0002875$  кезінде, түбірлері  $\omega_s \approx 2,405; 5,520; 8,654$ .

Нормалау көбейткіштері  $c_0 D_s \approx 2 \cdot 10^6$ ;  $A_n B_k \approx 9,35 \cdot 10^5$ .

Осы мәліметтер негізінде Python бағдарламалау тілінің көмегімен рәсімделіп, температура айырымының уақытқа тәуелділік графигі тұрғызылды (11-сурет).



Сурет 11 – Температура айырымының уақытқа тәуелділік графигі

График бойынша  $\Delta T(0) \approx 0$ ,  $\Delta T(t)$  экспоненталы артып, стационарлық  $\Delta T_{\text{стат}} \approx 0,11 K$  мәнге 3–4 секунда жетеді, ал  $t > 4c$  кейін  $\Delta T$  тұрақты түрде өзгереді.  $T_1(r, \varphi, z, 0) = T_2(r, \varphi, \mu, 0) = T_c$  болғандықтан график 0 мәнінен басталып, дұрыстығын растайды. Жартылай сфера  $q = \eta E + Q$  жылу ағыны әсерінен қызады, және оның шыңындағы температура цилиндр табанындағы орташа температурадан жылдам артады, себебі цилиндр арқылы жылу шығарады.  $\Delta T$  тұрақты мәнге жетеді, бұл тұрақты жылу режиміне сәйкес келеді.

Теориялық мәнін бағаласақ,  $\Delta T = \frac{q}{\alpha_{2R}} \cdot \frac{R}{\lambda_2} \approx \frac{10000}{5} \cdot \frac{0,0023}{400} \approx 0,115K$ .

$\Delta T_{\text{стат}} \approx 0,11 K$  нәтижесі бағалаумен сәйкес келеді, демек бұл есептеулердің дұрыстығын растайды. Демек,  $\Delta T_{\text{стат}}$  мәні мыс үшін берілген  $q = 10000 Bm / m^2$ ,  $\alpha_{2R} = 5 Bm / m^2 K$  шарттарында шынайы болып табылады, бұл модельдің дұрыстығын және параметрлердің сәйкестігін растайды.

## 2.4 Кеңістіктік және жартылай кеңістіктік сәулелену өрісінің энергетикалық параметрлері және оларды өлшеу әдістері

Датчиктің бұрыштық орналасуы мен кеңістіктік сәулелену көзінің бұрыштық өлшемдеріне байланысты оның сәулелену өрісі әртүрлі энергетикалық параметрлермен сипатталуы мүмкін. Кеңістіктік сәулелену көзінің өрісінің алғашқы параметрлерінің бірі нүктенің кеңістіктік сәулеленуі  $E_k$  болып табылады және ол берілген нүктедегі центрдегі, бір ауданға тең экваторлық қимасы бар сфера арқылы барлық бағыттарда өтетін сәулелік ағын ретінде анықталады. Егер сфераны қоршап тұрған кеңістік жарқырауымен  $B$  сипатталса, онда:

$$E_k = \int_0^{4\pi} B d\omega \quad (2.41)$$

мұндағы  $d\omega$  - элементар денелік бұрыш.

Жазықтықтағы қалыпты сәулелену  $E_1$  нүкте мен бағыттың функциясы болса, ал кеңістіктік сәулелену тек нүктенің функциясы болып табылады. Кеңістіктік және қалыпты сәулеленулердің арасындағы қатынас келесі түрге ие [110]:

$$E_k = \int_0^{2\pi} dE_1 \quad (2.42)$$

Осы өрнектен кеңістіктік сәулелену  $2\pi$  сфералық денелік бұрышы шегінде өлшенген кеңістіктің берілген нүктесіндегі қалыпты сәулеленулердің қосындысына тең екендігі көрінеді.

Кеңістіктік сәулеленуден басқа, оның сәулелену энергиясымен қанықтылығын сипаттайтын параметрлерге орташа сфералық сәулелену және сәулелік энергияның көлемдік тығыздығы жатады. Орташа сфералық сәулелену  $E_{4\pi}$  берілген нүктеде орналасқан, радиусы өте кіші сфераның сыртқы бетінің орташа сәулеленуі болып табылады [111]:

$$E_{2\pi} = \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} B d\omega \quad (2.43)$$

Сәулелік энергияның көлемдік тығыздығы  $\omega_{4\pi}$  деп көлем нөлге ұмтылған жағдайда, сәулелену энергиясының  $W$  шамасының, оны қамтитын көлемге қатынасының шегін түсінеміз:

$$\omega_{4\pi} = \frac{dx}{dv} = \frac{1}{c} \int_0^{2\pi} B d\omega \quad (2.44)$$

мұндағы  $dx$  – элементар көлем,  $c$  – жарық жылдамдығы.

Изотропты ортада  $E_k$ ,  $E_{4\pi}$  және  $\omega_{4\pi}$  параметрлерінің арасындағы байланыс келесідей болады:

$$E_{\pi} = 4E_{4\pi} = c\omega_{4\pi} \quad (2.45)$$

Бұл шамалардың бір-бірінен тек тұрақты коэффициентпен ғана ерекшеленетініне қарамастан, сәулелену өрісінің негізгі нүктелік функциясы ретінде кеңістіктік сәулеленуді таңдау қажет. Бұл келесі себептермен негізделген:

- Орташа сфералық сәулелену ( $E_{4\pi}$ ) тек есептеулерге негізделген ұғым болса, ал кеңістіктік сәулелену табиғатта шынайы бар және берілген нүктеде кеңістіктің сәулелену ( $E_k$ ) энергиясымен жалпы қанықтылығын сипаттайды;
- Кеңістіктік сәулеленуді тікелей өлшеуге болады. Фотометриялық шардағы қабылдағыштардың сезімтал элементтері дәл осыған жауап береді;
- Кеңістіктік сәулелену шамасы шашырататын ортаның спектроскопиялық параметрлерін анықтауға арналған өрнектердің құрамына кіреді;
- Сәулелік энергияның көлемдік тығыздығын қолдануға ыңғайсыз, өйткені ол жарық жылдамдығының үлкендігіне байланысты өте кіші сандармен өрнектеледі.

Жартылай сфералық сәулелену деп жұтылатын және қарастырылатын орта элементі шығаратын,  $2\pi$  жартылай сфералық денелік бұрыш шегінде әртүрлі бағыттарда таралатын сәулелену аталады, ал көлемдік деп  $4\pi$  сфералық денелік бұрыш шегінде әртүрлі бағыттарда таралатын сәулелену аталады. Кеңістіктік сәулелену ретінде жұтылатын және шашырататын ортаның элементіне өтетін  $4\pi$  сфералық бұрыш шегіндегі сәулеленуді түсінеміз.

Кеңістіктік сәулеленуге ұқсас, жартыкеңістіктік сәулелену ұғымын енгіземіз, оны сіңіретін және шашырататын ортаның элементіне келетін  $2\pi$  жартылай сфералық денелік бұрыш шегінде сәулелену ретінде анықтаймыз.

Кеңістіктік сәулеленуге ұқсас, жартылай кеңістіктік сәулелену ұғымын енгіземіз, оны жұтылатын және шашырататын ортаның элементіне келетін  $2\pi$  жартылай сфералық денелік бұрыш ішінде сәулелену ретінде анықтаймыз.

Нүктенің жартылай кеңістіктік сәулеленуі  $E_{жск}$  деп, берілген нүктеде центрімен ең үлкен қимасы бірлік ауданға тең жартылай сфера арқылы  $2\pi$  денелік бұрыш шегінде өтетін сәулелік ағынды айтамыз:

$$E_{жск} = \int_0^{2\pi} B d\omega. \quad (2.46)$$

Жартылай кеңістіктік және қалыпты сәулеленулердің арасындағы қатынас келесі түрге ие:

$$E_{жск} = \int_0^{2\pi} B dE_1, \quad (2.47)$$

демек жартылай кеңістіктік сәулелену  $2\pi$  жартылай сфералық денелік бұрышы шегінде өлшенген кеңістіктің берілген нүктесіндегі қалыпты сәулеленулердің қосындысына тең екендігі көрінеді.

Берілген нүктеде орналасқан, радиусты кіші сфера бетінің орташа жартылай сфералық сәулеленуі:

$$E_{2\pi} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} B d\omega. \quad (2.48)$$

Жартылай кеңістіктік сәулелік энергияның тығыздығы  $\omega_{2\pi}$  деп көлем нөлге ұмтылған жағдайда, жартылай сфераға келетін сәулелену энергиясының  $W$  шамасының, осы энергияны қамтитын көлемге қатынасының шегі

$$\omega_{2\pi} = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{C} \int_0^{2\pi} B d\omega. \quad (2.49)$$

$E_{жск}$ ,  $E_{2\pi}$  және  $\omega_{2\pi}$  параметрлерінің арасындағы қатынас:

$$E_{жск} = 2E_{2\pi} = c\omega_{2\pi}. \quad (2.50)$$

Жартылай кеңістіктік сәулеленудің маңызды энергетикалық параметрі жергілікті жартылай сфералық сәулелену  $E(\varphi, \mu, t)$  болып табылады, ол жартылай сфера бетіне түсетін сәулелену ағыны тығыздығының жергілікті мәнін көрсетеді.

Жергілікті жартылай сфералық сәулелену  $E(\varphi, \mu, t)$  және  $dt$  уақытында  $dS$  ауданына түскен сәулелену энергиясының  $dW$  мөлшері арасындағы қатынас келесі өрнекпен сипатталады:

$$E(\varphi, \mu, t) = \frac{dW}{dS dt}. \quad (2.51)$$

Онда

$$dS = R dv rd\varphi = R^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi = R^2 d\mu d\varphi \quad (2.52)$$

мұндағы  $\vartheta$  және  $\varphi$  - азимуттық және орбиталық бұрыш,  $R$  – жартылай сфера радиусы,  $r$  – қиманың радиусы,  $\mu = \cos\vartheta (0 \leq \mu \leq 1)$ .

Демек:

$$E(\varphi, \mu, t) = \frac{dW}{R^2 d\mu d\varphi dt} \quad (2.53)$$

Осыдан жартылай кеңістіктік сәулеленудің  $W_{жск}$   $t$  уақыт ішінде жартылай сфераға түскен толық энергиясы үшін келесі өрнекті аламыз:

$$W_{жск} = R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 E(\varphi, \mu, t) \partial\varphi \partial\mu dt \quad (2.54)$$

Жергілікті жартылай сфералық сәулеленудің өрнегін тиісті айнымалыларға тәуелді функциялардың көбейтіндісі түрінде көрсетуге болады деп болжайық:

$$E(\varphi, \mu, t) = E_0 \Phi(\varphi) M(\mu) F(t) \quad (2.55)$$

мұндағы  $E_0$  – жергілікті жартылай сфералық сәулеленудің максималды мәні;  $\Phi(\varphi)$ ,  $M(\mu)$  және  $F(t)$  –  $[0...1]$  интервалында өзгертін тиісті айнымалылардың өлшемсіз функциялары.

Онда орташа жартылай сфералық және жартылай кеңістіктік сәулеленулерді келесі түрде көрсетуге болады:

$$E_{2\pi}(t) = E_{2\pi_0} F(t) \quad (2.56)$$

$$E_{жск}(t) = E_{жск_0} F(t) \quad (2.57)$$

мұндағы  $E_{2\pi_0}$  және  $E_{жск_0}$  - осы функциялардың максимал мәндері.

Жартылай кеңістіктік сәулеленудің толық энергиясы  $W_{жск}$  мен орташа жартылай сфералық сәулелену  $E_{2\pi}$  арасындағы байланыс мына қатынас арқылы беріледі:

$$W_{жск} = 2\pi R^2 \int_0^t E_{2\pi}(\tau) d\tau. \quad (2.58)$$

(2.55)-ді ескере отырып, (2.54) өрнегінен  $W_{жк}$  мәнін осы өрнекке қою арқылы, максималды мәндер мен жергілікті жартылай сфералық сәулелену арасындағы байланыс формуласын аламыз:

$$E_{2\pi_0} = \frac{E_0}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \Phi(\varphi) M(\mu) d\varphi d\mu \quad (2.59)$$

Түскен сәулелену көзінің маңызды параметрі ретінде жергілікті жартылай сфералық сәулелену  $E(\varphi, \mu, t)$  қарастырылады, ол сезімтал элементтің сәулеленетін бетінің белгілі бір нүктесіндегі түсетін сәулелену тығыздығының жергілікті мәнін білдіреді және (2.55) өрнегімен сипатталады. Жергілікті жартылай сфералық сәулеленудің максималды мәні  $E_0$  сфера, жартылай сфера, сфералық аймақ немесе сфералық сегменттің қисық беті түрінде болады.

Термоэлектрлік сәуле қабылдағышының сәулелендіру және электр тогымен калибрлеу кезіндегі реакциясын  $E(\varphi, \mu, t) = E_0 \Phi_n(\varphi) M_n(\mu) F_n(t)$  және  $Q_{\vartheta}(r, t) = A_{\vartheta}(r) H_{I_{\vartheta}}(t) \psi_{I_{\vartheta}} \psi_{II_{\vartheta}} J_{II_{\vartheta}} q_{v_0}$  өрнектері негізінде,  $U_c(t) = CH_{I_c}(t) E_0$  және  $U_{\vartheta}(t) = \frac{A}{\eta} CH_{I_{\vartheta}}(t) q_0$  өрнектеріне ұқсас келесі түрде жазуға болады:

$$U_c = CH_{I_c} \Psi_{I_c} \Psi_{II_c} I_{I_c} E_0 \quad (2.60)$$

$$U_{\vartheta} = \frac{A}{\eta} CH_{I_{\vartheta}} \Psi_{I_{\vartheta}} \Psi_{II_{\vartheta}} I_{II_{\vartheta}} q_0 \quad (2.61)$$

мұндағы  $C$  - пропорционалдық коэффициент;  $A$  – калибрлеу кезінде сәулеленуді электр тогымен алмастырудың эквивалентсіздігін сипаттайтын коэффициент,  $A = \frac{\eta E_0}{qq_0} = \frac{\eta E_0}{q_{v_0}(R_2 - R_1)}$ ;  $\eta$  - сезімтал элементтің қарамен жабылған бетінің жұтылу коэффициенті;  $q_0$  - сезімтал элементті электр тогымен қыздыру кезіндегі эквивалентті жылу ағынының максималды мәні, сәулеленудің максималды мәндерін  $E_0$  салыстыру мақсатында енгізілген; «С» және «Э» индекстері, берілген шаманың сезімтал элементтің калибрлеу кезіндегі сәулеленумен немесе электр тогымен қыздырылуына сәйкес келетінін білдіреді.

Бұл өрнектердің қатынасынан жергілікті жартылай сфералық сәулеленудің максималды мәні үшін келесі формуланы аламыз:

$$E_0 = \frac{AH_{I_{\vartheta}} \Psi_{I_{\vartheta}} \Psi_{II_{\vartheta}} I_{II_{\vartheta}}}{\eta H_{I_c} \Psi_{I_c} \Psi_{II_c} I_{I_c}} q_0 \frac{U_c}{U_{\vartheta}} \quad (2.62)$$

Сезімтал элементтің көлемі бойынша ішкі көздердің таралуына байланысты, (2.62) өрнегінің жеке жағдайларын қарастыруға болады.

Егер ішкі көздердің таралуы  $\varphi$ ,  $\mu$  және  $r$ -ге тәуелсіз болса, бұл тығыз оралған спираль жағдайында орын алуы ықтимал, онда  $\Psi_3(\varphi)=I$ ,  $M_3(\mu)=I$  және  $F(r)=I$  шарттары орындалады. Онда бірінші және екінші бұрыштық интегралдар, сондай-ақ екінші радиалды интеграл бірдей мәнге ие болады:

$$\psi_{I_3}=2\pi; \psi_{II_3}=\mu_2-\mu_1; I_{I_3}=I_{Ic} \quad (2.63)$$

Ішкі көздерден туындайтын жылу ағынының беттік тығыздығының максималды мәнін мына түрде жазуға болады:

$$q_0 = \frac{I^2 R}{S} = \frac{I^2 R}{\Omega R_2^2} \quad (2.64)$$

мұндағы  $S=\Omega R_2^2$  - сезімтал элементтің калибрленетін бетінің ауданы;  $\Omega$  – оның бұрыштық өлшемдері;  $I$  – сезімтал элементті электр тогымен калибрлеу кезінде қолданылатын қуат беру тогының шамасы. Калибрленген орамның радиусы  $(R_2 - R_1) \leq R_2$  аралығында сезімтал элементтің сыртқы радиусына  $R_2$  тең деп есптейміз, мұндағы  $R_1$  – сезімтал элементтің ішкі радиусы.

(2.63) және (2.64) өрнектеріндегі  $\psi_{I_3}$ ,  $\psi_{II_3}$  және  $I_{I_3}$  мәндерін (2.62) өрнекке қойып, келесіні аламыз:

$$E_0 = b_1 b_2 \frac{(\mu_2 - \mu_1) H_{I_3}}{H_{Ic} \Psi_{Ic} \Psi_{IIc}} \quad (2.65)$$

мұндағы

$$b_1 = \frac{2\pi AR}{\Omega \eta R_2^2} \quad (2.66)$$

$$b_2 = \frac{I^2}{U_3} \quad (2.67)$$

Калибрленген электрлік импульсінің ұзақтығы мен пішіне байланысты (2.62) және (2.65) өрнектерін одан ары жеңілдетуге болады. Егер калибрлеу  $F(t) = \begin{cases} 1, & \tau_0(N-1) \leq t \leq \tau_0(N-1) + \tau_H \\ 0, & \tau_0(N-1) + \tau_H < t < \tau_0 N \end{cases}$  өрнегімен сипатталатын жеке тік бұрышты импульспен жүзеге асырылса, онда қабылдағыштың максималды реакциясына негізделіп,  $(N-1)\tau_0 + \tau_c$  уақыт мезетінде анықталатын және  $H_I(\tau_H^*, Q, N) = \left[ \frac{1 - \exp(-\tau_H^*)}{1 - \exp(-Q\tau_H^*)} \right] [1 - \exp(-QN\tau_H^*)] \tau$  түріндегі уақыт интегралмен сипатталатын бірінші уақыттық интегралдың мәнін табуға болады

$$H_{IЭ} = \left[ 1 - \exp(-\tau_{сэ}^*) \right] \tau \quad (2.68)$$

мұндағы  $N$  – импульстің саны;  $Q$  – импульс процесінің қуыстылығы;  $\tau_c^*$  – келтірілген импульс ұзақтығы;  $\tau$  – құрылғының уақыт тұрақтылығы.

$\tau_{сэ}^* = 1$  немесе  $\tau_{сэ}^* \rightarrow \infty$  калибрленген импульс ұзақтығында (2.68) өрнегі сәйкесінше  $H_{IЭ} = 0,63\tau$  немесе  $\tau_{сэ}^* \rightarrow \infty$ ;  $H_{IЭ} = \tau$  түрге ие болады.

Осыке симметриялы сәулелік ағыны үшін:  $\Phi_c(\varphi) = 1$ . Онда бірінші бұрыштық интеграл

$$\psi_{IC} = 2\pi \quad (2.69)$$

тең.

Егер сезімтал элементтің бетіне сәулелік ағын біркелкі таралса, онда бір мезгілде келесі шарттар орындалады:

$$\Phi_c(\varphi) = 1 \quad \text{және} \quad M_c(\mu) = 1$$

Онда:

$$\psi_{IC} = 2\pi; \quad \psi_{IH} = \mu_2 - \mu_1 \quad (2.70)$$

Егер сезімтал элемент пен калибрлеу орамасы біріктіріліп, жартылай сфералық пішінде жасалса, онда:

$$\mu_1 = 0; \quad \mu_2 = 1; \quad \Omega = 2\pi \quad (2.71)$$

Онда:

$$\psi_{IIЭ} = \psi_{IIC} = 1 \quad (2.72)$$

(2.54), (2.55) және (2.62) өрнектерінің негізінде есептелген жартылай кеңістіктік сәулеленудің жиынтық энергиясы мынаған тең:

$$W_{эск} = \frac{AR_2^2 H_{IЭ} \Psi_{IЭ} \Psi_{IIЭ} I_{IIЭ} H_{IC}}{\eta H_{IC} I_{IC}} q_0 \frac{U_C}{U_э} \quad (2.73)$$

немесе (2.63) шарты орындалғанда:

$$W_{эск} = b_2 b_3 \frac{H_{IЭ} H_{IIЭ}}{H_{IC}} U_C \quad (2.74)$$

мұндағы

$$b_3 = \frac{AR}{\eta R_2^2} \quad (2.75)$$

(2.58) өрнегін пайдалана отырып, орташа жартылай сфералық сәулеленудің максималды мәнін анықтау үшін қажетті жұмыс формуласын аламыз:

$$E_{(2\pi)_0} = \frac{AH_{I\theta} \Psi_{I\theta} \Psi_{II\theta} I_{II\theta}}{2\pi\eta H_{IC} I_{IC}} q_0 \frac{U_C}{U_\Sigma} \quad (2.76)$$

немесе (2.63) шарты орындалғанда:

$$E_{(2\pi)_0} = \frac{b_2 b_3}{2\pi} \cdot \frac{H_{I\theta}}{H_{IC}} U_C \quad (2.77)$$

(2.50), (2.57) және (2.76) өрнектеріне сүйене отырып, жартылай кеңістіктік сәулеленудің максималды мәнін анықтау үшін жұмыс формуласын аламыз:

$$E_{жс\kappa_0} = \frac{AH_{I\theta} \Psi_{I\theta} \Psi_{II\theta} I_{I\theta}}{\pi\eta H_{IC} I_{IC}} q_0 \frac{U_C}{U_\Sigma} \quad (2.78)$$

немесе (2.63) шарты орындалғанда:

$$E_{жс\kappa_0} = \frac{b_2 b_3}{\pi} \frac{H_{I\theta}}{H_{IC}} U_C \quad (2.79)$$

Ұсынылған қабылдағыштар мен әдістерді Гаусс жарық шоқтарын, мысалы, оптикалық кванттық генераторлардың тар сәулелену шоқтарын өлшеуге қолдану қызығушылық тудырады.

Гаусс сәулелену шоғының жазық бетіндегі таралуы мына өрнек арқылы сипатталады:

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (2.80)$$

мұндағы  $r_0$  - шоқтың центрінен беттің қарастырылып отырған нүктесіне дейінгі радиус-вектор;  $r$  - центрдігі сәулеленуден е есе кем сәулелену мәні байқалатын нүктеге дейінгі радиус-вектор.

Егер сезгіш элементтің сәулеленетін беті жартылай сфера пішінді болса, онда:

$$E = E_0 \exp \left[ - \frac{R^2 (1 - \mu^2)}{r_0^2} \right] \quad (2.81)$$

яғни  $r = R \sin \nu = R \sqrt{1 - \mu^2}$ , мұндағы  $R$  – сәулеленетін беттің радиусы,  $\mu = \cos \nu$ ,  $\nu$  - азимуттық бұрыш.

Бұл жағдайдағы кез келген энергетикалық параметрді өлшеу ерекшелігі  $Q_9(r, t) = A_9(r) H_{I_9}(t) \psi_{I_9} \psi_{II_9}^J \psi_{III_9}^q \nu_0$  түріндегі екінші бұрыштық интегралды анықтауға байланысты. (2.81) өрнегін қолдану арқылы

$$M(\mu) = \exp \left[ - \frac{R^2 (1 - \mu^2)}{r_0^2} \right], \quad (2.82)$$

онда

$$\psi_{IC} = \exp \left( - \frac{R^2}{r_0^2} \right) \sum_{K=0}^{\infty} \frac{1}{K(2K+1)} \left( \frac{R}{r_0} \right)^{2K} \quad (2.83)$$

Егер қатар  $n$  мүшемен шектелсе, онда:

$$\psi_{In1} = \exp \left( - \frac{R^2}{r_0^2} \right) \sum_{K=1}^n \frac{1}{K(2K+1)} \left( \frac{R}{r_0} \right)^{2K} \quad (2.84)$$

Қатардың қалдық мүшесі мынаған тең:

$$\varepsilon_n = \exp \left( - \frac{R^2}{r_0^2} \right) \left( \frac{R}{r} \right)^{2(n+1)} \frac{\xi^{n+1}}{(n+1)!(2n+1)} \quad (2.85)$$

мұндағы  $0 \leq \xi \leq 1$ .

Қателігі

$$\delta = \frac{\varepsilon_n}{\psi_{In1} + \varepsilon_n} \quad (2.86)$$

шамасына тең.

Қатардың есепке алынған мүшелерінің саны мен шамасы  $R/r_0$  артқан сайын қателігі  $\delta$  азаяды.

**2-бөлім бойынша қорытынды**

«Жартылай сфера-цилиндр» түріндегі сезімтал элементтің құрылысы жартышардың үлкен беткі ауданы есебінен жылу ағынына жоғары сезімталдықты және цилиндрлік бөлік арқылы тиімді жылу әкетуді қамтамасыз етеді, бұл датчикті метеорологияда, энергетикада және өнеркәсіпте қолдануға қолайлы етеді.

Алғаш рет нақты жылуфизикалық қасиеттері мен пайдалану шарттарын ескере отырып, «жартылай сфера-цилиндр» құрылымды жылу ағыны датчигі үшін жылуалмасудың математикалық моделі жасалып, аналитикалық түрде шешілді.

Жартылай сфера бетінде сәулелену ( $\eta E$ ) мен электрлік қыздырудың ( $Q$ ) әсерін, сондай-ақ цилиндр арқылы жылу әкетуді (терсоэлектрлік датчиктің суық түйініне) ескеретін температуралар айырымының  $\Delta T(t)$  аналитикалық шешуі алынды.

Жартылай сфера пішінді сезімтал элементі бар сәулелену датчиктерінің кеңістіктік біртекті емес сәулелену, мысалы, Гаусс шоғы сияқты жағдайларда да қолдануға болатыны көрсетілді. Гаусс шоғын зерттеу барысында жергілікті сәулелену қарқындылығын анықтауға арналған жұмыс формуласы алынды.

Аналитикалық шешу нәтижесінде алынған  $T_1(r, \varphi, z, t)$  және  $T_2(r, \varphi, \mu, t)$  формулалары кез келген нүктедегі және кез келген параметрлер ( $E$ ,  $Q$ ,  $\alpha$ ) жағдайындағы температуралық өрістерді сипаттайды, бұл оларды датчиктерді жобалауда әмбебап етеді. Бұл формулалар датчиктерді сандық модельдеусіз-ақ жобалауды және калибрлеуді жеңілдетеді.

## **3 ЖЫЛУ АҒЫНЫН ӨЛШЕУ ҚҰРЫЛҒЫСЫН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ЖАСАУ**

### **3.1 Термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінің негізгі құрылымы**

Диссертацияның алдыңғы бөлімдерінде жылу ағынын өлшеудің қолданыстағы әдістері мен датчиктерінің типтеріне, атап айтқанда, термोजұптар, термобатареялар, жұқа қабыршақты және жылулық кедергіге негізделген датчиктерге жан-жақты талдау жүргізілді. Талдау нәтижесінде, аталған типтердің әрқайсысының өзіндік артықшылықтарымен қатар, нақты жұмыс жағдайлары мен зерттеу міндеттеріне байланысты қолданылуын шектейтін елеулі кемшіліктері анықталды. Бұл талдаудың нәтижесі келесі зерттеудің бағытын анықтауға негіз болды.

Жылу желілерінің аймақтарындағы жылу шығындарын бақылау үшін жоғары дәлдікті және сенімді жылу ағынының тығыздығын өлшеуішін жасау міндетін орындау мақсатында термоэлектрлік түрлендіргіш (термобатарея) негізгі өлшеу элементі ретінде таңдалып алынды. Бірнеше термोजұптардың тізбектей жалғануы негізінде әзірленген термобатареяның жоғары сезімталдығы, сипаттамасының сызықтылығы және сенімділігі оны жылу ағынын өлшеу құрылғылары үшін ең оңтайлы таңдауға әкеледі. Термо-ЭҚК-ті қосу температура мен жылу ағынының аз ғана өзгерістеріне сезімталдықты айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді, ал шығыс сигналының температураға байланыстылығының сызықтық болуы деректерді өңдеу мен калибрлеуді жеңілдетеді. Сонымен қатар, термобатареяның сипаттамаларының тұрақтылығына байланысты сенімділігі мен ұзақ мерзімділігі өлшегіштің жоғары дәлдігін және әртүрлі пайдалану жағдайларына төзімділігін қамтамасыз етеді. Термобатареяның осы қасиеттері оны зерттеу жұмысы үшін тиімді таңдау етеді.

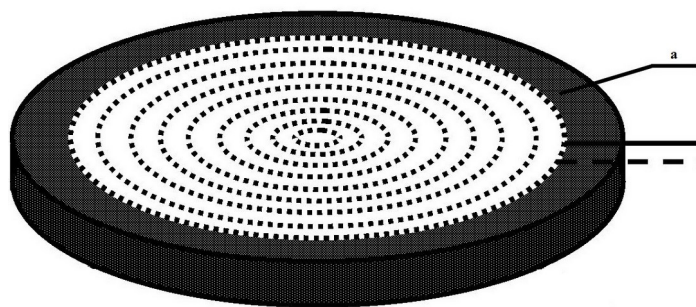
Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университетінің физика-техникалық факультетінің профессор Ж.С. Ақылбаев атындағы инженерлік жылуфизика кафедрасының «Жылуфизикалық шамаларды өлшеу» зертханасында жылу ағынының тығыздығының термоэлектрлік түрлендіргіші әзірленді [112]. Бұл термоэлектрлік түрлендіргіш өндірілетін электрлік сигнал бойынша тізбектей, ал анықталатын жылу ағыны бойынша параллель жалғаған және электр оқшаулағыш компаундпен құйылған бірдей термоэлементтерден тұрады. Жылу ағыны түрлендіргішінің шығыс сигналы жылу ағынының өтуі кезінде пайда болатын термоэлектрлік қозғаушы күш болып табылады.

Жоғары дәлдік және тұрақтылықты қамтамасыз етуге бағытталған гальваникалық қабатты датчиктерді жасау технологиясы диаметрі 0,07 мм екі мыс-константан сымды целлулоидты жолаққа жіптік оқшаулаумен орау станогында жүзеге асырылады. Ені 1,2–1,5 мм целлулоидты жолақ уақытша төсеме ретінде қолданылады, ол кейінірек еріткішпен жойылады. Сым целлулоидті жолақтың айналасында айналатын шарыққа оны зақымдамау үшін екі сымды беру минималды қысыммен резеңке біліктер көмегімен оралады. Орау қадамы 0,12–0,14 мм құрайды. Диаметрі 46 мм және қалыңдығы 18 мм болатын датчик әзірлеу үшін дайындаманың ұзындығы 20–25 м, яғни бұл 150 элементар түйіндер жұбын құрады. Орама аяқталғаннан кейін сымның тұтастығы үзілулерді анықтау үшін зуммері бар аналогты мультиметр арқылы тексеріледі. Түйіндердің өткізгіштігін және беріктігін жақсарту мақсатында сымның бетіне мыс қабатын тұндыру үшін дайындама арнайы рамкаға бекітіліп, мыс купоросы ( $\text{CuSO}_4$ ), күкірт қышқылы ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) және 2% изопропил спирті бар модификацияланған электролитпен толтырылған гальваникалық ваннаға орналастырылады. Электролиттің температурасы 25–30°C аралығында ұсталады, ал тұндыру процесі 0,5–1 А/дм<sup>2</sup> токта 5–10 минутқа созылады. Мыс қабатының қалыңдығы 5 мкм құрайды, бұл жұқа сым үшін жеткілікті. Мыс тұндырылғаннан кейін целлулоидты төсеме таза ацетонның (техникалық, ГОСТ 2768-84) көмегімен жойылады, яғни дайындама 200–300 мл ацетонға жабық ыдыста 10–15 минутқа батырылады, бұл целлулоидтың тез және біркелкі еруін қамтамасыз етеді және мыс-константан түйіндеріне зақым келтірмейді. Целлулоид жойылғаннан кейін алынған спираль сыртқы әсерлерден қорғау және -20...250 °C температура диапазонында төзімділікті және жоғары электрді оқшаулауды қамтамасыз ету үшін ПИ-ЛК-1 полиимидті лак жұқа қабатпен жағылып, бөлме температурасында 60 минут бойы ұсталады. Лакпен қапталған спираль кептіру шкафына орналастырылып, алдымен 100°C температурада 1 сағат кептіріледі, одан кейін жоғары жылу төзімділікке жету үшін 30 минут бойы 150°C температурада полимерленеді.

Келесі кезеңде төмен температурада иеханикалық беріктік пен жоғары жылу төзімділікті қамтамасыз ету үшін спираль алюминий оксидімен (массасы бойынша 20–30%) модификацияланған эпоксидті шайырмен (ЭД-20 с ПЭПА, 10:1) жабылады. Дайындама арнайы силиконды пресс-қалыпқа салынып, барлық жағынан нығыздалады (0,5–1 кг/см<sup>2</sup>), содан кейін кептіру шкафына қойылып, шайыр 80°C температурада 2,5 сағат бойы полимерленеді.

Полимерленгеннен кейін нығыздалған қабатты диск ішкі ойығы бар алюминий сақинасына орнатылады. Жылу ағындарын өлшеу үшін қажетті жылуды жұтуды арттыру мақсатында датчиктің жұмыс беті 5–10% көмір ұнтағымен араластырылған эпоксидті шайырмен құйылады. Көмір ұнтағы жоғары қаралық дәрежесін қамтамасыз етеді (жұту коэффициенті ~0,9), бұл жылу ағындарына сезімталдықты жақсартады. Құю тек дискінің бір жағына орындалады, ал екінші жағы температура айырмашылығын жасау үшін

оқшауланған күйде қалады. Әзірленген дисктің сыртқы түрі 12-суретте көрсетілген.



Сурет 12 - Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің сыртқы түрі: а – датчиктегі терможұптардың орналасуы

Кең спектралды диапазонда энергия ағыны толығымен «қара дене» немесе оған мүмкіндігінше жақын сезімтал элементі бар қабылдағыш арқылы тіркеледі. Мұндай қабылдағыштағы түсетін сәуле толқын ұзындығына тәуелсіз сіңіріліп, оның ішінде сіңірілген интегралдық сәулелік энергияға пропорционалды сигнал қалыптастырады. Жоғары жылу өткізгіштікке ие және жылу сыйымдылығы төмен қара түспен жабдықталған материалды таңдау арқылы қабылдағыштың жылу инерциясын азайтуға қол жеткізіледі.

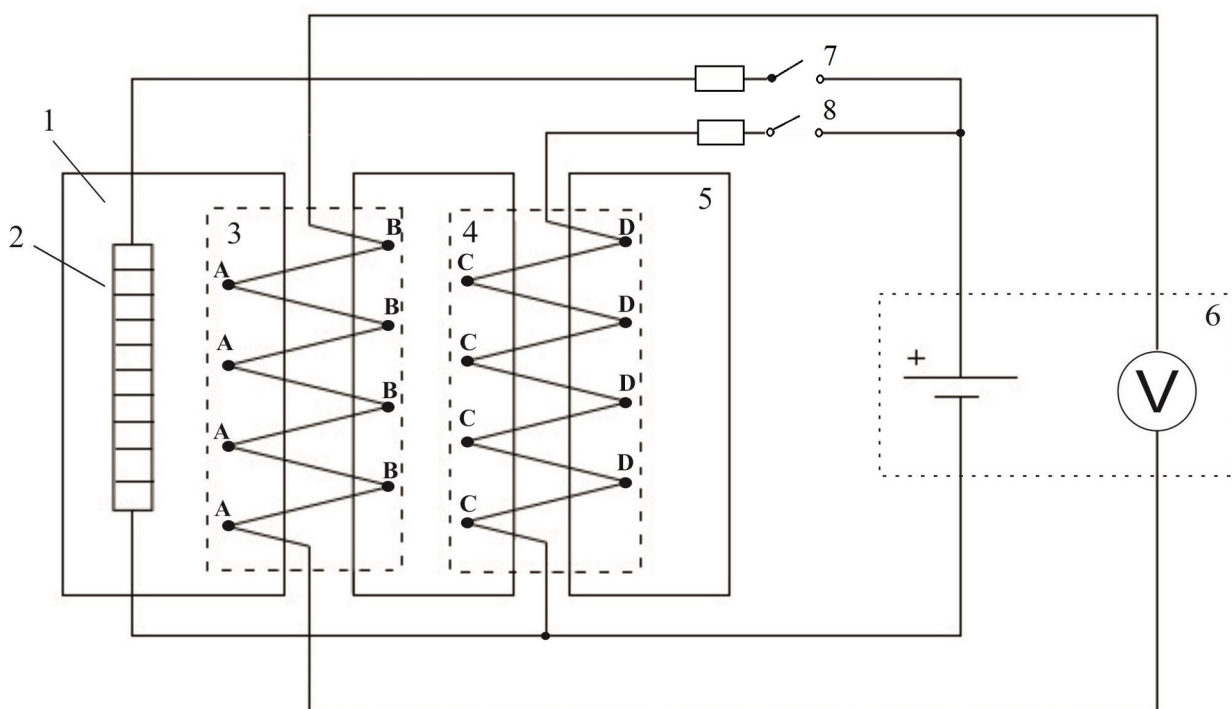
### 3.2 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы

1.5-бөлімде қарастырылған жылу ағыны аспаптарының бірнеше модификацияларының артықшылықтарын ескеріп, кемшіліктерін жою және өлшеу дәлдігін арттыру негізінде жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы әзірленді. Бұл құрылғының негізгі мақсаты беттік температура градиентін өлшеудің дәлдігі мен жылдамдығын арттыру болып табылады [113, 114].

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жылу өлшеу блогынан және автономды батареялық қоректендірумен жабдықталған, шағын өлшемді электрондық көрсеткіш құрылғысынан тұрады. Жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргіші жылу өлшеу блогынан тұрады, ал оның негізін батареялы термоэлектрлік түрлендіргіш құрайды. Бұл конструкция термоэлектрлік эффектті тиімді пайдалануға және жылу ағынын дәл өлшеуге мүмкіндік береді. Термоэлектрлік датчик құрылғының конструкциялық тұрақтылығын қамтамасыз етеді. Оның бір табаны өлшенетін жылу ағынымен жанасатын жұмыс беті ретінде қызмет етсе, екінші табаны қоршаған орта температурасындағы денемен жылулық байланыста болады. Кіріктірілген қыздырғыш элемент термоэлектрлік датчик арқылы оның негіздеріне перпендикуляр бағытта жылу ағынын тудыруға мүмкіндік береді.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жылу өткізгіштік пластинадан, қыздырғыш элементтен, жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінен, термоэлектрлік салқындатқыштан, радиатордан және

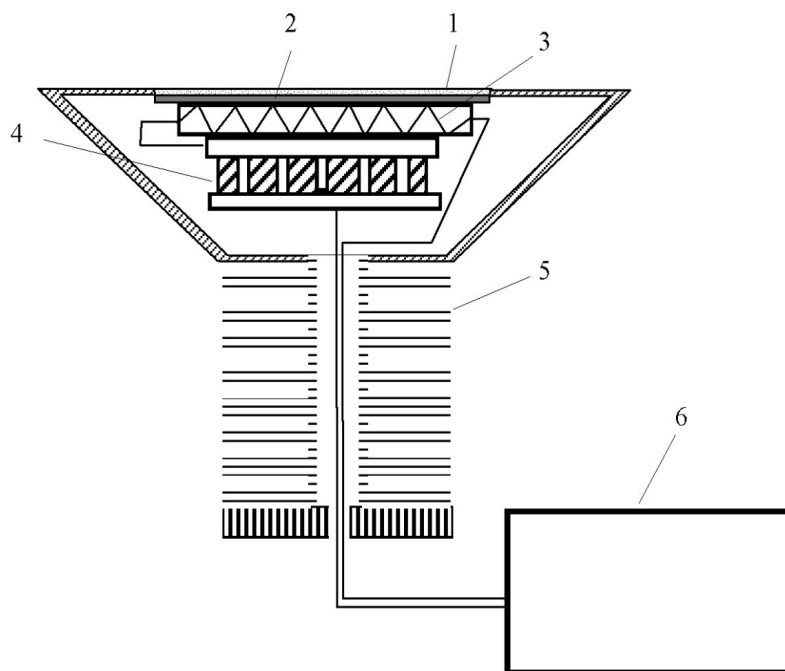
өлшеуші блоктан тұрады. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының қағидалық сұлбасы 13-суретте көрсетілген. Қағидалық сұлбасы негізгі элементтерді, олардың функционалдық мақсаттарын және өзара байланысын көрсетеді.



Сурет 13 - Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының қағидалық схемасы:  
 1 - жылу өткізгіштік пластина; 2 - қыздырғыш элемент; 3 – жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргіші; 4 – термоэлектрлік салқындатқыш; 5 – радиатор; 6 – өлшеуші блок; 7, 8 – кілттер; I – жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінің «ыстық» түйіндері; II - жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргішінің «суық» түйіндері; III - термоэлектрлік салқындатқыштың «ыстық» түйіндері; IV - термоэлектрлік салқындатқыштың «суық» түйіндері

Құраушылар арасындағы электрлік байланысы қыздырғыш элементі берілетін қуатты реттеуге мүмкіндік беретін қуат көзіне қосылуы және термоэлектрлік түрлендіргіштен, қыздырғыш элементінен және тоңазытқыштан келетін сигналдар өлшеуші блокқа бағытталуы болып табылады. Ал, жылулық байланысы қыздырғыш элементінің түрлендіргішпен тікелей жылулық байланыста болуы жылудың тиімді берілуін және түрлендіргіштен тоңазытқышқа, содан кейін радиаторға жылудың берілуі жүйенің тиімді салқындатылуын қамтамасыз етуі болып табылады.

Осы қағидалық сұлбаның негізінде жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының схемалық бейнесі әзірленді (14-сурет).



Сурет 14 - Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының схемалық бейнесі: 1 – жылу өткізгіштік пластина; 2 – қыздырғыш элемент; 3 – жылу ағынының термоэлектрлік батареялы түрлендіргіші; 4 – термоэлектрлік салқындатқыш; 5 – радиатор; 6 – өлшеуші блок

Құрылғының әмбебаптығы оның эталондық жылу ағынын жасау қабілетіне негізделген. Бұл қасиет оны әртүрлі жағдайларда, соның ішінде далалық жағдайда да, калибрлеу мен өлшеулер жүргізуге бейімделген икемді құралға айналдырады. Құрылғының құрылымына қыздырғыш элементі мен термоэлектрлік салқындатқыш енгізілген, бұл термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш арқылы бақыланатын жылу ағынын тудыруға мүмкіндік береді. Мұндай жүйе құрылғыны оның пайдалану орнында тікелей калибрлеуге мүмкіндік жасайды, яғни стационарлық зертханалық жабдықты пайдалануды қажет етпейді. Мысалы, жылыту элементі эталондық жылу ағынын тудырады, ал салқындатқыш суық түйіндердің тұрақты температурасын ұстап тұрады. Бұл температуралар айырымын дәл бақылауға мүмкіндік береді, нәтижесінде термоЭҚК дәл өлшенеді. Мұндай тәсіл құрылғыны әртүрлі беттерге және жағдайларға бейімдеуге мүмкіндік береді. Атап айтқанда, бұл жылу желілерін диагностикалауда тиімді қолдануға жол ашады.

Қыздырғыш элемент (2) жылу өткізгіштік пластинаға (1) орнатылған және ол калибрлеу режимінде белсенді болып, бақыланатын жылу ағынын тудырады. Жылу өткізгіштік пластина жылуды жылыту элементінен (2) немесе өлшенетін объектіден ТБТ-ның (3) ыстық түйіндеріне жеткізеді, ал өлшеу кезінде қыздырғыш элемент (2) өшіріледі, ал пластина (1) объектімен тікелей жанасады. Жылу өткізгіштігі шамамен  $200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  болатын алюминийден жасалған жылу өткізгіш пластина (1) біркелкі жылулық

байланысты қамтамасыз етіп, жергілікті қызып кетуді азайтады. Пластина (2) өлшенетін объектіден алған жылуды біркелкі таратады және жылу шығындарын азайта отырып, оны жылу өткізгіштігі  $15 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$  және қалыңдығы  $0,05 \text{ мм}$  жылу өткізгіш паста қабаты арқылы термоэлектрлік батареялық түрлендіргіштің (3) ыстық түйіндеріне береді. Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің (3) «суық» түйіндері термоэлектрлік тоңазытқыштың (4) «ыстық» түйіндерімен, ал термоэлектрлік тоңазытқыштың (4) «суық» түйіндері радиатормен (5) жылулық байланысқа түседі. Бұл термоэлектрлік тоңазытқыштың (4) «ыстық» түйіндері қыздырғыш элемент (2) пен термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш (3) арасына орналастырылып, ал «суық» түйіндер қоршаған орта температурасына тәуелсіз құрылғы корпусымен жылулық байланысында болады. Шығыс сигнал жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргішінен (3), қыздырғыш элементтен (1) және термоэлектрлік салқындатқыштан (4) өлшеуші блокқа (6) беріледі.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жалпы түрі 15-суретте көрсетілген.



Сурет 15 – Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жалпы түрі

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жұмыс істеу принципі: қыздырғыш элемент арқылы зерттелетін нысаннан келетін ықтимал жылу ағынынан әлдеқайда көп қуат бөлінетіндей етіп электр тогы өткізіледі. Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш жұмыс режимінде болғанда, оның шығысында пайда болатын сигнал термоэлектрлік тоңазытқыш арқылы алынатын жылу ағынына тікелей пропорционал болады. Қыздырғыш элементтің температурасы қоршаған орта температурасына жуық болып сақталады, бұл өлшеу дәлдігін арттырады. Құрылғы жұмыс режимінде болады. Кейіннен, құрылғы алдымен зерттелетін нысанның ақаулары жоқ аймағына, содан кейін, ақауы болуы мүмкін зерттелетін аймаққа қойылады.

Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің шығысындағы сигналдың өзгеруіне сүйене отырып, ақаудың бар болуы анықталады.

Жылу өткізгіш пастаны таңдауда оның жылу өткізгіштігі жоғары, яғни 15-20 Вт/м·К (одан жоғары көрсеткіштер ТБТ-ті қысқа тұйықталудан оқшаулауды қажет етеді) аралығында болу қажет, сол себепті Arctic MX-6 керамикалық пастасы таңдалды, себебі паста -20°C-ден 250°C температуралық диапазонында өз қасиеттерін сақтайды, жылуөткізгіштігі 15 Вт/м·К, ток өткізбейді (термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш ЭҚК-ін түрлендіруіне байланысты қысқа тұйықталу болмауы қажет), төзімді (қыздыру немесе салқындау кезінде еру, ағу, нашарлау болмауы қажет) болып табылады.

Жылулық кедергіні азайту үшін Arctic MX-6 пастасының 0,1 мм және 0,05 мм қалыңдықтарында келесі теориялық нәтижелер алынды:

$$R_1 = \frac{h}{\lambda S} = \frac{0,0001}{15 \cdot 0,001661} \approx 0,00401 K / Bm$$

$$R_2 = \frac{h}{\lambda S} = \frac{0,00005}{15 \cdot 0,001661} \approx 0,00201 K / Bm$$

мұндағы:  $h$  – пастаның қалыңдығы, м;  $\lambda$  – жылуөткізгіштік, Вт/м·К;  $S$  – түйіспе ауданы, м<sup>2</sup> (термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің диаметрі 46 мм,  $S = \pi R^2 = 3,14 \cdot 0,023^2 \approx 0,001661 \text{ м}^2$ ).

Нәтижелер бойынша қалыңдықты екі есе азайту жылулық кедергіні 50%-ға азайтты, сәйкесінше түйіспедегі температурада төмендейді. Ал температураның төмендеуі өлшеу дәлдігін арттырады, себебі ТБТ арқылы өткен жылу ағыны бірқалыпты болады.

Егер, шамамен ТБТ-ның ауданына қарай  $Q = 10 Bm / m^2 \cdot 0,001661 \text{ м}^2 = 0,01661 Bm$  жылу ағыны болса, онда температураның төмендеуі:

$$\Delta T_1 = Q \cdot R_1 = 0,01661 \cdot 0,00401 \approx 0,00007^\circ C$$

$$\Delta T_2 = Q \cdot R_2 = 0,01661 \cdot 0,00201 \approx 0,00003^\circ C$$

Демек, пастаның қалыңдығын азайту арқылы температураның да екі есе төмендейтін көреміз, сол себепті Arctic MX-6 керамикалық пастасының 0,05 мм қалыңдықта алу өте тиімді болып табылады.

Қыздырғыш бірқалыпты емес жылу тудыруына байланысты, оны реттеу үшін жылу өткізгіш пластина ретінде қалыңдығы 2 мм, жылуөткізгіштігі жоғары (200 Вт/м·К) алюминий пластина таңдалды. Егер ТБТ-тің ыстық түйіндері бірқалыпты қыздырылмаса, онда ЭҚК-нің дәлдігі және ақауларға сезімталдығы төмендейді, сол себепті пластина ТБТ-тің тұтас аймағында бірдей температураны қамтамасыз ете отырып, ағынды теңестіреді. Жоғарыда берілген өрнекпен пластинаның да жылулық кедергісін анықтасақ,

$$R_n = \frac{h}{\lambda S} = \frac{0,002}{200 \cdot 0,001661} \approx 0,00602 K / Bm, \text{ ал сәйкесінше } 0,01661 \text{ Вт жылу ағыны}$$

кезінде температураның төмендеуі  
 $\Delta T_n = Q \cdot R_n = 0,01661 \text{ м}^2 \cdot 0,00602 \text{ К} / \text{Вт} \approx 0,0001^\circ \text{С}$  өте төмен, бұл жылу берілу кезінде алюминийдің жоғары тиімділігін көрсетеді. Мысалы, егер қыздырғыштың ортасындағы температура  $30^\circ \text{С}$ , ал шет жақтарында  $28^\circ \text{С}$  болса, онда жоғары жылуөткізгіштігіне байланысты алюминий пластина градиентті  $<0,01^\circ \text{С}$  дейін азайтады.

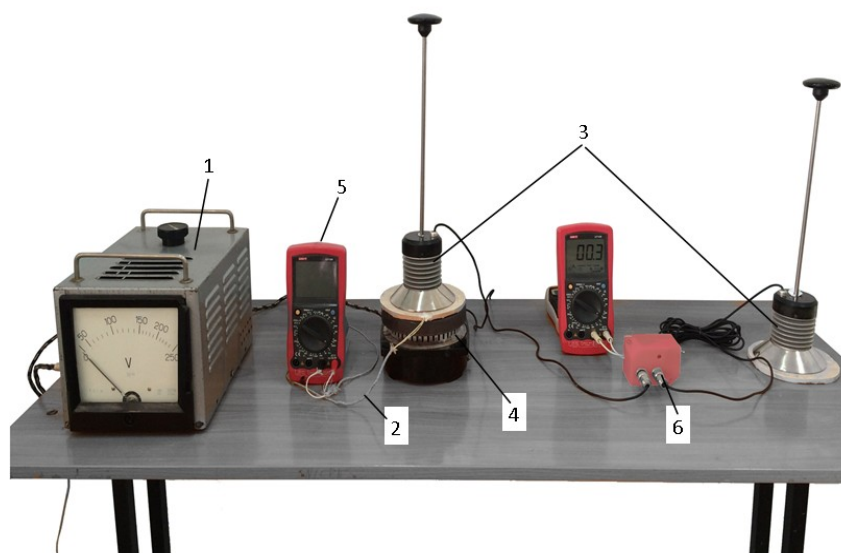
Демек,  $\Delta T_2 (<0,00003^\circ \text{С})$  және  $\Delta T_n (<0,0001^\circ \text{С})$  төмен көрсеткіштері ТБТ-ке берілетін жылу ағынын жақсартып, аз жылу шығынын қамтамасыз етеді.

### **3.3 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны градуирлеу**

Зерттеу жұмысының барысында термоЭҚК пен температура өзгерісі арасындағы тәуелділікті анықтау арқылы жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны градуирлеу жүргізілді. Градуирлеудің мақсаты - термоджұптардың термо-ЭҚК-нің мәні мен Цельсий градусындағы сәйкес температура арасындағы тікелей байланысты көрсететін градуирлеу коэффициентін анықтау болып табылады. Жүргізілген зерттеулер құрылғының дұрыс жұмыс істеуі үшін қажетті дәл калибрлеу сипаттамасын орнатуға мүмкіндік береді.

Эксперимент барысында әртүрлі температура градиенттерінде пайда болатын термоЭҚК мәндері анықталады, бұл термоЭҚК коэффициентін (Зеебек коэффициентін) есептеуге және жылу ағынын өлшеу дәлдігін арттыруға мүмкіндік береді.

Әзірленген жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішпен салыстырылып, термоЭҚК және температура арасындағы тәуелділікті орнату үшін термоЭҚК-тің коэффициентін анықтау мақсатында құрылғыны градуирлеу жүргізілді. ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішін градуирлеу үшін 16-суретте көрсетілгендей зертханалық стенд жинақталып, термператураның термоЭҚК-нен өсімшесі анықталды. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны градуирлеу  $20^\circ \text{С}$  температурада стандартты мыс-константан термоджұбының көмегімен жүзеге асырылды [115, 116].



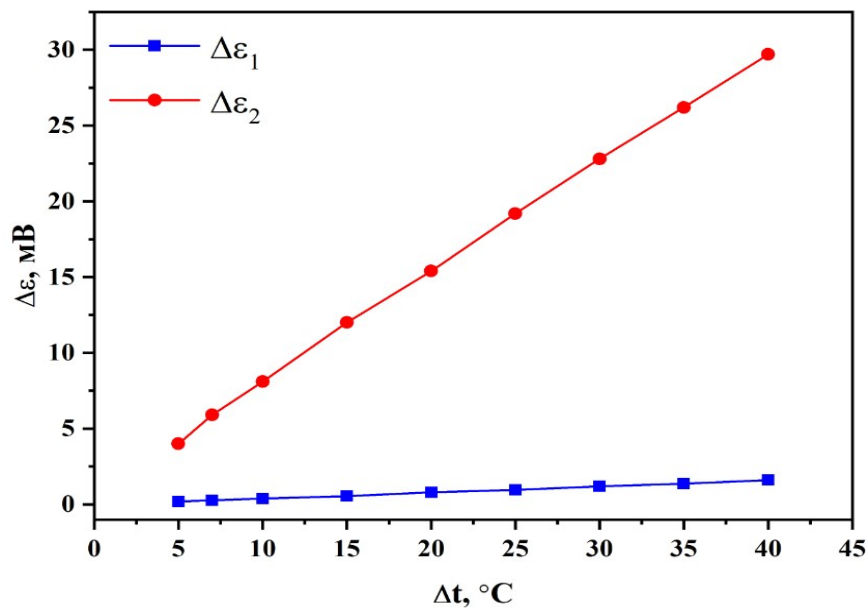
Сурет 16 - Температураны градуирлеуге арналған зертханалық стенд: 1 - зертханалық автотрансформатор; 2 - стандартты мыс-константан терможұбы; 3 - ИТП-1М жылу ағынын өлшеуіші; 4 - зертханалық пеш; 5 – мультиметр; 6 - жылу ағынын өлшеуішті ажыратып-қосқыш

ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішін градуирлеу нәтижесінде алынған эксперимент нәтижелері келесі кесте мен графикте берілген (9-кесте, 17-сурет).

Кесте 9 – ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішін градуирлеу кестесі

| $\Delta t, ^\circ\text{C}$ | Стандартты мыс-<br>константан терможұбы  |                                                | ИТП-1М жылу ағынын<br>өлшеуіші               |                                                    |
|----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                            | $\Delta \epsilon_{\text{ст}}, \text{мВ}$ | $\alpha_{\text{ст}}, \text{мВ}/^\circ\text{C}$ | $\Delta \epsilon_{\text{ИТП-1М}}, \text{мВ}$ | $\alpha_{\text{ИТП-1М}}, \text{мВ}/^\circ\text{C}$ |
| 5                          | 0,195                                    | 0,039                                          | 4                                            | 0,8                                                |
| 7                          | 0,273                                    | 0,039                                          | 5,9                                          | 0,842857                                           |
| 10                         | 0,391                                    | 0,039                                          | 8,1                                          | 0,81                                               |
| 15                         | 0,549                                    | 0,037                                          | 12                                           | 0,8                                                |
| 20                         | 0,790                                    | 0,039                                          | 15,4                                         | 0,77                                               |
| 25                         | 0,951                                    | 0,038                                          | 19,2                                         | 0,768                                              |
| 30                         | 1,196                                    | 0,039                                          | 22,8                                         | 0,76                                               |
| 35                         | 1,362                                    | 0,0385                                         | 26,2                                         | 0,748571                                           |
| 40                         | 1,611                                    | 0,04                                           | 29,7                                         | 0,7425                                             |

Ескерту.  $\Delta t$ – температураның өсімшесі;  $\alpha_{\text{ст}}$ ,  $\alpha_{\text{ИТП-1М}}$  – стандарттық және ИТП-1М жылу ағыны өлшегішінің термоЭҚК-і коэффициенті.



Сурет 17 - Стандартты мыс-константан терможұбының термоЭҚК-інің ( $\Delta\varepsilon_1$ ) және ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішінің термоЭҚК-і ( $\Delta\varepsilon_2$ ) температура өзгерісінен тәуелділігі

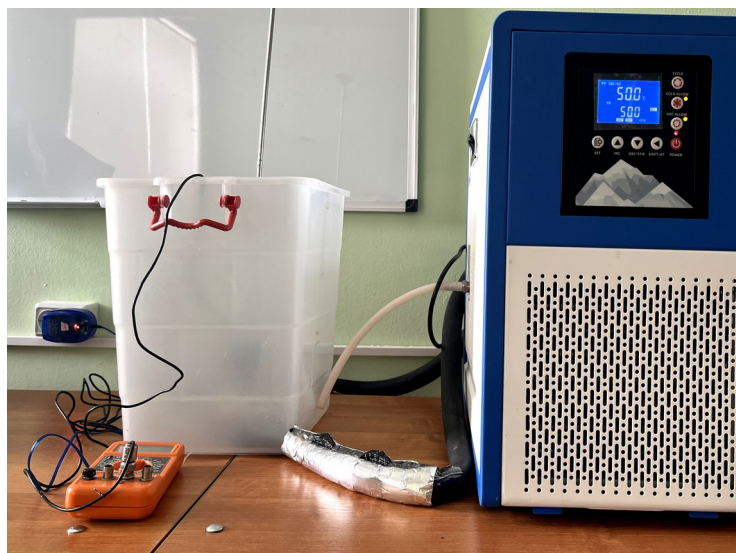
Графиктен ИТП-1М жылу ағынын өлшеуішінің термоЭҚК-інің мәні ( $\Delta\varepsilon_2$ ) стандартты құрылғының градуирлеу мәндерімен ( $\Delta\varepsilon_1$ ) салыстырғанда шамамен 20 есе артық екенін көруге болады.

ТермоЭҚК-інің коэффициенті келесі формула бойынша анықталады:

$$\alpha = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \quad (3.1)$$

Формула бойынша есептелген термоЭҚК коэффициентінің алынған мәні барлық температура мәндері үшін шамамен бірдей ( $\alpha_{\text{орт}} = 0,7824 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ ), бұл кез келген зерттелетін заттың температурасын анықтауға мүмкіндік береді.

Әзірленген жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының градуирлеу тұрақты температураны ұстап тұратын зертханалық термостаттың көмегімен жүргізілді. Термостатқа жалғанған қыздырылған беттің үстіне құрылғы оның сезімтал элементін біркелкі қыздыруды қамтамасыз ететіндей орналастырылды, ал температураны бақылау оның тікелей жанында орналасқан датчик арқылы жүзеге асырылды (18-сурет).



Сурет 18 – Температураны градуирлеуге арналған зертханалық стенд

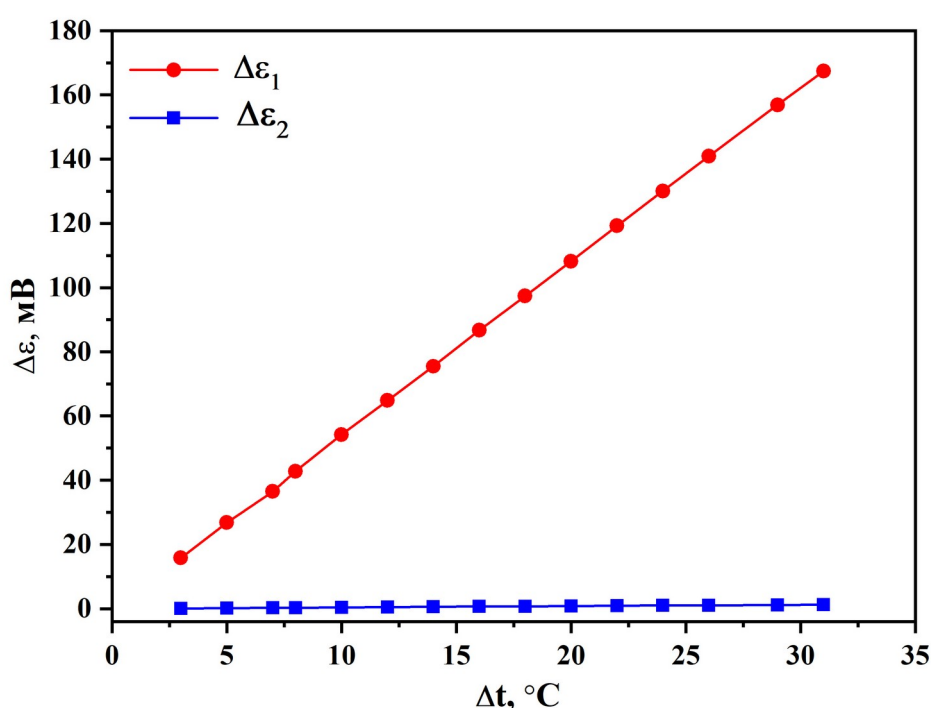
Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының термоэлектрлік батареялы түрлендіргіші мыс-константан өткізгіштерінен әзірленгендіктен, оның көрсеткіштері бір жұмыс түйінді мыс-константан терможұбының көрсеткіштерімен салыстырылды. Эксперимент барысында ортаның температурасы 19-20°C, ал зерттеу 22°C-ден 50°C аралығында әрбір 2°C қадаммен жүргізілді. Термостат әртүрлі температуралық режимдерге кезекпен орнатылып, әр температура үшін құрылғының терможұбында пайда болатын термо-ЭҚК-нің мәндері тіркелді. Өлшеулер тұрақтандырылған температура мәндерінде жүргізілді, бұл жылу ауытқуларына байланысты қателіктерді барынша азайтуға мүмкіндік берді. Зерттеу нәтижелері Зеебек коэффициентін (термоЭҚК коэффициенті) есептеу және құрылғыны әрі қарай градуирлеу үшін пайдаланылды.

Алынған деректер негізінде термо-ЭҚК-нің температура айырмасына тәуелділігі тұрғызылды (10-кесте, 19-сурет).

Кесте 10 - Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны градуирлеу кестесі

| $\Delta t$ ,<br>°C | Мыс-<br>константан<br>терможұбы<br>арқылы<br>анықталған<br>ЭҚК, $\Delta \epsilon$ , мВ | Мыс-<br>константан<br>терможұбының<br>термоЭҚК<br>коэффициенті<br>$\alpha$ , мВ/°C | Жылу ағынының<br>тығыздығын<br>өлшеуге<br>арналған<br>құрылғының<br>көрсеткіші<br>(ЭҚК), $\Delta \epsilon$ , мВ | Жылу ағынының<br>тығыздығын<br>өлшеуге арналған<br>құрылғының<br>термоЭҚК<br>коэффициенті<br>$\alpha$ , мВ/°C |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3                  | 0,11                                                                                   | 0,037                                                                              | 16,26                                                                                                           | 5,42                                                                                                          |
| 5                  | 0,18                                                                                   | 0,036                                                                              | 27,05                                                                                                           | 5,41                                                                                                          |
| 7                  | 0,26                                                                                   | 0,037                                                                              | 37,94                                                                                                           | 5,42                                                                                                          |

|    |      |        |        |      |
|----|------|--------|--------|------|
| 8  | 0,33 | 0,0412 | 43,52  | 5,44 |
| 10 | 0,42 | 0,042  | 54,2   | 5,42 |
| 12 | 0,52 | 0,0433 | 64,8   | 5,4  |
| 14 | 0,58 | 0,0414 | 75,46  | 5,39 |
| 16 | 0,66 | 0,0413 | 86,72  | 5,42 |
| 18 | 0,72 | 0,04   | 97,38  | 5,41 |
| 20 | 0,82 | 0,041  | 108,2  | 5,41 |
| 22 | 0,9  | 0,0409 | 119,24 | 5,42 |
| 24 | 1,01 | 0,0421 | 130,08 | 5,42 |
| 26 | 1,08 | 0,0415 | 140,92 | 5,42 |
| 29 | 1,15 | 0,0396 | 156,89 | 5,41 |
| 31 | 1,23 | 0,0397 | 167,4  | 5,4  |



Сурет 19 - Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының термоЭҚК-і ( $\Delta\varepsilon_1$ ) және стандартты мыс-константан терможұбының термоЭҚК-інің ( $\Delta\varepsilon_2$ ) температура өзгерісінен тәуелділігі

Зерттеулер нәтижесінде бір жұмыс түйінді мыс-константан терможұбы үшін термоЭҚК коэффициентінің орташа мәні  $\alpha_{\text{орт}} = 0,0403 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , ал жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының орташа мәні  $\alpha_{\text{орт}} = 5,415 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$

құрайды. Құрылғының стандартты ауытқуы  $\sigma_\alpha \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}} \approx 0,012 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , ал

кездейсоқ қателігі  $\Delta\alpha_{\text{кезб}} \approx 0,0067 \text{ мВ}/^\circ\text{C}$ , яғни салыстырмалы кездейсоқ қателігі 0,12%. Бұл жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының термобатарея контурындағы жалпы термоЭҚК-інің мәні жеке термоэлектрлік

түрлендіргіштің мәнінен үлкен, яғни жалпы шығыс сиганалын артатынын көрсетеді, демек құрылғының сезімталдығы жоғары екенін сипаттайды.

Құрылғының температура өзгерістеріне сезімталдығын көрсететін термо-ЭҚК коэффициентін салыстыру негізінде ИТП-1М жылу ағынын өлшегішінің орташа мәні  $0,7824 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ , ал жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының орташа мәні  $5,415 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ , демек әзірленген құрылғының термо-ЭҚК коэффициенті ИТП-1М жылу ағынын өлшегішінен 6,9 есе артық. Бұл құрылғының жылу ағынын өлшеудегі жоғары сезімталдығын көрсетеді. Осылайша, жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы негізгі метрологиялық сипаттамалары бойынша ұқсас құрылғылардан асып түседі және белгілі бір температура диапазонында жылу ағынын дәлірек әрі жылдам өлшеу үшін пайдаланылуы мүмкін.

### 3.4 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының түрлендіру теңдеуі

Мыс-константан термोजұбы (Т типі) үшін түрлендіру теңдеуі термоэлектрлік қозғаушы күшті (Е, микровольтпен) ыстық және суық түйіндер арасындағы температура айырымымен ( $\Delta T = T_{\text{ыстық}} - T_{\text{суық}}$ ) байланыстырады. Ол эксперименталды деректер негізінде анықталады және полином, кестелік мәндер немесе IEC 60584-1 немесе NIST сияқты стандарттар арқылы сипатталады.

$-200^{\circ}\text{C}$ -тан  $+400^{\circ}\text{C}$ -қа дейінгі  $T_{\text{ыстық}}$  температуралар диапазонында термо-ЭҚК-ін келесі полиноммен аппроксимациялауға болады.

$$E(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots + a_nT^n,$$

мұндағы  $E(T)$  - термо-ЭҚК (мкВ);  $T$  — ыстық түйіннің температурасы ( $^{\circ}\text{C}$ );  $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  — температура диапазонына тәуелді коэффициенттер.

Мыс-константан термोजұбы үшін полиномиалды коэффициенттерді NIST деректер базасынан алуға болады. NIST деректер базасы – АҚШ-тың Ұлттық стандарттар және технологиялар институты (Institute of Standards and Technology, NIST) әзірлеген және қолдау көрсететін ғылыми деректер мен құралдар жиынтығы. NIST ғылымда, техникада және өнеркәсіпте қолданылатын жоғары дәлдіктегі деректерді стандарттау және дәл есептеулер үшін ұсынады.

Осы деректер базасына сәйкес, мыс-константан термोजұбы  $-200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 0^{\circ}\text{C}$  температура диапазонда келесі полиноммен сипатталады:

$$E(T) = \sum_{i=0}^{10} a_i T^i$$

мұндағы,

$$a_0 = 0.0; \quad a_1 = 3.8748106364 \cdot 10^{-2}; \quad a_2 = 4.4194434347 \cdot 10^{-5}; \quad a_3 = 1.1844323105 \cdot 10^{-7}; \\ a_4 = 2.0032046972 \cdot 10^{-8}; \quad a_5 = 9.0138019559 \cdot 10^{-10}; \quad a_6 = 2.2651156593 \cdot 10^{-11};$$

$$a_7 = 3.6071154205 \cdot 10^{-13}; \quad a_8 = 3.8493939883 \cdot 10^{-15}; \quad a_9 = 2.8213521925 \cdot 10^{-17}; \\ a_{10} = 1.4251594779 \cdot 10^{-19}.$$

Ал  $0^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C}$  температура диапазо́нда мыс-константан терможұбы келесі полиноммен сипатталады:

$$E(T) = \sum_{i=0}^6 b_i T^i$$

мұндағы

$$b_0 = 0.0; \quad b_1 = 3.8748106364 \cdot 10^{-2}; \quad b_2 = 3.3292227880 \cdot 10^{-5}; \quad b_3 = 2.0618243404 \cdot 10^{-7}; \\ b_4 = -2.1882256846 \cdot 10^{-9}; \quad b_5 = 1.0996880928 \cdot 10^{-11}; \quad b_6 = -3.0815758772 \cdot 10^{-14}.$$

Есептеу мысалы ретінде ыстық түйіннің температурасы  $T_{\text{ыстық}} = 100^\circ\text{C}$  және суық түйіннің температурасы  $T_{\text{суық}} = 0^\circ\text{C}$  болған жағдайды қарастырайық. Алдымен,  $T = 100^\circ\text{C}$  мәнін теңдеуге қойып,  $b_i$  коэффициенттерінің көмегімен  $E(T)$  есептейміз. Нәтижесінде  $E(100^\circ\text{C}) \approx 4.277\text{мВ}$  мәніне тең.

Температура түрлендіргіші үшін жалпы түрлендіру теңдеуін сипаттауға болады:

$$E(T) = N_{\text{sum}} \cdot \begin{cases} \sum_{i=0}^{10} a_i T^i & \text{егер } -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C} \\ \sum_{i=0}^6 b_i T^i & \text{егер } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \end{cases}$$

мұндағы  $N_{\text{sum}}$  - өлшеу түрлендіргішінде тізбектей жалғанған терможұптардың жалпы саны.

Температураны жылу өткізгіштік арқылы жылу ағынының тығыздығына ( $q$ ) түрлендіру теңдеуін алу үшін, Фурье заңына негізделген физикалық тәртіпті ұстану қажет. Осы түрлендіру теңдеуін толығырақ қарастырайық.

Фурье заңы материал арқылы жылу ағынын былай сипаттайды:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x},$$

мұндағы  $q$  – жылу ағынының тығыздығы ( $\text{Вт/м}^2$ );  $\lambda$  – материалдың жылу өткізгіштігі ( $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$ );  $\Delta T = T_2 - T_1$  - материал ұштарындағы температура айырымы ( $^\circ\text{C}$  немесе  $\text{К}$ );  $\Delta x$  – материалдың қалыңдығы ( $\text{м}$ ).

Жылу ағыны  $q$  температура градиентіне  $\Delta T$  және материалдың жылу өткізгіштік  $\lambda$  қасиеттеріне тура пропорционал. « $-$ » таңбасы жылу ағынының бағытын көрсетеді, яғни жылу жоғары температурадан төмен температураға қарай қозғалады.

Материалдың жылу өткізгіштігі  $\lambda$  біртекті материалдар үшін тұрақты, ал температураға тәуелді болуы да мүмкін (бұл жағдайда интегралдау қажет).

Температураға тәуелді жылу өткізгіштікке ие материалдар үшін жылу ағынының тығыздығы келесідей түрде болады:

$$q = - \frac{1}{\Delta x} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(T) dT$$

Егер материал бірнеше қабаттан тұратын болса, жылу берілуді келесі өрнекпен есептеуге болады:

$$q = \frac{\Delta T}{\sum \frac{\Delta x_i}{\lambda_i}}$$

Терможұп термо-ЭҚК ( $E$ )  $E = f(\Delta T)$  арқылы температура айырымын ( $\Delta T = T_2 - T_1$ ) өлшейді, мұндағы  $f(\Delta T)$  - мыс-константан терможұбы үшін полином немесе деректер кестелерімен берілетін түрлендіру функциясы. Онда жылу ағынының тығыздығын есептеуге арналған келесі теңдеуді алуға болады:

$$q = - \lambda \cdot \frac{b_0 + b_1 E + b_2 E^2 + b_3 E^3 + \dots + b_n E^n}{\Delta x}$$

Бұл формула жылу ағынының тығыздығын терможұп өлшеулерімен тікелей байланыстыруға мүмкіндік береді.

Енді жылу ағынының тығыздығы бойынша сезімталдық теңдеуін қорытып шығарайық. Жылу ағынының тығыздығы бойынша сезімталдық теңдеуін  $S_q$  анықтау үшін өлшенетін шаманың (мысалы, терможұптың термо-ЭҚК-і) өзгеруін жылу ағынының тығыздығының өзгеруімен байланыстыру керек.

Жылу ағынының тығыздығы бойынша сезімталдық  $S_q$  шығыс сигналының ( $E$ , термо-ЭҚК) жылу ағынының тығыздығына  $q$  қатысты туындысы арқылы анықталады:

$$S_q = \frac{\partial E}{\partial q},$$

мұндағы  $S_q$  - сезімталдық (мкВ/Вт·м<sup>2</sup>);  $E$  - термо-ЭҚК (мкВ);  $q$  - жылу ағынының тығыздығы (Вт/м<sup>2</sup>).

$S_q = \frac{\partial E}{\partial q}$  өрнегінен жылу ағынының тығыздығы ( $q$ ) бойынша термо-ЭҚК-

нің ( $E$ ) туындысын есептейміз. Бұл үшін  $E = f\left(-\frac{q \cdot \Delta x}{\lambda}\right)$  тәуелділігін қолданамыз.

$$S_q = \frac{\partial f}{\partial \Delta T} \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial q}.$$

$\Delta T = - \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda}$  өрнегін қолданып,  $\frac{\partial \Delta T}{\partial q}$  туындысы

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial q} = - \frac{\Delta x}{\lambda}.$$

Орнына қою арқылы, келесіні аламыз:

$$S_q = \frac{\partial f}{\partial \Delta T} \cdot \left( - \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda} \right)$$

Жылу ағынының тығыздығы бойынша сезімталдықтың қорытынды формуласы:

$$S_q = - \frac{q \cdot \Delta x}{\lambda} \cdot \frac{\partial f}{\partial \Delta T},$$

мұндағы  $\frac{\partial f}{\partial \Delta T}$  термо-ЭҚК-ін түрлендіру теңдеуінен анықталады, мысалы

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta T} = a_1 + 2a_2 \Delta T + 3a_3 \Delta T^2 + \dots$$

Берілген формула материалдың қасиеттерін, қабаттың қалыңдығын және термोजұптың температура өзгерістеріне реакциясын ескереді.

### **3-бөлім бойынша қорытынды**

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының негізгі өлшеу элементі ретінде жоғары сезімталдығы, сипаттамасының сызықтылығы және сенімділігі үшін термоэлектрлік түрлендіргіш (термобатарея) таңдалды. Зертханада әзірленген жылу ағынының термоэлектрлік түрлендіргіші – мыс-константан сымының кезектесетін жартылай орамдардан тұратын жалпақ спираль түрінде жасалған және электр оқшаулағыш компаундпен құйылған. Мұндай құрылым түрлендіргіштің жоғары сезімталдығын қамтамасыз етеді және үлкен әрі кіші жылу ағындарын дәл өлшеуге мүмкіндік береді.

Жаңа интеграцияланған жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы ұсынылып, оның ғылыми-техникалық негіздемесі жасалды. Бұл құрылғыда екі жылуөлшеу блогының функциялары біріктіріліп, термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш пен жылыту элементі термоэлектрлік тоңазытқышқа орналастырылды. ТБТ-тің тұтас аймағында бірдей температураны қамтамасыз ете отырып, жылу ағынының біркелкі берілуі қамтамасыз ету

үшін жылуөткізгіштігі жоғары алюминий пластинасы орнатылды. Arctic MX-6 керамикалық пастасын  $\Delta T_2$  ( $<0,00003$  °C) және алюминий пластинасын  $\Delta T_n$  ( $<0,0001$  °C) қолдануда, температураның төменгі көрсеткіштері ТБТ-ке берілетін жылу ағынын жақсартып, аз жылу шығынын қамтамасыз етеді.

Құрылғының температура өзгерістеріне сезімталдығын көрсететін термо-ЭҚК коэффициентін салыстыру негізінде ИТП-1М жылу ағынын өлшегішінің орташа мәні  $0,7824$  мВ/°C, ал жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының орташа мәні  $5,415$  мВ/°C, демек әзірленген құрылғының термо-ЭҚК коэффициенті ИТП-1М жылу ағынын өлшегішінен  $6,9$  есе артық. Бұл құрылғының жылу ағынын өлшеудегі жоғары сезімталдығын көрсетеді.

## **4 ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ**

### **4.1 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны калибрлеу және түрлендіру коэффициентін анықтау**

Жылу ағыны тығыздығын дәл өлшеудің өзектілігі, бұл параметрдің ғылым мен техниканың әр түрлі салаларында кеңінен қолданылуымен

айқындалады. Жылу ағыны құрылғысын пайдаланып жылу ағынының тығыздығын анықтаудың маңызды кезеңі датчикті калибрлеу болып табылады. Бұл, датчиктің шығыс сигналын (кернеу немесе терможұптың ЭҚК) калибрлеу көзінен алынған жылу ағыны тығыздығының эталондық мәнімен салыстыру арқылы жүзеге асырылады. Осының нәтижесінде алынған түрлендіру коэффициенті датчик сигналын нақты жылу ағынының тығыздығымен байланыстырып, жоғары дәлдікпен өлшеуге мүмкіндік береді.

Термоэлектрлік батареялы түрлендіргішті (ТЭБТ) калибрлеу және оның түрлендіру коэффициентін анықтау – жылуды электр энергиясына (немесе керісінше) түрлендіру кезінде құрылғының жұмысының дәлдігі мен тиімділігін қамтамасыз ететін маңызды қадамдар болып табылады. Осыған байланысты, ТЭБТ-ті калибрлеу процесінің қалай жүргізілетінін және түрлендіру коэффициентін қалай анықтауға болатынын қарастырамыз.

Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіштің түрлендіру коэффициенті – датчиктің шығыс сигналы (термо-ЭҚК, мВ) мен өлшенетін жылу ағыны тығыздығы ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ ) арасындағы сызықтық тәуелділікті білдіретін сандық көрсеткіш болып табылады:

$$k = \frac{q}{E}, \quad (4.1)$$

мұндағы  $k$  – түрлендіру коэффициенті,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ ;  $q$  – жылу ағынының беттік тығыздығы,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $E$  – шығыс сигналының мәні (термоЭҚК), мВ.

Ол аталған шамалар арасындағы функционалдық байланысты көрсетеді, әрі термо-ЭҚК мәнін жылу ағынының сәйкес тығыздығына айналдыруға мүмкіндік береді. Дәлірек айтқанда, термо-ЭҚК 1 мВ-қа артқанда жылу ағынының тығыздығы қанша  $\text{Вт}/\text{м}^2$ -ге өсетінін көрсетеді. Құрылғының сезімталдығын жоғарылату үшін келесі әдістер қолданылады: біріншісі – сезімтал элементтің бірлік ауданындағы термобатареяның ыстық түйіндерінің санын көбейту, екіншісі – термобатареяның жылу сыйымдылығын азайту және тармақтары арқылы жылудың берілуін азайту есебінен ыстық түйіндердің температурасын арттыру.

Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғыны калибрлеу үшін эталондық көз ретінде қуаты реттелетін қыздырғыш пеш қолданылды. Ал құрылғының термоЭҚК-ін өлшеуге цифрлық мультиметр (UNI-T UT106) қолданылды. Қоршаған ортаның температурасы  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  шегінде ұсталып тұрды, бұл жағдайдың тұрақтылығын қамтамасыз етіп, жылу жоғалту әсерін барынша азайтты.

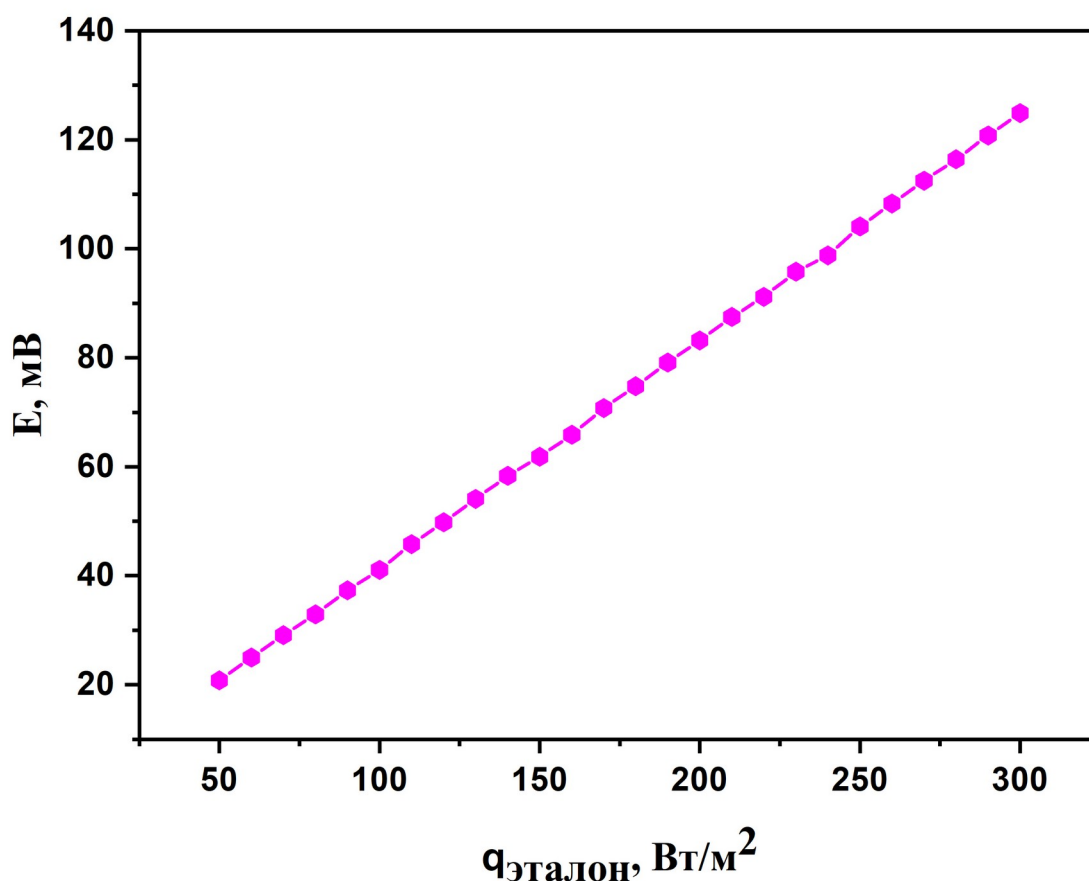
Эксперименттің әдістемесі ГОСТ 8.563–2009 «Өлшем бірлігін қамтамасыз етудің мемлекеттік жүйесі. Өлшеулерді орындау әдістемелері» және ASTM E1530 халықаралық стандарты «Жылу ағыны әдісі арқылы материалдардың жылу өткізгіштігін бағалау бойынша стандартты сынақ әдісі» талаптарына сәйкес дайындалды.

Жылу ағыны тығыздығының эталондық мәні ( $q_{\text{эталон}}$ ) 50-ден 300 Вт/м<sup>2</sup> арылығыны зерттелді, қыздырғыш плитаға сәйкесінше өзгертіліп отырды. Жылу ағыны тығыздығының әрбір эталондық мәні үшін термоЭҚК-н өлшеу 5 рет жүргізіліп, орташа мәні алынды. Өлшеу нәтижелері төменгі 11-кестеде көрсетілген.

Кесте 11 - Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғыны калибрлеу нәтижелері

| $q_{\text{эталон}}, \text{Вт/м}^2$ | $E, \text{мВ}$ | $k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ |
|------------------------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 50                                 | 20,8           | 2,4038                                      |
| 60                                 | 25             | 2,4                                         |
| 70                                 | 29,1           | 2,4054                                      |
| 80                                 | 32,9           | 2,4316                                      |
| 90                                 | 37,3           | 2,4128                                      |
| 100                                | 41,1           | 2,4330                                      |
| 110                                | 45,8           | 2,4017                                      |
| 120                                | 49,8           | 2,4096                                      |
| 130                                | 54,1           | 2,4029                                      |
| 140                                | 58,3           | 2,4013                                      |
| 150                                | 61,8           | 2,4271                                      |
| 160                                | 65,9           | 2,4279                                      |
| 170                                | 70,8           | 2,4011                                      |
| 180                                | 74,8           | 2,4064                                      |
| 190                                | 79,12          | 2,4014                                      |
| 200                                | 83,2           | 2,4038                                      |
| 210                                | 87,5           | 2,4                                         |
| 220                                | 91,2           | 2,4122                                      |
| 230                                | 95,8           | 2,4008                                      |
| 240                                | 98,8           | 2,429                                       |
| 250                                | 104,1          | 2,4015                                      |
| 260                                | 108,3          | 2,4007                                      |
| 270                                | 112,5          | 2,4                                         |
| 280                                | 116,4          | 2,4054                                      |
| 290                                | 120,8          | 2,4006                                      |
| 300                                | 124,9          | 2,4019                                      |

Эксперимент нәтижелерінде алынған мәндердің негізінде жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының түрлендіру коэффициенті (4.1) формуланың көмегімен анықталды. Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының калибрлеу нәтижелерінің графигі 20-суретте көрсетілген.



Сурет 20 - Калибрлеу сипаттамасының графигі

Құрылғының тұрақтылығын бағалау үшін түрлендіру коэффициентінің орташа мәнін анықтаймыз:

$$\bar{k} = \frac{\sum k_i}{N} = \frac{62,6099}{26} \approx 2,4080 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{мВ}$$

$k$  мәндерін бағалау үшін стандартты ауытқуды есептейміз:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{0,00307189}{25}} \approx 0,011 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{мВ}$$

Кездейсоқ қаттелігі:

$$\Delta k_{\text{кезд}} = t \cdot \frac{\sigma_k}{\sqrt{n}} = 2,060 \cdot \frac{0,011}{\sqrt{26}} \approx 0,0044 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{мВ}$$

Салыстырмалы кездейсоқ қателігі:

$$\delta k_{\text{кезд}} = \frac{\Delta k_{\text{кезд}}}{\bar{k}} \cdot 100\% = \frac{0,0044}{2,4080} \cdot 100\% \approx 0,18\%$$

$k$  мәнінің жүйелік қателігі эталондық жылу ағынының қателігін (сертификатталған құралдар үшін әдеттегі мән  $\delta q_{\text{etalon}} \approx 0,5\%$ ) және ТермоЭҚК өлшеу қателігін ескереді:

$$\delta k_{жүйел} = \sqrt{\delta q_{эталон}^2 + \delta E^2}.$$

ТермоЭҚК өлшеу қателігі:

Кездейсоқ қателігі  $k$  мәндерінің ауытқуы негізінде бағаланады:

$$\delta k_{станд} = \frac{\sigma_k}{k} \cdot 100\% = \frac{0,0011}{2,4080} \cdot 100\% \approx 0,45\%$$

Жүйелік қателігі орташа мәнінен ең үлкен ауытқуды бағалау арқылы анықталады:

$$\Delta k_{max} = |2,4330 - 2,4080| = 0,025 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{мВ}$$

Кездейсоқ жүйелік қателік:

$$\delta k_{жүйел} = \frac{\Delta k_{max}}{k} \cdot 100\% = \frac{0,025}{2,4080} \cdot 100\% \approx 1,03\%$$

Берілген диапазон үшін мультиметрдің қателігі:

$$\delta E_{мультиметр} \approx 1,06\%$$

$\delta E$  жалпы қателігі:

$$\delta E = \sqrt{\delta E_{кезд}^2 + \delta E_{жүйел}^2 + \delta E_{мультиметр}^2} = \sqrt{0,0045^2 + 0,0103^2 + 0,0106^2} \approx 1,54\%$$

$$\delta q_{эталон} \text{ ескерсек, онда } \delta k_{жүйел} = \sqrt{0,005^2 + 0,0154^2} = 1,61\%$$

$k$  жалпы қателігі:

$$\delta k = \sqrt{\delta k_{кезд}^2 + \delta k_{жүйел}^2} = \sqrt{0,0018^2 + 0,0161^2} = 1,62\%$$

Құрылғының жалпы қателігі, яғни жылу ағыны тығыздығын өлшеуде жалпы салыстырмалы қателік:

$$\delta q = \sqrt{\delta k^2 + \delta E^2} = \sqrt{0,0162^2 + 0,0154^2} = 2,23\%$$

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылысының орташа түрлендіру коэффициентінің мәні  $2,408 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ . Стандартты ауытқуы ( $\approx 0,0011$ ) және жалпы қателігі  $2,23\%$  мәндері берілген диапазонда түрлендіру коэффициентінің жоғары тұрақтылығын көрсетеді. Демек, құрылғы тұрақты және сызықты өзгерісті көрсетеді. Бұл қателік калибрлеу эксперименті жағдайында әзірленген аспаптың дәлдік сипаттамасы ретінде қарастырылады. Дегенмен, нақты пайдалану жағдайында жылу жоғалтулары немесе қоршаған ортаның температурасының өзгеруі салдарынан қателіктің ұлғаюы мүмкін екенін атап өткен жөн. Бұл факторлар қазіргі есептеуге енгізілмеген, себебі эксперимент жылу жоғалтуларын барынша азайтатын жағдайларда жүргізілді.

## 4.2 Зертханалық жағдайларда жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны зерттеу

Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғыны зерттеу үшін зертханалық термостаттың сұйығы бар (су) резервуарына құрылғының қабылдағышы орналастырылды. Эталондық құрал ретінде ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегіші пайдаланылды (бұл құралдың температура қабылдағышы да суда орналастырылды). Жылу ағыны өлшегішінің қабылдағышы мыс-константан өткізгіштерінен әзірленгендіктен, оның көрсеткіштері бір жұмыс түйінді мыс-константан терможұбының көрсеткіштерімен салыстырылды (12-кесте) [117].

Кесте 12 - Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының эксперименттік нәтижелері

| Термостат температурасы, t, °C | ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегіші көмегімен анықталған температура, t, °C | Мыс-константан терможұбы арқылы анықталған ЭҚК, E, мВ | Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының көрсеткіші (ЭҚК), E, мВ |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 10                             | 10                                                                  | 0,45                                                  | 2,3                                                                          |
| 12                             | 12                                                                  | 0,52                                                  | 5,5                                                                          |
| 14                             | 14                                                                  | 0,58                                                  | 11,1                                                                         |
| 16                             | 16                                                                  | 0,64                                                  | 16,2                                                                         |
| 18                             | 18                                                                  | 0,71                                                  | 21,4                                                                         |
| 20                             | 20                                                                  | 0,79                                                  | 27                                                                           |
| 22                             | 22                                                                  | 0,85                                                  | 33,3                                                                         |
| 24                             | 24                                                                  | 0,92                                                  | 39,7                                                                         |
| 25                             | 25                                                                  | 0,97                                                  | 45,7                                                                         |
| 27                             | 27                                                                  | 1,05                                                  | 51,5                                                                         |
| 28                             | 28                                                                  | 1,12                                                  | 57,4                                                                         |
| 30                             | 30                                                                  | 1,21                                                  | 63,9                                                                         |
| 32                             | 32                                                                  | 1,31                                                  | 69,8                                                                         |
| 34                             | 34                                                                  | 1,37                                                  | 75,6                                                                         |
| 36                             | 36                                                                  | 1,45                                                  | 81,9                                                                         |
| 38                             | 38                                                                  | 1,51                                                  | 87,9                                                                         |
| 40                             | 40                                                                  | 1,61                                                  | 94                                                                           |
| 42                             | 42                                                                  | 1,69                                                  | 99,9                                                                         |
| 44                             | 44                                                                  | 1,80                                                  | 106,2                                                                        |
| 46                             | 46                                                                  | 1,87                                                  | 112,1                                                                        |
| 48                             | 48                                                                  | 2,77                                                  | 118,3                                                                        |
| 50                             | 50                                                                  | 2,82                                                  | 124,3                                                                        |

Алынған нәтижелерден судың температурасын 10 °C-ден 50 °C-ге дейін әрбір 2 °C сайын арттырғанда бір түйінді терможұптың көрсеткіші 0,45 мВ-

тан 2,82 мВ-қа өзгердені анықталды. Ал жылу ағыны өлшегішінің көрсеткіші аталған температура аралығында 2,3 мВ-тан 124,3 мВ-қа артты.

11-кестеден бір түйінді термोजұптың көрсеткіштеріне қарағанда жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының көрсеткіші шамамен жоғары екені анықталды. Бұл құралдың сезімталдығының артқанын көрсетеді. Тәжірибе нәтижелерінен судың температурасын 2 °С өзгерткенде Жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғы арқылы анықталған электр қозғаушы күшінің өзгерісі шамамен 5,7-6,4 мВ аралығын құрады.

Жылу желілерінің құбырлары жер қабатында орналасқанда олардың үстіңгі қабаты құммен жабылатын болғандықтан, құм қабатындағы температура өзгерісін анықтау үшін зертханалық стенд жинақталды (21-сурет). Құмның фракциясының диаметрі 0,1-0,3 мм аралығын құрады. Мұндай өлшемдегі ұнтақ материал электроимпульсті әдіспен алынды. Зерттелетін нысан (құм) биіктігі 300 мм, ені 150 мм, ұзындығы 150 мм пластикалық ыдысқа орналастырылды.

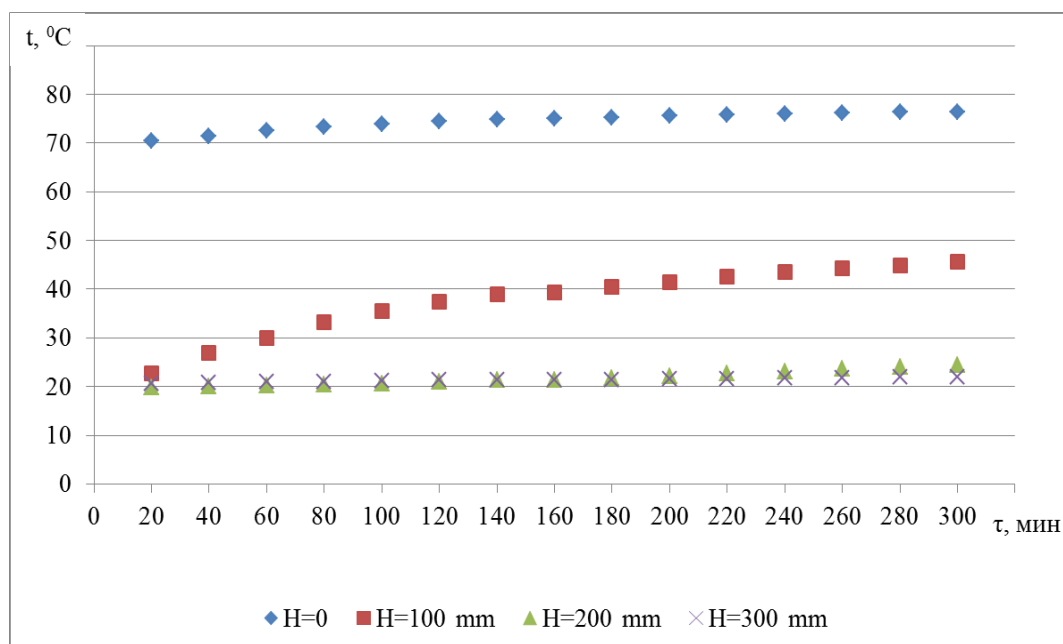


Сурет 21 - Зертханалық стенд

Ыдыстың төменгі бөлігінде қыздырғыш құбыр орналастырылды. Құбырға зертханалық термостаттан қыздырылған су берілді. Сусымалы материалдардың қабатындағы температура өзгерісі жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғы, ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегіші және цифрлы мультиметрмен бақыланды. Бұл мультиметрде қабылдағыш ретінде хромель-алюмель термोजұбы қолданылды.

Құм қабатындағы температура өзгерісін анықтауға арналған стендті сынақтан өткізу үшін құм қабатындағы жылу құбырынан әртүрлі қашықтықта қабылдағыштар орналастырылып, температураның өзгерісі

уақытқа тәуелді анықталды (22-сурет). Құм қабатына жылу беру үшін термостаттан құбырға берілетін су температурасы  $80^{\circ}\text{C}$  болды.



Сурет 22 - Құм қабатындағы температураның уақытқа байланысты өзгерісі

Жылуөткізгіштен әртүрлі қашықтықта орналасқан құм қабаттарыдағы температуралардың өлшеу нәтижелері бойынша:

$H=0$  – бұл жылу құбырының бетінде қабылдағыштар орналастырылған кездегі алынған нәтижелер;

$H=100$  мм,  $H=200$  мм,  $H=300$  мм – сәйкесінше құм қабатындағы жылу құбырынан қабылдағыштарды 100 мм-ден 300 мм қашықтыққа орналастырғандағы алынған нәтижелер.

24-суретте келтірілген құм қабатындағы температура өзгерісінің нәтижелерінен әрбір 20 минут уақыт аралығынан кейін алынған мәліметтерден құбыр бетінде орналасқан ( $H=0$ ) қабылдағыш арқылы анықталған температура  $70,5^{\circ}\text{C}$ -дан  $76,4^{\circ}\text{C}$ -ға өзгергенін, ал жылу алмастырғыштан 100 мм қашықтықта құм қабатындағы температура  $22,8^{\circ}\text{C}$ -дан  $45,6^{\circ}\text{C}$ -ға өзгергені анықталды. Жылу алмастырғыштан 200 мм ( $19,9^{\circ}\text{C}$ -дан  $24,5^{\circ}\text{C}$  аралығында) және 300 мм қашықтықта ( $20,7^{\circ}\text{C}$ -дан  $22^{\circ}\text{C}$  аралығында) температура аса өзгеріске ұшырамады.

Нәтижесінде, жылуалмастырғышқа жақын құм қабатында температураның едәуір өзгерісі байқалды, ал одан алшақтаған сайын температура өзгерісінің шамасы айтарлықтай азайды.

Келесі зерттеулерде құрылғы көмегімен жер үсті жылу трассасында сынақтар жүргізілді (13-кесте). Қарастырылған жылу желісі қысқы мезгілде зерттелді. Жылу трассасында оның оқшауы мен сыртқы қабатында (металл қорғаныс бөлігі) температура өзгерісі зерттелді.

Кесте 13 - Жылу желісінің барлық ұзындығы бойынша алынған температураның эксперименттік мәндері

| Жылу желісінің ұзындығы, мм | Жылу желісінің температурасы, °C<br>(сыртқы орта температурасы 9,3 °C) | Жылу желісінің температурасы, °C<br>(сыртқы орта температурасы 13,5 °C) |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 500                         | 14,5                                                                   | 18,1                                                                    |
| 1000                        | 13,3                                                                   | 17,8                                                                    |
| 1500                        | 14,1                                                                   | 17,2                                                                    |
| 2000                        | 12,9                                                                   | 16,4                                                                    |
| 2500                        | 14,8                                                                   | 18,6                                                                    |

Тұтынушыларды жылумен жабдықтауда ғимараттың кірісіндегі құбырдың температурасы өлшенетін болғандықтан, жұмыста аталмыш құрылғымен құбырдың ұзындығы бойынша әрбір 500 мм сайын өлшеулер жүргізілді. Жылу желісі бойынша жалпы өлшеулер 2500 мм болды.

12-кестеден жер үсті жылу желісінің ұзындығы бойынша жүргізілген зерттеу нәтижелерінен қарастырылған нүтелердегі температура өзгерісі шамамен бірдей екенін байқауға болады. Бұл мәліметтерден құбырдың, оның оқшауы және сыртқы қорғаныс бөлігінің ақауланбағаныны анықталды.

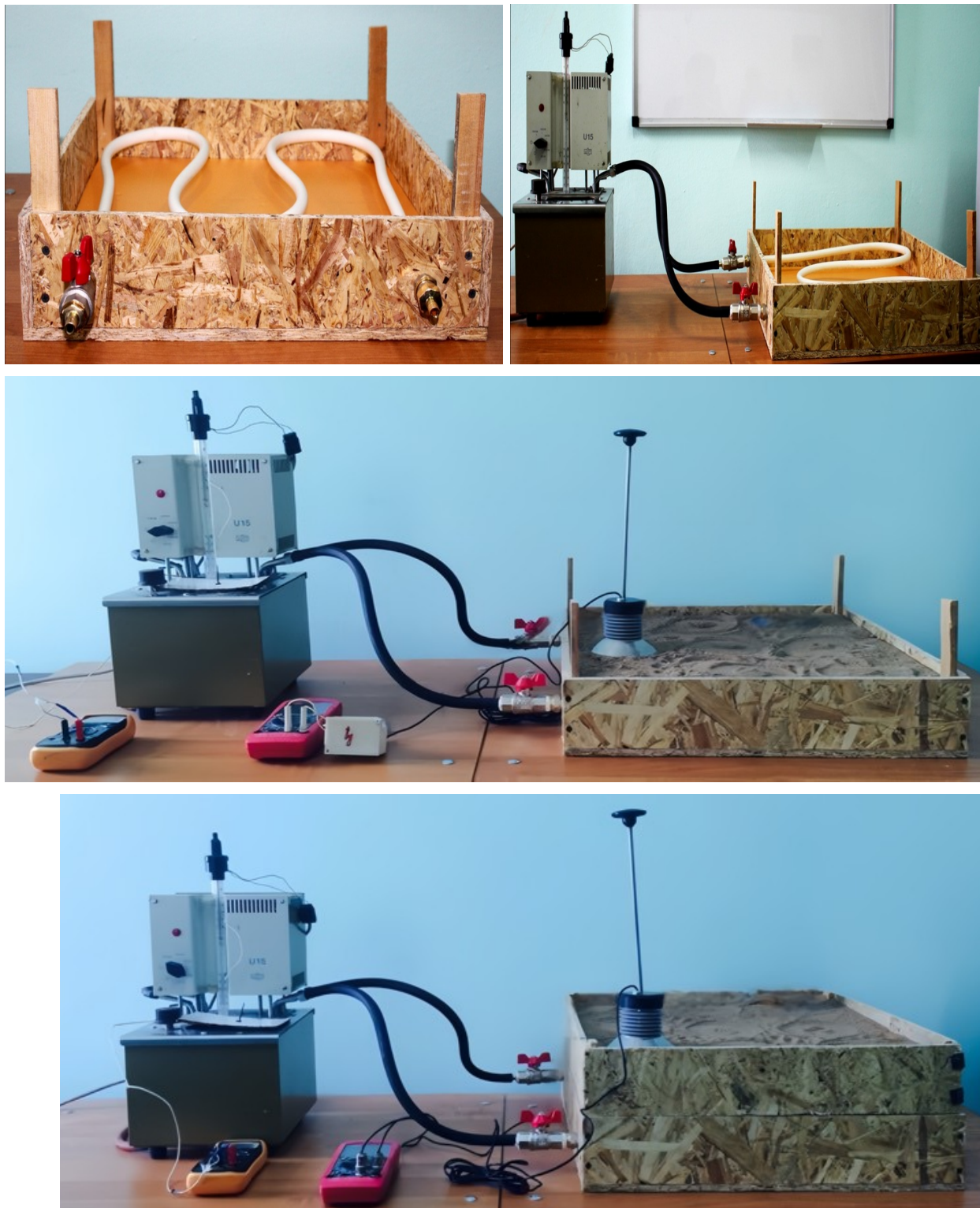
Алынған мәліметтерге сәйкес, стандартты градуирлеу мәндермен салыстырғанда, мыс-константан термोजұптары мен құрылғы көрсеткіштері шамамен 30 есеге нормадан асып түседі. Мұның себебі, жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының сезімталдығы термобатарея контурындағы термо-ЭҚК-нің жалпы мәні жеке термоэлектрлік түрлендіргішке қарағанда N есе көп болуымен байланысты, яғни датчик сезімталдығының жоғарылауына әкеледі.

Зерттеу жұмысы барысында жер астындағы жылу желісінің әртүрлі параметрлерінің топырақтың температуралық өрісіне тигізетін әсері де қарастырылды. Зерттеудің өзектілігі, жер асты құбырларының жылу оқшаулағыш тиімділігін арттыру, сондай-ақ құбыр мен қоршаған топырақ арасындағы жылу алмасу ерекшеліктерін ескере отырып, жылу желілерінің жұмысын оңтайландыру қажеттілігімен байланысты.

Зерттеу жұмысы барысында жылу желісіндегі жылу тасымалдағыштың және қоршаған ортаның температурасының, құбырлардың орналасу тереңдігінің және олардың техникалық параметрлерінің жылу желісінің үстіндегі топырақ бетінен жылу ағыны тығыздығының таралу сипатына әсері эксперименттік стенд арқылы зерттелді.

Қойылған мақсатқа жету үшін жер асты жылу оқшаулағыш жүйесінің шағын құрылымдық моделін құрастырдық. Бұл модель оның әртүрлі пайдалану жағдайларындағы тиімділігін анықтауға, сонымен қатар әртүрлі

температуралық режимдер мен ылғалдылық жағдайларындағы жылу оқшаулағыш қасиеттерін талдауға арналған. Осының нәтижесінде материалдар мен құрылымдық шешімдердің нақты жағдайлардағы әрекетін нақтырақ бағалауға мүмкіндік береді. Модельдің жалпы көрінісі 23-суретте көрсетілген.



Сурет 23 - Жер асты жылу оқшаулағыш жүйесінің шағын құрылымдық моделінің эксперименттік стенді

Әзірленген модель жылу желісінің үстіндегі топырақта температураның таралуына әртүрлі факторлардың әсерін зерттеуге арналған. Нақтырақ айтсақ:

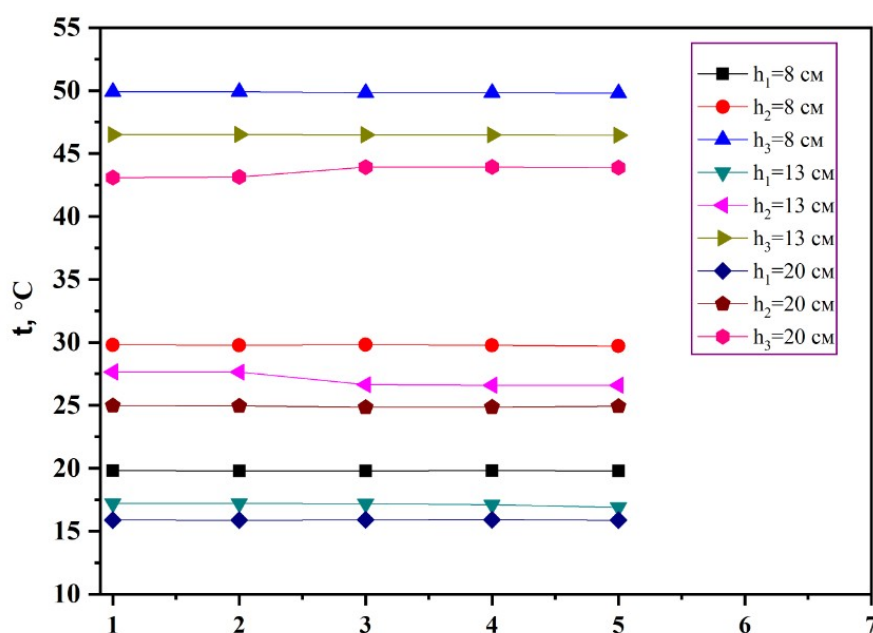
- жылу тасымалдағыштың температуралары: экспериментте жылу тасымалдағыштың үш түрлі мәні алынды: 17°C, 30°C және 40°C.

- құбырлардың орналасу тереңдігі: тәжірибеде құбырлардың орналасу тереңдігінің үш түрлі арақашықтығы алынды: 8 см, 13 см және 20 см.

Эксперимент барысында құбырлардың техникалық сипаттамалары тұрақты болды.

Жылу тасымалдағышты белгіленген температураға дейін қыздырылып, құм бетінен әр түрлі тереңдіктерде жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының термо-ЭҚК-і өлшенді.

Эксперимент нәтижелері жылу тасымалдағыштың температурасына, құбырдың орналасу тереңдігіне және қоршаған ортаның әсеріне байланысты жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының ЭҚК-нің тәуелділігін көрсететін график арқылы ұсынылған (24-сурет).



Сурет 24 - Әртүрлі қашықтықтардағы топырақ температурасының өзгеруі

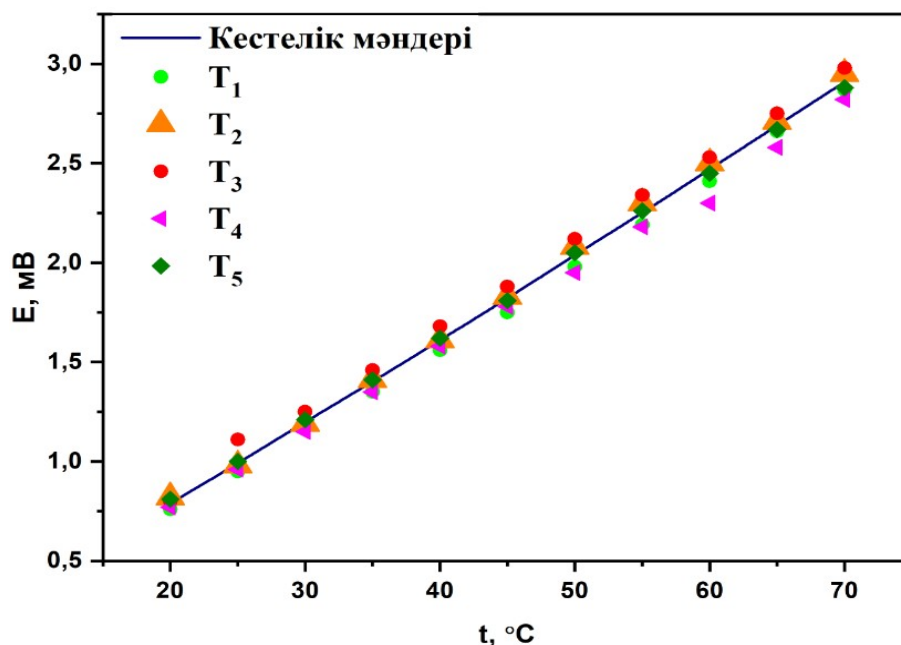
Графикке сәйкес, жылу тасымалдағыштың температурасы артқан сайын жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының ЭҚК-і де артады, ал құбырдың орналасу тереңдігінің артуы жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының ЭҚК-ін төмендетеді. Эксперимент барысында қоршаған ортаның температурасы тұрақты болғандықтан, топырақтағы температураның таралуына әсерін бағалау мүмкін емес.

### 4.3 Жасанды жер қабатындағы жылу желісінен таралатын температура өрісін зерттеу

Термोजұптар ғылымда, техникада және өнеркәсіпте температураны өлшеу үшін кеңінен қолданылатын датчиктер болып табылады. Олардың өлшеу жұмыс сипаттамалары мен дәлдігін анықтау үшін термोजұптарды градуирлеу маңызды, яғни термо-ЭҚК-нің температураға тәуелділігін анықтау қажет.

Зерттеу жұмысының негізгі бөлігіне дайындық ретінде жүргізілген алдын ала зерттеулер аясында мыс-константан термोजұбы градуирленді. Бұл термोजұптар топырақтағы температураның ауытқуын дәл өлшеуге арналған, бұл жылуфизикалық процестерді одан әрі талдау үшін маңызды.

Эксперимент мыс-константан термोजұптары, термостат, термोजұптарды ажыратып-қосқыш, мультиметр көмегімен жүзеге асырылады. Әрбір термोजұптың бір түйіні термостатқа орналастырылып, ал екінші түйіні термोजұптарды ажыратып-қосқышқа жалғанды. Термोजұптарды градуирлеу 20°C-тан 70°C-қа дейінгі температуралық диапазонда 5°C қадаммен жүргізілді. Термостаттағы температураны белгілі бір температураға орнатқаннан кейін әрбір термोजұп үшін термо-ЭҚК шығыс мәндерінің көрсеткіштерін алмас бұрын, температура тұрақтанғанға дейін 5-10 минут күтеміз. Эксперименттің нәтижесінде алынған мыс-константан термोजұптарының термо-ЭҚК-інің өлшеу нәтижелері кестедегі мәндермен салыстырылып градуирлеу графигі тұрғызылды. Бұл график термोजұптардың шығыс сигналы мен температура арасындағы нақты байланысты көрсетеді (25-сурет).



Сурет 25 - Мыс-константан термозұптарын градуирлеу графигі

20°C-тан 70°C-қа дейінгі температура диапазонында жүргізілген мыс-константан терможұптарын градуирлеу нәтижелері эксперименттік деректердің кестелік термо-ЭҚК мәндерімен жақсы сәйкес келетінін көрсетті. Өлшеулерді талдау орташа жүйелік қателік -0.0058 мВ екенін анықтады, бұл өлшеулердің жоғары дәлдігін көрсетеді. Орташа квадраттық ауытқу бойынша есептелген кездейсоқ қателік 0.0113 мВ-қа тең, бұл терможұптардың көрсеткіштерінің тұрақтылығын растайды.

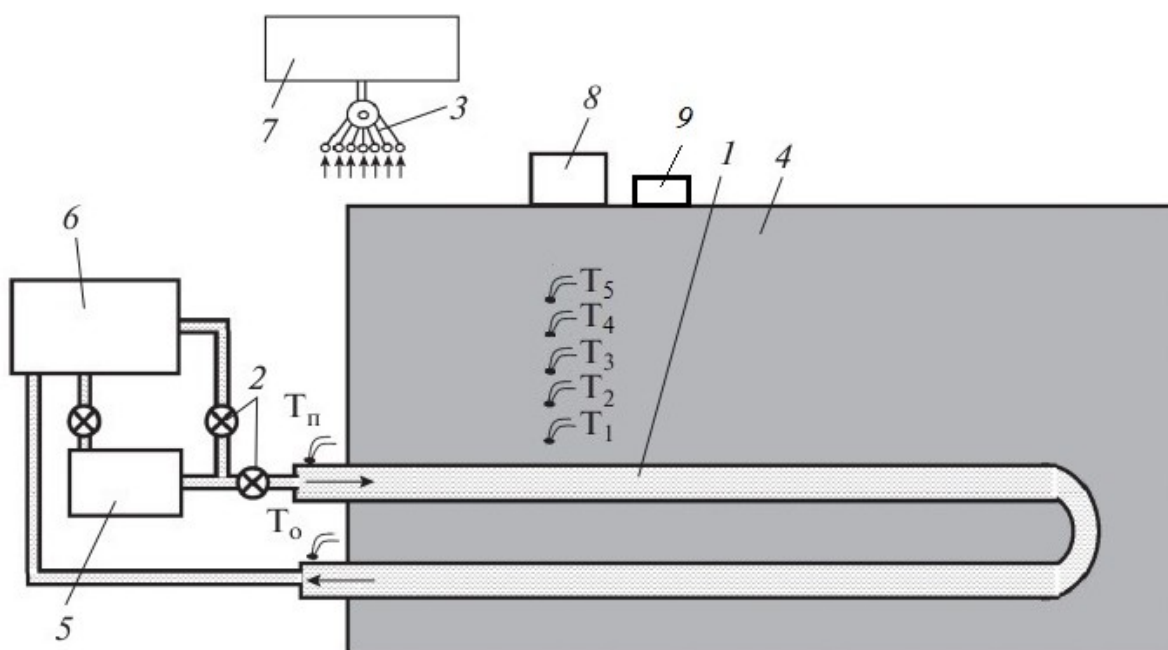
Кестелік мәндерден ең үлкен ауытқу 0.032 мВ-тан аспайды, бұл осы типтегі терможұптар үшін рұқсат етілген қателік шегінде жатыр. Осылайша, жүргізілген сынақтар терможұптардың жұмысқа қабілеттілігін және дәлдігін растады, бұл оларды белгіленген температура диапазонында жылу ағынын өлшеу үшін пайдалануға мүмкіндік береді.

Терможұптардың жұмысқа қабілеттілігі және дәлдігі расталғаннан кейін, келесі эксперименттік жұмыстарда қолданылды.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жұмыс істеу қабілетін тексергеннен кейін, жер асты жылу құбырының неғұрлым нақты құрылымы жинақталды. Бұл құрылым жылу желілерінің үстіндегі топырақ бетінен температураның таралу сипатына әсер ететін негізгі факторларды, атап айтқанда, жылу тасымалдағыш және қоршаған ортаның температураларын, құбырлардың орналасу тереңдігін, сонымен қатар олардың техникалық сипаттамаларын зерттеуге арналған.

Жылу тасымалдағыштың температурасы жылу желісінің үстіндегі топырақтағы температураның таралуын анықтайтын негізгі фактор болып табылады. Құбырдың орналасу тереңдігі де температураның таралуына әсер етеді, ал тереңдігі артқан сайын жылу тасымалдағыш температурасының әсері де біртіндеп азаяды.

26-суретте құрастырылған эксперименттік стендтің сұлбасы кескінделген. Эксперимент кезінде ұзындығы 10 м, биіктігі 1,5 м құммен толтырылған ағаш жәшіктің температуралық өрісі зерттелді. Жәшіктің ішіне ұзындығы 20 м, сыртқы диаметрі 32 мм және қабырға қалыңдығы 3,5 мм U-тәрізді жылуалмастырғыш құбыр орналастырылды, ол арқылы жылу тасымалдағыш, яғни су өтеді.



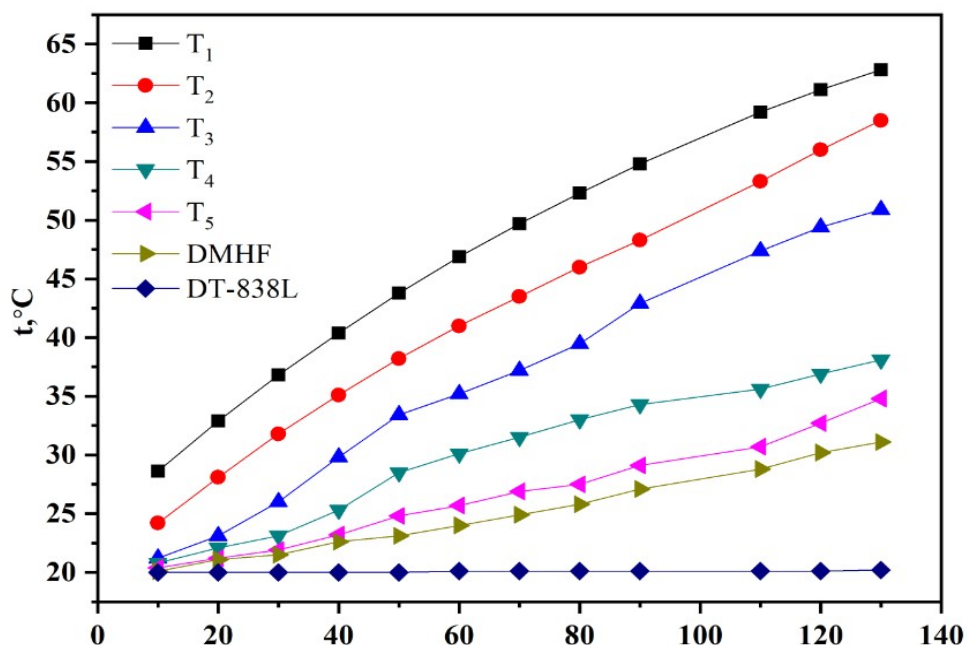
Сурет 26 - Эксперименттік стендтің сұлбасы: 1– U-тәріздес құбыр желісі (жер асты жылу желісінің имитациялық жүйесі); 2– қысымды реттегіш; 3– термोजұптарды ажыратып-қосқыш; 4– топырақ;  $T_1$ – $T_5$ –топырақтағы термोजұптар;  $T_6$  - DT-838L мультиметрі;  $T_n$ ,  $T_o$ – кіріс және шығыс қабылдағыштары; 5– сорғы; 6– термостат; 7– компьютер; 8– жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы; 9 - DT-838L мультиметрі

Термостаттан шығатын жылу тасымалдағыш U-тәрізді құбырдың жылу шығару бөлігіне беріледі. Құрғақ құммен толтырылып, кейіннен ылғадандырылған ыдыс жер асты құбыр рөлін атқарады. Жүйе термोजұптардың термо-ЭҚК мәліметтерін алу үшін термोजұптарды ажыратып-қосуға арналған құрылғыны және потенциометрді қамтиды. Топырақ температурасының өзгерістері құбырдың тереңдік деңгейіне қатысты әртүрлі қашықтықтарда  $T_1$ – $T_5$  термोजұптары, сәйкесінше 0,2 м, 0,4 м, 0,6 м, 1 м, 1,2 м арқылы бақыланды. Ал жылу тасымалдағыштан 1,5 м қашықтықта топырақ бетінің температурасы жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғымен және стандартты құрылғының көмегімен (DT-838L мультиметрі) өлшенді. Құбырдағы жылу тасымалдағыштың температурасы  $T_n$  кіріс және  $T_o$  шығыс қабылдағыштары арқылы бақылауға алынды. Зертханалық қондырғының жалпы түрі 27-суретте көрсетілген.



Сурет 27 - Зертханалық қондырғының жалпы түрі

Термостаттағы су алдымен 70°C-қа дейін қыздырылып, содан соң қыздырылған жылу тасымалдағыш құбырға берілді. Зерттеу нәтижелері топырақ қабатында 10 минут сайын тіркеліп отырды. Алынған нәтижелерге сәйкес, топырақ бетінің қызу процесі жылу тасымалдағыштың құбырға берілуінен шамамен 1 сағат өткен соң басталады (28-сурет).



Сурет 28 - Құм температурасының эксперимент уақытына (τ) тәуелділігі:  
T<sub>1</sub>– T<sub>5</sub> терможұптары; DT-838L мультиметрі; DMHF - жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы

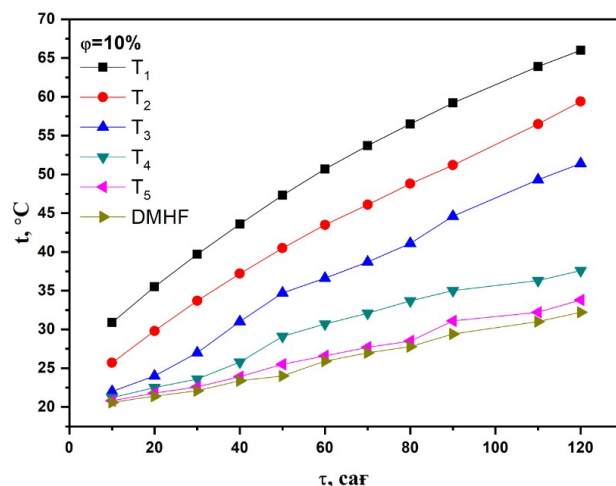
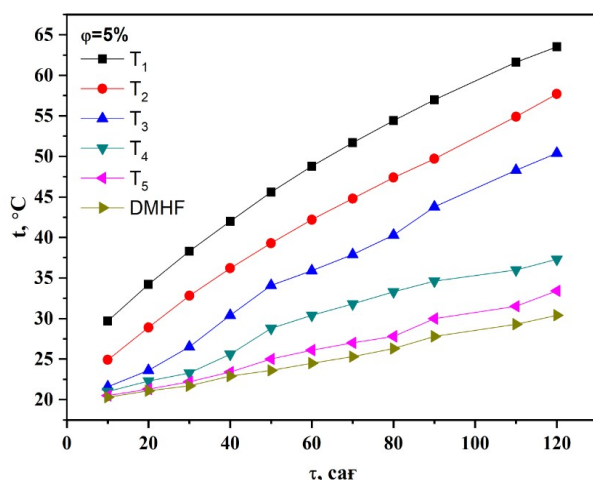
Графикте көрсетілгендей, тереңдік бойынша температураның таралу сипаттамасы бойынша ең үлкен температураның өсуі 0,2 м қашықтықта байқалады. 10 минуттан кейін температура 28,6°C дейін көтеріледі, ал 130 минуттан кейін 62,8°C жетеді. Бұл құбырға жақын аймақтағы белсенді жылу алмасуды растайды. 1 м қашықтықта 130 минуттан кейін температура бар

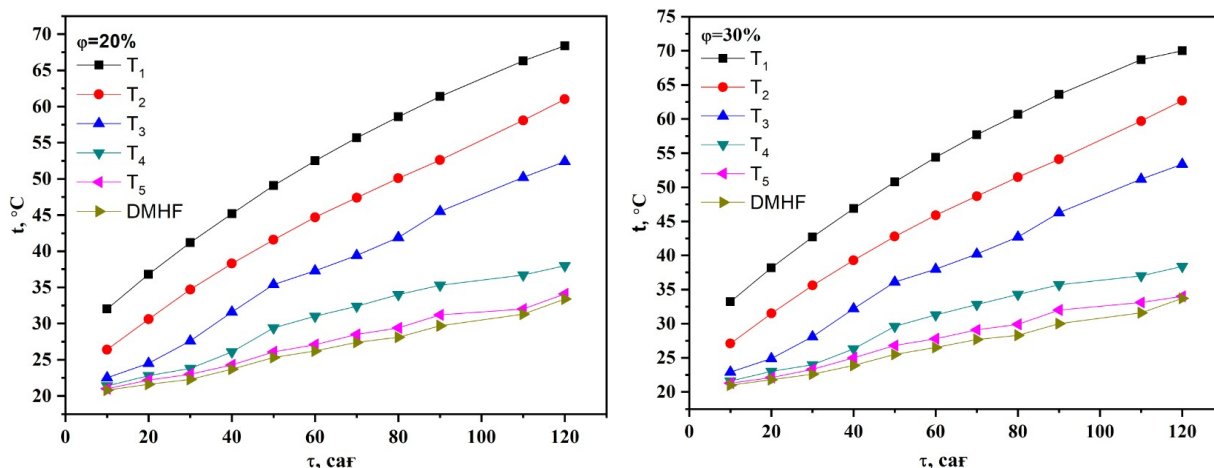
болғаны  $34,8^{\circ}\text{C}$  құрайды, яғни қашықтық артқан сайын температура баяу өседі. 1,4 м қабатта өзгерістер ең төмен, яғни температура  $20,1^{\circ}\text{C}$ -тан  $31,1^{\circ}\text{C}$ -қа дейін ғана көтеріледі, өйткені жылу топырақтың жоғарғы қабаттарына кешігіп жетеді. Ал осы қабатта орналасқан стандартты құрылғы эксперимент барысында тұрақты көрсеткіштер көрсетеді ( $20-20,2^{\circ}\text{C}$ ). Бұл құрылғының температураның кіші өзгерістеріне сезімталдығының төмен екенін көрсетеді.

Температуралық градиенттер сипаттамасына келсек, ең анығы 0,6 м қашықтыққа дейін байқалады, ал 0,2 м қашықтықта эксперимент басынан бастап 130 минуттан кейін температура айырмашылығы  $34^{\circ}\text{C}$ -тан асады. 0,8 м және 1 м тереңдіктерінде температура өзгерістері азырақ байқалады, бұл құмның үлкен жылу сыйымдылығымен және жылу тасымалдағыштан алыстауымен түсіндіріледі.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы 1,5 м қашықтықтағы температуралық өзгерістерді нақты түрде тіркейді, ал стандартты мультиметр бұл өзгерістерді сезбейді. Демек, жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы стандартты хромель-алюмельді мультиметрге қарағанда әлдеқайда жоғары сезімталдықты көрсетеді. Эксперименттік нәтижелер топырақ бетінің температурасын дәл анықтау үшін, сезімталдығы жоғары құрылғыларды пайдаланудың қажеттілігін дәлелдейді.

Сондай-ақ, құмның әртүрлі ылғалдылық деңгейінің топырақтың температуралық өрісіне әсері зерттелді. Құмның ылғалдылығы жылу өткізгіштік, жылу сыйымдылық және топырақтың қызу жылдамдығының өзгеруіне байланысты жылу беру процесіне әсер етеді. Ылғалды құмның жылу сыйымдылығы жоғары, сондықтан ол баяу қызады, бірақ сонымен бірге жылуды жақсы өткізеді, бұл терең қабаттардың жылыну процесін жылдамдатуы мүмкін. Бұл үшін ыдыстың көлеміне қатысты топырақты ылғалдандырудың әртүрлі пайыздық арақатынастары қолданылды. Эксперимент жылу тасымалдағыштың температурасы  $70^{\circ}\text{C}$ , 5%, 10%, 20% және 30% ылғалдылықтарда жүзеге асырылды (29-сурет).





Сурет 29 - Әртүрлі ылғалдылықтағы топырақ температурасының өзгеруі

Алынған мәліметтерді талдау барысында, топырақ ылғалдылығының артуымен құм қабаттарындағы температураның таралуының ұлғаятыны және бірқалыпты таралатыны анықталды. Құбырдан 0,2 м қашықтықта орналасқан  $T_1$  термोजұбының көрсеткіші бойынша тек 2 сағаттан кейін жоғары ылғалдылықта, яғни  $\phi = 30\%$  болғанда  $70^\circ\text{C}$  жететінін көруге болады.

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы арқылы өлшенген топырақ бетінде де байқалды, яғни  $\phi=10\%$  ылғалдылықта  $32,2^\circ\text{C}$ ,  $\phi=20\%$  ылғалдылықта  $33,4^\circ\text{C}$ ,  $\phi=30\%$  ылғалдылықта  $32^\circ\text{C}$ , ал  $\phi=40\%$  ылғалдылықта  $33,7^\circ\text{C}$  болды.

Бұл нәтижелер топырақ ылғалдылығының қоршаған ортадағы температураның таралуына айтарлықтай әсер ететінін дәлелдейді. Осыған байланысты жер асты жылу желілерін жобалау мен пайдалану барысында бұл факторды міндетті түрде ескеру қажет.

Құм қабатындағы температура құбыр бетінен қашықтық артқан сайын азаятыны байқалды. Бұл ылғалдылықтың артуына байланысты топырақтың жылуөткізгіштігінің күрт ұлғаюына байланысты. Су тау жыныстарының кеуектерінен ығыстырған ауаның жылуөткізгіштігі, судың жылуөткізгіштігінен 30 есе аз, бұл осы заңдылықты түсіндіреді. Алынған нәтижелер топырақ ылғалдылығының жер асты жылу желілеріндегі жылу алмасу процестеріне маңызды ықпал ететінін дәлелдейді.

Сонымен, жылу жинақтау жүйесінің топырақ массиві болып табылатын капиллярлық-кеуекті жүйелерде кеуек ішіндегі ылғал жылу таралуына айтарлықтай әсер етеді. Ылғалды құмның эквивалентті жылуөткізгіштігі ылғалды сазға қарағанда жоғары, әрі ылғалдылық 5%-дан 15%-ға дейін өскен сайын, ол да артады. Саздың жылуөткізгіштігі 2-ден  $4 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$  аралығында өзгерсе, құмда бұл көрсеткіш  $5 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ -тан жоғары. Топырақ күрделі жүйе екенін ескерсек, стендте жасалған эксперименттер нәтижесінде құрғақ және ылғалды құмдардың температурасының уақытқа байланысты өзгеруі, сонымен қатар топырақтағы температураның таралуы анықталды.

Жүргізілген тәжірибелер ылғалды топырақтағы температураның өзгеруі құрғақ топыраққа қарағанда көп болатынын растады.

#### **4.4 Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны натуралық жағдайларда апробациялау**

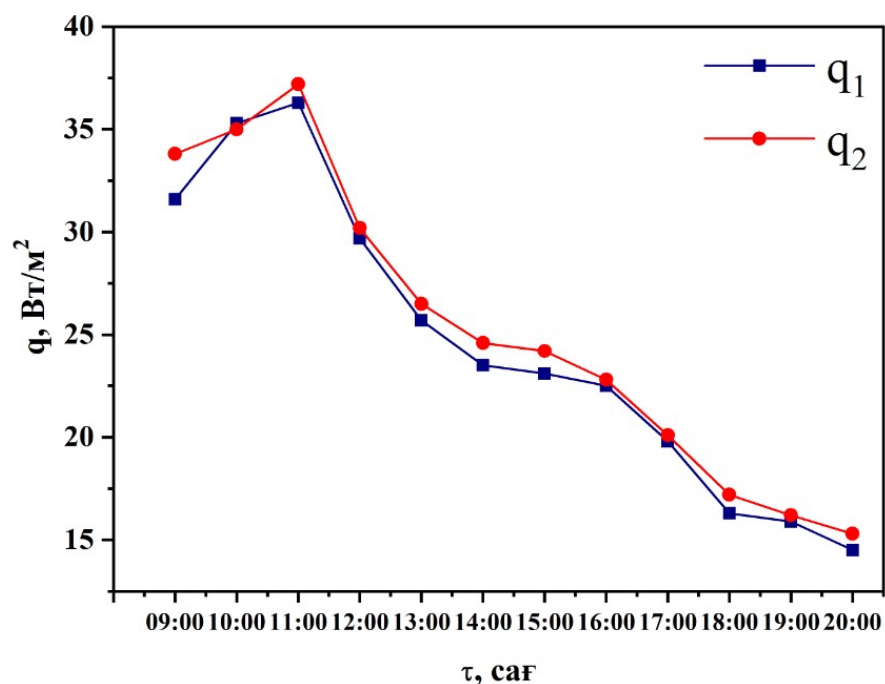
Жылу ағындарын зерттеудің маңызды кезеңдерінің бірі – әзірленген құрылғыны нақты жағдайларда эксперименттік сынақтан өткізу. Әзірленген жылу ағынының тығыздығын өлшейтін құрылғының жұмыс қабілеттілігін тексеру және оны өнеркәсіптік ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегішінің көрсеткіштерімен салыстыру мақсатында эксперимент жүргізілді. Эксперимент барысында бөлменің ішкі қабырғасы мен терезесінің беткі қабатындағы жылу ағыны тығыздығының динамикасы зерттелді.

Эксперименттік өлшеулер желтоқсан айында бірнеше тәулік бойы жүргізіліп, ішкі қабырға мен терезе беттеріндегі температуралық өзгерістер, жылу ағыны тығыздығы және жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының термоЭҚК-і тіркелді (34-сурет).

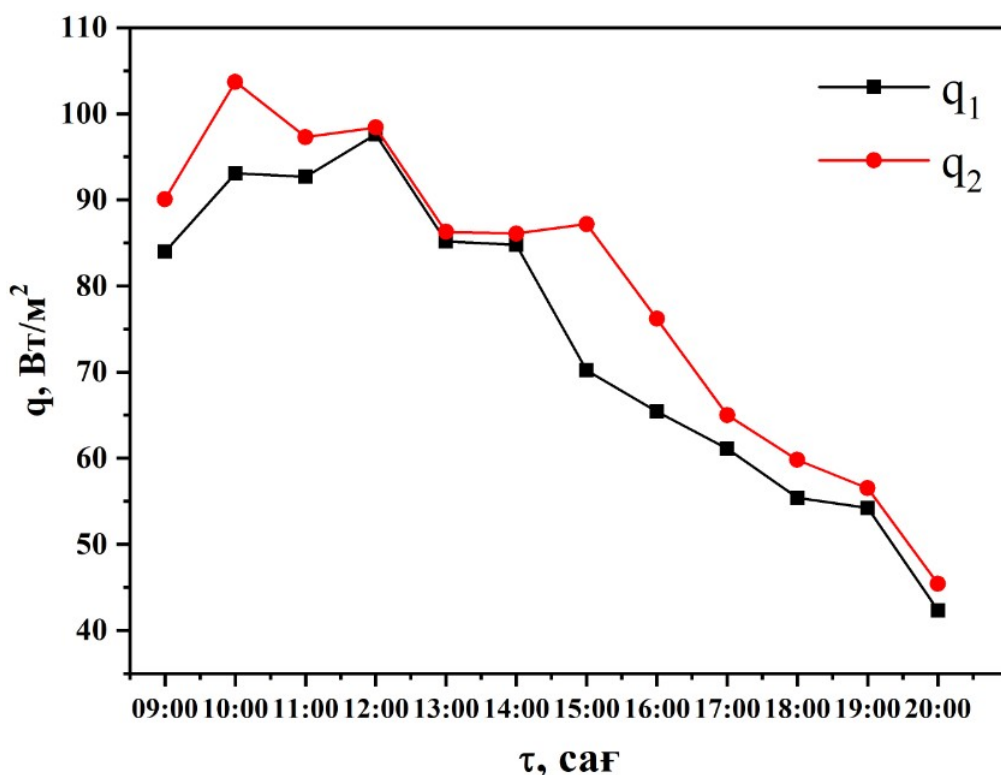


Сурет 30 – Зерттеу жұмысының барасы

Зерттеу жұмысының барысында температуралық жағдайларының орташа мәндері: сыртқы ортаның температурасы: таңертең  $-5^{\circ}\text{C}$ , күндіз  $-4^{\circ}\text{C}$ , кешке  $-5^{\circ}\text{C}$  –  $-6^{\circ}\text{C}$ ; бөлменің температурасы:  $21^{\circ}\text{C}$  –  $22^{\circ}\text{C}$ . Өлшеулер барысында беткі қабаттың орташа температурасы келесідей өзгерді: ішкі қабырға: таңертең:  $19^{\circ}\text{C}$ ; күндіз  $19,3^{\circ}\text{C}$ ; кешке  $18,6^{\circ}\text{C}$ ; ішкі терезе: таңертең  $27^{\circ}\text{C}$ ; күндіз  $16-15^{\circ}\text{C}$ ; кешке  $13,2^{\circ}\text{C}$ . Алынған нәтижелер келесі графиктерде көрсетілген (31, 32-сурет):



Сурет 31 - Ішкі қабырғаның өлшеу нәтижелері:  $q_1$  – ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегішінің жылу ағынының тығыздығы;  $q_2$  – жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жылу ағынының тығыздығы



Сурет 32 - Ішкі терезенің өлшеу нәтижелері:  $q_1$  – ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегішінің жылу ағынының тығыздығы;  $q_2$  – жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғының жылу ағынының тығыздығы

Өлшеу нәтижелері бойынша терезеге қарағанда қабырға арқылы жылу ағыны таңертеңгі және кешкі уақытта жоғары, ал күндізгі уақытта терезенің

жоғалу жылуы жоғары, себебі оның бетінің температурасы қабырғамен салыстырғанда төмен. Таңертеңгі уақытта ішкі терезе қабырғаға қарағанда көбірек жылынады, бұл оның ішкі бөлменің жылуынан көбірек жылынаатынын көрсетеді. Күндізгі уақытта терезенің температурасы 16-15°C дейін төмендейді, ал қабырға температурасы 19,3°C шамасында тұрақты қалады, бұл терезе арқылы жылудың көп жоғалатынын білдіреді. Кешкі уақытта терезенің температурасы 13,2°C дейін, ал қабырғаның температурасы 18,6°C дейін төмендейді, бұл терезенің жылуды тезірек жоғалтатынын көрсетеді. Демек, терезе жылуды қабырғаға қарағанда едәуір тез жоғалтады, әсіресе кешкі уақытта, ал қабырға тәулік бойы тұрақты температураны сақтайды, бұл оның жақсы жылу оқшаулау қасиеттерін растайды. Күн ішінде жылу жоғалту айырмашылығы 22%-дан 40%-ға дейін өзгереді, бұл ғимараттардың энергия үнемдеуінде терезе жылу оқшаулауының маңыздылығын дәлелдейді.

Эксперименттік деректерді талдау нәтижесінде әзірленген құрылғының жылу ағыны тығыздығын өлшеу бойынша тұрақты нәтижелер көрсететіні және оның көрсеткіштері өнеркәсіптік ИТП-МГ-4 «ПОТОК» есептегішінің деректерімен салыстырмалы екені анықталды.

Өлшеу нәтижелеріндегі шамалы айырмашылықтар құралдардың конструктивтік ерекшеліктерімен түсіндіріледі. Екі құрылғымен алынған мәндер арасындағы орташа ауытқу шамамен 2,4% құрайды, бұл әзірленген құрылғының жоғары дәлдігін көрсетеді. Тәулік ішінде құралғылар арасындағы өлшеу айырмашылығы 1,8%-дан 3,6%-ға дейін өзгерді.

Әзірленген құрал температуралық жағдайлар мен жылу ағыны тығыздығының өзгерістеріне жоғары сезімталдық танытты. Оны қолдану жылу алмасу процестері туралы нақты деректер алуға және құрылғыны нақты пайдалану жағдайларында тиімді қолдануға мүмкіндік береді.

Сондай-ақ, зерттеу аясында жылыту жүйесінің жұмыс параметрлерін бақылауға арналған құрылғыға бірқатар сынақтар жүргізілді. Сынақтар құрылғының өлшеу дәлдігін, нақты пайдалану жағдайларында тұрақты жұмыс істеуін, сондай-ақ оның жылу торабының тиімділігіне әсерін бағалау мақсатында Қарғанды қаласының ЖШС «Энергосервис-ЛТД» қызмет көрсететін мектептердің бірінде өткізілді. Жылу есебінің негізгі элементі ретінде Kamstrup маркалы термोजұптары (0°C дан 150°C аралығында температура және температура өзгерісін анықтауға арналған датчик) жалғанған ВКТ-7 жылу мөлшерін есептегіші қолданылды (33-сурет).

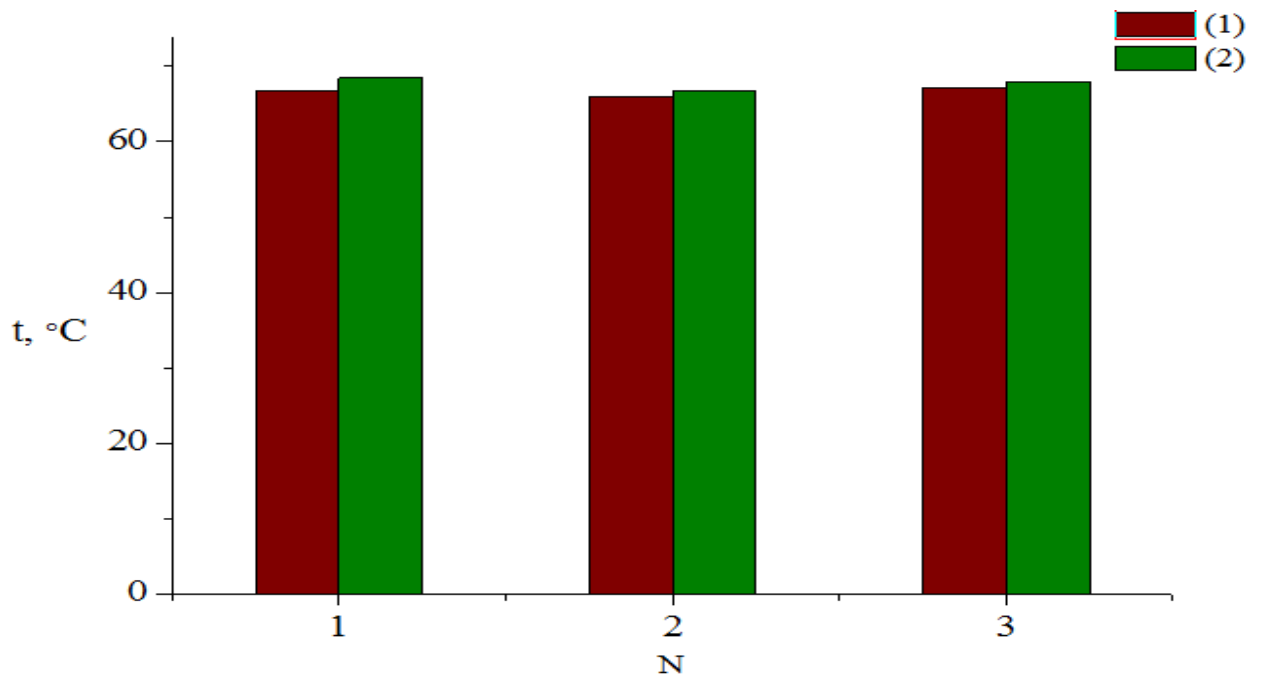
Сынақтар барысында жылу торабының жұмыс ерекшеліктерін ескере отырып, бақылау өлшеу нүктелері анықталды. Өлшеу дәлдігін барынша қамтамасыз ету мақсатында құрылғы элеваторлық торапқа тікелей жақын жерде орнатылды. Күні бойы жылыту жүйесінің параметрлері тіркелді. Жылу беру өзгерістерін анықтау мақсатында өлшеулер бірнеше тәулік жүргізілді. Шығыс және кіріс жылу тасымалдағыштың температурасы, зерттелетін беттер арқылы өтетін жылу ағыны, сондай-ақ жүйедегі қысым бағаланды. Деректер кейінгі талдау үшін ВКТ-7 жылу есептегішімен

тіркелді. Жүйенің әртүрлі учаскелеріндегі температуралық параметрлердің өзгеру динамикасы бағаланды.

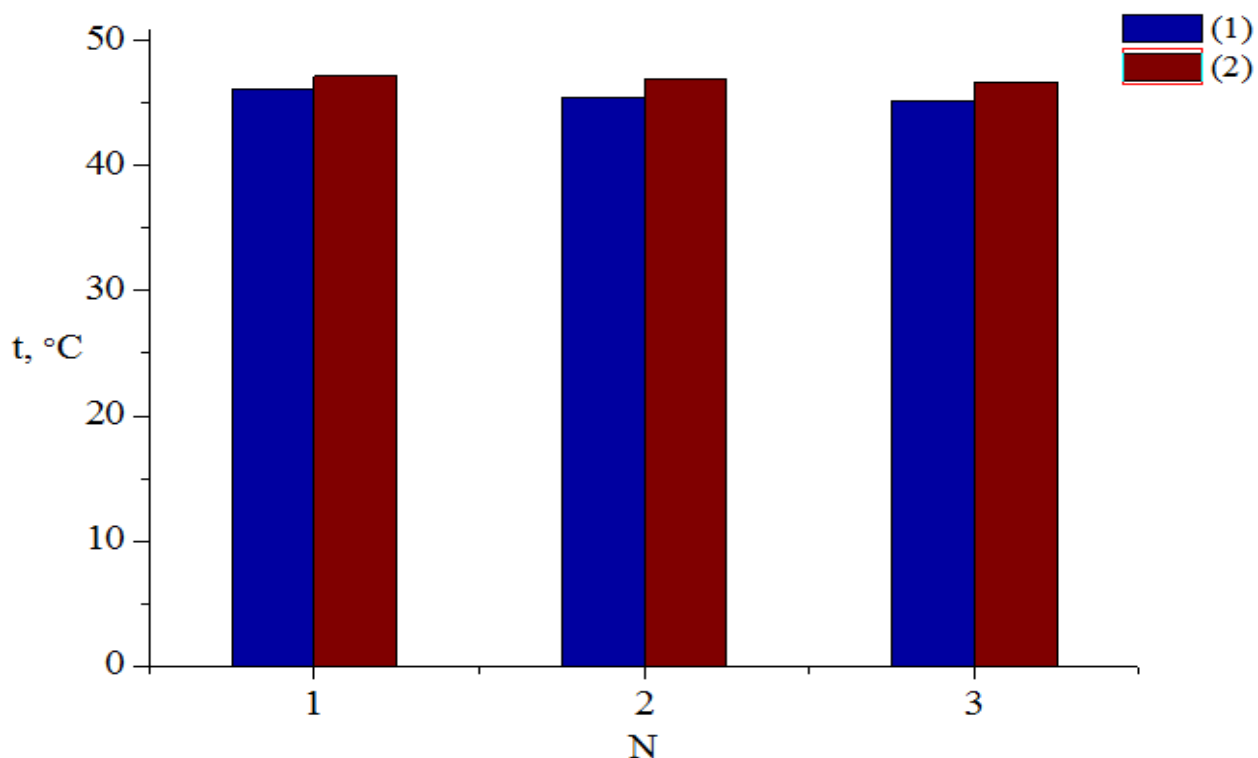


Сурет 33 – Эксперимент барысы

Датчиктің бірнеше тәулік ішіндегі алынған мәліметтері бойынша орташа мәні кіріс жылу желісі  $\bar{t}_1 = 66.75^\circ\text{C}$ , шығыс жылу желісі  $\bar{t}_2 = 46.09^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t = 20.66^\circ\text{C}$ . Ал жылу ағынының тығыздығын өлшеуге арналған құрылғының мәліметтері келесі 34, 35 - суреттерде көрсетілген.



Сурет 34 – Жылыту жүйесінің кіріс желісінің нәтижелері: 1 - ВКТ-7 есептегіші; 2 – жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы



Сурет 35 – Жылыту жүйесінің шығыс желісінің нәтижелері: 1 - ВКТ-7 есептегіші; 2 – жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы

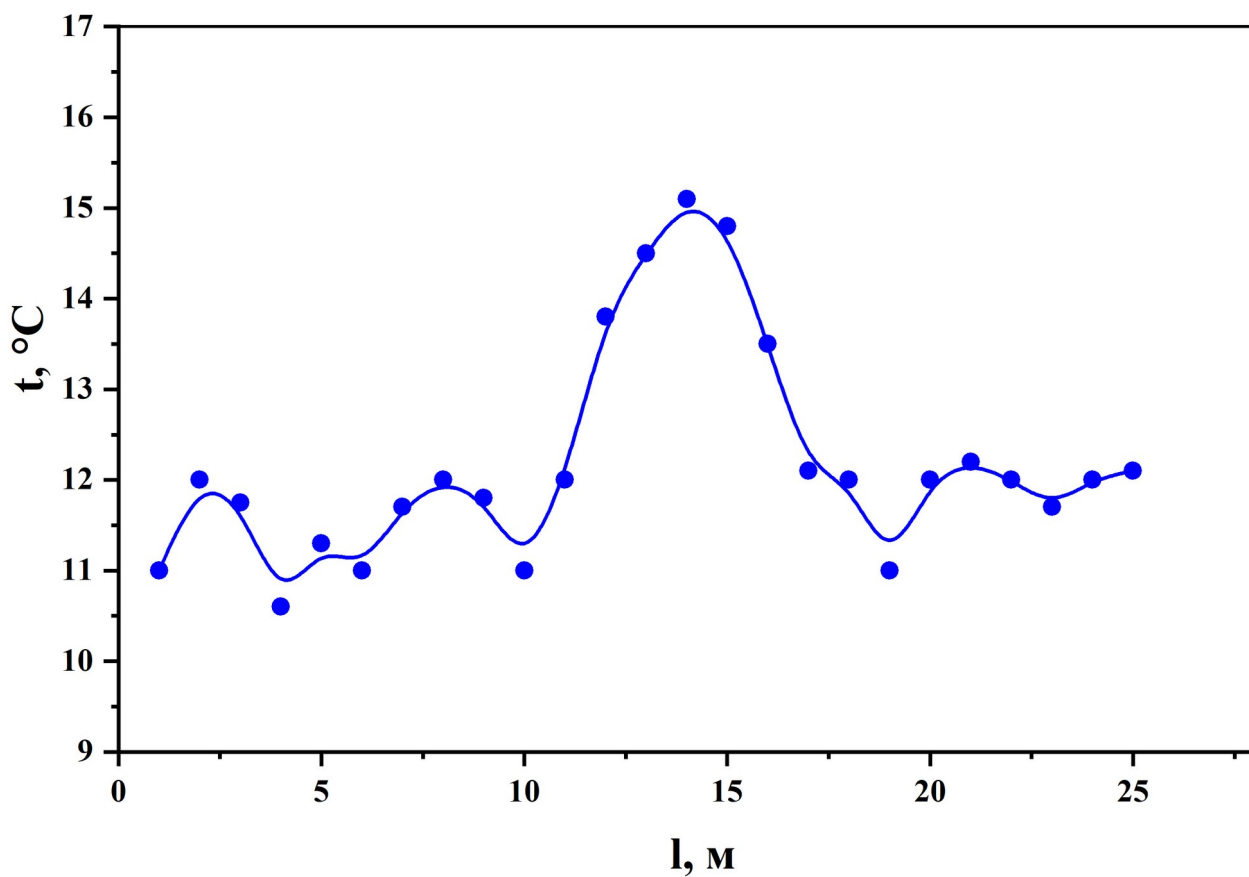
Алынған деректер негізінде жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы ВКТ-7 жылу есептегіші мен Kamstrup терможұптарымен бірге өлшеу дәлдігі мен жұмысының тұрақтылығын жоғары деңгейде көрсететіндігі анықталды.

Сонымен қатар, құрылғыны қаланың жер асты жылу магистральдерінде жұмысын тексеру мақсатында натуралық сынақтар жүргізілдік [118]. Қарағанды қаласы Жастар аймағының жылу желілерінің участкісінде екі жылу камерасының арасында диагностика жұмысы жүргізіліп, жер асты құбырының зақымдалған жерлері анықталды (36-сурет). Диагностика жылу тасымалдағышының кіріс (беруші) құбырда – 75°C, шығыс (қайтарушы) құбырда – 50°C, сыртқы ауа – 17,5°C температураларында, желдің жылдамдығы 8 м/с дейін жүргізілді. Жылу құбырларының орналасу тереңдігі – 1,3 м. Жылу құбырларының сыртқы диаметрі: оқшаулаусыз кіріс (беруші) және шығыс (қайтарушы) құбырлар – 0,325 м, оқшаулаумен – сәйкесінше 0,510 м және 0,460 м. Топырақтың жылу өткізгіштігі – 2,0 Вт/(м·К).



Сурет 36 - Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны тексеру барысы

37-суретте жылу желісінің учаскесі бойынша топырақ бетінің температурасының таралуы көрсетілген.



Сурет 37 - Жылу желісінің учаскесі бойынша топырақ бетінің температурасының таралуы

Жылу желісінің учаскесі бойынша топырақ бетінің температурасының таралуын талдау температуралық көрсеткіштердің таралу ерекшеліктерін анықтауға және мүмкін болатын ақауларды айқындауға мүмкіндік береді. Жылу трассасы бойындағы температура көпшілік нүктелерде 10,6–13°C диапазонында өзгеріп, жүйенің қалыпты жұмыс істеп тұрғанын көрсетеді. Алайда, кейбір учаскелерде жергілікті температураның жоғарылауы байқалады, бұл ықтимал ақаулардың немесе жылу шығыны аймақтарының бар екенін білдіруі мүмкін.

Ерекше назар 12-ші метрден басталатын учаскеге аударылды, онда температура 13,8°C-қа дейін артады және 14-ші метрде ең жоғары 15,1°C мәніне жетеді. 15-ші метрден кейін температураның біртіндеп төмендеуі байқалады, бұл құбырда жарықшақтардың болуын, жылу шығыны немесе құбырдағы басқа ақаулардың бар екенін көрсетуі мүмкін. Осындай температуралық өзгеріс қосымша талдауды талап етеді, себебі бұл ауытқудың нақты себебін анықтауға көмектеседі.

Температураның жоғарылауына келесі факторлар әсер етуі мүмкін: жылу құбырларының зақымдануы салдарынан құбыр жылу жоғалтып, қоршаған ортаны қыздыруы мүмкін; сондай-ақ, құбырдан су ағу ықтималдығы, бұл жылу тасымалдағыштың сыртқы ортамен байланысы арқылы жергілікті температураның жоғарылауына әкелуі мүмкін. Бұл факторлар гипотезаларды растау немесе жоққа шығару үшін жан-жақты диагностика жүргізуді қажет етеді.

12–15 м учаскесіндегі ақауларды нақты анықтау үшін шуыл өлшегіш құрылғысы көмегімен қосымша талдау жүргізілді. Өлшеулер нәтижесінде температураның ауытқу мәндері расталды (42-сурет). Алынған деректер негізінде жылу оқшаулау мен құбырдың тұтастығын тексеру ұсынылады. Егер жоғарыда сипатталған ақаулар расталса, жылу шығындарын азайту және жылу трассасының қалыпты жұмысын қалпына келтіру мақсатында жөндеу жұмыстарын жүргізу қажет.



Сурет 42 - Зерттеу жұмыстары кезінде жылу желісінің ақау болған бөлігінің түсірілімі

Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны апробациядан өткізу нәтижесінде құрылғының сенімді жұмысын және жоғары сезімталдығын дәлелдеді. Температураны өлшеу нәтижелері негізінде жылу трассасының үстіндегі топырақтың қызу дәрежесін бақылау арқылы, жылу тасымалдағыштың қоршаған ортаға ағу орындарын жедел анықтауға, жылу оқшаулауы мен қорғаныс құрылымдарының қанағаттанарлықсыз күйдегі учаскелерін алдын ала анықтауға мүмкіндік береді.

#### **4.5 Энергетикалық параметрлерінің өлшеу қателіктері**

Жылу ағынын өлшеудің дәлдігін арттыру мақсатында әзірленген құрылғы температураны өлшеуде сезімтал элементтің тоқтық қыздыру әдісін қолданады. Бұл әдіс температураның дәлдігін арттырумен қатар, тоқтық қыздыру арқылы алдын ала анықталған эталондық температураны тұрақты ұстап тұруға мүмкіндік береді. Құрылғының бірнеше ұқсас пластиналарының болуы, олардың әрқайсысының сәулеленуді қабылдау қабілетін арттырады, бұл өлшеу нәтижелерінің сенімділігін жоғарылатады.

Мұндай құрылғының жұмыс істеу принципі зерттелетін қыздырылған дене бөлігінен шығатын сәулеленудің бір қабылдаушы пластинаны қыздыруын, ал екіншісін электр тоғымен қыздыру арқылы салыстыруға негізделген. Егер зерттелетін қыздырылған дене бөлігінің сәулелену индикатрисасы сфералық болса, онда сәулелену арқылы қыздырылған қабылдаушы пластинаның сәулелену қарқындылығын келесі түрде өрнектеуге болады:

$$E = \frac{\varepsilon r S}{2\pi^2} T^4, \quad (4.4)$$

мұндағы  $\varepsilon$  -  $T$  температурадағы дененің сәулелену коэффициенті;  $\sigma$  - Стефан – Больцман тұрақтысы;  $S$  – қыздырылған дене аймағының ауданы;  $r$  – зерттелетін аймақтан сезімтал элементке дейінгі қашықтық.

Сәйкесінше, белгілі реперлік  $T_0$  температурасы және  $S_0$ ,  $r_0$ ,  $\varepsilon_0$  параметрлері үшін келесі өрнекті аламыз:

$$E_0 = \frac{\varepsilon_0 r S_0}{2\pi^2} T_0^4. \quad (4.5)$$

Егер зерттелетін дененің бір қабылдаушы пластинасы сәулеленумен қыздырылып, ал екіншісі қыздырылмаса, онда құрылғының максималды реакциясы келесі өрнекпен анықталады:

$$U_k = b\eta E \tau_u, \quad (4.6)$$

мұндағы  $U$  – құрылғының максималды шығыс сигналы;  $b$  - пропорционалдық коэффициент;  $\tau_u$  – сәулелену импульсінің ұзақтығы.

Сәйкесінше,  $E_0$  сәулеленуі және  $\tau_u$  сәулелену импульсінің ұзақтығы үшін

$$U_0 = b\eta E_0 \tau_u. \quad (4.7)$$

Егер құрылғының бұл қабылдаушы пластинасы сәулеленуге ұшырамай, бірақ электр тогымен  $\tau_u$  уақыты ішінде және жылу ағынының тығыздығы  $q$  мәнінде қыздырылса, онда оның максималды реакциясы келесі түрде өрнектеледі:

$$U_\vartheta = bq\tau_u. \quad (4.8)$$

Егер бір пластинаның сәулеленуі  $E$  болса, ал екінші пластина электр тогымен бір уақытта қыздырылған кезде жылу ағынының тығыздығы  $q$  болса, онда сезімтал элементтің терможұптарының дифференциалды қосылуына байланысты максималды реакция келесі түрде өрнектеледі:

$$U = U_k - U_\vartheta. \quad (4.9)$$

Егер бір пластинаның сәулеленуі  $E_0$ , ал екіншісінде жылу ағынының тығыздығы  $q$  болса, онда

$$U_0 = U_{r_0} - U_\vartheta. \quad (4.10)$$

Келесі өрнекті аламыз:

$$T = T_0 \sqrt[4]{\left(\frac{U + U_{\text{э}}}{U + U_{\text{э}}}\right) \frac{\varepsilon_0 r^2 s_0}{\varepsilon r^2 s}}. \quad (4.11)$$

$r = r_0$ ,  $s = s_0$  деп алып бұл өрнекті ықшамдауға болады, онда:

$$T = T_0 \sqrt[4]{\left(\frac{U + U_{\text{э}}}{U_0 + U_{\text{э}}}\right) \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}}. \quad (4.12)$$

Ұсынылған әдіспен қыздырылған денелердің температурасын анықтау дәлдігі реперлік температураны  $T_0$  анықтау дәлдігіне жоғары дәрежеде тәуелді. (4.12) өрнегіне сезімтал элементтің сәулелену немесе электр тогы арқылы қыздыру импульсының ұзақтығы кірмейтіндіктен, бұл формула кез келген импульс ұзақтығы үшін, соның ішінде  $\tau_i \rightarrow \infty$ , яғни сезімтал элементтің стационарлық қызуы жағдайында да қолданылуы мүмкін.

Толық өтемі жағдайында, яғни дене бөлігінің  $T_0$  температурасынан шығатын сәулеленудің сезімтал элементке әсері электр тогының әсерімен теңестірілгенде  $U_{\text{э}} = U_{\text{вк}}$  немесе  $U_0 = 0$  аламыз. Онда (4.12) формула келесі түрге ие болады

$$T = T_0 \sqrt[4]{\left(\frac{U}{U_{\text{э}}} + 1\right) \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon}}. \quad (4.13)$$

Егер зерттелетін температура диапазонында сәулелену коэффициентінің өзгерісін елемеге болса ( $\varepsilon_0 = \varepsilon$ ), онда (4.12) және (4.13) формулалары сәйкесінше келесі түрге ие болады:

$$T = T_0 \sqrt[4]{\left(\frac{U + U_{\text{э}}}{U_0 + U_{\text{э}}}\right)}; \quad (4.14)$$

$$T = T_0 \sqrt[4]{\left(\frac{U}{U_{\text{э}}} + 1\right)}. \quad (4.15)$$

Термोजұптарды дифференциалдық жалғау кезінде, яғни термоэлектрлік температураларда, әдетте уақыт бойынша өзгеріп отыратын температуралардың бірін білу қажет. Бұл әдіс зерттелетін денемен жанаспайтын термोजұп қабаттарының температура мәндерін білуді талап етпейді.

Термобатарея саны екіге тең деп есептейік. Онда бірінші термобатареядағы өлшенген температура өзгерісі  $(T_1 - T)$ , ал екінші

термобатарея үшін  $(T - T_2)$ , сондай-ақ  $T_1 > T > T_2$ , мұндағы  $T$  – өлшенетін температура. Онда термобатареядағы термоЭҚК

$$\varepsilon_1 = n_1 k(T_1 - T); \quad (4.16)$$

$$\varepsilon_2 = n_2 k(T_2 - T), \quad (4.17)$$

мұндағы  $n_1$  және  $n_2$  – әрбір термобатареядағы терможұп саны;  $k$  – термоэлементтің Зеебек коэффициенті.

Егер өлшенетін температура белгілі және  $T_0$  тең болса, онда

$$\varepsilon_{10} = n_1 k(T_1 - T_0); \quad (4.18)$$

$$\varepsilon_{20} = n_2 k(T_0 - T_2). \quad (4.19)$$

$T_0$  температурасын реперлік температура ретінде қабылдауға болады және оны  $\varepsilon_{10} = \varepsilon_{20}$  шартын орындау үшін таңдауға болады. Осылайша, (4.17) және (4.19) формулаларынан келесіні аламыз:

$$T_0 = \frac{n_1 T_1 + n_2 T_2}{n_1 + n_2}. \quad (4.20)$$

Термобатареяларды дифференциалды жалғау жағдайында термоэлектрлік құрылғының тіркеуші аспабындағы кернеу түсуі келесідей болады:

$$U = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)R}{r_1 + r_2 + R} \quad (4.21)$$

мұндағы  $r_1$  және  $r_2$  – термобатареялардың кедергісі;  $R$  – тіркеуші құрылғының кіріс кедергісі. Өрнектерді ескеріп, қарапайым түрлендірулерден кейін (4.21) өрнектен

$$T = T_0 - \frac{U}{a}; \quad (4.22)$$

$$a = \frac{k(n_1 + n_2)R}{r_1 + r_2 + R}. \quad (4.23)$$

Термобатареялар тізбектей жалғанған жағдайда, өлшенетін температура келесі формула бойынша анықталады:

$$T = \frac{U}{a} - T_0. \quad (4.24)$$

Термобатареяларды сипатталған жалғау әдістерін қолдану температураны өлшеу дәлдігін және термометрдің сезімталдығын арттыруға мүмкіндік береді, өйткені қоршаған ортаның температурасының әсері өзара өтеледі және іс жүзінде реперлік температура мен зерттелетін температура арасындағы айырмашылық өлшенеді.

Сезімтал элементтің ауданын өлшеу қателігі, ені 10-12 диаметрден кем емес (әртүрлі бағыттар бойынша) бақылау кезінде және заманауи өлшеу құралдарын қолданғанда  $\sigma_s = 0,04$  % құрайды. Тіркеуші құралдың шкаласының ұзындығымен анықталатын қабылдағыштың реакциясын анықтау қателігі, диапазоны мен дәлдігі сәйкес келетін цифрлық вольтметрлерді қолдану кезінде 0,05% жетеді. Уақытты өлшеу қателігі  $\sigma_t = \pm 0,1$  % құрайды.

Жартылай сфералық сезімтал элементі бар сәулелену қабылдағыштары үшін оның конструктивтік ерекшеліктеріне байланысты қосымша қателік орын алады. Бұл қателік құрылғының кеңістіктік бұрышы  $2\pi$ -ден үлкен болуына байланысты. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы үшін біркелкі жарықтанған созылыққы көздің энергетикалық параметрлерін өлшеу кезінде бұл қателік  $\sigma_\Omega = \pm 1,9\%$  тең.

Калибрлеу барысындағы жылу ағыны тығыздығының қателігі келесі өрнекпен анықталады:

$$\sigma_q = \sqrt{4\sigma_I^2 + \sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (4.25)$$

мұндағы  $\sigma_I$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_S$  – сәйкесінше калибрлеу ток күшінің, қыздырғыш шиыршықтың рмдық кедергісі және сезімтал элементтің ауданы.  $\sigma_I = \pm 0,05\%$ ,  $\sigma_R = \pm 0,02\%$  және  $\sigma_S = \pm 0,04\%$  болғанда  $\sigma_q = \pm 0,11\%$ .

Пельтье эффекті есебінен термобатареяның ыстық түйіндерінде жылудың жұтылуымен байланысты қателік жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы үшін  $\sigma_{II} = \pm 0,04$  % құрайды. Мыс-константаннан жасалған сезімтал элементтің геометриялық және электрлік сипаттамаларының температураға тәуелділігімен байланысты қателік  $\sigma_T = \pm 0,06$  % аспайды.

Онда энергетикалық параметрлер үшін салыстырмалы қателік

$$\sigma = \sqrt{\sigma_S^2 + \sigma_\Omega^2 + \sigma_q^2 + \sigma_T^2 + \sigma_{II}^2} \quad (4.26)$$

теңдеуіне қойып,  $\sigma = 1,9$  % мәнін аламыз.

#### **4-бөлім бойынша қорытынды**

Әзірленген жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жоғары сезімталдық пен дәлдікке ие екендігі эксперименттік деректермен расталды. Құрылғының түрлендіру коэффициенті  $2,408 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ . Оның көрсеткіштерінің эталондық ИТП-МГ-4 «ПОТОК» құрылғысымен

салыстырғандағы орташа ауытқуы 2,4%-ды құрайды, ал өлшеулер кезіндегі максималды айырмашылық 3,6%-дан аспайды.

Жылу трассасындағы топырақтың температуралық өрісін эксперименттік зерттеу нәтижесінде құрылғының жоғары сезімталдығы расталды. Судың температурасы 2°C-қа көтерілген кезде, құрылғының электрқозғаушы күші (ЭҚК) 5,7 мВ-тан 6,4 мВ-қа дейін өзгерді. Бұл дәстүрлі термोजұптардың сезімталдығынан 30 еседен артық жоғары, бұл әзірленген құрылғыны жылу техникалық бақылау жүйелерінде қолдануға аса тиімді етеді.

Топырақтың ылғалдылығының жерасты жылу желілеріндегі жылу алмасу процестеріне айтарлықтай әсер ететіні анықталды. Жылутасымалдағыштың температурасы 70°C болғанда, құм қабатының ылғалдылығы 5%-дан 30%-ға дейін артқанда, жылу ағынын өлшейтін құралмен анықталған топырақтың беткі температурасы 20,3°C-тан 33,4°C-қа дейін өседі. Ал стандартты құрылғының көрсеткіштері бірқалыпты, көбіне 20°C немесе өте аз өзгерістермен (20,1°C) ғана, яғни бұл құрылғының өте нашар сезімталдығын көрсетеді. Демек, жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы стандартты құрылғыға қарағанда жылу ағынын дәлірек және сенімдірек анықтайды, әсіресе құрғақ құмда, төмен температураларда және алыс қашықтықта. Бұл әсіресе ылғалдылық өзгерген кезде де нақты деректер алуға мүмкіндік береді.

Эксперименттік деректерді талдау нәтижесінде, ылғалданған құмның эквивалентті жылу өткізгіштігі ылғалданған сазға қарағанда жоғары екені және ылғалдылығы 5%-дан 15%-ға дейін артқанда оның жылу өткізгіштігінің өсетіні анықталды. Саздардың жылу өткізгіштігі 2–4 Вт/(м•°C) аралығында өзгерсе, құмның жылу өткізгіштігі 5 Вт/(м•°C)-тан асады. Алынған нәтижелер жылу желілерін жобалау және пайдалану кезінде топырақтың ылғалдылығын ескерудің маңыздылығын көрсетеді.

Қыздырылған денелердің температурасын анықтау әдістері ұсынылды, олардың негізінде өлшенетін температураны белгілі бір реперлік температурамен салыстыру жатыр. Бұл реперлік температура электр тогының көмегімен сәулеленбейтін пластинаны қыздыру арқылы тұрақты деңгейде ұсталады. Ұсынылған әдістер температураны өлшеу сезімталдығын арттырып, өлшеу қателігін азайтуға мүмкіндік берді. Сәулеленудің энергетикалық параметрлерін өлшеу қателіктері талданды. Алынған нәтижелер көрсеткендей, әзірленген құралдар мен әдістер арқылы энергетикалық параметрлерді өлшеудің салыстырмалы шығарылмайтын қателігі 1,9%-дан аспайды.

## ҚОРЫТЫНДЫ

Жүргізілген зерттеулердің нәтижесінде келесідей қорытындылар жасалды:

1. Алғаш рет сфералық және цилиндрлік геометрияны ескеретін жылуөткізгіштік есебінің шешімі алынды. Бұл шешім Бессель функциялары мен Лежандр көпмүшелері арқылы интегралдық түрлендірулерді қолдануға негізделген және сыртқы жылу ағыны әсерінен жартылай сфера төбесі мен цилиндр табаны арасындағы температура айырмасының динамикасын дәл сипаттауға мүмкіндік береді.

2. Алғаш рет температура айырымы ( $\Delta T(t)$ ) есептеу үшін цилиндр табанының температурасын аудан бойынша орташа алу әдісі ұсынылды. Бұл тәсіл нәтижені радиал координатаға тәуелсіз етеді және датчик сигналының бірыңғай мәнін қамтамасыз етіп, модельдің нақты пайдалану жағдайларындағы дәлдігі мен практикалық қолданылуын арттырады.

3. Термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш, термоэлектрлік тоңазытқышты және қыздырғыш элементтің температурасын тұрақтандыру арқылы өлшеу дәлдігі мен жылдамдығын арттыратын өлшеу блогын

қамтитын жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы әзірленді. Ұсынылған түрлендіргіштің шығыс сигналының өзгерісін талдау әдісі жылу ағынының градиенті бойынша зерттелетін объектідегі ақауларды анықтауға мүмкіндік береді.

4. Жаңа интеграцияланған жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы ұсынылып, оның ғылыми-техникалық негіздемесі жасалды. Бұл құрылғыда екі жылуөлшеу блогының функциялары біріктіріліп, термоэлектрлік батареялы түрлендіргіш пен жылыту элементі термоэлектрлік тоңазытқышқа орналастырылды. ТБТ-тің тұтас аймағында бірдей температураны қамтамасыз ете отырып, жылу ағынының біркелкі берілуі қамтамасыз ету үшін жылуөткізгіштігі жоғары алюминий пластинасы орнатылды. Arctic MX-6 керамикалық пастасын  $\Delta T_2$  ( $<0,00003$  °C) және алюминий пластинасын  $\Delta T_n$  ( $<0,0001$  °C) қолдануда, температураның төменгі көрсеткіштері ТБТ-ке берілетін жылу ағынын жақсартып, аз жылу шығынын қамтамасыз етеді.

5. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жоғары сезімталдыққа ие, өйткені термобатарея тізбегіндегі термоЭҚК-нің жиынтық артуы стандартты термोजұптарға қарағанда өлшеу дәлдігін айтарлықтай арттыруға мүмкіндік береді. Құрылғыны калибрлеу әдістемесі эталондық ИТП-МГ-4 «ПОТОК» құралына салыстыру негізінде өлшеулердің дәлдігін қамтамасыз етеді және құрылғыны құрылыс құрылымдары мен жылу трассаларындағы жылу шығыны аймақтарын жедел анықтау үшін қолдануға мүмкіндік береді.

6. Бұзбайтын бақылау әдісін қолданатын, термоэлектрлік батареялық түрлендіргіші бар және термоЭҚК коэффициенті 5,415 мВ/°C болатын, әзірленген жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы -30°C-тан 100°C-қа дейінгі температура диапазонында жылу тасымалдағыштағы ақауларды анықтау кезінде жоғары сезімталдық пен дәлдікті қамтамасыз етеді.

7. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жоғары сезімталдық пен дәлдікке ие, бұл эксперименттік деректермен расталды. Термоэлектрлік батареялық түрлендіргішті калибрлеу барысында оның түрлендіру коэффициенті 2,408 Вт/м<sup>2</sup>·мВ, ал түрлендіргіштің электр кедергісі 12 – 20 кОм аралығында екендігі анықталды. Жасалған құрылғыдан алынған мәндердің эталондық ИТП-МГ-4 «ПОТОК» құрылғысымен салыстырғандағы орташа ауытқуы 2,4%-ды құрайды, ал өлшеулердегі ең үлкен айырмашылық 3,6%-дан аспайды. Жылу трассасындағы топырақтың температуралық өрісіне жүргізілген эксперименттік зерттеулер құрылғының электр қозғаушы күші (ЭҚК) судың температурасы 2°C-қа көтерілгенде 5,7 мВ-тан 6,4 мВ-қа дейін өзгертетінін көрсетті, бұл стандартты термोजұптардың сезімталдығынан 30 еседен астам жоғары.

8. Көрсетілгендей, жылу ағыны мен температура құбырдың зақымдану дәрежесіне байланысты 30-150 Вт/м<sup>2</sup>, ал температура 5-20°C аралығында тербеледі. Жылу оқшаулау құрылымы бұзылған жағдайда, бұл мәндер 35-65 Вт/м<sup>2</sup>, ал температура 6-8°C шегінде өзгереді.

9. «Энергосервис- ЛТД» ЖШС-нен жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны жылуоқшаулағыш күйін және жылумеханикалық жабдықтар мен

құбырлардың зақымдалған учаскелерін бұзбай анықтау әдісімен бағалау үшін сынақтан өткізу туралы акт алынды.

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Теплометрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах. Кн. 3: Теплометрическая аппаратура для решения прикладных задач: в 2 томах. Том 1 / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев и др.; под ред. д-ра техн. наук. Т.Г. Грищенко – К.: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2018.– 433 с.
- 2 Theodore L. Bergman, Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, David P. De Witt Fundamentals Of Heat And Mass Transfer, Seventh Edition. - the United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2011. – 1033 p.
- 3 Энергетический сектора Казахстана: итоги ремонтно-восстановительных работ по итогам 10 месяцев 2024 года <https://www.gov.kz/memleket/entities/energo/press/news/details/878647?lang=ru>
- 4 Об утверждении Концепции развития топливно-энергетического комплекса Республики Казахстан на 2023 – 2029 годы <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P1400000724>
- 5 В 12 городах Казахстана выявили критически высокий износ на ТЭЦ <https://www.zakon.kz/obshestvo/6433717-v-12-gorodakh-kazakhstana-vyyavili-kriticheski-vysokiy-iznos-na-tets.html>
- 6 Белокур И.П., Коваленко В.А. Дефектоскопия материалов и изделий. - Киев: Тэхника, 1989. - 192 с.
- 7 Ермолов И.Н. Методы и средства неразрушающего контроля качества. - Красноярск: СФУ, 1988. – 368 с.
- 8 Lu Q. Y., Wong C. H. Applications of non-destructive testing techniques for post-process control of additively manufactured parts // Virtual and Physical Prototyping. – 2017. - №12(4). – P. 301-321.
- 9 Peter, L. (2020). Development of a non-destructive testing method for thermal assessment of a district heating network. Chalmers University of Technology, 34. Available at: [https://research.chalmers.se/publication/515569/file/515569\\_Fulltext.pdf](https://research.chalmers.se/publication/515569/file/515569_Fulltext.pdf)
- 10 Бакунов А.С., Горкунов Э.С., Щербинин В.Е. Магнитный контроль. – М.: Спектр, 2011. – 192 с.
- 11 Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. // В кн.: Оптический контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 6. – 832 с.
- 12 ГОСТ 25315–82. Контроль неразрушающий электрический. Термины и определения. – Введ. 1983-07-01. – М. : Издательство стандартов, 2005. – 8 с.
- 13 ГОСТ Р 56542–2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – Введ. 2016-06-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.
- 14 Javier G-M., Jaime G-G., Ernesto V-S. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // Sensors. – 2011. - №11. – P. 2525-2565. doi:10.3390/s110302525
- 15 ГОСТ Р ИСО 12718–2009. Контроль неразрушающий. Контроль вихретоковый. Термины и определения. – Введ. 2010-12-01. – М. : Стандартиформ, 2011. – 40 с.

- 16 Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. Т.2: в 2 кн. Кн.1: Контроль герметичности; кн. 2: Вихретоковый контроль. – М.: Машиностроение, 2006. – 687 с.
- 17 Федосенко Ю.К., Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Останин Ю.Я. Вихретоковый контроль. – Изд. 2-е, испр. – М.: Машиностроение, 2006. – 688 с.
- 18 Герасимов В.Г., Ключев В.В., Шатерников В.Е. Методы и приборы электромагнитного контроля. – М.: Спектр, 2010. – 256 с.
- 19 Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль // В кн.: Электромагнитный контроль. – М.: Высшая школа, 1992. – 312 с.
- 20 ГОСТ 23479–79. Контроль неразрушающий. Методы оптического вида. Общие требования. – Введ. 1980-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 10 с.
- 21 ГОСТ Р 53696–2009. Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 12 с.
- 22 Liske O., Yakymiv R., Melnychuk A. Radiowave methods of non-destructive testing // Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. – 2012. – P. 21-24.
- 23 Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 303 с.
- 24 Аксененко М.Д., Баранчиков М.Л. Приемники оптического излучения: справочник. – М.: Радио и связь, 1987. – 296 с.
- 25 ГОСТ 23480-79. Контроль неразрушающий. Методы радиоволнового вида. Общие требования. – Введ. 1980-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 17 с.
- 26 Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. Научное, методическое, справочное пособие. – СПб: Гуманистика, 2009. – 1100 с.
- 27 Ключев В.В. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. // В кн.: Радиоволновой контроль. – Изд. 2-е, испр. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 6. – 832 с.
- 28 ГОСТ 20415–82. Контроль неразрушающий. Методы акустические. Общие положения. – Введ. 1983-07-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 4 с.
- 29 ГОСТ 23829–85. Контроль неразрушающий акустический. Термины и определения. – Введ. 1987-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1986. – 18 с.
- 30 Lalit Kumar Solanki, Munzni B.K., Vidyarthi U.S. Acoustic Emission, A Non-Destructive Technique - An Overview // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). – 2024. - Volume 12, Issue II. – P. 1423-1430.

31 ГОСТ Р 53698–2009. Контроль неразрушающий. Методы тепловые. Термины и определения. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартиформ, 2010. – 12 с.

32 ГОСТ Р 56511–2015. Контроль неразрушающий. Методы теплового вида. Общие требования. – Введ. 2016-06-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 11 с.

33 Ключев В.В., Соснин Ф.Р., Ковалев А.В. И др. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.

34 Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. - М.: ИД Спектр, 2013. – 544 с.

35 Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови: ДСТУ 3756-98. – [Чинний 21 с. — К.: Держспоживстандарт України, 2000. -від 2000-07-01]. (Національний стандарт України).

36 Энергосбережение. Преобразователи теплового потока термоэлектрические общего назначения. Общие технические условия: ГОСТ [Введ. 2000-07-01]. – К.: Межгосударственный совет по-30619-98. 28 с. – -стандартизации, метрологии и сертификации, 2000. (Межгосударственный стандарт).

37 ДСТУ ISO 9869:2007. Тепловая характеристика зданий. Определение теплового сопротивления и коэффициента теплоотдачи. Метод измерения теплового потока с помощью зонтовых теплосчетчиков. — Киев: Госстандарт Украины, 2007.

38 Holmberg D., Womeldorf C. A progress report on the NIST convective heat flux calibration facility. Proceedings of the 5th ASME/JSME Joint thermal engineering conference, San Diego, California, 1999, pp.1-8.

39 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus: ASTM C177-10. (Acting from 01-Sep-2010), ASTM International, 2010, 23 p.

40 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus: ASTM C158-10. (Acting from 01-Sep-2010), ASTM International, 2010, 15 p.

41 Tsai B.K., Ch.E. Gibson, A.V. Murthy. NIST Measurement Services: Heat-Flux Sensor Calibration. NIST Special Publication 250-65, 2004, 44 p.

42 Назаренко Л.А., Полевой В.І., Бондаренко Л.І. Державний спеціальний еталон одиниці енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. УМЖ, Вип. 1, 1995, с.31–36.

43 Бондаренко Л.И., Н.В. Прокопенко. Метрологическое обеспечение оптико-физических измерений в системе экологического мониторинга и контроля параметров микроклимата // Вестник ХНАДУ. - Вып. 52. - 2011, С. 162-166.

44 ДСТУ 3193-95. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювань енергетичної освітленості некогерентним випромінюванням. Чинний від 1996-07-01. - К.: Держстандарт України, 1996. - 18 с.

45 Геращенко О.А., Федоров В.Г. Техника теплотехнического эксперимента. – Киев: Наукова думка, 1964. – 164 с.

46 Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer / F.P. Incropera, D.P. DeWitt. — 6th ed. — New York: Wiley, 2006. — 997 p.

47 McAfee K., Sunderland P.B., Rabin O. (2023). A heat flux sensor leveraging the transverse Seebeck effect in elemental antimony. Sensors and Actuators A: Physical, 363, 114729. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114729>

48 Геращенко О.А. Основы теплотметрии. – Киев: Наукова думка, 1984. – 192 с.

49 Геращенко О.А., Федоров В.Г. Тепловые и температурные измерения: справочник. – К.: Наукова думка, 1965. – 304 с.

50 Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в нестационарной теплотметрии : дис. канд. техн. наук Митяков Андрей Владимирович; – СПб.: СПб ГПУ, 2000. – 132 с.

52 Сапожников С.З. Основы градиентной теплотметрии. – СПб.: СПб ГПУ, 2012. – 203 с.

53 Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Градиентные датчики теплового потока в теплотехническом эксперименте. – СПб.: СПб ГПУ, 2007. – 202 с.

54 Теоретичні та прикладні основи проектування зразкових засобів відтворення одиниці густини теплового потоку [Рукопис] : Звіт з НДР "Компаратор" (заключ.). – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України; кер. Декуша Л. В.; викон. : Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Менделеева Т. В. [та ін.]. - Київ, 2005. – 131 с. Бібліогр. : С. 127–131. – № ДР 0103U005193.

55 Створення вихідного еталону для відтворення, зберігання та передавання розміру одиниці поверхневої густини теплового потоку [Рукопис]: Звіт про НДР (заключ.). – Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України; кер. Декуша Л. В.; викон. : Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Трикоз П. І. [та ін.].- Київ, 2008. – 150 с. Бібліогр.: с. 100–108. – № ДР 0108U008391.

56 Розробка універсальної комп'ютеризованої системи вимірювання теплових потоків на базі малоінерційних перетворювачів [Рукопис] : звіт про НДР (заключ.) / Інститут технічної теплофізики НАН України ; наук. керівник Декуша Л.В.; викон. Грищенко Т. Г., Воробйов Л. Й., Трикоз П. І. [та ін.]. – Київ. – 2008. – 165 с. – Бібліогр. : с. 153–165. – № ДР 0108U002710.

57 Визначення теплових потоків крізь огорожувальні конструкції (Определение теплового потока через ограждающие конструкции) : Методика М 00013184.5.023-01 / Розробники: Т. Г. Грищенко, Л. В. Декуша [та ін.] // Нормативний документ. Держком України з енергозбереження та

Держком України з будівництва та архітектури. – К. : ЛОГОС, 2002. – 131 с.  
– (На українській та російській мовах).

58 Царьгородцев Ю.П., Полуэктов Н.П., Усатов И.И., Харченко В.Н. Тепловые потоки в магнетронном разряде с полым катодом // Труды 5-й Российской национальной конференции по теплообмену. - 2010. - Т. 1. - С. 142-145.

59 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник под ред. А.В.Клименко и В.М.Зорина, книга 2. - М.: МЭИ, 2001. - 561 с.

60 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus: ASTM C177-10.

61 Теплотетрия: теория, метрология, практика. Монография в трех книгах / Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша, Л.И. Воробьев и др.; под ред. д-ра техн. наук. Т.Г. Грищенко. Кн. 3: Теплотетрическая аппаратура для решения прикладных задач : в 2 томах. Том 1. – Киев: Институт технической теплофизики НАН Украины, 2018. – 433 с.

62 Курбатова Н.А. Разработка и исследование радиационно-конвективного метода и установки эталонного назначения для поверки датчиков теплового потока: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.19. – Новосибирск, 2011. – 22 с.

63 Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. - 2004. - Т. 74, Вып. 7. - С. 114-120.

64 Геращенко О.А. Создание датчика теплового потока // Удостоверение о регистрации с приоритетом от 5 февраля 1957. – Комитет по делам изобретений при СМ СССР.

65 Межгосударственный стандарт ГОСТ 6616-94 «Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия»

66 Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар: Справочник. — М.: Металлургия, 1983.

67 Геращенко О.А., Грищенко Т.Г. Приборы для теплофизических измерений. – Киев: Час, 1991. – 73 с.

68 Бакунов А.С., Герасимов В.Г., Останин Ю.Я. Вихретоковый контроль накладными преобразователями. – М.: МЭИ, 1985. – 123 с.

69 Saidi, A., Kim, J. (2004). Heat flux sensor with minimal impact on boundary conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28 (8), 903–908. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.01.004>

70 Akoshima, M. (2021). Developement of an apparatus for practical calibration of heat flux sensors. *Measurement: Sensors*, 18, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2021.100343>

71 Pountney, O. J., Patinios, M., Tang, H., Luberti, D., Sangan, C. M., Scobie, J. A. et al. (2021). Calibration of thermopile heat flux gauges using a physically-

based equation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 235 (7), 1806–1816. <https://doi.org/10.1177/0957650920982103>

72 Fralick, G., Wrbanek, J., Blaha, C. (2002). Thin Film Heat Flux Improved Design. National Aeronautics and Space Administration, 211566. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20020082950/downloads/20020082950.pdf>

73 Azerou, B., Garnier, B., Lahmar, J. (2012). Thin film heat flux sensors for accurate transient and unidirectional heat transfer analysis. Journal of Physics: Conference Series, 395, 012084. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/395/1/012084>

74 Kava, M. P., Patel, A. (2023). Design Development and Performance of a Heat Flux Meter Subjected to a Steady State Heat Flux Conditions. Vol. IV Mechanical Engineering, Metallurgical & Materials Engineering, Textile Engineering. Maharaja Sayajirao University of Baroda. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/370074617\\_Design\\_Development\\_and\\_Performance\\_of\\_a\\_Heat\\_Flux\\_Meter\\_Subjected\\_to\\_a\\_Steady\\_State\\_Heat\\_Flux\\_Conditions](https://www.researchgate.net/publication/370074617_Design_Development_and_Performance_of_a_Heat_Flux_Meter_Subjected_to_a_Steady_State_Heat_Flux_Conditions)

75 Diller, T. E. (2015). Heat Flux Measurement. Mechanical Engineers' Handbook, 1–27. <https://doi.org/10.1002/9781118985960.meh407>

76 Ewing, J., Gifford, A., Hubble, D., Vlachos, P., Wicks, A., Diller, T. (2010). A direct-measurement thin-film heat flux sensor array. Measurement Science and Technology, 21 (10), 105201. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/10/105201>

77 Pullins, C. A., Diller, T. E. (2010). In situ High Temperature Heat Flux Sensor Calibration. International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (17-18), 3429–3438. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.03.042>

78 Моисеев С.С. Разработка и исследование тонкопленочных датчиков теплового потока для установок промышленной теплоэнергетики: дис. ... канд. техн. наук.: 05.14.04., М., 2011. – 138 с.

79 Application and specification of heat flux sensors [Electronic resource] URL: <http://www.hukseflux.com>

80 Captec scientific catalogue [Electronic resource]: URL: <http://www.captec.fr>

81 Vatel heat flux microsensors: [Electronic resource]. URL: <http://www.vatell.com>

82 Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Измерение нестационарных тепловых потоков градиентными датчиками на основе анизотропных монокристаллов висмута // Журнал технической физики. - 2004. - Т. 74, Вып. 7. - С. 114-120.

83 Сиваков И.А. Использование информационной матрицы Фишера для оценки погрешности нестационарной теплотметрии при параметрической идентификации на примере батарейного приемника теплового потока // Сборник трудов I Всероссийского конгресса молодых ученых. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – С. 66-72.

84 Сиваков И.А. Исследование возможности применения батарейных приемников теплового потока в нестационарной теплотметрии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2012. - № 5 (81). - С. 134-138.

85 Измеритель плотности тепловых потоков и температуры «Теплограф» [Электронный ресурс]. Научно-производственное предприятие «ИНТЕРПРИБОР» [Официальный сайт]. URL: <http://www.interpribor.ru/teplograf10.php>

86 ОАО «Омский завод Эталон» [Официальный сайт] URL: <http://www.etalonomsk.ru>.

87 ООО «Промышленный союз» [Официальный сайт] URL: <http://promsoyuz.ru/>

88 ООО «Специальное конструкторское бюро Стройприбор»

89 А.с. РК № 9657. Прибор для измерения теплового потока / Ю.Н. Антипов, Д.Ж. Карабекова; опубл. 17.03.2003, Бюл. № 3. – 4 с.

90 А.с. РК № 13587. Прибор для измерения теплового потока / К. Кусаиынов, В.Е. Гладков, Д.Ж. Карабекова; опубл. 15.10.2003, Бюл. № 5. – 4 с.

91 Антипов Ю.Н., Карабекова Д.Ж., Ахтанова М.К., Иманасова Н.В. Приборы для измерения энергетических параметров теплофизических процессов // Известия КГТУ. – 2005. – № 7. – С. 241-245.

92 Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Абдыкова, Г., Жакиев Н. Моделирование и разработка теплотметрических датчиков для неразрушающего контроля теплотрасс // Научное и творческое наследие академика Е.А. Букетова: материалы междунар. науч.-практ. конф. – Караганда: КарГУ, 2015. – С. 381-384.

93 Пат. № 1588 РК. Измеритель теплового потока / Нусупбеков Б.Р., Карабекова Д.Ж., Хасенов А.К., Нусупбеков У.Б., Аукеев О.Б.; опубл. 29.07.16, Бюл. № 4. – 4 с.

94 Kurytnik I.P., Nussupbekov B.R., Karabekova D.Zh. Thermal control method for the diagnosis of underground heating systems. Bulletin of University of Karaganda. PHYSICS Series. – 2014. – №2 (74). – С.52-57.

95 Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – Изд. 3-е, перер. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.

96 Рубцов В.А. Работа чувствительных термоприемников в импульсном режиме // В кн.: Тепловые приемники излучения. – Л.: 1971. – С. 39-44.

97 Михайлов М.Д. Несимметрическое нагревание неограниченной пластины // Инж.-физ. журнал. – 1962. – № 11. – С.157-162.

98 Шкловер А.М. Теплопередача при периодических тепловых воздействиях. – Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 121 с.

99 Белоусова Л.Е. Температурное поле пластины при нагревании поверхности периодически повторяющимся импульсами // Теплофиз. высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 3. – С. 668-673.

100 Коноводченко А.А., Журавель А.Л., Сиваков А.Г. Координатная характеристика болометра, полученного на границе пленок нормального

металла и сверхпроводника // В кн.: Тепловые приемники излучения. – Л.: 1990. – С. 24-25.

101 Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.

102 Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. – М.: Наука, 1964. – 488 с.

103 Чистяков Е.И. Теплообмен абсолютного приемника излучения плоского типа при нагревании его внешним и внутренним источниками тепла // Труды ГГО. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – № 295. – С. 141-147.

104 Беляев М.Н., Рядно А.А. Методы стационарной теплопроводности – М.: Высшая школа, 1978. – 328 с.

105 Томбасов Е.А., Лозинская О.М., Черепанов В.Я. Образцовая установка для градуировки и проверки преобразователей теплового потока. – М.: Метрология, 1987. – № 1. – С. 31-39.

106 Перевертун А.И., Антипов Ю.Н. Температурное поле бесконечной пластины, нагреваемой импульсным потоком радиации // В кн.: Математика и физические исследования. – Караганда: Изд-во КарГУ, 1974. – С. 257-261.

107 Гершун А.А. Избранные труды полиномы фотометрии и светотехнике. – М.: Физматгиз, 1958. – 548 с.

108 Перевертун А.И., Антипов Ю.Н., Васильев Н.Ф. Импульсный обогрев пластины с тепловой изоляцией одной стороны // В кн.: Математика и физические исследования. – Караганда: Изд-во КарГУ, 1974. – С. 251-257.

109 Kissabekova P.A., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K, Kucheruk V.Yu., Kudussov A.S., Kyzdarbekova Sh.S. Theoretical foundations of the construction of the operation of heat flow devices // Bulletin of the university of Karaganda-physics. – 2023. - №1 (109). – P. 80-87. <https://doi.org/10.31489/2023PH1/80-87>

110 Антипов Ю.Н., Контаев С.С., Омаров Т.Е. Измерение энергических параметров излучения протяженных источников. Депон. в КазНИИНТИ. (Депонированные научные работы. ВИНТИН. М.: 1989, №3(209) с. 164) с. 98.

111 Kucheruk V., Kulakov P., Moskvichova Yu., Gadzhula N., Kissabekova P., Kulakova A., Karabekova D., Khassenov A. Development of the mathematical model of light flux intensity sensor based on the photodiode and operational amplifier // Bulletin of the university of Karaganda-physics. – 2020. - №1 (97). – P. 50-57.

112 Kissabekova P.A., Karabekova D.Zh., Khassenov A.K, Chirkova L.V, Satybaldin A.K. Investigation of the operation of a thermoelectric converter // Bulgarian Chemical Communications. – 2022. – Vol. 54. - Special Issue B2. - P. 119-121.

113 Прибор для измерения теплового потока. Патент на полезную модель №6393 от 03.09.2021 Карабекова Д.К., Қисабекова П.Ә., Хасенов А.К., Азатбек Ш.

114 Karabekova D.Zh., Kissabekova P.A., Kucheruk V.Yu., Mussenova E.K., Azatbek Sh. Main characteristics of the heat flow meter // Eurasian Physical Technical Journal. – 2022. - Vol.19. - №2(40). – P. 71-74.

115 Karabekova D.Zh., Khassenov A.K, Kissabekova P.A., Satybaldin A.Zh., Tungushbekova M.K.Variation of spatially heterogeneous radiation by coordinate-sensitive receiver // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. - Vol.17. - №1 (33). – P. 113-118. <https://doi.org/10.31489/2020No1/113-118>

116 Karabekova D.Zh., Kissabekova P.A., Nussupbekov B.R., Khassenov A.K. Analysis of the Insulation State of Underground Pipelines in the Heating Network // Thermal Engineering. – 2021. - Vol. 68. - №10. - P. 802–805. <https://doi.org/10.1134/S0040601521100013>

117 Karabekova D.Zh., Kissabekova P.A., Khassenov A.K, Kucheruk V.Yu., Kudussov A.S.Heat flow density measurement during non-destructive testing // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2024. – Vol. 3. - №5 (129). – P. 45-51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304597>

118 Карабекова Д.Ж., Нүсіпбеков Б.Р., Хасенов А.К., Сабитова М.Б. Жылу желілерінің жай-күйін бақылау // Бейсызық жүйелердегі хаос және құрылымдар. Теория және эксперимент: 11-ші Халықаралық ғылыми конференцияның материалдары. – Қарағанды: ҚарМУ, 2019. – Б.315-318.

  
 КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ      РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН  
 REPUBLIC OF KAZAKHSTAN  
**ПАТЕНТ**  
**PATENT**  
 № 6393  
 ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL



(21) 2021/0315.2

(22) 01.04.2021

(45) 03.09.2021

(54) Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы  
 Прибор для измерения теплового потока  
 Device for measuring heat flow

(73) «Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)  
 Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский университет имени академика Е. А. Букетова» (KZ)  
 «Karaganda University of the name of Academician E.A. Buketov» Non-profit limited company (KZ)

|                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>(72) Карабекова Дана Жилкибаевна (KZ)<br/>         Қисабекова Перизат Әуелқызы (KZ)<br/>         Хасенов Аянберген Кайрбекович (KZ)<br/>         Азатбек Шерхан (KZ)</p> | <p>Karabekova Dana Zhilkibayevna (KZ)<br/>         Kissabekova Perizat Auyelkyzy (KZ)<br/>         Khassenov Ayanbergen Kairbekovich (KZ)<br/>         Azatbek Sherkhan (KZ)</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



ЭЦҚ қол қойылды  
 Подписано ЭЦП  
 Signed with EDS

Е. Оспанов  
 E. Ospanov  
 Y. Ospanov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМҚ директоры  
 Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»  
 Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

**ҚОСЫМША 2**

**ЖАУАПКЕРШІЛІГІ  
ШЕКТЕУЛІ  
СЕРІКТЕСТІК  
«ЭНЕРГОСЕРВИС-ЛТД»**



100026, Қарағанды қаласы, Язев көшесі, 13 үй  
Тел.: 8 (7212) 35-30-67, 35-30-71  
БСН 060440007120  
ЖСҚ КЗ406017191000004499, БСК HSBKCKZKX  
«Қазақстан Халық Банкі» АҚ  
E-mail: energoservis-2006@mail.ru

**ТОВАРИЩЕСТВО  
С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
«ЭНЕРГОСЕРВИС-ЛТД»**

100026, город Караганда, улица Язева, дом 13  
Тел.: 8 (7212) 35-30-67, 35-30-71  
БИН 060440007120  
ИНН КЗ406017191000004499, БИК HSBKCKZKX  
АО «Народный Банк Казахстана»  
E-mail: energoservis-2006@mail.ru

«Энергосервис-ЛТД» ЖШС директоры  
Оспанбай Е.



**Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны сынау актісі**

Осы сынақ актісі жылу окшаулау күйін және құбырлардың зақымдалған учаскелерін бұзбайтын әдіспен анықтауға арналған жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы Е.А. Бокетов атындағы Қарағанды университетінің профессор Ж.С. Ақылбаев атындағы инженерлік жылуфизика кафедрасында орындалған докторлық диссертация аясында әзірленгенін және «Энергосервис-ЛТД» ЖШС кәсіпорнында сынақтан өткенін растайды.

1. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғы жер астында салынған құбырлар оң бойымен өлшеу арқылы жылу желісі құрылымының зақымдануы немесе ылылдануын бұзбайтын әдіспен сынау үшін қолданылды.
2. Ғылыми-зерттеу жұмыстарының нәтижелерінің жаңалығы түбегейлі жаңа болып табылады.
3. Құрылғының сынақтары Қарағанды қаласындағы орта мектепке жеткізуші жылу желісі учаскелерінде және «Жастар» ауданында жүргізілді.
4. Жылу ағынын өлшеуге арналған құрылғыны пайдалану барысында қоршаған ортаны қорғау және адам өмірінің қауіпсіздігі ережелері мен талаптары толық сақталды.

**Сынақтарды орындаушылар:**

Жетекші, PhD, қауымдастырылған профессор

Карабекова Д.Ж.

Жауапты орындаушы, докторант

Қисабекова Н.А.

«Энергосервис-ЛТД» ЖШС бас инженері

Кулжанов А.