

**Міністерство освіти і науки України
Департамент освіти і науки Запорізької облдержадміністрації
Запорізьке територіальне відділення МАН України**

Відділення: технічні науки
Секція: екологічно безпечні технології
та ресурсозбереження

**МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
МАТЕРІАЛІВ**

Роботу виконав:
Семененко Андрій Васильович,
учень 11–В класу
Запорізького багатoproфільного ліцею № 99

Наукові керівники :
Андрєєв Андрій Миколайович,
професор Запорізького національного
університету, доктор педагогічних наук;
Багрійчук Олександр Сергійович,
доцент Запорізького національного університету,
кандидат фізико-математичних наук

Запоріжжя – 2020

Запорізьке територіальне відділення Малої академії наук

АНОТАЦІЯ

Семененко Андрій Васильович,
учень 11–В класу
Запорізького багатoproфільного
Ліцею № 99
заклад позашкільної освіти:
КЗ «ЗОЦ НТТУМ «Грані» ЗОР

Наукові керівники: Андреев Андрій Миколайович, доктор педагогічних наук, професор Запорізького національного університету; Багрийчук Олександр Сергійович, кандидат фізико-математичних наук, доцент Запорізького національного університету

Методика дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

Науково-дослідницьку роботу присвячено темі створення сучасних технологій дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів та розробці методики вимірювання коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.

Проаналізовано існуючі методики дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, зокрема таких, що дозволяють виміряти коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.

Створено власну методику дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, яка дозволяє, зокрема, вимірювати їх коефіцієнт теплопровідності, оцінювати відповідність фактичних характеристик основних робочих властивостей тим характеристикам, що були заявлені виробником.

Створено експериментальний зразок пристрою для вимірювання коефіцієнту теплопровідності та наведено результати експериментальних досліджень теплоізоляційних матеріалів.

Впроваджено експериментальний зразок пристрою для вимірювання коефіцієнту теплопровідності в освітній процес з фізики у Запорізькому багатoproфільному ліцеї №99 та Запорізькому національному університеті у межах підготовки студентів предметної спеціальності «Середня освіта (Фізика)».

Ключові слова: коефіцієнт теплопровідності, теплоізоляційні властивості, теплоізоляційні матеріали, Закон Фур'є для стаціонарного потоку теплоти, теплоізоляційна камера, нагрівач, температура, термодатчики.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ.....	5
1.1 Етапи роботи.....	5
1.2 Актуальність проблеми дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів	7
1.3 Аналіз існуючих методик вимірювання теплопровідності матеріалів	9
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ	11
2.1 Фізичні засади методу	11
2.2 Технічний опис приладу	13
2.3 Алгоритм авторської методики дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів	15
РОЗДІЛ 3 АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ	17
3.1 Опис діючої моделі пристрою	18
3.2 Результати експериментальних досліджень теплоізоляційних матеріалів	20
3.3 Напрямки впровадження установки	26
ВИСНОВКИ	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	28
ДОДАТКИ	Error! Bookmark not defined.

ВСТУП

Збереження невідновлюваних ресурсів у сучасному світі є дуже актуальною проблемою. Допомагають в цьому теплоізоляційні матеріали. Вони дозволяють знизити втрати тепла в приміщеннях, отже зберегти ресурси, що були б витрачені на підтримання стабільної температури.

Оцінку теплоізоляційних якостей матеріалів можливо провести за допомогою теоретично обґрунтованої та експериментально апробованої в рамках наших робіт МАН установки для визначення коефіцієнту теплопровідності.

Ця установка за розробленим алгоритмом авторської методики дозволяє провести дослідження популярних утеплювачів та на підставі отриманих результатів зробити висновок щодо теплоізоляційних якостей утеплювачів та оцінити їх відповідності стандартам, заявленим виробником.

Актуальність дослідження пов'язана із необхідністю створення сучасних технологій для дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, які дозволяли б вибрати економічно оптимальні з них для утеплення.

Об'єкт дослідження: Методики та пристрої дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

Предмет дослідження: Способи та пристрої вимірювання коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційних матеріалів

Мета дослідження: Розробити методику вимірювання коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційних матеріалів

Практичне значення: Створена методика може використовуватися у наукових та виробничих цілях для дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів та оцінювання відповідності фактичних характеристик основним робочим властивостям.

РОЗДІЛ 1

ПРОБЛЕМА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Етапи роботи

Наша робота присвячується розробці методики дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів. Вона складається з трьох етапів.

I етап (2017/2018 учбовий рік):

- суть явища теплопровідності
- коефіцієнт теплопровідності
- види теплоізоляційних матеріалів. Зокрема виявлено, що крім великої різноманітності традиційних утеплювачів постійно створюються нові матеріали даного класу. Тому існує потреба у вимірюванні фізико-технічних характеристик теплоізоляційних матеріалів, одною з яких є коефіцієнт теплопровідності.

- аналіз існуючих методів визначення коефіцієнту теплопровідності. Зокрема було показано, що істотним недоліком існуючих методів та пристроїв вимірювання теплопровідності матеріалів є високі ціни на готові пристрої, складність апаратури для стаціонарних методів, складність обчислень та велика похибка визначення коефіцієнта теплопровідності і використання руйнівного контролю для нестационарних методів, все це значно ускладнює процес вимірювання теплопровідності матеріалів.

- теоретична розробка пристрою для вимірювання коефіцієнту теплопровідності, зокрема запропонована конструкція лабораторного пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, принцип роботи якого базується на використанні джерела теплоти відомої потужності та вимірювані різниці температур на зовнішній та внутрішній поверхні зразка, який є складовою частиною теплоізоляційної камери.

II етап (2018/2019 учбовий рік):

- розробка експериментального зразка установки для вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та дослідження його робочих характеристик. Зокрема визначено експериментальну та теоретичну залежність густини усталеного теплового потоку від електричної потужності нагрівача

- перший зразок підтвердив дієздатність методу. Установка була апробована для дослідження різних типів пінополістиролу на предмет практичного визначення їх коефіцієнту теплопровідності.

III етап (2019/2020 учбовий рік):

На основі теоретичної моделі розробленого методу та з використанням експериментального зразка пристрою для вимірювання коефіцієнту теплопровідності створено методику дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, зокрема:

- вимірювання їх коефіцієнту теплопровідності;
- оцінювання відповідності фактичних характеристик основних робочих властивостей (зокрема густина, коефіцієнт теплопровідності) тим, що були заявлені виробником цих матеріалів;
- розроблено алгоритм авторської методики дослідження, що є, з одного боку, технологічною картою для використання оператором установки для вимірювання коефіцієнту теплопровідності, а з іншого - порядком виконання відповідної лабораторної роботи в освітньому процесі з фізики закладів загальної середньої та вищої освіти.

1.2 Актуальність проблеми дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

На сьогодні існує велика кількість теплоізоляційних матеріалів. Матеріали, що використовуються для теплоізоляції можна розділити на є органічні (пінопласти) та неорганічні (вати). Розглянемо їх властивості.

Таблиця 1.1

Порівняння характеристик теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Густина, кг/м ³	Горючість (від негорючого НГ до сильно горючого Г4)	Коефіцієнт теплопровідності Вт/(м·°C)	Вартість за 1м ³ , у.о. (умовна одиниця, прирівнюється до долара США)
Безпресовий пінополістирол (пінопласт)	15...40	Г2..Г4	0,038...0,04	30...50
Екструдований пінополістирол	25...45	Г2..Г4	0,03...0,035	70...100
Піноізол	13...40	Г2	0,03...0,047	35...80
Пінофол	44...74	Г1	0,037... 0,052	1,5...20 за 1 м ²
Пінополіуретан	30...200	Г2..Г4	0,03...0,04	40...70
Мінеральна вата	35...160	НГ...Г2	0,04... 0,048	40...80
Скловата	13...85	Г1..Г4	0,04... 0,046	50...55
Аерогель	180	НГ	0,022	415...555 за 1 м ²

Теплоізоляційним матеріалам властивий ряд фізико-технічних характеристик, які виділяють їх серед інших матеріалів. Важливими характеристиками теплоізоляційних матеріалів є коефіцієнт теплопровідності та густина.

Неорганічні вати являють собою кам'яні (або скляні) волокна, склеєні за допомогою синтетичних сполучників. Як правило, вони пожежобезпечніше за пінопласти. Проте теплоізоляційні властивості більшості ват з часом втрачаються.

Пінопласти - клас матеріалів, що представляють собою спінені пластичні маси, в яких міститься близько 98% газів (переважно повітря) та 2 % пластичної маси.

Найбільш відомими пінопластами є: карбамідно-формальдегідні (піноізол), поліетиленові (пінофол), поліуретанові (пінополіуретан, поролон), полівінілхлоридні (PVC), і полістирольні.

Важливою характеристикою пінопластів є екологічність - наприклад, піноізол, маючи непогані теплоізоляційні характеристики, здатен тривалий час виділяти високотоксичний формальдегід, що значно зменшує його привабливість як утеплювача помешкань.

Висока здатність до водопоглинання також може кардинально змінити теплоізоляційні характеристики матеріалів - піноізол та пінофол здатні поглинати велику кількість води, що значно погіршує їх теплоізолюючу здатність.

Вигідно виділяються на їх тлі безпечні для людини полістирольні пінопласти, завдяки структурі з закритими комірками з повітрям вони мають одночасно низьку теплопровідність і низьке водопоглинання (0,4% порівняно з 20% піноізолу).

Полістирольні пінопласти розрізняються за методом виготовлення: безпресовий (саме його часто називають просто пінопластом), пресовий, екструдований та автоклавний.

В будівництві дозволено використовувати лише слабогорючі пінополістироли - як екструдований так і безпресовий ПСБ-С (Пінополістирол суспензійний безпресовий самозатухаючий) до складу яких введені антипірени (класу Г1-Г2), з монтажем розділяючих протипожежних розтинів з негорючого матеріалу (наприклад, неорганічної вати). [1, с. 97]

1.3 Аналіз існуючих методик вимірювання теплопровідності матеріалів

Є декілька можливих способів вимірювання теплопровідності, кожен з яких підходить для обмеженого кола матеріалів, в залежності від термічних властивостей і температури середовища. Існують два класи методів для вимірювання теплопровідності: стаціонарні і нестаціонарні (або перехідні) методи.

Стаціонарні методи вимірювання (1-2 в таблиці 1.2) застосовують, коли температура матеріалу не змінюється з часом. Це робить аналіз прямим. Недоліком є дорога, складна і точна експериментальна установка та відносно більший час вимірювання.

Нестаціонарні методи вимірювання теплопровідності (3-9 в таблиці 1.2) вивчають сигнал як функцію часу. [2]

Перевага цих методів полягає в тому, що вони можуть в цілому бути виконані більш швидко, оскільки немає необхідності чекати стаціонарної ситуації. Недолік полягає в тому, що математичний аналіз даних в цілому складніше. [3, с. 89]

Таблиця 1.2

Існуючі методи вимірювання теплопровідності

№	Метод	Застосування
1	розділеного бруска	геофізичні об'єкти
2	визначення при стаціонарному тепловому режимі	тверді речовини
3	визначення теплопровідності циліндричним зондом	тверді речовини, порошки, паста
4	визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем	тверді речовини
5	джерела перехідних площин	тверді речовини, паста, тонкі плівки
6	МTPS–метод	рідини, порошки, пасти
7	лазерного спалаху	тонкий диск
8	3 ω –метод	речовини кріогенних температур
9	теплового відбиття випромінювання	тонкі плівкові матеріали [4]

Вимірювання коефіцієнту теплопровідності може проводитися за допомогою запропонованих різними виробниками готових приладів. Але у існуючих ДСТУ для вимірювання теплопровідності теплоізоляційних матеріалів застосовуються вимірювальні установки індивідуального виготовлення, а не промислові прилади. [5]

Отже, порівнюючи характеристики теплоізоляційних матеріалів, бачимо, що найбільш конкурентним утеплювачем за співвідношенням економічності та теплосефективності для утеплення всередині панелей, в багатошаровій кладці та при фасадній теплоізоляції (за умови захисного покриття) є безпресовий пінополістирол – жорсткий матеріал з комірчастою структурою, отриманий шляхом спікання гранул полістиролу або одного з його сополімерів. Останнім часом популярності набуває екструдований пінополістирол, що пов'язано з більшою стабільністю його характеристик.

Популярність пінополістиролу спонукає виробників вносити зміни у технологію виробництва - щоб з меншої кількості сировини виготовити більше плит пінополістиролу. Така економія матеріалу вочевидь позначається на одній з важливих характеристик матеріалу - густині.

Цікаво було б дослідити на практиці, як залежать теплоізоляційні характеристики пінополістиролу від його густини - адже при розрахунку утеплення використовують коефіцієнт теплопровідності, регламентований ДСТУ. Але при відхиленні від стандарту розрахунок буде неточним і утеплення житла виявиться неефективним.

Представлені на ринку промислові прилади для обчислення теплопровідності складні, дорогі та мають недоліки, ДСТУ їх не використовує, пропонуючи скористатися вимірювальною установкою індивідуального виготовлення.

Для визначення коефіцієнта теплопровідності можемо використати власноруч створену установку, яка була представлена як на обласному, так і на всеукраїнському етапі МАН. Коефіцієнт теплопровідності будемо визначати методом стаціонарного теплового режиму - це значно спрощує математичний апарат обчислень.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

Нестационарні методи мають необхідність складних обчислень, велику похибку визначення коефіцієнта теплопровідності і потребу у руйнуванні зразків, стаціонарні ж вимагають складної апаратури, існуючі прилади не виправдано дорого коштують.

За основу було взято стаціонарний метод вимірювання коефіцієнту теплопровідності, з використанням поширених матеріалів та приладів створено лабораторний пристрій, що досягає відносно швидкого вимірювання з прийнятною точністю, та без необхідності у проведенні дуже складних дослідів і розрахунків.

2.1 Фізичні засади методу

Найбільш популярні теплоізоляційні матеріали переважно використовуються для утеплення житла у вигляді пластин або плоского шару. Тому досліджуваний зразок теплоізоляційного матеріалу повинен мати форму пластини.

Для спрощення математичного апарату будемо досліджувати стаціонарний тепловий режим, коли температура досліджуваного зразка не залежить від часу.

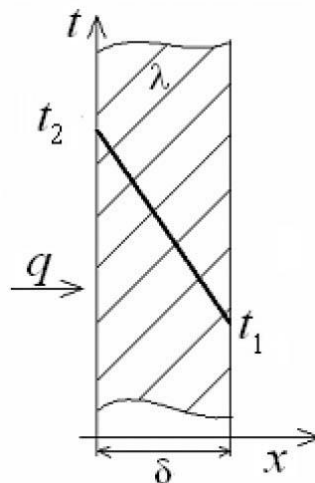


Рис. 2.1 – Плоский однорідний зразок у стаціонарному тепловому потоці

Розглянемо плоский однорідний зразок (рис. 2.1) товщиною δ з постійним коефіцієнтом теплопровідності λ . На зовнішніх поверхнях зразка підтримуються постійними температури t_1 і t_2 . Таким чином через зразок проходить стаціонарний тепловий потік.

Тепловий потік – це кількість теплоти, що передається в одиницю часу через довільну поверхню.

Густина теплового потоку q – тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні. Це вектор, що співпадає з напрямком поширення тепла, тобто направлений в сторону зменшення температури і перпендикулярний частинам з однаковою середньою температурою. [6, с. 4]

Оскільки ми розглядаємо пластину, що пронизується одновимірним тепловим потоком з лініями, перпендикулярними до поверхні пластини, а коефіцієнт теплопровідності матеріалу λ приймається постійним, не залежним від температури, то густина теплового потоку q через таку пластину може бути розрахована за законом Фур'є:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta}, \quad (\text{Вт/м}^2) \quad (2.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини (Вт/(м·°C));

$\Delta t = t_2 - t_1$ – різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями зразка, °C;

δ – товщина пластини, м.

2.2 Технічний опис приладу

Після вивчення недоліків та переваг існуючих методів вимірювання теплопровідності ізоляційних матеріалів було запропоновано конструкцію лабораторної установки, зображену на рис. 2.2.

Установка являла собою термоізовану камеру (термокамеру). Для спрощення розрахунків вибрано геометрично правильну форму установки у вигляді куба.

Усередині камери було встановлено точкове електричне джерело теплоти регульованої потужності.

Зразок, що підлягає випробуванню, встановлювався у вигляді кришки в верхній частині термоізованої камери. Розташування зразка – горизонтальне, напрямок теплового потоку знизу вгору.

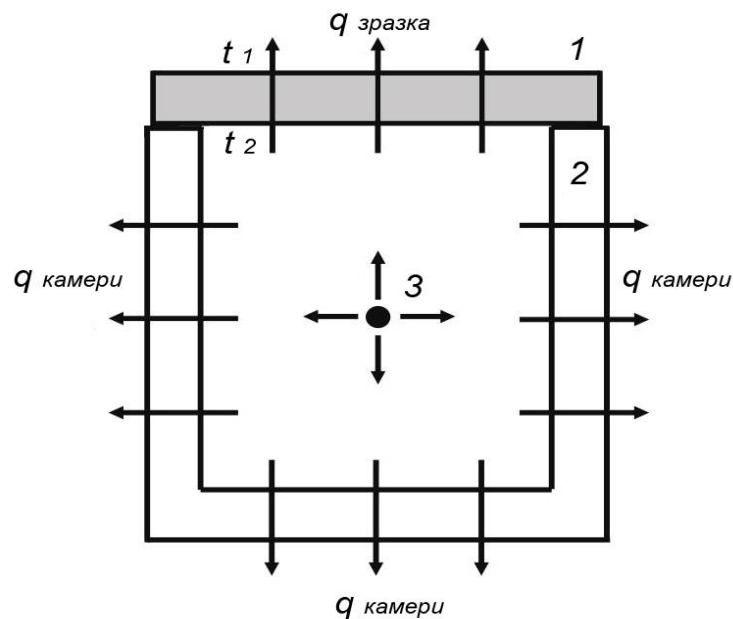


Рис. 2.2 – Схема термокамери

1 – зразок, 2 – термокамера, 3 – нагрівач.

У загальному випадку слід враховувати залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури. Проте для теплоізоляційних

матеріалів у вузькому інтервалі температур (до 60 °С) величина коефіцієнта теплопровідності може бути прийнята постійною. [7, с. 53]

Також при використанні зразків кінцевих розмірів в експерименті необхідно враховувати, що частина теплового потоку, що надходить в зразок, розсіюється в навколишнє середовище через торцеві поверхні. Але якщо зразки виготовлені з повітряно-пористих матеріалів малої густини, розсіюванням теплоти через торцеві поверхні можна знехтувати.

Суть методу в створенні стаціонарного теплового потоку, що проходить через плоский зразок певної товщини і спрямованого перпендикулярно до лицьових (найбільших) граней зразка, вимірюванні електричної потужності нагрівача, температури протилежних лицьових граней і товщини зразка. [8]

Була запропонована теоретична залежність для визначення величини густини теплового потоку, що досягає поверхні зразка від електричної потужності нагрівального елемента з урахуванням геометричних особливостей внутрішнього об'єму камери.

Шляхом вираження густини теплового потоку через електричну потужність нагрівача, що створює цей потік і за умови використання вибраної для установки кубічної форми коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини λ дорівнює:

$$\lambda = \eta \cdot \frac{P}{6 \cdot S_{\text{зразка}}} \cdot \frac{\delta}{\Delta t} \quad (2.2)$$

де η – тепловий ККД нагрівача;

P – електрична потужність нагрівача у режимі насичення, Вт;

$S_{\text{зразка}}$ – внутрішня площа зразка, м²;

δ – товщина пластини, м.

Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, °С;

2.3 Алгоритм авторської методики дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

1. Вирізати зразок теплоізоляційного матеріалу (наприклад, полістиролу) потрібних розмірів та форми.

2. Провести вимірювання товщини зразка δ за допомогою лінійки та записати це значення у долях метра для використання в подальших обчисленнях.

3. Прикріпити один термодатчик у геометричному центрі верхньої квадратної сторони зразка, другий термодатчик - в аналогічному місці нижньої сторони зразка.

4. Встановити зразок з термодатчиками на установку у якості кришки.

5. Ввімкнути установку. Послідовно через кожні 5 хвилин знімати та заносити до таблиці показники t_1 термодатчика, що знаходиться всередині установки та t_2 термодатчика зовні установки. Коли значення різниці температур лицьових граней зразка у трьох послідовних вимірюваннях зафіксується на стабільному показнику, це означає, що установка вийшла на робочий режим зі стаціонарним тепловим потоком. Стаціонарний показник Δt потрібно записати для використання в подальших обчисленнях.

6. Виміряти силу струму I та напругу U для вирахування електричної потужності P нагрівача за формулою $P=I \cdot U$ та записати для використання в подальших обчисленнях.

Примітка: заміри показників струму слід робити саме в робочому режимі установки для впевненості у стабільному значенні опору електричного нагрівача.

7. Підставити всі раніше виміряні дані у виведену експериментальним шляхом формулу та отримати коефіцієнт теплопровідності λ .

$$\lambda \approx 5,44 \cdot I \cdot U \cdot \frac{\delta}{\Delta t}$$

Примітка: вищевказана формула лишається справедливою за умов незмінності розмірів та геометричної форми даної установки.

8. Зробити висновок про відповідність теплоізоляційного матеріалу заявленим виробником характеристикам, порівнюючи отриманий коефіцієнт теплопровідності з паспортними даними, наданими виробником.

Даний алгоритм (технологічна карта) може бути використаний особою, що є оператором установки для вимірювання коефіцієнту теплопровідності.

Разом із цим цей алгоритм є порядком виконання відповідної лабораторної роботи в освітньому процесі з фізики закладів загальної середньої та вищої освіти.

РОЗДІЛ 3

АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ
ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ

Незважаючи на велику кількість теплоізоляційних матеріалів на ринку України, найпопулярнішими за співвідношенням ціна/якість є різні типи пінополістиролу. Завдяки попиту на ці матеріали, багато виробників пропонують вибір пінополістиролів різного типу. Проте, намагаючись зекономити сировину, не всі виробники добросовісно дотримуються правильної технології виготовлення. Тому характеристики цих матеріалів можуть відхилятися від норм, вказаних в ДСТУ.

Для дослідження з метою визначення коефіцієнтів теплопровідності були використані зразки типів пінополістиролів, що на поточний час найбільш затребувані на ринку:

- безпресовий пінополістирол різної товщини.
- екструдований пінополістирол різної товщини від різних виробників (Sweetondale і Styrofoam)

Зразки досліджуваних матеріалів різної товщини наведено на Рис.3.1:



Рис. 3.1 – Зразки плит пінопласту: 1 - 5-тисантиметровий екструдований (Sweetondale),
2 - 3-хсантиметровий екструдований (Styrofoam),
3 - 2-сантиметровий екструдований (Styrofoam),
4 - 2-сантиметровий марки ПСБ-35,
5 - 5-тисантиметровий марки ПСБ-25,
6- 2-сантиметровий марки ПСБ-25.

3.1 Опис діючої моделі пристрою

Виходячи з теоретичних розрахунків і аналізу існуючих методів вимірювання теплопровідності, була побудована діюча модель установки, яка використовує поширені матеріали та доступні вимірювальні прилади.

Термокамеру діючої моделі установки було виготовлено з пінопласту ПСБ-35 ДСТУ Б 13163:2012, товщиною 50 мм.

Джерелом електричного струму був лабораторний блок живлення DNF-1502DD з плавним регулюванням та стабільними значеннями струму та напруги.

Необхідні для обчислення електричної потужності нагрівача значення сили струму I та напруги U у стаціонарному режимі установки визначалися за допомогою електровимірювального комбінованого приладу Ц4317 та перевірялися цифровим мультиметром DT-830B.

Послідовно через кожні 10 хвилин проводилися зняття показників датчиків температур лицьових граней зразка, що розташований на установці (рис. 3.2).

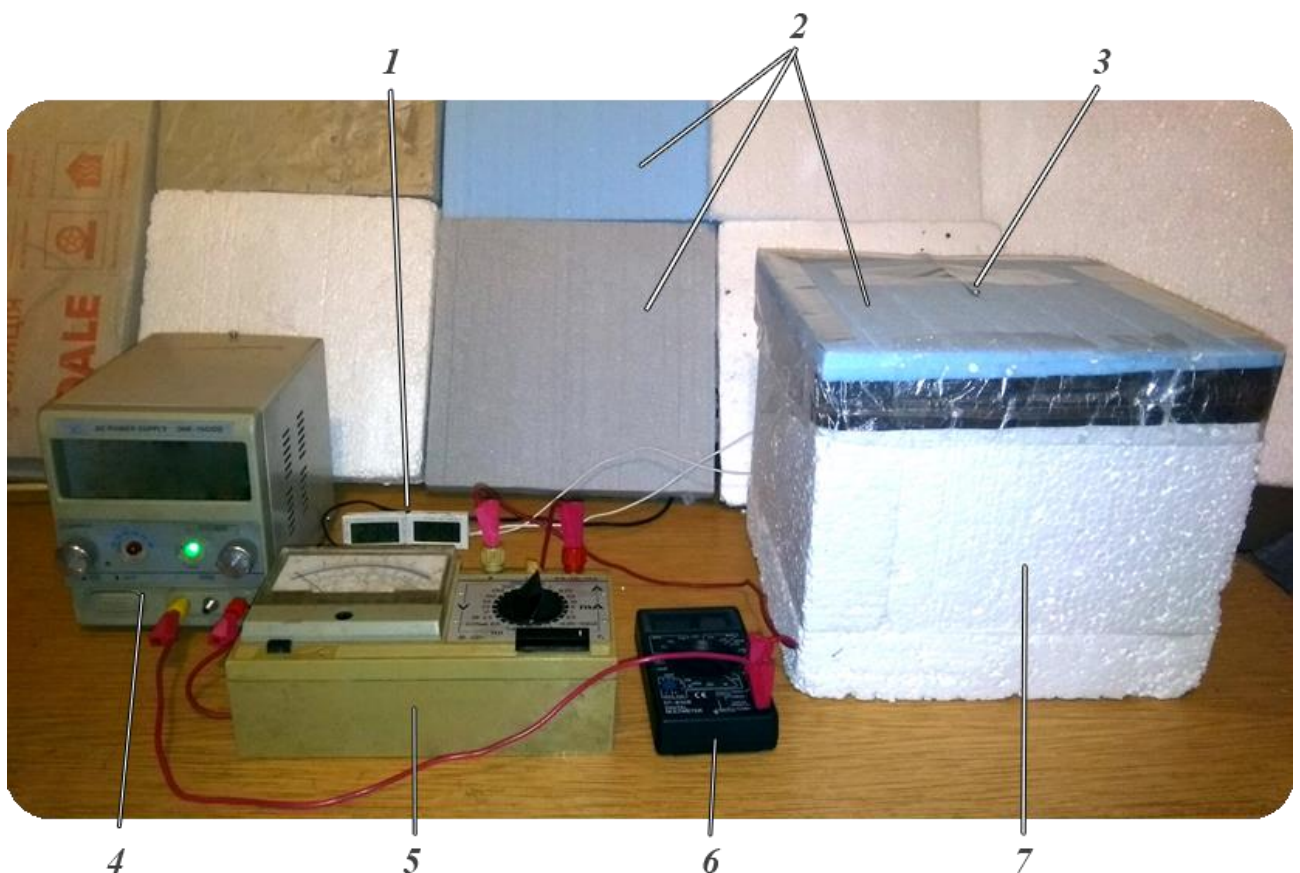


Рис. 3.2 – Фотографія установки

1 – індикатори температури; 2 – зразки; 3 – термодатчик;

4 – блок живлення; 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – термокамера

Показники температури вимірювалися термометрами цифровими з виносними датчиками WSD10 з точністю до 0,5 °С. Різниця температур лицьових граней зразка Δt складала 10–50 °С, що забезпечувало у процесі випробування постійний коефіцієнт теплопровідності.

Тепловий потік через випробуваний зразок вважався стаціонарним, коли значення різниці температур лицьових граней зразка Δt у трьох послідовних вимірюваннях сигналів датчиків температур не зростало і не зменшувалося монотонно.

У підсумку було підтверджено можливість використання експериментальної залежності для визначення на цій установці коефіцієнта теплопровідності невідомих матеріалів.

$$\lambda \approx 5,44 \cdot I \cdot U \cdot \frac{\delta}{\Delta t}, \quad (\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})) \quad (3.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини (Вт/(м·°С));

Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, °С;

δ – товщина пластини, м.

I – сила струму, що протікає через нагрівач, А

U – напруга на нагрівачі, В

Експериментальні значення коефіцієнта теплопровідності близькі до обчислених у формулі 3.1, тому можуть бути використаними для практичного визначення коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів.

Отже, проаналізовано теоретичні засади розробленого методу вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів та описано принцип дії створеної моделі лабораторного пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційних матеріалів, а також здійснено юстирування створеного пристрою для визначення кількості теплового потоку, який потрапляє на поверхню зразка в залежності від електричної потужності нагрівача.

3.2 Результати експериментальних досліджень теплоізоляційних матеріалів

Значення коефіцієнтів теплопровідності пінополістиролу різної густини можна безпосередньо визначити з допомогою випробуваного раніше методу та створеної власноруч установки – юстирування та порівняння результатів з еталонними значеннями для неї ми розглядали у минулому році.

Характеристики екструдованого пінополістиролу порівнювалися з нормативами, наданими виробником, безпесового згідно ДСТУ Б 13163:2012.[11]

Для першої частини досліджень ми вибрали плиту пінополістиролу ПСБ-25 («пінопласту»), товщиною 2 см, придбаного на ринку. З плити було відокремлено зразок розмірами 25 см × 25 см для вимірювання коефіцієнту теплопровідності.

Для попередження просочування нагрітого повітря крізь щілини між зразком та установкою, ці отвори було заклеєно вузьким тонким шаром харчової фольги.

Було проведено три серії вимірювань температур зразка. Вимірювання проводилися наступним чином: кожні 10 хвилин фіксувався час, температура на поверхні зразка, що знаходилася зовні робочої камери t_1 та температура на поверхні зразка у робочій камері t_2 , вираховувалась різниця цих температур, все це заносилося до таблиці 3.1.

Після двох послідовних замірів, що показали стабільну різницю температури, заміри температури припинялися. У кінці дослідів з вимірювальних пристроїв знімалися параметри електричного струму: напруга U та сила струму I для подальшого визначення електричної потужності P .

У всіх трьох серіях вимірювань після встановлення сталої різниці температур напруга становила $U=5\text{В}$, сила струму була $I=1,05\text{А}$. Таким чином електрична потужність P становила: $P=U \cdot I=5\text{В} \cdot 1,05\text{А}=5,25\text{Вт}$

Зняття параметрів струму здійснювалося після виходу установки у робочий режим. Після закінчення проведення серії вимірювань камера установки відкривалася для вирівнювання показників внутрішньої та зовнішньої температури, тільки після досягнення цього починалися нові вимірювання.

**Залежність температур поверхонь пінополістиролу ПСБ-25 товщиною
2 см у робочій камері $t_{\text{внутр}}$ та зовні $t_{\text{зовн}}$ від часу нагріву τ .**

	Вимірювання 1			Вимірювання 2			Вимірювання 3		
τ	t внутр ₁ (°C)	t зовн ₁ (°C)	Δ t ₁ (°C)	t внутр ₂ (°C)	t зовн ₂ (°C)	Δ t ₂ (°C)	t внутр ₃ (°C)	t зовн ₃ (°C)	Δ t ₃ (°C)
0	23,6	23,1	0,5	24,3	24,1	0,2	24,3	24	0,3
5	32,7	24,9	7,8	31,6	25,2	6,4	33,7	26,7	7,0
10	36,6	26,2	10,4	35,7	26,3	9,4	38,5	28,2	10,3
15	38,7	26,9	11,8	38,7	27,6	11,1	40,4	29,1	11,3
20	39,9	27,3	12,6	40,0	28,1	11,9	41,5	29,6	11,9
25	40,4	27,4	13	40,7	28,4	12,3	41,9	29,9	12
30	40,7	27,7	13	40,5	28,0	12,5	42,1	30,0	12,1
35	41,1	28,0	13,1	40,9	28,3	12,6	42,5	30,2	12,3
40	41,1	28,0	13,1	41,0	28,4	12,6	42,7	30,3	12,4
45	41,2	28,0	13,2	41,2	28,5	12,7	42,9	30,4	12,5
50	41,2	28,0	13,2	41,4	28,7	12,7	43,0	30,5	12,5
55	41,3	28,0	13,3	41,6	28,8	12,8	43,2	30,6	12,6
60	41,3	28,0	13,3	41,7	28,9	12,8	43,3	30,7	12,6
65	41,4	28,0	13,4	41,8	29,0	12,8	43,5	30,8	12,7
70	41,4	28,0	13,4	41,8	29,0	12,8	43,5	30,8	12,7

За отриманими даними побудований графік (рис. 3.3).

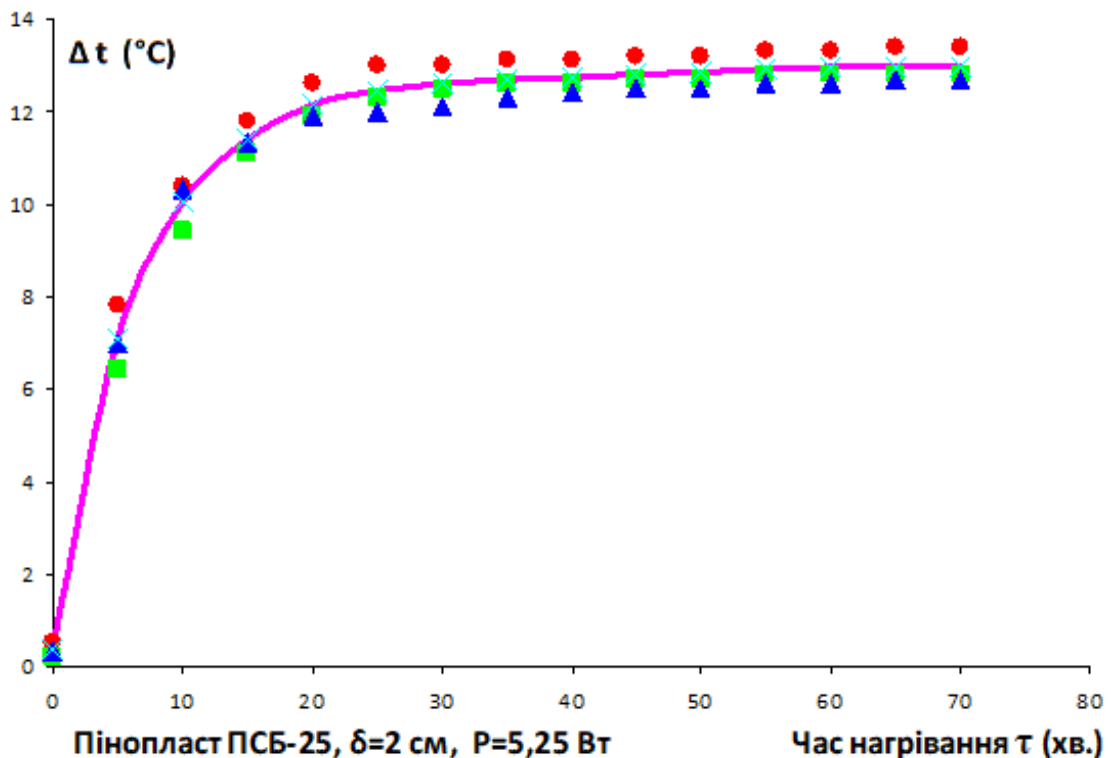


Рис. 3.3 – Графік залежності різниці температур на зразку від часу нагріву

Для визначення коефіцієнту теплопровідності на основі трьох вимірювань було визначено середню стабільну різницю температур на лицьових гранях зразка.

Для цього значення різниць температур складено та розділено на їх кількість.

$$\Delta t_{\text{сер}} = (\Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3) / 3 = (13,4^\circ\text{C} + 12,8^\circ\text{C} + 12,7^\circ\text{C}) / 3 = 13^\circ\text{C}$$

Маючи електричну потужність нагрівача, товщину зразка та середню стабільну різницю температур за формулою 2.2 ми можемо вирахувати коефіцієнт теплопровідності λ :

$$\lambda = 5,44 \cdot P \cdot \delta / \Delta t = 5,44 \cdot 5,25 \cdot 0,02 / 13 = 0,044 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}.$$

За ДСТУ Б 13163:2012 коефіцієнт теплопровідності не вище від 0,041 Вт/(м·°C).

Досліди на інших зразках проводимо за такою ж схемою.

Наведемо порівняльний графік всіх досліджених зразків пінополістиролу.

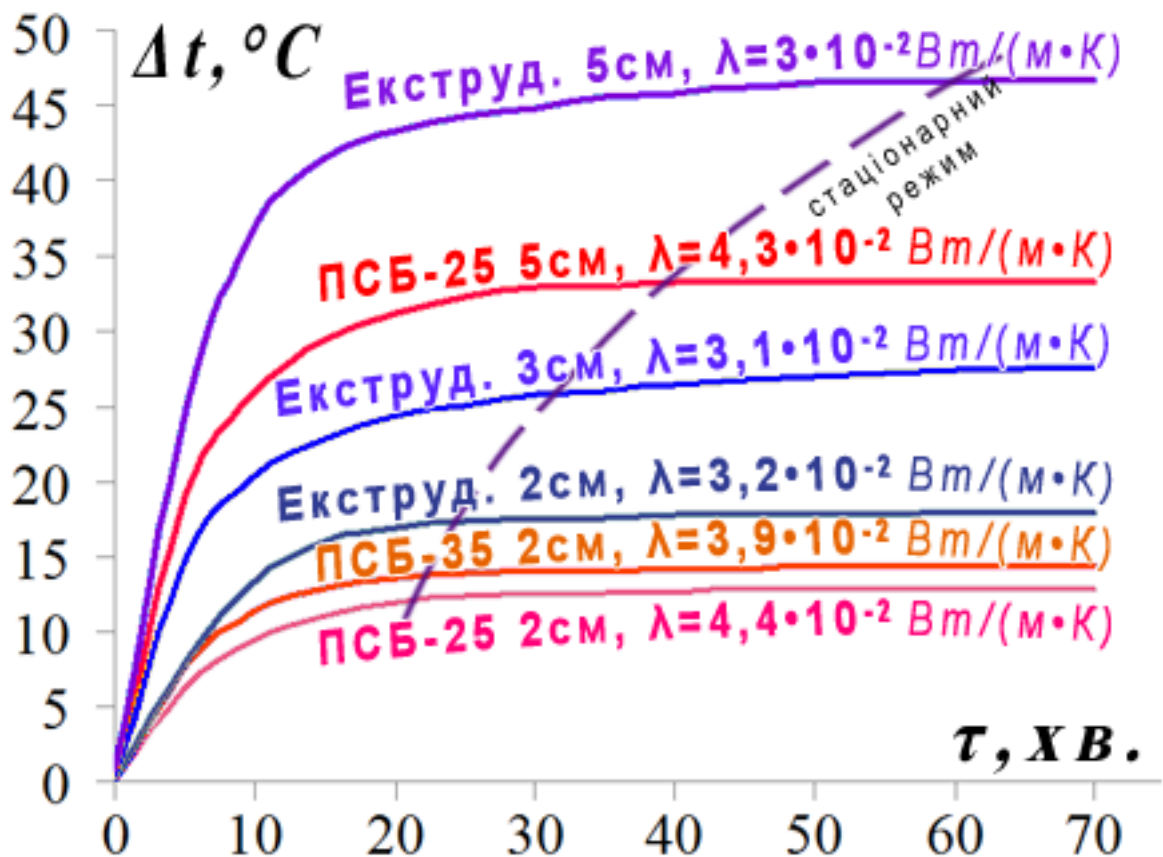


Рис. 3.4 – Порівняльний графік залежності різниці температур від часу нагріву для всіх досліджених зразків пінополістиролу

На порівняльному графіку помітно, що різниця температур залежить від виду матеріалу і для одного виду зростає із збільшенням товщини. Знаючи потужність, товщину і різницю температур, ми обчислюємо коефіцієнт теплопровідності для кожного із зразків та заносимо його до таблиці 3.2. Для порівняння, до цієї ж таблиці заносимо нормативні значення коефіцієнту теплопровідності.

Таблиця 3.2

Обчислення коефіцієнта теплопровідності зразків

Тип та товщина	δ , м	ε_δ , %	$\Delta t_{\text{сер}}$, °C	$\varepsilon_{\Delta t}$, %	λ , Вт/(м·К)	ε_λ , %	$\lambda_{\text{норм}}$, Вт/(м·К)
ПСБ-25	0,02	5	13,0	7,7	0,044	15,9	0,041
ПСБ-25	0,05	3	33,2	3,0	0,043	9,2	0,041
ПСБ-35	0,02	5	14,5	6,9	0,039	15,1	0,038
Екструдований	0,02	5	17,8	5,6	0,032	13,8	0,03
Екструдований	0,03	3	27,4	3,7	0,031	9,9	0,03
Екструдований	0,05	2	47,0	2,1	0,03	7,3	0,03

Додатково була розрахована і занесена до таблиці 3.2 відносна похибка вимірювання коефіцієнта теплопровідності.

Згідно формули 3.1, ця похибка складається з наступних складових:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_U + \varepsilon_I + \varepsilon_\delta + \varepsilon_{\Delta t}, \quad (\%) \quad (3.2)$$

де ε_U - відносна похибка обчислення напруги, %;

ε_I - відносна похибка обчислення струму, %;

ε_δ - відносна похибка обчислення товщини зразка, %;

$\varepsilon_{\Delta t}$ - відносна похибка обчислення різниці температур, %.

Напруга U вимірювалася за допомогою комбінованого приладу Ц4317 з відомим класом точності: 1,5

Згідно ГОСТ 8.401-80 відносна похибка ε_X вимірюваної величини X дорівнює:

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100\%, (\%) \quad (3.3)$$

де ΔX – абсолютна похибка;

X – виміряне значення.

За відсутності класу точності у вимірювального приладу значення абсолютної похибки ΔX приймається рівним від половини (мінімальне значення) до цілої (максимальне значення) поділки шкали в залежності від сприятливості умов проведення дослідів. Якщо відомий клас точності приладу, абсолютна похибка визначається верхньою межею шкали вимірювання:

$$\Delta X = \alpha \cdot X_{\text{верх}}, \quad (3.4)$$

де α - клас точності приладу;

$X_{\text{верх}}$ - верхня межа шкали вимірювання.

Щоб знайти абсолютну похибку вимірювання ΔU , скористаємося формулою (3.4) та помножимо клас точності на верхню межу вимірювань 10 В:

$$\Delta U = \frac{1,5 \cdot 10}{100} = 0,15(B)$$

Це приблизно відповідає ціні поділки на цій межі вимірювань.

$$\text{За формулою (3.3): } \varepsilon_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{5} \cdot 100\% = 3(\%)$$

Відносна похибка струму I , що вимірювався цифровим мультиметром DT-830B (клас точності 2, верхня межа вимірювань 10 А, абсолютна похибка 0,2)

$$\varepsilon_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{0,2}{1} \cdot 100\% = 0,2(\%)$$

Відносну похибку обчислення товщини зразка ε_δ обчислено за (3.3) для кожного зразка і занесено до таблиці 3.2

$$\varepsilon_\delta = \frac{\Delta\delta}{\delta} \cdot 100\%, \quad (\%) \quad (3.5)$$

де $\Delta\delta=0,001$ м - поділка лінійки;

δ - товщина зразка, г.

Відносну похибку обчислення різниці температур $\varepsilon_{(t_2-t_1)}$ вираховуємо для кожного зразка і заносимо до таблиці 3.4

$$\varepsilon_{(t_2-t_1)} = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_1}{|t_2 - t_1|} \cdot 100\% = \frac{1}{\Delta t} \cdot 100\%, \quad (\%) \quad (3.6)$$

де $t_2-t_1=\Delta t$ – різниця температур, °С;

$\Delta t_1=\Delta t_2=0,5^\circ\text{C}$ – точність термодатчиків, вказана виробником, (тобто $\Delta t_1+\Delta t_2=1^\circ\text{C}$)

Помітно, що для безпресового пінополістиролу експериментально знайдені значення коефіцієнту теплопровідності відрізняються від нормативних.

3.3 Напрямки впровадження установки

Розроблена методика може використовуватися у наукових та виробничих цілях для дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів та оцінювання відповідності фактичних характеристик основним робочим властивостям.

Зокрема за допомогою установки було виявлено цікавий факт - на відміну від виробників екструдованого пінополістиролу виробники найдешевшого та найпопулярнішого утеплювача - безпресового пінополістиролу завищують показники теплопровідності декларованої продукції приблизно на одну марку у порівнянні з нормативами ДСТУ Б 13163:2012.

Факт отримання теплоізоляційних матеріалів з заниженими характеристиками потрібно враховувати при практичному застосуванні придбаних матеріалів - і в розрахунку енергоефективності утеплення, і при врахуванні їх недостатньої міцності, і при оцінці їх водонепроникності та довговічності.

Також під час дослідів, спрямованих на отримання коефіцієнту теплопровідності, було вивчено на різних видах теплоізоляційних матеріалів і підтверджено дієздатність раніше розробленого методу практичного визначення коефіцієнту теплопровідності за допомогою побудованої експериментальної установки.

Розроблена установка впроваджена в освітній процес з фізики у Запорізькому багатoproфільному ліцеї №99 та Запорізькому національному університеті у межах підготовки студентів предметної спеціальності «Середня освіта (Фізика)». На основі цієї установки запропонована і впроваджена лабораторна робота «Вимірювання коефіцієнту теплопровідності теплоізоляційних матеріалів».

ВИСНОВКИ

Результати наукової роботи, присвяченої розробленню методики дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, стали підставою для таких висновків:

1. Проведено аналіз існуючих методик дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, зокрема таких, що дозволяють виміряти коефіцієнт теплопровідності теплоізоляційних матеріалів. Серед недоліків існуючих методик виділено відносно дорогую методів, тривалий час випробування, а також досить складний математичний аналіз експериментальних даних.

2. Створено методику дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів, яка дозволяє, зокрема, вимірювати їх коефіцієнт теплопровідності, оцінювати відповідність фактичних характеристик основних робочих властивостей тим, що були заявлені виробником.

3. Створено експериментальний зразок пристрою для вимірювання коефіцієнту теплопровідності та наведено результати експериментальних досліджень теплоізоляційних матеріалів. Ця установка впроваджена в освітній процес з фізики у Запорізькому багатoproфільному ліцеї №99 та Запорізькому національному університеті у межах підготовки студентів предметної спеціальності «Середня освіта (Фізики)».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. П.И. Горелик, Ю.С. Золотова.: Современные теплоизоляционные материалы и особенности их применения. – «Строительство уникальных зданий и сооружений», 2014, №3 (18).
2. ДСТУ Б В.2.7–41–95 (ГОСТ 30290–94) Метод визначення теплопровідності поверхневим перетворювачем.
3. Калінчак В.В. Фізика теплопровідності та експериментальні методи визначення коефіцієнту теплопровідності речовин: метод. посіб. / В.В. Калінчак, С.Г. Орловська, О.С. Черненко; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, - Одеса: ОНУ, 2012.
4. Вікіпедія. Способи вимірювання теплопровідності [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Способи_вимірювання_теплопровідності.
5. ДСТУ Б В.2.6–101:2010 Конструкції будинків та споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій.
6. Задачник по процессам теплообмена: Учеб. пособие для вузов. / Авчухов В.В., Паюсте Б.Я. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Баштовой А.А., Багрийчук А.С., Недбайло А.Н.: Методика определения термического сопротивления строительных стеклопакетов. «Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. Пром. теплотехника», 2013, т. 35, №3.
8. ДСТУ Б В.2.7–105–2000 (ГОСТ 7076–99) Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі.
9. Физика: учебник для 8 кл. общеобразоват. учеб. заведений / под ред. В.Г. Барьяхтара, С.А. Довгого – Харьков: Ранок, 2016.
10. ГОСТ 8.401-80 Державна система забезпечення єдності вимірювань. Класи точності засобів вимірювань. Загальні вимоги.
11. ДСТУ Б 13163:2012 Матеріали будівельні теплоізоляційні. Вироби зі спіненого полістиролу (EPS). Технічні умови

ДОДАТКИ

Додаток А Лабораторна робота 4. Дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів



4.1. Теоретичні відомості.

Теплоізоляційним матеріалам властивий ряд фізико-технічних характеристик, які виділяють їх серед інших матеріалів. Одною з важливих характеристик теплоізоляційних матеріалів є коефіцієнт теплопровідності.

Найбільш конкурентними утеплювачами за співвідношенням економічності та теплоефективності (за умови захисного покриття) є спінений або екструдований пінополістироли – матеріали, отримані шляхом спікання гранул полістиролу. Часто саме ці утеплювачі називають пінопластом, хоча пінопласти - цілий клас матеріалів, що представляють собою спінені пластичні маси, в яких міститься близько 98% газів (переважно повітря) та 2 % пластичної маси.

Існують два класи методів для вимірювання коефіцієнту теплопровідності: стаціонарні і нестаціонарні. Проте нестаціонарні методи мають необхідність складних обчислень, велику похибку визначення коефіцієнта теплопровідності і потребу у руйнуванні зразків.

В даній лабораторній роботі використовується стаціонарний метод вимірювання коефіцієнту теплопровідності, що досягає вимірювання з прийнятною точністю без необхідності у проведенні дуже складних дослідів і розрахунків.

Найбільш популярні теплоізоляційні матеріали переважно використовуються для утеплення житла у вигляді пластин або плоского шару. Тому досліджуваний зразок теплоізоляційного матеріалу повинен мати форму пластини.

Для спрощення математичного апарату будемо досліджувати стаціонарний тепловий режим, коли температура досліджуваного зразка не залежить від часу.

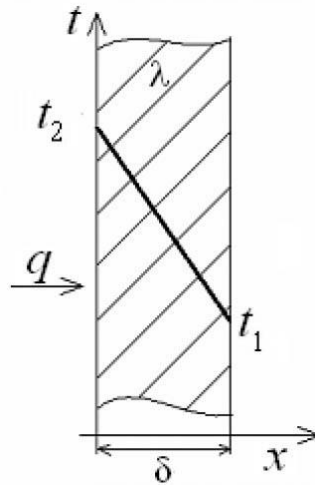


Рис. 4.1 – Плоский однорідний зразок у стаціонарному тепловому потоці

Розглянемо плоский однорідний зразок (рис. 4.1) товщиною δ з постійним коефіцієнтом теплопровідності λ . На зовнішніх поверхнях зразка підтримуються постійними температури t_1 і t_2 . Таким чином через зразок проходить стаціонарний тепловий потік.

Тепловий потік – це кількість теплоти, що передається в одиницю часу через довільну поверхню.

Густина теплового потоку q – тепловий потік, віднесений до одиниці поверхні. Це вектор, що співпадає з напрямком поширення тепла, тобто направлений в сторону зменшення температури і перпендикулярний частинам з однаковою середньою температурою.

Оскільки ми розглядаємо пластину, що пронизується одновимірним тепловим потоком з лініями, перпендикулярними до поверхні пластини, а коефіцієнт теплопровідності матеріалу λ приймається постійним, не залежним від температури, то густина теплового потоку q через таку пластину може бути розрахована за законом Фур'є:

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta t}{\delta}, \quad (\text{Вт/м}^2) \quad (4.1)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини (Вт/(м·К));

$\Delta t = t_2 - t_1$ – різниця температур між внутрішньою та зовнішньою поверхнями зразка, К;

δ – товщина пластини, м.

Лабораторна установка, зображена на рис. 4.2. являє собою термоізовану камеру (термокамеру) геометрично правильної форми у вигляді куба.

Усередині камери встановлено точкове електричне джерело теплоти регульованої потужності.

Зразок, що підлягає випробуванню, встановлюється у вигляді кришки в верхній частині термоізованої камери. Розташування зразка – горизонтальне, напрямок теплового потоку знизу вгору.

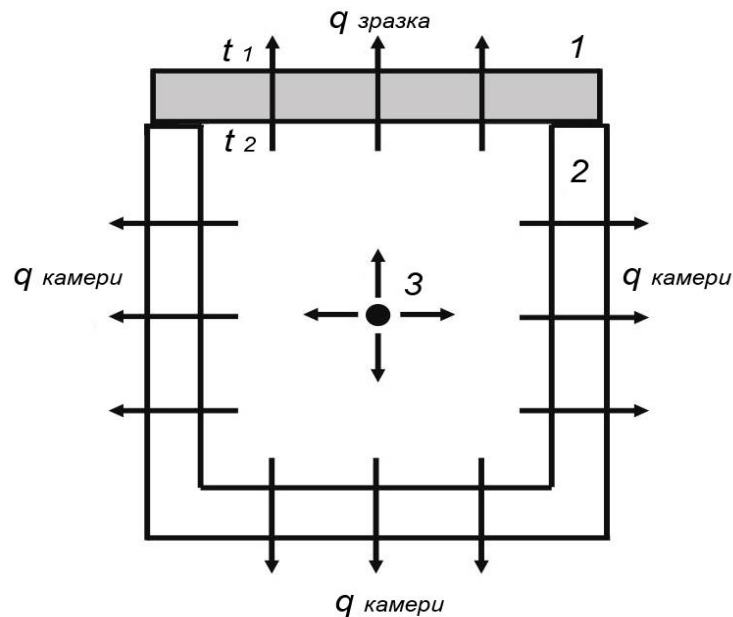


Рис. 4.2 – Схема термокамери

1 – зразок, 2 – термокамера, 3 – нагрівач.

У загальному випадку слід враховувати залежність коефіцієнта теплопровідності матеріалу від температури. Проте для теплоізоляційних матеріалів у вузькому інтервалі температур (до 60 К) величина коефіцієнта теплопровідності може бути прийнята постійною.

Також при використанні зразків кінцевих розмірів в експерименті необхідно враховувати, що частина теплового потоку, що надходить в зразок, розсіюється в навколишнє середовище через торцеві поверхні. Але якщо зразки виготовлені з повітряно-пористих матеріалів малої густини, розсіюванням теплоти через торцеві поверхні можна знехтувати.

Суть методу в створенні стаціонарного теплового потоку, що проходить через плоский зразок певної товщини і спрямованого перпендикулярно до лицьових (найбільших) граней зразка, вимірюванні електричної потужності нагрівача, температури протилежних лицьових граней і товщини зразка.

Теоретична залежність для визначення величини густини теплового потоку, що досягає поверхні зразка від електричної потужності нагрівального елемента з урахуванням геометричних особливостей внутрішнього об'єму камери шляхом вираження густини теплового потоку через електричну потужність нагрівача, що створює цей потік і за умови використання вибраної для установки кубічної форми коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини λ дорівнює:

$$\lambda = \eta \cdot \frac{P}{6 \cdot S_{\text{зразка}}} \cdot \frac{\delta}{\Delta t} \quad (4.2)$$

де η – тепловий ККД нагрівача;

P – електрична потужність нагрівача у режимі насичення, Вт;

$S_{\text{зразка}}$ – внутрішня площа зразка, м²;

δ – товщина пластини, м.

Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, К;

💡 4.2. Експериментальна частина.

З а в д а н н я . Виміряти коефіцієнт теплопровідності наданих зразків різних типів пінополістиролу за допомогою лабораторної установки.

О б л а д н а н н я : лабораторна установка; два термометра цифрових з виносними датчиками; амперметр; вольтметр; годинник; лінійка; зразки; ніж канцелярський (за умови відсутності готового зразка); паспортні дані теплопровідності .



Рис. 4.3. Деякі пристрої, що використовуються при виконанні досліду

Методика дослідження теплоізоляційних властивостей матеріалів

1. Отримати готовий зразок теплоізоляційного матеріалу (наприклад, полістиролу) потрібних розмірів та форми або вирізати самостійно за розмірами установки.

2. Провести вимірювання товщини зразка δ за допомогою лінійки та записати це значення у долях метра для використання в подальших обчисленнях.

3. Прикріпити один термодатчик у геометричному центрі верхньої квадратної сторони зразка, другий термодатчик - в аналогічному місці нижньої сторони зразка.

4. Встановити зразок з термодатчиками на установку у якості кришки.

5. З'єднати за електричною схемою (Рис. 4.4) елементи установки - вимірювальні прилади (вольтметр і амперметр), що надають характеристики струму.

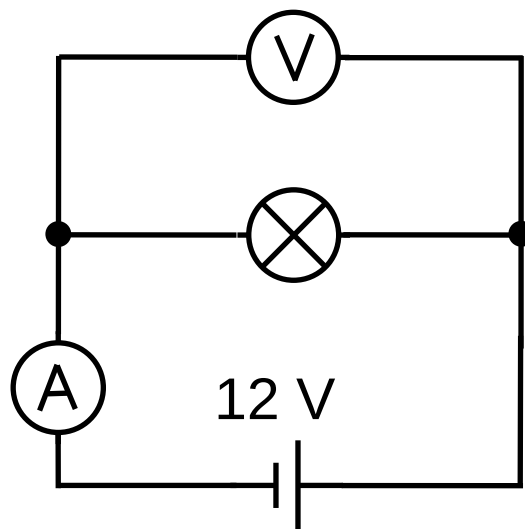


Рис. 4.4 – Електрична схема з'єднання приладів

5. Ввімкнути установку. Послідовно через кожні 5 хвилин знімати та заносити до таблиці показники t_1 термодатчика, що знаходиться всередині установки та t_2 термодатчика зовні установки. Коли значення різниці температур лицьових граней зразка у трьох послідовних вимірюваннях зафіксується на стабільному показнику, це означає, що установка вийшла на робочий режим зі стаціонарним тепловим потоком. Стаціонарний показник Δt потрібно записати для використання в подальших обчисленнях.

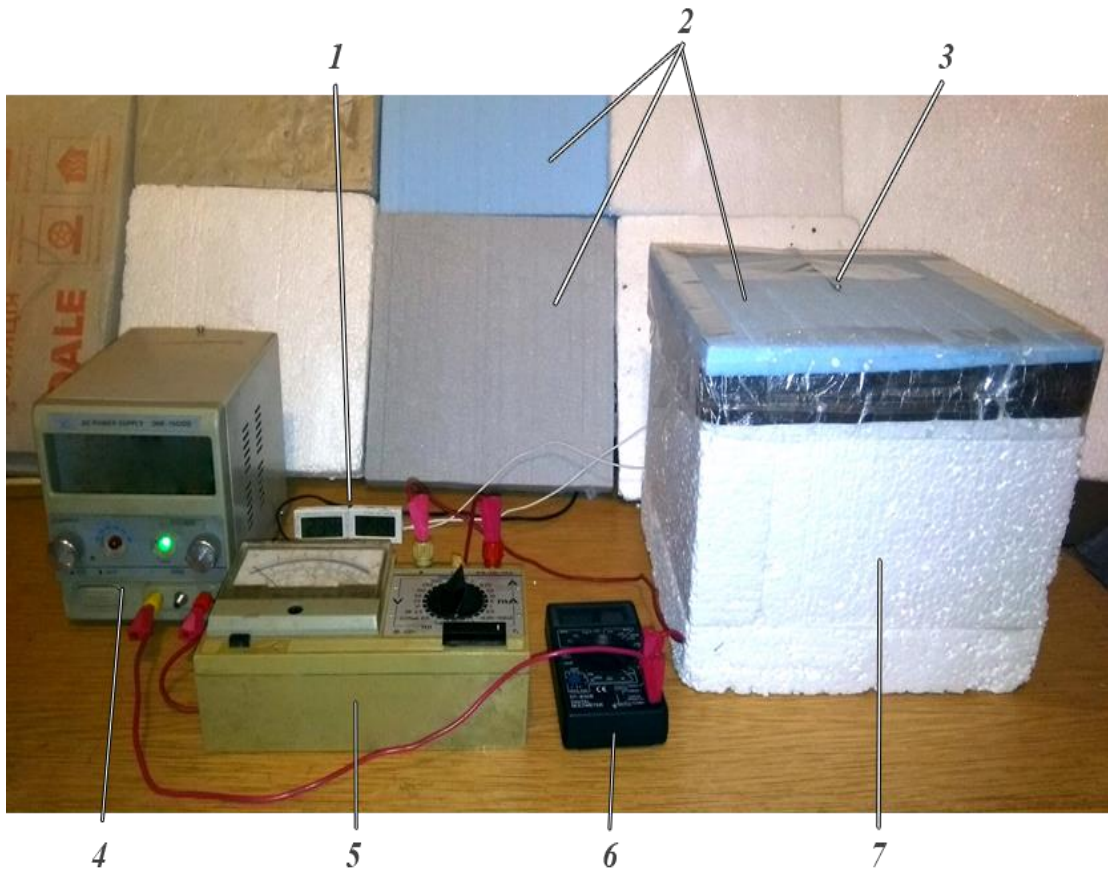


Рис. 4.5. Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнту теплопровідності λ :
 1 – індикатори температури; 2 – зразки; 3 – термодатчик; 4 – блок живлення;
 5 – вольтметр; 6 – амперметр; 7 – термокамера

6. Виміряти силу струму I та напругу U для вирахування електричної потужності P нагрівача та записати для використання в подальших обчисленнях.

Електрична потужність нагрівача прямо пропорційна напрузі та силі електричного струму, який проходить через нагрівач.

$$P = U \cdot I \quad (4.3)$$

де I – сила струму, який проходить через нагрівач

U – напруга на нагрівачі

Примітка: заміри показників струму слід робити саме в робочому режимі установки для впевненості у стабільному значенні опору електричного нагрівача.

7. Підставити всі раніше виміряні дані у виведену експериментальним шляхом формулу та отримати коефіцієнт теплопровідності λ .

$$\lambda \approx 5,44 \cdot I \cdot U \cdot \frac{\delta}{\Delta t}, \quad (\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})) \quad (4.4)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу пластини ($\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$);

Δt – різниця температур між внутрішньої та зовнішньої поверхнями зразка, К;

δ – товщина пластини, м.

I – сила струму, що протікає через нагрівач, А

U – напруга на нагрівачі, В

Примітка: вищевказана формула лишається справедливою лише за умов незмінності розмірів та геометричної форми даної установки.

8. Зробити висновок про відповідність теплоізоляційного матеріалу заявленим виробником характеристикам, порівнюючи отриманий коефіцієнт теплопровідності з паспортними даними, наданими виробником.