

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Теплотехнічні вимірювання

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ТА
ТЕМПЕРАТУРОПРОВІДНОСТІ СИПКИХ
МАТЕРІАЛІВ У РЕГУЛЯРНОМУ РЕЖИМІ**

**Навчальний посібник
Лабораторний практикум**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та інжиніринг
теплоенергетичних систем»
спеціальності 144 «Теплоенергетика»

Укладачі: В.О. Виноградов-Салтиков, О.І. Єщенко

Електронне мережне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Гриф надано Методичною радою КПП ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 26.05.2022 р.)

за поданням Вченої ради Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту (протокол № 9 від 26.04.2022 р.)

В лабораторній роботі розглянута методика визначення теплофізичних характеристик (ТФХ) – теплопровідності, об'ємної теплоємності, температуропровідності сипких матеріалів методом кулі. В посібнику розглянуто теоретичні положення регулярного режиму II роду, дослідну лабораторну установку, необхідне приладне забезпечення та умови проведення досліджень, наведені розрахункові рівняння, графіки, номограми для визначення ТФХ експериментального матеріалу за умов комплексного визначення цих характеристик.

Робота призначена для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Енергетичний менеджмент та інжиніринг теплоенергетичних систем» спеціальності 144 «Теплоенергетика», також буде корисна спеціальностям які розглядають Енергетичний менеджмент в своєму навчанні, крім цього студенти отримують приклад постановки задачі досліджень, проведення експерименту, отримання результатів і аналізу результатів.

Реєстр. № НП 21/22-526 Обсяг 1,2 авт.арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідомство про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.О. Виноградов-Салтиков, О.І. Єщенко
© КПП ім. Ігоря Сікорського. 2022

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Мета та основні завдання роботи.	5
2. Теоретичні положення.	6
3. Лабораторна установка та вимірювальні прилади.	13
4. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи	14
5. Послідовність виконання роботи	15
6. Оброблення результатів вимірювань.	16
7. Порядок та рекомендації щодо виконання роботи.	17
8. Вимоги до звіту	18
9. Контрольні питання	17
10. Список рекомендованої літератури.	19
Додаток 1. Градувальна таблиця хромель-копелевих термопар	20
Додаток 2. Теплофізичні характеристики різних матеріалів, рідин, газових середовищ	20

ВСТУП

На даний час найбільш актуальною проблемою є пошук і створення енергозберігаючих заходів та інженерних рішень, що могли б забезпечити мінімальне тепло- та енергоспоживання на теплотехнологічні процеси та одночасно звести до мінімуму теплові втрати. Значну роль у цьому відіграє знання теплофізичних характеристик — ТФХ, що використовуються в якості розрахункових значень для оцінки теплозахисних властивостей конструкційних матеріалів. Не останню роль має знання цих властивостей на процеси нагрівання, обробки й виготовлення матеріалів і виробів, та матеріалу, що використовується в оболонці апаратів, конструкцій огорожень, а також змінності їх властивості від вологості, температурних та механічних навантажень. В більшості випадків потрібно розглядати так звані ефективні властивості продуктів і матеріалів, і визначати їх в змінних процесах, під час яких і відбуваються характерні зміни в структурі речовини матеріалу. А це нестаціонарні процеси.

Важливою стороною в дослідженні є перехід з лабораторних вимірювань до виробничих визначень ТФХ та сертифікації якості виробів за ними.

Продовженням рішень аналітичних задач теплопровідності розглянутих в курсі «Тепломасообмін» і експериментальних визначень теплопровідності в попередніх лабораторних роботах «Визначення теплопровідності твердих тіл» є ознайомлення студентів з методиками комплексних вимірювань та визначень теплофізичних характеристик ТФХ продуктів і матеріалів. До яких відносять коефіцієнт теплопровідності, теплоємність та температуропровідність — визначеність яких вкрай необхідна для розрахунку технологічних процесів, вибору матеріалу обладнання, стану теплового захисту огорожувальних конструкцій то що. Комплексне визначення дозволяє одночасно визначити перелічені характеристики (властивості) при зміні температури, вологості, що особливо важливо, враховувати структурні зміни всередині речовин з можливими фазовими перетвореннями. На даний час існує більше десятка методів та

більше сотні дослідних комірок в яких можливо реалізувати ці вимірювання, основи та класифікацію яких розглянуто в курсі «Теплотехнічні вимірювання».

Дана робота дає можливість практично закріпити теоретичні положення дисциплін, що вивчались та вивчається, ознайомитись з методикою постановки та проведення експериментів. При виконанні та аналізу результатів лабораторної роботи студенти отримують також досвід науково-дослідницького спрямування.

1. Мета роботи та основне завдання роботи

Метою роботи є — засвоєння особливостей накопичення та перенесення енергії у нестационарному режимі, аналітичного опису цих процесів, застосування теорії подібності, а також методики визначення коефіцієнта температуропровідності, темпу охолодження та теплоємності — у регулярному режимі II роду.

Основні завдання роботи:

- ознайомитись з особливостями передачі та перенесення теплоти в сипких та поруватих матеріалах;
- ознайомитись з конструкцією і приладним оснащенням лабораторного стенду та методикою визначення теплопровідності в умовах як стаціонарного, так і нестационарного – регулярного теплового режимів методом кулі;
- провести вимірювання за порядком виконання лабораторної роботи наведеним нижче та зробити розрахунок коефіцієнта теплопровідності, об'ємної теплоємності та температуропровідності за змінними температурними умовами;
- порівняти отримані розрахунки з відомими довідниковими значеннями теплопровідності, теплоємності та температуропровідності для даного матеріалу.

2. Теоретичні положення.

Різниця температур в окремих точках тіла є *рушійною силою* перенесення теплової енергії або теплоти в напрямку меншої температури. Перенесення теплоти може відбуватися трьома способами за рахунок *теплопровідності, конвекції та випромінювання*.

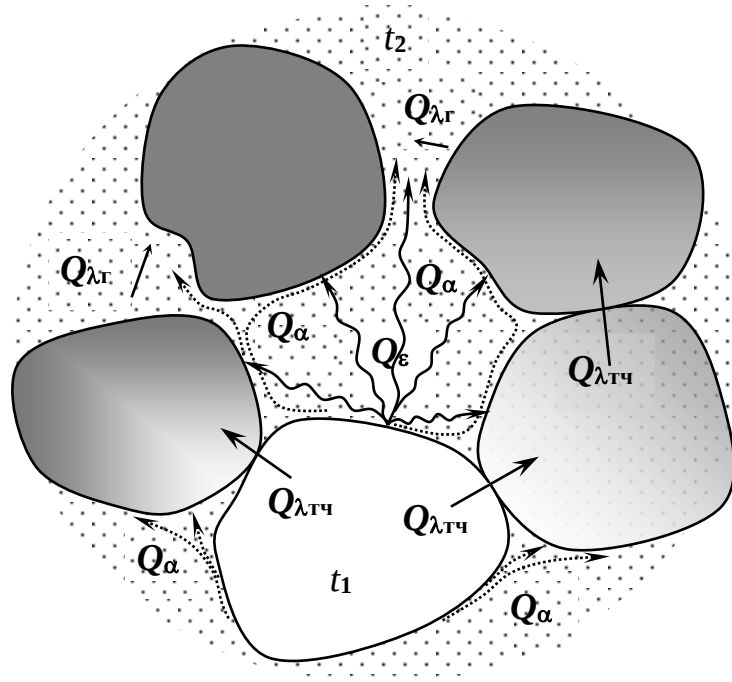
Теплопровідність (інші назви: кондукція, тепла дифузія) — це процес передавання внутрішньої енергії або енергії теплового руху мікрочастинок будь-якого тіла, що відбувається у напрямку зменшення температури. Вважають, що це передавання відбувається *на молекулярному рівні*, так, наприклад, в тонких прошарках газового середовища поширення теплоти відбувається за рахунок теплової дифузії молекул і атомів, в рідинах — де відстані між молекулами дуже малі, молекули отримують енергію від сусідніх молекул. На рівні молекул відбувається передача енергії і в аморфних тілах. Але інколи носії енергії є меншими за молекули, наприклад, в металах — превалює *електронна провідність* (вільними електронами та іонами), а в кристалічних тілах квазічастинками — фононами, тобто квантами пружних коливань атомів або іонів кристалу.

Конвекція — це процес перенесення енергії рухомим середовищем на молярному рівні, тобто розміри носіїв енергії незрівнянно більші від мікрочастинок. Але знов ці носії мають контакт між собою під час передавання енергії, тому теплопровідність та конвекцію об'єднує загальна назва — *теплообмін зіткненням*.

Під час *променистого теплообміну* джерело енергії може бути на дуже великій відстані від приймача. У поверхневих шарах джерела (твердої поверхні, поверхні рідини, ядра нагрітого газу) відбувається перетворення теплової енергії на променисту, яка розповсюджується в вигляді електромагнітних хвиль і у діатермічному середовищі переноситься зі швидкістю світла. По досягненні поверхні приймача відбувається зворотне перетворення енергії. Інфрачервоне випромінювання займає межовий інтервал від ультрафіолетового випромінювання до радіохвиль — довжиною 0,4 ... 800 мкм.

Для сипких та поруватих матеріалів всі перелічені процеси перенесення теплоти поєднуються і відбуваються сумісно, а саме:

- 1) теплопровідність у твердих частинках чи каркасі — $Q_{\lambda_{тч}}$;
- 2) теплопровідність у газуватому заповнювачі — $Q_{\lambda_{г}}$;
- 3) конвекція у порах — Q_{α} ;
- 4) променистий теплообмін між твердими частинками (стінками пор) — Q_{ϵ} .



Чисельні експерименти показали, що для більшості теплоенергетичних та теплотехнологічних процесів частка енергії, що переноситься конвекцією у порах та променистим теплообміном між твердими частинками, а подекуди теплопровідністю у твердих частинках чи тонкому каркасі, є дуже малою порівняно із теплопровідністю газового чи рідинного заповнювача. Це дає можливість застосувати феноменологічний підхід до цього явища, тобто розглядати нерухомий сипкий або поруватий матеріал — як простір, заповнений не окремими частинками, а суцільною масою, в якій тепла енергія поширюється лише теплопровідністю.

Теплопровідність в поруватому матеріалі будемо розглядати через молекулярне перенесення теплоти в тілах або між ними, що обумовлено перемінністю температурного поля. Процеси теплопровідності, за якими температурне поле змінюється з часом, називаються нестационарним. **Температурне поле** - це сукупність миттєвих значень температури в усіх

точках тіла або системи тіл в даний момент часу. Температурне поле, що описується рівнянням $t=f(x, y, z, \tau)$ (де t — температура, x, y, z — просторові координати, τ — час), називається нестационарним. В цьому випадку температура в кожній точці тіла змінюється з часом.

Нестационарні процеси теплопровідності відбуваються при нагріванні або охолодженні тіл і супроводжуються зміненням ентальпії тіла. Будь-який процес нагріву або охолодження тіла можна умовно поділити на три стадії.

— Перша стадія відповідає початку процесу, характеризує поширення температурних збурень. На цій стадії швидкість змінення температури в різних точках тіла різна, температурне поле залежить від початкового розподілу температур. Такий режим називається неусталеним.

— З часом вплив початкових нерівномірностей температури в тілі зменшується і швидкість змінення температури у всіх точках тіла стає сталою величиною, що залежить від форми і розмірів тіла, його теплофізичних властивостей, умов теплообміну на поверхні тіла. режим називається регулярним.

— Після тривалого часу (теоретично нескінченно великого часу) настає стаціонарний режим з постійним розподілом температури тіла в часі.

Рішення задачі нестационарної теплопровідності це визначення температурного поля і кількості теплоти, що отримується тілом за час τ . Ці задачі розв'язуються рішенням диференційного рівняння теплопровідності спільно з умовами однозначності. Умови однозначності це математичний опис всіх частинних особливостей конкретного процесу.

Диференційне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho}. \quad (1.1)$$

Закон Фур'є справедливий як для стаціонарного, так і нестационарного режиму перенесення, але в останньому випадку треба враховувати також здатність матеріалу накопичувати чи втрачати енергію, тобто його

теплоємність. Другий закон Фур'є або диференціальне рівняння Фур'є-Кірхгофа для сферичної стінки має такий вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1.2)$$

де додатково до рівняння $\int_{t_1}^{t_2} dt = - \int_{r_1}^{r_2} \frac{Q}{4\pi \cdot \lambda} \frac{dr}{r^2}$. τ — час процесу; c —

масова теплоємність та ρ — густина матеріалу.

Комплекс $\lambda/(c\rho)$ характеризує процеси нестационарної теплопровідності та швидкість переміщення ізотермічної поверхні у нестационарному режимі і тому має назву *коефіцієнт температуропровідності*:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}, \quad \text{м}^2/\text{с}. \quad (1.3)$$

Для розв'язання рівнянь типу (1.1) найчастіше застосовують граничні умови третього роду, коли відома *температура навколишнього середовища* $t_{p,пов}$ (рідини чи повітря) та інтенсивність його взаємодії з поверхнею тіла, тобто *коефіцієнт тепловіддачі* α :

$$\alpha \equiv \frac{q}{t_c - t_{p,пов}}, \quad \text{Вт}/(\text{м}^2\text{К}), \quad (1.4)$$

де t_c — температура на поверхні тіла (стінки).

Навіть для найпростіших умов (c , ρ , λ , α , t_0) є постійними величинами) рішення диференціальних рівнянь теплопровідності є сумою нескінченного ряду членів, кожний з яких має коефіцієнти з характеристичного рівняння, що має відповідно нескінченне число рішень. Для порожнистої кулі це рішення наведене у праці [1, 4, 5]. Однозначно перетворити його відносно величин λ , c , чи α неможливо, тому вдаються до методів теорії подібності. В нашому випадку рівняння подібності має такий вигляд:

$$\theta = f(\eta; Fo; Bi), \quad (1.5)$$

де θ — відносна надлишкова температура, або температурний критерій,

$$\theta = (t - t_{\text{пов}}) / (t_0 - t_{\text{пов}}), \quad (1.6)$$

відповідно *поточна* — t та *початкова* — t_0 температура в будь-якій точці, і температура оточуючого повітря (виміряна неподалік від дослідного об'єкта за межами пристінного шару) — $t_{\text{пов}}$; η — відношення внутрішнього та зовнішнього радіусів кульового прошарку, $\eta = r_1 / r_2 = 130 / 150 = 0,87$; Fo — безрозмірний час процесу, або число Фур'є:

$$Fo = a\tau / \delta^2, \quad (1.7)$$

Bi — число подібності граничних умов, або число Біо —

$$Bi = \alpha r / \lambda, \quad (1.8)$$

де λ — теплопровідність матеріалу, що визначили на початку дослідів. α визначають за емпіричною формулою

$$\alpha = 8,6 + 0,07(\bar{t}_{3,\tau} - t_{\text{пов}}), \quad (1.9)$$

де $\bar{t}_{3,\tau}$ — середня температура зовнішнього прошарку в певний час вимірювань.

Розв'язання рівняння (1.5) показано на рис.1. для внутрішньої ізотерми прошарку ($r = r_1 = 0,130/2 = 0,065$ м) Ця номограма дає можливість визначати температуропровідність a прошарку: в якусь мить τ вимірюють температуру t , обчислюють значення θ , йдуть по горизонталі до обчисленого значення Bi та опускаються на вісь Fo , за яким визначають

$$a = r_2^2 Fo / \tau. \quad (1.10)$$

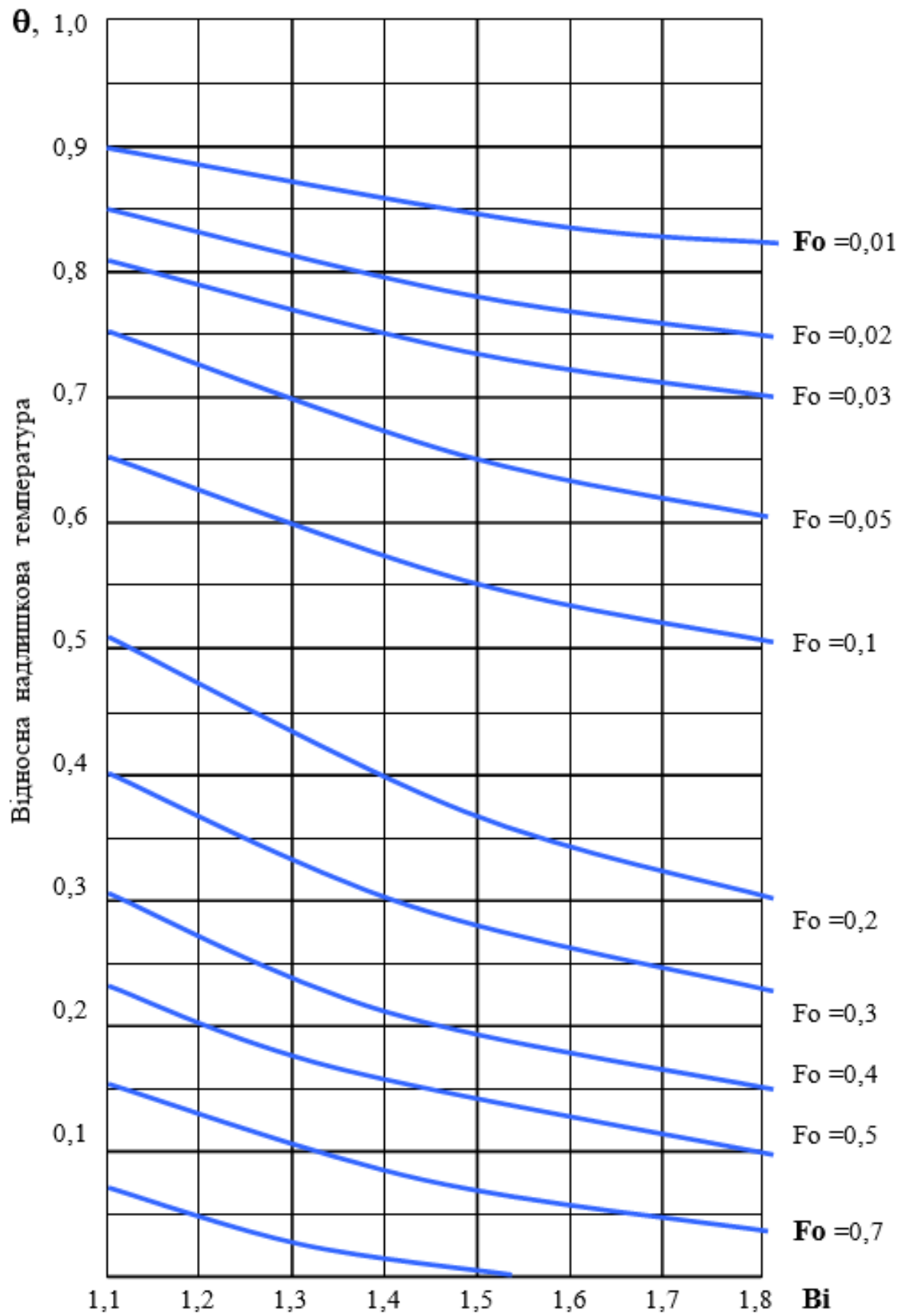


Рис.1. Графік $\theta = f(Fo, Bi)$ для визначення відносної надлишкової температури для зовнішньої кулі.

Об'ємну теплоємність c_p можна одержати з так званого *регулярного режиму* II роду охолодження [4, 6], для якого логарифм надлишкової температури $\vartheta = t - t_{\text{пов}}$ змінюється з часом лінійно. Для цього визначають *темпл охолодження*

$$m = \frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (1.11)$$

беручи різні моменти часу τ_2 та τ_1 ; лише коли на графіку $\ln \vartheta = f(t)$ (рис.2.) є напевне досить довгий лінійний відрізок.

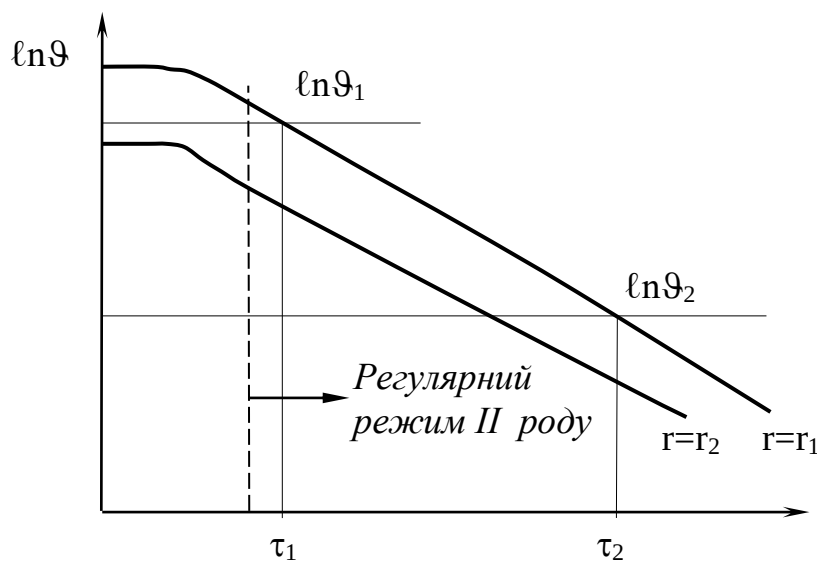


Рис.2.

Темпл охолодження m пов'язаний з теплоємністю c_p рівнянням

$$c_p = \psi \frac{\alpha F}{mV}, \quad (1.12)$$

де $F = 4\pi r^2$ та $V = 4/3\pi(r_2^3 - r_1^3)$, (1.13)

відповідно зовнішня поверхня кулі та об'єм прошарку матеріалу; ψ — коефіцієнт нерівномірності температурного поля тіла, відношення середніх надлишкових температур поверхні та об'єму тіла. Цей коефіцієнт є функцією числа Біо; для кулі ця залежність наведена на рис. 3.

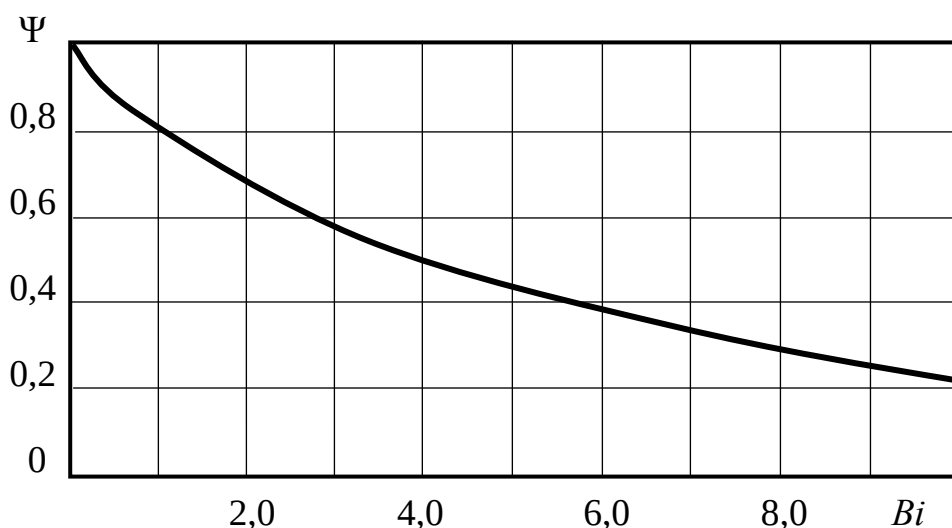


Рис.3.

3. Лабораторна установка та вимірювальні прилади.

Кульовий прошарок 2 для досліджуваного матеріалу утворений за допомогою двох тонкостінних мідних оболонок 3 та 4 (див. рис. 4). У внутрішній оболонці розташований електронагрівник 5 із рівномірним виділенням теплоти по всіх напрямках. Потужність нагрівника W , яка в усталеному режимі дорівнює тепловому потоку Q через будь-яку ізотермічну поверхню прошарку $W=Q$, регулюється за допомогою лабораторного автотрансформатора 6 та вимірюється ватметром 7. Температури t_{c1} та t_{c2} визначають за сигналами чотирьох термопар 1, гарячі спаї яких закріплені на відповідних поверхнях оболонок, як показано на рис. 4.

Для розрахунку беруть середнє арифметичне значення $\bar{t}_{c1}$ з показів ЕРС термопар *I* та *II*, значення $\bar{t}_{c2}$ — відповідно термопар *III* та *IV*, сигналами яких виводяться на цифровий мілівольтметр 9, перемикання на відповідну позицію здійснюється перемикачем 11. Можливі два варіанти стабілізації температури холодного спаю:

- в посудині Дьюара із суміші води із льодом 10;
- холодними спаями термопар є місця їх з'єднання на разйомі позиційного перемикача 11. Для розрахунку температури необхідно врахувати поправку на температуру оточуючого середовища, яку визначають за показаннями термометра на стенді 8.

Подальші визначення температури за сигналами термопар проводять використовуючи градуювальні таблиці хромель-копельових (ХК) термопар, які наведені в Додатку 1.

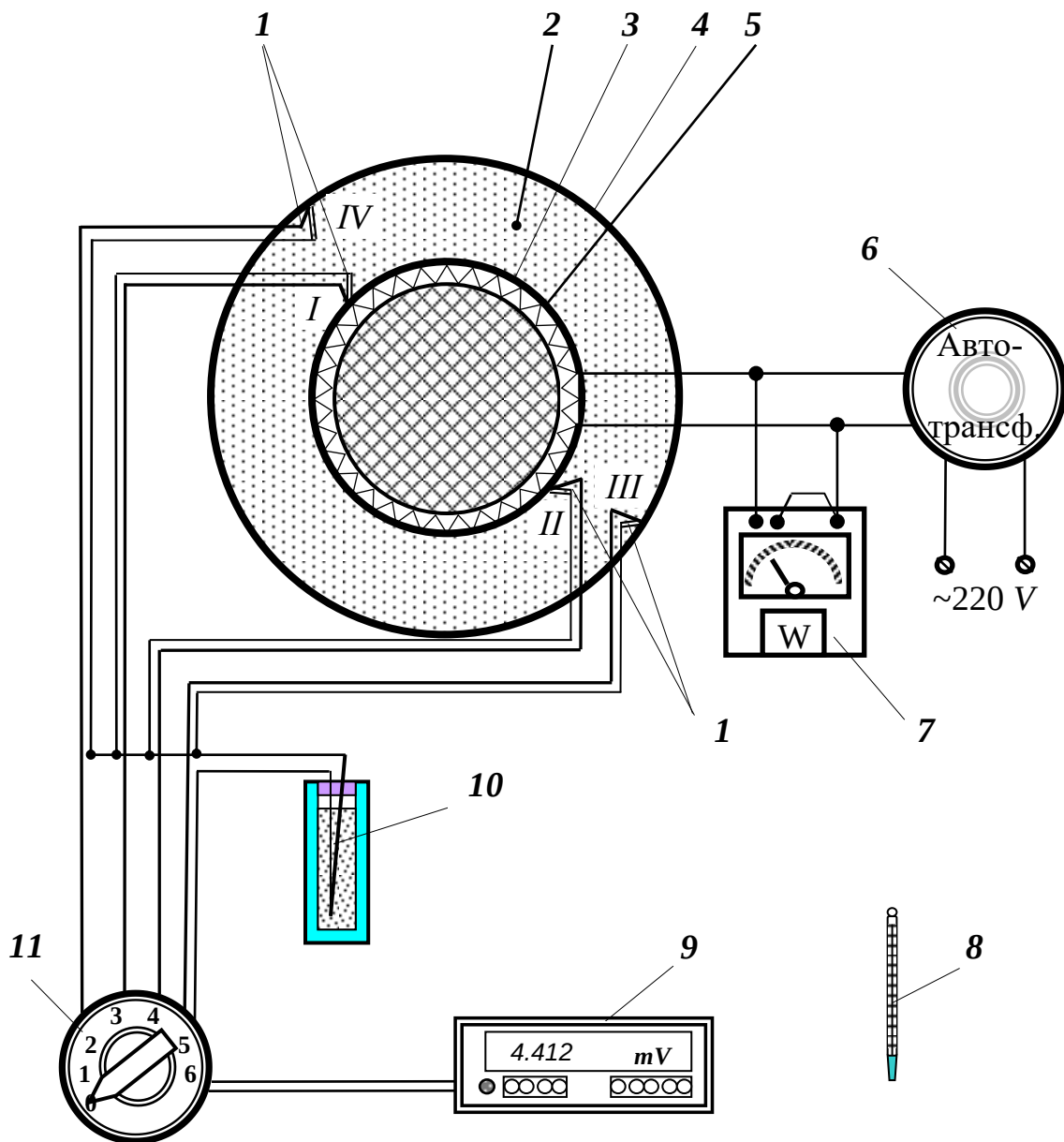


Рис. 4.

Кулю необхідно прогріти — включити не менше ніж за годину до початку лабораторного заняття, на режим заданий викладачем. Крім перелічених приладів слід мати секундомір.

4. Заходи безпеки під час виконання лабораторної роботи .

При виконанні лабораторної роботи необхідно дотримуватись наступних

заходів безпеки.

4.1. До виконання лабораторної роботи на установці допускаються лише студенти, що ознайомились з методичними вказівками, правилами безпеки та підготували протокол до лабораторної роботи.

4.2. До одночасної роботи на установці допускається не більше п'яти студентів.

4.3. Дослідження проводяться лише під наглядом викладача чи інженера, який є відповідальним за лабораторію.

4.4. Категорично забороняється торкатися електричних дротів, клем під'єднання, кнопок та перемикачів на стенді.

5. У разі виникнення найменших неполадок необхідно терміново повідомити про це викладача чи інженера, якщо їх немає поруч.

5. Послідовність виконання роботи.

5.1. Після перевірки комплектності приладів та наявності з'єднань відповідно до рис. 4. викладач чи лаборант вмикає ЛАТР в електромережу напругою 220 В і за допомогою ватметра встановлює, та з часом перевіряє постійність потужності електронагрівника. До початку досліду потрібно прогріти кулю не менше години.

5.2. На протязі певного часу на увімкненому мілівольтметрі спостерігати та вимірювати через кожні 5 хв. показання ЕРС чотирьох термопар, послідовно перемикаючи позиційний перемикач, поки розбіжність в значеннях в даному інтервалі не перевищуватимуть 0,004 мВ.

5.3. По досягненні стаціонарного режиму, зняти покази ватметра 7 та значення чотирьох термопар за мілівольтметром 9, зафіксувати температуру повітря t_8 та занести дані до таблиці.

5.4. Вимкнути нагрівник та увімкнути секундомір та кожні 10 хв. записувати у таблицю сигнали всіх термопар за мілівольтметром 9 та покази температури повітря 8.

5.5. Під час проведення досліду будувати графік $\ln \theta$ однієї з термопар залежно від τ (див. рис.2). Дослід припинити лише після того, як на цьому графіку прямолінійна ділянка стане досить довгою.

6. Оброблення результатів вимірювань

Обрахунки проводиться на інженерному калькуляторі та порівнюється з розрахункам програми на комп'ютері.

6.1. Після проведення першої частини дослідження п. 5.3. (за методикою з лабораторної роботи «Визначення теплопровідності сипких матеріалів у стаціонарному режимі методом кулі») з рівняння визначається теплопровідність:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{\pi d_1 d_2 (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)},$$

результат порівнюється з значенням теплопровідності отриманим в цій роботі.

6.2. За завданням викладача обчислюють величину θ для кожного моменту часу τ , визначаючи температури $t_{\text{пов}}$ та t за методикою, викладеною у п. 5.2, або одразу за сигналами ЕРС термопар за таблицею для даного типу термопар знаходять температуру в $^{\circ}\text{C}$ та обчислюють θ за (1.6):

$$\theta = (t - t_{\text{пов}}) / (t_0 - t_{\text{пов}}).$$

6.3. За рівнянням (1.9) визначається коефіцієнт складної тепловіддачі — α .

6.4. Після розрахунку число подібності Біо за рівнянням (2.8), користуючись графіком рис.1, визначають число подібності Фур'є — Fo . За значенням числа Fo з рівнянням (1.10) обчислюють температуропровідність a та знаходять та будують залежність $a = f(t)$.

6.5. Будують графік залежності $\ln \vartheta = f(\tau)$ (приклад на рис.2) для середньої температури внутрішнього прошарку та визначають темп охолодження m за рівнянням (1.11).

6.6. Значення ψ знаходять за рис. 3 за значенням числа подібності Біо та обчислюють середнє значення $\bar{c}_p$ за рівнянням (1.12), попередньо підрахувавши об'єм прошарку дослідного матеріалу та площу кульки за рівнянням (1.13).

6.7. Середнє значення теплоємності $\bar{c}_p$ для порівняння визначають з рівняння (1.3).

6.8. Результати вимірювань та розрахунків заносять до таблиці 1.

6.9. Отримані значення температуропровідності та теплоємності порівнюють з довідниковими значеннями з Додатку 2.

Таблиця 1

τ , хв.	λ , $\frac{\text{Вт}}{(\text{мК})}$	t_0 , °C	$t_{\text{пов}}$, °C	t , °C	$t_{3.\tau}$, °C	θ	α , $\frac{\text{Вт}}{(\text{м}^2\text{К})}$	Ві	Fo	a , $\text{м}^2/\text{с}$	ψ	$\ln \vartheta_3$	m	$\bar{c}_p$, $\frac{\text{Дж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{кг})}$	$\bar{c}_p$, $\frac{\text{Дж}}{(\text{м}^3 \cdot \text{кг})}$
0															
10															
20															
30															
40															
50															
60															

7. Порядок та рекомендації до виконання роботи.

1. Ознайомитися з особливостями, стаціонарного та регулярного теплового режиму II роду, методиками дослідного визначення теплопровідності, об'ємної теплоємності та температуропровідності сипких поруватих матеріалах, що описується в технічній літературі, конспекті лекцій і

методичних вказівок.

2. Підготувати протокол для виконання лабораторних досліджень.
3. Провести вимірювання основних величин, зазначених у розділі 6 .
4. Зробити розрахунки і побудувати графіки згідно з методикою, яка наведена в розділі 6.
5. Порівняти між собою теоретичні значення величин та результати дослідження.

8. Вимоги до звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен обов'язково містити:

1. Назву і мету лабораторної роботи;
2. Стислі теоретичні відомості;
3. Схему установки із зазначенням основних елементів і приладів для вимірювання;
4. Запис результатів вимірювань під час експерименту;
5. Обробку результатів експерименту;
6. Аналіз отриманих результатів та висновки по роботі.

9. Контрольні питання

- 9.1. Диференціальне рівняння теплопровідності. Фізичний зміст коефіцієнта температуропровідності.
- 9.2. Граничні умови третього та другого роду. Коефіцієнт тепловіддачі.
- 9.3. Числа подібності нестационарної теплопровідності — температурний критерій, числа Фур'є та Біо.
- 9.4. Регулярний режим охолодження (нагрівання) II роду. Темп охолодження та його експериментальне визначення.
- 9.5. Зв'язок між темпом охолодження, теплофізичними характеристиками матеріалу та числом Біо.
- 9.6. Описати схему лабораторної установки та порядок роботи.
- 9.7. Як визначати початок регулярного режиму охолодження кулі?

9.8. У багатьох підручниках [1, 2, 3] наведений графік залежності $\theta = f(F_0)$ для тіл різної форми, із якого випливає, що за однакових умов куля, порівняно з іншими тілами, охолоджується найшвидше. Чому кицька, коли їй зимно, згортається клубком — саме в кулю?

10. Список рекомендованої літератури.

1. Лыков А. В. Тепломассобмен / Лыков А. В. – М. : Энергия, 1978. – 480с.
2. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / Нестеренко А. В. – М.: Высшая школа, 1971. – 459с.
3. Теплофизические измерения и приборы/ С. Е. Буравой, В. В. Курепин, Г. С. Петров; Под общ. ред. Е. С. Платунова. —Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986, —256 с., ил.
4. Платунов Е. С. Теплофизические измерения в монотонном режиме.— Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1973. – 143 с.
5. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с., ил. – (Теплотехника и теплоэнергетика)
6. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты тепловых режимов твердых тел. Л.: «Энергия», 1976.—325 с., ил.

Додаток 1

Градувальна таблиця хромель-копелевих термопар

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	термо-е.д.с. мВ									
0	0	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,70	1,77	1,84	1,91
30	1,98	2,05	2,12	2,18	2,25	2,32	2,38	2,45	2,52	2,59
40	2,66	2,73	2,80	2,87	2,94	3,00	3,07	3,14	3,21	3,28
50	3,35	3,42	3,49	3,56	3,63	3,70	3,77	3,84	3,91	3,98
60	4,05	4,12	4,19	4,26	4,33	4,41	4,48	4,55	4,62	4,69
70	4,76	4,83	4,90	4,98	5,05	5,12	5,20	5,27	5,34	5,41
80	5,48	5,56	5,63	5,70	5,78	5,85	5,92	5,99	6,07	6,14
90	6,21	6,29	6,36	6,43	6,51	6,58	6,65	6,73	6,80	6,87
100	6,97	7,03	7,10	7,17	7,25	7,32	7,40	7,47	7,54	7,62
110	7,69	7,77	7,84	7,91	7,99	8,06	8,13	8,21	8,28	8,35
120	8,43	8,50	8,58	8,65	8,73	8,80	8,88	8,95	9,03	9,10
130	9,18	9,25	9,33	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,00	10,08	10,16	10,23	10,31	10,38	10,46	10,54	10,61
150	10,69	10,77	10,85	10,92	11,00	11,08	11,15	11,23	11,31	11,38
160	11,46	11,54	11,62	11,69	11,77	11,85	11,93	12,00	12,08	12,16
170	12,24	12,32	12,40	12,48	12,55	12,63	12,71	12,79	12,87	12,95

Додаток 2

Теплофізичні характеристики різних матеріалів, рідин, газових середовищ

Матеріал	Густина, ρ , кг/м ³	Теплопровідність, λ , Вт/(м·К)	Теплоємність, c_p , кДж/(кг·К)	Температуро- провідність, a , м ² /с
Алмаз	3150...3530	900...2320	0,502	$(569...1309) \cdot 10^{-6}$
Метали				
Срібло (99,9%)	10400	410	0,234	$168,5 \cdot 10^{-6}$
Мідь (99,9 %)	8950	382...395	0,389	$112,9 \cdot 10^{-6}$
Золото	19300	313	0,134	$121,0 \cdot 10^{-6}$
Алюміній (99,9 %)	2680	209	0,894	$87,23 \cdot 10^{-6}$
Латунь (Cu-70%, Sn-30%)	8520	110,7	0,385	$33,80 \cdot 10^{-6}$
Бронза (Cu-95%, Al-5%)	8660	83	0,410	$23,30 \cdot 10^{-6}$
Платина	21600	70	0,130	$24,90 \cdot 10^{-6}$
Олово	7250	67	0,220	$41,01 \cdot 10^{-6}$

Свинець (99,9%)	11400	35	0,126	$24,36 \cdot 10^{-6}$
Залізо (99,9 %)	7900	74,5	0,440	$21,42 \cdot 10^{-6}$
Сталь	7600...7860	15...55	0,444...0,682	$(6,75...11,5) \cdot 10^{-6}$
Сталь 10 :	7860	69,2	0,465	$18,94 \cdot 10^{-6}$
$t = 100^{\circ}\text{C}$		57,6	0,477	$15,33 \cdot 10^{-6}$
200°C		51,6	0,511	$12,86 \cdot 10^{-6}$
400°C		45,7	0,565	$10,31 \cdot 10^{-6}$
600°C				
Титан	4500	17,0	0,6	$62,96 \cdot 10^{-6}$
Ртуть	13579	8,69	0,139	$4,61 \cdot 10^{-6}$
Вуглець (графіт)	1700...2300	174...116	0,670	$(153...75,5) \cdot 10^{-6}$
Будівельні матеріали				
Бетон с кам'яним щебенем	2000	1,28	0,84	$0,762 \cdot 10^{-6}$
Залізобетон	2200	1,547	0,837	$0,840 \cdot 10^{-6}$
Кладка з червоної цегли	1700	0,810	0,88	$0,541 \cdot 10^{-6}$
Кладка з силікатної цегли	1900	0,870	0,84	$0,545 \cdot 10^{-6}$
Пісок річковий дрібний (сухий)	1520	0,300...0,380	0,795	$0,29 \cdot 10^{-6}$
Пісок річковий дрібний (вологий)	1650	1,130	2,09	$0,328 \cdot 10^{-6}$
Пісок кварцевий	1520	0,814	0,921	$0,581 \cdot 10^{-6}$
Скло	2550	0,760...0,880	0,67...0,779	$(0,445...0,443) \cdot 10^{-6}$
Фарфор	2400	1,040	1,09	$0,443 \cdot 10^{-6}$
Фанера клеєна	600	0,151	2,512	$0,100 \cdot 10^{-6}$
Деревина				
уздовж волокон	550...825	0,291...0,345	2,512...2,386	$(0,211...0,175) \cdot 10^{-6}$
поперек волокон	550...825	0,174...0,209	2,512...2,386	$(0,126...0,106) \cdot 10^{-6}$
Фторопласт-3	2120	0,0602	0,921	$0,031 \cdot 10^{-6}$
Теплоізоляційні матеріали				
Азбест листовий	770	0,1163	0,816	$0,186 \cdot 10^{-6}$
Волокно азбестове	100...250	0,052...0,081	0,837	$(0,621...387) \cdot 10^{-6}$
Пінобетон	360	0,096	0,795	$0,335 \cdot 10^{-6}$
Газоскло	280	0,100	0,837	$0,427 \cdot 10^{-6}$
Вата мінеральна	200...300	0,056...0,079	0,940...0,837	$(0,298...0,315) \cdot 10^{-6}$
Пінопласт ПС	75	0,041	1,340	$0,408 \cdot 10^{-6}$
(пінополістирол)	125	0,058	1,340	$0,346 \cdot 10^{-6}$

Пінопласт ППУ (пінополіуретан)	75	0,029	1,340	$0,289 \cdot 10^{-6}$
Повітря	1,293	0,0244	1,005	$18,18 \cdot 10^{-6}$
Аргон	1,784	0,0177	0,538	$18,44 \cdot 10^{-6}$
Вакуум (абсолютний)		0		
Рідини, холодоагенти, вода в різних станах, харчові продукти				
Фреон R12	1394	0,0919	0,929	$0,071 \cdot 10^{-6}$
Гліцерин	1267	0,2768	2,260	$0,097 \cdot 10^{-6}$
Масло МС-20	904	0,1349	1,980	$0,076 \cdot 10^{-6}$
Бензин (ВК)	740	0,1861	2,093	$0,120 \cdot 10^{-6}$
Амміак (газ)	0,771	0,0210	2,043	$13,40 \cdot 10^{-6}$
Двоокис вуглецю (газ)	1,977	0,0146	0,815	$9,100 \cdot 10^{-6}$
Вода	999,7	0,586	4,193	$0,140 \cdot 10^{-6}$
Сніг, що тільки випав	180	0,116	2,093	$0,308 \cdot 10^{-6}$
Сніг, що злежався	350	0,460	2,093	$0,628 \cdot 10^{-6}$
Лід	917	2,210	2,120	$1,140 \cdot 10^{-6}$
Цукровий песок	1600	0,580	1,260	$0,288 \cdot 10^{-6}$
Спирт етиловий	806,2	0,1884	2,302	$0,101 \cdot 10^{-6}$