

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.565.3:664.723

Експериментальне визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипкого палива рослинного походження

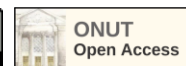
В. О. Волчок¹✉, А. Г. Крятов²¹⁻²Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: 1recvicv@gmail.comORCID: [1http://orcid.org/0009-0002-9445-788X](http://orcid.org/0009-0002-9445-788X); [2https://orcid.org/0009-0005-3371-2885](https://orcid.org/0009-0005-3371-2885)

У роботі викладено результати експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипкого палива рослинного походження. Наведено методологічні підходи до визначення теплофізичних властивостей матеріалів. Особлива увага приділена теоретичним і експериментальним методам, які забезпечують високу точність вимірювання таких властивостей, як теплоємність, тепловіддача та теплопровідність. Аналіз охоплює сучасні моделі та технологічні рішення, що сприяють більш ефективному дослідженню теплофізичних властивостей у контексті їхнього практичного застосування в різних галузях науки та техніки. Найпоширеніші з них дозволяють отримувати максимум інформації про теплофізичні характеристики матеріалу в рамках одного експерименту. Наводиться опис одного з методів визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності. Для оцінки коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності був обраний метод, який забезпечує можливість проводити вимірювання в регулярному режимі. Створено установку для експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності гетерогенної системи на основі сипкого палива рослинного походження. Представлено схему експериментальної установки. Основним елементом установки є а-калориметр і л-калориметр, виготовлені з алюмінію у формі тонкостінного циліндричного стакану із кришкою. Калориметри наповнювали досліджуваним сипким матеріалом без попереднього ущільнення, після чого здійснювали його нагрівання у сушильній шафі. Завершальний етап передбачав охолодження матеріалу в умовах середовища зі сталою температурою. Об'єктом дослідження були відходи зернопереробних виробництв різного рівня подрібнення, зокрема лушпиння соняшника, лузга гречки, ячмінна лузга та лузга спельти. Температуру матеріалу всередині калориметрів вимірювали за допомогою мідь-константанової диференційної термопари. Представлено фізичну модель вимірювальної комірки для реалізації метода визначення властивостей матеріалів у вигляді двошарової системи. Представлено розрахункові формули для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності. Показано, що при розрахунках коефіцієнти тепловіддачі та теплопровідності визначалися з урахуванням поправки на оболонку калориметра. Встановлено темп охолодження для кожного з матеріалів. Представлено результати експериментальних досліджень коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипких матеріалів рослинного походження з урахуванням відносної похибки.

Ключові слова: Сипкий матеріал; Експеримент; Коефіцієнт тепловіддачі; Коефіцієнт теплопровідності

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3278>

© The Author(s) 2025. This article is an open access publication
This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Важливе місце у господарській діяльності сучасної людини займають зернисті, сипкі та волокнисті матеріали (гетерогенні матеріали). Значні обсяги лігніноцелюлозних залишків у вигляді сипкої маси щорічно утворюються після переробки сільгосппродукції і деревини, наприклад, при виробництві паперу. До матеріалів, що містять лігнін відносять рослинні тканини, такі як деревина, солома, лушпиння, стебла кукурудзи та інші залишки рослин.

Приблизно 50% цих залишків біомаси зараз спалюється з метою отримання теплової енергії, тоді як решта викидається на звалища, що викликає серйозне занепокоєння щодо забруднення ґрунтових вод.

Розробка, проектування та експлуатація вакуумної піролізної системи, що перетворює відходи сільгосппродукції на хімічні речовини вимагають наявності достовірної інформації про властивості біоматеріалів у сипкому стані, а саме коефіцієнтів теплопровідності, тепловіддачі та теплопровідності.

Тому особливого значення набуває розв'язання задач пов'язаних з розробкою методів розрахунку і експериментального визначення теплофізичних властивостей гетерогенних матеріалів з урахуванням їх структурних характеристик, які в свою чергу можуть змінюватись під час експлуатаційних впливів.

Теплофізичні властивості є найважливішими характеристиками речовин та матеріалів. Кількісні розрахунки теплових та температурних полів реальних тіл можливі лише тоді, коли відомі конкретні значення теплофізичних властивостей. Вони входять як коефіцієнти у всі рівняння аналітичної теорії теплопровідності.

Процеси поширення теплоти (теплопровідність, конвекція та теплове випромінювання) у технологічних процесах та навколишньому середовищі, досить часто відбуваються спільно.

Накопичений досвід дає ясно зрозуміти, що характеристики твердих матеріалів можуть вважатися у першому наближенні однопараметричними функціями температури. На даний момент фізика не має в своєму розпорядженні універсальних теоретичних моделей, які дозволяли б розраховувати теплофізичні властивості реальних речовин і матеріалів. Основним джерелом надійної інформації про них залишаються спеціально організовані теп-

лофізичні експерименти.

2. Методи та засоби вимірювання теплопровідності гетерогенних матеріалів

На даний час розроблено безліч методів і приладів для вимірювання теплофізичних властивостей (ТФВ) різних речовин: імпульсних [1, 2], регулярних [3, 4] та квазістаціонарних [5]. Це пояснюється насамперед тим, що безперервно створюються нові матеріали, теплопровідність, температуропровідність та питома теплоємність яких змінюються в широких межах і залежать від зміни структури речовини, роду термічної та механічної обробки, від наявності домішок.

Для визначення ТФВ застосовують теплові режими, які піддаються точному математичному аналізу та дозволяють створювати зручні для практичного використання розрахункові формули.

Попри велике розмаїття методів вимірювання теплопровідності, їх можна умовно розділити на дві основні групи: стаціонарні й нестаціонарні. Методи першої групи базуються на закономірностях стаціонарного теплового режиму. Теорія теплопровідності розглядає тіло як безперервне середовище. Згідно з основним законом теплопровідності – законом Фур'є – вектор густини теплового потоку, переданого теплопровідністю, пропорційний вектору градієнта температури:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}t \quad (1)$$

де q – тепловий потік; λ – коефіцієнт теплопровідності; $\text{grad}t$ – градієнт температури.

До другої групи входять методи, засновані на закономірностях нестаціонарного теплового режиму. У цьому випадку температура тіла залежить як від координат, так і від часу.

У нестаціонарних методах розподіл температури по всьому зразку змінюється з часом, що вимагає розв'язання більш складного рівняння теплового потоку, що залежить від часу. Теплова енергія подається або періодично, як окремий крок, або як імпульс, що призводить до періодичних або тимчасових змін температури у зразку, відповідно.

Нестационарні методи зазвичай є непрямими, вони вимірюють коефіцієнт температуропровідності $a = \lambda / \rho c_p$ та обчислюють коефіцієнт теплопровідності λ , використовуючи питому теплоємність матеріалу c_p та густину ρ , що додає додатко-

вих невизначеностей. Окрім недоліку, основними перевагами цих методів є те, що вони не потребують ні підведення енергії, ні вимірювання абсолютної температури.

На відміну від нестационарних методів, стаціонарні методи [3] спираються на точні знання абсолютних температур та енергоспоживання і мають перевагу безпосереднього вимірювання теплопровідності на основі простого стаціонарного рівняння теплового потоку (1).

Стаціонарні методи потребують плоских, циліндричних або сферичних ізотерм, і або вимірюють тепловий потік через зразок безпосередньо або встановлюють еталонний матеріал з відомою та подібною теплопровідністю послідовно зі зразком.

Серед стаціонарних методів вимірювання найпопулярнішими вважаються метод пластини, метод циліндру та метод кулі.

Проте пряме використання стаціонарного методу пластини для визначення сукупності ТФВ насипного шару озерених регенеративних продуктів та поглиначів ускладнене.

Критичною проблемою для точного вимірювання теплового потоку є мінімізація втрат тепла, особливо для зразків з малими значеннями теплопровідності. Порівняльні методи з еталонним зразком мінімізують похибку вимірювання теплового потоку, але використання еталону додає додаткових невизначеностей.

При застосуванні методів циліндру та кулі, досліджуваній матеріал отримує відповідну циліндричну та сферичну форму.

У методі кулі головна складність полягає в однорідному заповненні простору між двома порожнистими концентричними оболонками досліджуваною речовиною, що вимагає суворого розташування центрів куль.

Методи захищеного нагрівача вимірюють тепловий потік безпосередньо та усувають втрати тепла від нагрівача шляхом часткової інкапсуляції нагрівача матеріалом зразка та використання дуже точно контрольованих нагрівальних радіаційних екранів [6].

Аналогічно, методи з нагрівачем мінімізують втрати тепла шляхом вбудовування нагрівального елемента в матеріал зразка та використання рівняння радіального теплового потоку для визначення теплопровідності [7].

Метод циліндру дозволяє досліджувати теплопровідність насипного шару, за умови його правильної адаптації до експериментальних умов і

врахування агресивних характеристик досліджуваного матеріалу.

Типовими датчиками температури є термопари та термометри опору. Останні зазвичай мають вищі стандарти точності та не потребують додаткового вимірювання компенсації холодного спаю, як того вимагають термопари [8].

Однак, термометри опору складніше підключити до зразка і вони можуть мати більші втрати тепла через розмір датчика та підводи струму та напруги. Для досягнення точних показників температури термопари повинні мати хороший тепловий контакт зі зразком.

Крім того, тепловий потік через спай термопари потрібно мінімізувати, а термопари калібрувати. Щоб зменшити невизначеності термопар, застосовану різницю температур можна безпосередньо отримати за допомогою вимірювання диференціальною термопарою.

Під час аналізу теплових характеристик за допомогою методів нестационарного теплового режиму використовуються рішення нестационарного диференційного рівняння [3]. Як правило, такі рішення визначаються для об'єктів простої геометричної форми за наявності заданих початкових і граничних умов.

На відміну від стаціонарних, нестационарні режими відрізняються меншою тривалістю експерименту, простотою дослідницького механізму й автоматизацією процесу вимірювання та обробки отриманих даних.

Серед методів, заснованих на закономірностях нестационарного температурного поля, при температурах близьких до кімнатних, особлива увага приділяється регулярному тепловому режиму першого роду.

Регулярний тепловий режим визначається як етап процесу, коли просторово-часові зміни температури більше не залежать від початкових умов і переходять до стабільного, упорядкованого стану.

При розробці нестационарних методів вимірювання виходять із рішень диференціального рівняння теплопровідності за певних початкових та граничних умов, що характеризують режими зміни температури на поверхні тіла. За різних граничних умов спостерігаються відмінності у поведінці температурного поля, які змінюються залежно від часу.

Якщо температура середовища з часом змінюється за лінійним законом $t_c = t_0 + b\tau$, то спостерігається регулярний режим другого роду

або квазістаціонарний режим, який характерний тим, що зміна температури в часі у будь-якій точці відбувається за лінійним законом, тобто з постійною та однаковою швидкістю, що дорівнює швидкості зміни температури середовища.

На основі теорії регулярного теплового режиму першого роду було створено та здобули значну популярність α -калориметри, λ -калориметри, мікрокалориметри та бікалориметри, які використовуються для проведення комплексних теплофізичних досліджень.

Варто зазначити, що методи регулярного режиму спочатку створювалися для визначення ТФВ пористих теплоізоляційних матеріалів. Згодом їх адаптували для дослідження інших систем.

Для рідин, наприклад, застосовувався метод бікалориметра для визначення теплопровідності, а також метод мікрокалориметра для вимірювання теплоємності.

Як правило, стаціонарні та нестаціонарні методи дозволяють визначити лише одну характеристику матеріалу: теплопровідність, теплоємність або температуропровідність. Для визначення комплексу теплофізичних характеристик необхідно або комбінувати існуючі методи та вимірювальні прилади, що тягне за собою збільшення трудомісткості вимірювальних операцій, часу вимірювання та похибки або використовувати методи, що дозволяють в одному експерименті виміряти весь комплекс шуканих характеристик.

Фізичну модель вимірювальної комірки для реалізації метода визначення ТФВ матеріалів можна розглядати як двошарову систему (рис. 1), яка складається з циліндричного шару досліджуваного зразка 1 радіусом R_1 і циліндричної оболонки 2 радіусом R_2 .

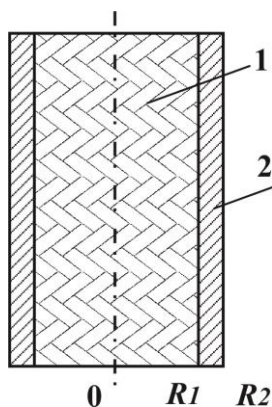


Рисунок 1 – Фізична модель вимірювальної комірки циліндричної форми: 1 – шар зразка, що досліджується; 2 – циліндрична оболонка

Вводиться припущення, що температурні поля в шарах комірки одномірні (за умови, що циліндричний шар можна вважати необмеженим у поздовжньому напрямку); відсутні термічні опори на поверхнях контакту шарів 1 та 2; ТФВ матеріалів комірки постійні і залежать від зміни температури під час експерименту; відсутнє теплоперенесення випромінюванням і у матеріалах комірки.

Для визначення коефіцієнтів температуропровідності, тепловіддачі і теплопровідності зразків проводять два досліди, під час яких вимірювальну комірку у вигляді калориметру попередньо термостатують при певній температурі і потім охолоджують у середовищі з постійною температурою. Під час кожного з дослідів реєструють температуру у центрі калориметру з певним проміжком часу, знаходять безрозмірну температуру θ ($0, Fo$) і число Фур'є $Fo = \alpha t/R_2^2$. Значення чисел Біо визначають за виразом: $Bi = \alpha R/\lambda$. В якому коефіцієнт тепловіддачі визначають з експерименту.

Якщо калориметр розміщено в середі з постійною температурою, то зміна його температури в часі включає всі три стадії: початкову іррегулярну, регулярну і стаціонарну. За відсутністю у калориметрі джерел теплоти стаціонарна стадія не може бути корисно використана, оскільки ця стадія відповідає повному вирівнюванню температури в об'ємі тіла.

3. Експериментальне визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипкого матеріалу методом регулярного режиму першого роду

З теорії теплотехнічних вимірів відомо, що нестаціонарні методи з точки зору оперативності, повноти отримуваної інформації про об'єкти дослідження і простоти реалізації експериментальних установок є переважними.

Однією з ключових ознак регулярного теплового режиму є постійний темп охолодження m , який залишається однаковим для всіх точок тіла і не залежить від того, як спочатку розподілялася температура.

Основним завданням регулярного режиму є встановлення залежності між темпом охолодження тіла m і коефіцієнтом тепловіддачі α між ним і зовнішнім середовищем. При цьому можуть бути визначені теплофізичні характеристики тіл, зокрема, коефіцієнти температуропровідності і теплопровідності, теплоємність, а також коефіцієнт

тепловіддачі від тіла до довкілля. З настанням регулярного режиму, коли критерій Фур'є $Fo > 0,5$ натуральний логарифм надлишкової температури в будь-якій точці тіла змінюється в часі за лінійним законом:

$$\ln \theta = -m\tau + c \quad (2)$$

А-калориметр являє собою циліндричну тонкостінну металеву ємність, виготовлену з матеріалу з високою теплопровідністю, такого як алюміній. Вона заповнюється досліджуванним сипким матеріалом і оснащена диференціальною мідь-константановою термопарою.

Коефіцієнт форми а-калориметру, особливість його конструкції і геометричні розміри представлено у роботі [9].

Коефіцієнт тепловіддачі α від поверхні а-калориметру до зовнішнього повітря, згідно першої теореми Кондратьєва, може бути визначений з рівняння:

$$m = \alpha \frac{F}{C} \psi \quad (3)$$

де α – середній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); F – повна площа поверхні а-калориметра, м²; $C = c \cdot M$ – повна теплоємність тіла, Дж/К; c – питома теплоємність тіла, Дж/(кг·К); M – маса тіла, кг; ψ – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу температур в тілі.

Коефіцієнт тепловіддачі від сипкого палива визначали за допомогою двоскладового а-калориметру. Двоскладовий а-калориметр є оболонкою з матеріалу з високою теплопровідністю і ядра з порівняно низькою теплопровідністю.

Схема експериментальної установки представлена на рис. 2.

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі від двоскладового калориметра використовували формулу:

$$\alpha = \left(\frac{\Phi_M}{\psi H \sqrt{m}} + \Phi_{обол} \right) m \quad (4)$$

де $\Phi_M = c_M \cdot M_M / F_{вн}$ – відношення повної теплоємності сипкого палива до площі внутрішньої поверхні а-калориметра; $\Phi_{обол} = c_{обол} \cdot M_{обол} / F_{зов}$ – відношення повної теплоємності оболонки до площі зовнішньої поверхні а-калориметра; c_M – питома

теплоємність сипкого палива, Дж/кг К; M_M – маса сипкого палива, кг; $c_{обол}$ – питома теплоємність оболонки а-калориметра, Дж/кг К; $M_{обол}$ – маса оболонки а-калориметра, кг; H – характеристика калориметра.

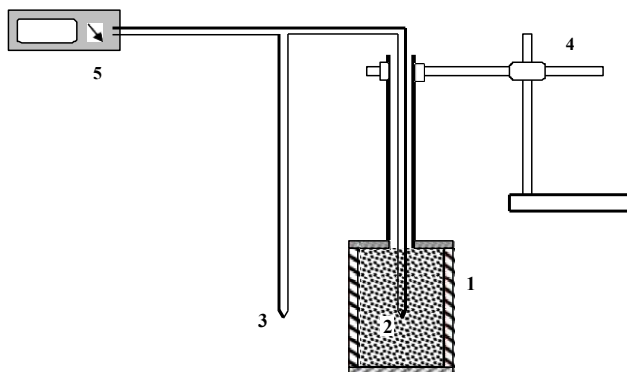


Рисунок 2 – Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипких тіл: 1 – а-калориметр; 2 – гарячий спай термопар; 3 – холодний спай термопар; 4 – мілівольтметр; 5 – штатив

Характеристику калориметра H розраховували за формулою:

$$H = R_{вн} \sqrt{\frac{1}{a}} \quad (5)$$

де k – коефіцієнт форми калориметра; a – коефіцієнт температуропровідності сипкого палива отриманий у роботі [9], м²/с.

На початку досліду у а-калориметр засипали сипке паливо відповідної маси. Потім заповнений матеріалом калориметр нагрівали в сушильній шафі до температури 70...80 °С. Після нагріву його діставали з шафи і дотримуючись обережності закріплювали у штативі. Гарячий спай диференційної термопар розташовували у центрі а-калориметра, а холодний спай у пробірці з олією, що має сталу температуру, яка дорівнює температурі навколишнього середовища. Потім диференційну термопару підключали до мілівольтметра і кожні 30 секунд проводили виміри термоЕРС термопар. Надлишкову температуру θ визначали за термоЕРС мідь-константанової термопар.

Коефіцієнт теплопровідності λ сипкого палива визначали за допомогою двоскладового λ -калориметру, такої ж форми як при визначенні коефіцієнта тепловіддачі. При цьому в ході розрахунків використовували результати попередніх вимірів: коефіцієнта температуропровідності a [9]

і коефіцієнта тепловіддачі α .

Коефіцієнт теплопровідності λ сипкого палива визначали за формулою:

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot B}{S} \left(1 - \frac{m \cdot c_{обол} \cdot M_{обол}}{F_{обол}} \right) \quad (6)$$

де $B = R_H \left(1 + \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{R_{вн} + l_{вн}} \right)$ – геометричний параметр λ -калориметру; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – товщина кришки, стінки і донця оболонки, м; $R_{вн}, l_{вн}$ – внутрішній радіус і внутрішня довжина λ -калориметру, м; S – безрозмірний критерій, який обирається за темпом охолодження у безрозмірній формі; $c_{обол}$ – теплоємність матеріалу оболонки калориметру, Дж/кгК; $M_{обол}$ – маса облонки калориметру, кг; $F_{обол}$ – площа поверхні контакту оболонки калориметру, м².

Експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності λ сипкого палива рослинного походження проводили за методом регулярного режиму. Досліджувальний зразок сипкого палива насипали у жорстку оболонку, нагрівали у сушильній шафі до температури 65...75 °С. Після закріплення у штативі проводили заміри термоЕРС термопари при охолодженні λ -калориметру у повітряному середовищі з постійною температурою. Для реалізації цього методу використовували експериментальну установку, схема якої представлена на рис. 2.

Для виміру надлишкової температури використовували диференційну термопару. Гарячий спай термопари розміщували всередині λ -калориметру, занутивши його у сипке паливо, а холодний спай у пробірку з олією при кімнатній температурі. Після проходження іррегулярного режиму починали відлік часу за допомогою секундоміру. Покази на мілівольтметрі фіксували кожні 30 секунд. Як і в попередніх дослідах значення термоЕРС переводили і знаходили надлишкову температуру θ і натуральний логарифм надлишкової температури.

Дослідження охоплювали основні відходи зернопереробних виробництв з різним ступенем подрібнення, а саме лушпиння соняшника, лузга гречки, лузга ячмінна та лузга спельти.

У дослідах по визначенню насипної густини використовували контейнер циліндричної форми з внутрішнім об'ємом 0,005 м³. Тарировку контейнеру проводили з використанням дистильованої води при температурі 20 °С. Насипну густину

розраховували виходячи з маси нетто і внутрішнього об'єму контейнера. Розрахована величина стосується палива з вмістом вологи, рівним вмісту вологи випробуваної проби. За остаточний результат приймали середнє арифметичне значення результатів паралельних випробувань. Значення насипної густини знаходилося у діапазоні від 120 до 180 кг/м³ для всіх зразків.

В реальних умовах насипна густина може змінюватися як під дією власної ваги, так і при зовнішньому ущільнюючому навантаженні. Значення насипної густини при цьому може досягати 300 кг/м³.

Калориметри заповнювали досліджуваним сипким матеріалом без попереднього ущільнення. Після цього здійснювали термічну обробку шляхом нагрівання у сушильній камері.

Для забезпечення відтворюваності результатів усі описані експерименти були проведені тричі.

Лушпиння соняшника є відходом виробництва соняшникової олії, що являє собою тверде, дерев'яніле покриття насіння соняшника. Його отримують під час механічного лущення при підготовці ядра насіння соняшника до виділення олії з метою зменшення негативного впливу на обладнання й збільшення виходу олії та інших цінних компонентів.

На сучасних крупозаводах при виробництві 150 т гречаної і ячмінної крупи утворюються приблизно 35 т лушпиння, що являють собою досить жорстку еластичну структуру з високим вмістом клітковини.

Лузга спельти, яка містить мінімальну кількість глютену, є зовнішньою оболонкою зерна, має тверду структуру, тому потребує видалення перед вживанням на спеціальних відцентрових машинах.

До випробувань проводилась попередня оцінка розмірів часток досліджувальних зразків. З цієї точки зору сипкий матеріал складається з абсолютно твердих тіл, які взаємодіють між собою, що ґрунтується на певному уявленні про механізм теплопровідності та структури матеріалу.

Тривалість кожного експерименту з урахуванням першої стадії охолодження у вигляді іррегулярного режиму становила 20 хв.

Результати експериментального визначення коефіцієнту тепловіддачі і коефіцієнту теплопровідності сипкого матеріалу рослинного походження представлені у таблиці.

Оцінка похибки проводилася за рекомендаціями, згідно з якими необхідно враховувати (за

умови виключення систематичних похибок) невиключені залишки систематичних похибок, похибки віднесення та випадкові похибки вимірювань, що визначають розкид експериментальних точок та статистичну обробку даних.

Як межі складових невиключеної систематичної похибки приймали межі основних і додат-

кових похибок засобів вимірювань, що допускаються.

Похибка вимірювання температури була обумовлена градууювальною похибкою мідь-константової термопари, а також наявністю залишкових систематичних погрешностей, які не були усунуті під час проведення вимірювань.

Таблиця – Експериментальні значення коефіцієнтів тепловіддачі та теплопровідності сипкого матеріалу рослинного походження

Тип зразка	Розмір частин, мм	Насипна густина, кг/м ³	Коефіцієнт тепловіддачі α , Вт/м ² К	$\delta\alpha$, %	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/мК	$\delta\lambda$, %
Лушпиння соняшника	1,45	120	10,82	1,91	0,042	1,81
Лузга гречки	1,35	180	9,37	2,48	0,047	2,58
Лузга ячмінна	1,30	145	10,22	1,74	0,052	3,14
Лузга спельти	1,25	162	10,78	2,29	0,038	2,179

Межі невиключеної систематичної похибки результату вимірювання, за їх рівномірному розподілі, визначалися шляхом складання композиції невиключених систематичних похибок.

Відносна похибка визначення коефіцієнта тепловіддачі та коефіцієнта теплопровідності, що допускається, була оцінена за формулою:

$$\delta = \pm 1,1 \sqrt{\delta_o^2 + 4(\delta_n)^2 + 8(\delta_e)^2 + 7(\delta_{A_{i-j}})^2} \quad (7)$$

де δ_o – гранична допустима відносна похибка; δ_n – гранична допустима похибка вимірювання товщини; δ_e – гранична допустима похибка вимірювання термоЕРС; $\delta_{A_{i-j}}$ – гранична допустима відносна похибка визначення безрозмірної константи A_{i-j} .

Достовірність отриманих експериментальних даних підтверджується коректною постановкою виконаних досліджень і проведенням аналізом експериментальних похибок даних.

4. Висновки

Створено експериментальну установку для визначення коефіцієнтів тепловіддачі і теплопровідності сипкого матеріалу рослинного походження.

Застосований метод регулярного режиму першого роду а-калориметру і λ -калориметру най-

зручніший для визначення коефіцієнтів тепловіддачі і теплопровідності гетерогенних матеріалів.

Проведено серію експериментів по визначенню коефіцієнтів тепловіддачі і теплопровідності насипної біомаси.

Отримано експериментальні дані коефіцієнтів тепловіддачі і теплопровідності сипкого біопалива, а саме: лушпиння соняшника, лузги гречки, лузги ячменю і лузги спельти.

Виконано аналіз похибок експериментальних даних. Встановлено, що основний внесок у повну похибку робить її випадкова складова.

Подяка

Автори вдячні за корисні поради, обговорення і матеріали, надані в ході збору та узагальнення інформації студентам, інженерам підприємств та співробітникам кафедр ОНТУ.

Особистий внесок авторів CRediT

Волчок В.О.: методичне забезпечення, планування експерименту, створення експериментальної установки, дослідження, аналіз результатів. **Крятов А.Г.:** інформаційний пошук, формальний аналіз, огляд та редагування

Література

1. **Kosaka M., Monde M.** Simultaneous measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by means of inverse solution for one-dimensional heat conduction (anisotropic thermal properties of CFRP for FCEV) // *International Journal of Thermophysics*. – 2015. – Vol. 36. – No. 10-11. – P. 2590-2598.
2. **Bouguerra A., Ait-Mokhtar A., Amiri O., Diop M.B.** Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2001. – Vol. 28. – No. 8. – P. 1065-1078.
3. **Alaili K., Ordonez-Miranda J., Ezzahri Y.** Simultaneous determination of thermal diffusivity and thermal conductivity of a thin layer using double modulated thermal excitations // *Journal of Applied Physics*. – 2019. – Vol. 126. – No. 14. – P. 145103.
4. **Volchok V.** Determination of the temperature conductivity coefficient of bulk biofuels // *V International Scientific-Technical Conference: Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering. Book of abstracts.* – Kielce University of Technology, Poland, 2021. – P. 132.
5. **Bison P., Marinetti S., Mazzoldi A., Grinzato E., Bressan C.** Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods // *Infrared Phys. Technol.* – 2002. – Vol. 43. – P. 127-132.
6. **Standard Practice for Thermal Conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter.** ASTM E2584-20; 2020. p. D2214.
7. **Gupta M., Yang J., Roy C.** Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles // *Fuel*. – 2003. – Vol. 82. – No. 8. – P. 919-927.
8. **Suuberg E., Aarna I., Milosavljevic I.** The char residues from pyrolysis of biomass – some physical properties of importance // *Progress in Thermochemical Biomass Conversion, IEA Bioenergy.* – UK: Blackwell Science Ltd, 2001. – Vol. 2. – P. 1246-1258.
9. **Волчок В.О., Нікітін Д.М.** Експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності гетерогенної системи // *Холодильна техніка та технологія.* – 2024. – Том 60. – №4. – С. 266-274.

Отримана в редакції 02.08.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Experimental determination of heat transfer and thermal conductivity coefficients of bulk fuels of plant origin

Victor Volchok^{1✉}, *Artem Kriatov*²

^{1,2}Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹recvicv@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0009-0002-9445-788X>; ²<https://orcid.org/0009-0005-3371-2885>

The work presents the results of experimental determination of heat transfer and thermal conductivity coefficients of loose fuel of plant origin. Methodological approaches to determining the thermophysical properties of materials are presented. Special attention is paid to theoretical and experimental methods that provide high accuracy in measuring properties such as heat capacity, heat transfer, and thermal conductivity. The analysis covers modern models and technological solutions that contribute to more effective research of thermophysical properties in the context of their practical application in various fields of science and technology. The most common of them allow you to obtain maximum information about the thermophysical characteristics of a material within a single experiment. A description of one of the methods for determining the coefficients of heat transfer and thermal conductivity is given. A method was chosen to estimate the coefficients of heat transfer and thermal conductivity, which provides the opportunity to conduct measurements in a regular mode. A setup has been created for experimental determination of heat transfer and thermal conductivity coefficients of a heterogeneous system based on loose fuel of plant origin. A diagram of the experimental setup is presented. The main element of the setup is an a-calorimeter and a λ-calorimeter, made of aluminum in the form of a thin-walled cylindrical beaker with a lid. The calorimeters were filled with the investigated bulk material without prior compaction, after which it was heated in a drying oven. The final stage involved cooling the material in an environment with a constant temperature. The object of the study was waste from grain processing industries of various levels of grinding, in particular sunflower husk, buckwheat husk, barley husk and spelt husk. The tempera-

ture of the material inside the calorimeters was measured using a copper-constantan differential thermocouple. A physical model of a measuring cell for implementing a method for determining the properties of materials in the form of a two-layer system is presented. Calculation formulas for determining the coefficients of heat transfer and thermal conductivity are presented. It is shown that in the calculations the heat transfer and thermal conductivity coefficients were determined taking into account the correction for the calorimeter shell. The cooling rate was established for each of the materials. The results of experimental studies of heat transfer coefficients and thermal conductivity of loose materials of plant origin are presented, taking into account the relative error.

Keywords: Loose material; Experiment; Thermal diffusivity; Heat transfer coefficient; Thermal conductivity coefficient

References

1. **Kosaka, M., Monde, M.** (2015). Simultaneous measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity by means of inverse solution for one-dimensional heat conduction (anisotropic thermal properties of CFRP for FCEV). *International Journal of Thermophysics*, 36(10–11), 2590-2598.
2. **Bouguerra, A., Ait-Mokhtar, A., Amiri, O., Diop, M.B.** (2001). Measurement of thermal conductivity, thermal diffusivity and heat capacity of highly porous building materials using transient plane source technique. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 28(8), 1065-1078.
3. **Alaili, K., Ordenez-Miranda, J., Ezzahri, Y.** (2019). Simultaneous determination of thermal diffusivity and thermal conductivity of a thin layer using double modulated thermal excitations. *Journal of Applied Physics*, 126(14), Article 145103.
4. **Volchok, V.** (2021). Determination of the temperature conductivity coefficient of bulk biofuels. *V International Scientific-Technical Conference: Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering. Book of abstracts. Kielce University of Technology, Poland*, 132.
5. **Bison, P., Marinetti, S., Mazzoldi, A., Grinzato, E., Bressan, C.** (2002). Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods. *Infrared Phys. Technol.*, 43, 127-132.
6. Standard Practice for Thermal Conductivity of Materials Using a Thermal Capacitance (Slug) Calorimeter. *ASTM E2584-20; 2020. D2214*.
7. **Gupta, M., Yang, J., Roy, C.** (2003). Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles. *Fuel*, 82(8), 919-927.
8. **Suuberg, E., Aarna, I., Milosavljevic, I.** (2001). The char residues from pyrolysis of biomass—some physical properties of importance. *Progress in Thermochemical Biomass Conversion, IEA Bioenergy, UK: Blackwell Science Ltd*, 2, 1246-1258.
9. **Volchok, V., Nikitin, D.** (2024). Experimental determination of the coefficient of thermal diffusivity of a heterogeneous system. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(4), 266-274.

Received 02 August 2025

Approved 29 August 2025

Available in Internet 30 September 2025