

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 621.565.3:664.723

Експериментальне визначення коефіцієнту температуропровідності гетерогенної системи

В. О. Волчок¹, **Д. М. Нікімін²**¹⁻²Одеський 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); [2http://orcid.org/0009-0000-9144-1810](http://orcid.org/0009-0000-9144-1810)

У роботі викладено результати експериментального визначення коефіцієнта температуропровідності сипучих матеріалів, які в подальшому можуть піддаватись стисканню. Розглянуто методи визначення теплофізичних властивостей матеріалів. Найбільш поширеними є методи, що дозволяють в одному експерименті встановлювати максимум інформації про теплофізичні властивості досліджуваного матеріалу. Наводиться опис одного з методів визначення коефіцієнта температуропровідності. Для визначення коефіцієнта температуропровідності було обрано метод, що дозволяє проводити вимірювання його значень в іррегулярному режимі, викликаному поглинанням або виділенням значної кількості теплоти у зразках при нагріванні. Розроблено установку для експериментального визначення коефіцієнту температуропровідності гетерогенної системи на базі сипкого біопалива. Наведено схему експериментальної установки для визначення коефіцієнту температуропровідності. Основним елементом установки є α -калориметр, виготовлений з металу з високим коефіцієнтом теплопровідності у вигляді циліндрового тонкостінного стакану. Стакан заповнювали досліджувальним сипким матеріалом без утрамбування і нагрівали у сушильній шафі, потім проводили охолодження у середовищі зі сталюю температурою. У якості об'єкту дослідження було обрано відходи зернопереробних виробництв різного ступеня подрібнення, а саме лушпиння соняшника, лузга гречки, лузга ячмінна, лузга спельти. Температуру сипкого матеріалу в середині α -калориметру визначали за допомогою мідь-константанової диференційної термопари. Виготовлення α -калориметра у вигляді закритого стакану дозволило уникнути проникнення вологи всередину досліджуваного матеріалу. Наведено параметри α -калориметру. Показано, що саме метод α -калориметру найзручніший для дослідження гетерогенних матеріалів. При розрахунках коефіцієнту температуропровідності визначався з урахуванням поправки на оболонку. За результатами дослідів визначено темп охолодження для кожного з матеріалів. Наведено результати експериментальних досліджень коефіцієнту температуропровідності для сипких тіл рослинного походження. Проведена оцінка відхилення визначення коефіцієнту температуропровідності сипкого матеріалу. Встановлено, що основний внесок до повної похибки вносить її випадкова складова.

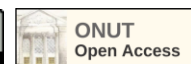
Ключові слова: Сипкий матеріал; Експеримент; Коефіцієнт температуропровідності

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3052>

© The Author(s) 2024. 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

Сипкі матеріали, які складаються з твердої та газової фаз, займають важливе місце у господар-

ській діяльності людини. Показники якості цих матеріалів і виробів з них часто визначаються режимами теплопереносу, які залежать від температуропровідності, теплопровідності та тепло-

віддачі.

Сипкі матеріали до сих пір є об'єктом дослідження, який являє собою зростаючий інтерес як сам по собі, так і у зв'язку з наявністю великої кількості задач, в яких сипуча середа є одним з елементів досліджуваної гетерогенної системи.

Властивості гетерогенної системи є функціями властивостей її твердої і газової фаз, об'єму пор чи відстані між твердими частинами, питомого об'єму твердої фази тощо. Це обумовлює суттєвий вплив на властивості механічних, теплових і фізико-хімічних впливів, яким підвержені матеріали під час експлуатації.

При розробці, проектуванні та експлуатації обладнання, що працює на переробці сільгосп-продукції часто виникають труднощі, пов'язані з відсутністю достовірної інформації про властивості сипких біоматеріалів. Наявна в літературі інформація про властивості обмежена і не дозволяє інтерпретувати отримані закономірності на інші системи.

Сипкий матеріал демонструє великий спектр явищ. Він може рухатись як рідина, може залишатись у спокої при наявності напруги як тверде тіло, може вести себе як газ при високій інтенсивності впливу на нього. Незважаючи на велику кількість спроб теоретичного опису окремих аспектів поведінки сипкої середи використовуючи апарат механіки суцільної середи, не знайдено загальної теорії передбачення зміни поведінки сипкого матеріалу.

2. Методи та засоби вимірювання властивостей гетерогенних матеріалів

Властивості гетерогенної системи є функціями властивостей її твердої та газової фаз, обсягу пор або простору між зернами та волокнами, питомого об'єму твердої фази тощо. Це зумовлює істотний вплив на теплофізичні властивості механічних, теплових та фізико-хімічних впливів, яким піддаються матеріали у процесі експлуатації. Тому особливої актуальності набуває вирішення завдань розробки методів розрахунку та експериментального визначення теплофізичних властивостей (ТФВ) гетерогенних матеріалів з урахуванням їх структурних характеристик, що змінюються внаслідок експлуатаційних впливів.

Відомі різні розрахунково-експериментальні методи визначення ТФВ сипких матеріалів. Роботи з узагальненої провідності гетерогенних тіл

було розпочато наприкінці XIX століття Максвеллом, а однією з перших розрахункових формул, що зв'язують теплопровідність зразка з об'ємом повітряних включень та теплопровідністю матеріалу твердої фази, отримав Ейкен на початку XX століття. Більшість відомих моделей присвячені теплопровідності гетерогенних тіл, а також теплопровідності сумішей та композиційних матеріалів.

Знання про ТФВ, отримані розрахунковими методами, можуть бути використані для вузького класу матеріалів та умов їх експлуатації. Тому при контролі ТФВ найбільш ефективними є експериментальні методи, що базуються на залежностях, що описують перенесення тепла в гетерогенних системах.

Однак через різноманіття пористих гетерогенних систем, до яких належить сипке біопаливо, немає універсальної моделі, що дозволяє визначити їх ТФВ з прийнятними похибками в широкому інтервалі температур і пористості.

Теплові впливи на досліджуваний матеріал безпосередньо в процесі вимірювання ТФВ, також впливають на його структурні характеристики, що пояснюється тепловим розширенням твердої фази.

Використання аналітичних рішень важливих завдань нестационарної теплопровідності часто практично неможливо через відсутність надійних даних про значення коефіцієнтів, що характеризують теплофізичні властивості матеріалів, що нагріваються (охолоджуються). Оскільки зміна температурного поля твердого тіла залежить від внутрішнього та зовнішнього теплових опорів, то за відсутності значень коефіцієнтів теплопровідності та теплообміну неможливо зробити розрахунок та вибір оптимального режиму теплової обробки матеріалів.

Таким чином, найбільш надійним способом визначення теплофізичних властивостей є експеримент.

Наявність надійних експериментальних даних про властивості сипкої середи твердої маси дасть змогу будувати моделі, максимально наближеної до своїх реальних прототипів.

Методи визначення ТФВ матеріалів ґрунтуються на використанні математичних моделей, що встановлюють взаємозв'язок між параметрами теплоперенесення в гетерогенному матеріалі та його пористістю.

Для визначення температуропровідності пористих структур отримано формулу виду [1]:

$$a(T, \varepsilon) = a_0 f_T(T) f_\varepsilon(\varepsilon) \quad (1)$$

де a_0 – температуропровідність, що відповідає деякій початковій температурі; $f_T(T)$ – функція залежності температуропровідності твердої фази матеріалу від температури; $f_\varepsilon(\varepsilon) = 1$ – функція пористості.

З виразу (1) випливає, що на температуропровідність розглянутих матеріалів пористість безпосередньо практично не впливає, незважаючи на залежність від неї теплопровідності, густини і теплоємності.

Труднощі безпосереднього вимірювання та прагнення отримати максимальну інформацію про теплофізичні властивості одного і того ж зразка призвели до створення низки методів досліджень, у тому числі імпульсних [2, 3], регулярних [4, 5] та квазістаціонарних [6].

На даний час розроблено безліч методів і приладів для вимірювання ТФВ різних речовин. 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.

Методи визначення ТФВ залежно від характеру зміни у часі температур та теплових потоків можна розділити на стаціонарні і нестаціонарні методи.

Суть стаціонарних методів вимірювання полягає у визначенні теплового потоку, що проходить через дослідний зразок заданих розмірів, і перепаду температур на його ізотермічних поверхнях при тепловому режимі, що встановився [3-5].

Основними передумовами стаціонарних методів вимірювання є сталість та однорідність теплового потоку в просторі, відхилення від теоретичного розподілу якого можуть виникати через нерівномірне температурне поле, створюване нагрівачем. Зразки повинні мати ізотропну теплопровідність, оскільки передбачається, що ізотерми паралельні до ізотермічних поверхонь приладу.

До основних переваг стаціонарних методів вимірювання можна віднести їх достатню простоту і надійність розрахункових рівнянь, а основними недоліками є значні витрати часу на підготовку та проведення дослідів та можливість вимірювання лише однієї теплової характеристики.

Найбільшого поширення серед стаціонарних методів вимірювання набули метод плоского шару

(методи пластини), метод циліндричного шару (методи труби або циліндра), а також метод кульового шару (метод кулі).

При реалізації методів плоского шару [2, 8] досліджуваному зразку надається форма пластини, відношення товщини якої діаметру рекомендується вибирати з діапазону 1/10...1/7. На зовнішніх поверхнях зразка створюється перепад температури. Бічна поверхня зразка захищається від втрат тепла у довкілля. Вимірювання теплопровідності здійснюється при тепловому режимі, коли витрата потужності від нагрівача відповідає відводу тепла через холодильник.

Прилади, що серійно випускаються, реалізують метод необмеженого плоского шару. Великий вплив на точність при вимірюваннях зазначеним методом мають контактні теплові опори, що виникають при контакті поверхні зразків з нагрівачами та холодильниками. Для зменшення зазначених опорів у вимірювальних пристроях використовують стискаючі пристрої, при можливості здійснюють якісну обробку поверхні зразків.

Однак безпосереднє застосування наявних стаціонарних методів пластини для дослідження комплексу ТФВ регенеративних продуктів та поглиначів важко. Це пояснюється тим, що досліджувані зразки не захищені від контакту з навколишньою атмосферою, методи не придатні для вимірювання ТФВ насипного шару озерненого продукту.

При використанні методів циліндричного та кульового шару досліджуваному матеріалу надається циліндрична та кульова форми відповідно. У разі циліндричного зразка через його стінку перпендикулярно до осі направляється тепловий потік. Причому досліджувані зразки можуть нагріватися як із внутрішньої сторони, так і зовнішньої. При обох способах обігріву нагрівач повинен створювати тепловий потік, рівномірно розподілений по всій довжині зразка. Для захисту від торцевих втрат тепла у приладах такого типу встановлюють екрани із теплової ізоляції або використовують екранні нагрівачі.

При практичній реалізації методів циліндричного шару необхідно вирішити проблему надійного центрування осевого нагрівача, яка потрібна для створення рівномірного обігріву внутрішньої поверхні зразка, а також компенсації подовження, що виникає внаслідок термічного розширення нагрівача. Методи циліндричного шару можуть бути використані для дослідження

теплопровідності насипного шару озерненого регенеративного продукту при відповідній їх адаптації до умов досвіду та агресивних властивостей досліджуваного матеріалу.

На відміну від розглянутих раніше методів плоского та циліндричного шару, методи кульового шару дозволяють отримати одновимірний тепловий потік без застосування екранних нагрівачів або теплоізоляції. Прикладом реалізації методу кульового шару може бути прилад для дослідження сипких ізоляційних матеріалів, що складається з двох мідних куль [4, 7]. Зовнішня куля підвішена за допомогою двох кернів. У середині цієї кулі за допомогою опори центрована інша куля. Міжкульовий простір заповнюється матеріалом, що досліджується. У внутрішній кулі розташовується електричний нагрівач.

Кульовий прилад відрізняється складністю рівномірного заповнення простору між двома порожнистими концентричними поверхнями досліджуваною речовиною, що вимагає суворого центрування куль.

Слід зазначити, що в порівнянні з методами пластини стаціонарні методи циліндричного та кульового шару не знайшли масового застосування в теплофізичних вимірах. Практична реалізація цих методів обмежена розробкою окремих вимірювальних установок.

При дослідженні теплових параметрів методами нестаціонарного теплового режиму користуються [1, 4] рішеннями нестаціонарного диференціального рівняння:

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right), \quad (2)$$

$$\tau > 0, R_1 < r < R_2$$

Зазвичай такі рішення отримують для тіл простої геометричної форми та заданих початкових та граничних умов, наприклад, виду:

$$T(r, 0) = T_0 = \text{const},$$

$$\lambda \frac{\partial T(R_1)}{\partial R} = q(\tau), T(R_2, \tau) = T_2(\tau), \quad (3)$$

де τ – час; T_0 – початкове значення температури зразка; $q(\tau)$, $T_2(\tau)$ – функції, що визначають закономірності зміни теплового потоку і температури на межі поверхонь зразка з координатами $r = R_1$ і $r = R_2$; a – теплопровідність зразка.

Дослідження ТФВ здійснюється при нагріванні чи охолодженні зразка або його частини. Нагрів можна вести безперервно або періодичною подачею тепла до тіла [4, 5].

Процеси теплоперенесення на початковій стадії найбільш складні для математичного моделювання, що обмежує сферу застосування початкової стадії теплообміну в практичних цілях. Для методів, що ґрунтуються на початковій стадії нестаціонарного процесу теплоперенесення, характерна сильна залежність результатів вимірювання від завдання конкретних початкових умов.

Нестаціонарні режими, на відміну стаціонарних, відрізняються меншими витратами часу на виміри. Відомо багато способів вимірювання температуропровідності, тепловіддачі та теплопровідності матеріалів, які різняться між собою точністю результатів вимірювання, простотою проведення експерименту, автоматизацією процесу вимірювання та обробки отриманих даних, тривалістю вимірювань тощо.

У теплофізиці відомо три види теплових режимів. Якщо нагрівання (охолодження) тіла здійснюється в умовах постійної температури середовища та постійного коефіцієнта тепловіддачі, такий режим нагрівання (охолодження) носить назву регулярного режиму першого роду.

При зміні температури середовища за лінійним законом, температура будь-якої точки тіла також змінюється за лінійним законом. Цей режим зміни температури називається регулярного режиму другого роду або квазістаціонарного теплового режиму.

Якщо температура середовища змінюється за періодичним законом щодо середнього постійного значення, настає регулярний режим третього роду.

Нестаціонарні методи дозволяють уникнути вимірювання теплових потоків, надзвичайно скрутного за високих температур. Вони дають більші можливості у виборі джерела тепла, ніж стаціонарні, часто не вимагають попереднього термостатування зразків. Ці способи може бути динамічними, тобто, в процесі експерименту можна отримати залежність теплових характеристик речовин від температури широкому діапазоні зміни температур. Перелічені переваги роблять нестаціонарні методи привабливими для розробників вимірювальних пристроїв, що виражається у великій кількості робіт, опублікованих останніми роками.

Найбільш прийнятним методом для визначення температуропровідності, що відповідає кон-

кретним умовам їхньої теплової обробки, є метод, заснований на квазістаціонарному режимі нагрівання зразка. Сутність його здійснення впливає з рішення диференціального рівняння теплопровідності за умови сталості швидкості нагрівання та наявності різниці температур перетину тіла в початковий момент часу.

Методики та прилади, засновані на квазістаціонарному тепловому режимі, є найбільш перспективними, оскільки характеризуються простою експерименту та розрахункових співвідношень.

У разі залежності властивостей матеріалу від температури регулярний режим досягають лише за сталості температурного перепаду у зразку [3], а здійснення його нагріву (у контрольних точках) значно складніше, ніж за постійної швидкості зміни температури на поверхні зразка.

Крім того, нагрівання такого роду (з постійним перепадом температур) було б дещо штучним і погано відповідало дійсному процесу випалювання матеріалів у теплових установках.

З відомих нестационарних методів вимірювання теплофізичних властивостей матеріалів найкращим є метод вимірювання в регулярному режимі при зміні температури поверхні зразка з постійною швидкістю (хоча б у невеликому інтервалі часу).

Загалом із аналізу існуючих моделей, що пов'язують параметри теплоперенесення в гетерогенних матеріалах з їх пористістю, можна зробити висновок, що універсальної моделі, що описує взаємозв'язок між теплопровідністю та пористістю, нині не створено. При виборі моделі, а також при здійсненні розрахунків по ній необхідно враховувати структуру гетерогенних матеріалів, фізико-хімічні властивості їх твердої та газової фаз, розміри пор, зерен або волокон, а також безліч інших характеристик (наприклад, температуру, тиск, шорсткість частинок матеріалу). Тому вибір розрахункових методів, виправданий лише у випадках, коли існує впевненість у адекватності математичної моделі, використовуваної до розрахунку. В інших випадках доцільніше використовувати експериментальні методи.

3. Експериментальне визначення коефіцієнту температуропровідності сипкого матеріалу методом регулярного режиму першого роду

Для визначення коефіцієнта температуропро-

відності було обрано метод, який дозволяє вимірювати його значення в нерівномірних зонах, спричинених поглинанням або виділенням зразком кількості тепла під час нагрівання (охолодження).

Для технічної реалізації методів регулярного режиму першого роду розроблено декілька пристроїв [1-5, 8], що відрізняються використанням зразків різної форми, додатковим використанням зразків порівняння. Класичними методами вважаються методи а-калориметра, лямбда-калориметра, бікалориметра [4, 5].

Якщо калориметр розміщено в середі з постійною температурою, то зміна його температури в часі включає всі три стадії: початкову іррегулярну, регулярну і стаціонарну. За відсутності у калориметрі джерел теплоти стаціонарна стадія не може бути корисно використана, оскільки ця стадія відповідає повному вирівнюванню температури в об'ємі тіла. За наявності джерел теплоти за тих самих умов розрахунок ТФВ може бути виконаний на будь-якій ділянці температурної кривої.

Характерною особливістю регулярного теплового режиму є сталий темп охолодження m для всіх точок тіла та його незалежність від початкового температурного розподілу.

Метод визначення коефіцієнта температуропровідності твердого тіла, в даному випадку – сипкого палива, розміщеного в а-калориметрі, складається із охолодження його у середовищі з постійною температурою при цьому повинна виконуватись умова: коефіцієнт тепловіддачі $\alpha \rightarrow \infty$, що відповідає критерію Біо:

$$Bi = \frac{\alpha l}{\lambda} \rightarrow \infty \quad (4)$$

Остання обставина забезпечує рівність температур рідини і а-калориметра на його межах, що може бути реалізоване при охолодженні а-калориметра у воді.

За цих умов теплообміну, згідно другої теореми Кондратьєва, темп охолодження стає прямопропорційним коефіцієнту температуропровідності тіла a :

$$a = k \cdot m_{\infty} \quad (5)$$

де k – коефіцієнт форми а-калориметру; m – темп охолодження.

А-калориметр є циліндровим тонкостінним ме-

талевим стаканом, виготовленим з металу з високим коефіцієнтом теплопровідності (алюміній), наповненим досліджуваним сипким матеріалом і що має диференційну мідь-константову термопару.

Для циліндрового а-калориметру коефіцієнт форми має вид:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{2,405}{R_{вн}}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l_{вн}}\right)^2} \quad (6)$$

де $R_{вн}$ – внутрішній діаметр а-калориметру, м; $l_{вн}$ – внутрішня висота а-калориметру, м.

Для складених тіл (оболонка – сипкий матеріал), як в разі використання а-калориметра, коефіцієнт температуропровідності визначається з врахуванням поправки на оболонку:

$$a_{розр} = a \left(1 + 2 \frac{\delta}{R_{зов}} \frac{\lambda_m}{\lambda_{обол}}\right) \quad (7)$$

де λ_m – коефіцієнт теплопровідності сипкого матеріалу, Вт/мК; $\lambda_{обол}$ – коефіцієнт теплопровідності оболонки, Вт/мК; δ – товщина циліндрової стінки а-калориметра, м; $R_{зов}$ – зовнішній радіус а-калориметра, м.

Виготовлення а-калориметра у вигляді закритого стакана дозволяє уникнути проникнення вологи всередину досліджуваного матеріалу і найзручніше при дослідженні сипких матеріалів. Похибка вимірів не перевищує 2...4 %. Схема експериментальної установки представлена на рис. 1.

У досліді реалізується процес охолодження сипкого палива у стадії регулярного режиму. Його засипали в а-калориметр і нагрівали в сушильній шафі до температури 70 ... 80 °С. Після цього його переносили і закріплювали в штативі. Потім поміщали у центр а-калориметра гарячий спай диференційної термопару (мідь-константан або хромель-копель), а холодний спай у воду термостата, опускали калориметр в термостат і підключали термопару до вимірювального приладу (мілівольтметра).

Для виконання умов теплообміну $\alpha \rightarrow \infty$ у водяному термостаті вмикали електромішалку 5 і вібратор 6. Вимір термоЕРС диференційної термопару проводили кожні 15 секунд. Надлишкову

температуру θ визначали за термоЕРС мідь-константової термопару.

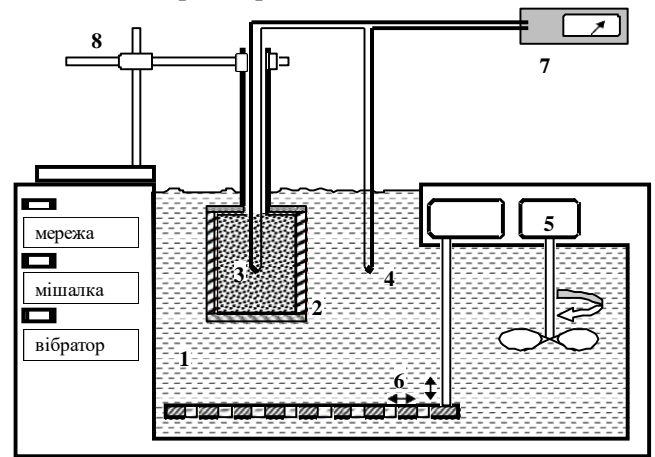


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для визначення коефіцієнта температуропровідності сипких тіл: 1 – термостат з водою; 2 – а-калориметр; 3 – гарячий спай термопару; 4 – холодний спай термопару; 5 – електромішалка; 6 – вібратор; 7 – мілівольтметр; 8 – штатив

Для визначення темпу охолодження m експериментальним шляхом проводили виміри надлишкової температури тіла в часі в процесі його охолодження. За отриманими даними будували графік, $\ln\theta = f(\tau)$ в якому m є кутовим коефіцієнтом лінійної ділянки, що характеризує регулярний режим. Темп охолодження можна визначити за формулою:

$$m = \frac{\ln \theta_1 - \ln \theta_2}{\tau_2 - \tau_1} \quad (8)$$

Пряму лінію на графіку проводили за методом найменших квадратів так, щоб сума квадратів відхилень експериментальних значень від апроксимуючої прямолінійної функції була мінімальна. Чисельне значення темпу охолодження m визначали при обробці в координатах $\ln\theta - \tau$ за обраними на лінійній ділянці залежності точками. Темп охолодження розраховували за формулою (8) і коефіцієнт температуропровідності за формулою (7).

Об'єктами дослідження були відходи зернопереробних виробництв різного ступеня подрібнення, а саме лушпиння соняшника, лузга гречки, лузга ячмінна, лузга спельти.

Лушпиння соняшника являє собою чорно-білі оболонки насіння соняшнику, які отримують під час лушення при підготовці його до виділення олії.

Сухе лушпиння соняшника швидко запалюється, добре газифікується, стійко горить і може бути використане у якості палива. Основною причиною, яка стримує використання лушпиння соняшника в якості палива, є утворення відкладень золи на поверхнях нагріву котла.

Лузга гречки, лузга ячмінна – це відходи лушпиння гречки і ячменю, які являють собою безліч незв'язаних між собою окремих елементів. Кожен елемент має стійку структуру і складається з поодиноких, здвоєних або прибудованих пелюсток, що представляють собою досить жорстку еластичну структуру.

У складі лушпиння і лузги міститься лігнін, який є природним полімером і при тепловій обробці діє як природна зв'язувальна речовина. Але його кількість невелика, за виключенням лузги гречки. Лігнін проявляє пластичні властивості при підвищеній температурі та тиску, особливо при підвищеній вологості.

Методика обробки результатів експериментів передбачала попередню оцінку розмірів часток досліджувальних зразків, що покладено у одному з підходів до моделювання гетерогенної системи. Цей підхід заснований на використанні законів механіки твердого тіла. Сипке середовище моделюється кінцевим числом частиць, які взаємодіють між собою. Вони, як правило, є абсолютно твердими тілами.

Першим наближенням такого середовища є система твердих сферичних тіл у просторі. Контакт між тілами виникає при перетині кордонів тіл і призводить до виникнення сил контактної взаємодії. Цей метод враховує геометрію часток і їх взаємодію.

Результати експериментального визначення коефіцієнту теплопровідності представлені у таблиці.

Відповідно до класу точності вимірювального приладу, були прийняті наступні значення абсолютних похибок: при визначенні маси калориметрів та сипкого матеріалу на вагах ВЛА-200 – усереднена наведена похибка зважування $\Theta_1 = 5 \cdot 10^{-4}$ г.

Похибка вимірювання температури визначалась градуальною похибкою мідь-константанові термопари і невиключення залишків систематичних погрешностей (НЗСП) вимірювання температури.

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

$$\delta = \pm 1,1 \sqrt{\delta_d + 4(\delta_n)^2 + 8(\delta_{e_i})^2 + 7(\delta_{A_{i-j}})^2} \quad (9)$$

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

Таблиця – Експериментальні значення коефіцієнтів теплопровідності сипкого матеріалу

Тип зразка	Розмір частин, мм	Коефіцієнт теплопровідності, $a \cdot 10^7$, м ² /с	δ_a , %
Лушпиння соняшника	1,45	2,70	2,81
Лузга гречки	1,35	4,72	3,28
Лузга ячмінна	1,30	4,38	2,74
Лузга спельти	1,25	3,75	2,19

Зі зростанням розміру зерен слід очікувати зменшення ролі термічного опору поверхнями розділу і вирішального впливу термічного опору за сипки, обумовленого пористістю та властивостями речовини.

4. Висновки

Створено експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності сипкого матеріалу.

Застосований метод а-калориметру – найзручніший для визначення коефіцієнта теплопровідності гетерогенних матеріалів.

Проведено серію експериментів по визначенню коефіцієнту теплопровідності насипної біомаси методом регулярного режиму першого роду.

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

Виконано аналіз похибок експериментальних даних. Межі невиключення систематичної похибки визначалися шляхом побудови композицій з невиключених систематичних похибок застосовуваних засобів вимірювань.

Особистий внесок авторів CRediТ

Волчок В.О.: перевірка, планування експерименту, створення експериментальної установки, дослідження, аналіз результатів. **Нікітін Д.М.:** методичне забезпечення, формальний аналіз, огляд та редагування.

Література

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **Чирка Т.В., Васильченко Г.М., Панов Є.Н.** Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів: монографія. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016. – 152 с.
 5. **Volchok V.** Determination of the temperature conductivity coefficient of bulk biofuels // *Proceedings of the V International Scientific-Technical Conference «Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering»*, Kielce University of Technology, Poland. – 2021. – P. 132.
 6. **Bison P., Marinetti S., Mazzoldi A., Grinzato E., Bressan C.** Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods // *Infrared Physics & Technology*. – 2002. – Vol. 43. – P. 127-132.
 7. **Laskar J., Bagavathiappan S., Sardar M., Jayakumar T., John P., Baldev R.** Measurement of thermal diffusivity of solids using infrared thermography // *Materials Letters*. – 2008. – Vol. 62. – P. 2740-2742.
 8. **Monde M., Kosaka M., Mitsutake Y.** Simple measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity using inverse solution for one-dimensional heat conduction // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2010. – Vol. 53. – No. 23-24. – P. 5343-5349.

Отримана в редакції 29.10.2024, прийнята до друку 28.11.2024

Experimental determination of the coefficient of thermal diffusivity of a heterogeneous system

Victor Volchok¹, **Dmitry Nikitin²**

¹⁻²Odesa 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<http://orcid.org/0009-0000-9144-1810>

The work presents the results of the experimental determination of the coefficient of thermal diffusivity of bulk materials, which may subsequently undergo compression. Methods of determining thermophysical properties of materials are considered. The most common are the methods that allow in one experiment to establish the maximum amount of information about the thermophysical properties of the material under study. A description of one of the methods for determining the coefficient of thermal diffusivity is given. To determine the coefficient of thermal diffusivity, a method was chosen that allows measuring its values in an irregular mode caused by the absorption or release of a significant amount of heat in the samples during heating. An installation was developed for the experimental determination of the coefficient of thermal diffusivity of a heterogeneous system based on loose biofuel. The scheme of the experimental setup for determining the coefficient of thermal diffusivity is given. The main element of the installation is an a-calorimeter made of metal with a high coefficient of thermal conductivity in the form of a thin-walled cylindrical glass. The glass was filled with test loose material without compaction and heated in a drying cabinet, then cooling was carried out in an environment with a constant temperature. As the object of the study, the waste of grain processing industries of various degrees of grinding, namely sunflower husk, buckwheat husk, barley husk, spelled husk, was chosen. The temperature of the loose material in the middle of the a-calorimeter was determined using a copper-constantan differential thermocouple. Making the

α -calorimeter in the form of a closed glass made it possible to avoid the penetration of moisture into the studied material and is most convenient when studying loose materials. The parameters of the α -calorimeter are given. It is shown that the α -calorimeter method is the most convenient for studying heterogeneous materials. The results of experimental studies of the coefficient of thermal diffusivity for loose bodies of plant origin are presented. The deviation of the determination of the coefficient of thermal diffusivity of the loose material was evaluated. It was established that the main contribution to the total error is made by its random component.

Keywords: Loose material; Experiment; Thermal diffusivity

References

1. **Alaili, K., Ordonez-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, 145103.
2. **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.
3. **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.
4. **Chirka, T.V., Vasylenko, G.M., Panov, E.N.** (2016) Physical properties of carbon bulk materials: monograph. Kyiv: NTUU "KPI", 152.
5. **Volchok, V.** (2021) Determination of the temperature conductivity coefficient of bulk biofuels. *Proceedings of the V International Scientific-Technical Conference «Actual problems of renewable power engineering, construction and environmental engineering»*, Kielce University of Technology, Poland, 132.
6. **Bison, P., Marinetti, S., Mazzoldi, A., Grinzato, E., Bressan, C.** (2002) Cross-comparison of thermal diffusivity measurements by thermal methods. *Infrared Physics & Technology*, 43, 127-132.
7. **Laskar, J., Bagavathiappan, S., Sardar, M., Jayakumar, T., John, P., Baldev, R.** (2008) Measurement of thermal diffusivity of solids using infrared thermography. *Materials Letters*, 62, 2740-2742.
8. **Monde, M., Kosaka, M., Mitsutake, Y.** (2010) Simple measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity using inverse solution for one-dimensional heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 23-24, 5343-5349.

Received 29 October 2024

Approved 28 November 2024

Available in Internet 30 December 2024