
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

З. А. БУРОВА,

*кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-4712-6298>

E-mail: z_burova@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України

С. О. ІВАНОВ,

*кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу
моніторингу та оптимізації теплофізичних процесів*

<https://orcid.org/0000-0002-2722-7323>

E-mail: IvanovSO@nas.gov.ua

Інститут технічної теплофізики НАН України

Т. О. РОМАН,

асистент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції

<https://orcid.org/0000-0001-9149-2829>

E-mail: tatyana.roman@cb.ua

Національний університет харчових технологій

В. П. ВАСИЛІВ,

*кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-2109-0522>

E-mail: vasiliv-vp@ukr.net

М. М. ЖЕПЛІНСЬКА,

*кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-7286-3003>

E-mail: jeplinska@ukr.net

М. М. МУШТРУК,

*кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-3646-1226>

E-mail: mixej.1984@ukr.net

І. П. ПАЛАМАРЧУК,

*доктор технічних наук, професор, кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-0441-6586>

E-mail: vibroprocessing@gmail.com

В. В. САРАНА,

*кандидат технічних наук, доцент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0002-5102-2264>

E-mail: saranavv@ukr.net

М. М. ГУДЗЕНКО

*кандидат технічних наук, асистент кафедри процесів і обладнання
переробки продукції АПК*

<https://orcid.org/0000-0001-7959-3627>

E-mail: gudzenkomax@ukr.net

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Анотація. Здорове харчування є одним з найважливіших елементів збереження здоров'я та зміцнення імунітету нації, неодмінною умовою досягнення активного довголіття нинішніх та майбутніх поколінь. Винайдення нових інгредієнтів та створення харчових продуктів на їхній основі, розробка нових та вдосконалених наявних технологій потребує достовірної інформації про основні теплофізичні характеристики сировини та матеріалів біологічного походження для розрахунку й оптимізації тепломасообмінних процесів переробки і виробництва.

Сучасна наука пропонує широке коло досліджень параметрів термодинамічних та масообмінних процесів, визначень теплофізичних характеристик новітніх речовин та продуктів із застосуванням метрологічно атестованих приладів та інформаційно-вимірювальних систем. Основною проблемою під час дослідження матеріалів біологічного походження є їхня негомогенність та неоднорідність структури зразків.

Визначення коефіцієнта ефективної теплопровідності сипких матеріалів та круп доцільно проводити в стаціонарному тепловому режимі на приладі для визначення теплофізичних характеристик матеріалів і теплових ефектів, у якому реалізована симетрична схема теплометричного методу вимірювань із застосуванням сенсорів теплового потоку та температури. Використання чотирьох вимірювальних комірок дає можливість проводити синхронний порівняльний аналіз декількох зразків, а поворотно-притискний механізм сприяє мінімізації контактних опорів. Розроблена методика вимірювань коефіцієнта ефективної теплопровідності враховує особливості сипких харчових продуктів та значно підвищує точність дослідження їхньої теплопровідності через введення поправки на контактний опір пристінного шару. Можливість проведення довготривалих спостережень дає можливість досліджувати термолабільні матеріали, аналізувати теплові ефекти в зразках, оцінювати об'ємне та інтегральне тепловиділення.

Калориметричні дослідження широкої гами біологічних матеріалів та речовин із достатньою точністю можна проводити на системі STA, у якій реалізовано методи покрокового сканування та синхронного теплового аналізу для визначення питомої теплоємності та теплотипаровування, дослідження співвідношення вільної та зв'язаної вологи в негомогенних матеріалах. Ці характеристики є невід'ємними параметрами під час дослідження кінетики тепломасообмінних процесів, зокрема сушіння, для розрахунку і проектування технологічного обладнання.

Дослідження теплофізичних характеристик негетерогенних матеріалів та речовин дадуть змогу оптимізувати виробничі процеси та надалі розвивати технології харчової, біотехнологічної та переробної галузі.

Ключові слова: неоднорідні матеріали, коефіцієнт ефективної теплопровідності, тепловиділення, питома теплоємність, теплота випаровування, сушіння

Актуальність.

Головне завдання харчової промисловості – перероблення сільськогосподарської продукції в якісні харчові продукти. Воно має здійснюватися з найменшими фінансовими й матеріальними витратами, що неможливо без використання досягнень сучасної науки. Наука є базою сучасних технологій. Будь-яка технологія – це сукупність процесів, за допомогою яких сировина перетворюється в кінцевий продукт. Глибоке знання закономірностей процесів, що здійснюються під час вироблення харчових продуктів, дає змогу інтенсифікувати процеси, створювати апарати нових типів, розробляти методи оптимального керування процесами.

Велика частка процесів харчових, біотехнологічних та переробних виробництв належить до теплових, швидкість яких описується законами теплопередачі (нагрівання, охолодження, конденсація), та масообмінних – дифузійних, які характеризуються перенесенням одного або декількох компонентів початкової речовини з однієї фази в іншу (сушіння, сорбція, ректифікація та ін.). Найчастіше ці процеси взаємопов'язані та відбуваються одночасно. Вивченню законів тепло- і масопередачі присвячено багато праць вітчизняних та зарубіжних науковців.

Але будь-який подібний розрахунок неможливий без знання основних

теплофізичних характеристик матеріалів і речовин, до яких відносяться зокрема коефіцієнти тепло- і теплопровідності, питома теплоємність та теплота випаровування, а також їхніх температурних залежностей. Зазвичай такі дані беруть із довідкової літератури, і донедавна фахівці харчової й переробної галузей користувалися відомими довідниками (Chubik & Maslov, 1970; Ginzburg et al., 1980). У наш час опубліковані сучасні видання (Fedorov et al., 2014; Zheplinska & Vasylyv, 2021), що містять основні теплофізичні характеристики напівфабрикатів та продуктів, необхідних для проведення розрахунків процесів та обладнання для харчової промисловості. Крім табличних даних, теплофізичні показники багатьох продуктів, особливо сипких та негетерогенних, представлені у вигляді емпіричних залежностей. Це дає змогу проводити технологічні та інженерні розрахунки з певною точністю, яка наразі є недостатньою для наукових досліджень.

Винайдення нових інгредієнтів, створення харчових продуктів на їхній основі та розробка технологічних процесів їхнього виготовлення потребують оновлення наявної бази теплофізичних характеристик. Це вимагає додаткових досліджень на сучасній приладовій базі. Імпортні прилади можуть задовольнити всі вимоги до точності та відтворюваності результатів вимірювань, але головною проблемою їхнього використання є необ-

хідність періодичного калібрування для забезпечення належних метрологічних показників.

Профільним науковим Інститутом технічної теплофізики (ІТТФ) НАН України накопичено більш ніж півсторічний досвід визначення основних фізичних параметрів термодинамічних і масообмінних процесів у різних галузях народного господарства. Досягнення теплотерії, електроніки та метрології теплових процесів вимірювань втілені в приладах та системах для прецизійних вимірювань теплопровідності та теплоємності матеріалів і речовин, дослідження енергетичних ефектів у фізико-хімічних та біологічних процесах харчової та переробної промисловості.

Аналіз досліджень.

Труднощі одержання якісної та адекватної інформації щодо теплофізичних характеристик речовин біологічного походження зазвичай пов'язані з їхньою неомогенністю та неоднорідністю структури. Наприклад, сипкі харчові матеріали – зернові й крупні як об'єкти дослідження володіють специфічними фізичними характеристиками: сипкістю, самосортуванням і шпаруватістю. Механізація й автоматизація процесів обробки зерна в потоці (Datsishin et al., 2008), застосування пневматичного та вібротранспорту, впровадження нових способів сушіння (Palamarchuk et al., 2017), потребує визначень їхніх тепло-, температуро- і термовологопровідності, теплоємності, здатності до самозігрівання (Mushtruk et al., 2020; Palamarchuk et al., 2020).

Величезну роль водночас мають термодинамічні параметри повітря, яке є невід'ємною частиною зернової

маси і впливає на всі процеси, що з нею відбуваються. Зокрема, повітряні проміжки сприяють передачі теплоти конвекцією й переміщенню вологи у вигляді пари. Унаслідок самосортування шпаруватість зернової маси, тобто наявність проміжків між її твердими частками, заповнених повітрям, може бути нерівномірною. Шпаруватість і насипна щільність зерна також залежать від форми, пружності, розмірів і стану поверхні твердих компонентів. Ці чинники в сукупності призводять до варіативності величини контактної опору між частинками матеріалу й мають бути враховані під час розробки методології вимірювань, адже можуть відчутно спотворити результати досліджень теплофізичних характеристик.

Як відомо, для розрахунку термодинамічних характеристик речовин, хімічних рівноваг, встановлення зв'язку між термодинамічними характеристиками речовини та її властивостями й будовою, а також для складання теплових балансів технологічних процесів у харчовій, біотехнологічній та фармацевтичній галузях застосовують калориметричні дослідження (Sarge et al., 2014). Для одержання достовірної калориметричної інформації про матеріал під час його лінійного чи ступеневого нагрівання або охолодження використовують диференціальну сканувальну калориметрію (DSC). DSC також застосовують для визначення точки плавлення й оцінки ступеня чистоти речовин, вивчення кінетики процесів сушіння, ліофілізації та кристалізації, для дослідження стабільності та термічного розкладання речовин і визначення строків їхньої придатності, для визначення температури склування аморфних речовин тощо

(Elkordy et al., 2013). DSC у поєднанні з термогравіметричним аналізом (TGA) складає метод синхронного теплового аналізу матеріалів та речовин (STA).

Наразі існує широкий модельний ряд закордонних приладів для синхронного теплового аналізу, принцип дії яких ґрунтується на одночасному визначенні зменшення маси й кількості теплоти, що витрачається на випаровування рідини. Універсальність та широкий температурний діапазон є їхніми безперечними перевагами. Проте більшість із них мало пристосовані для дослідження зразків рослинного походження, рідина в яких є сумішшю води й численних складних речовин (сахаридів, органічних кислот, рослинних пігментів, колоїдних розчинів пектинів, ефірномасляних кислот, альдегідів, спиртів, терпенових речовин тощо). Ще одним негативним чинником є те, що розмір тиглів сучасних приладів розрахований на вагу порядку міліграма, який дуже малий і не є інформативним для рослин через розмір їхніх клітин.

Аналітичне визначення питомої теплоти випаровування рослинної сировини також пов'язане зі значними труднощами, а часто практично неможливо, оскільки потрібно обчислити одночасно характеристики суміші декількох рідин і що входять до складу нерозчинних речовин (Atamanyuk & Gumnitsky, 2013). Це є особливо важливим під час розрахунків та оптимізації параметрів процесу сушіння будь-якої сировини рослинного походження, який пов'язаний із відведенням вологи, вільної та зв'язаної (Kolyanovska et al., 2019). Набагато більш доцільним для цієї мети є експериментальний метод синхронного теплового аналізу.

Метою дослідження є розробка методики вимірювання коефіцієнта ефективної теплопровідності сипких харчових продуктів, зокрема, зернових та круп, та дослідження питомої теплоємності та теплоти випаровування вологи в процесі сушіння біологічної сировини.

Матеріали і методи дослідження теплопровідності.

Для визначення теплофізичних характеристик сипких матеріалів відомі різні експериментальні методи, у т.ч. стаціонарного й нестаціонарного теплового потоку – зондові й безконтактні – оптичні (Тур, Р. Р., 1969; Maglich et al., 1984). Наявність повітря між частинками сипких матеріалів дає можливість передбачити, що їхня теплопровідність співрозмірна з теплопровідністю теплоізоляційних матеріалів, отже, до них може бути застосовна методика дослідження коефіцієнта теплопровідності, регламентована в ISO 8301-1991.

Суть теплотричного методу, що регламентується в ISO 8301, полягає в створенні стаціонарного теплового потоку крізь плоский зразок, направлено перпендикулярно до його лицьових (найбільшим) поверхонь. Коефіцієнт теплопровідності визначається за результатами вимірювань товщини зразка, різниці значень температури його робочих поверхонь і поверхневої густини теплового потоку, що пройшов крізь зразок, за умови його односпрямованості та рівномірності.

Дослідження проводяться в стаціонарному тепловому режимі на приладі для визначення теплофізичних характеристик матеріалів і теплових ефектів, розробленого в ІТТФ НАН України, у якому реалізована симе-

трична схема теплотричного методу (Dekusha, O. et al., 2020). Прилад, зовнішній вигляд якого представлено на рис. 1, є інформаційно-вимірювальною системою, що складається з функціонально об'єднаних теплового блоку 1, конструкція якого показана на рис. 2, електронного блоку 2 з вбудованим пристроєм термостатування опорних спайв термопар і комп'ютера зі спеціалізованим програмним забезпеченням 3.

Основні технічні характеристики приладу:

- діапазон вимірюваної густини теплового потоку 5...500 Вт/м²;
- границі допустимої основної відносної похибки $\pm 3\%$;
- діапазон значень робочої температури мінус 40 °С...180 °С ;
- розмір зразка:
 - 1 зразок 250×250×(10...120) мм;
 - 4 зразки Ø100×(10...50) мм.

Характерною конструктивною особливістю цього приладу є наявність поворотного механізму, що дає можливість встановлювати тепловий блок у робоче положення під кутом 90°, як

це показано на рисунку 1. Це дає можливість забезпечити необхідну точність вимірювання теплового потоку й температури зразків під час дослідів. У зібраному стані між верхнім і нижнім блоками термостатування утворюється чотири (поз. 8 рис. 2) або одна (поз. 9 рис. 2) вимірювальна комірка, призначена для розміщення зразків дослідного матеріалу й забезпечення необхідних теплових і температурних режимів. Використання чотирьох вимірювальних комірок дає можливість проводити синхронний порівняльний аналіз одразу чотирьох зразків.

Блоки термостатування 1 зі встановленою між ними вкладкою 3 і дослідними зразками розміщені в поворотному-притисковому пристрої 4, який є рамною конструкцією на направляючих стійках 5 і призначений для фіксації зразків і мінімізації контактних опорів між ними й теплотричними блоками у вимірювальних комірках. Зусилля задається за допомогою гвинтового механізму із силовою пружиною. Конструкцію повертають на кут 90° і встановлюють у

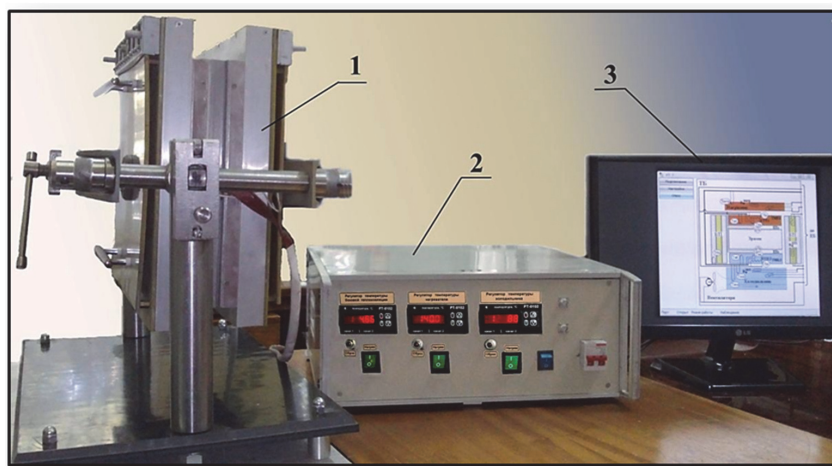


Рис. 1. Зовнішній вигляд приладу (робоче положення): 1 – тепловий блок, 2 – електронний блок, 3 – програмне забезпечення

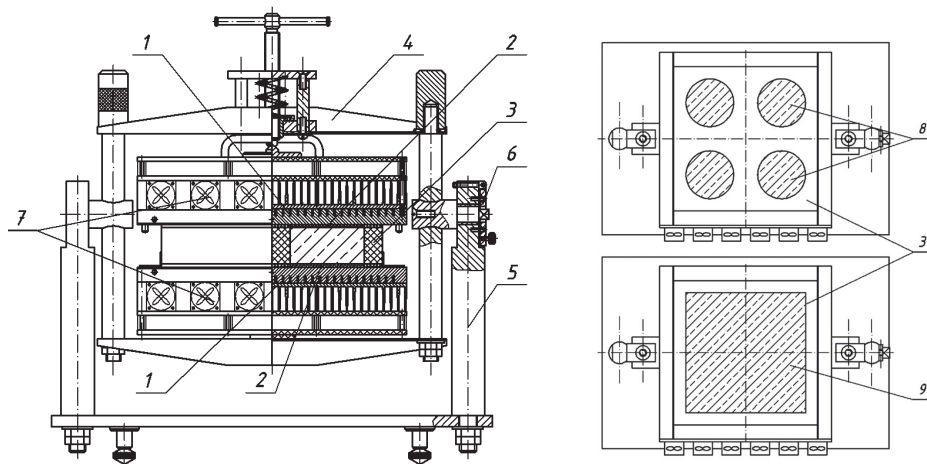


Рис. 2. Схема теплового блоку приладу: 1 – блоки термостатування, 2 – теплотиметричні блоки, 3 – теплоізоляційна вкладка, 4 – поворотно-притискний пристрій, 5 – напрямні стійки, 6 – фіксатор, 7 – блоки вентиляторів, 8, 9 – вимірювальні комірки

робоче положення (вертикальне, рис. 1), закріплюючи фіксатором 6.

Програмне забезпечення приладу розраховане на тривалу (від декількох годинників до декількох діб) індикацію й запис значень температури й густини теплового потоку в зразку для подальшої обробки й аналізу теплових процесів, обчислення теплового опору та коефіцієнта ефективної теплопровідності зразків силкових матеріалів.

Розрахункова формула коефіцієнта теплопровідності λ , Вт/(м·К), має вигляд:

$$\lambda = h \cdot (\Delta T / \bar{q} - R_K)^{-1}, \quad (1)$$

де: h – товщина дослідного зразка, що дорівнює товщині теплоізоляційної вкладки, м; ΔT – різниця значень температури T_B и T_H , відповідно, верхньої й нижньої робочих поверхонь зразка, К; $\bar{q}$ – середнє значення густини теплового потоку, Вт/м², що проходить, відповідно, крізь верхню q_B та нижню q_H робочі поверхні зразка; R_K – поправка на сумарний контактний тепловий опір вимірю-

вальної комірки, яке визначають при калібруванні приладу, м·К/Вт.

Значення коефіцієнта теплопровідності зразків дослідного матеріалу визначають як середнє значення з урахуванням похибки вимірювань за формулою:

$$\bar{\lambda}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_{T,i} + \delta, \quad (2)$$

де: $\bar{\lambda}_T$ – середнє значення коефіцієнта теплопровідності за значення температури T ; $\lambda_{T,i}$ – значення коефіцієнта теплопровідності i -го зразка за температури T ; N – кількість зразків; δ – похибка вимірювань.

Результати досліджень зразків зернової маси в діапазоні значень середньої температури від 35 до 70 °С представлені на рисунку 3.

Зразки 1 – 4 досліджувались одночасно в комірках Ø100 мм, а зразок 5 – у рамці 250×250 мм. Насипна щільність усіх зразків перебувала у межах ± 3 %. Як бачимо, усереднений графік для чотирьох зразків добре корелюється з результатами, отриманими для зразка 5.

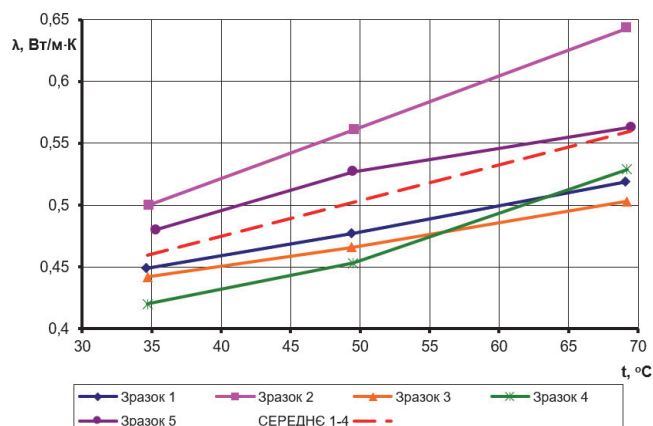


Рис. 3. Результати дослідження коефіцієнта ефективної теплопровідності зернової маси

За допомогою приладу також можливе вивчення теплових ефектів, що супроводжують дослідження термолабільних матеріалів, наприклад, за наявності тепловиділення в зразках. Водночас інформаційно-вимірювальна система веде реєстрацію та обробку сигналів первинних сенсорів упродовж усього часу процесу, результатом чого є графіки зміни теплових потоків на поверхнях зразка, як це показано на рисунку 4.

Для визначення об'ємного тепловиділення використовується формула:

$$q_v = \frac{(q_2 - q_1)}{h}, \quad (3)$$

Значення інтегральних тепловиділень, кДж/м^3 , за час τ отримаємо, використовуючи формулу:

$$Q_\tau = \int_{\tau_0}^{\tau} q_v d\tau, \quad (4)$$

де τ – поточне значення часу, год, – значення часу початку тепловиділення, год.

Результати розрахунків тепловиділення зразків курячого посліду в чотирьох температурних режимах представлені на рисунку 5.

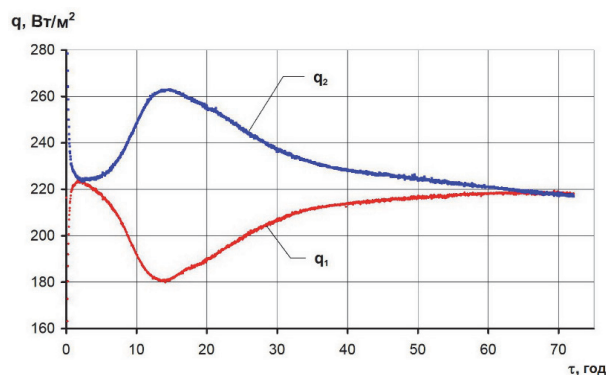


Рис. 4. Графіки зміни поверхневої густини теплового потоку на поверхнях зразка при тепловиділенні за температури 20 °C

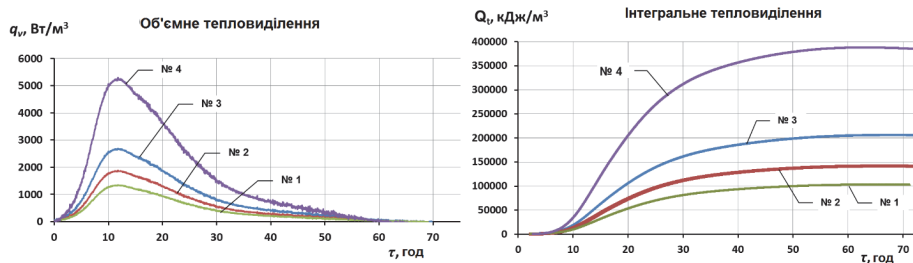


Рис. 5. Об'ємне та інтегральне тепловиділення зразків у температурних режимах: № 1 – 20 °С, № 2 – 30 °С, № 3 – 40 °С, № 4 – 50 °С

Отже, наявність обмеженого об'єму комірок дозволяє дотримуватися однакової насипної щільності матеріалу в різних дослідках, а вимірювання одночасно на чотирьох зразках дають значний виграв у часі. Порівняння експериментальних даних при різній товщині зразків дає можливість компенсувати вплив контактного опору пристінного шару на результат вимірювань теплопровідності сипкого зернового матеріалу.

Методика проведення довготривалих досліджень дозволяє вивчати теплові ефекти та зміну параметрів зразків при тепловиділенні в реальному часі, що розширює функціональні можливості приладу.

Матеріали і методи дослідження теплоємності та теплоти випаровування.

Як зазначено вище, для досліджень процесів зневоднення *рослинної сировини* доцільно використовувати метод синхронного теплового аналізу (STA), який охоплює такі методи аналізу:

- диференціальну мікрокалориметрію – вимірювання кількості енергії, що затрачується на фазовий перехід у досліджуваному зразку,

- термогравиметрію – реєстрацію зміни втрат маси зразка в часі.

Система STA розробки ІТТФ НАН України поєднує в собі калориметричний і термогравиметричний аналізи та дає можливість із достатньою надійністю визначити питому теплоту випаровування в процесі сушіння тонкого шару вологого дисперсного матеріалу та рідин у хімічній, мікробіологічній, фармацевтичній і харчовій промисловості (Ivanov et al., 2019). Зовнішній вигляд та структурна схема представлені на рисунку 6.

Система STA є інформаційно-вимірювальним комплексом функціонально об'єднаних теплового блоку, аналітичних ваг, компресора, електронного блоку й персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Основною відмінністю цієї системи від відомих аналогів є можливість проводити виміри за оптимального температурного режиму, підтримуючи температуру поверхні продукту приблизно рівній температурі динамічного середовища. Така можливість досягається завдяки тому, що калориметрична платформа має незалежне регулювання температури.

Об'єктом дослідження можуть бути як чисті рідини (вода, спирти, органічні розчинники), так і різні матеріали: харчові й рослинні продукти

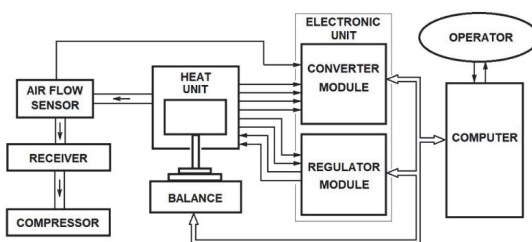


Рис.6. Зовнішній вигляд та структурна схема системи STA

(зерно, овочі, фрукти й ін.), фармацевтичні препарати, лаки, фарби тощо за визначення випаровування як вільної, так і зв'язаної з матеріалом рідини.

Основні технічні характеристики системи STA:

- діапазон значень вимірюваної питомої теплоти випаровування від 500 до 2500 Дж/г;
- границі основної допустимої відносної похибки вимірювання питомої теплоти випаровування $\pm 0,5\%$;
- діапазон значень температури від 18 до 105 °C;
- границі основної допустимої похибки виміру температури $\pm 0,5$ K;
- діапазон значень маси проби до-

сліджуваної твердої речовини від 1 до 5 грамів.

У тепловому блоці установки, схему якого представлено на рисунку 7, знаходиться робоча камера зі змінною калориметричною платформою для дослідження зразків.

Робоча камера утворена двома термостатованими блоками з вбудованими нагрівниками, що дає можливість підтримувати ізотермічний режим у робочій камері під час проведення експерименту. Калориметрична платформа встановлена на коаксіальну стійку, яка розміщена на аналітичних вагах, що використовуються для реєстрації зменшення маси вологого зразка в

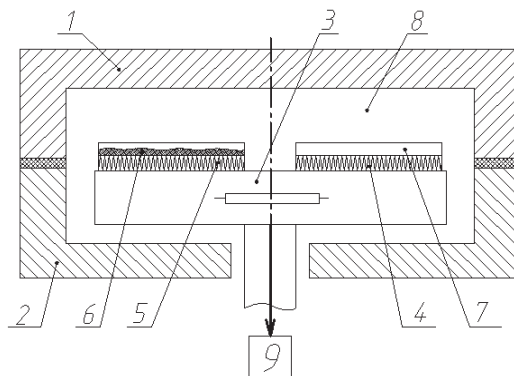


Рис. 7. Принципова схема робочої камери теплового блоку :

- 1 – верхній термостатований блок; 2 – нижній термостатований блок;
 3 – калориметрична платформа з основним електронагрівником;
 4,5 – сенсори теплового потоку; 6 – комірка з пробєю досліджуваної речовини; 7 – комірка з еталоном; 8 – робоча камера; 9 – аналітичні ваги

процесі сушіння. Водночас платформа механічно не пов'язана зі статичними елементами теплового блоку, а електричний зв'язок здійснюється за допомогою спеціального колектора, що складається з петлеподібних радіально розташованих дрітів діаметром 0,03 мм. Така конструкція струмопідведення мінімізує вплив електричних дрітів на вимірювання маси.

Змінні калориметричні платформи представлені трьома варіантами виконання калориметричних комірок (рис. 8), що розширює номенклатуру видів досліджуваних матеріалів залежно від їхніх особливостей.

У кожній із конструкцій комірки виконані максимально схожими як за геометричними, так і за теплофізичними параметрами. Кожна комірка оснащена сенсорами теплового потоку (HFS). Одна комірка є робочою і призначена для розміщення в ній досліджуваного зразка. Друга комір-

ка є референтом і під час дослідів залишається пустою, або слугує для розміщення речовини порівняння. У платформі розташовано електричний нагрівник та два платинові термометри опору, один із яких виконує реєстрацію температури платформи, а другий входить до складу системи регулювання температури платформи.

Калориметрична платформа з відкритими комірками оснащена двома відкритими комірками у формі чашок із сенсорами теплового потоку під дном кожної з них. Така платформа призначена для досліджень теплоти випаровування розчинників із розчинів, пастоподібних матеріалів, рідких однорідних зразків, а також теплоємності твердих зразків із підготовленою поверхнею, яка забезпечує тепловий контакт із плоским дном комірки.

Платформу з високими циліндричними комірками розроблено для дослідження зразків із дисперсною структу-

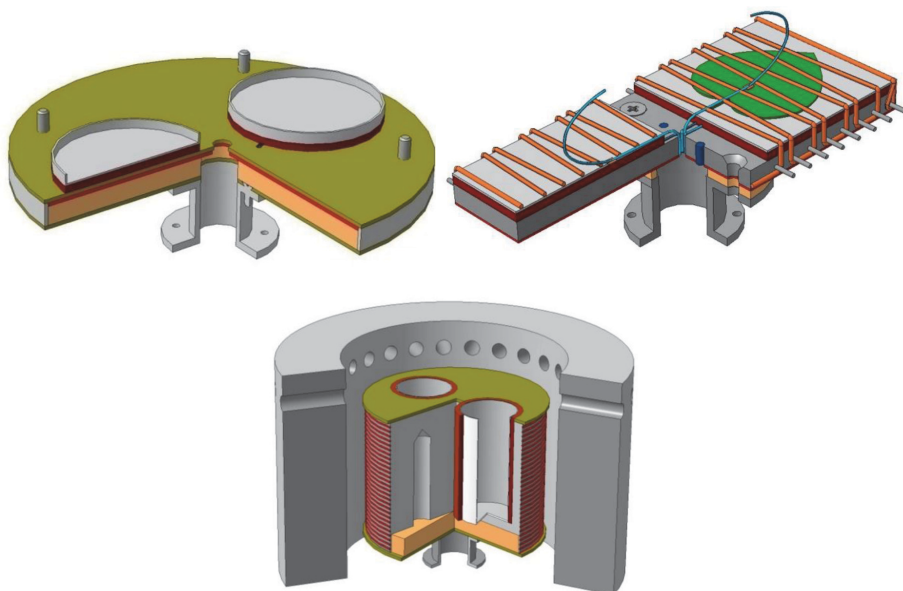


Рис. 8. Змінні калориметричні платформи з відкритими комірками, плоскими комірками з фіксацією зразка та високими циліндричними комірками

рою та високим тепловим опором між частинками. Особливістю такої платформи є те, що сенсори теплового потоку комірок знаходяться по периметру вздовж циліндричних стінок комірки. Така форма виконання дає можливість отримувати коректну інформацію про теплофізичні та термодинамічні характеристики неоднорідних матеріалів завдяки майже повному охопленню зразка сенсором теплового потоку. Ця платформа зручна для дослідження теплоємності широкого кола матеріалів, у тому числі і вологих зразків помірно значних розмірів.

Визначення питомої теплоти випаровування рідин із деяких матеріалів може бути ускладнене внаслідок зміни їхніх геометричних параметрів під час сушіння. Деформація при сушінні таких зразків, як листя лікарських рослин, тонкі зрізи паренхімних тканин плодів, деяких органічних тонколистових матеріалів і зрізів тканин невеликої товщини, призводить до порушення теплового контакту зразка з плоскою поверхнею комірки. Це вносить додаткову похибку або ж повністю спотворює вимірювальну інформацію. Для таких досліджень розроблено платформу з плоскими комірками прямокутної форми з сенсорами теплового потоку під дном кожної та тримачем зразка – гнучкою стрічкою малого діаметра.

У системі реалізовано можливість застосування двох різних методів дослідження: методу синхронного теплового аналізу для дослідження теплоти випаровування і методу покрокового сканування, регламентований ISO 11357-4:2014, для дослідження теплоємності. Підготовка зразка для дослідження також відрізняється в залежності від структури та особливостей матеріалу зразка, а також обраного типу калориметричної платформи.

Під час дослідження питомої теплоємності температурний діапазон, в якому буде проводитись вимірювання, розбивається на однакові інтервали (кроки) достатньої тривалості для встановлення в робочій камері системи рівноважного стану та його підтримування протягом не менше 20 хв. У разі підвищення температури нагрівників до наступного інтервалу сенсори теплового потоку комірок фіксують кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання робочої комірки зі зразком та комірки-референта до заданої температури. Сигнали всіх первинних сенсорів температури й теплового потоку фіксуються інформаційно-вимірювальною системою, обробляються та виводяться на монітор комп'ютера у вигляді графічних залежностей (рис. 9).

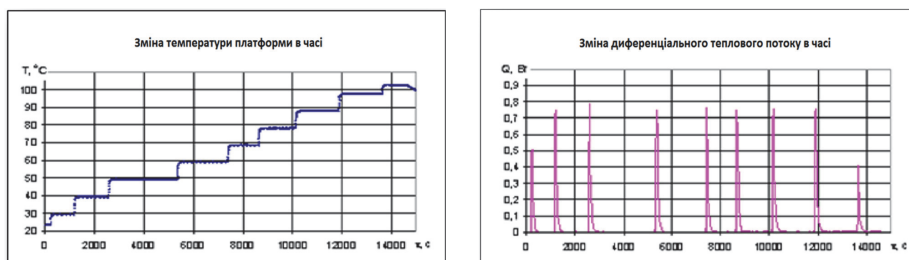


Рис. 9. Графіки покрокової зміни температури та відповідні значення теплового потоку в часі

Значення питомої теплоємності для окремо взятого інтервалу обчислюється за формулою:

$$c = 1/m \cdot \left| \int_{\tau_1}^{\tau_2} \Delta Q(\tau) d\tau / \Delta T - C_K + \Delta C_{БЛ} \right|, (5)$$

де: m – маса досліджуваного зразка; ΔQ – різниця теплових потоків, що реєструються робочою коміркою та коміркою-референтом за час від τ_1 до τ_2 (тривалість інтервалу); ΔT – різниця значень температури між інтервалами; $\Delta C_{БЛ}$ – параметр, який враховує неідентичність теплофізичних параметрів робочої комірки й комірки-референта; теплоємність контейнера C_K враховується, якщо досліджуваний зразок знаходиться в контейнері, а комірка-референт порожня.

Під час дослідження питомої теплоти випаровування методом синхронного теплового аналізу реєструється залежність втрати маси зразком у часі та кількість теплоти, яка витрачається на випаровування рідин зі зразка в ізотермічному середовищі за відповідний проміжок часу. Дослідження продовжується до моменту припинення випаровування рідин зі зразка, який визначається за припиненням зменшення показів маси та стабілізацією сигналу сенсорів теплового потоку комірок.

Середнє значення питомої теплоти випаровування за інтервал часу від початкового моменту τ_i до кінцевого моменту τ_j розраховують за формулою:

$$\bar{q}_{ij}(T, m, \tau) = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_j} [Q_1(T) - Q_2(T) + Q_{HT}(T)] d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_j)}, (6)$$

де: Q_1 – тепловий потік, що проходить через робочу комірку; Q_2 – тепловий потік, що проходить через комірку-референт; Q_{HT} – неконтрольований теплообмін зразка з середовищем, який не реєструється сенсо-

рами теплового потоку; $m(\tau_i) - m(\tau_j)$ – втрата маси зразком за час від моменту τ_i до моменту τ_j .

Результати досліджень.

Науковцями ІТТФ НАН України, НУХТ та НУБіП проведено низку досліджень деяких харчових продуктів та рослинної сировини, призначеної для виробництва біопалива із застосуванням системи STA. Метою цих досліджень було не лише визначення теплофізичних параметрів зразків, а і встановлення температурних і часових параметрів та оптимізація процесу сушіння.

Так, на основі теплофізичних експериментів побудовано експериментально-статистичні моделі процесу сушіння ніжки та шапинки культивованого гриба шампінйон (рис. 10), доведено доцільність та розроблено технологічну схему роздільного сушіння шампінйону (Kubaychuk et al., 2016; Yeshchenko et al., 2016).

Загальний приріст питомої теплоти випаровування вологи з нативних тканин шапинки за різних температур у порівнянні з табличним значенням для випаровування чистої води з вільної поверхні складає $\sim 9\%$, а характер залежності його від вологості корелює з динамікою зміни стану вільної та зв'язаної води у разі зневоднення гриба. До поступового зростання загальних витрат теплоти на випаровування майже із самого початку процесу сушіння тканин гриба призводить зменшення частки вільної води і зростання частки зв'язаної вологи. У подальший розвиток даної роботи для розв'язання проблеми визначення співвідношення вільної та зв'язаної вологи в неоднорідних матеріалах запропоновано концепцію кріокалориметра для дослідження

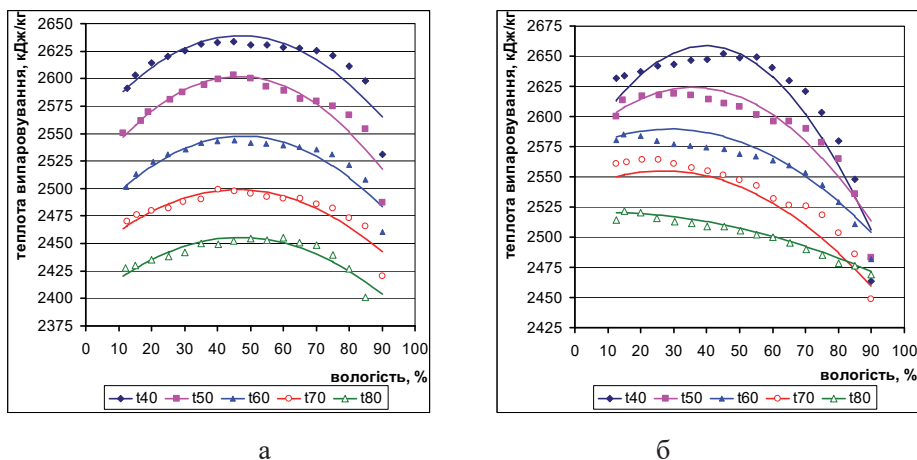


Рис. 10. Залежності зміни теплоти випаровування від вологості при різних температурах в процесі сушіння гриба шампінйона: а – ніжки, б – шпинки

енергії фазового переходу води в матеріалі (Ivanov et al., 2019).

Представляють цікавість дослідження новітніх матеріалів, наприклад, розчинів для виготовлення біодеградабельної полімерної упаковки та параметрів їхнього зневоднення із 69-72 % у вихідній речовині до 6 % у висушеній плівці / покритті у виробничих мовах (Shulga et al., 2018).

Висновки і перспективи.

Технології виготовлення харчових продуктів повсякчас прогресують, асортимент продукції переробних підприємств галузі постійно збільшується. Сучасна наука пропонує широке коло досліджень параметрів термодинамічних та масообмінних процесів, визначення теплофізичних характеристик новітніх речовин та продуктів. Позитивним є той факт, що Україна має власну матеріально-технічну базу метрологічно атестованих приладів та систем для вимірювань температури й теплового потоку, теплового опору, коефіцієнтів

теплопровідності та теплоємності різноманітних матеріалів та речовин.

Розроблена методика вимірювань коефіцієнта ефективної теплопровідності враховує особливості досліджень сипких харчових продуктів та дає можливість ввести поправку на контактний опір пристінного шару сипких матеріалів, що значно підвищує точність дослідження їхньої теплопровідності. Можливість проведення довготривалих спостережень дає можливість досліджувати теплові ефекти в зразках, обчислити об'ємне та інтегральне тепловиділення.

Система STA надає можливість визначення питомої теплоємності методом покрокового сканування та теплоти випаровування методом синхронного теплового аналізу під час дослідження широкої гами речовин і продуктів біологічного походження.

Дослідження теплофізичних характеристик негетерогенних матеріалів та речовин дадуть змогу оптимізувати виробничі процеси та надалі розвивати технології харчової, біотехнологічної та переробної галузі.

Список літератури

1. Чубик І. А., Маслов А. М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.
2. Гинзбург А. С., Громов М. А., Красовская Г. И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник. М.: Пищевая промышленность, 1980. 288 с.
3. Теплофізичні характеристики продуктів і матеріалів АПК. Довідник / В. Г. Федоров, О. М. Скарбовійчук, О. І. Кепко, П. О. Кравчук. Умань.: Редакційно-видавничий відділ Уманського НУС, 2014. 352 с.
4. Теплофізичні властивості напівфабрикатів та харчових продуктів: довідник / М. М. Жеплінська, В. П. Василів. К.: Фірма «ІНКІОС», 2021. 206 с.
5. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: навч. посібник / за ред. О. В. Дацишина. Вінниця: Нова книга, 2008. 488 с.
6. Вібромеханічна інтенсифікація процесів сушіння оліємистої сировини: монографія / І. П. Паламарчук, М. Ф. Друкований, В. І. Паламарчук, З. А. Бурова; за ред. І. П. Паламарчука. Київ: Компринт, 2017. 324 с.
7. Mushtruk, M., Gudzenko, M., Palamarchuk, I., Vasylyv, V., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Nychyk, O., Salavor, O., Bober, A. Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 937–944.
8. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Dudchenko, V., Korets, L., Litvinenko, A., Deviatko, O., Ulianko, S., Slobodyanyuk, N. Modelling of the process of vibromechanical activation of plant raw material hydrolysis for pectin extraction. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 239–246.
9. Sarge S.M., Höhne G.W.H., Hemminger W. *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*. Wiley, Weinheim, Germany, 2014. 280 p.
10. *Applications of Calorimetry in a Wide Context – Differential Scanning Calorimetry, Isothermal Titration Calorimetry and Microcalorimetry*. Ed. by Amal Ali Elkordy. Rijeka, Croatia: InTech, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/2898>.
11. Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 276 с.
12. Kolyanovska, L., Palamarchuk, I., Sukhenko, Y., Mussabekova, A., Bissarinov, B., Popiel, P., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Vasuliev, V., Semko, T., Tyshchenko, L. Mathematical modeling of the extraction process of oil-containing raw materials with pulsed intensification of heat of mass transfer. *Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering*. 2019. 25 p.
13. *Thermal conductivity*. Ed. by R. P. Tye. London and New York: Academic Press, 1969. Vol.1, 2.
14. *Compendium of thermophysical property measurement methods*. Ed. by K. D. Maglič, A. Cezairliyan, V. E. Peletsky. New York: Plenum Press, 1984. Vol.1, 2.
15. ISO 8301:1991 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus
16. Dekusha O., Burova Z., Kovtun S., Dekusha H., Ivanov S. Information-Measuring Technologies in the Metrological Support of Thermal Conductivity Determination by Heat Flow Meter Apparatus. In: Babak V., Isaienko V., Zaporozhets A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 298. Springer, Cham, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_14
17. Ivanov, S., Dekusha, O., Vorobiov, L., Dekusha, L., Burova, Z. The Synchronous Thermal Analysis Cyber-Physical System for the Wet Materials Properties Study. 2019 IEEE 14th

- International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), 2019, pp. 197–200. DOI: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929763>.
18. ISO 11357-4:2014 Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 4: Determination of specific heat capacity.
19. Kubaychuk O., Mazurenko O., Roman T. Mathematical modelling and analysis of the mushroom drying process at the optimal temperature. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 2016. Vol. 6, Issue 2, (Part - 3). P. 67–72.
20. Ещенко О. А., Роман Т. О., Мазуренко О. Г. Експериментально-статистичне моделювання процесу сушіння шапинки і ніжки гриба шампінйона. *Наукові праці НУХТ*, 2016. Т. 22, № 4. С. 149–155.
21. Ivanov S., Roman T., Ivanchenko M. The development of calorimeter for the study of bound moisture in heterogeneous materials. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, 2019. Vol. 1, Issue 7, Part 1. P. 71–76. DOI : <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-07-01-031>.
22. Шульга О., Іванов С., Листопад В. і Мазуренко О. Дослідження теплофізичних характеристик формувального розчину біодegradабельного їстівного покриття/плівки. *Scientific works [Odessa National Academy of Food Technologies]*, 2018. Том 82, № 2. С. 47–55. DOI : <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1169>.
- materials: Reference book. Uman: Uman National University of Horticulture Publishing Division.
4. Zheplinska, M., & Vasylyv, V. (2021) *Thermophysical properties of semi-finished products and food products: Reference book*.
5. Datsishin, O.V. et al (2008) *Technological equipment of grain processing and oil production: Textbook*. Vinnytsia: Nova knyha.
6. Palamarchuk, V.I., Burova, Z.A., Palamarchuk, I.P., & Drukovany, M.F. (2017). *Vibromechanical intensification of drying processes of oily raw materials: monograph*.
7. Mushtruk, M., Gudzenko, M., Palamarchuk, I., Vasylyv, V., Slobodyanyuk, N., Kuts, A., Nychyk, O., Salavor, O., Bober, A. (2020) *Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder*. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*.14. 937–944.
8. Palamarchuk, I., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Dudchenko, V., Korets, L., Litvinenko, A., Deviatko, O., Ulianko, S., Slobodyanyuk, N. (2020). *Modelling of the process of vibromechanical activation of plant raw material hydrolysis for pectin extraction*. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*.14. 239–246.
9. Sarge, S.M., Hohne, G.W.H., & Hemminger, W. (2014) *Calorimetry. Fundamentals. Instrumentation and Applications*. Wiley: VCH.
10. Elkordy, A.A. et al (2013) *Applications of calorimetry in a wide context – differential scanning calorimetry, isothermal titration calorimetry and microcalorimetry*. Rijeka, Croatia: InTech. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/2898>.
11. Atamanyuk V. M., & Gumnitsky Ya. M. (2013) *Scientific bases of filtration drying of disperse materials: monograph*.
12. Kolyanovska, L., Palamarchuk, I., Sukhenko, Y., Mussabekova, A., Bissarinov, B., Popiel, P., Mushtruk, M., Sukhenko, V., Vasylyv, V., Semko, T., Tyshchenko, L. *Mathematical modeling of the extraction process of oil-containing raw materials with pulsed intensification of heat of mass transfer*. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2019. 25 p.
-

References

1. Chubik, I.A., & Maslov, A.M. (1970). *Handbook of thermophysical characteristics of food and semi-finished products*. Moscow: Food industry.
2. Ginzburg, A.S. et al. (1980) *Thermophysical characteristics of food products: Reference book*. Moscow: Food industry.
3. Fedorov, V.G., Skarboviychuk, O.M., Kepko, O.I., & Kravchuk, P.O. (2014) *Thermal characteristics of agriculture products and mate-*

13. Tye, R. P. (1969) Thermal conductivity. London and New York: Academic Press.
14. Maglich, D. K., Cezairliyan, A. A., & Peletsky, V. E. (1984) Compendium of thermophysical property measurement methods. New York: Plenum Press.
15. ISO 8301:1991 Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus.
16. Dekusha, O., Burova, Z., Kovtun, S., Dekusha, H., & Ivanov, S. (2020). Information-measuring technologies in the metrological support of thermal conductivity determination by heat flow meter apparatus. In: Babak V., Isaienko V., Zaporozhets A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy I. Studies in Systems, Decision and Control, vol 298. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-48583-2_14
17. Ivanov, S., Dekusha, O., Vorobiov, L., Dekusha, L., & Burova, Z. (2019). The synchronous thermal analysis cyber-physical system for the wet materials properties study. Paper presented at the International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 197–200. <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2019.8929763>
18. ISO 11357-4:2014 Plastics — Differential scanning calorimetry (DSC) — Part 4: Determination of specific heat capacity.
19. Kubaychuk, O., Mazurenko, O., & Roman, T. (2016) Mathematical modelling and analysis of the mushroom drying process at the optimal temperature. Journal of Engineering Research and Applications, 6 (02-03), 7–72.
20. Yeshchenko, O.A., Roman, T.O., & Mazurenko, O.G. (2016). Experimental and statistical modeling of the drying process of the mushroom cap and stem. Scientific works of the National University of Food Technologies, (22, № 4), 149–155.
21. Ivanov, S., Roman, T., & Ivanchenko, M. (2019). The development of calorimeter for the study of bound moisture in heterogeneous materials. Modern Engineering and Innovative Technologies, 1 (07-01), 71–76. <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2019-07-01-031>
22. Shulga, O.S., Ivanov, S.O., Listopad, V.V., & Mazurenko, O.G. (2018). Investigation of thermophysical characteristics of the molding solution of biodegradable edible coating / film. Scientific works [Odessa National Academy of Food Technologies], (82, № 2), 47–55. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i2.1169>

**Z. A. Burova, S.O. Ivanov, T.O. Roman V. P. Vasyliv, M. M. Zheplinska,
M. M. Mushtruk, I. P. Palamarchuk, V. V. Sarana, M. M. Gudzenko (2021).
RESEARCH ON THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF FOOD PRODUCTS.
ANIMAL SCIENCE AND FOOD TECHNOLOGY, 12(3): 18-35.
<https://doi.org/10.31548/animal2021.03.002>.**

Abstract. Healthy diet is one of the most important elements in maintaining health and strengthening the nation's immunity, an essential condition for achieving active longevity of present and future generations. Inventing new ingredients and creation of food products based on them, development of new and improvement of existing technologies requires reliable information about the basic thermophysical characteristics of raw materials and biological substances to calculate and optimize heat and mass transfer processes during processing and production.

Modern science offers a wide range of studies on the thermodynamic and heat and mass transfer process parameters, determination of the thermophysical characteristics of new substances and products using metrologically certified devices and information measuring

systems. The main problem in the study of materials of biological origin is their inhomogeneity and sample structure heterogeneity.

Measuring the effective thermal conductivity coefficient of bulk materials and cereals should be carried out in a stationary thermal mode on the device for determination of the thermophysical properties of materials and thermal effects, which implements a symmetrical scheme of the thermometric method of measurement using heat flow and temperature sensors. Using four measuring cells allows synchronous comparative analysis of several samples, and the rotary clamping mechanism helps to minimize contact resistance. The developed technique for measuring the coefficient of effective thermal conductivity takes into account the characteristics of bulk food products and significantly increases the accuracy of their thermal conductivity determination by introducing a correction for the contact resistance of the wall layer. The possibility of long-term observations allows to study thermolabile materials, analyze the thermal effects in the samples, to estimate the volumetric and integral heat dissipation.

Calorimetric studies of a wide range of biological materials and substances can be performed with sufficient accuracy by the STA system, which implements step-by-step scanning and synchronous thermal analysis methods to determine the specific heat capacity and heat of evaporation, the ratio of free and bound moisture in heterogeneous materials. These characteristics are integral parameters in the study of the kinetics of heat and mass transfer processes, including drying, for the calculation and design of process equipment.

Research on the thermophysical characteristics of heterogeneous materials and substances will optimize production processes and further develop technologies in the food, biotechnology, and processing industries.

Keywords: heterogeneous materials, effective thermal conductivity coefficient, heat dissipation, specific heat capacity, heat of vaporization, drying
