



Всеукраїнський науково-технічний журнал

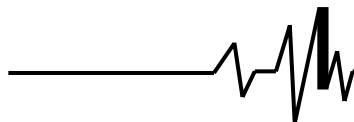
Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3

Вібрації в техніці та технологіях



**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

*Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації*

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

*Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та
технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця,
2021. – 3 (102) – 117 с.*

*Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного
університету (протокол № 2 від 28.09.2021 р.).*

*Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань
України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки
України від 02.07.2020 р. № 886)*

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

**Заступник головного
редактора**

Адамчук В.В. – д.т.н., проф., акад. НААН
України, Національний науковий центр
“Інститут механізації та електрифікації
сільського господарства”

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доц., Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Граняк В.Ф. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Деревенько І.А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Зіньковський А.П. – д.т.н., професор,
Інститут проблем міцності імені Г. С.
Писаренка НАН України

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Надуть В.П. – д.т.н., професор, Інститут
геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
НАН України

Ольшанський В.П. – д.ф.-м.н., професор,
Державний біотехнологічний університет

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Севостьянов І.В. – д.т.н., професор,
Вінницький національний аграрний
університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

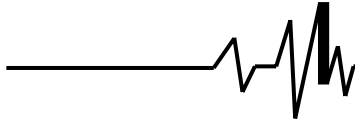
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

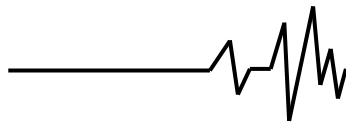
Технічний редактор **Замрій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Бовсуновський А.П.***ВІБРАЦІЙНА ДІАГНОСТИКА ВТОМНИХ ПОШКОДЖЕНЬ У КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТАХ
ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ НА СТАДІЇ РЕМОНТУ.....5***Цуркан О.В., Полевода Ю.А., Присяжнюк Д.В.***РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ
ДЛЯ СИНТЕЗУ ОЗОНУ У ВІБРАЦІЙНІЙ СУШАРЦІ.....15***Булаєков В. М., Кувачов В.П., Солоня О. В., Борис М.М.***ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ КОЛИВАНЬ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИНО-ТРАКТОРНИХ АГРЕГАТІВ.....24***Ольшанський В. П., Сліпченко М.В., Солоня О.В, Купчук І.М.***ПРО АНАЛІТИЧНИЙ РОЗВ'ЯЗОК РІВНЯННЯ СИЛИ УДАРУ ДВОХ ПРУЖНИХ ТІЛ.....34***Іскович-Лотоцький Р.Д., Веселовська Н.Р, Гнатюк О.Ф.***ПЕРСПЕКТИВНИЙ ВІБРОУДАРНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ РОЗВАНТАЖЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ
ЗАСОБІВ.....43***Ярошенко Л.В., Чубик Р.В., Деревенько І.А.***ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМ
ДЕБАЛАНСНИМ ВІБРОПРИВОДОМ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН НА ОСНОВІ ШТУЧНОЇ
НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ52***Спірін А.В., Твердохліб І.В., Замрій М.А.***ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВО-ГРАВІТАЦІЙНОГО
СЕПАРАТОРА ТЕРКОВОГО ПРИСТРОЮ.....64****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Gaidamak O., Matviychuk V.***CREATION OF ELECTRIC CONDUCTIVE COATINGS USING GAS-DYNAMIC SPRAYING.....72***Гулько І.В.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ЗМІНИ ТИСКУ ПРИ РОБОТІ ГІДРАВЛІЧНОЇ
СИСТЕМИ ІЗ ЧОТИРМА ПОСЛІДОВНО СПОЛУЧЕНИМИ ГІДРОМОТОРАМИ.....81***Руткевич В.С., Яропуд В.М., Купчук І.М., Остапчук О.О.***ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОПРИВОДА
ВІДОКРЕМЛЮВАЧА СТЕБЛОВИХ КОРМІВ З ТРАНШЕЙНИХ СХОВИЩ.....88****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Цуркан О. В., Спірін А. В., Твердохліб І. В.***ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ ВІБРАЦІЙНОГО СУШІННЯ...100***Севостьянов І. В., Мельник О. С., Підлипна М. П.***ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ КЛАСИФІКАЦІЇ СУХОЇ
ЗЕРНОВОЇ СИРОВИНИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ СХЕМ ЇЇ НАВАНТАЖЕННЯ.....109**

**Цуркан О. В.**

д.т.н., доцент

Спирін А. В.

к.т.н., доцент

*Відокремлений
структурний підрозділ
«Ладизинський фаховий
коледж ВНАУ»*

Твердохліб І. В.

к.т.н., доцент

*Вінницький національний
аграрний університет*

Tsurkan O.Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor**Spirin A.**PhD of Engineering, Associate
Professor

*Separated structural unit
«Ladyzhyn Professional
College of Vinnytsia
National Agrarian
University»*

Tverdokhlib I.PhD of Engineering, Associate
Professor

*Vinnytsia National Agrarian
University*

УДК 631.362.3**DOI: 10.37128/2306-8744-2021-3-**

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТІВ ВІБРАЦІЙНОГО СУШІННЯ

Продукція рослинництва для успішного зберігання потребує досягнення матеріалом кондиційної вологості. В основному для цього використовують процес сушіння. Для його успішного проектування і реалізації потрібно мати відомості про фізико-механічні властивості матеріалу, в тому числі теплофізичні характеристики. Саме для успішної реалізації процесу післязбирального обробки насіння гарбуза були заплановані та проведені експериментальні дослідження.

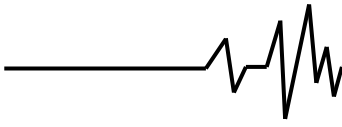
Аналіз попередніх досліджень визначення теплофізичних характеристик різноманітних матеріалів, в тому числі і рослинної продукції, показав що для цього в більшості випадків використовують нестационарні методи які дозволяють в одній серії дослідів визначити зразу три основних показника – теплоємність, теплопровідність та температуропровідність продукції. На жаль не існує універсального способу та установки для визначення потрібних показників, тому і в наших дослідженнях була використана оригінальна установка, принцип роботи якої ґрунтується на використанні закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стержнів, в місці дотику яких знаходиться джерело тепла постійної потужності.

Теоретичною основою реалізованого метода є рішення та аналіз рівняння теплопровідності з відповідними граничними умовами. Були отримані проміжні рівняння з яких графоаналітичним методом розв'язання знаходили значення теплопровідності та температуропровідності для кожної серії дослідів. Значення теплоємності матеріалу визначалось із загальновідомої формули співвідношення цих трьох показників. В результаті проведених досліджень і обробки отриманих даних були визначені залежності теплофізичних властивостей матеріалу від його вологості які представлені в графічному та аналітичному вигляді. Отримані залежності підтвердили результати досліджень деяких авторів про наявність перегину в графіку температуропровідності який пояснюється переходом вологи із вільного в зв'язаний стан.

Ключові слова: насіння гарбуза, теплопровідність, теплоємність, температуропровідність, термопара.

Постановка проблеми. Галузь рослинництва характеризується великим різноманіттям вирощеної продукції, і всю її потрібно або переробляти, або зберігати. Для переробки і зберігання потрібен матеріал певної вологості, як правило, значно меншої ніж польова. Основним способом досягнення кондиційної вологості є сушіння зібраного матеріалу. Енергетична ефективність процесу

сушіння та якість отриманої продукції залежить від багатьох факторів, в тому числі від фізико-механічних характеристик матеріалу. Особливе місце серед них займають теплофізичні характеристики, адже саме вони в значній мірі визначають конструктивно-технологічні параметри обладнання. Особливої актуальності набуває це питання при розробці технології сушіння насінневої продукції, адже



саме від правильного вибору параметрів процесу залежить якість висушеного матеріалу.

Одним з елементів технологічної лінії по переробці насіння гарбуза є вібраційна сушарка оригінальної конструкції. Саме для визначення раціональних параметрів її роботи і були знайдені значення теплофізичних характеристик насіння гарбуза.

Аналіз останніх досліджень Одними з основних характеристик, що визначають властивості речовин і матеріалів є їх теплофізичні характеристики. На їх величину суттєво впливає склад та концентрація його компонентів в речовині в процесі її використання. Для більшості випадків при проектуванні процесів сушіння продукції потрібно знати три основні теплофізичні характеристики матеріалу: теплоємність C (Дж/кг⁰С), теплопровідність λ (Вт/м⁰С) та температуропровідність a (м²/с). Ці величини пов'язані між собою співвідношенням:

$$C = \frac{\lambda}{a\rho}, \quad (1)$$

де ρ – густина матеріалу, кг/м³.

При визначенні теплофізичних характеристик найбільші труднощі виникають при визначенні теплопровідності. Загальні методи визначення саме теплопровідності наведені в [1]. Для дослідження теплопровідності використовують дві групи методів: стаціонарні та нестаціонарні. Стаціонарні методи, які ґрунтуються на дослідженні температурних полів незмінних в часі, як правило, більш прості і, відповідно, більш досконалі. Нестационарні методи досліджують температурні поля які змінюються в часі за певним законом і тому вони більш складні в реалізації. Однак нестаціонарні методи дозволяють окрім даних по теплопровідності отримувати інформацію про теплоємність та температуропровідність речовини.

Визначення теплофізичних характеристик рослинних матеріалів дещо відрізняється від аналогічних методів, наприклад, для металів або твердих будівельних матеріалів. Для останніх більш характерним є дослідження в широкому діапазоні саме температур, в той час коли для рослинних матеріалів дослідження поводяться для невеликого діапазону температур і значного інтервалу вологості матеріалу. Тези про нестаціонарні методи та визначення характеристик твердих матеріалів підтверджується дослідженнями наведеними в [2,3,4]. В цих дослідженнях використовували саме нестаціонарні методи для матеріалів постійної вологості в широкому діапазоні

температур. Але, звичайно, не може бути одного універсального метода і обладнання для дослідження властивостей різних матеріалів, хоча загальні тенденції і зберігаються.

Аналогічне становище спостерігається і при дослідженні різноманітних рослинних матеріалів. Частина досліджень присвячена визначенню теплофізичних властивостей різноманітних овочів при заморожуванні [5,6]. Дослідження проводились для вузького діапазону негативних температур з використанням спеціально розробленого пристрою. Певну цікавість викликає відмічений в роботі [6] факт стрімкого зростання коефіцієнта теплопровідності овочів при переході нульової температури що пояснюється фазовим переходом води в лід. Це характерно саме для заморожування овочів, при сушінні зерна та насіння температура теплоносія практично постійна, а змінюється вологість матеріалу. Хоча і тут можна відмітити деяку відмінність при сушінні товарного зерна і насіннєвого матеріалу. В роботі [7] описана методика визначення теплофізичних характеристик товарного зерна. Зокрема відмічається що залежність температуропровідності від вологості матеріалу має явно виражений криволінійний характер, навіть є перегин даної кривої. Автори пояснюють це переходом вологи із вільного в зв'язаний стан. Визначення теплофізичних характеристик насіннєвого матеріалу описано в роботах [8,9]. Дослідження проводились при температурах що не перевищували максимально допустимі для даного виду насіння. Характерною особливістю всіх цих досліджень є використання нестаціонарних методів і різних установок в залежності від особливостей матеріалу.

Ще однією особливістю рослинної продукції є залежність їх теплофізичних характеристик від ступеня стиглості [10]. Це пояснюється різною пористістю овочів та кількістю і станом вологи в них.

Аналіз досліджень методів і засобів визначення теплофізичних характеристик різноманітних матеріалів дозволяє зробити два основних висновки. По-перше, всі дослідники використовують оригінальні установки для визначення властивостей окремих матеріалів. По-друге, практично всі вони використовували нестаціонарні методи досліджень, а основою для всіх них був метод розроблений А.Б. Вержинською і вперше представлений в роботі [11] і набув подальшого розвитку в [12,13] та інших роботах. Не зважаючи на солідний вік цей метод і досі залишається одним з надійних засобів визначення теплофізичних характеристик різноманітних матеріалів. Тому і



для своїх досліджень за основу ми вибрали саме цей метод, звичайно адаптувавши його для наших умов - насіння гарбуза початковою вологістю 42%.

Постановка задачі Метою досліджень є підвищення ефективності процесу зневоднення насіння гарбуза на етапі планування та практичної реалізації процесу шляхом визначення залежності теплофізичних характеристик матеріалу від його вологості. Для визначення цих залежностей був використаний метод який ґрунтується на використанні закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стержнів в місці дотику яких знаходиться джерело тепла постійної потужності.

Виклад основного матеріалу.

Теплоємність матеріалу чисельно дорівнює кількості теплоти, яку необхідно підвести до одиниці маси матеріалу, щоб підвищити його температуру на один градус.

Теплоємність рослинних матеріалів через особливості їх природної будови, в основному залежить від теплоємності води та сухої речовини. Через те, що теплоємність води вище теплоємності сухої речовини, то при сушінні теплоємність рослинних матеріалів, в тому числі і насіння баштанних культур, зменшується. Окрім того, теплоємність залежить і від температури матеріалу – при збільшенні температури вона також збільшується.

Коефіцієнт теплопровідності характеризує здатність матеріалу проводити теплоту і чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить за одиницю часу через одиницю довжини при зміні температури на один градус на одиницю довжини матеріалу.

Теплопровідність матеріалу залежить від його структури, вологості, густини, температури. При зменшенні вологості в процесі сушіння матеріалу його теплопровідність зменшується.

Теплопровідність шару (вороху) насіння нижче теплопровідності окремих насінин через наявність повітряних проміжків між ними.

Коефіцієнт температуропровідності визначає швидкість розвитку нестационарного теплового процесу, тобто здатність часток матеріалу при нагріві або охолодженні вирівнювати температуру в окремих його місцях. Коефіцієнт температуропровідності залежить від інтенсивності переносу вологи усередині матеріалу і характеру зв'язку вологи з матеріалом.

Для визначення теплофізичних характеристик матеріалу використаємо викладений в [11] метод, який ґрунтується на закономірностях нестационарного нагріву двох напівобмежених стержнів, в місці дотику яких

знаходиться джерело тепла постійної потужності.

Теоретичною основою методу є рішення та аналіз рівняння теплопровідності:

$$-\frac{dt(x, \tau)}{d\tau} = a \frac{d^2t(x, \tau)}{dx^2} \quad (2)$$

з граничними умовами:

$$\begin{aligned} t(x, 0) &= t_0 = \text{const}; \\ q(0, \tau) &= q_0 = \text{const}; \quad \frac{dt(\pm\infty, \tau)}{dx} = 0; \\ \lambda \left(\frac{dt}{dx} \right)_{x=0} &= q_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Рішення рівняння (2) з граничними умовами (3) має вигляд:

$$\Delta t_x = t(x, \tau) - t_0 = 2 \frac{q_0}{\lambda} \sqrt{a\tau} \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right). \quad (4)$$

Підставивши $x=0$ в формулі (4), отримуємо вираз для температури нагрівача при $\tau=0$:

$$\Delta t_n = t_n - t_0 = 1,1284 q_0 \lambda^{-1} \sqrt{a\tau}, \quad (5)$$

оскільки $\operatorname{ierfc}0 = 0,5642$.

Поділивши (4) на (5), отримуємо:

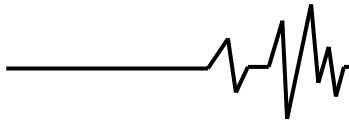
$$0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} = \operatorname{ierfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right). \quad (6)$$

З виразів (5) і (6) можна визначити a і λ аналітично, однак більш простим і зручним є графоаналітичний метод розв'язання.

Графічним зображенням (5) в координатах $\Delta t_n, \tau$ є пряма, яка проходить через початок координат під кутом γ до осі абсцис:

$$\gamma = \arctg 1,1284 \frac{q_0 \sqrt{a}}{\lambda}. \quad (7)$$

При відомому питомому тепловому потоці q_0 і $\operatorname{tg}\gamma$ можна знайти співвідношення:



$$\frac{\sqrt{a}}{\lambda} = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{1,1284 q_0}. \quad (8) \quad \operatorname{argierfc} \left(0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} \right)$$

Для визначення величини a скористаємось виразом (6). Графічна інтерпретація рівняння (6) в координатах $\sqrt{\tau}$,

показана на рис. 1 і є прямою лінією, яка проходить через початок координат під кутом φ до осі $\sqrt{\tau}$.

$$\varphi = \operatorname{arctg} \operatorname{argierfc} \left(0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n} \right) \sqrt{\tau} = \operatorname{arctg} \left(\frac{x^2}{2\sqrt{a}} \right),$$

звідки:

$$a = \frac{x_2}{4 \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (9)$$

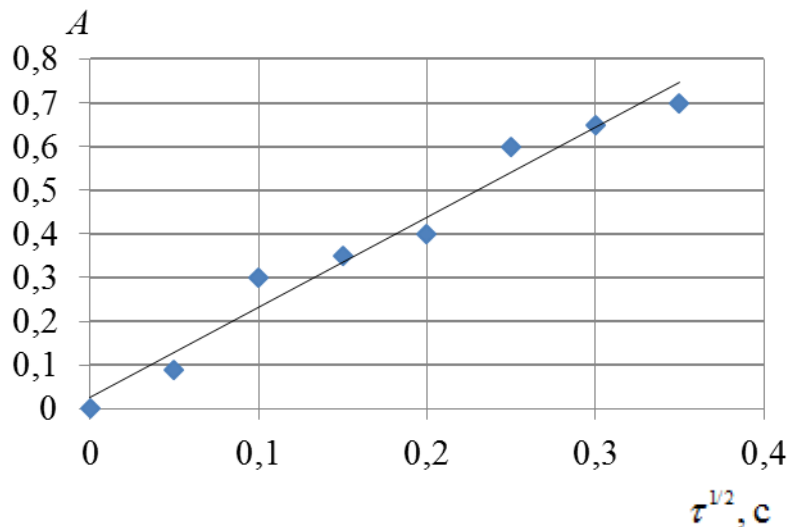


Рис. 1. Графік залежності $A = \operatorname{ierfc}(0,5642 \Delta t_x) / (\Delta t_n)$ від $\tau^{-1/2}$ для $X=5$ мм і $W=34$ %: для насіння гарбузів

Схема лабораторної установки для визначення теплофізичних властивостей матеріалу представлена на рис. 2.

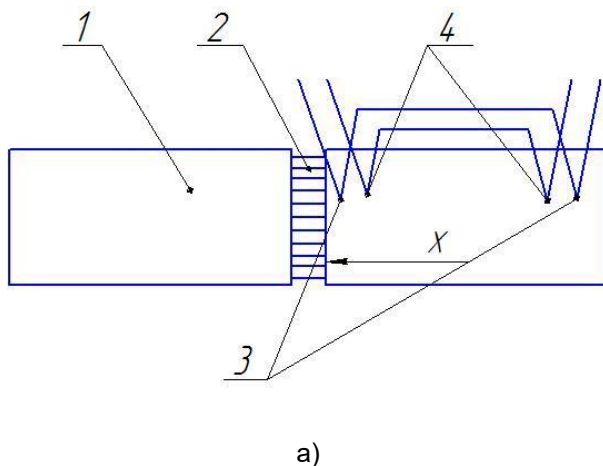
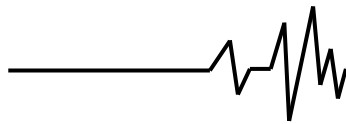


Рис. 2. Лабораторна установка для визначення теплофізичних властивостей матеріалу: а – схема, б – загальний вигляд



В теплоізольовані паралелепіпеди 1, які мають розмір 35x35x60 мм, щільно укладається матеріал для випробовувань. Між паралелепіпедами встановлюється плоский електричний нагрівач 2, який має поверхню 34x34 мм.

Потужність нагрівача регулюється латром в межах 20-50 Вт. Торці паралелепіпедів, які повернуті до нагрівача, не теплоізольовані. Температура Δt_n та Δt_x вимірюється відповідно диференційними термопарами 3 і 4, холодні кінці яких розташовані на значній відстані від гарячих кінців так, що в місці розташування холодних кінців температура в процесі дослідження не змінюється. Відстань x варіювалася в межах 5-15 мм. Значення температур Δt_n та Δt_x реєструвалися цифровим потенціометром типу МСР 41010.

Питомий тепловий потік q_0 визначався за формулою:

$$q_0 = 0,864 P / 2S, \quad (10)$$

де P – потужність нагрівача, Вт;
 S – площа нагрівача, мм².

Матеріал для випробовування (насіння гарбуза) засипався в паралелепіпеди і вмикався нагрівач 2. Одночасно з нагрівачем вмикалися прилади для реєстрації температур Δt_n та Δt_x . Одночасно відбиралася проба матеріалу для визначення його вологості. В процесі одного дослідження потужність нагрівача залишалась постійною.

Для матеріалу однієї вологості дослідження проводились при $X = 5$ мм, 10 мм і 15 мм та потужності нагрівача $P = 20$ Вт і 50 Вт.

Час одного дослідження становив 7 хвилин.

При обробці результатів дослідів визначались значення температур Δt_n та Δt_x у відповідні моменти часу, визначались

значення виразу $A = ierfc\left(0,5642 \frac{\Delta t_x}{\Delta t_n}\right)$

для цих же моментів часу і будувались графіки залежності комплексу A від $\sqrt{\tau}$ для різних значень X . Один з таких графіків показаний на рис. 1. Із графіка визначався кут φ і за формулою (9) визначалось значення a для даної залежності. Потім за результатами того ж дослідження будували графік залежності Δt_n від $\sqrt{\tau}$.

Один з таких графіків (для $W = 34\%$ і $P = 20$ Вт) наведений на рис. 3. За формулою (10) визначалось значення q_0 , а за формулою (8) – значення λ . Після визначення значень a та λ для даної вологості за формулою (1) визначалось значення теплоємності для даної вологості.

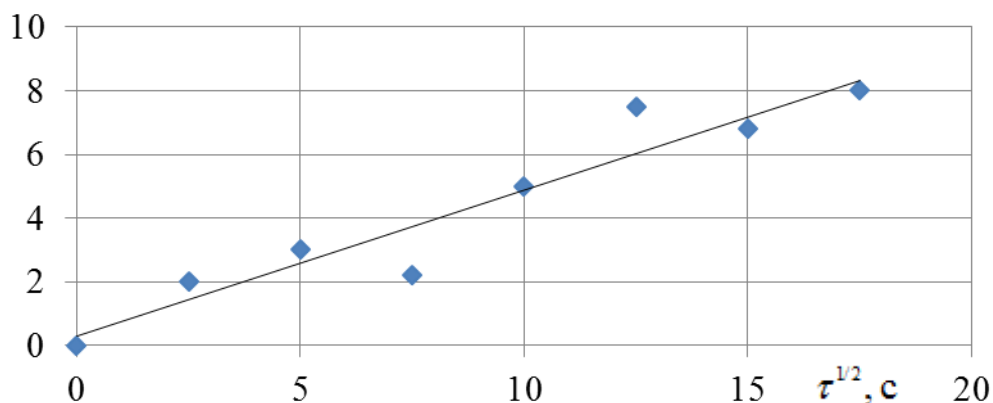
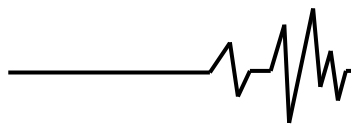


Рис. 3 – Графік залежності Δt_n від $\tau^{1/2}$ для $P=20$ Вт і $W=34\%$: для насіння гарбузів

В результаті проведених досліджень і обробки отриманих даних получили залежності теплофізичних властивостей матеріалу від його вологості, які наведені на рис. 4. Дані графічні залежності адекватно описуються наступними

рівняннями (для теплоємності, теплопровідності та температуропровідності відповідно).

$$C = 0.00614W + 1.108 \quad (11)$$



$$\lambda = 0.0557 \exp(0.03W) \quad (12)$$

$$a = \frac{W}{0.7W + 1.385} \quad (13)$$

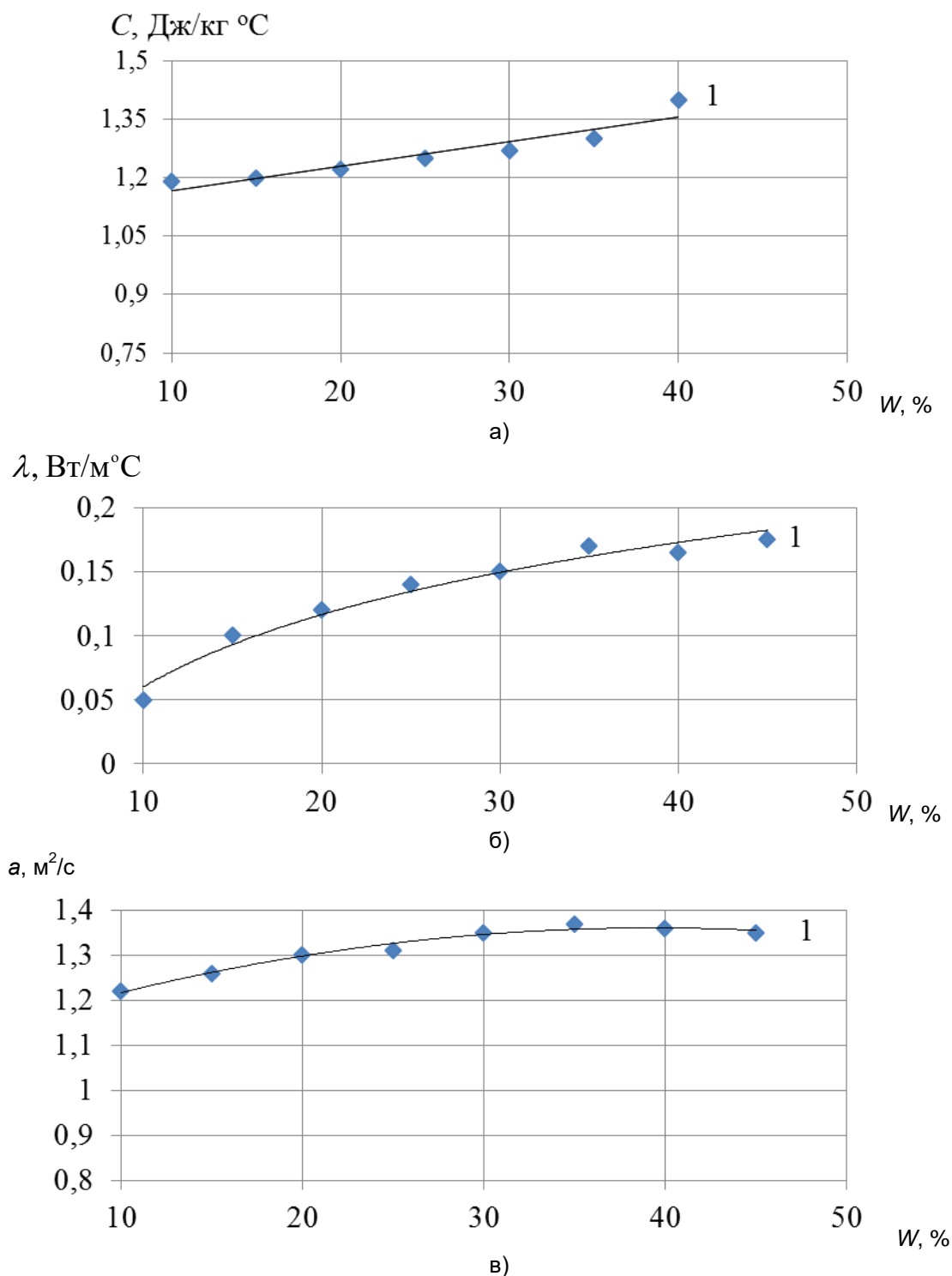


Рис. 4 – Залежність теплофізичних характеристик від вологості насіння: а – теплоємність; б – теплопровідність; в – температуропровідність; 1 – для насіння гарбузів

Як видно з наведених графіків, теплоємність і теплопровідність насіння баштанних культур збільшуються із зростанням вологості матеріалу. Температуропровідність має точку

перегину в районі вологості 35-38 %. Це підтверджує припущення вказане в роботі [7] що цей перегин пояснюється переходом води (вологи) із вільного в зв'язаний стан.

**Висновки:**

1. Аналіз останніх досліджень дозволив вибрати метод визначення теплофізичних характеристик гарбузового насіння. Цей метод ґрунтується на використанні закономірностей нестационарного нагріву двох напівобмежених стержнів з джерелом тепла постійної потужності.

2. Проведені на оригінальній лабораторній установці дослідження дозволили отримати залежності теплоємності, теплопровідності та температуропровідності насіння гарбуза від вологості при постійній температурі.

3. Отримана графічна залежність для температуропровідності має перегин в районі вологості 35-38%. Це підтверджує припущення інших дослідників, що цей перегин виникає через перехід вологи із вільного в зв'язаний стан.

Список використаних джерел

1. А.Г. Коротких Теплопроводность материалов. Учебное пособие Томского политехнического университета. 2011. 96с.

2. Н.А. Подледнева, В.А. Краснов, Р.С. Магомедов Определение коэффициентов теплопроводности и температуропроводности за один опыт методом линейного источника теплоты постоянной мощности. Вестник Астраханского ГТУ. 2013. №2(56). С.50-54.

3. Головин Д.Ю., Дивин А.Г., Самодуров А.А. и др. Новый экспресс-способ определения коэффициента температуропроводности материалов и готовых изделий. Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. №1. С.240-247.

4. Головин Д.Ю., Тюрин А.И., Самодуров А.А., Головин Ю.И. Определение температуропроводности материалов методом нестационарного точечного нагрева. Письма в Журнал технической физики. 2020. Т.46. №1. С. 39-42.

5. Иванченко В.И., Модонкаева А.Э., Ялпачик В.Ф., Стручаев К.Н., Загорко Н.П. Определение коэффициента теплопроводности плодоовощной продукции при замораживании. Хранение и переработка сельхозсырья. 2001. №12. С. 24-25.

6. Ялпачик В.Ф., Стручаев М.И., Тарасенко В.Г. Экспериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності при заморожуванні. Праці ТДАТУ. 2015. Вип.17. Т. 1. С.113-117.

7. Цугленок Н.В., Манасян С.К., Демский Н.В., Конусов Н.Н. Методика определения теплофизических свойств зернового материала. Вестник Красноярского ГАУ. 2007. №4. С. 131-133.

8. А.Ф. Эрк, А.Н. Перекопский, С.В.Чугунов Теплофизические характеристики семян трав. Теоретический и научно-практический журнал ИАЭП. 2017. Вып.92. С. 88-92.

9. Бутова С.В., Седова О.С. Анализ теплофизических свойств семян масличных культур. Материалы международной научно-технической конференции "Проблемы совершенствования машин, оборудования и технологий в агропромышленном комплексе". Воронежский ГАУ. 2019. С.53-58.

10. Н.М. Осокіна, К.В. Костецька Фізичні і теплофізичні властивості овочів залежно від сорту та ступеня стиглості. Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва. 2013. Вип.83. С.38-43.

11. Вержинская А.Б., Новиченок Л.Н. Новый универсальный метод определения теплофизических коэффициентов. Инженерно-физический журнал. 1960. Т. III. №9. С.65-68.

12. Вержинская А.Б. Метод источника постоянной мощности. В кн. Тепло- и массоперенос. Минск. Из-во АН БССР. 1962. Т.1. С56-60.

13. Вержинская А.Б., Куц П.С. Исследование зависимости теплофизических характеристик торфоизоляционных плит от влажности в процессе сушки. Инженерно-физический журнал. 1964. №8. С.81-84.

References

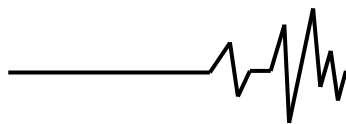
1. A.G. Korotkikh. (2011). Teploprovodnost' materialov. [Thermal conductivity of materials]. Uchebnoye posobiye Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. [in Russian].

2. N.A. Podledneva, V.A. Krasnov, R.S. Magomedov. (2013). Opredeleniye koeffitsiyentov teploprovodnosti i temperaturoprovodnosti za odin opyt metodom lineynogo istochnika teploty postoyannoy moshchnosti. [Magomedov Determination of the coefficients of thermal conductivity and thermal diffusivity in one experiment by the method of a linear heat source of constant power] Vestnik Astrakhanskogo GTU. [in Russian].

3. Golovin D.YU., Divin A.G., Samodurov A.A. i dr. (2020). Novyyu ekspress-sposob opredeleniya koeffitsiyenta temperaturoprovodnosti materialov i gotovykh izdeliy. [A new express method for determining the thermal diffusivity of materials and finished products]. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. [in Russian].

4. Golovin D.YU., Tyurin A.I., Samodurov A.A., Golovin YU.I. (2020). Opredeleniye temperaturoprovodnosti materialov metodom nestatsionarnogo tochechnogo nagreva. [Determination of thermal diffusivity of materials by the method of non-stationary point heating] Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. [in Russian].

5. Ivanchenko V.I., Modonkayeva A.E., Yalpachik V.F., Struchayev K.N., Zagorko N.P. (2001). Opredeleniye koeffitsiyenta teploprovodnosti plodoovoshchnoy produktsii pri zamorazhivani. [Determination of the coefficient of thermal



conductivity of fruits and vegetables during freezing]. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyr'ya*. [in Russian].

6. Yalpachyk V.F., Struchaev M.I., Tarasenko V.H. (2015). Eksperymental'ne vyznachennya koefitsiyenta teploprovodnosti pry zamorozhuvanni. [Experimental determination of the coefficient of thermal conductivity during freezing of Labor]. *Pratsi. TDATU*. [in Ukrainian].

7. Tsluglenok N.V., Manasyan S.K., Demskiy N.V., Konusov N.N. (2007). Metodika opredeleniya teplofizicheskikh svoystv zernovogo materiala. [Methods for determining the thermophysical properties of grain material]. *Vestnik Krasnoyarskogo GAU*. [in Russian].

8. A.F. Erk, A.N. Perekopskiy, S.V.Chugunov. (2017) Teplofizicheskiye kharakteristiki semyan trav. [Thermophysical characteristics of grass seeds]. *Teoreticheskiy i nauchno-prakticheskiy zhurnal IAEP*. [in Russian].

9. Butova S.V., Sedova O.S. (2019). Analiz teplofizicheskikh svoystv semyan maslichnykh kul'tur. [Analysis of thermophysical properties of oilseeds]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy sovershenstvovaniya mashin, oborudovaniya i tekhnologiy v agropromyshlennom komplekse"*. Voronezhskiy GAU. [in Russian].

10. N.M. Osokina, K.V. Kostets'ka. (2013). Fizychni i teplofizychni vlastyvoli ovochiv zalezho vid sortu ta stupenya styhlosti. [Physical and thermophysical properties of vegetables depending on the variety and degree of ripeness]. *Zbirnyk naukovykh prats' Umans'koho natsional'noho universytetu sadivnytstva*. [in Ukrainian].

11. Verzhinskaya A.B., Novichenok L.N. (1960). Novyy universal'nyy metod opredeleniya teplofizicheskikh koefitsiyentov. [A new universal method for determining thermophysical coefficients]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. [in Russian].

12. Verzhinskaya A.B. (1962) Metod istochnika postoyannoy moshchnosti. [Constant power source method]. V kn. *Teplo- i massoperenos*. Minsk. Iz-vo AN BSSR. [in Belarus].

13. Verzhinskaya A.B., Kuts P.S. (1964). Issledovaniye zavisimosti teplofizicheskikh kharakteristik torfoizolyatsionnykh plit ot vlazhnosti v protsesse sushki. [Investigation of the dependence of the thermophysical characteristics of peat insulation boards on moisture during the drying process]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*. [in Russian].

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТОВ ВИБРАЦИОННОЙ СУШКИ

Продукция растениеводства для успешного хранения требует достижения материалом кондиционной влажности. В основном для этого используют процесс сушки. Для его успешного проектирования и реализации нужно иметь сведения о физико-механических

свойствах материала, в том числе теплофизические характеристики. Именно для успешной реализации процесса послеуборочной обработки семян тыквы были запланированы и проведены экспериментальные исследования.

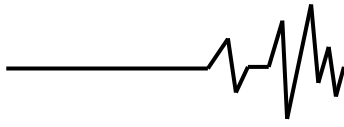
Анализ предыдущих исследований определения теплофизических характеристик различных материалов, в том числе и растительной продукции, показал, что для этого в большинстве случаев используют нестационарные методы которые позволяют в одной серии опытов определить сразу три основных показателя - теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность продукции. К сожалению, не существует универсального способа и установки для определения нужных показателей, так и в наших исследованиях была использована оригинальная установка, принцип работы которой основан на использовании закономерностей нестационарного нагрева двух полуограниченных стержней, в месте соприкосновения которых находится источник тепла постоянной мощности.

Теоретической основой реализованного метода есть решение и анализ уравнения теплопроводности с соответствующими граничными условиями. Были получены промежуточные уравнения из которых графоаналитическим методом решения находили значения теплопроводности и температуропроводности для каждой серии опытов. Значение теплоемкости материала определялось с общеизвестной формулы соотношения этих трех показателей. В результате проведенных исследований и обработки полученных данных были определены зависимости теплофизических свойств материала от его влажности представленные в графическом и аналитическом виде. Полученные зависимости подтвердили результаты исследований некоторых авторов о наличии перегиба в графике температуропроводности который объясняется переходом влаги из свободного в связанное состояние.

Ключевые слова: семена тыквы, теплопроводность, теплоемкость, температуропроводность, термопара.

DETERMINING THE THERMO PHYSICAL CHARACTERISTICS OF VIBRATION DRYING OBJECTS

Crop products require good moisture content for successful storage. The drying process is mainly used for this purpose. For its successful design and implementation it is necessary to have information about the physical and mechanical properties of the material, including thermo physical characteristics. It is for the successful implementation of the process of



post-harvest processing of pumpkin seeds were planned and conducted experimental studies.

Analysis of previous studies to determine the thermo physical characteristics of various materials, including plant products, showed that in most cases one series of experiments to determine three main indicators - heat capacity, thermal conductivity and thermal conductivity of products. Unfortunately, there is no universal method and installation for determining the required indicators, so in our research we used the original installation, the principle of which is based on the use of non-stationary heating patterns of two semi-bounded rods, where the source of heat is constant power.

The theoretical basis of the implemented method is the solution and analysis of the thermal equation with the corresponding boundary conditions. Intermediate equations were obtained from which the

values of thermal conductivity and thermal conductivity for each series of experiments were found by the graph-analytical method of solution. The value of heat capacity of the material was determined from the well-known formula of the ratio of these three indicators. As a result of research and processing of the obtained data, the dependences of the thermo physical properties of the material on its humidity were determined, which are presented in graphical and analytical form. The obtained dependences confirmed the results of researches of some authors on the presence of inflection in the graph of thermal conductivity which is explained by the transition of moisture from free to bound state.

Key words: pumpkin seeds, thermal conductivity, heat capacity, thermal conductivity, thermocouple.

Відомості про авторів

Цуркан Олег Васильович – доктор технічних наук, доцент, директор відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету» (вул. Кравчика Петра, 5, м. Ладизин, Вінницька обл., Україна, 24321, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net).

Цуркан Олег Васильевич – доктор технических наук, доцент, директор обособленного структурного подразделения «Ладыженский профессиональный колледж Винницкого национального аграрного университета» (ул. Кравчика Петра, 5, г. Ладыжин, Винницкая обл., Украина, 24321, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net).

Tsurkan Oleh – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of Separate structural subdivision «Ladyzhyn vocational college of Vinnytsia National Agrarian University» (Kravchik Petro St., 5, Ladyzhyn, Vinnytsia Region, Ukraine, 24321, e-mail: tsurkan_ov76@ukr.net).

Спирін Анатолій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент викладач відокремленого структурного підрозділу «Ладизинський фаховий коледж Вінницького національного аграрного університету», e-mail: spirinanatoly16@gmail.com.

Спирин Анатолий Владимирович - кандидат технических наук, доцент, преподаватель обособленного структурного подразделения «Ладыженский профессиональный колледж Винницкого национального аграрного университета» (ул. Кравчика Петра, 5, г. Ладыжин, Винницкая обл., Украина, 24321, e-mail: spirinanatoly16@gmail.com).

Spirin Anatoly - candidate of technical sciences, associate professor, teacher of Separate structural subdivision «Ladyzhyn vocational college of Vinnytsia National Agrarian University» (Kravchik Petro St., 5, Ladyzhyn, Vinnytsia Region, Ukraine, 24321, e-mail: spirinanatoly16@gmail.com).

Твердохліб Ігор Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці Вінницького національного аграрного університету: м. Вінниця, вул. Сонячна 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com.

Твердохлеб Игорь Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры общетехнических дисциплин и охраны труда Винницкого национального аграрного университета: г. Винница, ул. Солнечная 3, ВНАУ, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com.

Tverdokhlib Igor – candidate of technical sciences, associate professor of the department of general technical disciplines and occupational safety, Vinnytsia National Agrarian University: Vinnytsia, st. Sonyachna 3, VNAU, 21008, e-mail: igor_tverdokhlib@yahoo.com.