

УДК 664.8.037.1

Олена ПАЛІЄНКО

## ВИЗНАЧЕННЯ ІМПУЛЬСНИМ МЕТОДОМ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФРУКТІВ

*Запропоновано неруйнівний і прискорений імпульсний метод визначення теплофізичних параметрів фруктів із застосуванням мікропроцесорного приладу БИ-Т021. Переваги його – простота, швидкість і комплексність визначення теплофізичних характеристик, значення яких необхідні для ефективного зберігання та заморожування рослинної сировини. Доведено, що величина коефіцієнту теплопровідності фруктів залежить від вмісту в них вологи, температури та будови тканин.*

*Ключові слова:* теплопровідність, температуропровідність, мікропроцесорний прилад, фрукти.

*Палиєнко Е. Определение импульсным методом теплофизических параметров фруктов. Предложен неразрушающий и ускоренный импульсный метод определения теплофизических параметров фруктов с применением микропроцессорного прибора БИ-Т021. Преимущества его – простота, скорость и комплексность определения теплофизических характеристик, значения которых необходимы для эффективного хранения и замораживания растительного сырья. Доказано, что величина коэффициента теплопроводности фруктов зависит от состава в них влаги, температуры и строения тканей.*

*Ключевые слова:* теплопроводность, температуропроводность, микропроцессорный прибор, фрукты.

**Постановка проблеми.** Плодова сировина – основне джерело біологічно активних компонентів: вітамінів, поліфенольних сполук, мікроелементів, органічних кислот, пектинових речовин. Від інших продуктів рослинництва вона відрізняється одним спільним показником – високим вмістом води: до 82–91 %. Така насиченість тканини фруктів водою призводить до інтенсивного обміну речовин у період зберігання, підвищених витрат вологи на випаровування, зниженої стійкості до руйнівної дії фітопатогенних мікроорганізмів. Саме тому плодovu сировину доцільно переробляти відразу після її збирання. Наявність великої кількості води у фруктах зумовлює також низку особливостей при їх переробленні, зокрема заморожуванні.

Від теплофізичних властивостей рослинної сировини та готових продуктів залежить швидкість їх охолодження або нагрівання [1].

Теплофізичні властивості фруктів описуються загальними законами теплофізики. До основних теплофізичних характеристик, які мають

значення при переробленні та зберіганні плодової сировини, належать *теплопровідність*, *питома теплоємність* і *коефіцієнт температуропровідності*, які теоретично розраховуються за формулами, однак здебільшого визначаються експериментально.

Для визначення теплофізичних характеристик застосовують стаціонарні та нестаціонарні методи вимірювання. Наприклад, при стаціонарному методі під час вимірювання *теплопровідності* температура не залежить від часу, а при нестаціонарному температура є функцією часу. Перевага останніх полягає в тому, що досліджуваний матеріал не потребує тривалої витримки до досягнення постійної температури (що вкрай важливо для товарів із підвищеним вмістом вологи) і тим самим прискорюється вимірювання показників.

Сучасні засоби вимірювання теплофізичних величин нестаціонарними методами використовують нагрівачі як джерела теплового поля і окремо датчики температури для фіксації значень температури у визначених точках температурного простору.

Для визначення теплофізичних параметрів широко застосовують метод безперервного постійного або імпульсний метод лінійного джерела тепла. Основою для створення імпульсного методу комплексного визначення теплофізичних характеристик товарів є закономірності розвитку нестаціонарних температурних полів, створюваних дією миттєвих точкових, лінійних або плоских джерел тепла в необмеженому тілі [2].

Величина *коефіцієнта теплопровідності* фруктів залежить від вмісту в них вологи, температури й будови тканин. Наприклад, коефіцієнт теплопровідності становить для, Вт/(м<sup>2</sup>·К): води – 0.60, баклажанів – 0.37, огірків – 0.44, вишень – 0.57, картоплі – 0.61 [3].

*Питома теплоємність* рослинної сировини залежить від вмісту в них води, органічних, мінеральних речовин, структури та властивостей тканин. Хімічний склад є доволі сталою сортовою ознакою, яка змінюється за дуже різких змін метеорологічних умов вегетаційного періоду. Між вмістом води й питомою теплоємністю є пряма залежність. Так, у картоплі (75 % вологи) коефіцієнт теплоємності – 3550–3559 Дж/(кг·К), у вишнях (85.5 % вологи) – 3350–3850, у баклажанах (91.0 % вологи) – 3930–4030, в огірках (95 % води) – 4057–4103. Найвищу теплоємність – 4203 Дж/(кг·К) – має вода [3].

За існуючою класифікацією виділяють вільну та зв'язану (гідратаційну) вологу [4]. Під час заморожування вода може перебувати в твердому (лід), рідкому та пароподібному станах, здійснювати фазові переходи [5]. Ураховуючи істотний вплив різних фракцій води в рослинній сировині на технологічні параметри процесу зневоднення та якість кінцевого продукту, Інститутом технічної теплофізики АН України з використанням диференційної скануючої мікрокалориметрії за методикою [6] визначено вміст вільної та зв'язаної води в різних

видах фруктів. Вивчаючи залежність теплоємності рослинної сировини від температури в області фазового переходу лід – вода, вода – лід, отримано експериментальні дані з кількості замороженої (вільної) та незамороженої (зв'язаної) води, відповідно до вихідної вологості. Відомо [7], що міжфазовий перехід вода – лід є результатом низької теплопровідності об'єкта дослідження.

Основним фізичним процесом, який характеризує заморожування фруктів, є перетворення води в тверду фазу, що супроводжується зниженням температури всієї системи та виділенням теплоти льодоутворення. Наявність вільної води у фруктовій сировині, склад і концентрація розчинених у ній компонентів здійснює вплив на хімічні та біохімічні перетворення сполук, що відбуваються при заморожуванні досліджуваних зразків, і, як наслідок, на якість отриманих продуктів.

Воду, яка утворює навколо макромолекул колоїдної дисперсності (клітковини, крохмалю, протопектину тощо) тонку оболонку, відносять до зв'язаної [7; 8]. Молекули зв'язаної води орієнтовані в просторі, тому її діелектрична постійна в десятки разів менша, ніж у звичайної води [9]. Завдяки цьому зв'язана вода дуже міцно утримується біля поверхні частинок фази, не бере участі в розчиненні електrolітів, не кристалізується при заморожуванні й потребує звичайного додаткового випаровування, тому для видалення цієї форми води необхідні додаткові енерговитрати.

Здатність до переохолодження залежить від виду фруктів, ступеню їх зрілості, хімічного складу, вихідної вологості. Важливу роль у цьому відіграють високомолекулярні сполуки, гідрофільні колоїди, схильні до набубнявіння та зв'язування води, особливо цукри [10].

Для процесу заморожування характерними є: період переохолодження, що відбувається в інтервалі температур від 283 до 272 К; початок кристалізації при температурах 272–271 К; зона інтенсивної кристалізації при температурах 271–269 К; подальша кристалізація при температурах 269–265 К; завершення кристалізації [11; 12]. Величина граничної температури переохолодження визначається властивостями охолоджуваних видів фруктів.

Під впливом охолодження та заморожування вода клітин і тканин фруктів за тривалістю і характером кристалізується неоднаково, оскільки одна частина води вільна, а друга – міцно фіксована фізико-хімічними зв'язками з поверхнею реакційно здатних груп макромолекул [13; 14].

Питома теплоємність харчових продуктів унаслідок їхнього заморожування зменшується, оскільки теплоємність льоду в два рази нижча теплоємності води, а теплопровідність фруктів при їх заморожуванні зростає, оскільки кількість вимороженої води з пониженням температури збільшується.

*Мета роботи* – застосування нестационарного імпульсного експрес-методу вимірювання теплофізичних параметрів плодів яблук і груш під час охолодження та заморожування.

**Матеріали та методи.** Об'єкти дослідження – плоди яблук сорту *Golden Delouses* (Бахчисарайський р-н АР Крим, Україна) та груші сорту *William's* (Греція).

Для визначення теплопровідності яблук і груш імпульсним методом застосовано мікропроцесорний прилад БИ-Т021 з діапазоном вимірювання параметра від 0.02 до 1 Вт/м · К. Робота приладу базується на методі неруйнівного прискореного визначення теплопровідності. Цей метод полягає в створенні одностороннього короткочасного теплового імпульсу на поверхні зразка та реєстрації зміни температури на цій поверхні.

Прилад складається з пінополістиролового датчика циліндричної форми із вбудованим нагрівачем і системою термопар. Для кожного датчика, що входить до комплекту приладу, при градуванні проводиться обчислення коефіцієнтів, які заносяться в пам'ять і використовуються при вимірюваннях. Блок вимірювання та обробки генерує стабільний тепловий імпульс, який передається на нагрівач датчика. Після подачі теплового імпульсу вбудований мікропроцесор виробляє необхідну кількість вимірювань і обробку отриманих даних для виведення на індикатор отриманого значення теплопровідності.

Протягом періоду вимірювання на індикаторі відбиваються поточні значення напруги. Після закінчення виміру (4 хв) на табло відображається значення теплопровідності зразка в Вт/м · К. Проводиться не менше п'яти вимірювань на різних ділянках зразка, результатом яких є середнє значення.

**Результати дослідження.** Застосування мікропроцесорного приладу БИ-Т021 дає змогу за один дослід визначити теплофізичні характеристики зразка фруктів. Він безпосередньо контактує з нагрівальним середовищем прибору та навколишнім середовищем, тобто без вологонепроникної оболонки. Для забезпечення в досліді теплообмінних умов автоматично дотримано температурний режим. Щодо обрання форми та розміру зразка прилад надає можливість використовувати широкий спектр цих параметрів. Нами обрано циліндричну форму та розмір діаметром 15 мм і товщиною 12 мм. Це надає перевагу проти застосування стаціонарних приладів, для яких необхідно створити певні умови проведення досліду (тривалий час, встановлення температурних параметрів) і підготовки зразків для випробування фіксованої форми.

Коефіцієнт теплопровідності та температуропровідності залежить від двох визначальних факторів: вологості та температури. Ці показники визначено при нагріванні, охолодженні та заморожуванні зразків яблук і груш у діапазоні температур 265–333 К (таблиця).

## Вплив напрямку теплового потоку на теплофізичні властивості фруктів

Вид і сорт фруктів	Температура, К	Густина, кг/м <sup>3</sup>	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К
<i>Нагрівання</i>			
Яблука <i>Golden Delouses</i>	293–333	861±5	0.40
Груші <i>William's</i>		1006±3	0.43
<i>Охолодження</i>			
Яблука <i>Golden Delouses</i>	333–293	861±5	0.10
Груші <i>William's</i>		1006±3	0.33
<i>Заморожування</i>			
Яблука <i>Golden Delouses</i>	265–272	793±5	0.94
Груші <i>William's</i>		908±4	1.25

Густина фруктів при заморожуванні зменшується внаслідок розширення води, яка міститься в них. Проте ступінь зміни густини порівняно зі зміною інших теплофізичних властивостей (теплопровідності та температуропровідності) продуктів при охолодженні дуже невелика. У середньому густина фруктів при заморожуванні зменшується на 7.8–9.7 %. Отримані результати щодо коефіцієнта теплопровідності корелюють із літературними даними [1; 3; 15].

**Висновки.** Перевагами імпульсного експрес-методу з використанням мікропроцесорного приладу БИ-Т021 є простота, швидкість (4 хв) і комплексність визначення теплофізичних характеристик фруктів на прикладі яблук сорту *Golden Delouses* і груш сорту *William's*, значення яких необхідні для ефективного зберігання та заморожування рослинної сировини.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов, Г. И. Красовская. — М. : Агропромиздат, 1990. — 287 с.
2. Теория тепломассообмена : учеб. для техн. ун-тов и вузов / [С. И. Исаев, И. А. Кожин, В. И. Кофанов и др.] ; под ред. А. И. Леонтьева. — [2-е изд., испр. и доп.]. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. — 683 с.
3. Гинзбург А. С. Теплофизические характеристики картофеля, овощей и плодов / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. — М. : Агропромиздат, 1987. — 272 с.
4. Красавцев О. А. Калориметрия растений при температурах ниже нуля / О. А. Красавцев. — М. : Наука, 1992. — 117 с.
5. Масліков М. М. Холодильна технологія харчових продуктів / М. М. Масліков : навч. посібник. — К. : НУХТ, 2007. — 335 с.

6. Михайлик В. А. О ложных тепловых эффектах в сканирующей калориметрии влагосодержащих объектов / В. А. Михайлик, Е. О. Давыдова, В. В. Манк // Криобиология. — 1990. — № 1. — С. 17—20.
7. Анисимова А. В. Исследование незамерзающей воды растительных тканей методом ЯМР / А. В. Анисимова, Ф. Г. Миортахундинова // Физиология растений. — 1986. — Т. 23, № 4. — С. 799—804.
8. Mikhailyk V. Specific heat of apple at different moisture contents and temperatures / V. Mikhailyk, N. Lebovka // J. Food Engineering. — May 2013. — P. 424—452.
9. Латышев В. П. Изобарная удельная теплоемкость, энтальпия и доля вымороженной воды пищевых продуктов / В. П. Латышев. — М. : Изд-во стандартов, 1989. — 92 с.
10. Polley S. L. Compilation of thermal properties of foods / S. L. Polley, O. P. Shyder, P. A. Kotnour // J. Food Technology. — 1980. — N 11. — P. 78—94.
11. Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties, and glass transition of pears and apples / [N. D. Mrad, C. Bonazzi, N. Boudhrioua, N. Kechaou, F. Courtois] // Drying Technol. — 2012. — Vol. 30. — P. 1397—1406.
12. Rahman M. S. State diagram of foods: its potential use in food processing and product stability / M. S. Rahman // Trends Food Sci. Technol. — 2006. — Vol. 17. — P. 129—141.
13. Чижов Г. Б. Вопросы теории замораживания продуктов / Г. Б. Чижов. — М. : Пищевая пром-сть, 1990. — 271 с.
14. Ramaswamy H. S. Thermophysical properties of apples in relation to freezing / H. S. Ramaswamy, M. A. Tung // J. Food Sci. — 1981. — Vol. 46. — P. 724—728.
15. Singh R. K. Mathematical modelling of heat and moisture transfer-related properties of intermediate moisture applies / R. K. Singh, D. B. Lund // J. Food Process. — 1985. — Vol. 8. — P. 191—210.

Стаття надійшла до редакції 24.06.2014.

***Palienko O. Pulse method for determining thermo physical characteristics of fruits.***

**Background.** The urgency of a rapid method for the determination of thermo physical parameters of fruits and vegetables is obvious, since it affects the effectiveness of both storage and processing of plant materials. From the thermal properties of fruits and vegetables depends the speed of their cooling or heating, thus increasing energy consumption for these processes.

The *aim* of the study is application of non-stationary pulse rapid method of measuring thermo physical parameters of fruit of apples and pears during cooling and freezing.

**Material and methods.** Objects of research are fruit of the apples *Golden Delouses* (Bakhchisarai district, Crimea, Ukraine) and pear varieties *William's* (Greece). Pulse method is non-destructive determination of accelerated thermal characteristics using non-stationary device BI-T021. Thus there is a unilateral creation of a short heat pulse at the sample surface of raw fruits and registration of temperature changes on the surface.

**Results.** The use of microprocessor device BI-T021 enables one experiment to determine the thermal characteristics of the sample fruits. Thermal conductivity and diffusivity depends on two factors: humidity and temperature. These indicators have been defined by heating, cooling and freezing samples of apples and pears in the temperature range 265–333 K. When frozen fruits change their heat capacity, heat diffusivity, thermal conductivity, density. The results on thermal conductivity correlate with the literature [1; 3; 15].

**Conclusion.** The advantages of pulsed rapid method using a microprocessor device BI-T021 are the simplicity, speed (4 min) and the complexity of determining the thermal characteristics of fruit for example apples *Golden Delouses* sort and pears *William's*, whose values are required for efficient storage and freezing plant material.

*Keywords:* thermal conductivity, heat capacity, microprocessor unit, fruits.

#### REFERENCES

1. *Ginzburg A. S.* Teplofizicheskie karakteristiki pishhevyh produktov / A. S. Ginzburg, M. A. Gromov, G. I. Krasovskaja. — M. : Agropromizdat, 1990. — 287 s.
2. *Teorija teplomassoobmena* : ucheb. dlja tehn. un-tov i vuzov / [S. I. Isaev, I. A. Kozhinov, V. I. Kofanov i dr.]; pod. red. A. I. Leont'eva. — [2-e izd., ispr. i dop.]. — M. : Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 1997. — 683 s.
3. *Ginzburg A. S.* Teplofizicheskie karakteristiki kartofelja, ovoshhej i plodov / A. S. Ginzburg, M. A. Gromov. — M. : Agropromizdat, 1987. — 272 s.
4. *Krasavcev O. A.* Kalorimetrija rastenij pri temperaturah nizhe nulja / O. A. Krasavcev. — M. : Nauka, 1992. — 117 s.
5. *Maslikov M. M.* Holodyl'na tehnologija harchovyh produktiv / M. M. Maslikov : navch. posibnyk. — K. : NUHT, 2007. — 335 s.
6. *Muhajlik V. A.* O lozhnyh teplovyh jeffektah v skanirujushhej kalorimetrii vlagosoderzhashhij obektov / V. A. Mihajlik, E. O. Davydova, V. V. Mank // Kriobiologija. — 1990. — № 1. — S. 17—20.
7. *Anisimova A. V.* Issledovanie nezamerzajushhej vody rastitel'nyh tkanej metodom JaMR / A. V. Anisimova, F. G. Miortahundinova // Fiziologija rastenij. — 1986. — T. 23, № 4. — S. 799—804.
8. *Mykhailyk V.* Specific heat of apple at different moisture contents and temperatures / V. Mykhailyk, N. Lebovka // J. Food Engineering. — May 2013. — P. 424—452.
9. *Latyshev V. P.* Izobarnaja udel'naja teploemkost', jental'pija i dolja vymorozhennoj vody pishhevyh produktov / V. P. Latyshev. — M. : Izd-vo standartov, 1989. — 92 s.
10. *Polley S. L.* Compilation of thermal properties of foods / S. L. Polley, O. P. Shyder, P. A. Kotnour // J. Food Technology. — 1980. — N 11. — P. 78—94.
11. *Moisture sorption isotherms, thermodynamic properties, and glass transition of pears and apples* / [N. D. Mrad, C. Bonazzi, N. Boudhrioua, N. Kechaou, F. Courtois] // Drying Technol. — 2012. — Vol. 30. — P. 1397—1406.
12. *Rahman M. S.* State diagram of foods: its potential use in food processing and product stability / M. S. Rahman // Trends Food Sci. Technol. — 2006. — Vol. 17. — P. 129—141.
13. *Chizhov G. B.* Voprosy teorii zamorazhivanija produktov / G. B. Chizhov. — M. : Pishhevaja prom-st', 1990. — 271 s.
14. *Ramaswamy H. S.* Thermophysical properties of apples in relation to freezing / H. S. Ramaswamy, M. A. Tung // J. Food Sci. — 1981. — Vol. 46. — P. 724—728.
15. *Singh R. K.* Mathematical modelling of heat and moisture transfer-related properties of intermediate moisture applies / R. K. Singh, D. B. Lund // J. Food Process. — 1985. — Vol. 8. — P. 191—210.