

**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ  
ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

**ЗБІРНИК ПРАЦЬ**

*XVII Міжнародної наукової конференції*  
**«УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ І  
ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ТА  
ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ»**

*3-8 вересня 2018 р.*



**ОДЕСА  
2018**

Публікуються доповіді, представлені на XVII Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів і обладнання харчових та хімічних виробництв» (3 – 8 вересня 2018 р.) і присвячені актуальним проблемам підвищення енергоефективності в сфері АПК, харчових та хімічних виробництвах, розробки та впровадження ресурсо-та енергоефективних технологій та обладнання, альтернативних джерел енергії.

Редакційна колегія:

Доктор техн. наук, професор  
Кандидат техн. наук

О.Г. Бурдо  
Ю.О. Левтринська

## МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВИЙ ОРГКОМІТЕТ

<b>Єгоров</b> <i>Богдан Вікторович</i>	– голова, Одеська національна академія харчових технологій, ректор, д.т.н., професор
<b>Бурдо</b> <i>Олег Григорович</i>	– вчений секретар, Одеська національна академія харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Атаманюк</b> <i>Володимир Михайлович</i>	– Національний університет «Львівська політехніка», д.т.н., професор
<b>Васильєв</b> <i>Леонард Леонідович</i>	– Інститут тепло- і масообміну ім. А.В. Ликова, Республіка Білорусь, д.т.н., професор
<b>Гавва</b> <i>Олександр Миколайович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Гумницький</b> <i>Ярослав Михайлович</i>	– Національний університет „Львівська політехніка”, д.т.н., професор
<b>Долинський</b> <i>Анатолій Андрійович</i>	– Інститут технічної теплофізики, почесний директор, д.т.н., академік НАН України
<b>Зав’ялов</b> <i>Владимир Леонідович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Сукманов</b> <i>Валерій Олександрович</i>	– Полтавський університет економіки і торгівлі, д.т.н., професор
<b>Колтун</b> <i>Павло Семенович</i>	– Technident Pty. Ltd., Australia, Dr.
<b>Корнієнко</b> <i>Ярослав Микитович</i>	– Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”, д.т.н., професор
<b>Малежик</b> <i>Іван Федорович</i>	– Національний університет харчових технологій, д.т.н., професор
<b>Михайлов</b> <i>Валерій Михайлович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, д.т.н., професор
<b>Паламарчук</b> <i>Ігор Павлович</i>	– Національний університет біоресурсів та природокористування України, д.т.н., професор
<b>Снежкін</b> <i>Юрій Федорович</i>	– Інститут технічної теплофізики, директор, д.т.н., академік НАН України
<b>Сорока</b> <i>Петро Гнатович</i>	– Український державний хіміко-технологічний університет, д.т.н., почесний професор
<b>Тасімов</b> <i>Юрій Миколайович</i>	– Віце-президент союзу наукових та інженерних організацій України
<b>Товажнянський</b> <i>Леонід Леонідович</i>	– Національний технічний університет „Харківський політехнічний інститут”, д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України
<b>Ткаченко</b> <i>Станіслав Йосифович</i>	– Вінницький національний технічний університет, г. Вінниця, д.т.н., професор
<b>Черевко</b> <i>Олександр Іванович</i>	– Харківський державний університет харчування та торгівлі, ректор, д.т.н., професор
<b>Шит</b> <i>Михайл Львович</i>	– Інститут енергетики Академії Наук Молдови, к.т.н., в.н.с.
<b>Сухий</b> <i>Константин Михайлович</i>	– ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д. хім. н., професор

---

**СЕКЦІЯ 2.**

**МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ  
ПЕРЕНОСУ.  
ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ**

---

УДК 536.42

## ТЕПЛООБМІН ПРИ ПЛАВЛЕННІ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

Корінчевська Т.В., к.т.н., Снежкін Ю.Ф., д.т.н., професор, академік НАН України,  
Михайлик В.А., к.т.н., с.н.с.  
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна

## HEAT TRANSFER DURING MELTING AND CRYSTALLIZATION OF THE HEAT STORAGE MATERIALS

Korinchevska T.V., Snezhkin Yu.F., Mykhailik V.A.  
Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, , Ukraine

**Анотація.** На сьогодні задача акумулювання теплової енергії є досить актуальною. Перспективним напрямком є використання теплоакumuлюючих матеріалів з фазовим переходом. При цьому важливо вибрати матеріал, який зможе забезпечити теплові та експлуатаційні параметри процесу. Як такий матеріал запропоновано використовувати суміш на основі 85 % парафіну та 15 % буровугільного воску, що використовується в ливарному виробництві. В даній роботі розглянуті теоретичні та експериментальні дослідження процесу теплообміну при фазових переходах «тверде тіло - рідина», що відбуваються при нагріванні та охолодженні теплоакumuлюючого матеріалу. Для вивчення процесу була прийнята модель акумулятора капсульного типу, що складається з теплоакumuлюючих елементів, якими є тонкостінні металеві трубчасті контейнери, заповнені матеріалом з фазовим переходом. Експериментально та теоретично процес теплообміну з урахуванням фазового переходу теплоакumuлюючого матеріалу було змодельовано на прикладі окремого теплоакumuлюючого елемента. В результаті отримано розподіл температури в теплоакumuлюючому елементі під час охолодження (від 80 до 22 °С) та нагрівання при контакті зовнішньої стінки металеві капсули з теплоносієм, нагрітим до 80 °С та з теплоносієм, що нагрівається зі швидкістю 0,35, 0,77 і 1,17 К/хв. від 22 до 80 °С. Було підтверджено, що при використанні невеликих об'ємів капсул конвективною складовою в рівнянні теплопровідності можна знехтувати. Співставлення даних результатів з експериментальними показало адекватність результатів розрахунків. Порівняння результатів експериментальних та теоретичних досліджень підтверджують можливість використання принципу ефективної теплосмності для розрахунку теплообміну при фазовому переході та дозволяють досить точно передбачити фактичний час нагрівання та охолодження. Результати розрахунків також підтвердили дані, одержані експериментально – під час нагрівання з високою швидкістю спостерігається висока неоднорідність температурного поля в межах розрізу. Експериментально виявлено, що не має сенсу застосовувати високу швидкість нагрівання. В результаті визначені особливості кінетики нагрівання та охолодження при фазовому переході, що дозволило встановити раціональний режим нагрівання.

**Abstract.** At present, the problem of heat storage is very relevant. The promising direction is the use of the heat storage materials with phase change. It is important to choose a material that can provide the thermal and operational parameters of the process. As a material, a mixture of 85% wax and 15% brown coal wax was suggested to be used. This mixture is used in foundry work. In this paper, theoretical and experimental studies of the heat transfer process during solid - liquid phase change occurring during heating and cooling of the heat storage material are considered. The model of a heat storage system of capsular type was adopted to study the process. It consists of the heat storage elements – thin-walled metallic tubular containers filled with phase change material. The heat transfer process taking into account phase change of the heat storage material is experimentally and theoretically simulated on the example of a separate heat storage element. As a result, the temperature distribution is obtained in the heat storage element during cooling (from 80 to 22 °C) and heating at contact external wall of metal capsule with heat carrier heated to 80 °C and heat carrier, which heated with a speed of 0.35, 0.77 and 1.17 K/min. from 22 to 80 °C. It was confirmed that the convective component in the heat conduction equation can be neglected at using small volume of capsule. Comparison of theoretical and experimental results showed the adequacy of the results of calculations. Comparison of experimental and theoretical studies confirm the ability to use the principle of effective specific heat to calculate the heat transfer at the phase change and allows one to accurately predict the actual time of heating and cooling. The results of studies also confirmed the data obtained experimentally - high heterogeneity of the temperature field is observed within the cross section during heating with high speed. It is experimentally revealed that it makes no sense to use a high heating rate. As a result, features of the kinetics of heating and cooling have been determined during the phase change. This will

make it allowed to determine a rational mode of heating.

**Ключові слова:** акумулювання теплоти, теплоакумулюючі матеріали, фазовий перехід, теплообмін.

**Key words:** heat storage, heat storage materials, phase change, heat transfer.

**Вступ.** В законі України «Про енергозбереження» [1] визначені основні заходи щодо забезпечення енергозбереження та шляхи його стимулювання. Одним із завдань є стимулювання раціонального використання та економії паливно-енергетичних ресурсів, створення виробництва і широке застосування енергетично ефективних технологічних процесів, обладнання та матеріалів. Пошук ефективних шляхів енергозбереження стимулювало вивчення теплоакумулюючих матеріалів (ТАМ).

Перспективним є застосування теплоакумулюючих пристроїв з використанням ТАМ з фазовим переходом, в яких поглинання/виділення теплоти відбувається під час плавлення/кристалізації робочого тіла. При цьому такі пристрої можуть застосовуватись не тільки в системах акумулювання для опалення та гарячого водопостачання, але й в інших галузях промисловості та сільського господарства, зокрема в технологічних схемах сушіння.

**Формулювання проблеми та аналіз останніх досліджень.** Відомий досить широкий спектр речовин, які забезпечують температуру акумулювання від 0 до 1400 °С [2]. Класифікують їх в залежності від хімічного складу на неорганічні, органічні сполуки та евтектичні суміші. В межах кожного класу матеріали поведуться подібно [3]. Органічні сполуки включають парафіни, жирні кислоти, складні ефіри, спирти, гліколи та ін. До класу неорганічних сполук входять солі металів, гідрати солей та метали. Евтектичні суміші – композиції органічних і неорганічних сполук, що підбираються та комбінуються до досягнення потрібної температури плавлення.

Розглянувши переваги і недоліки кожного класу матеріалів, наведених в роботах [3-5], можна зробити висновок про приблизно однакову їх придатність для систем акумулювання теплової енергії. При виборі матеріалів слід керуватися тепловими та експлуатаційними характеристиками, які ці матеріали можуть забезпечити.

На сьогодні існує багато невирішених питань стосовно вибору недорогого теплоакумулюючого матеріалу, який задовольняв би ряд вимог. Для оцінки необхідне детальне вивчення його властивостей. На основі аналізу науково-технічної, патентної літератури та експериментальних досліджень було запропоновано для використання в системах акумулювання теплоти матеріали з фазовим переходом – органічні суміші на основі парафіну, буровугільного та поліетиленового воску, що використовуються в ливарному виробництві. В ціні вони вигідно відрізняються від чистих речовин, а використання відходів модельних сумішей після ливарного виробництва дасть можливість забезпечити зниження вартості теплового акумулятора у декілька разів.

Проаналізувавши властивості досліджених ТАМ, а саме теплоту фазових переходів, теплоємність, теплопровідність та термічну стійкість [6, 7], було відібрано для використання суміш, що складається з 85% парафіну та 15% буровугільного воску. Результати досліджень показали, що у запропонованого ТАМ досить низька теплопровідність, що є головною проблемою при використанні в системах акумулювання теплоти. Для усунення даного недоліку запропоновано теплоакумулюючий матеріал розміщувати в макрокапсулі з високою теплопровідністю. Для вивчення теплообміну при акумулюванні теплоти було прийнято модель акумулятора капсульного типу, що складається з корпусу та теплоакумулюючих елементів, якими є тонкостінні металеві труби, заповнені матеріалом з фазовим переходом. Процес теплообміну досліджували на прикладі окремого теплоакумулюючого елемента.

**Мета.** Метою даної роботи є моделювання процесів теплообміну та розрахунок температурного поля теплоакумулюючого елемента з урахуванням фазового переходу під час нагрівання та охолодження.

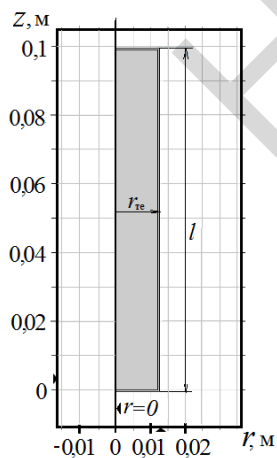
Для перевірки достовірності теоретичних розрахунків експериментально дослідити кінетику акумулювання теплоти теплоакумулюючим елементом та отримати розподіл температур в ТАМ під час нагрівання та охолодження.

**Результати та їх обговорення.** Для моделювання теплообміну при нагріванні та охолодженні ТАМ з фазовим переходом був використаний пакет COMSOL Multiphysics. Задана геометрія моделі (рис. 1) виконана в двовимірній проекції.

В системах акумулювання теплоти фазового переходу процеси теплообміну відбуваються за рахунок теплопередачі при плавленні-кристалізації, теплопровідності та конвекції. Для побудови математичної моделі введемо наступні припущення:

- через використання невеликого об'єму ТАМ в капсулах конвекція в рідкій фазі відсутня, теплопередача здійснюється тільки за рахунок теплопровідності;
- під час нагрівання теплові втрати в навколишнє середовище від ТАМ відсутні;
- внутрішні джерела теплоти відсутні;
- початкова температура по всьому об'єму ТАМ та контейнера однакова;
- границі розташування ТАМ незмінні.

В цьому випадку процеси теплообміну при фазових переходах ТАМ задаються



**Рис. 1. Геометрія теплоакумулюючого елемента.**

рівнянням теплопровідності у вигляді:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho \cdot c} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;  $c$  – питома теплоємність,  $\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $\text{К}$ ;  $t$  – час,  $\text{с}$ ;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ .

Початкові та граничні умови мають вигляд:

1) у початковий момент часу  $T(r, z, t = 0) = T_0$  ( $T_0$  – початкова температура теплоакумуючого матеріалу,  $\text{К}$ ).

2) на зовнішній поверхні контейнеру з ТАМ задаємо теплообмін з навколишнім середовищем у вигляді граничної умови Ньютона-Ріхмана:

$$-n \cdot (-k \nabla T) = \alpha \cdot (T_{ext} - T), \quad (2)$$

де  $n$  – нормаль до зовнішньої границі;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ ;  $T_{ext}$  – температура оточуючого середовища,  $\text{К}$ .

Коефіцієнт тепловіддачі концентрує в собі всю інформацію про складні процеси теплового контакту між тілом і оточуючим середовищем в приграничному шарі:

$$\alpha = \alpha_{ext}(x, p_a, T_{ext}), \quad (3)$$

де  $x$  – розмір, що характеризує геометрію стінки, яка знаходиться в контакті з оточуючим середовищем,  $\text{м}$ ;  $p_a$  – тиск навколишнього середовища,  $\text{Па}$ .

Математичний пакет COMSOL Multiphysics дозволяє при виборі граничних умов задавати вид конвекції (природна чи вимушена), оточуюче середовище (вода, повітря, мінеральне масло), геометричні параметри стінок, температуру тощо. Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі в математичному пакеті закладені критеріальні рівняння відповідно [8, 9].

3) при радіусі контейнеру  $r = 0$  задамо умову симетрії:  $\frac{\partial T}{\partial r} = 0$ .

Задача полягала у визначенні функції  $T(r, z, t)$  в області, де задовольняються умови:

$$0 \leq r \leq r_{\text{те}}, \quad 0 \leq z \leq l, \quad T_1 \leq T \leq T_2,$$

де  $T_1, T_2$  – початкова та кінцева температури процесів нагрівання та охолодження,  $\text{К}$ .

Щоб врахувати особливості фазових переходів при нагріванні-охолодженні теплофізичні властивості ТАМ були задані в залежності від температури, відповідно даним, отриманим в попередніх дослідженнях [6, 7]. При цьому вирази для теплоємності та теплопровідності згладжуються за допомогою спеціальних рівнянь, закладених в пакет COMSOL Multiphysics.

Фазовий перехід в вибраному ТАМ від твердого до рідкого стану відбувається в досить широкому інтервалі температур ( $30 \dots 86 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і характеризується декількома максимумами піка плавлення. Врахувати окремо кожен максимум досить складно, оскільки завершення плавлення одного компонента починається на фоні початку плавлення іншого. Тому для імітації фазового переходу використано принцип ефективної теплоємності [10]. Було прийнято температуру фазового переходу рівною максимальному значенню піка плавлення ( $58 \text{ }^\circ\text{C}$ ) та введено штучний температурний інтервал в околі температури фазового переходу, приблизно рівний інтервалу температур плавлення.

Даний принцип ґрунтується на тому, що при температурі фазового переходу ентальпія, як функція температури, зазнає стрибок на величину пропорційну теплоті фазового переходу. Ефективна теплоємність визначається як сума теплоти фазового переходу та теплоти, що накопичується за рахунок теплоємності:

$$\bar{c} = c + \frac{\partial L}{\partial T}, \quad (4)$$

де  $L$  – питома теплота фазового переходу,  $\text{кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$ .

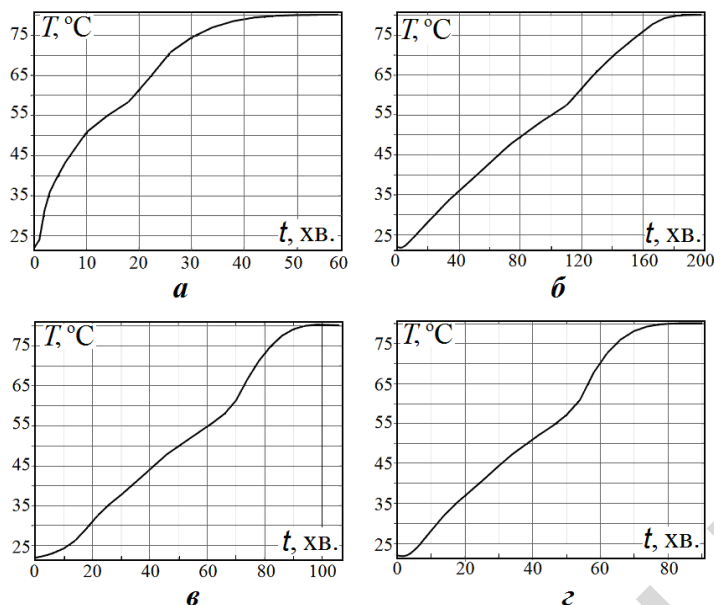
В результаті інтеграл теплоємності в температурному інтервалі фазового переходу дорівнює теплоті фазового переходу, а характер кривої залежності розрахованої ефективної теплоємності від температури наближений до характеру ДСК-кривої нагрівання ТАМ [6].

Для процесу нагрівання розглянуто наступні режими. В початковий момент часу приймаємо, що температура однорідна по всьому об'єму матеріалу і дорівнює  $22 \text{ }^\circ\text{C}$ . Граничні умови задаємо відповідно до режимів нагрівання ТАМ до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ : 1) контакт зовнішньої стінки теплоакумуючого елемента з теплоносієм (водою), нагрітим до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 2) контакт з теплоносієм, який нагрівається від  $22$  до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  зі швидкістю  $0,35, 0,77$  та  $1,17 \text{ К/хв}$ .

В результаті числового моделювання динаміки зростання температур отримано розподіл температур в теплоакумуючому елементі та зміну температури в його центрі. Дані щодо розподілу температур показали, що рух межі фазового переходу відбувається паралельно стінкам циліндричного контейнера. При високих швидкостях нагрівання спостерігається висока неоднорідність температурного поля в межах розрізу теплоакумуючого елемента. Під час контакту теплоакумуючого елемента з нагрітим до  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  теплоносієм

відбувається миттєве нагрівання його стінок до 80 °С, оскільки вони виготовлені з металу, що має високу теплопровідність.

З кривих зміни температури в точці, яка знаходиться в центрі теплоакуюючого елемента (рис. 2, а-г), видно, що при нагріванні температура матеріалу починає зростати від початкової (22 °С) до температури початку фазового переходу. Протягом цього періоду теплова енергія акумулюється за рахунок теплоємності матеріалу. Досягнувши температури початку фазового переходу, швидкість зростання температури матеріалу дещо зменшується – поглинається теплота, яка витрачається на процес плавлення. Після завершення плавлення температура ТАМ починає знову зростати доки не досягне температури теплоносія.



**Рис. 2. Криві зміни температури ТАМ в центрі теплоакуюючого елемента під час нагрівання теплоносієм зі сталюю (80 °С) (а) та змінною температурою: швидкість нагрівання 0,35 (б), 0,77 (в),**

При охолодженні в початковий момент часу приймаємо, що ТАМ знаходиться в рідкому стані з температурою 80 °С, однорідною по всьому об'єму матеріалу. Охолодження відбувається за рахунок природної конвекції повітрям з температурою 22 °С. Дані щодо розподілу температур показали, що процес кристалізації починається від стінок теплоакуюючого елемента, які перебувають в контакті з повітрям, та протікає вглиб матеріалу. Оскільки приймали, що теплообмін відбувається тільки за рахунок теплопровідності, то рух межі фазового переходу відбувається паралельно стінкам циліндричного контейнера.

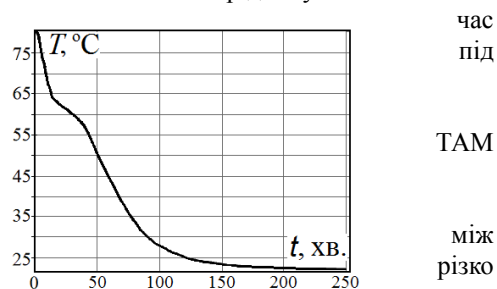
На кривій зміни температури в точці, що знаходиться в центрі теплоакуюючого елемента (рис. 3), на початковій ділянці кривої охолодження (до початку фазового переходу) спостерігається різке зменшення температури ТАМ. Це є наслідком значної різниці температур між повітрям та розплавленим матеріалом. В оточуюче середовище передається теплота, накопичена за рахунок теплоємності ТАМ в рідкому стані. Фазовий перехід відображається на кривій охолодження перегином. Під кристалізації вивільняється теплота, що дорівнює акумульованій час нагрівання теплоті плавлення. При цьому швидкість зниження температури ТАМ зменшується. Після завершення процесу кристалізації повітря передається теплота, накопичена за рахунок теплоємності в твердому стані. В результаті швидкість зниження температури ТАМ знову зростає. Після досягнення матеріалом 30 °С, через малу різницю температур контейнером та оточуючим повітрям, швидкість охолодження зменшується. На цьому відрізку кривої охолодження зміна температури має експоненціальний характер.

Експериментальне дослідження кінетики акумулювання теплоти проводили на експериментальній установці, що включає термостат та теплоакуючий елемент, геометрія якого співпадає з рис. 1. Для реєстрації температури ТАМ в процесі нагрівання та охолодження в його центральній частині була розміщена термопара. Друга термопара фіксувала температуру теплоносія в термостаті при нагріванні або в

Оскільки обраний ТАМ має широкий температурний діапазон плавлення, то на отриманих кривих не можна виділити чітку зону фазового переходу. Проте добре видно перегини, які відповідають фазовому переходу.

При великій різниці температур теплоносія та ТАМ (рис. 2, а), через нерівномірне нагрівання, зміна температури матеріалу за межами фазового переходу має нелінійний характер. Повністю матеріал розплавляється через ~28 хв. Температури теплоносія матеріал досягає за ~47 хв. Тому для практичного застосування кращим варіантом є поступове нагрівання теплоносія та матеріалу.

При одночасному нагріванні теплоносія та ТАМ (рис. 2, б-г) криві нагрівання на ділянках, що відповідають твердому та рідкому стану матеріалу, мають лінійний характер. Невелика швидкість нагрівання теплоносія забезпечує більш рівномірний процес зростання температури ТАМ. Матеріал досягає температури 80 °С за 185, 94 та 80 хв. при швидкості нагрівання теплоносія 0,35, 0,77 та 1,17 К/хв. відповідно.



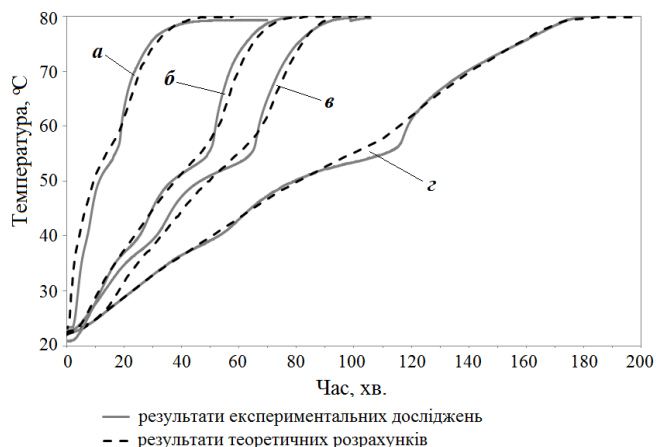
**Рис. 3. Зміна температури ТАМ в центрі теплоакуюючого елемента під час охолодження в повітряному середовищі з температурою 22 °С.**

повітряному середовищі при охолодженні. Показання термопар під час нагрівання-охолодження записувалися за допомогою прикладної комп'ютерної програми.

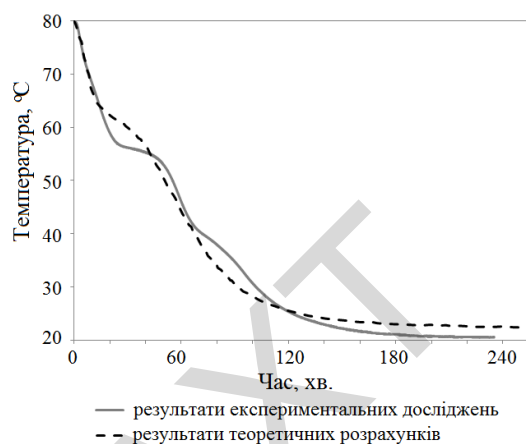
Експериментально змодельовані режими нагрівання та охолодження повністю співпадають з режимами, що використовувалися для теоретичних розрахунків.

Експериментально було виявлено, що не має сенсу застосовувати високу швидкість нагрівання, потужність нагрівача повинна бути такою, щоб температура ТАМ та теплоносія були близькими в кінці процесу нагрівання.

Співставлення результатів експериментальних та теоретичних досліджень, показало адекватність результатів розрахунків (рис. 4-5).



**Рис. 4. Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень теплообміну при контакті зовнішньої стінки капсули, заповненої ТАМ, з теплоносієм зі сталлю (80 °С) (а) та змінною температурою: швидкість нагрівання 1,17 (б), 0,77 (в),**



**Рис. 5. Порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень теплообміну при охолодженні капсули з ТАМ в повітряному середовищі з температурою**

Як вже було зазначено, в якості ТАМ розглядалася багатокомпонентна суміш, що має досить широкий діапазон фазового переходу та декілька максимумів теплопоглинання при нагріванні. Всі ці особливості врахувати в математичній моделі не вдалося. Тому в результаті теоретичних розрахунків маємо менш виражені перегиби на температурних кривих теплопоглинання, які відповідають фазовому переходу. Максимальна розбіжність становить 5,5 %. Крім того, застосована математична модель дозволяє достатньо точно розраховувати час нагрівання (рис. 4).

Щодо процесів теплообміну при кристалізації ТАМ (рис. 5), то тут розбіжності більш суттєві за рахунок того, що кристалізація – процес нерівноважний і часто супроводжується переохолодженням, величину якого не можливо точно прогнозувати. Час охолодження ТАМ до 25 °С розрахований та експериментально визначений має розбіжність в 5 %.

**Висновки.** При використанні невеликих об'ємів капсул конвективною складовою в рівнянні теплопровідності можна знехтувати. Використання принципу ефективної теплоємності для розрахунку теплообміну при фазовому переході дозволяє досить точно передбачити фактичний час нагрівання та охолодження. Використання математичного пакету COMSOL Multiphysics для моделювання і розрахунків дає можливість з досить високою точністю досліджувати процеси теплообміну при фазових переходах ТАМ не тільки окремого теплоакмулюючого елемента, а й досліджувати процеси в самому тепловому акумуляторі без попереднього виготовлення дослідного зразка, що дозволить підібрати його оптимальну конструкцію.

#### Література:

1. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР. Дата оновлення: 9.05.2015. URL: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/74/94-вр>.
2. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. Киев: Техника, 1991. 112 с.
3. Mehling H., Cabeza L.F. Heat and cold storage with PCM. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. 308 p.
4. Zalba B., Marin J.M., Cabeza L.F., Mehling H. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. P. 251–283.
5. Farid M.M., Khudhair A.M., Razack S.A.K., Al-Hallaj S. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*. 2004. Vol. 45. P. 1597–1615.
6. Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф., Коринчевская Т.В., Парняков А.С., Постников В.А. Теплофизические свойства композиционных теплоаккумулирующих материалов на основе органических соединений. *Промышленная теплотехника*. 2011. Т. 33, № 5. С. 96–103.

7. Снежкин Ю.Ф., Михайлик В.А., Коринчевская Т.В., Воробьев Л.И., Декуша Л.В. Удельная теплоемкость и теплопроводность теплоаккумулирующих материалов на основе парафина, буроугольного и полиэтиленового восков. *Problemele energeticii regionale*. 2014. № 2 (25). С. 35–41.
8. Incropera F.P., DeWitt D.P. Fundamentals of heat and mass transfer, New York; Chichester: John Wiley & Sons, 2002. 944 p.
9. Bejan A. Heat Transfer. New York: John Wiley & Sons, 1993. 675 p.
10. Alawadhi E., Amon C. H. Pcm thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2003. Vol. 26. № 1. P. 116–125.

УДК 664.292:547.458.88:66.083.2

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКТОРА НАСИЧЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ ЦУКАТІВ

Гузьова І.О., доц., к.т.н.  
Атаманюк В.М., проф., д.т.н.  
НУ «Львівська політехніка», м.Львів

## MODELING OF SATURATION REACTOR IN MANUFACTURE OF CANDIED FRUITS

I. Huzova, PhD in Technical Sciences, Associate Professor  
V. Atamanyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor  
Lviv Polytechnic National University

**Анотація.** За допомогою універсальної моделюючої програми ChemCad змодельований ізотермічний реактор насичення частинок гарбуза сахарозою, який працює за умов постійної її концентрації в сиропі і одночасним збільшенням концентрації сахарози в цукатах. Отримані числові значення результату моделювання, розрахункові та графічні залежності насичення цукатів сахарозою та проаналізовані отримані результати.

**Ключові слова:** реактор для насичення, бульбашковий, ізотермічний, режим змішування, моделювання, цукат.

**Abstract.** The isothermal reactor is designed to saturate the pumpkin particles with sugar. The constant concentration of sucrose in the syrup and the increase in sucrose concentration in the candied fruits are present in the reactor. The reactor is modeled in the universal simulation program ChemCad. Numerical simulation values, graphical and computational relationships are obtained, the result is analyzed.

**Key words:** saturation reactor, bubble, isothermal, mixing mode, simulation, candied fruit.

**Вступ.** Найважливішим завданням організації харчування населення є раціональне використання місцевих ресурсів, зокрема овочів та фруктів, як основних джерел біологічно активних речовин. Виробництво цукатів з місцевої каротиновмісної сировини дає змогу розширити асортимент овочевих цукатів вітчизняного виробництва. На даний час в Україні технологічні лінії виробництва цукатів є енергозатратними, з громістким обладнанням та великими непродуктивними втратами сировини. Саме тому, розрахунок основних процесів у виробництві цукатів з використанням сучасних моделюючих програм, які б дали змогу отримати достовірні дані для проектування нового обладнання є актуальним питанням сьогодення.

**Постановка проблеми.** На даний час способи виробництва цукатів є дуже різноманітними та не завжди досконалими. Перевитрата сиропу, сульфатування, оброблення сировини консервантами перед процесом насичення цукром та антиоксидантами перед процесом сушіння є основними причинами шкідливого впливу готового продукту на організм людини, високої вартості цукатів та великих затрат на виробництво в цілому.

Універсальна моделююча програма ChemCad дає змогу провести моделювання процесу насичення плодів гарбуза цукром. Результати моделювання дають змогу організувати технологічний процес з мінімально можливими енергозатратами та максимально можливим збереженням поживних речовин в готовому продукті, в якому основним консервантом буде цукор.

**Аналіз останніх публікацій.**

## ЗМІСТ

### ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ, ТЕПЛОВИХ, МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

ВПЛИВ МЕТОДИКИ РОЗМІЩЕННЯ СИРОВИННИХ ПОЛІН ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ДЕРЕВНОГО ВУГЛЛЯ ПІРОЛІЗНИМ СПОСОБОМ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ	
<b>Товажнянский Л.Л., Вель В.Є., Миронов А.М.</b> .....	5
ТЕПЛООБМІННИКИ КРІОМОДУЛІВ НА БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШАХ	
<b>Литвиненко М.П., Туз В.О.</b> .....	10
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ФІТОЕСТРОГЕННОЇ СИРОВИНИ	
<b>Петрова Ж.О., Слободянюк К.С.</b> .....	12
ЗВ'ЯЗОК ЯВИЩА ГІДРОДИНАМІЧНОЇ КАВІТАЦІЇ ТА ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОКАЗНИКІВ ВОДИ	
<b>Авдєєва Л.Ю., Жукотський Е.К., Макаренко А.А.</b> .....	17
КОНВЕКТИВНО-ТЕРМОРАДІАЦІЙНЕ СУШІННЯ ЯБЛУЧНИХ СНЕКІВ ЗА УМОВ РУХУ ПОВІТРЯ	
<b>Малежик І. Ф., Дубковецький І. В., Стрельченко Л. В.</b> .....	20
ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ЕКСТРАГУВАННЯ СІРЧАНОКИСЛОЇ МІДІ ЗА УМОВ ВАКУУМУВАННЯ	
<b>Симак Д.М. Склабінський В.І.</b> .....	24
ВПЛИВ РОЗЧИННИХ РЕЧОВИН НА СТАН ВОДИ В РОСЛИННИХ ТКАНИНАХ ТА КІНЕТИКУ ЇХ СУШІННЯ	
<b>Дмитренко Н.В.</b> .....	30
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДІОКСИДУ СУЛЬФУРУ ТА НІТРОГЕНУ НА ПРОЦЕС ПОГЛИНАННЯ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ ХЛОРОФІЛСИНТЕЗУЮЧИМИ МІКРОВОДОРОСТЯМИ	
<b>Дячок В.В., Катишева К.В., Гуглич С.І., Мандрик С.Т.</b> .....	35
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АБСОРБЦІЇ КИСНЮ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ	
<b>Ободович О.М., Сидоренко В.В.</b> .....	41
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО СОСТАВА БАКТЕРИАЛЬНОГО ПРЕПАРАТА «БИФАЦИЛ» НА ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА РАСПЫЛИТЕЛЬНОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ И КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КОНЕЧНОГО ПРОДУКТА	
<b>Переяславцева Е.А.</b> .....	44
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ	
<b>Рябова І.Б., Петухова О.А., Горносталя С.А., Щербак С.М.</b> .....	50
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ СУСПЕНЗОВАНОГО ГРИБА ШИЇТАКЕ В СИСТЕМІ «КРАПЛЯ-ПАРОГАЗОВЕ СЕРЕДОВИЩЕ»	
<b>Шаркова Н.О., Турчина Т.Я., Жукотський Е.К., Костянець Л.О.</b> .....	55
КОНВЕКТИВНЕ ЗНЕВОДНЕННЯ КОРЕНЕПЛОДІВ БАТАТУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	
<b>Шапар Р.О., Гусарова О.В.</b> .....	58
ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БЮКОРМІВ	
<b>Гнатів З.Я., Мосюк М.І., Дулеба В.П.</b> .....	62
ПРОЦЕС ЕКСТРАГУВАННЯ З ПЛОДІВ ШИПШИНИ У ВАКУУМНОМУ МІКРОХВИЛЬОВОМУ АПАРАТІ	
<b>Левтринська Ю.О., Альхурі Юсеф, Голінська Я.А., Терзієв С.Г.</b> .....	66

### МОДЕЛЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕНОСУ. ОПТИМІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ І СИСТЕМ

ТЕПЛООБМІН ПРИ ПЛАВЛЕННІ ТА КРИСТАЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ	
<b>Корінчевська Т.В., Снежкін Ю.Ф., Михайлик В.А.</b> .....	73