

The theoretical regularities of change of volume of gas content by the height of intake device of tool for extracting of organic sapropel are presented in the article. Graphical dependences were built based on the obtained solution using numerical method of this parameter.

Одержано 05.11.13

УДК 536:644.8

В.Ф. Ялпачик, доц., д-р техн.наук, С.В. Кюрчев, доц., канд. техн. наук, В.Г. Тарасенко, інж.

Таврійський державний агротехнологічний університет, м. Мелітополь

Моделювання процесу заморожування гарбузових ОВОЧІВ

Робота присвячена розробці математичної моделі процесу заморожування гарбузових овочів та її апробації по змінних в часі температурних полів, тривалості процесу і тепловим потокам шляхом порівняння розрахункових та експериментальних даних з метою контролю процесів в промислових умовах і подальшого вирішення задач енерго- та ресурсозбереження на агропромислових підприємствах.
моделювання, заморожування, кабачок, гарбуз, фазове перетворення, теплообмін

В.Ф. Ялпачик, С.В. Кюрчев, В.Г. Тарасенко

Таврійський державний агротехнологічний університет, г. Мелітополь

Моделирование процесса замораживания тыквенных овощей

Работа посвящена разработке математической модели процесса замораживания тыквенных овощей и ее апробации по переменным во времени температурным полям, продолжительности процесса и тепловым потокам путем сравнения расчетных и экспериментальных данных с целью контроля процесса в промышленных условиях и дальнейшего решения проблемы энерго- и ресурсосохранения в агропромышленных предприятиях.

моделирование, замораживание, кабачок, тыква, фазовый переход, теплообмен

Постановка проблеми. Відомо, що теплофізичні властивості різних видів овочів істотно залежать від температури, особливо в області від'ємних температур. Через це крайова задача теплопровідності для одержання температурних полів об'єктів заморожування має бути нелінійною, враховувати теплові ефекти, зумовлені протіканням фазових перетворень вода – лід.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі процесів тільки охолодження сировини достатньо було б провести необхідне моделювання в рамках лінійних крайових задач теплопровідності [1]. В області від'ємних температур, при протіканні фазового перетворення вода – лід, неможливо використовувати лінійні постановки. Тому, для вирішення задач даної роботи необхідно провести моделювання в рамках нелінійних крайових задач теплопровідності, що дозволить описувати як стадію охолодження, так і стадію заморожування в рамках однієї моделі, одного розрахункового алгоритму. Раніше нами вже було досліджено зміни теплофізичних властивостей кабачків і гарбуза [2].

Експериментальні дослідження процесу заморожування кабачків і гарбуза в даній роботі вдалося провести за умов вільної конвекції охолоджуючого повітря та у потоці пари азоту. При задовільному узгодженні експериментальних даних з вимірних та розрахованих значень температур в окремих точках об'єктів заморожування стане обґрунтованим використання розробленої методики та алгоритму для прогнозування промислових режимів заморожування в умовах примусової конвекції охолоджуючого повітря [3]. Результати для цих об'єктів відповідно до умов їх заморожування в експериментальних дослідженнях та умов можливих режимів промислового заморожування представлені нижче.

Об'єкти заморожування, в даній роботі кабачки і гарбуз, представляють собою тверді тіла, і зміни їх температурних профілів здійснюються в основному за рахунок молекулярної теплопровідності (кондуктивний теплоперенос). За геометрією ці тіла (як і їх нарізані кружками шматки) є суцільними, для них як тіл неправильної геометричної форми можливо визначити „псевдоцентр“ з координатою $x = 0$ та розмір $x = R$, як характерну відстань від псевдоцентру до поверхні. Відповідно, якщо температурне поле нестационарне та одомірне, моделюється функцією $T(x, \tau)$, то для псевдоцентру $x=0$ має бути записана умова симетрії температурного поля

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0. \quad (1)$$

Підсумовуючи наведені вимоги до математичної моделі процесу заморожування овочевої сировини, запишемо її у наступному вигляді, з використанням загальноприйнятих позначень:

$$\begin{cases} C_e(T)\rho(T)\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{x^r} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T)x^r \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; & \tau > 0, \\ T(x, 0) = f(x), \\ \lambda[T(\tau)]\frac{\partial T(\tau)}{\partial x} + \alpha_1(\tau)[T_{c1}(\tau) - T(\tau)]\frac{F_1}{F_2} = 0, \\ -\lambda[T(\tau)]\frac{\partial T(\tau)}{\partial x} + \alpha_2(\tau)[T_{c2}(\tau) - T(\tau)] = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Тут моделюючою функцією виступає температурне нестационарне і одомірне поле $T(x, \tau)$, $C_e(T)$ - ефективна питома теплоємність продукту, $\rho(T)$ - густина продукту, $\lambda(T)$ - ефективна теплопровідність (перколяція теплоти) продукту, $\alpha_1(\tau)$, $\alpha_2(\tau)$ - змінні в часі коефіцієнти тепловіддачі відповідно з внутрішньої та зовнішньої поверхні теплообміну, $T_{c1}(\tau)$, $T_{c2}(\tau)$ - температури охолоджуючого середовища, що омиває відповідно внутрішню та зовнішню поверхні.

Постановка завдання. Описану математичну модель процесів охолодження та заморожування успішно було апробовано проф. Оніщенко В.П., але для сировини тваринного походження. З метою перевірки адекватності моделі для рослинної сировини було проведено її апробацію.

Виклад основного матеріалу. В основу розрахункових співвідношень покладено напівемпіричні формули для коефіцієнтів тепловіддачі при натіканні потоку на плоску пластину:

$$Nu_\delta = Nu_{\min} + \sqrt{Nu_{\delta, lam}^2 + Nu_{\delta, turb}^2}, \quad (3)$$

$$Nu_{\delta, lam} = 0,664 \sqrt{Re_{\delta}} \cdot \sqrt[3]{Pr} , \quad (4)$$

$$Nu_{\delta, turb} = \frac{0,037 \cdot Re_{\delta}^{0,8} \cdot Pr}{1 + 2,443 \cdot Re_{\delta}^{-0,1} (Pr^{2/3} - 1)} . \quad (5)$$

Тут $Nu_{\delta, lam}$, $Nu_{\delta, turb}$ - відповідно числа Нусельдта для ламінарного та турбулентного пограничного прошарку газу чи рідини обтікання, Re_{δ} - число Рейнольдса для потоку газу чи рідини, Pr - число Прандтля при температурі газу чи рідини. Індекс δ в формулах (3-5) підкреслює значення характерного розміру при розрахунках чисел Re , Nu як довжини обтікання.

Заморожування кубиків гарбуза і кабачків за різних умов теплообміну розглянемо далі. В попередніх дослідженнях нами обґрунтовано доцільність заморожування гарбуза у вигляді нарізаних шматочків-кубиків, а кабачків – нарізаних кружечками [4]. Коли об'єкт заморожування має куб з ребром a , температури визначаються в координатному діапазоні від 0 (координата псевдоцентра) до $R=a/2$ (відповідає значенню найменшої напівтовщини). Характерний розмір при визначенні значень коефіцієнту тепловіддачі за формулами (3-5) залишається рівним πR . Щодо значень коефіцієнту геометричної форми кубика при його зовнішньому омиванні холодоносієм, то чисто геометрична оцінка об'єму і поверхні дає для нього значення 2.

Очевидно, що відмінність значень геометричної поверхні від поверхні теплообміну (узгодженої з розрахованим коефіцієнтом тепловіддачі), приведе до дещо менших від 2 коефіцієнтів геометричної форми, за різними оцінками біля 1,8...1,9. Тому нами прийнято в подальших розрахунках значення $\Gamma=1,85$.

Результати апробації математичної моделі, розрахункового алгоритму та теплофізичних властивостей гарбуза представлені на рис. 1 для процесу заморожування кубика гарбуза в потоці насиченої пари азоту.

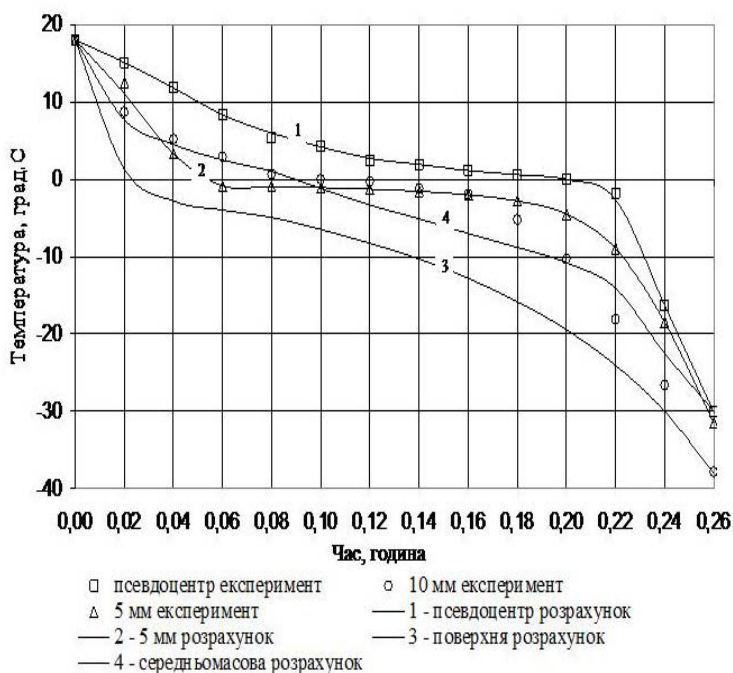


Рисунок 1 – Експериментальні та розрахункові дані зі змін температур у характерних точках кубика гарбуза в процесі заморожування в насиченій парі азоту

При цьому розрахункове значення швидкості руху пари азоту становило 0,206 м/с, а коефіцієнт тепловіддачі змінювався (за рахунок радіаційного теплообміну) від 13,8 до 13,3 Вт/м²К. Відповідно питомі значення теплових потоків змінювались від 2800 до 2060 Вт/м² за весь процес заморожування, в основному за рахунок змін температури поверхні кубика. Необхідно також додати, що кубик гарбуза в цьому досліді мав ребро $a=35$ мм і початкову температуру 18 °С, в кінці процесу значення температури псевдоцентру і середньомасової достатньо близькі.

Заморожування в розсолі також достатньо інтенсивний процес, навіть при відносно високих температурах, як, наприклад, в разі дослідження, представленого своїми результатами на рис. 2.

Тут температура розсолу становила мінус 12,3 °С, початкова температура кубика гарбуза 19,0°С, а ребро кубика – 48 мм.

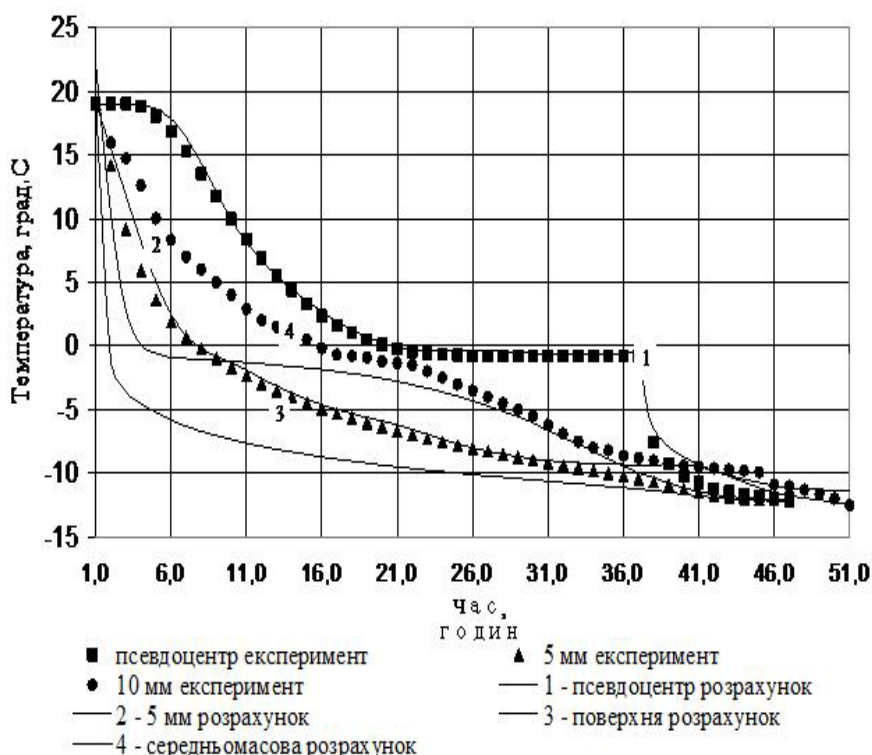


Рисунок 2 – Експериментальні та розрахункові дані зі змін температур у характерних точках кубика гарбуза в процесі заморожування в розсолі NaCl

Механізм теплообміну – конвективний, за умов вільної конвекції розсолу відносно кубика гарбуза, коефіцієнти тепловіддачі змінювались від значень близько 360 на початку до 130 Вт/м²К в кінці процесу заморожування, питомі значення теплового потоку відповідно від 3500 Вт/м² до 15 Вт/м². На рис. 2 представлені також результати апробаційних розрахунків, які демонструють розходження розрахункових і експериментальних даних на рівні до 0,5 -1,5 °С, за виключенням декількох точок в областях, де температура різко зменшується (наприклад, температура псевдоцентру в кінці процесу).

Звичайно, заморожування нарізаних кубиків гарбуза в розсолах NaCl в промислових умовах мабуть не є доцільним (скоріше в сиропях), але тут важливим є задовільні результати апробації. Інтенсивне заморожування кубиків гарбуза в потоці повітря при відносно високих швидкостях руху охолоджуючого повітря (у псевдозріженому шарі) є найбільш прийнятним для промислової реалізації, тому тут представляє інтерес проведення апробаційних розрахунків.

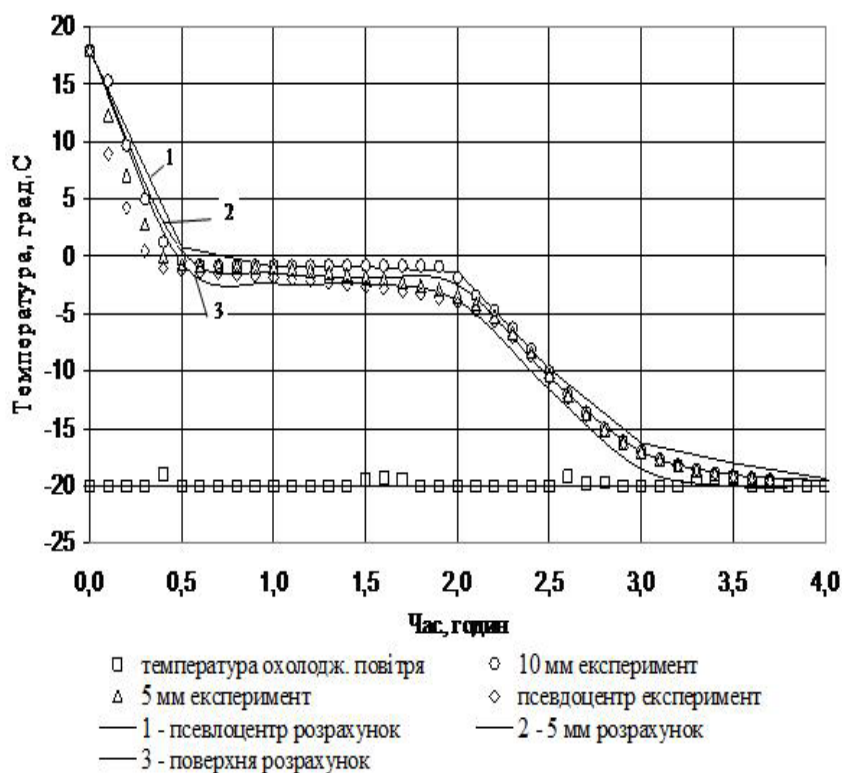


Рисунок 3 – Експериментальні та розрахункові дані зі змін температур у характерних точках кубика гарбуза в процесі заморожування в повітрі за умов вільної конвекції у холодильній камері

На рис. 3 наведені експериментальні та розрахункові дані, згідно з якими кубик гарбуза з ребром 32 мм, початковою температурою 18 °С заморожувався в повітрі холодильної камери, де підтримувалась температура біля мінус 20 °С. Розрахункові значення коефіцієнту тепловіддачі зменшувались від значень близько 13,0 на початку до значення 7,6 Вт/м²К в кінці процесу заморожування, питомі значення теплових потоків відповідно від 360 до 4,0 Вт/м².

Узгодження розрахункових і експериментальних результатів досліджень задовільне, при заморожуванні в повітрі також досягаються в часі процесу температурні поля з меншою неоднорідністю, ніж у вище наведених інтенсивних процесах заморожування.

Для апробації математичної моделі процесів заморожування нарізаних кружочків кабачків достатньо експериментальних даних з характеристик процесів заморожування цих об'єктів в охолоджуючому повітрі за довільних значень його температури та швидкості руху, зокрема, за умов вільної конвекції (з урахуванням радіаційного теплообміну в холодильній камері).

Якщо виходити з того, що нарізаний кружок кабачка являє собою циліндр радіусу R та висотою δ , то оцінка геометричних значень величини його об'єму та поверхні приводить до коефіцієнту його геометричної форми Γ , що дорівнює відношенню δ/R . Цей результат за відомих причин є приблизним, але коректним, оскільки при $R \rightarrow \infty$ об'єкт вироджується в нескінченну пластину товщиною δ , для якої $\Gamma=0$. Тому, в разі значень $\delta = 25$ мм та $R = 29$ мм одержуємо $\Gamma \approx 0,9$, що й було прийнято в подальших розрахунках. При цьому відносно площин зрізу об'єкт заморожування є симетричним, тому достатньо розрахувати температурне поле тільки для половини тіла (по висоті), тобто для значень координати x від R_1 до $R_2 = \delta/2$ з використанням граничної умови (1) або умови (2) з $\alpha_1(\tau)=0$. Розрахунок $\alpha_2(\tau)$ проводиться за наведеними вище формулами за умов вільної конвекції охолоджуючого повітря відносно об'єкту заморожування.

На рис. 4 представлено порівняння розрахункових та експериментальних даних для змін в часі температури в псевдоцентрі нарізаного кружечка кабачку, а також для повноти інформації і розрахункові криві для температур поверхні та середньомасової температури.

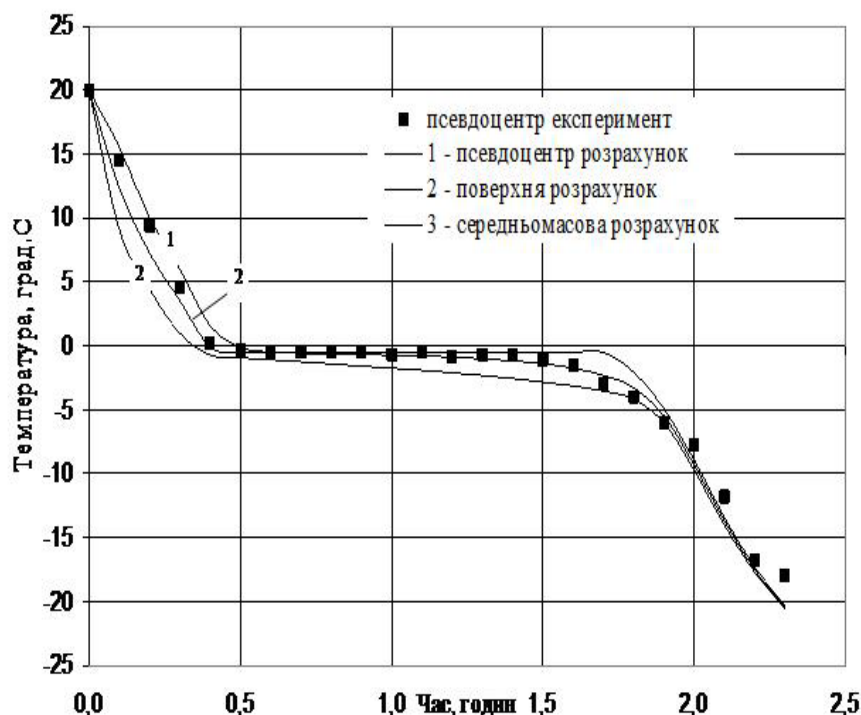


Рисунок 4 – Порівняння експериментальних значень температури в псевдоцентрі кружечка кабачка при його заморожуванні в повітрі холодильної камери за умов вільної конвекції

Узгодженість даних лежить в границях похибки експериментальних даних, яка складає не більше 1,5...2,0 °С за весь період заморожування.

Необхідно тут звернути увагу, що процес заморожування нарізаних кружків кабачка в промислових об'ємах може бути здійснено в конвеєризованих швидкоморозильних апаратах з сітчастою або суцільнометалевою (апарат типу пельменного) конвеєрною стрічками.

Висновки:

- сформульована нелінійна інтерполяційна математична модель для процесу охолодження і заморожування гарбузових овочів дозволяє розраховувати зміни температурних полів та теплових потоків з поверхні об'єктів холодильної обробки в часі;

- на формування температурних полів і теплових потоків при холодильній обробці овочевої сировини суттєвий вплив здійснюють не тільки температура і швидкість руху охолоджуючого середовища, а і геометрія об'єкту, наявність радіаційного теплообміну між об'єктом і огорожуючими конструкціями холодильного обладнання, теплофізичні властивості як холодоносія, так і овочевої сировини;

- на основі проведення апробації сформульованої математичної моделі одержані задовільні результати апробації – розходження між розрахованими та експериментальними значеннями температур в характерних точках об'єктів заморожування не перевищує похибки експериментальних даних ($\pm 1...2^{\circ}\text{C}$);

- за результатами проведеної апробації сформульованої математичної моделі геометрія овочевої сировини як об'єкта холодильної обробки характеризується значеннями коефіцієнта геометричної форми G , що дорівнює $(1,85 \pm 0,05)$ для кубиків нарізаного гарбуза, $(0,9 \pm 0,05)$ для нарізаних кружків кабачка.

Список літератури

- 1 Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М. : Высшая школа, 1967. – 592 с.
- 2 Ялпачик В.Ф. Определение теплофизических свойств кабачков при замораживании / В.Ф. Ялпачик, В.Г. Тарасенко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2007. – Вип.7. – Том 1. – С. 58 – 61.
- 3 Ялпачик В.Ф. Математичне моделювання процесів заморожування плодоовочевої сировини за різних умов теплообміну / В.Ф. Ялпачик // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь, 2011. – Вип.11. – Том.6. – С. 25 – 37.
- 4 Ялпачик В.Ф. Обоснование размеров кусочков тыквы и кабачков при замораживании / В.Ф. Ялпачик, К.Н. Стручаев, В.Г. Тарасенко // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2006. – Вип. 37. – С. 176-182.

Vladimir Yalpachik, Sergey Kyurchev, Vera Tarasenko

Tavria State Agrotechnological University

Modeling of frozen pumpkin vegetables

The work is devoted to developing a mathematical model of the process of freezing pumpkin vegetables and its approval by variable temperature fields over time, and duration of the heat flux by comparing the calculated and experimental data for process control in an industrial environment and further solve the problems of energy efficiency in the agro-industrial enterprises. Nonlinear interpolation formulated a mathematical model for the process of cooling and freezing pumpkin vegetables can expect changes in temperature fields and heat fluxes from the surface facilities refrigeration processing time. On the basis of testing of the formulated mathematical model obtained satisfactory results of testing.

modeling, freezing, squash, pumpkin, phase transformation, heat transfer

Одержано 13.11.13