

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.723.047

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/28>**Пазюк В.М.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Дмитренко Н.В.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

Іванов С.О.

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ГАРБУЗА ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ТЕПЛООВОГО СУШІННЯ

У статті досліджуються теплофізичні властивості насіння гарбуза (теплоємність та теплота випаровування вологи), особливості технології його теплового сушіння та вплив підвищених температур на збереження здатності насіння до проростання. Важливість дослідження обумовлена великим значенням якості посівного матеріалу для продовольчої безпеки країни та необхідністю створення надійних сучасних технологій його якісного сушіння після збирання врожаю. Дослідження проводили: методами диференціальної калориметрії, шляхом сушіння невеликих об'ємів матеріалу на стенді теплового конвективного сушіння та шляхом лабораторного пророщування висушеного посівного матеріалу в чашках Петрі. Отримано формулу залежності теплоємності насіння від температури і вологості матеріалу та експериментальну залежність теплоти випаровування вологи від зміни вологості насіння під час сушіння при різних температурах. Теплота випаровування вологи з насіння гарбуза з самого початку сушіння виявилась на 6% більшою від табличного значення теплоти випаровування чистої води. Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної вологи з самого початку процесу сушіння. Результати калориметричного вимірювання підтверджуються даними, отриманими при сушінні насіння на конвективному стенді. Обрахунок кінетичних кривих сушіння показав, що після попереднього прогріву насіння сушіння відбувається в періоді падаючої швидкості. Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів дозволили підібрати найбільш раціональні режими конвективного сушіння посівного насіння гарбуза. Нами рекомендовано сушити насіння до відносної вологості 12% при температурі теплоносія 40...50 °С. Це дозволить зберегти схожість насіння на рівні 96...98% та одночасно максимально унеможливити процеси самонагрівання та грибового ураження насіння при довготривалому зберіганні через зведення до мінімуму його внутрішніх біологічних процесів (дихання, ферментація).

Ключові слова: посівне насіння гарбуза, теплове сушіння, теплоємність, теплота випаровування води, технічні параметри сушіння.

Постановка проблеми. Виробництво якісного насіння є питанням продовольчої безпеки будь-якої країни. Насіння рослин для людства є як окремим джерелом збалансованих поживних речовин, так і матеріалом для вирощування необхідних сільгоспкультур. Для гарного зберігання зібраного насіння воно повинне мати вологість, при якій внутрішні біологічні процеси (дихання, ферментація) зведені до мінімуму, а процеси самонагрівання та грибового ураження максимально унеможливлені. В багатьох природних

зонах насіння одразу після збирання має значну вологість. До того ж, часто воно є недозрілим, і процес дозрівання може тривати 4...6 місяців. Для прискорення процесів зневоднення та дозрівання рекомендується додаткове сушіння насіння теплим повітрям. Від технологій теплового сушіння вимагається забезпечити збереження потенціалу врожайності насіння та його здатності до проростання (схожість).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Насіння за своїми фізико-хімічними властивостями

є колоїдним капілярно-пористим тілом, в якому переважає капілярно зв'язана волога. Схильність насіння до висушування залежить від виду і сорту рослин. Повільно сохне насіння бобів, гороху, кукурудзи. Швидше – дрібне насіння буряку, багаторічних трав. Вибране нами для дослідження насіння гарбуза має досить суттєві відмінності за фізико-механічними властивостями [1, с. 219–229] та унікальній хімічній склад з майже однаковим вмістом жирів, білків та вуглеводів [2, с. 30–33]. Воно гармонійно поєднує особливості насіння олійних (багато жирів), бобових (багато білку) та зернових (багато вуглеводів) культур.

Для правильного вибору технологічних параметрів процесу теплового сушіння насіння необхідне знання його теплофізичних властивостей. Відомий негативний вплив на насіння температур вищих за 55 °С, при яких відбувається коагуляція білку в зародку, що призводить до незворотного зниження його життєдіяльності. Тому при таких температурах насіння не повинно знаходитися більше 5 хвилин. Але теплове сушіння може і поліпшити якість насіння. Наприклад, прогрівання насіння ехінацеї пурпурної та чорнушки посівної протягом 3 діб при температурі 45 °С підвищило їх схожість від 72 % до 78 % та від 78 % до 86 % відповідно [3].

Підвищення температури значно пришвидшує процес сушіння, але коли швидкість випаровування води з поверхні насіння перевищує швидкість її переміщення всередині, утворюється перепад вологовмісту, який призводить до виникнення деформаційних напружень та розтріскування насіння. Проте, якщо тривалість сушіння буде значна, насіння може «запаритися». Тому тривалість сушіння при температурі 30...35 °С не повинна перевищувати 2...4 доби для насіння пшениці й гороху і 5...6 діб для насіння вівса та ячменя з початковою вологістю 22...24 % [3].

Для вибору технологічних параметрів процесу теплового сушіння посівного насіння гарбуза нам необхідне знання не лише його теплофізичних властивостей, але й впливу підвищених температур на його схожість. Але досі вивчалось сушіння в основному паренхіми гарбуза. В роботі [4, с. 422–428] було отримано змінювання в часі вологості гарбуза при тепловому конвективному сушінні. Результати показали, що сушіння гарбуза до чипсів займає 8 годин при 30 °С, і лише 2 години при збільшенні температури до 70 °С. Подібні результати було отримано в роботі [5, с. 345–352]. У роботі [6, с. 23–30] досліджували сушіння зовнішнім сонячним опроміненням,

опроміненням через сонячний тунель та за допомогою гарячого повітря ядра насіння гарбуза (без оболонки). До отриманих експериментальних результатів було застосовано автором деякі відомі моделі (як то модель дифузії Фіка), щоб дослідити переміщення вологи всередині насіння та визначити ефективні коефіцієнти дифузії.

Постановка завдання. Теплофізичні властивості посівного насіння гарбуза, особливості його сушіння та вплив підвищених температур на збереження здатності насіння гарбуза до проростання досі досліджено не було. Тому метою нашої роботи стало розроблення технології теплового сушіння посівного насіння гарбуза на основі дослідження: його теплофізичних властивостей (теплоємність та теплота випаровування вологи); енергоефективності процесу сушіння; тепломасообміну при сушінні; збереження здатності насіння до проростання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Насіння для дослідження брали з середини плодового тіла гарбуза сорту «Стофунтовий» безпосередньо перед дослідженнями.

Для визначення теплоємності і питомої теплоти випаровування води з насіння було застосовано створений в Інституті диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01 [7]. Завдяки використанню додатково розробленої калориметричної платформи з циліндричними комірками глибиною 36 мм, де перетворювач теплового потоку розміщений вздовж периметру стінок комірок, прилад дає можливість визначення також питомої теплоємності крупнодисперсного насіння гарбуза.

Визначення теплоємності здійснювали за стандартизованою методикою [8] методом покрокового сканування через кожні 5 °С. Теплоємність насіння гарбуза з початковою вологістю 0 та 60 % було визначено в діапазоні температур 30... 95 °С (рис. 1).

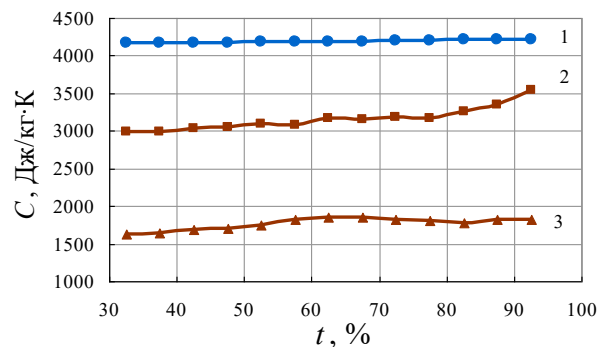


Рис. 1. Залежність від температури теплоємності: 1 – дистильованої води, 2 – насіння гарбуза з вологістю 60%, 3 – сухого насіння гарбуза

За отриманими експериментальними даними, з похибкою не більше 3 %, визначена формула для розрахунку теплоємності насіння гарбуза в діапазоні його відносної вологості $W = 0 \dots 60$ % та температури $t = 32,5 \dots 92,5$ °C:

$$c = 1632 + 1,78t + 23W, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Визначення теплоти випаровування води з насіння гарбуза здійснювали шляхом синхронного вимірювання зміни маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування води під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння зразка всередині калориметру ДМКИ-01. Поточні значення питомої теплоти випаровування води зі зразка визначали після закінчення дослідів шляхом співвіднесення кількості витраченої в калориметрі теплоти до відповідної кількості випареної вологи за кожний малий проміжок часу. Дослідження було проведено при температурах конвективно-кондуктивного сушіння 40, 50 та 60 °C. Результати надані у координатах залежності питомих витрат теплоти на випаровування (приведених до табличних для чистої води) від відносної вологості насіння (рис. 2).

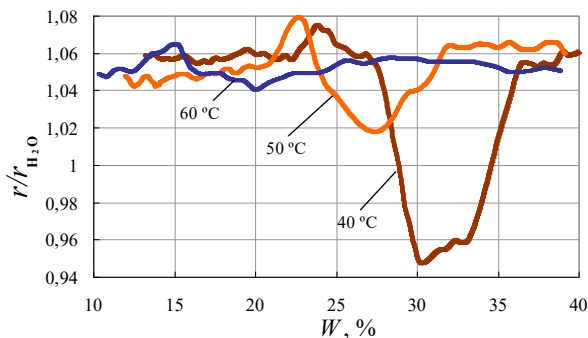


Рис. 2. Залежність від вологості матеріалу приведених питомих витрати теплоти на випаровування води з насіння гарбуза при різних температурах сушіння

Експериментально отримана питома теплота випаровування води з насіння гарбуза (рис. 2) перевищила табличні значення теплоти випаровування чистої води приблизно на 6 % ($r/r_{\text{води}} \approx 1,06$) при всіх досліджених температурах сушіння. Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної вологи з самого початку процесу сушіння. Крім того, на кривих спостерігається деякий піковий екзотермічний тепловий ефект. При збільшенні температури сушіння величина цього піку зменшується, а його початок зсувається в бік меншої вологості (але настає раніш за часом сушіння).

Для визначення енергоефективності процесу сушіння та змін в тепломасообміні при сушінні було проведено дослід з сушіння невеликих об'ємів матеріалу в елементарному шарі на стенді конвективного сушіння. Насіння насипали на сітчастий піддон розміром 100x50x4мм та розміщували на штанзі терезів в сушильній камері стенду. Для вимірювання зміни температури всередину насінин було вставлено термопари. Вибір режиму сушіння (тривалість до 8 годин при температурі теплоносія 40...60 °C) було зроблено за аналізом наведених вище літературних даних. Розрахунок кінетичних та енергетичних характеристик процесу сушіння здійснювали за методиками класиків теорії сушіння О. В. Ликова та О.С. Гінзбурга [9, 10].

Сушіння насіння з початковою вологістю 39% на конвективному сушильному стенді при температурі теплоносія 40 °C зайняло 4 години. Підвищення температури теплоносія до 50 °C скоротило час сушіння в 2,28 рази, а до 60 °C — в 4,14 рази.

За кривими кінетики сушіння було визначено криві швидкості сушіння (рис. 3). З рисунку 3 бачимо, що після попереднього прогріву сушіння насіння відбувається в періоді падаючої швидкості сушіння. Це корелює з даними рис. 2, які свідчать про видалення зв'язаної вологи з насіння з самого початку процесу сушіння ($r/r_{\text{води}} > 1$ з самого початку процесу сушіння). Підвищення температури теплоносія від 40 до 60 °C призвело до збільшення швидкості сушіння в 2,85 рази. При цьому критична точка максимальної швидкості сушіння W_k змістилася в область меншої вологості матеріалу.

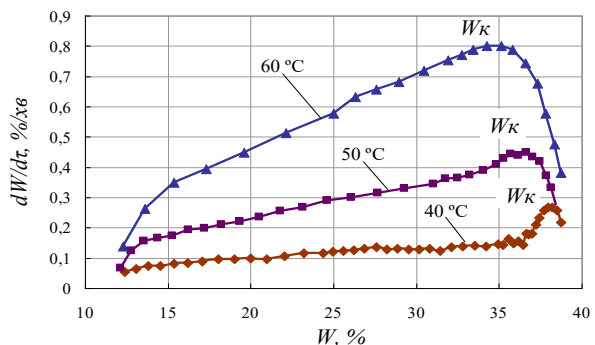


Рис. 3. Вплив температури теплоносія на швидкість конвективного сушіння насіння гарбуза. $W_N = 39\%$, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм

Процес різкого спаду швидкості сушіння при 40 та 50 °C після критичної точки W_k з наступним

виходом на меншу швидкість сушіння є незвичним для досліджених досі рослинних матеріалів. За досягнутим ступенем зневоднення насіння, цій спад співпадає з початком пікового зниження теплових витрат на випаровування (рис. 2). Візуальні спостереження поточного стану насіння дозволили припустити, що цей ефект пов'язаний з деформуванням та руйнуванням верхньої тонкої плівки-принасінника, а додаткове дослідження витрат теплоти на випаровування води з очищеного від плівки-принасінника насіння (рис. 4) підтвердило це припущення. Подальший повільний спад швидкості сушіння, вочевидь, обумовлено початком більш утрудненого та повільного видалення вологи через тверду шкірку насінини – склеротесту. Спадання швидкості до нуля наприкінці сушіння свідчить про видалення сильно зв'язаної води з середини насінин.

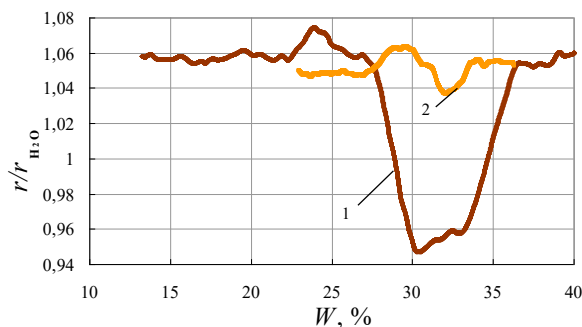


Рис. 4. Залежність від вологості матеріалу приведених питомих витрати теплоти на випаровування води з насіння гарбуза з плівкою-принасінником (1) та без неї (2) при температурі конвективно-кондуктивного сушіння 40 °С

Енергоефективність процесу сушіння в кожному момент часу визначали за критерієм Ребіндера (Rb), який показує відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу c_t , до кількості теплоти, витраченої на випаровування вологи r_p , за окремий малий проміжок часу. Розрахунок проводили за отриманими експериментальними даними теплофізичних характеристик насіння та кінетики його сушіння. На рис. 5, як приклад, наведено залежність $Rb = f(W)$ при температурі сушіння 40 °С. Залежності при інших температурах подібні за виглядом та близькі за значеннями.

Детальний розгляд енергоефективності процесу сушіння (рис. 6) вказує на його складність. Можна виокремити 8 етапів: *I* – йде процес початкового прогрівання насіння, який значно переважає над випаровуванням; *II* – переважає випаровування вологи з плівки-принасінника, та відбувається її деформування; *II*₄₀ – додатковий

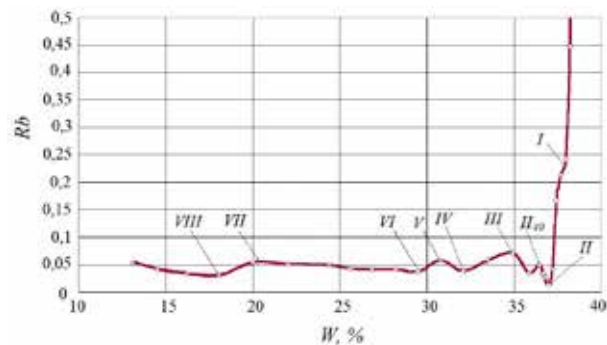


Рис. 5. Зміна критерію Ребіндера під час конвективного сушіння насіння гарбуза при температурі 40 °С. $W_N = 39\%$, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм

прогрів при переважанні випаровування вологи з плівки-принасінника; *III* – переважає прогрівання насіння після зневоднення плівки-принасінника; *IV* – різке полегшення процесу випаровування завдяки руйнуванню плівки-принасінника; *V* – переважає прогрівання наступних шарів насінин; *VI* – максимально активне випаровування вологи зі шкірки-склеротесту; *VII* – переважає прогрівання внутрішніх шарів насінин завдяки зневодненню шкірки-склеротесту; *VIII* – максимально активне випаровування вологи з внутрішніх шарів насінин, після якого прогрівання все більше переважає над випаровуванням, і процес подальшого сушіння стає занадто енерговитратним та недоцільним.

Знання залежності $Rb = f(W)$ дозволило встановити зв'язок між тепло- і вологообміном під час сушіння шляхом розрахунку зміни теплового потоку при змінюванні вологості матеріалу за основним рівнянням кінетики процесу сушіння:

$$q_\tau = q_N \cdot \frac{1}{N} \left(\frac{dW^c}{d\tau} \right) \cdot (1 + Rb),$$

де q_N – тепловий потік в період постійної (початкової максимальної) швидкості сушіння; W^c – абсолютна (по сухому залишку) поточна вологість матеріалу; N – постійна (початкова максимальна) швидкість сушіння, розрахована за значенням відповідної її абсолютної вологості матеріалу.

На початку процесу сушіння, під час прогрівання насіння, спостерігали велике значення теплового потоку при всіх обраних температурах сушіння (рис. 6). В другому періоді сушіння відбулося зменшення теплового потоку разом із збільшенням кількості видаленої вологи. При цьому, на самому початку зменшення теплового потоку спостерігали короточасне його збільшення, яке можна пояснити ефектом деформування та руй-

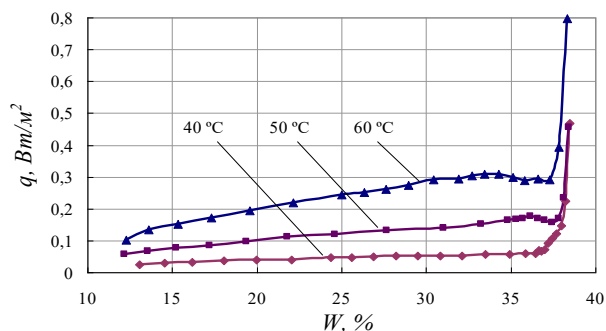


Рис. 6. Зміна теплового потоку під час конвективного сушіння насіння гарбуза при різних температурах теплоносія. $W_N = 39\%$, $V = 1,5$ м/с, $d = 10$ г/кг с. п., $\delta = 2$ мм

нування плівки-принасінника. Спроби досушити насіння до вологості меншої за 12% призвели до спадання майже до нуля теплового потоку, що свідчить про припинення тепломасообміну та недоцільність подальшого сушіння.

Перевірку здатності насіння гарбуза до проростання (схожості) після процесу теплового сушіння проводили шляхом лабораторного пророщування висушеного матеріалу в чашках Петрі.

Дослідження показало, що схожість насіння зменшується при збільшенні температури сушіння і становить: 98% після сушіння при температурі теплоносія 40 °С; 96% після сушіння при температурі 50 °С та 90% після сушіння при температурі 60 °С. Зауважимо, що додаткове дослідження насіння, яке було висушене при температурі теплоносія 80 °С, показало спадання до 0% його здатності до проростання, і тому застосування температур сушіння вищих за 60 °С було визнано недоцільними.

Висновки. Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів дозволили підібрати найбільш раціональні режими конвективного сушіння посівного насіння гарбуза. Нами рекомендовано досушувати насіння до відносної вологості 12% при температурі теплоносія 40...50 °С. Це дозволить досить енергоефективно провести процес сушіння, забезпечити збереження схожості насіння на рівні 96...98% та одночасно максимально унеможливити процеси самонагрівання і грибового ураження насіння при зберіганні за рахунок зведення до мінімуму його внутрішніх біологічних процесів (дихання, ферментації).

Список літератури:

- Joshi D.C., Das S.K., Mukherejee R.K. Physical properties of pumpkin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1993. № 54. P. 219–229.
- Васильєва А.Г., Круглова І.А. Химический состав и потенциальная биологическая ценность семян тыквы различных сортов. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2007. № 3. С. 30–33.
- Сушка семян URL: <https://www.agrodialog.com.ua/sushka-semyan.html> (дата звернення: 11.03.2022)
- Guiné, R. P., Pinho, S. F., Barroca M. J. Study of the convective drying of pumpkin. *Food and Bioprocess Processing*. 2011. № 89. P. 422–428.
- Hashim N., Daniel O., Rahaman E. A Preliminary Study: Kinetic model of drying process of pumpkins in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014. № 2, P. 345–352.
- Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin. *Journal of Food Engineering*. 2007. № 79. P. 23–30.
- Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів: пат. 84075 Україна: МПК G 01N25/26, G 01N25/28. № а200613266; заявл. 15.12.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 17. 10 с.
- ДСТУ ISO 11357-4:2010. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина. 4. Визначення питомої теплоємності. [Чинний від 2012-01-01]. Київ, 2011. 8 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. Москва, 1968. 472 с.
- Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Москва, 1973. 528 с.

Paziuk V.M., Dmytrenko N.V., Ivanov S.O. THERMOPHYSICAL QUALITY OF PUMPKIN SEEDS AND FEATURES OF ITS THERMAL DRYING

The article examines the thermophysical properties of pumpkin seeds (heat capacity and heat of moisture evaporation), features of its thermal drying technology and the effect of elevated temperatures on maintaining the ability of seeds to germinate. The importance of the study is associated with a large value of seed quality for food security of the country and the need to create reliable modern technologies for its high-quality drying after collection. The research was performed by differential calorimetry, by drying small volumes of material on a stand of thermal convective drying and by laboratory germination of dried seed in Petri dishes. The formula of dependence of heat capacity of seeds on temperature and humidity of material and experimental dependence of heat of evaporation of moisture on change of humidity of seeds during drying at different temperatures is received. The heat of evaporation of moisture from pumpkin seeds from the very beginning

of drying was 6% higher than the tabular value of the heat of evaporation of pure water. This indicates the removal of not only free but also bound moisture from the seeds from the very beginning of the drying process. The results of calorimetric measurements are confirmed by the data obtained by drying the seeds on a convective stand. Calculation of kinetic curves of drying showed that after preheating the seeds drying occurs in the stage of falling of speed. The research and analysis of the obtained results allowed to select the most suitable modes of convective drying of pumpkin seeds. We recommend drying the seeds to a relative humidity of 12% at a heat carrier temperature of 40... 50 ° C. This will maintain seed germination at 96... 98% and, at the same time, block the processes of self-heating and fungal damage to seeds during long-term storage by minimizing its internal biological processes (respiration, fermentation).

Key words: *pumpkin seed sowing, heat drying, heat capacity, heat of water evaporation, technical parameters of drying.*