

УДК 536.6 : 664.8.047
DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2954>

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ДИНІ ТА ТЕПЛОМАСООБМІН В ПРОЦЕСІ ЙОГО СУШІННЯ

Дмитренко Н.В., к.т.н., Іванов С.О., к.т.н., Дабіжа Н.О., к.т.н.
Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ

Анотація. Сушіння є основним технологічним етапом підготовки посівного матеріалу до тривалого зберігання. Під час сушіння відбувається видалення надлишкової вологи з насіння до рівня, при якому припиняється мікробне псування та мінімізується ферментативна активність. Для збереження схожості та сили проростання посівне насіння зазвичай зневоднюють в конвективних сушарках при таких параметрах сушильного агента, при яких не відбувається перевищення гранично допустимої температури нагріву матеріалу. В статті викладені результати всебічних досліджень насіння дини сорту «Ананас» як об'єкта сушіння з метою розроблення енергоефективних режимів зневоднення. З застосуванням диференціального мікрокалориметра ДМКІ-01 проведені експериментальні та розрахункові дослідження теплоємності насіння дини та витрат теплоти на випаровування з нього вологи. Надана формула для розрахунку питомої теплоємності насіння дини в діапазоні змінювання відносної вологості від 10,4 до 37,5 % та температури від 32,5 до 92,5 °С. За результатами досліджень тепломасообмінних процесів під час конвективного сушіння насіння дини при температурах теплоносія 40, 50 та 60 °С та експериментально визначеними теплофізичними властивостями проведені розрахунки критерію Ребіндера і густини теплових потоків на поверхні матеріалу. На підставі сумісного аналізу одержаних експериментальних та розрахункових даних зроблено висновок про те, що задля раціонального використання енергії та збереження якості та схожості насіння дини, його доцільно конвективно сушити при температурі теплоносія 40 °С до вологості 15 % відн.. Після досягнення насінням вологості 25% відн. необхідно знижувати енергопідведення, бо теплові потоки на поверхні матеріалу з цього моменту процесу сушіння стабілізуються на дуже низькому рівні.

Ключові слова: насіння дини, теплоємність, питома теплота випаровування, сушіння, тепломасообмін, критерій Ребіндера, теплові потоки.

Вступ. Агропромисловий сектор, основою якого є сільське господарство, забезпечує промисловість сировиною, а населення – високоякісними та безпечними харчовими продуктами. Одним з таких продуктів є плоди дини, які традиційно вирощують у східно-південних районах України. Крім вишуканого смаку, ніжного аромату та соковитої м'якоті, диня має лікувальні й профілактичні властивості та є цінним дієтичним продуктом. Для одержання високих урожаїв дині важливим завданням є підготовка і збереження посівного матеріалу. Однією з головних проблем заготівлі насіння дини є те, що воно швидко псується під час зберігання, що призводить до зниження його поживної цінності та схожості.

Сушіння є основним технологічним етапом підготовки посівного матеріалу до тривалого зберігання. Під час сушіння відбувається видалення надлишкової вологи з насіння до рівня, при якому в ньому мінімізується ферментативна активність та припиняється життєдіяльність мікробів. Для збереження схожості та сили проростання посівне насіння зазвичай зневоднюють в конвективних сушарках при таких параметрах сушильного агента, при яких не відбувається перевищення гранично допустимої температури нагріву матеріалу.

Дослідження насіння дини як об'єкта сушіння потребує експериментального визначення його теплофізичних властивостей та закономірностей тепломасоперенесення в процесі зневоднення задля підбору доцільних технологічних параметрів, що дозволить отримати якісний продукт. Використання результатів цих досліджень при розробленні енергоефективних режимів зневоднення і проектуванні та оптимізації сушильних установок є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що в літературних джерелах було знайдено дуже мало досліджень щодо сушіння насіння дини.

Так у статті [1] показано, що отримання якісного насіннєвого матеріалу дині потребує низькотемпературних режимів сушіння, бо тривала дія температури негативно впливає на схожість насіння. Це підтверджено дослідженнями, в яких схожість при температурі 38 та 41 °С зменшувалась на 2...10%, а в деяких випадках до 16%.

В дослідженні [2] наведені данні з сушіння насіння дини при температурі теплоносія 40, 50, 60 °С і відносній вологості повітря 10, 20, 30, 40, 50 %. Збільшення вологості повітря і зменшення температури сушіння збільшує ту рівноважну вологість насіння дини, якої можна досягти під час зневоднення. Так, при температурі 70°С можлива рівноважна вологість насіння дини після висушування становить від 0 до 9 %, при 60 °С – від 0 до 10 %, при 50 °С – від 0 до 12 %, а при 40 °С – від 0 до 13 %. Температура теплоносія і його

вологість впливають також на інтенсивність та коефіцієнт сушіння. При температурі теплоносія 60 °С та відносній вологості повітря 30 % тривалість сушіння насіння дині склала 80 хв з коефіцієнтом сушіння 13,5 хв⁻¹.

В роботі [3] вивчали періодичне та безперервне сушіння насіння дині «Неве». Насіння сушили в сушарці з нерухомим шаром при температурі 60 °С та швидкості повітря 1 м/с з подальшим прогнозуванням кінетики сушіння з використанням емпіричних моделей.

Раніше вже були визначені деякі теплофізичні властивості насіння дині. Відомо, що збільшення температури від 30 до 100 °С приводить до зниження його питомої теплоємності від 2,995 до 1,596 кДж/(кг·К), а теплопровідності від 3,62 до 0,46 Вт/(м·К) [4]. Але рівняння теплоємності та теплопровідності тут не були виведені.

Дослідження змінювання критерію Ребіндера Rb під час сушіння насіння дині та змінювання густини теплових потоків на поверхні матеріалу при різних температурах досі не проводилися. Але, зазвичай, чисельні значення Rb в процесі сушіння рослинних матеріалів змінюються в межах від 0,2 до 0,003. Наприклад, при конвективному сушінні моркви від вологості 800 до 50 % абс., чисельні значення Rb змінювались від 0,151 до 0,0038 [5].

Аналіз існуючих досліджень показав, що для повної характеристики тепломасобміну в процесі сушіння насіння дині, забезпечення ефективності витрат теплоти і правильного вибору технологічних параметрів процесу сушіння потрібно визначити питому теплоємність та питому теплоту випаровування води з насіння дині. Це дозволить розрахувати критерій Ребіндера процесу сушіння, теплові потоки на поверхні матеріалу та правильно підібрати технологічні параметри процесу сушіння насіння дині.

Тому нами було поставлено завдання дослідити змінювання в процесі сушіння теплоти випаровування води з насіння дині сорту «Ананас» (не гібрид), експериментально визначити його питому теплоємність та розрахувати за цими даними критерій Ребіндера і теплові потоки під час конвективного сушіння насіння за різними температурними режимами.

Матеріали і методи. Для дослідження був вибраний сорт дині «Ананас» (не гібрид). Це середньоранній сорт, від висадки розсади до збору першого врожаю якого проходить приблизно 65-70 днів. Вирощується у відкритому ґрунті. Рослина сильна, з густим, рясним листям, з добре розвинутою кореневою системою. Плоди дині «Ананас» витягнуто-овальної форми, середніх розмірів, насичено-жовтого кольору. Вага – від 1,5 до 3 кг. Шкірочка шорстка, покрита густою, дрібною сіткою, щільна. На зрізі плоди кремово-жовтого кольору, з насінневою камерою середніх розмірів, великою кількістю насіння і м'ясистим ендокарпієм (м'якоттю).

Для дослідів стиглу диню розрізали і з насінневої камери виймали м'якоть з насінням, яке ретельно відокремлювали від м'якоти, просушували та зберігали в прохолодному місці.

Для визначення теплоємності насіння дині та питомої теплоти випаровування води з нього застосовували диференціальний мікрокалориметр ДМКИ-01, що розроблений у відділі теплотерії Інституту технічної теплофізики НАН України [6]. Прилад являє собою сукупність функціонально поєднаних теплового блоку, аналітичних ваг, компресора, блоку електронного керування і персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Для дослідження досить крупного, з великим термічним опором насіння дині було використано калориметричну платформу з циліндричними комірками глибиною 36 мм, в яких перетворювач теплового потоку розміщений вздовж периметру стінок комірок.

Визначення теплоти випаровування за допомогою ДМКИ-01 засновано на синхронному вимірюванні змінювання маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачається на випаровування під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння. Поточні значення питомих витрат теплоти на випаровування води зі зразка під час сушіння визначали після закінчення досліду за формулою:

$$r_i = \frac{\int_{\tau_i}^{\tau_{i+1}} q(\tau) d\tau}{m(\tau_i) - m(\tau_{i+1})}, \quad (1)$$

де r_i – питома витрата теплоти на випаровування за час сушіння від τ_i до τ_{i+1} , кДж/кг;

τ_i та τ_{i+1} – поточні моменти часу процесу сушіння, с;

$q(\tau)$ – тепловий потік всередині робочої камери як функція часу, кДж/с;

$m(\tau_i)$ та $m(\tau_{i+1})$ – маса зразка в моменти часу τ_i та τ_{i+1} , кг.

Визначення питомої теплоємності за допомогою ДМКИ-01 здійснювали за стандартизованою методикою методом покрокового сканування через кожні 5 °С [7]. На підставі отриманих даних визначали питому теплоємність насіння при температурі середини температурного ступеня за формулою:

$$c_i = \frac{\int_{\tau_{\text{поч}}}^{\tau_{\text{кін}}} q(\tau) d\tau}{m(t_{\text{кін}} - t_{\text{поч}})}, \quad (2)$$

де c_i – питома теплоємність матеріалу при температурі середини температурного кроку, кДж/(кг·К);

m – маса матеріалу, кг;

$t_{\text{поч.}}$ та $t_{\text{кін}}$ – температура початку та кінця температурного кроку, К.

Дослідження тепломасообмінних процесів при зневодненні насіння дині проводились на конвективному сушильному стенді за методикою, що викладена в монографії [5]. Насіння насипали на сітчастий піддон розміром 100х50х4 мм, який розміщували на штанзі терезів в середині сушильної камери. Для відстеження змінювання температури матеріалу під час сушіння в середину насіння вставляли термопару. Дослідження кінетики сушіння насіння дині в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді здійснювалися за режимами, вибір яких було зроблено за літературними даними [2, 8-10]. Для збору інформації під час досліджень використовувався персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням. За експериментальними даними одержані криві сушіння насіння дині $W = f(\tau)$ та температурні криві $t = f(\tau)$. При певній обробці цих даних встановлена залежність середньооб'ємної температури матеріалу від вологовмісту.

Для оптимізації інтенсивності теплопідведення в процесі сушіння за встановленою залежністю середньооб'ємної температури насіння дині від його вологовмісту, а також за експериментально визначеними питомими теплоємністю насіння та витратами теплоти на випаровування з нього вологи проводилися розрахунки числа Ребіндера за формулою:

$$Rb_i = \frac{c_i}{r_i} \left(\frac{dt_i}{du_i} \right), \quad (3)$$

де $u_i = (m_i - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}}$ – вологовміст зразка по відношенню до маси сухої речовини у певний момент сушіння, кг/кг с.м.

Критерій Ребіндера характеризує співвідношення кількості теплоти, що витрачена на нагрівання матеріалу, до кількості теплоти, що витрачена на випаровування з нього вологи, за нескінченно малий проміжок часу, тобто визначає ефективність витрат теплоти на процес випаровування і за фізичним змістом є критерієм оптимізації. Оскільки нагрівання матеріалу є нераціональною витратою теплоти під час сушіння, бажаним є зведення величини Rb до мінімально можливої під час певного процесу. Знання залежності між Rb і вологовмістом матеріалу дозволяє привести рішення рівняння масообміну до відповідного рішення рівняння теплообміну. Якщо визначити відносну густину теплового потоку $q^*(\tau)$ як відношення потоку тепла в період падаючої швидкості сушіння $q(\tau)$ до потоку тепла в період постійної (максимальної) швидкості сушіння q_N , тоді, як показано в [11], можна одержати співвідношення:

$$q^*(\tau_i) = \frac{q(\tau_i)}{q_N} = \left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right)^* (1 + Rb_i), \quad (4)$$

де $\left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right)^* = \frac{100}{N} \left(\frac{du_i}{d\tau_i} \right) = \frac{1}{N} \left(\frac{dW_i^C}{d\tau_i} \right)$ – відносна швидкість сушіння;

$N = \frac{dW_N^C}{d\tau_N}$ – нормувальний коефіцієнт, який визначається в періоді постійної (максимальної)

швидкості сушіння;

$W_N^C = u_N \cdot 100$ – абсолютна вологість матеріалу в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння, %.

Співвідношення (4) встановлює зв'язок між тепло- і вологообміном під час сушіння за допомогою критерію Rb та є основним рівнянням кінетики процесу сушіння. Воно дозволяє дослідити змінювання густини теплового потоку $q(\tau_i)$ в процесі сушіння, уникаючи визначення коефіцієнту теплообміну, за оберненою залежністю:

$$q(\tau_i) = q^*(\tau_i) \cdot q_N, \text{ кВт/м}^2, \quad (5)$$

де $q_N = r_N \cdot \frac{\Delta m_N}{\Delta \tau_N \cdot S}$ – помножена на теплоту випаровування кількість вологи, яка видалена з 1 м² поверхні сушіння (S) за 1 с в періоді постійної (максимальної) швидкості сушіння.

Результати досліджень. Теплоємність насіння дині з вологістю $W = 0 \dots 37,5$ % відн. визначена в діапазоні температур $t = 32,5 \dots 97,5$ °C (рис. 1).

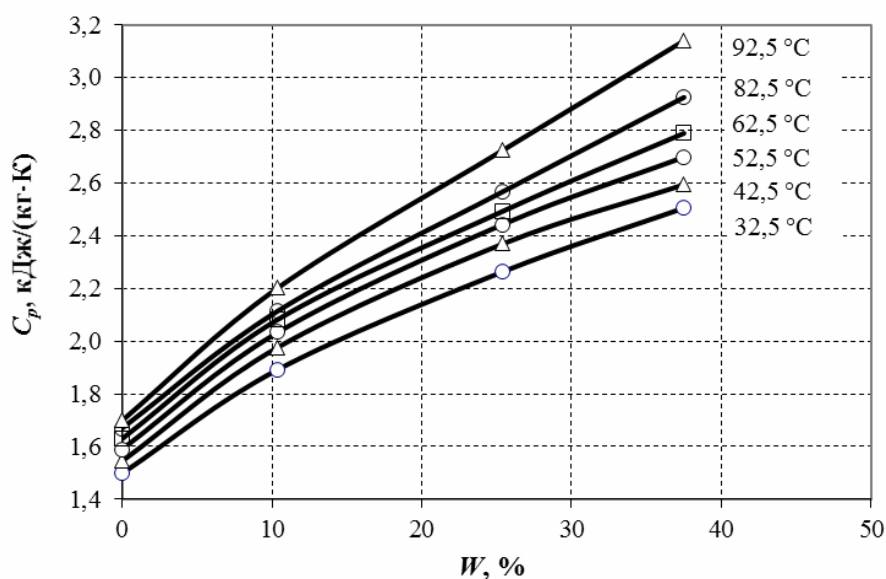


Рис. 1 – Залежність питомої теплоємності насіння дині сорту «Ананас» від відносної вологості при різних температурах

Як видно з рис. 1, при досягненні відносної вологості $W \approx 10\%$ відбувається злам лінійності графіків залежності теплоємності насіння дині від вологості, такий самий як і для інших рослинних тканин [12]. Це явище обумовлено деградацією спіральної структури білків при зневодненні, бо саме молекули води формують спіраль з молекули білка. Без води структура білків хаотична, вони мають теплоємність меншу за теплоємність білків, що закручені у спіраль. Оскільки під час конвективного сушіння рідко вдається досягнути вологості насіння менше 10%, була проведена лінійна апроксимація одержаних даних в діапазоні вологості насіння $W = 10,4 \dots 37,5$ % відн. за температур $t = 32,5 \dots 92,5$ °C та визначена формула для розрахунку теплоємності насіння дині сорту «Ананас» з похибкою не більше 2%:

$$C_p(W, t) = 1,6569 + 0,01488W + 0,002t + 0,0002tW, \text{ кДж/(кг·К)}. \quad (6)$$

Дослідження витрат теплоти на випаровування вологи з насіння дині проводили при температурах конвективно-кондуктивного сушіння 40, 50 та 60 °C (рис.2).

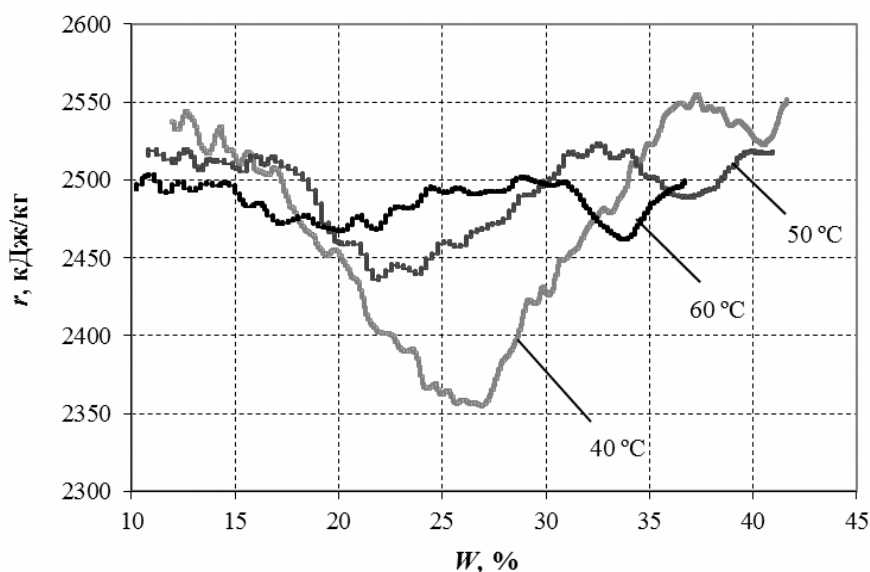


Рис. 2 – Залежність питомих витрат теплоти на випаровування вологи з насіння дині сорту «Ананас» від відносної вологості під час конвективно-кондуктивного сушіння при різних температурах

Як видно (рис. 2), експериментально одержані питомі витрати теплоти на випаровування води з насіння дині перевищили приблизно на 6 % табличні значення теплоти випаровування чистої води для кожної з температур (2406, 2382 та 2358 кДж/кг, відповідно). Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної води з самого початку сушіння, хоча традиційно вважається, що істотне зростання енерговитрат на випаровування відбувається на заключному етапі сушіння і обумовлено початком видалення гігроскопічної води матеріалу. При тому, загальне збільшення температури сушіння з 40 до 60 °C зменшує питомі витрати теплоти на випаровування відповідно зменшенню питомої теплоти випаровування чистої води.

На експериментальних кривих (рис. 2) спостерігаються також піки зниження теплових витрат на випаровування, початок яких зсувається в бік більш низької вологості при збільшенні температури сушіння. Додаткові візуальні спостереження поточних змін стану насіння під час сушіння дозволили ідентифікувати це явище як тепловий ефект, що пов'язаний з руйнуванням спочатку верхньої тонкої оболонки насіння – плівки-принасінника (перший пік екзотермічного ефекту), потім нижньої твердої оболонки – склеротесту (другий пік екзотермічного ефекту). Слід зазначити, що оскільки процес руйнування не є рівноважним, то робити висновки щодо конкретної величини теплового ефекту руйнування на підставі отриманих даних не є коректним.

Дослідження кінетики процесу сушіння насіння дині проводили на конвективному сушильному стенді при температурах теплоносія 40, 50, 60 °C, швидкості руху повітря 1,5 м/с та його вологовмісті 7 г/кг сухого повітря (рис. 3).

За експериментально одержаними даними щодо теплофізичних характеристик (рис. 1 і 2) та кінетики зневоднення (рис. 3) за формулою (3) було враховано змінювання критерію Ребіндера Rb в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» для різних температурних режимів (рис. 4).

На початку процесу сушіння відбувається прогрівання матеріалу, і Rb має досить великі значення (рис. 4). В процесі сушіння Rb зменшується до нуля, що вказує на те, що теплота поступово починає витрачатися переважно на випаровування води з матеріалу, а не на його нагрівання. Коли Rb знову починає зростати, це означає, що все більша частка теплоти починає витрачатися переважно на нагрівання матеріалу, а не на випаровування з нього води. Процес зневоднення значно сповільнюється, а подальше сушіння насіння до більш низької вологості є тепловитратним та недоцільним. Сушіння насіння, особливо посівного, доцільно проводити до моменту зростання критерію Ребіндера. Тобто насіння дині варто сушити при температурі 40 °C до досягнення ним вологості 15 % відн., при температурі 50 °C – до 13 % відн., при температурі 60 °C – до 11 % відн.

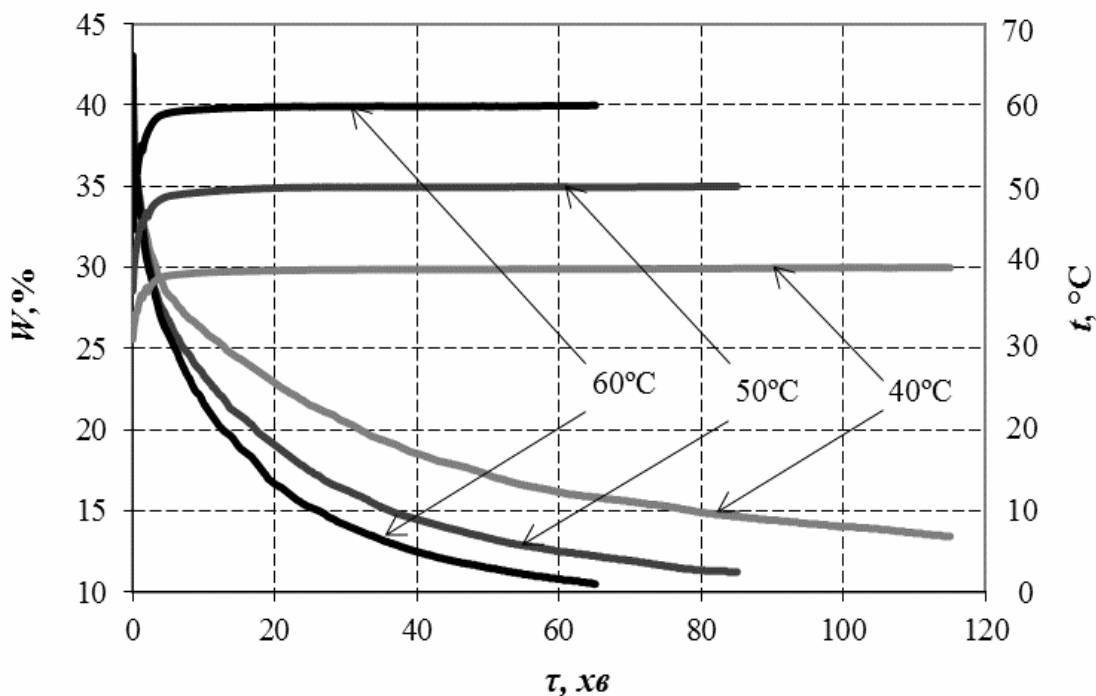


Рис. 3 – Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння дині сорту «Ананас» в елементарному шарі (верхні криві – зміна температури насіння, нижні – криві сушіння)

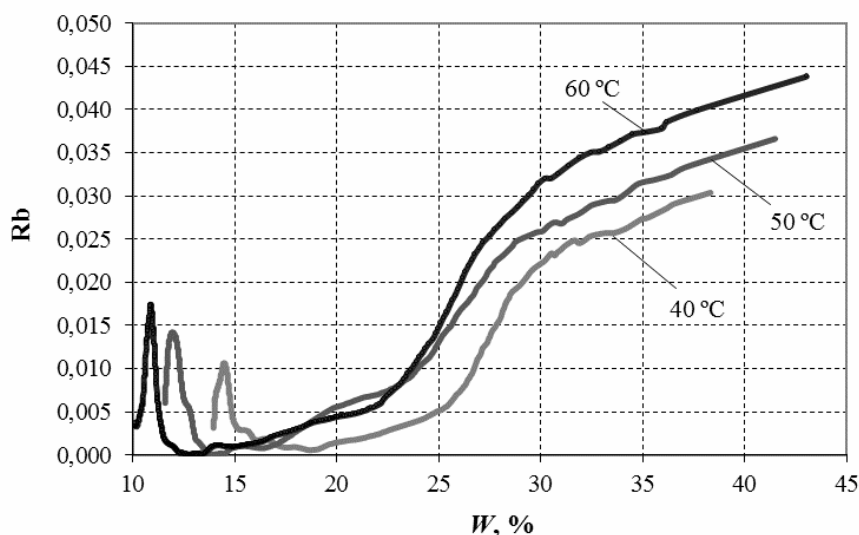


Рис. 4 – Залежність Rb від відносної вологості насіння дині сорту «Ананас» під час його сушіння в елементарному шарі на конвективному сушильному стенді при різних температурах теплоносія

Швидке спадання чисельних значень Rb наприкінці процесу сушіння, обумовлене не лише остаточним прогріванням матеріалу до температури теплоносія, але й початком періоду видалення з насіння виключно зв'язаної води, що потребує значних витрат теплоти та часу на її випаровування. Витрати теплоти на випаровування (на рис. 2 та у знаменнику дробу формули 3) швидко зростають, а теплоємність залишається сталою величиною, тому Rb швидко зменшується.

За одержаними даними щодо змінювання критерію Ребіндера Rb в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» (рис. 4) за формулою (5) було вираховано змінювання густини теплового потоку під час сушіння при різних температурах теплоносія та представлено в залежності від досягнутої насінням відносної вологості (рис. 5). При цьому, зауважимо, що теплові потоки визначали за експериментально одержаними теплофізичними характеристиками (теплоємністю та теплотою випаровування), що дозволило врахувати реальні витрати теплоти в процесі сушіння, а саме, крім теплоти пароутворення, теплоту руйнування зв'язків молекул води з іншими речовинами рослинної тканини і теплоту адсорбції пари води матеріалом.

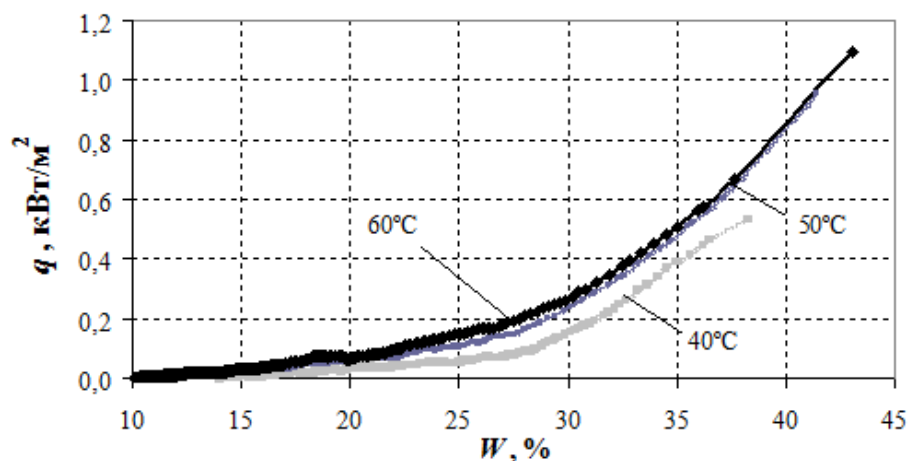


Рис. 5 – Залежність густини теплового потоку від відносної вологості насіння дині сорту «Ананас» при різних температурах теплоносія

За одержаними величинами теплових потоків можна розрахувати витрати теплоти в сушарці, які корисно витрачаються на нагрівання матеріалу та його зневоднення. На графіках (рис. 5) бачимо, що теплові потоки зменшуються зі зменшенням вологості насіння і, коли основні витрати теплоти йдуть на випаровування (при зменшенні вологості насіння нижче 25 % відн. згідно значень числа Rb), величини q прямують до мінімуму. Значить, в цьому періоді сушіння можливо зменшити підведення енергії у сушильну камеру.

Наочне порівняння значень критерію Rb (рис. 4) та густини теплового потоку q (рис. 5) при різних режимах сушіння показує, що вони залежать від температури теплоносія: більші значення Rb та q відповідають

режиму з вищою температурою. Це свідчить про доцільність використання більш низької температури теплоносія, не лише задля більш раціонального використання енергії, але й задля позитивного впливу на якість та схожість насіння.

Висновки. На підставі експериментальних досліджень одержана формула для розрахунку, з похибкою не більше 2 %, теплоємності насіння дині сорту «Ананас» в залежності від двох факторів: відносної вологості насіння в діапазоні $W = 10,4 \dots 37,5$ % та температури в діапазоні $t = 32,5 \dots 92,5$ °C.

Експериментальне дослідження витрат теплоти на зневоднення насіння дині показало, що їхня відмінність від табличних значень теплоти випаровування чистої води складає в середньому 6 %, а розтріскування оболонки насіння через висушування супроводжується викидом теплоти (екзотермічним тепловим ефектом).

За експериментально одержаними даними з теплоємності та теплоти випаровування розраховані значення критерію Ребіндера в процесі сушіння насіння дині сорту «Ананас» та густини теплових потоків при різних температурах теплоносія, які можна використовувати при розрахунках сушильних установок задля їхньої оптимізації.

Сумісний аналіз одержаних експериментальних та розрахункових даних показав, що задля більш раціонального використання енергії та більш позитивного впливу на якість і схожість насіння доцільно проводити конвективне сушіння насіння дині сорту «Ананас» до вологості 15% відн. за температури теплоносія 40 °C. Після досягнення насінням вологості 25 % відн. можливо зменшення підводу енергії всередину сушильної камери задля більш раціонального її використання.

References

1. Torres, S. B., & Filho, J. M. (2003). Accelerated aging of melon seeds. *Scientia Agricola*, 60(1), 77–82. <https://doi.org/10.1590/s0103-90162003000100012>
2. Ajibola, O. O. (1989). Thin-layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*, 9(4), 305–320. [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(89\)90037](https://doi.org/10.1016/0260-8774(89)90037)
3. da Silva, R. C., da Silva, W. P., Gomes, J. P., de Melo Queiroz, A. J., et al. (2022). A new empirical model for predicting intermittent and continuous drying of “Neve” melon (*Cucumis melo* sp.) seeds. *Agriculture*, 12, 328–340. <https://doi.org/10.3390/agriculture12030328>
4. Asoiro, F. U., Simeon, M. I., & Ezugwu, I. C. (2018). Aerodynamic and thermal properties of melon (*Citrullus lanatus*) seeds under varying drying temperature for separation from shells and processing. *AZOJETE*, 14(sp.i4), 149–160.
5. Snyezhkin, Yu. F., & Shapar, R. O. (2018). *Teplomassoobminni tekhnolohiyi pererobky pektynovmisnoyi syrovyny*. TOV «SIK HRUP Ukrayina».
6. Snyezhkin, Yu. F., Dekusha, L. V., Dubovikova, N. S., Hryshchenko, T. H., Vorobyov, L. Y., & Boryak, L. A. (2008). *Kalorymetrychnyy prystriy dlya vyznachennya pytomoyi teploty vyparovuvannya volohy ta orhanichnykh ridyn z materialiv* (Patent Ukrayiny № 84075). Derzhavna sluzhba intelektual'noyi vlasnosti Ukrayiny.
7. (2011). *Plastmasy. Dyferentsial'na skanuval'na kalorymetriya. Chastyna 4. Vyznachennya pytomoyi teployemnosti* (DSTU ISO 11357-4:2010). Derzhspozhyvstandart Ukrayiny.
8. Sacilik, K. (2007). Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*, 79, 23–30. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023>
9. Guiné, R. P. F., Pinho, S., & Barroca, M. J. (2011). Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita Maxima*). *Food and Bioprocess Processing*, 89, 422–428. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2010.09.001>
10. Hashim, N., Daniel, O., & Rahaman, E. (2014). A preliminary study: Kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, 345–352. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2014.11.048>
11. Lykov A. V. (1968). *Teoriya sushinnya*. Enerhiya.
12. Mikhailik, V. A., Dmitrenko, N. V., Snyezhkin, Y. F. (2014). Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 87(1), 48–53. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-0983-7>

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MELON SEEDS AND HEAT AND MASS TRANSFER IN ITS DRYING PROCESS

Dmytrenko N.V., Ph.D., Ivanov S.O., Ph.D., Dabizha N.O., Ph.D.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv

Abstract. Drying is the main technological stage of seed preparation for long-term storage. During drying moisture is removed from seeds to a level that microbial spoilage stops and enzymatic activity minimizes. In order to

preserve germination seeds are usually dehydrated in convective dryers at such parameters of the drying agent that do not exceed the maximum allowable heating temperature of the material. The article presents the results of comprehensive studies of "Pineapple" melon seeds as a drying object with the aim of developing energy-efficient dehydration regimes. Using the DMKY-01 differential microcalorimeter, experimental and calculated studies of the heat capacity of melon seeds and heat consumption for moisture evaporation from it were carried out. The formula for calculating the specific heat capacity of melon seeds in the range of changing relative humidity from 10,4 to 37,5 % and temperature from 32,5 to 92,5 °C is given. According to the results of studies of heat and mass exchange processes during convective drying of melon seeds at coolant temperatures of 40, 50 and 60 °C and experimentally determined thermophysical properties, calculations of Rebinder's criterion and heat flows on the surface of the material were carried out. On the basis of the combined analysis of the obtained experimental and calculation data, it was concluded that for the rational use of energy and preservation of the quality and germination of melon seeds, it is advisable to convectively dry them at a coolant temperature of 40 °C to relative humidity of seeds 15 %. After relative humidity of seeds reaches 25 % it is necessary to reduce the energy input, because heat flows on the surface of the material from this moment of the drying process stabilize at a very low level.

Key words: melon seeds, heat capacity, specific heat of evaporation, drying, heat and mass transfer, Rebinder's criterion, heat flows.

Список використаної літератури

1. Torres S. B., Filho J. M. Accelerated aging of melon seeds. *Scientia Agricola*. 2003. Vol. 60, no. 1. P. 77–82. DOI: 10.1590/s0103-90162003000100012.
2. Ajibola O. O. Thin-layer drying of melon seed. *Journal of Food Engineering*. 1989. Vol. 9, no. 4. P. 305–320. DOI: 10.1016/0260-8774(89)90037-x.
3. da Silva R. C., da Silva W. P., Gomes J. P., de Melo Queiroz A. J., et al. A new empirical model for predicting intermittent and continuous drying of “Neve” melon (*Cucumis melo* sp.) seeds. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. P. 328–340. DOI: 10.3390/agriculture12030328.
4. Asoiro F. U., Simeon M. I., Ezugwu, I. C. Aerodynamic and thermal properties of melon (*Citrullus lanatus*) seeds under varying drying temperature for separation from shells and processing. *AZOJETE*. 2018. Vol. 14(SP.i4). P. 149–160.
5. Снежкін Ю. Ф., Шапар Р. О. Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини : монографія. Київ : ТОВ «СІК ГРУП Україна», 2018. 228 с.
6. Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів : пат. 84075 України : G01N 25/26, G01N 25/28. № а 2006 13266 ; заявл. 15.12.2006 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. №17. 10 с.
7. ДСТУ ISO 11357-4:2010. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина 4. Визначення питомої теплоємності. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2011. 8 с.
8. Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 79, no. 1. P. 23–30. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.023.
9. Guiné R. P. F., Pinho S., Barroca M. J. Study of the convective drying of pumpkin (*Cucurbita Maxima*). *Food and Bioproducts Processing*. 2011. Vol. 89, no. 4. P. 422–428. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.09.001.
10. Hashim N., Daniel O., Rahaman E. A preliminary study: Kinetic model of drying process of pumpkins (*Cucurbita Moschata*) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014. Vol. 2. P. 345–352. DOI: 10.1016/j.aaspro.2014.11.048.
11. Лыков А. В. Теория сушки. Москва : Энергия, 1968. 472 с.
12. Mikhailik V. A., Dmitrenko N. V., Snezhkin Y. F. Change in the specific heat capacity of parenchymal tissues of apples due to dehydration. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2014. Vol. 87, no. 1. P. 48–53. DOI: 10.1007/s10891-014-0983-7.

Отримано в редакцію 24.07.2024
Прийнято до друку 25.09.2024

Received 24.07.2024
Approved 25.09.2024