

УДК 664.8.047

## ТЕПЛОНАСОСНЕ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Снежкін Ю.Ф., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ, професор, Дабіжа Н.О., Капустін Р.В.  
Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ

*Досліджений процес конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту, запропонований енергозберігаючий режим зневоднення з перемінним ступенем осушення сушильного агента, що здійснюється за допомогою теплового насосу.*

*Convection drying of thermolabile materials to low residue moisture content is studied. The energy-saving mode with the agent humidity regulation by a heat pump is proposed.*

**Ключові слова:** термолабільність, сушіння, кінетика зневоднення, ізотерми адсорбції, тепловий насос, питомі енерговитрати.

**Постановка проблеми.** До класу термолабільних відноситься велика кількість матеріалів, що піддаються сушінню. Особливістю термолабільних матеріалів є залежність якості готового продукту від температурного рівня процесу. При перевищенні максимально допустимої температури відбуваються необоротні зміни фізичної і хімічної структури матеріалу, що у свою чергу призводить до погіршення якісних показників. Одним з об'єктів сушіння, до якості якого висуваються підвищені вимоги, є така традиційна сільськогосподарська сировина як фрукти, які за своєю біологічною і хімічною природою чутливі до дії підвищених температур, тобто термолабільні.

Згідно із статистичними даними світове виробництво фруктів має стійку тенденцію до зростання [1]. Оскільки фрукти є швидкопсувними продуктами велика частина вирощеного урожаю підлягає переробці з метою одержання продуктів з тривалим терміном зберігання. При цьому до 20 % вирощених фруктів піддається сушінню. В результаті одержують продукти з проміжною вологістю 15-25 % (сухофрукти) і продукти з низькою вологістю 5-6 % (порошки, чіпси), частка останніх в загальному виробництві сушених фруктів невинно росте. Причиною тому є подовжений термін зберігання продуктів з низькою вологістю та істотна економія транспортних витрат. Крім того, фруктові порошки є цінними харчовими продуктами, що містять біологічно активні речовини: вітаміни, органічні кислоти, вуглеводи, флавоноїди і мікроелементи. Нерозчинна частина порошоків являє собою клітковину плодової м'якоти, тобто харчові волокна. Порошки швидко відновлюються при додаванні рідини. Одержувані після відновлення продукти за органолептичними і фізико-хімічними показниками відповідають вихідній сировині. Такі порошки є основою для виробництва різноманітного асортименту продуктів дитячого і дієтичного харчування, швидкокорозчинних напоїв, десертів, кондитерських і хлібобулочних виробів.

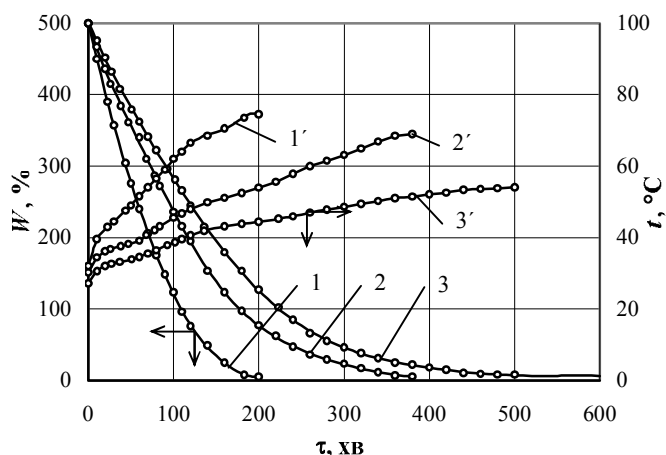
Основним технологічним процесом при виробництві фруктових порошоків є сушіння, тому вибір методу сушіння визначає з одного боку якісні показники порошоків, з іншого – величину капітальних і поточних витрат.

Порівняльний аналіз сучасних технологій виробництва фруктових порошоків [2] показує перевагу технології одержання порошоків з цільної сировини з використанням конвективних сушильних установок тунельного, конвеєрного або стрічкового типу. Перевагами даної технології є низькі енерговитрати, раціональне використання всіх складових частин сільськогосподарської сировини, простота обслуговування технологічного устаткування та його висока продуктивність. Також за цією технологією сировина до сушіння не зазнає глибокої термообробки, що позитивно впливає на якість продукту. Недоліками даної технології, які особливо виявляються під час сушіння термолабільних матеріалів до залишкового вологовмісту, що нижчий за рівноважний з навколишнім середовищем, є залежність ефективності роботи сушарки від вологості атмосферного повітря, а також низька інтенсивність процесу вологовидалення при використанні невисоких температур. При цьому процес видалення вологи з матеріалу значно сповільнюється, що призводить до збільшення енерговитрат. Використання конвективних сушильних установок пов'язане із значними втратами теплоти з відпрацьованим повітрям, в результаті чого витрати енергії на видалення вологи під час конвективного сушіння можуть досягати 6000 кДж/кг і більше.

**Метою дослідження** є вибір та обґрунтування методів інтенсифікації процесу конвективного сушіння термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту та пошук шляхів підвищення ефективності даного процесу.

У технології конвективного сушіння інтенсифікація процесу здійснюється головним чином шляхом підвищення температури сушильного агента. Проте можливість застосування цього методу при сушінні термолабільних матеріалів до низького залишкового вологовмісту обмежена.

Як видно з кривих сушіння яблука (рис. 1) при збільшенні температури з 60 до 100 °С під час сушіння до залишкового вологовмісту матеріалу 5 % тривалість процесу скорочується з 620 до 200 хв. (тобто у 3,1 рази), а швидкість сушіння в початковий момент збільшується в 1,77 рази.



**Рис. 1 – Вплив температури сушильного агента на процес сушіння кубиків яблука при  $v = 1$  м/с та  $d = 10$  г/кг с.п.: 1, 1' –  $t = 100$  °С; 2, 2' –  $t = 80$  °С; 3, 3' –  $t = 60$  °С**

Проте для фруктів, що містять такі термолабільні речовини як цукри, пектини, органічні кислоти, вітаміни, ферменти підвищення температури сушіння обмежене гранично допустимим рівнем нагріву матеріалу. Для запобігання утворенню забарвлених речовин, яким супроводжується термічне розкладання цукрів, а також для збереження цінних живильних речовин та аромату, необхідно сушити фрукти за таких умов, при яких температура нагріву матеріалу не перевищуватиме гранично допустиму. Грунтуючись на проведених дослідженнях термічного розкладання цукристих речовин та приймаючи до уваги літературні дані щодо біохімічних і фізичних змін, що відбуваються під впливом температури в рослинних матеріалах, приймаємо гранично допустиму температуру нагріву матеріалу при конвективному сушінні ананасів та яблук в щільному шарі рівною 60 °С.

Як видно з температурних кривих і кривих сушіння (рис. 1), нагрівання зразків відбувається швидше, ніж їх зневоднення, таке швидке збільшення температури матеріалу при температурах сушіння 100 і 80 °С не дозволяє видалити необхідну кількість вологи, не перевищивши гранично допустиму температуру (видаляється близько 250 %). Візуально відзначено, що під час сушіння при цих температурах побуріння поверхні зразків починалося при досягненні вологовмісту 200 %, а при 25-30 % спостерігалось неприпустиме потемніння продукту. Тобто використання високих температур для термолабільних матеріалів можливе тільки на етапі видалення вільної вологи. В зв'язку з цим рекомендується сушити плоди або при низькій температурі 50-60 °С, або при багатостадійному сушінні таким чином, щоб температура нагріву матеріалу не перевищувала гранично допустиму.

Необхідно відзначити, що досушування від вологовмісту 18-20 %, рівноважного з навколишнім середовищем, до низького залишкового вологовмісту 5-6 % відбувається при дуже низьких швидкостях видалення вологи, що приводить до значного збільшення тривалості процесу, особливо при низьких температурах зневоднення. Видалення такої малої кількості вологи під час досушування за такий тривалий час істотно погіршує енергетичні показники процесу. Зниження інтенсивності вологовидалення пов'язане із зменшенням рушійної сили масообміну, яка визначається різницею парціальних тисків пари води у поверхні матеріалу і в парогазовому потокові.

Теоретичні передумови дозволяють припустити, що примусове осушення сушильного агента сприятиме інтенсифікації масообмінних процесів під час зневоднення термолабільних матеріалів при температурах сушіння, що не перевищують максимально допустимий рівень. А створення умов процесу зневоднення з керованим вологовмістом сушильного агента дозволить усунути вплив параметрів повітря на процес сушіння.

Під час сушіння для досягнення бажаного результату температура и вологість сушильного агента повинні відповідати заданому кінцевому вологовмісту матеріалу. Тому при визначенні тепловологісних параметрів сушильного агента важливе значення має аналіз ізотерм сорбції-десорбції, що представляють функціональну залежність між відносною вологістю повітря і рівноважним вологовмістом матеріалу при постійній температурі і тиску. За ізотермами сорбції-десорбції встановлюється зв'язок між тепловологісними параметрами сушильного агента і висушуваного матеріалу при адиабатичному зволоженні та охолодженні повітря в процесі сушіння.

За результатами експериментальних досліджень сорбційних властивостей паренхімних тканин яблука сорту Джонатан одержані ізотерми адсорбції пари води при температурі 20 °С (рис. 1). Як видно, ізотерми мають форму характерну для колоїдних капілярно-пористих матеріалів. Характерною особливістю одержаних ізотерм адсорбції є наявність широкої петлі гістерезису в області відносного тиску  $p/p_s$  від 0 до 0,8. При цьому петля гістерезису, що простягається в область найнижчих  $p/p_s$ , перекривається з петлею гістерезису, яка спостерігається при капілярній конденсації. Аналіз одержаних ізотерм показав, що поглинання вологи паренхімними тканинами плодів є складним процесом, який відбувається за механізмом полімолекулярної адсорбції, ускладненої капілярною конденсацією, і супроводжується адсорбцією розчиненням. Сукупність цих явищ суттєво впливає на взаємодію води з матеріалом – в паренхімних тканин яблука міститься до 25 % адсорбційно-зв'язаної вологи. В результаті зменшення вологовмісту матеріалу нижче проміжного супроводжується різким зниженням парціального тиску пари води на його поверхні (рис 2.).

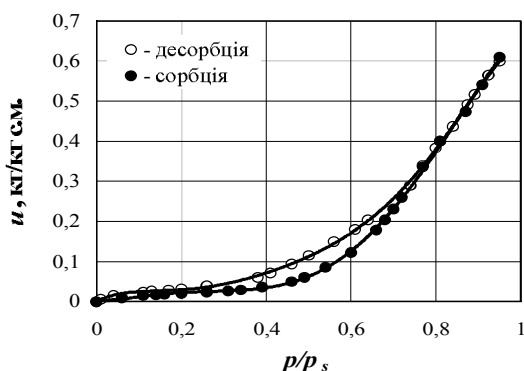


Рис. 2 – Ізотерми адсорбції пари води паренхімними тканинами яблука

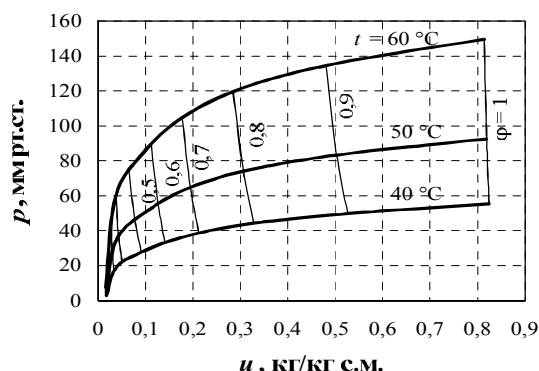


Рис. 3 – Залежність парціального тиску пари води в паренхімних тканинах яблука від вологовмісту і температури

На підставі визначення залежності парціальних тисків пари води від вологовмісту в паренхімних тканинах плодів в області гігроскопічного стану матеріалу встановлено, що під час видалення з них зв'язаної вологи основним механізмом інтенсифікації процесу є збільшення масообмінного напору шляхом зниження парціального тиску водяної пари в сушильному агенті. Визначено, що зниження вологовмісту сушильного агента на 10 г/кг с.п. приводить до збільшення середнього масообмінного напору на 25 – 30 %, що дозволяє на стадії видалення адсорбційно-зв'язаної вологи значно інтенсифікувати процес сушіння.

За результатами аналітичних та експериментальних досліджень гіротермічної рівноваги між матеріалом та вологим повітрям та кінетики низькотемпературного зневоднення розроблений енергозберігаючий режим сушіння яблук до низького залишкового вологовмісту з перемінним ступенем осушення сушильного агента.

На першій стадії сушіння, коли з матеріалу видаляється вільна волога достатня невелика ступінь осушення сушильного агента. На другій стадії (область гігроскопічного стану) для підтримки постійної величини масообмінного напору у міру зниження парціального тиску пари води над матеріалом відповідно збільшується ступінь його осушення. На стадії досушування, при видаленні з матеріалу адсорбційно-зв'язаної вологи, основним фактором, що обумовлює енерговитрати, є тривалість процесу. Для збільшення швидкості сушіння необхідно максимально збільшити ступінь осушення сушильного агента. Розроблений режим забезпечує оптимальну інтенсивність масообміну та мінімальні енерговитрати в продовж всього процесу сушіння.

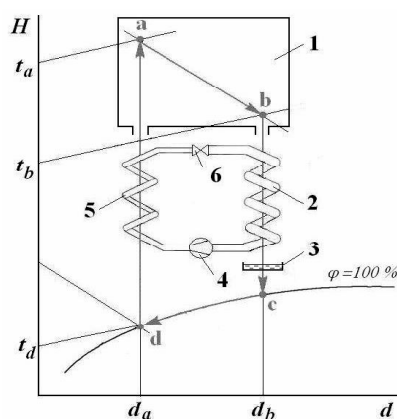
При практичній реалізації даного режиму для осушення сушильного агента запропоновано використовувати парокompресійний тепловий насос (ТН) (рис. 4). Цикл сушіння в конденсаційних теплонасосних сушарках здійснюється таким чином: нагріте і осушене повітря (стан *a*) надходить до сушильної камери 1, де, проходячи над шаром висушуваного матеріалу, адиабатично зволожується і охолоджується (стан *b*). Зволожене повітря осушується у випарнику теплового насоса 2 за рахунок охолодження (процес *b-c-d*) до заданої температури точки роси (стан *d*), при цьому волога, що міститься в повітрі, конденсується, і вода виводиться до збірника конденсату 3. Далі холодне осушене повітря нагрівається в конденсаторі теплового насоса 4 (процес *d-a*) і повертається до сушильної камери 1.

Інтеграція теплового насоса в замкнутий цикл конвективної сушарки дозволяє за рахунок конденсації вологи в випарнику ТН знижувати вологовміст сушильного агента, а також здійснювати утилізацію теплоти конденсації з наступним поверненням її в процес сушіння на більш високому температурному рівні, що суттєво впливає на енергоспоживання сушарки.

Розрахункові питомі витрати енергії на підготовку сушильного агента за розробленим режимом становлять: на першому етапі – 0,4-0,5 кВт·год, на другому – 0,6-1,0 кВт·год, на третьому – до 1,5 кВт·год, і в середньому складають 0,7-0,9 кВт·год на кг видаленої вологи.

За результатами досліджень в ІТТФ НАНУ розроблена та створена теплонасосна сушильна установка камерного типу (рис. 4) з такими технічними характеристиками:

Температура сушильного агента	40°–55 °С
Кількість вологи, що видаляється з продукту	до 2 л/год
Кількість висушуваного продукту	до 40 кг/доба
Установлена електрична потужність	1,0 кВт
Питомі витрати електроенергії на випаровування вологи	0,3...0,7 кВт·год/л



1 – сушильна камера; 2 – випарник; 3 – збірник конденсату;  
4 – компресор; 5 – конденсатор; 6 – дросель

**Рис. 4 – Процес теплонасосного сушіння в *H-d* діаграмі та теплонасосна сушильна установка**

Сушарка являє собою шафу, в верхній частині якої знаходиться сушильна камера з піддонами для зневоднюваного матеріалу, а в нижній – агрегатний відсік, де розташований теплонасосний агрегат. Теплонасосний агрегат включає холодильний компресор, випарник із системою відводу конденсату до конденсатозбірника, рекуперативний теплообмінник і двосекційний повітряний конденсатор. Сушильна камера і агрегатний відсік пов'язані між собою повітропроводами. Сушіння відбувається в замкненому контурі. Підтримка необхідних тепловологісних параметрів сушильного агента здійснюється за допомогою системи автоматики шляхом регулювання подачі холодоагенту у випарник і перерозподілу в необхідному співвідношенні величини теплового навантаження на секції конденсатора.

Засновуючись на розробленій технології встановлена доцільність розподілу процесу сушіння на такі етапи: 1) прогрів матеріалу сушильним агентом; 2) інтенсивне вилучення вільної вологи з матеріалу з використанням теплонасосного агрегату при максимально допустимих температурах і вологості сушильного агента; 3) зневоднення матеріалу при поступовому, керованому зниженні вологовмісту сушильного агента; 4) досушування матеріалу при мінімально досяжному вологовмісті сушильного агента; 5) витримка зневодненого матеріалу при його обдуванні повітрям з заданим вологовмістом і температурою.

**Висновки.** Здійснення процесу конвективного сушіння з регульованим ступенем осушення теплоносія протягом усього періоду сушіння дозволяє створити оптимальні умови для зневоднення термолабільних матеріалів з високою вихідною вологістю і забезпечити зниження питомих енерговитрат на видалення вологи у 1,3-1,5 рази.

#### Література

1. FAO Statistical Yearbook 2010. Word Food and Agriculture // Word Food and Agriculture Organization of The United Nations. – Roma, 2010.
2. Сравнение различных методов производства пищевых порошков / О. А. Кремнев, Ю. Ф. Снежкин, А. А. Хавин, Л. В. Клименко // Пром. теплотехника. – 1985. – Т. 7, № 5. – С. 39-41.