

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СУШКИ НА ТЕПЛОТУ ВИПАРОВУВАННЯ ВОЛОГИ З РОСЛИННИХ ТКАНИН

Дмитренко Н.В.

Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ

У статті наведені результати експериментального дослідження впливу технологічних параметрів процесу конвективно-кондуктивної сушки на теплоту випаровування вологи з паренхімних тканин яблука. Показано, що змінення технологічних параметрів процесу сушки призводить до змінення залежності теплоти випаровування від поточної вологості тканин. Але загальні витрати теплоти на випаровування, від вологості тканин 627 % абс. до вологості 34 % абс., залишаються сталими в межах похибки досліду і перевищують значення теплоти пароутворення чистої води на 5,56 % в діапазоні температури сушки 40...60 °C, вологості повітря 3...8 г/кг, швидкості руху повітря 0,4...1,6 см/с.

The article represents the results of the experimental study of technological parameters of the convective-conductive drying on heat of evaporation of parenchyma tissue apple. It is shown that changing the parameters of the drying process leads to change depending heat of vaporization on the current moisture of tissue. But the overall spending of heat for evaporation of moisture from 627 % abs. to 34 % abs. remains constant within the error of experiment and exceeds the value heat of vaporization of pure water on 5,56 % at a drying temperature 40...60 °C, air humidity 3...8 g/kg, air velocity 0,4...1,6 cm/s.

Ключові слова: паренхімні тканини яблука, сушіння, технологічні параметри сушіння, теплота випаровування.

Сушіння вологої сировини є одним з найефективніших засобів її підготування до тривалого зберігання та наступної переробки. При моделюванні процесу сушіння рослинної сировини та розрахунку теплових витрат на її зневоднення зазвичай використовують данні з теплоти пароутворення, які були отримані для умов випаровування чистої води з вільної поверхні [1]. Іноді їх уточнюють для сушіння в області гігроскопічної вологості матеріалу на підґрунті аналізу кривих сорбції [2, 3]. При цьому припускають, що істотний ріст теплоти випаровування починається після видалення всієї вільної вологи та перед початком видалення зв'язаної. Однак, літературні данні [4-6] та попередні результати наших експериментів [7] свідчать про зменшення вмісту зв'язаної води в деяких рослинних тканинах вже під час видалення вільної води. Експериментальне дослідження теплоти випаровування води з ряду рослинних тканин [8] показало збільшення витрат енергії на випаровування вже на початкових етапах сушіння за рахунок видалення зв'язаної води. Оскільки теплота випаровування є термодинамічною характеристикою вологого матеріалу, а з досліджень наших попередників відомо, що через залежність процесів дифузії вологи та деформування рослинних тканин від режиму сушіння [9, 10] стан води в рослинних тканинах під час сушки може змінюватися по-різному [4, 6, 11], постало питання про необхідність дослідження впливу технологічних параметрів процесу сушки на теплоту випаровування води з рослинної сировини.

Тож основною метою роботи стало експериментальне визначення питомої теплоти випаровування води з нативних паренхімних тканин яблука сорту «Делікатес» при різних технологічних параметрах процесу сушки. Для дослідження було використано зразки нативних паренхімних тканин яблука товщиною 1...1,5 мм та діаметром 40 мм.

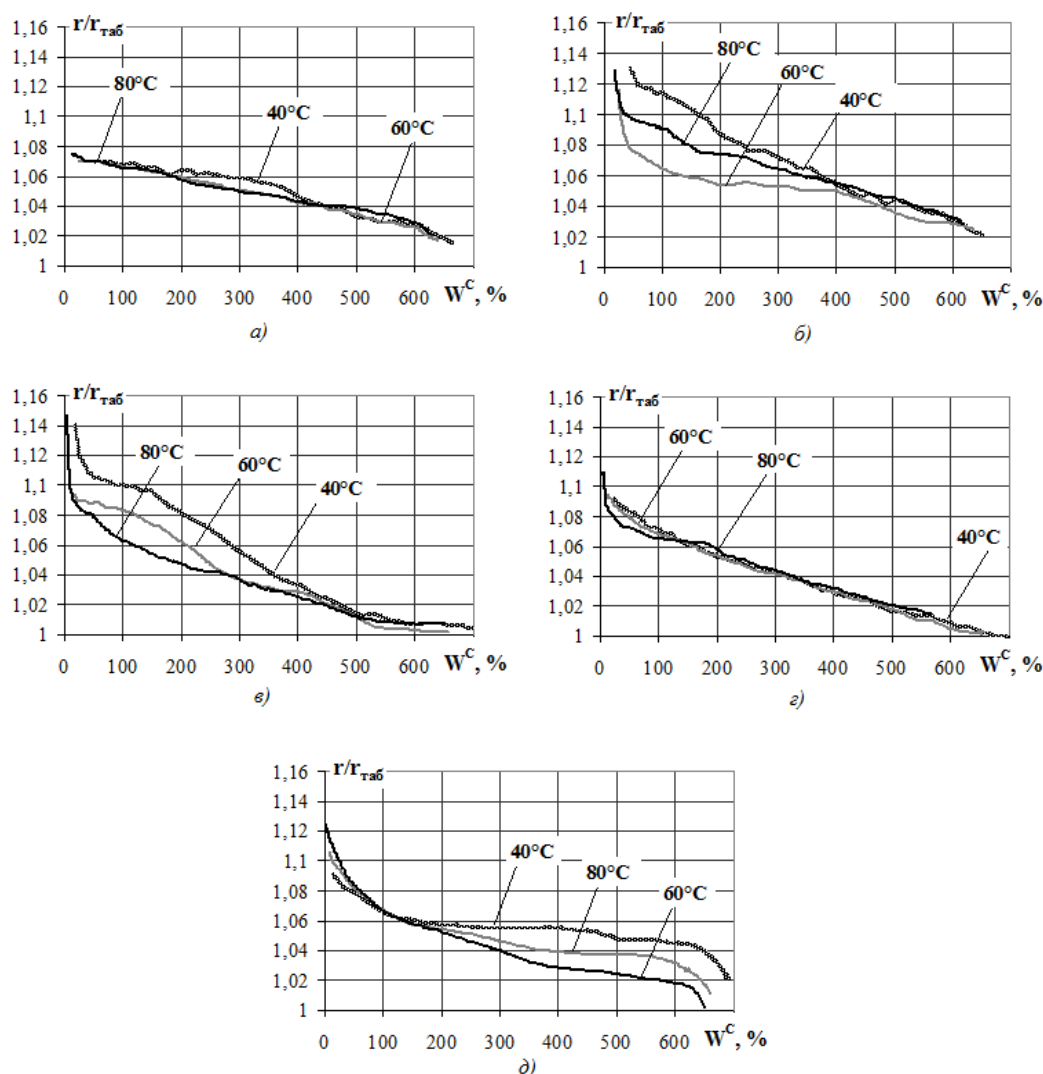
Для визначення питомої теплоти випаровування було використано калориметричний комплекс на базі диференціального мікрокалориметра випаровування ДМКИ-01, який суміщає в собі можливості диференціальної мікрокалориметрії і термогравиметрії [12]. Комплекс дозволяє визначати питому теплоту випаровування вологи з таких речовин як харчові, фармацевтичні, лакофарбні матеріали, розчини і розчинники. Для визначення питомої теплоти випаровування, в ДМКИ-01 реалізовано метод безперервного виміру кількості теплоти, яка витрачена на випаровування вологи з матеріалу в процесі ізотермічної сушки, та одночасного безперервного виміру відповідного зменшення маси зразка.

Всередині робочої камери теплового блоку ДМКИ-01 проводили конвективно-кондуктивне сушіння зразків паренхімних тканин яблука при температурах сушки 40, 60 і 80 °C. Крім температури, було проварійовано вологість повітря, яке продували крізь робочу камеру, та швидкість продування. Діапазон зміни швидкості руху повітря (від 0,4 см/с до 1,6 см/с) було лімітовано можливостями використаного регульованого компресору та необхідністю мінімізації шкідливого впливу руху повітря на стабільність

роботи терезів. Параметри вологості повітря не можна було задавати примусово, оскільки для продування використовували повітря з навколишнього середовища. Натомість, проведення експериментів було узгоджено з поточним станом навколишнього середовища. Експерименти з повітрям вологовмісту 8 г/кг сухого повітря було проведено восени під час дощів, а експерименти з повітрям вологовмісту 3 г/кг сухого повітря – взимку, коли відносна вологість повітря в приміщенні, сягала 20%.

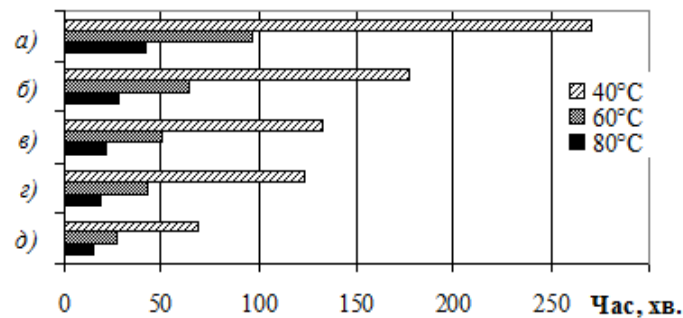
Результати експериментів з визначення теплоти випаровування в залежності від параметрів сушки наведені на рисунку 1 в координатах приведеної (до табличних значень питомої теплоти пароутворення чистої води [1]) питомої теплоти випаровування води зі зразків $r/r_{\text{таб}}$ та абсолютної вологості зразків W^c .

Як бачимо з рисунку 1, поточні значення теплоти випаровування води з паренхімних тканин яблука залежать від технологічних параметрів процесу сушіння. При завданні найнижчої швидкості продування та максимальної вологості повітря (рис. 1 а), коли час сушіння був найбільшим (рис. 2), спостерігаємо співпадання кривих приведеної теплоти випаровування при різних температурах сушки. Але тут відсутній період сушки, коли $r/r_{\text{таб}} = 1$, та відсутнє різке підвищення теплоти випаровування наприкінці сушіння, як у всіх інших випадках. Зразки, висушені при цьому режимі, зберегли свій природний колір.



швидкість руху 0,4 см/с і вологовміст 8 г/кг (а); швидкість руху 1,6 см/с і вологовміст 8 г/кг (б); швидкість руху 0,4 см/с і вологовміст 3 г/кг (в); швидкість руху 0,8 см/с і вологовміст 3 г/кг (г); швидкість руху 1,6 см/с і вологовміст 3 г/кг (д)

Рис. 1 – Залежність приведеної питомої теплоти випаровування води з нативних паренхімних тканин яблука від їх абсолютної вологості під час конвективно-кондуктивного сушіння при різних температурах та параметрах повітря, яке продувається



швидкість руху 0,4 см/с і вологовміст 8 г/кг (а); швидкість руху 1,6 см/с і вологовміст 8 г/кг (б); швидкість руху 0,4 см/с і вологовміст 3 г/кг (в); швидкість руху 0,8 см/с і вологовміст 3 г/кг (г); швидкість руху 1,6 см/с і вологовміст 3 г/кг (д)

Рис. 2 – Час конвективно-кондуктивного сушіння зразків нативних паренхімних тканин яблука від вологості 627 % абс. до вологості 34 % абс. при різних температурах та параметрах повітря

Зміна технологічних параметрів процесу сушки, результати впливу якої на питому теплоту випаровування наведені на рисунку 1 б, призвела до пришвидшення процесу сушіння та поступового (починаючи з вологості 400 %) розходження в залежностях приведеної теплоти випаровування при різних температурах сушки. Зразки, які були висушені при цьому режимі, в тому чи іншому ступені змінили свій природний колір. Тож розходження залежностей можна пов'язати з впливом на результати визначення теплоти випаровування теплових ефектів від реакцій ферментативного і неферментативного браунінгу тканин яблука. Оскільки обов'язковою умовою таких реакцій є вільний доступ до тканин кисню повітря, можна припустити, що при вологості тканин нижчій ніж 400 % поверхня зразків зневоднюється через поглиблення зони випаровування. При вологості ж вищій ніж 400 % поверхня зразків, очевидно, залишається вкритою шаром вологи, яка перешкоджає доступу кисню до тканин, тому реакції ферментативного і неферментативного браунінгу не мали можливості розвиватися, і криві зміни теплоти випаровування при різних температурах сушіння співпадають. Мабуть, так само була вкрита шаром вологи і поверхня зразків у випадку, зображеному на рисунку 1 а, причому, через значну повільність сушіння, була вкрита на протязі всього процесу. Тому потемніння тканин тут не відбулося, і залежності при різних температурах сушки співпали дуже добре. Через відсутність зневоднення поверхні та поглиблення зони випаровування, не спостерігається тут і різкого підвищення теплоти випаровування наприкінці сушіння.

Хід кривих питомих витрат теплоти на випаровування, зображених на рисунку 1 в, загалом нагадує хід кривих з рисунку 1 б. Тут також відбулося різного ступеню потемніння тканин, при їх вологості нижчій ніж 400 %, через процеси ферментативного і неферментативного браунінгу. Але деяке пришвидшення процесу сушіння дозволило проявитися першому періоду сушки, коли відбувається видалення переважно вільної вологи з вільної поверхні рідини міжклітинних проміжків та клітинного соку клітин, розітнутих під час приготування зразка, а зв'язана волога не встигає мігрувати до зони видалення. Також, вдалося трохи сильніше висушити тканини, через більш низький вологовміст повітря (3 г/кг сухого повітря), яке продували через робочу камеру теплового блоку ДМКИ-01.

При подальшому прискоренні процесу сушки шляхом завдання швидкості руху повітря 0,8 см/с при його вологовмісті 3 г/кг сухого повітря (рис. 1 г) криві приведеної теплоти випаровування знову співпали, а зразки після сушіння зберегли свій природний колір, мабуть через брак часу на розвиток реакції ферментативного і неферментативного потемніння. Тут, також, присутня ділянка де $r/r_{\text{таб}} = 1$, тобто період сушки, коли відбувається видалення переважно вільної води. Ці зміни у витратах теплоти на випаровування в порівнянні з попередніми режимами сушки нагадують процес, результати якого наведені у роботі [6], але пов'язані вони з прискоренням сушіння не через зміну температури сушки, а через зміну швидкості та вологості повітря, яке продували крізь калориметричну камеру.

Подальше скорочення часу сушки, шляхом завдання швидкості руху повітря 1,6 см/с при його вологовмісті 3 г/кг сухого повітря (рис. 1 д), викликало розходження залежностей приведеної теплоти випаровування від вологості зразків на початку процесу сушіння. Це розходження досить добре пояснюється інформацією, наведеною у роботі [6]. В даному випадку воно явно пов'язано з деяким початковим перерозподілом води в бік збільшення питомої кількості зв'язаної води, при зменшенні температури сушки.

Очевидно, через різницю в ступеню деформування [9,10] паренхімної тканини яблука при різних температурах сушки при даному вологовмісті повітря та швидкості його продування.

Таким чином, конкретна залежність питомої теплоти випаровування вологи з паренхімних тканин яблука від технологічних параметрів процесу сушки є досить складною. Її більш детальний аналіз потребує розгляду конкретних механізмів тепломасопереносу та деформування рослинних тканин. Але при цьому, треба відзначити, що при суттєвих змінах в вигляді кривих поточних витрат теплоти на випаровування, загальні витрати теплоти на випаровування вологи з тканин яблука, від вологості 627 % абс. до вологості 34 % абс., різняться незначно – в межах похибки приладу. В даних експериментах вони становили 2548 кДж/кг для температури сушіння 40 °С, 2482 кДж/кг для температури сушіння 60 °С і 2437 кДж/кг для температури сушіння 80 °С. Тобто, загальні витрати теплоти на випаровування вологи з нативних паренхімних тканин яблука сорту «Делікатес», від їх початкової вологості 627 % абс. і до межі гігроскопічності, при температурах сушки 40, 60, 80 °С перевищили значення витрат теплоти на випаровування чистої води з вільної поверхні приблизно на 5,56 %, незалежно від умов застосованого нами режиму сушіння.

Висновки. Зміна технологічних параметрів процесу конвективно-кондуктивного сушіння, таких як температура сушки, швидкість продування повітря та його вологовміст, мало впливає на загальні витрати теплоти на випаровування вологи з нативних паренхімних тканин яблука. При суттєвій різниці у вигляді кривих поточних змін теплоти випаровування, загальні витрати теплоти на випаровування вологи з паренхімних тканин яблука від їх вологості 627 % абс. і до межі гігроскопічності різняться мало. В наведених експериментах вони перевищили значення витрат теплоти на паротворення чистої води приблизно на 5,56 % в діапазоні температури сушки 40...80 °С, вологовмісту повітря 3...8 г/кг сухого повітря та швидкості руху повітря 0,4...1,6 см/с.

Література

1. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: справочник. – М.: МЭИ, 1999. – 168 с.
2. Снежкин Ю.Ф., Дабижа Н.А., Шапарь Р.А. Определение энергетических затрат при сушке коллоидных капиллярно-пористых материалов // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 198-200.
3. Потапов В.А. Структурно-енергетичний метод аналізу ізотерм сорбції-десорбції харчової сировини // Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі : 36. наук. праць. – Харків: ХДУХТ, 2005. – вип.1. – С.313-322.
4. Потапов В.А. Кинетика сушки: анализ и управление процессом. – Харків: ХДУХТ, 2009. – 250 с.
5. Давыдова Е. О. Воздействие низких температур на состояние свекловичной ткани и ее основных компонентов при хранении сахарной свеклы : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.05 – Киев, 1992. – 172 с.
6. Гришин М.А., Погожих Н.И., Потапов В.А. Эффект динамического структурирования влаги в процессе сушки // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 4-5. – С. 100-105.
7. Снежкин Ю.Ф., Михайлик В.А., Дмитренко Н.В. Динаміка зміни стану води в паренхімних тканинах рослин при сушінні // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т.33, №2. – С. 35-40.
8. Дмитренко Н.В., Дубовікова Н.С., Снежкин Ю.Ф., Михайлик В.А., Декуша Л.В., Воробйов Л.І. Вивчення впливу стану води в харчових рослинних матеріалах на теплоту випаровування // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 40, т.2. – С. 71-75.
9. Никитенко Н. И., Снежкин Ю. Ф., Сорокова Н. Н. Динамика процессов тепломассопереноса, фазовых превращений и усадки при обезвоживании коллоидных капиллярно-пористых материалов // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 3. – С. 56-66.
10. Сорокова Н. Н. Моделирование тепло- и массопереноса при обезвоживании пористых тел с целью оптимизации процесса сушки : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06. – Киев, 2003. – 170 с.
11. Потапов В.А., Погожих Н.И. Модель поведения влаги в процессах сушки // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 4. – С. 423-425.
12. Дубовікова Н.С., Снежкин Ю.Ф., Декуша Л.В., Воробьев Л.И. Теплотрический прибор синхронного термического анализа для определения удельной теплоты испарения // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 2. – С. 87-95.