

Узагальнення кінетики сушіння зв'язнодисперсних структурованих харчових продуктів

Н.В. Іващенко, старший викладач кафедри теплотехніки, Національний університет харчових технологій

О.Ф. Буляндра, доктор технічних наук, професор, виконуючий обов'язки завідувача кафедри теплотехніки, Національний університет харчових технологій

В.В. Шутюк, кандидат технічних наук, доцент, кафедри технології консервування, Національний університет харчових технологій

В статті розглянуто вдосконалену класифікацію вологих дисперсних матеріалів, віднесених до групи зв'язнодисперсних речовин з малою пористістю. Зроблено огляд методів узагальнення процесів сушіння для вологих дисперсних систем на прикладах картопляного крохмалю та бурякового жому. Отримані узагальнені криві сушіння для бурякового жому для довільного значення початкової вологості.

Ключові слова: класифікація, сушіння, картопляний крохмаль, буряковий жом, узагальнені криві.

В статье рассмотрена усовершенствованная классификация влажных дисперсных материалов, отнесенных к группе связнодисперсных веществ с малой пористостью. Сделан обзор методов обобщения процессов сушки для влажных дисперсных систем на примерах картофельного крахмала и свекловичного жома. Получены обобщенные кривые сушки для свекловичного жома для произвольного значения начальной влажности.

Ключевые слова: классификация, сушка, картофельный крахмал, свекловичный жом, обобщенные кривые.

The article analysis an improved classification of moist disperse materials of group connected dispersion substances with low porosity. A review of methods for synthesis of drying wet disperse systems with examples of potato starch and sugar beet pulp. The resulting generalized drying curves for the sugar beet pulp, for an arbitrary value of the initial moisture content.

Key words: classification, drying, potato starch, sugar beet pulp, generalized curves.

Сушіння вологих харчових продуктів в промислових масштабах має важливе практичне значення. Нові технології сушіння, а також вдосконалені режими з можливістю контролю та оперативного коригування, внесли свій внесок у поліпшення якості готової продукції. Використання в процесах сушіння як сушильного агента вологого повітря заданих параметрів як і раніше є пріоритетним. Такий вибір можна пояснити тим, що використання даного виду сушильного агента призводить до зменшення втрат початкового продукту та поліпшення якості готового продукту, незважаючи на те, що в даному випадку потрібні значні інвестиції при розробці таких сушарок і подальші експлуатаційні витрати при їх використанні.

З іншого боку, щоб вирішити питання універсальності чи широкого застосування того чи іншого режиму сушіння, його поліпшення, удосконалення існуючих сушарок, необхідно провести ряд теоретичних узагальнень. У зв'язку з цим було проаналізовано та удосконалено класифікацію вологих харчових продуктів, виходячи з їх основних тепломасообмінних властивостей (табл. 1) [1]. За

основні визначальні властивості були прийняті кількість компонентів системи, їх агрегатний стан і характер взаємодії частинок дисперсної фази. Вдосконалення торкнулися тієї частини класифікації, де системи, в яких дисперсна фаза складається з твердих частинок, поділяються на системи з поверхневою і поверхнево-об'ємною взаємодією вологи з матеріалом.

Різний характер взаємодії вологи з матеріалом пояснюється наявністю різних форм зв'язку вологи. Так в системах з поверхневою взаємодією має місце капілярна волога, волога моно- і поліадсорбційного зв'язку. В системах з поверхнево-об'ємною взаємодією макромолекули повністю проникли для молекул води. Такі системи містять в собі низькомолекулярні розчинні і високомолекулярні нерозчинні у воді фракції. Концентрація низькомолекулярних фракцій неоднакова в об'ємі речовини. Найбільша їх кількість знаходиться в замкнутих міцелах. При зволоженні матеріалів, низькомолекулярні фракції розчиняються і за рахунок осмотичного тиску волога односторонньо проникає в замкнуті міцели.

При вивченні масоперенесення в процесах сушіння в сильноструктурованих матеріалах, віднесених до групи малопористих, встановлено, що одні продукти мають порівняно невелику усадку і розтріскуються (макарони), інші, маючи значну усадку, не розтріскуються. До останніх можна віднести продукти рослинного походження. Основу їх клітинної будови становить протоплазма (вакуолі з клітинним соком), яка має складну зовнішню клітинну оболонку, що утворює твердий каркас (форму) клітини. Клітинна оболонка містить ферменти, які сприяють переносу речовин із зовнішнього середовища до внутрішніх прошарків клітини шляхом перетворення речовин, нерозчинних в мембранах, в розчинні. Оболонка клітини є напівпроникливою, завдяки чому в клітину проникають рідини з меншою концентрацією розчинених речовин в порівнянні з речовинами клітини [2]. Матеріали, які розтріскуються під час сушіння, не мають класичної клітинної будови, а складаються з найдрібніших частинок, які взаємодіють між собою за рахунок вандерваальсових сил. У рослинних матеріалах осмотично зв'язана волога знаходиться всередині клітин в напівпрониклих міцелах. Осмотичне проникнення води відбувається без виділення теплоти і стиснення системи.

Осмотично зв'язана вода не відрізняється від звичайної і при сушінні переміщується всередині матеріалу без фазового перетворення - у вигляді рідини. При більш високій концентрації розчинних речовин в зовнішніх шарах клітин волога осмотично дифундує в ці шари через напівпроникливі стінки клітин. Таким чином, процес видалення цієї вологи аналогічний і протилежний осмотичному проникненню її всередину клітин. Як видно з наведеного, рушійними силами в процесі масоперенесення сильноструктурованих малопористих матеріалів виступають різні сили і механізм переносу вологи має істотні відмінності, що викликає необхідність розробки різних режимів сушіння.

Враховуючи це, була вдосконалена класифікація вологих дисперсних матеріалів, віднесених до групи зв'язнодисперсних речовин з малою пористістю. Рослинні продукти, віднесені до підгрупи матеріалів, які не розтріскуються, мають загальну властивість. Продукти цієї групи дають значну усадку в процесі сушіння. Їх рослинні клітини мають значну еластичність і внаслідок цього усадка не призводить до утворення критичних внутрішніх напружень і тріщин. Велика кількість вільно зв'язаної вологи ($u_0 = 600-300\%$) і відсутність небезпеки утворення тріщин дозволяє сушити їх із застосуванням високоінтенсивних методів підведення енергії: конвективно-радіаційним, конвективнорадіаційним із застосуванням соплового обдування та інші інтенсивні методи підведення теплоти [3, 4, 5, 6].

Використовуючи дану класифікацію і вибравши окремі продукти з різних груп їх можна розгля-

дати як еталонні. Підбравши для них раціональні режими сушіння можливо прогнозувати режими сушіння і для інших продуктів цієї групи. Сам вибір оптимального режиму вимагає проведення широкомасштабних експериментів по дослідженню процесів сушіння, тому використання методів узагальнення кривих сушіння дає можливість значно скоротити цей трудомісткий процес. В якості прикладу розглянемо методи узагальнення кінетики терморадіаційного сушіння картопляного крохмалю, як представника зв'язнодисперсної слабоструктурованої коагуляційної системи і конвективного сушіння бурякового жому, як представника зв'язнодисперсної сильноструктурованої системи.

Для терморадіаційного сушіння був обраний наступний спосіб узагальнення [2]:

$$dq = A E \quad (1)$$

де q - кількість теплоти, яка витрачається на фазові перетворення за одиницю часу і віднесена до одиниці маси сухої речовини; E - густина випромінювання E ;

A - інтегральний коефіцієнт поглинання випромінювання.

$$\text{Тоді } A E \tau = \text{const} \quad (2)$$

Як показано в наших дослідженнях, при інфрачервоній сушці відбувається швидке зневоднення поверхневих шарів і інтегральний коефіцієнт поглинання, за винятком періоду прогріву, мало змінюється і його можна вважати постійним і рівняння (2) переписується так:

$$E \tau = \text{const} \quad (3)$$

Запропонований спосіб узагальнення кінетики сушіння відрізняється від узагальнень Краснікова В.В. [7] тим, що узагальнення ведеться по визначальному і режимним параметром сушіння - величині опромінення E .

Для перевірки запропонованої залежності були проведені досліди по терморадіаційному сушінню картопляного крохмалю, як типового представника слабоструктурованої коагуляційної системи [1]. Досліди показали, що співвідношення $E \tau = \text{const}$ дає досить точний збіг розрахункових та експериментальних даних як в період постійної швидкості, так і в період падаючої швидкості сушіння. Досліди проведені при зміні товщини зразка від 5 до 70 мм, величина опромінення змінювалася від 3100 до 5400 Вт/м². Швидкість руху повітря в сушарці змінювалася за рахунок природної циркуляції. У цій серії дослідів повітря поперечно не нагрівали.

Аналіз проведених експериментів показав, що при збільшенні товщини зразка (за умови $u_0, E = \text{const}$) практично пропорційно збільшується тривалість сушіння до певного значення вологовмісту. Це дає можливість запропонувати новий комплекс узагальнення $\frac{E \cdot \phi}{\delta}$ [кДж/м³]. Обробка екс-

Класифікація вологих дисперсних харчових продуктів

Характер взаємодії часток дисперсного середовища			Вільнодисперсні (неструктуровані)		Зв'язнодисперсні (структуровані)								
Кількість компонентів і їх агрегатний стан	Характер взаємодії вологи із матеріалом	Структурні зміни при взаємодії матеріалів із вологою	Мікрогетерогенні рідкі системи (d < 5мкм)	Макрогетерогенні системи (механічні суміші)	Коагуляційні				Кристалізаційні				
					Слабоструктуровані (порошкоподібні)		Сильноструктуровані		Слабоструктуровані (порошкоподібні)		Сильноструктуровані		
					Мала пористість	Велика пористість	Мала пористість		Мала пористість	Велика пористість	Мала пористість	Велика пористість	
Розтріскуються	Не розтріскуються	Розтріскуються	Не розтріскуються										
T+P+Г	Поворхнево об'ємний	Набухають, а при сушінні дають усадку		Засипка зерна	Крохмаль, картопляне пюре	Борошно	Макаронні вироби	рослинні продукти	Сухарі				
	поверхневий	Диспергуються і розчиняються	Суспензії							Харчова сода, лимонна кислота	Цукор пісок, сіль кухонна	Кусковий цукор	Цукоррафінад
P+P			Емульсії (молочні продукти)										

периментальних даних в координатах $u - \frac{E \cdot \phi}{\delta}$ дає досить точний збіг розрахункових та експериментальних результатів (рис.1).

Узагальнення характеризує об'ємну густину енергії, що поглинається. Таким чином, об'ємна густина поглиненої енергії при сушінні картопляного крохмалю від однакового початкового вологовмісту u_0 до будь-якого фіксованого вологовмісту u є величина постійна і не залежить від режиму сушіння.

Найбільш цінним при дослідженні процесів сушіння є отримання кривих сушіння для необхідних режимів за відомим режимом сушіння, отриманим при конкретних значеннях E , u , τ . З цієї метою експериментальні дані по кінетиці сушіння оброблені з ціллю отримання залежності $u = f(u_0)$ при $\frac{E \cdot \phi}{\delta} = \text{const}$ (рис. 2).

Як видно, залежності $u = f(u_0)$ при фіксованих значеннях представляють групу прямих ліній з різними кутами нахилу. Необхідне значення поточного вологовмісту u_x може бути розраховано за формулою:

$$u_x = u_1 + \frac{(u_{0x} - u_{01}) * (u_2 - u_1)}{u_{02} - u_{01}} \quad (4)$$

де u_{0x} , u_{01} , u_{02} - відповідно початковий вологовміст для розрахункового поточного вологовмісту і двох кривих сушіння при фіксованому значенні $E\tau/\delta$ u_1 , u_2 - відповідно поточний вологовміст для двох кривих при тих же значеннях $E\tau/\delta$

Ще одним об'єктом дослідження представника зв'язнодисперсної сильноструктурованої системи був обраний буряковий жом. Використан-

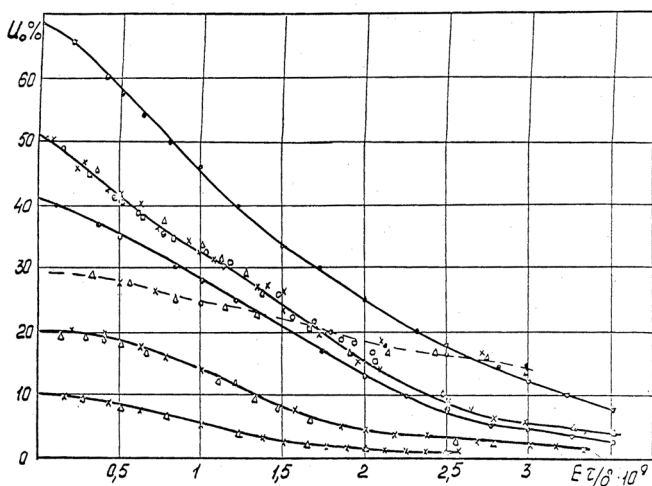


Рис.1. Кінетика терморадіаційного сушіння картопляного крохмалю

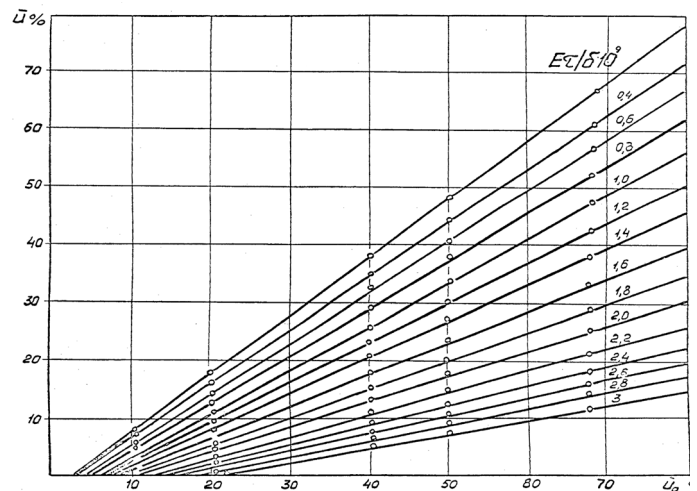


Рис.2 Узагальнені криві терморадіаційного сушіння картопляного крохмалю

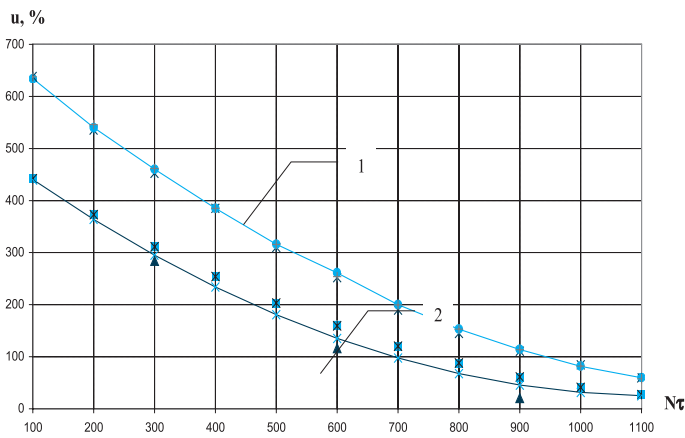


Рис. 3. Залежність вологовмісту жому від комплексної величини $N\tau$

ня низькотемпературних режимів для сушіння зв'язнодисперсних сильноструктурованих харчових продуктів, зумовлено тим, що дані режими дозволяють отримати якісний кінцевий продукт з найменшими втратами смакових та ароматичних властивостей, що є дуже важливим для їх подальшого використання.

За результатами проведених експериментів низькотемпературного сушіння жому цукрового буряка, побудовані узагальнені криві в координатах $u = f(N\tau)$ при різних початкових вологовмістах u_0 . Досліди показали, що співвідношення $N\tau = \text{const}$ дає досить точний збіг розрахункових та експериментальних даних як в період постійної швидкості, так і в період падаючої швидкості сушки. У діапазоні змін комплексної величини $N\tau$ від 0 до 1000, експериментальні дані практично співпадають з розрахунковими кривими 1,2 (рис. 3). Надалі спостерігається деяке відхилення від узагальненої кривої в межах припустимої точності. Максимальне відхилення спостерігається в кінці

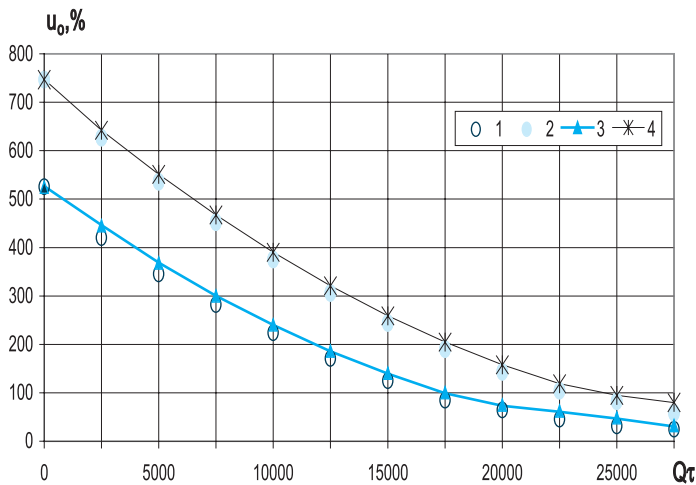


Рис. 4. Загальнені криві конвективного сушіння жому $u = f(Q\tau)$:

1. $u_0 = 750$;
2. $u_0 = 525\%$ — без врахування витрат теплоти на подолання зв'язку вологи із матеріалом;
3. $u_0 = 750$;
4. $u_0 = 525\%$ — з врахуванням витрат теплоти на подолання зв'язку вологи із матеріалом.

процесу сушіння. Так при $N\tau = 1100$ відхилення складе 4% для кривої 1 і 9% для кривої 2.

Математичний аналіз і обробка експериментальних даних підтвердили, що з достатнім ступенем точності можна використовувати рівняння (4) для обчислення необхідного значення поточного вологовмісту u для даної групи продуктів. На рис. 4 крива 3 побудована аналітичним шляхом. Математична обробка показала, що похибка узагальнення становить 3-7%, що цілком припустимо для практичних потреб.

Таким чином, дані дослідження дозволять в подальшому підібрати раціональний режим сушіння для жому цукрового буряка і прогнозувати режими сушіння інших продуктів зв'язнодисперсних сильноструктурованих систем.

Список використаних джерел

1. Буляндра А.Ф. Определяющие сушильные свойства пищевых продуктов и их классификация / А.Ф.Буляндра, А.С. Бессараб // К. : Промышленная теплотехника. – 1990.- т. XII, № 6. - с. 18-24
2. Буляндра А.Ф. Научно-технические основы выбора рациональных режимов сушки и расчета сушильных установок пищевой промышленности: диссертация на соиск.ученой степени докт.техн.наук / Буляндра Алексей Федорович.Киев. : КТИПП, 1978.– 487 с.
3. Сушка пищевых растительных материалов / Г.К. Филоненко, М.А. Гришин, Я.М. Гольденберг, В.К. Коссек. М. : Пищевая промышленность, 1971.-439с.
4. Филоненко Г.К., Лебедев П.Д. Сушильные установки. /М. : Государственное энергетическое издание, 1952.- 264с.
5. Алексанян И.Ю. Развитие научных основ процессов высокоинтенсивной сушки продуктов животного и растительного происхождения : автореф, диссертация на соиск.ученой степени докт. техн.наук : 05.18.12 / Алексанян Игорь Юрьевич.- М. : МГУПБ, 2001.-52 с.
6. Воловик П.Н. Инфракрасная сушилка для плодов и овощей / П.Н. Воловик, Б.И. Вербицкий, Ю.П. Луцик // Всесоюзная научно-техн. конф. «Электрофизические методы обработки пищевых продуктов и с.-х. сырья»: тез. докл. - М., 1989. - 393-394.
7. Красников В.В. Кондуктивная сушка / М. : Энергия,- 1973.-288 с.

Рецензент: Д.Є. Сінат-Радченко,
к.т.н., проф.