

CURRENT STATE OF RESEARCH IN MILK SPRAY-DRYING AND THE USE OF UNCONVENTIONAL MATERIALS

K. Belinska, V. Shutyuk, N. Falendysh
National University of Food Technologies

Key words: <i>Heat transfer</i> <i>Mass transfer</i> <i>Drying</i> <i>Drop</i> <i>Milk</i>	ABSTRACT The basic mathematical models of kinetics of one drop drying, the aspects of dry product microstructure forming in laboratory and industrial conditions, the phenomenon of separation of the solid (solute) and their relationship with functional properties are analyzed. The material used for study was milk of domestic animals, such as goats, sheep and mares. Experiments were carried out using the semi-industrial spray dryer for dried milk “Niro-Atomizer”; the removal of vapor adsorption isotherms was made by gravimetric method on vacuum apparatus “Mak Ben” with a quartz spring balance. The results of the studies indicate differences in various types of milk. This is evidenced by isotherms characterizing the products ability to absorb and release moisture as the main components of the product (proteins, fats, carbohydrates) are distinguished by the ability to absorb and release moisture. These results have practical value, allowing anticipating changes in the product characteristics during storage.
Article history: Received 12.07.2014 Received in revised form 20.07.2014 Accepted 29.07.2014	
Corresponding author: K. Belinska E-mail: nnuht@ukr.net	

СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У СУШІННІ МОЛОКА РОЗПИЛОМ І ВИКОРИСТАННЯ НЕТРАДИЦІЙНОЇ СИРОВИНИ

К.О. Белінська, В.В. Шутюк, Н.О. Фалендиш
Національний університет харчових технологій

У статті проаналізовано основні математичні моделі кінетики сушіння однієї краплі, аспекти утворення мікроструктури сухого продукту в лабораторних і промислових умовах, явище розшарування твердого тіла (розчиненої речовини) та їх зв'язок з функціональними властивостями. Як матеріал для дослідження використовувалося молоко домашніх тварин — кіз, кобил та овець. Досліди із сушіння молока виконувалися на напівпромисловій розпилювальній суширці «Ніро-Атомайзер», зняття ізотерм адсорбції парів відбувалося ваговим методом на вакуумній установці з пружинними кварцовими вагами Мак-Бена. Результати виконаних досліджень вказують на відмінності у складі різних видів молока. Про це свідчать ізотерми, що характеризують здатність продукту поглинати і віддавати вологу, оскільки основні складові продукту (білки, жири, вугле-

води) різняться здатністю поглинання й віддачі вологи. Отримані результати мають практичне значення, надаючи можливість передбачити зміни характеристик продукту в процесі зберігання.

Ключові слова: теплопередача, перенесення маси, сушіння, крапля, молоко.

Розпилювальне сушіння — один з основних процесів видалення води й отримання порошків у харчовій і переробній промисловості. Нині потужність розпилювальних сушарок досягає 20 т готового продукту на 1 годину. При цьому параметри оброблення продукту й устаткування технологічних процесів, їх вплив на зміну властивостей і якості продукту складні й численні. Взаємозв'язки між експлуатаційними параметрами і характеристиками продукції узагальнені С. King [1]. Зі схеми видно, що їх взаємодія може бути дуже складною і в процесі сушіння крапель (частин) значно впливає на кінцеву якість продукції. Кінетика сушіння однієї краплі стала предметом багатьох досліджень за останні 30 років. Математична модель кінетики сушіння — основа всього розрахунку гідродинаміки сушарки.

Більшість досліджень досі зосереджені на тепло- та масообмінних процесах і кореляції масоперенесення для встановлення граничних умов у моделюванні сушіння за набагато меншої інтенсивності тепло- і масообміну, ніж у промислових розпилювальних сушарках, на створенні механізмів і коефіцієнтів внутрішнього вологоперенесення, а також на процесі формування й руйнування кірочки. Виконано велику кількість експериментальних досліджень і на їх основі розроблено кілька математичних моделей. Останнім часом робота зосереджена на мікроструктурних аспектах формування частинок, а також на точних лабораторних методах для отримання рівнянь кінетики сушіння. Крім того, встановлено, що значне розшарування твердого тіла (розчину) може суттєво впливати на функціональні властивості багатокomпонентних крапель, наприклад, на відновлення сформованих частинок.

Як матеріал для дослідження використовувалося молоко домашніх тварин — кіз, кобил та овець. Молоко — складна дисперсна система, яка містить понад сотню органічних (білки, жири, вуглеводи, ферменти, вітаміни) і неорганічних (вода, мінеральні солі, гази) речовин. Хімічний склад молока різних видів і порід тварин дещо різняться. Молоко овече суттєво відрізняється від інших видів молока вмістом вологи. Масова частка вологи у козиному та кобилячому молоці перевищує цей показник у 1,5 раза. Овече молоко також характеризується найвищим вмістом жиру. В інших видах молока міститься майже вдвічі менше жиру. Високий вміст вуглеводів спостерігається у кобилячому молоці, що в 1,5—2 раза більше за вміст вуглеводів в овечому та козиному молоці.

Зняття ізотерм адсорбції парів відбувалося ваговим методом на вакуумній установці з пружинними кварцовими вагами Мак-Бена. Суть його полягає в тому, що тиск адсорбованого газу або пари вимірюється в заготовленій місткості певного об'єму, яку потім з'єднують з ампулою, що містить адсорбент, і після встановлення адсорбційної рівноваги вимірюють рівноважний

тиск. Ізотерми зображено графічно — як $a = f(P / P_s)$, де a — величина адсорбції, мм/г, P/P_s — відносний тиск парів адсорбтиву.

Досліди із сушіння молока виконувалися на напівпромисловій розпилювальної сушарці «Ніро-Атомайзер» з робочим об'ємом камери 0,9 м³ і продуктивністю за випареною вологою до 10 кг/год. Сушарка дає змогу забезпечити температуру сушильного агента в діапазоні 120...250 °С на вході в сушарку та 80...100 °С — на виході з неї.

Для визначення показників якості та безпеки молочних продуктів використовують методики та методи згідно з ДСТУ 4273: 2003 «Молоко та вершки сухі. Загальні технічні умови».

Результати і обговорення.

Створені для примусової конвекції рівняння тепло- і масообміну в більшості випадків, як правило, набувають такого вигляду:

$$Nu = a_1 + b_1 \text{ Rem Pr}_n, \quad (1)$$

$$Sh = a_2 + b_2 \text{ Rem S}_{nn}, \quad (2)$$

де Nu — число Нусельта; Re — число Рейнольдса; Pr — число Прандтля; Sh — число Шервурда; a , b , m , n — відповідні коефіцієнти.

Існують різні форми цих коефіцієнтів і деякі з яких відображають вплив природної конвекції тощо. Як правило, коефіцієнти a_1 і a_2 для процесів випаровування дорівнюють 2, значення коефіцієнтів b_1 і b_2 — 0,6 згідно з працею W.Ranz і W.Marshall [4]. Ряд дослідників дали подібні або відмінні коефіцієнти залежно від експериментальних систем і використаних розчинів (наприклад, С.Downing [5] і Т.Audu і G.Jefferys [6]). Проте рівняння W.Ranz і W.Marshall [4] найпопулярніше для використання в моделюванні розпилювальної сушарки.

Останні дослідження показали, що під час випаровування крапель води в лабораторних умовах, де рушійна сила в кілька разів вища, отримані співвідношення відрізняються від наведених W.Ranz і W.Marshall [4]. Наприклад, S.Lin і X.Chen [7] встановили, що за температури доквілля 40...160 оС, вологості навколишнього середовища від 0,001 кг/кг і швидкості 0,25...1,0 м/с сухого повітря співвідношення масоперенесення відрізняється від рівняння W.Ranz і W.Marshall. Адекватна відповідність рівняння тепло- і масообміну відіграє важливу роль у точному прогнозуванні не тільки втрати маси частинки з плином часу, а й температурно-часового процесу сушіння частинок.

Найбільш деталізовану математичну модель сушіння краплі знежиреного молока запропонували Y.Sano і R.Keey [8]. Ця модель найточніше відповідає експериментальним даним для зміни маси краплі під час тривалого процесу, але дає значні відхилення в температурно-часових профілях (зокрема в початковий період) [9]. Наведена модель включає в себе рівняння збереження маси і рівняння збереження енергії в поєднанні з граничними умовами.

Рівняння збереження маси:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\frac{2D(W, T_k)}{W + W'} \left(\frac{\partial W}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^2 D(W, T_k) \frac{\partial W}{\partial r} \right\}, \quad (3)$$

де W — вологовміст продукту, кг/кг; t — температура, К; D — коефіцієнт дифузії, м²/с; T_k — температура краплі, К; r — радіальна координата, м.

Для знежиреного молока коефіцієнт дифузії (D) залежно від початкового вологовмісту (W) і температури краплі (T_k) має вигляд:

$$D = f(W, T_k) = \exp \left\{ -\frac{39,912 + 323,39W}{1 + 15,84W} - \frac{\Delta r}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{303} \right) \right\}, \quad (4)$$

де Δr — прихована теплота випаровування води, Дж/кг; R — радіус частин, м.

Наведена залежність досить складна і процедура отримання результатів експерименту трудомістка. Якщо число Біо $< 0,1$ (для теплопередачі), температура рівномірна по всій краплі (частинці), то енергетичний баланс має такий вигляд:

$$\frac{dT_k}{dt} = \frac{4\pi R^2 K (T_{ca} - T_k) + L \rho_k (dX / dt)}{\rho_{сп} C_{сп} + \rho_v C_v}, \quad (5)$$

де K — коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); L — питомі витрати сушильного агента, м³/с; ρ — густина, кг/м³; X — вологість краплі, кг/кг; C — теплоємність, Дж/(кг·К); ca, k, sp, v — нижні індекси, якими позначено, відповідно, сушильний агент, краплю, сухий продукт, воду.

Граничні умови задаються як межі конвекції для тепло- і масообміну. Для перенесення маси треба припустити, що концентрація водяної пари над поверхнею розподілу перебуває в рівновазі з вмістом рідини на поверхні розподілу. Існує реальна відсутність рівноважних ізотерм крапель продукту (частин) за високої вологості і високих температур через труднощі створення точного приладу для їх вимірювання. M.Stevenson [9] використовував модель Y.Sano і R.Keeу включно з рівняннями W.Ranz і W.Marshall для тепло- і масообміну для моделювання процесу сушіння крапель знежиреного молока. Експериментальні дані показують, що зміна маси добре відповідає моделі, а зміна температури випаровування значно відрізняється від теоретичних розрахунків.

Інші моделі сушіння крапель рідких продуктів наводять S.Nesic і J.Vodnik [10], X.Chen зі співавторами [11]. T.Langrish і T.Kockel [12] передбачають спрощення базової моделі. S.Nesic і J.Vodnik [10] припустили, що кірочка формується за конкретного вологовмісту. Але експериментальна робота виконана в невеликому обсязі. X.Chen та інші [11] поєднали зменшення поверхні розподілу і кінетику пороцесу для моделювання сушіння краплі (див. рис. 3).

Дослідники T.Langrish і T.Kockel [12] довели відповідність характерної кривої сушіння ван Меля прогнозованим даним моделі X.Chen та ін. [11]. Проте досі немає праць зі «зворотності цих моделей», оскільки вони тільки припускають, що процес сушіння відбувається. Крім того, всі експериментальні дані отримані за ізотермічної та постійної вологості. Також не було перевірки цих моделей для зміни умов сушіння. У промислових сушарках розпилюється багато частинок і цілком імовірні великі зміни у навколишньому середовищі навколо крапель.

У цілому, експериментальні дослідження й експериментальні пристрої для сушіння однієї краплі можуть бути класифіковані на основі сушіння матеріалу, краплі, механізму підтримання в стаціонарних або перехідних умовах навколишнього середовища [2—4,6,8,11—14]. За матеріалом для сушіння дослідження можуть бути згруповані так: випаровування чистих рідин, сушіння крапель, що містять розчинні тверді речовини, і сушіння краплі з нерозчинними речовинами. У молочних продуктах існують як розчинні у воді компоненти, так і нерозчинні.

Механізм утримування краплі в ході експериментів можна класифікувати так: сопла, капіляр, безперервна елементарна скляна нитка, ультразвуковий підхід і процес вільного падіння.

У методі сопла, який використали T.Audu і G.Jefferys, основним недоліком є подібність діаметрів сопла і краплі, що призводить до значного порушення картини обтікання повітря навколо краплі. Теплопровідність через сопло близька до реальної через велику площу поверхні зіткнення сопла з краплею.

У методі скляних ниток занурення у краплю частини кінчика нитки скла додає лише близько 0,2 % об'єму на 2 краплі мкл. Можна вважати, що тепловий ефект в такій системі у краплі уздовж нитки не перевищує 1 % від загального теплового потоку до краплі. Недоліком цього методу є відсутність можливості вільного обертання і відносно великий розмір крапель (0,6...2 мм), але він використовується досі, хоча розмір частинок відрізняється від реального в промисловій розпилювальній сушарці (~100 мкм).

Капілярний метод має ті самі переваги, що й метод скляної нитки, але безперервне подавання нової рідини для підтримання розміру краплі порушує реальну зміну концентрації розчиненої речовини. Цей метод не підходить для розчинів, у яких утворюється тверда кірочка.

R.Тоеі і T.Furuta використали висхідний потік повітря з ультразвуковим полем для утримування краплі на місці (у повітрі) для спостереження. Це надає можливість уникнути втручання датчиків або підтримання, але значно ускладнює отримання зміни маси чи температури для розчиненої речовини краплі.

Варто зауважити, що вільне падіння - найкращий спосіб для вивчення випаровування крапель, оскільки точно імітує процес сушіння розпиленням. Установка складається з генератора краплі, сушильної колони у вертикальному положенні з гарячим потоком газу, спеціального калориметра, який може розміщуватися на будь-якій висоті, щоб упіймати краплю і виміряти її середню температуру й вміст вологи. Установка досить складна і використовується переважно для експериментів з чистим розчинником або тільки для дослідження морфології частинок без вимірювання втрат маси. Часто використовується високошвидкісна відеозйомка, якщо важливим для дослідження є розмір крапель або морфологія частинок.

Від складу продукту залежать параметри процесу сушіння. Початковий вміст сухих речовин і умови сушіння також значно впливають на процес сушіння. Один із прикладів для підтвердження відмінності у складі молока наведено в табл. 1. Навіть після зміни площі поверхні під час сушіння та інтенсивності сушіння область «постійної швидкості» зміни маси не показують. Продукти з високим вмістом жиру чи білка дають різні швидкості сушіння

порівняно з більш стандартними продуктами, такими як незбиране і знежирене молоко. Така тенденція може стосуватися також зміни температури сушіння.

Таблиця. Склад сухого молока домашніх тварин

Показники	Масова частка білка, %	Масова частка жиру, %	Масова частка лактози, %
Овече молоко	25,2	32,0	21
Козине молоко	29,6	22,0	40,0
Кобиляче молоко	16,1	12,0	66,0

Аналізуючи десорбційні криві (рис. 1), можна зробити висновок, що зі зменшенням тиску парів води зразки віддають вологу майже до кінця, оскільки гістерезис не входить у нульову позначку, а закінчується навіть після двогодинного вакуумування на лінії ординат. Це свідчить про те, що зразки видаляють тільки адсорбовану вологу, при цьому хімічно зв'язана волога не видаляється.

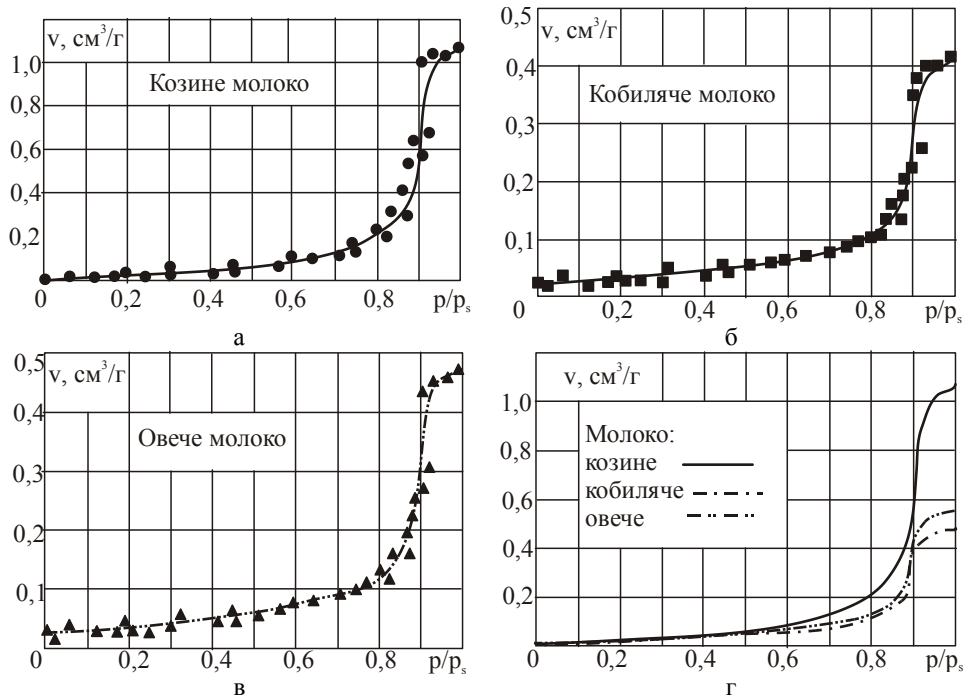


Рис. 1. Криві гістерезису видів молока залежно від тиску водяних парів

Треба зазначити, що зразки (крім зразка «Козине молоко») мають дуже близьку пористу структуру один щодо одного (рис. 2), проте зразок «Козине молоко» більше притягує до себе вологу, ніж інші зразки, і має більший об'єм пор: $V_s = 0,98 \text{ см}^3/\text{г}$ (рис. 2, а). Найменше вологи поглинає зразок «Кобиляче молоко» (рис. 2, в), до того ж у нього найменша питома поверхня, тобто найгірші структурні характеристики, тому з усіх зразків він є найгіршим адсорбентом. Проте для зберігання кобиляче молоко є кращим продуктом,

оскільки воно пізніше за всі інші зразки розмокатиме у приміщенні з підвищеною вологістю.

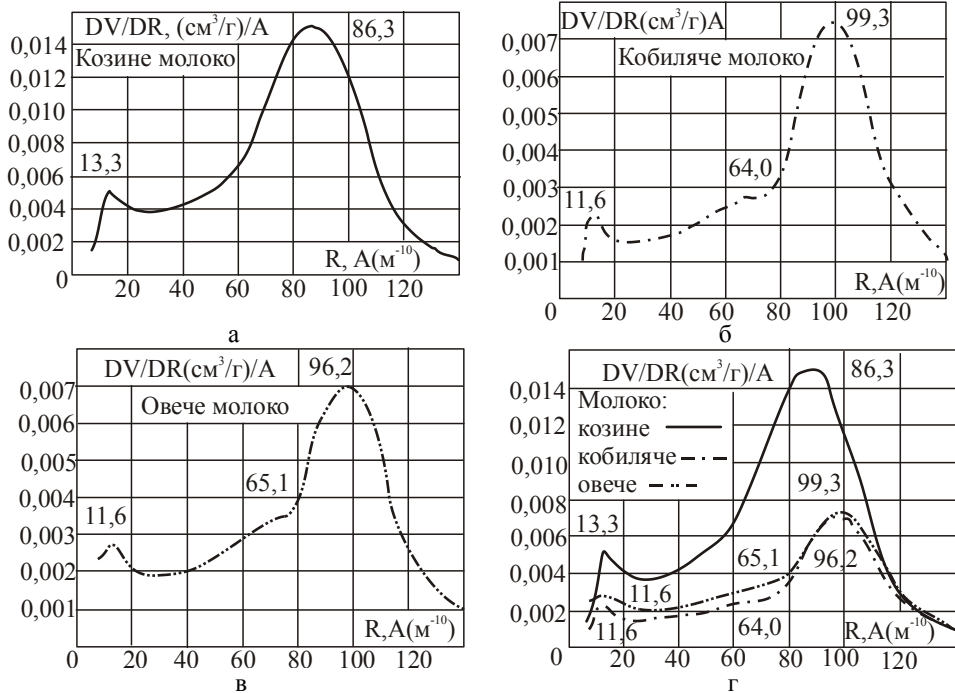


Рис. 2. Криві гістерезису видів молока залежно від тиску водяних парів

Зразок «Козине молоко» є найкращим адсорбентом серед трьох зразків, проте зберігатися він повинен найгірше, тому що краще й у більшій кількості притягує вологу. Проте зі зниженням вологості козине молоко віддає вологу, як і інші зразки. Діаметр пор у зразка «Козине молоко» такий же, як і в решти зразків, проте кількість цих пор набагато більша, оскільки крива розподілу пор за радіусами проходить по всій ширині набагато вище за інші, що й спостерігається у структурних характеристиках. Велика кількість пор дає змогу цьому зразку набирати вологу у більших кількостях, ніж інші зразки, тому за великої вологості зразок «Козине молоко» буде мати вищу вологість.

Висновки

У короткому огляді наведено значну кількість праць, в яких розглянуто сушіння молока на розпилювальній сушарці і практичне значення виконаних досліджень для вивчення процесу моделювання, оптимізації і розроблення нових продуктів. Проте недостатньо інформації про усадку харчових крапель, вплив умов сушіння на їх хімічний склад. Крім того, дослідження «вільного польоту» краплі продукту в гарячому повітрі — також питання майбутніх досліджень, які будуть спрямовані на вивчення кінетики дезактивації біологічно активних компонентів (наприклад, інактивації ферментів) під час сушіння крапель продукту.

Результати виконаних досліджень вказують на відмінності у складі різних видів молока. Про це свідчать ізотерми, що характеризують здатність продукту поглинати і віддавати вологу, оскільки основні складові продукту (білки, жири, вуглеводи) різняться здатністю поглинання та віддачі вологи. Отримані результати мають практичне значення, тому що надають можливість передбачити зміни характеристик продукту в процесі зберігання. Оскільки отримане сухе молоко використовується для виробництва дитячих адаптованих сумішей, які, як відомо, мають тривалий термін зберігання, то збереження продуктом сталої вологості є досить важливим питанням. За результатами досліджень можна стверджувати, що кобиляче молоко є досить доброю сировиною, яка поглинає найменше вологи, а отже, здатна протягом тривалого часу зберігатися, не змінюючи своїх властивостей.

Література

1. *Дубинин М.М.* Методы приведения изотерм адсорбции и удельная поверхность адсорбентов. — В кн: Адсорбция и пористость. — М.: Наука, 1976. — С. 105—111.
2. *Киселев А.В., Древинг В.П.* Экспериментальные методы в адсорбции и молекулярной хроматографии. — М.: Издательство МГУ, 1973. — 448 с.
3. *King C.J.* Food-quality factors in spray drying. In *Advances in Drying*; Mujumdar, A.S., Ed.; Hemisphere Publishing Co.: Washington. — 1984. — Vol. 3. — P. 71—120.
4. *Ranz W.E., Marshall W.R.* Evaporation from drops. *Chemical Engineering Process.* — 1952. — 48 (3). — P. 141—146.
5. *Downing C.G.* The evaporation of drops of pure liquids at elevated temperatures: rate of evaporation and wet-bulb temperatures. - *AIChE Journal.* — 1966. — 12 (4). — P. 760—766.
6. *Audu T.O.K.; Jefferys G.V.* The drying of drops of particulate slurries. - *Trans. IChemE.* — 1975. — 53. — P. 165—172.
7. *Lin S.X.Q., Chen X.D.* Improving the glass-filament method for accurate measurement of drying kinetics of liquid droplets. *Trans. IChem. E Part A.* — 2002. — 80. — P. 401—410.
8. *Sano Y., Keey R.B.* The drying of a spherical particle colloidal material into a hollow sphere. *Chemical Engineering Science.* — 1982. — 37 (6). — P. 881—889.
9. *Stevenson M.J.* Computational Modeling of Milk Droplet Drying. In ME thesis; Chemical and Materials Engineering Department The University of Auckland, 1998.
10. *Nesic S., Vodnik J.* Kinetics of droplet evaporation. *Chemical Engineering Science* — 1991. — 46 (2). — P. 527—537.
11. *Chen X.D., Reid D., Chen N.X., Fletcher A., Pearce D.* A new model for the drying of milk droplets for fast computation purposes. *Chemca'99*; On CD Rom: Newcastle, Australia, 1999.
12. *Langrish T.A.G., Kockel T.K.* The assessment of a characteristic drying curve for milk powder for use in computational fluid dynamics modeling. — *Chemical Engineering Journal.* — 2001. — 84. — P. 69—74.
13. *Awonorin S.O.* Evaporation rates of freely falling liquid nitrogen droplets in air. *Heat Transfer Engineering.* — 1989. — 10 (1). — P. 26—36.

14. Cheng H.W., Jefferys G.V., Mumford C.J. A receding interface model for the drying of slurry droplets. — *AIChE Journal*. — 1986. — 32 (8). — P. 1334—1346.
15. Toei R., Furuta T. Drying of a droplet in a non-supported state. *AIChE Symposium Series, Food Process Engineering*. — 1982. — 218 (78). — P. 111—117.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СУШКЕ МОЛОКА РАСПЫЛЕНИЕМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕТРАДИЦИОННОГО СЫРЬЯ

К.А. Белинская, В.В.Шутюк, Н.А. Фалендыш
Национальный университет пищевых технологий

В статье анализируются основные математические модели кинетики сушки одной капли, аспекты образования микроструктуры сухого продукта в лабораторных и промышленных условиях, явление расслоения твердого тела (растворенного вещества) и их связь с функциональными свойствами. В качестве материала для исследования использовалось молоко домашних животных — коз, кобыл и овец. Опыты по сушке молока выполнялись на полупромышленной распылительной сушилке «Ниро-Атомайзер», снятия изотерм адсорбции паров происходило весовым методом на вакуумной установке с пружинными кварцевыми весами Мак-Бена. Результаты выполненных исследований указывают на различия в составе различных видов молока. Об этом свидетельствуют изотермы, характеризующие способность продукта поглощать и отдавать влагу, поскольку основные составляющие продукта (белки, жиры, углеводы) отличаются способностью поглощения и отдачи влаги. Полученные результаты имеют практическое значение, давая возможность предвидеть изменения характеристик продукта в процессе хранения.

Ключевые слова: *теплопередача, перенос массы, сушка, капля, молоко.*