

## **DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MODELS OF DRYING PROCESS FOR THE TASK OF GUARANTEED CONTROL OF PRODUCTION ORDER**

V. Ivashchuk, A. Ladanyuk

*National University of Food Technologies*

---

**Key words:**

*Spray drying  
Model of control  
Milk production*

**Article history:**

Received 03.07.2015  
Received in revised form  
19.07.2015  
Accepted 21.08.2015

**Corresponding author:**

V. Ivashchuk  
**E-mail:**  
npnuht@ukr.net

---

**ABSTRACT**

The article investigates the development of mathematical models of spray dryer for milk production, which will be used for process monitoring and control. The urgency of the development of mathematical model in terms of existing restrictions and explosiveness in order to improve the quality of wide range of products had been done. The analysis of foreign works of leading scientific institutions of control processes, which had been done, has proved the need to formalize the method for construction of models, those will be used when monitoring and controlling the drying process. The permissible simplification, limitations and assumptions for the mathematical modeling and approximation of technological processes have been defined. The mathematical models of processes in terms of their functional purpose have been represented as detail. The features of construction of the model for modern drying chamber with rotary spraying have been described. The future direction of research has been pointed.

---

## **РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ СУШІННЯ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ЗАДАЧІ ГАРАНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РЕГЛАМЕНТОМ**

В.В. Іващук, А.П. Ладанюк

*Національний університет харчових технологій*

*У статті розроблено математичні моделі розпилювальної сушарки для молочного виробництва, що можуть бути використані для контролю та керування процесом. Доведено актуальність розробки математичної моделі, враховуючи обмеження, вибухонебезпеку та підвищення якості широкого асортименту продукції. Проведено аналіз досліджень зарубіжних наукових установ, які спеціалізуються на вивченні процесів управління, що доводить необхідність формалізації методики моделювання для використання в задачах спостереження та керування процесами сушіння. Визначено допустимі спрощення, обмеження та припущення щодо математичного моделювання й апроксимації технологічних процесів. Детально описано математичні моделі процесів за їх функціональним призначенням. Визначено*

*особливості моделювання сучасних сушильних камер з дисковим розпиленням і подальший напрямок досліджень.*

**Ключові слова:** розпилювальна сушарка, моделі керування, молочне виробництво.

**Постановка проблеми.** Масштаби діяльності в сучасних виробництвах сухого молока створюють необхідність виключення помилок в оперативному управлінні процесом, оскільки існує можливість порушення замовленої специфікації продукту та великий ризик з точки зору вартості втраченого/погіршеного продукту. Вказана небезпека також обумовлюється витратами через зупинку/пуск великого виробництва в разі несправностей (блокування циклону, блокування трубок випарного апарата, блокування апаратів з киплячим шаром тощо), кожна з яких може бути викликана недостатньо керованим процесом [1].

Вага помилки стає ще більш актуальною з урахуванням пожежонебезпеки виробництва. Так, зважений молочний пил у повітрі провокує ризик виникнення пожежі та вибуху, тоді як стримування, тобто виробництво з контролем максимального тиску спалаху істотно обмежує продуктивність комплексу. Враховуючи актуальність небезпеки, остаточне досушування продукту доцільно проводити в транспортері з псевдозрідженим дном і наступному циклоні.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Сьогодні, у зв'язку з різноманітністю складних сумішей, які підлягають сушінню, виникла необхідність розробки формалізованої методики, заснованої на фізико-хімічних і термодинамічних властивостях процесу сушіння. Краще розуміння біохімічних властивостей молочних продуктів перед потраплянням у сушильну камеру, передача води під час розпилення в сушильній камері, властивості порошків і факторів впливу на процес стали невід'ємною частиною технології виробництва сухого молока. В пошуках більш сучасних стратегій керування процесами при виробництві сухих молочних продуктів необхідне розуміння статичних і динамічних властивостей цих процесів, однак опис і розвиток повних, точних математичних моделей є ускладненим через значну кількість фізичних, хімічних і механічних властивостей технологічних систем. Так, складові характеристик входять, наприклад, у тепло- і масопередачі як у частці елемента середовища, так і на межі між твердою та рідкою фазою частки й оточуючого середовища. Складність перетворень, які необхідно представити математичними виразами, характеризується наявністю перехресних зв'язків між змінними об'єкта.

Відсутність технічно й економічно виправданих математичних моделей перешкоджає здійсненню виробниками оптимізації параметрів процесу з точки зору витрат енергії та якості порошку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка аналітичних моделей вимагає глибоких досліджень з визначення природи, а отже, для багатьох існуючих процесів, фізика яких досі залишається суперечливою, не може бути застосованою. Частіше аналітичне представлення реалізується у вигляді

нелінійної динамічної моделі та є максимально наближеним до природи процесу. На відміну від моделей емпіричного типу, цей тип моделей є повністю прогнозованим, навіть у випадку, коли зміни в технологічних умовах знаходяться поза межами технологічно регламентованого діапазону. Незважаючи на те, що модель є гнучкою і реалістичною, в підсумку отримуємо модель високого ступеня складності. Чим більш складною буде модель, тим важчою буде оцінка значень її параметрів.

Так, підхід до створення емпіричної моделі запропонований для моделювання процесів розпилювальної сушарки та регулювання вмісту вологи на основі періодичного вимірювання вмісту води у вихідному продукті [2].

Застосування ж підходу аналітичного моделювання до процесів випарювання та розпилювальної сушарки вимагає використання системи термодинамічних рівнянь для опису тепло- і масообміну з точки зору опису параметрів процесів, які проходить крапля сировини на кожному етапі обробки. Крім того, міжпараметричні зв'язки процесу мають бути чітко визначеними в сенсі аналітично відомих оцінок. Термодинамічні параметри повинні бути визначені в діапазоні умов виробничого процесу для кожної композиції сировини, яка переробляється [3]. У випадку розпилювальної сушки щільність, поверхневий натяг, в'язкість і коефіцієнти теплопередачі необхідно буде визначити в діапазоні розмірів крапель, загальної кількості твердих речовин і температури, при яких молоко розпилюється після попереднього випарювання. Реакція окремих частин конкретних продуктів за різних робочих умов описана у [4]. Також відома дуже точна модель обчислювальної динаміки потоку (CFD) [5], яка здатна представляти потоки з частинок і повітря у розпилювальній сушарці з високою точністю. Спільним для названих підходів в обох випадках є те, що моделі не були адаптовані для розробки систем управління в розпилювальній сушарці. Існуючі моделі більше використовуються для вивчення продукту з хіміко-технологічною метою або для вдосконалення конструкції розпилювальної сушарки. Відома модель інтелектуального датчика для контролю вологості, де вологість визначається за п'ятьма вхідним змінним: в'язкістю і розміром крапельок розпилу, швидкістю передачі тепла в падаючій плівці випарного апарата, залежно від в'язкості та швидкості руху потоку. В'язкість молока, яке концентрується, у свою чергу, залежить від складу продукту, що є достатньо складною системою [6]. Визначено, що для якості розпилення фізичні характеристики розпилу залежатимуть від динамічної в'язкості продукту в контрольній точці [7] і подібні умови руху на той момент буде важко відтворити в умовах лабораторії. Теплові та масові характеристики передачі крапель у вигляді спрею залежать від розподілу розміру крапель і змінюються з температурою, вмістом сухих речовин і часу процесу сушіння крапель. Деякі з цих характеристик продукції вимірюються при обмежених діапазонах для окремих продуктів [8], проте поки що оцінка розподілу розміру крапель у точці розпилення не знайшла практичного застосування в технології сушіння.

**Метою дослідження** є представлення порядку розробки моделі для використання її в алгоритмі керування процесом розпилювальної сушарки, забезпечення регламентів широкого спектра продуктів за вмістом жирів і

складом сухих компонентів, економії витрат тепла шляхом максимального використання об'єму сушильної камери.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час розробки практичної моделі для використання її в алгоритмі керування виконуються спрощення. Так, наприклад, зміна температури навколо часточки, що розпилюється в сушильній камері, фізично наближена до реального процесу конвекції, тобто є можливість використовувати коефіцієнт теплопередачі, а не модель фактичного ламінарного потоку повітря. Отже, емпірична модель обирається для визначення остаточного вмісту вологи у порошок.

У більшості практичних моделей невизначеність у поведінці процесу виникає через неспостережні порушення, неактуальну динаміку та нелінійності поведінки параметрів. Хоча математична модель є лише наближенням реального процесу, але цілком прийнятно, якщо вона буде здатною відновити необхідне уявлення про процес і, таким чином, задовольнити заплановані зміни процесу.

Моделювання розпилювальної сушарки може бути реалізоване на різних рівнях деталізації (від опису потоку, швидкості реакції і впливу на середовище крапель рідини в загальному потоці енергії і масової витрати сировини загалом на розпилювальну сушарку). Отже, для задач розробки й аналізу системи управління повна модель розпилювальної сушарки не вимагається. Так, можна розглядати застосування двох типів моделей:

- модель обладнання, яка поєднує в собі фактори, що впливають на процес розпилювального сушіння й описує середовище, де відбувається сушіння частинок;

- модель частинок, яка описує, як частинки реагують на сушіння в середовищі сушильної камери.

Якість продукції, яка є метою управління, складається з підгруп параметрів, таких як вміст вологи, термічна деструкція, зміст аромату, структура і розмір розпилювальних часток. З досвіду проведених випробувань відомо, що найбільш ефективним параметром для оперативного контролю якості є вміст вологи в продукті. Динаміка води в сировині є однією з найбільш важливих властивостей сушіння. Дослідження залежності поживних якостей, доступності поживних речовин молочних порошоків залежно від інтенсивності різних видів термічної обробки вимагає введення технологічних обмежень у процес виробництва [1]. Так, для операції сушки розпиленням є чотири основних явища, що виражаються:

- у розпиленні рідкого продукту;
- у сушці крапель після утворення спрею;
- у русі краплини в розпилювальній сушарці;
- у досушуванні готового продукту.

Процес розпилювального сушіння включає чотири етапи: атомізацію (розпилення) сировини, контакт розпилу з повітрям, випаровування вологи з крапель і вивантаження продукту.

Створення моделі температури і ступеня вологості в камері передбачає такі етапами:

- застосовуються рівняння балансу маси й енергії;

- розглядається модель стійкого стану розпилювальної сушарки;
- зі стаціонарної моделі як підоснови розробляється динамічна модель;
- розглядаються характеристики потоків живлення процесу сушіння;
- для уточнення моделі вивчається рівноважна вологість і кінетика сушіння для конкретного продукту;
- поведінка частинок (процес агломерації) не враховується;
- аналізується крок відповіді системи;
- дані використовуються для порівняння стійких базових результатів моделювання і часу відгуку для динамічної моделі;
- динамічна модель лінеаризується;
- модель вмісту вологи в частинках представляється у вигляді простої лінійної залежності як функція основних змінних процесу, що були оцінені.

Для управління частіше використовується проста модель балансу маси й енергії, включаючи рівновагу відносин за кількістю вологи у частці. Для моделювання розпилювальної сушарки переважно використовуються інженерні методи розрахунку, тому що процес сушіння може бути представлений як реакція змішування між газовою (пароподібний стан) і рідкою частками речовини. Процес реакції може бути представлений або у вигляді «реактора безперервного змішування» (РБЗ), реактора з поршнеvim потоком (РПП) або ж їх послідовності. У РБЗ зміст реактора передбачається в ідеалі з необхідним перемішуванням, де і реагенти, і продукти надходять від реактора до реактора безперервно. Це означає, що значення температури, тиску та концентрації залежать від просторового положення всередині реактора. Відповідно до заявленого вище припущення, склад і температура вихідного потоку ідентичні характеристикам газу в камері. РПП є ідеальним перемішуванням потоку в трубі, в якому рідина добре перемішується як у радіальному, так і в осьовому напрямках. Швидкість, склад і температура рідини є функціями осьового положення (вздовж довжини труби). Елемент поршневого потоку може бути також описаний як нескінченна кількість РБЗ в каскадному з'єднанні. Для моделювання прямоочних розпилювальних сушарок (вхід повітря згори і відвід повітря в нижній частині сушарки) передбачається, що прийнятий тип реактора формує найбільш адекватне представлення процесу, тобто модель РБЗ є найбільш придатною моделлю для ілюстрації перемішування повітря. Крім того, повітря входить у сушарку з верхньої частини камери так, що для моделі РБЗ ця температура не буде залежати від довжини шляху повітряного потоку, що є актуальним для нижньої частини колони з додатковими радіальними прискорювачами. Практичне моделювання процесів розпилювальної сушарки передбачає такі припущення та спрощення: 1. Спосіб сушіння неспостережної частини камери моделюється як реактор безперервного змішування (РБЗ). У цьому випадку газ сушарки і речовина безперервно потрапляють у камеру на рівномірних швидкостях потоку. Стан газу в камері ідентичний станом газу, що виходить з камери. 2. Модель буде заснована на балансі маси й енергії з рівноважними відносинами середовища. 3. Газове середовище передбачає склад сухого повітря і пари, які враховуються як ідеальний газовий потік та ідеальна суміш. Це впливає на розрахунок щільності газу і на співвідношення

між абсолютною вологістю й парціальним тиском пари. 4. Рідина подається повністю розпорошеною, тобто всі краплі мають єдиний розмір і однорідні. Для простоти розрахунків частинки приймаються сферичної форми, добре змішуються в камері та не взаємодіють одна з одною. Для спрощення процес агломерації та зіткнення частинок не враховуються. Робочі параметри розпилювальної сушарки отримують через систему розрахунків масового і теплового балансу в стаціонарному стані. Вимоги до швидкості потоку повітря можуть бути оцінені через характеристики продуктивності, характеристики сировини, висушеного продукту, з урахуванням властивостей навколишнього повітря. Відповідний вміст вологи в кінцевому продукті для існуючого потоку повітря сушки може бути обчислений для апіорі заданих умов процесу. Передбачається, що сушарка добре перемішує вміст, тому стан газу рівномірний всередині сушильної камери. Очікується, що на вході і виході газу частинки знаходяться в рівновазі. Відповідно, вміст вологи в частинках вихідного продукту знаходиться в рівновазі з температурою і вологістю газу.

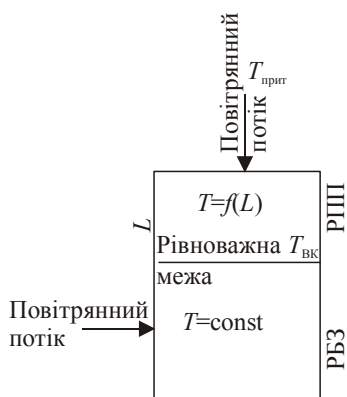


Рис. 1. Схема механізму формування параметрів дискової розпилювальної сушарки

Однак це динамічна рівновага, яка змінюється відповідно до зміни вологості  $dm$  і температури середовища:

$$\frac{dm}{dt} = k_m (T_{\text{прит}} - T_{\text{вк}}), \quad (1)$$

де  $T_{\text{прит}}$ ,  $T_{\text{вк}}$  — температура повітря, що надходить згори камери сушіння, та внутрішня температура камери в рівноважній межі потоку;  $k_m$  — коефіцієнт, що встановлює відповідність між кількістю втрат вологи при певній різниці температур, отриманий емпірично, для певного розмаху втрат вологи та розташування рівноважної межі температури камери.

Метою керування виступає переведення координат стану в інший статично стійкий стан з умовою мінімізації динамічної та статичної похибки. Умовою забезпечення керованості й статичної стійкості для багатомірного керування приймаємо реалізацію такого керування за обраним каналом, що забезпечуватиме від'ємний крок сходження амплітудно-фазової характеристики. Таке керування має бути забезпечене в каналах, де координати стану,

якими утворений канал, мають найбільший, з доступних координат, час спаду автокореляційної функції. Кожний рівень параметричної складності технологічного об'єкта характеризується відносною невизначеністю або, навпаки, частковою спостережністю. Якщо об'єкт доволі просто піддається декомпозиції, то існує можливість розділення каналів за корельованими змінними, також можна поділити і невизначеність між цими каналами. Так, виникає потреба у введенні інформаційної надмірності при побудові математичної моделі, яка забезпечуватиме довизначення координат стану між корельованими координатами суміжних груп моделей РБЗ та РПП процесу сушіння. Оскільки непряме визначення координат передбачає мультиплікативне накопичення помилки, що обґрунтовує виникнення статичної похибки при керуванні, то задача зводиться до скорочення ланцюжка непрямих вимірювань шляхом додаткового визначення неспостережних змінних через інші суміжні координати об'єкта. Так, для розміру краплини додаткове визначення відбувається через прискорення, яке передає обертальний диск розчину. У свою чергу, масу, яка накопичуватиме енергію прискорення, необхідно поставити в залежність від густини або динамічної в'язкості, що буде скорегована температурою розчину. В процесі сушіння краплина втрачатиме свою масу через втрату вологості, а отже, і накопичену енергію. Таким чином, для обмеження траєкторії польоту розпиленого розчину в сушильній камері необхідним є обмеження розміру краплин при апріорі відомих змінах її вищезазначених характеристик.

У практиці для розпилювальної сушарки параметри повітря, що виходить з камери, часто використовуються для опису умов сушіння, а також як керуюча змінна при управлінні зі зворотним зв'язком. Але малоімовірно вдале представлення динамічної моделі сушки РПП, часу, за який крапля втрачає імпульс сили, а відповідно, й масу при розпиленні, яка обчислюється десятками мілісекунд. Нелінійну залежність сушіння сировини, яку можна уявити частково лінійним еквівалентом (2) з урахуванням діапазонів змін аргументу, доцільно представити матрицею коефіцієнтів «С» у вигляді простору станів координат, де вектор управління формується множиною кроків:

$$u(k) = \Delta u(k) + u(k - 1), \quad (2)$$

а  $\Delta u(k)$  — приріст вхідного значення за обраним каналом керування. Вектор станів будується у вигляді приростів на помилку із суміжним діапазоном зміни координат:

$$\bar{x}(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ u(k - 1) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де математична модель набуває такого вигляду:

$$\begin{aligned} x(k + 1) &= Ax(k) + Bu(k); \\ y(k) &= Cx(k). \end{aligned} \quad (4)$$

Відновлені значення формуватимуться як  $\hat{y} = Gu + y_0$ , де матриця коефіцієнтів для отримання відновлених значень для моделі (4) набуває такого вигляду:

$$G = \begin{pmatrix} \overline{CB} & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \overline{CAB} & \overline{CB} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & & \overline{CB} & 0 \\ \overline{CA}^{N_2-1}\overline{B} & \dots & \dots & \dots & \overline{CB} \end{pmatrix} \quad (5)$$

та

$$y_0 = \begin{pmatrix} \overline{CA} \\ \overline{CA}^2 \\ \vdots \\ \overline{CA}^{N_2} \end{pmatrix} \bar{x}(k). \quad (6)$$

Необхідно зважати на те, що контроль температури вихідного повітря з камери слабо корельований з впливом нагрітого повітря на процес сушіння, зважаючи на існування кількох додаткових потоків нагрітого повітря, розташованих по висоті камери, що тангенціально прискорюють частинки розпилу. Таким чином, врахування температури в рівноважній межі камери, температури нагрітого повітря, динамічна в'язкість молочної сировини, що надходить до атомайзера (розпилювача), формує доступний опис стану об'єкта системою координат стану. Такий важливий показник, як відстань розпилу залишається на емпіричному уявленні через зв'язок параметрів: динамічної в'язкості  $\mu_{\text{сир}}$ , густини сировини  $\rho_{\text{сир}}$ , маси краплини  $m_{\text{сир}}$ , яка формується через поверхневий натяг  $\sigma_{\text{сир}}$  та прискорення  $a_{\text{ел\_сир}} = f(\omega_d)$ , сповіщене атомайзером; прискорення, у свою чергу, призводить до формування імпульсу сили через отриману масу краплини  $m_{\text{сир}}$ , що обумовлює шлях розпилу й траєкторію краплини, яка утворює поверхню теплообміну  $S_{\text{сир}}$  (рис. 2).

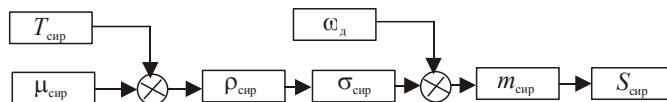


Рис. 2. Структурно-параметрична схема зв'язку поверхні теплообміну за різних характеристик сировини

Задача економії витрат пов'язується з ефективним використанням топкових газів. Відповідно, вказана задача вимагає оцінити кількість енергії, що витрачається на сушіння, передбачає використання різниці температури у сушильній камері й температури повітря, яке надходить, що корелюється з витратою сировини на атомайзер. Таким чином, для формування економічного сушіння необхідно врахувати нелінійний зв'язок між тепловим потоком сушильного агента та кількістю тепла, що втрачається під час руху сировини крізь сушильну камеру. Слід врахувати, що через наявність додаткових потоків по висоті сушильної камери температура суттєво спотворюється, а тому оцінка буде відносною. Діапазон зміни температури повітря, що



надходить, знаходиться в межах 50—70 °С і залежить від встановленої верхньої межі для мінімального розміру краплини сировини. Використання динамічних характеристик у параметричній моделі процесу сушіння не є ефективним через відсутність зміни основного несучого потоку повітря під час роботи сушарки. Процедура зводиться до нелінійних рівнянь, де динаміка зміни компонентів може бути врахована через параметричні коефіцієнти як інтегральну кількість впливу параметрів стану:

$$\zeta_{\text{поч\_пов}} F_{\text{пов}} C_{\text{води}} (T_{\text{прит}} - T_{\text{вк}}) = k_{\text{тп}} S_{\text{сир}} (T_{\text{сир}} - T_{\text{вк}}) m_{\text{сир}}, \quad (7)$$

де  $\zeta_{\text{поч\_пов}}$  — відносна вологість повітря;  $F_{\text{пов}}$  — витрата повітря;  $C_{\text{води}}$  — теплоємність води.

Оскільки модель розглядається як ланцюжок з'єднаних РБЗ, то температура сировини в потоці буде наближатись до температури повітря, яке вона охолоджує, тобто до рівноважного стану води за створеного розрідження в сушильній камері. Коефіцієнт теплопередачі  $k_{\text{тп}}$  може бути знайдений емпірично і для різної характеристики сировини він буде унікальним. Площа поверхні розпиленої сировини  $S_{\text{сир}}$  може бути знайдена як емпірична залежність від температури, поверхневого натягу, динамічної в'язкості та швидкості обертання розпилюючого диска.

Втрата маси розпилених краплин залежить від поверхні теплообміну, і, відповідно, від розміру кожної краплини, тому динамічна в'язкість розчину за його температури формує задачу для швидкості обертання розпилювального диска. Оскільки завжди існує проблема ефективного використання робочої камери та відповідності геометрії розпилу, то дана залежність має визначатися емпірично з подальшою апроксимацією, яка буде унікальною для кожної сушильної камери, конструкції диска, напрямку та швидкості потоку повітря, що нагрівається. Для ефективного використання сушильної камери необхідно максимально використовувати простір камери, тому потік тепла, що спричинює надходження повітря, має поглинатися максимальною кількістю розпиленого середовища. Витрата речовини, яка надходить у сушильну камеру, визначає різницю температур між вхідним повітрям і контрольною точкою всередині сушильної камери.

### **Висновки**

Аналіз існуючих методів математичного моделювання підтвердив необхідність удосконалення існуючих математичних моделей розпилювальної сушарки з урахуванням особливостей процесу та спрощень з використанням сучасних методів експериментальних досліджень. Для процесу сушіння молочних продуктів розроблена методика математичного моделювання, що включає виконання послідовності етапів з урахуванням особливостей об'єкта й обраного математичного апарата. Розроблена методика створення моделі дозволяє враховувати мету керування й особливості експлуатації об'єкта та може використовуватися для задачі гарантованого управління. Визначено порядок дій з розробки математичної моделі, характеристики обмежень і прийнятний апарат математичного наближення.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оперативну оцінку емпіричних залежностей на практичному об'єкті в умовах нормального функціонування об'єкта.

### Література

1. O'Callaghan D. Modern process control techniques in the production of dried milk products — a review / D. O'Callaghan, P. Cunningham // *Le Lait*. — 2005. — Vol. 85 (4—5). — P. 335—342.
2. Telang A.M. Optimization of Process Parameters for Spray Drying of Fermented Soy Milk (Citations: 3) / A.M. Telang, B.N. Thorat // *Drying Technology*. — 2010. — Vol. 28, # 12. — P. 1445—1456.
3. Dufour P. Control Engineering in Drying Technology: Review and Trends/ P. Dufour // *Drying Technology*. — 2006. — Vol. 24 (7). — P. 889—904.
4. Masters K. Spray drying in Practice / K. Masters. — Charlottenlund: SprayDryConsult, 2002. — 464 p.
5. Palencia C. Spray drying dynamic modeling with a mechanistic model / C. Palencia, J. Nava, E. Herman, G.C. Rodríguez-Jimenes, M.A. García-Alvarado // *Drying Technology*. — 2002. — Vol. 20(3). — P. 569—586.
6. Westergaard V. Milk Powder Technology. Evaporation and Spray Drying / V. Westergaard. — Copenhagen: NIRO A/S, 2004. — 337 p.
7. Investigation and visualization of droplet deformation and breakup in complex laminar flow fields / S.F.M. Kaufmann, K. Feigl, P. Fischer, E.J. Windhab; Ed J.J. Bimbenet // *Proceedings of 9th International Congress of Engineering and Food, Montpellier, France, 7—11 March 2004*. — Paris: Societe de Chimie Industrielle, 2004.
8. Hergeth W.-D. Industrial process monitoring of polymerization and spray drying processes / W.-D. Hergeth, C. Jaeckle, M. Krell // *Polymer Reaction Engineering*. — 2003. — Vol. 11(6). — P. 663—714.

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ СУШКИ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ГАРАНТИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕГЛАМЕНТОМ

В.В. Иващук, А.П. Ладанюк

*Национальный университет пищевых технологий*

*В статье рассмотрен вопрос разработки математических моделей распыляющих сушилок для молочного производства, которые могут быть использованы для контроля и управления процессом. Доказана актуальность разработки математической модели с точки зрения ограничений, взрывоопасности и повышения качества широкого ассортимента продукции. Проведен анализ исследований зарубежных научных учреждений, специализирующихся на изучении процессов управления, который доказывает необходимость формализации методики моделирования для использования в задачах наблюдения и управления процессами сушки. Определены допустимые упрощения, ограничения и предположения относительно математического моделирования и аппроксимации технологических процессов. Подробно описаны математические модели процессов по их функциональному назначению. Указаны особенности моделирования современных сушильных камер с дисковым распылением и дальнейшее направление исследований.*

**Ключевые слова:** *распылительная сушилка, модели управления, молочное производство.*