

УДК 66.047

ТКАЧЕНКО О.В.<sup>1</sup>, ДУБКОВЕЦЬКИЙ І.В.<sup>2</sup><sup>1</sup> Ін-т технічної теплофізики НАН України<sup>2</sup> Національний університет харчових технологій

## ГІДРОДИНАМІЧНІ ТА ТЕПЛОВІ ПАРАМЕТРИ В КАМЕРАХ РОЗПИЛЮЮЧОГО ЗНЕВОДНЕННЯ

Наведено аналіз науково-технічної інформації про сьогоденний стан досліджень гідродинамічних та аеродинамічних умов в активній зоні апаратів для сушіння в диспергованому стані. Також наведені графічні дані про зміну параметрів та характеру потоків, що одержані на основі чисельного моделювання складних процесів, які мають місце в розпилюючих камерах. Відмічено важливість цих одержаних даних для розробки заходів по вдосконаленню процесів теплового обміну при взаємодії факелу розчину рідкої сировини та потоку теплоносія (нагрітого повітря), а також при взаємодії двофазних потоків зі стінкою апарату.

Приведен анализ научно-технической информации о современном состоянии исследований гидродинамических и аэродинамических условий в активной зоне аппаратов для сушки в диспергированном состоянии. Также приведены графические данные об изменении параметров и характере потоков, полученных путем численного моделирования сложных процессов, которые имеют место в распылительных камерах. Отмечено важность полученных данных для разработки мер по усовершенствованию процессов теплового обмена при взаимодействии факела раствора жидкого сырья и потока теплоносителя (нагретого воздуха), а также при взаимодействии двухфазных потоков со стенкой аппарата.

The analysis of science-technology information about modern state of investigations of hydrodynamic and aerodynamic conditions in active zone of apparatuses for drying in dispersed state is presented in report. Also graphics about changes of parameters and flow character obtained by numeral modeling of complicated processes in spray-types chambers. Importance of obtained data for working out improved measures of heat exchange processes at interaction with torch raw material grout and heat carrier flow (heated air), also at interactions with two phase flows and apparatus wall is registered.

 $D_K$  – діаметр камери, м; $V_T$  – витрата сушильного агента, м<sup>3</sup>/с; $g_1$  – продуктивність сушарки по розчину, кг/с; $g_2$  – продуктивність сушарок по сухому $F_K$  – площа поперечного перерізу сушильної камери, м<sup>2</sup>; $F_{K_1}$  – площа перерізу сушильної камери, м<sup>2</sup>; $T$  – температура, К; $\alpha_v$  – об'ємний коефіцієнт тепловіддачі; $\delta_{cp}$  і  $\rho_{ch}$  – середній об'ємно-поверхневий діаметр і густина сухих частинок; $W$  – вологість, %; $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності газу, $v_{T_1}$  і  $v_{T_2}$  – середні швидкості витання сухих часток і газу в сушильній камері; $v_0$  – колова швидкість диску, м/с; $\mu$  – ступінь заповнення камери факелом.

### Вступ

Одним із розповсюджених способів конвективної сушки рідких продуктів є сушка їх в розпиленому (тонкодиспергованому) стані, або, як кажуть, сушка розпиленням (розпилювальна сушка). Цей спосіб широко використовується для сушки колоїдних розчинів, суспензій, емульсій, пульп і "рухомих" паст в хімічній, харчовій, фармацевти-

чній і інших галузях промисловості і, зокрема, для сушки молока і молочних продуктів, яєць, кормових дріжджів, кави і ін.

При висушуванні розпиленням матеріал диспергується на частинки (краплі) досить малих розмірів (50-200 мкм), що значно збільшує поверхню контакту їх із сушильним агентом (поверхня випаровування). При цьому способі тривалість суш-

ки та час перебування матеріалу в сушильній зоні апарату складає 5...30 с.

Проблеми диспергування рідин та тепло-масообміну при розпилювальній сушці вивчались і знайшли розвиток в роботах відомих вчених [1-8].

### Аналіз досліджень

При висушуванні розпиленням важливе значення має гідродинаміка розпилення (характер, швидкість руху частинок і т. ін.), яка впливає на тепло- і масообмін в процесі сушки; при цьому масообмін (зменшення розмірів і маси частинок в результаті випаровування) впливає в свою чергу на гідродинаміку процесу. Важливими є дослідження температурних полів в активній зоні розпилюючої камери, які наближено відображають ефективність взаємодії гідродинаміки розпилення рідкого продукту з аеродинамічними умовами потоку повітря, що надходить до камери в якості теплоносія.

Такі дослідження були проведені С.І. Шапіро в [7]. Картина, що зображена на рис. 1, свідчить про досить рівномірний розподіл температури середо-

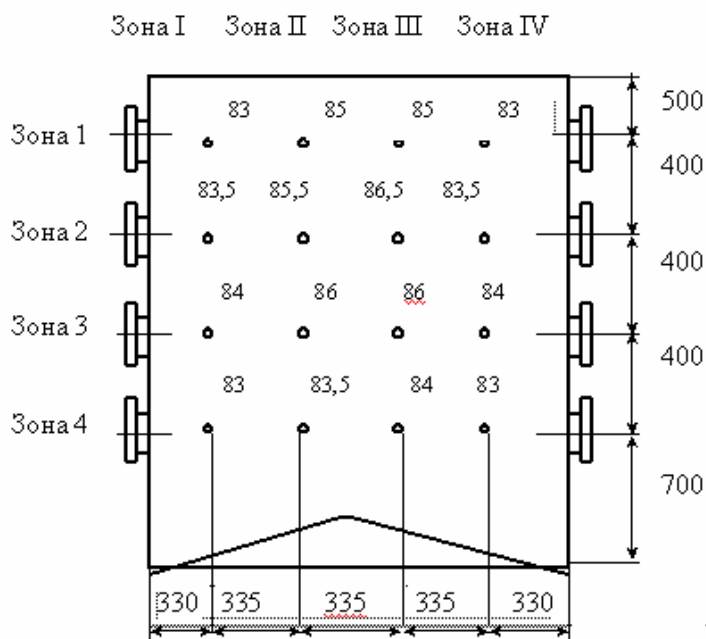


Рис. 1. Температурне поле (°C) в середньому перерізі сушильної камери розпилювальної установки.

вища в об'ємі камери, тобто про рівномірне і досить повне змішування газового потоку з факелом рідини. Розпилення суспензії (барвник кубовий голу бий) відбувалось за допомогою відцентрових дисків (тип – плоский, закритий, з зубцями). С.І. Шапіро отримані цікаві дані, що характеризують зміну залишкової вологості продукту по висоті сушильної камери.

Аналогічні експериментальні дослідження розподілу температур у камері розпилюючої сушарки були виконані Долінським А.А. також для випадку розпилювання рідкої суспензії відцентровим диском (рис. 2).

На рис. 3 показано графік, що характеризує залежність залишкової вологості порошоків барвників від висоти камери. Початкова вологість суспензії 75...77,8 %, температура газів на вході 160 °C, температура середовища в камері 75 °C. Із рис. 3 видно, що приблизно на половині висоти камери вологість продукту досягла 5...6 %, що відповідає технічним умовам на барвники. Характерно, що на рівні розташування розпилювального диску вологість продукту складає всього 12...14 %, тобто, очевидно, основне зниження вологості відбувалось в факелі розпилення. С.І. Шапіро

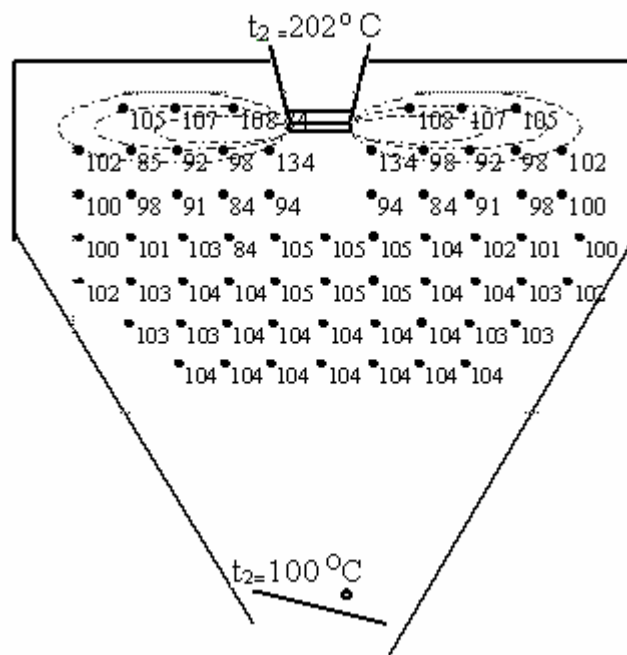
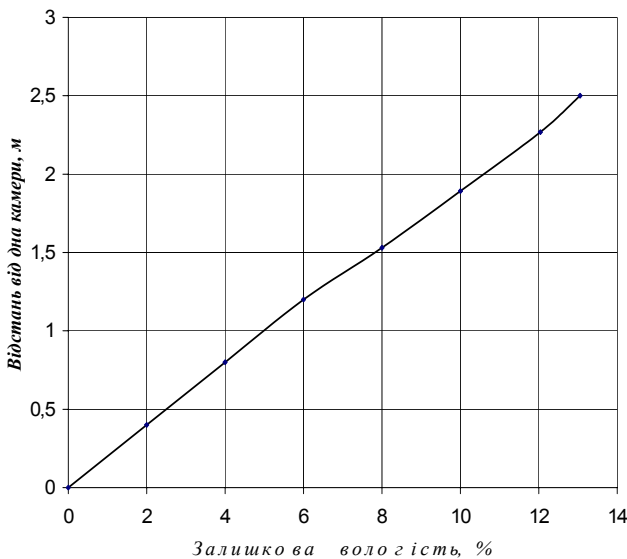


Рис. 2. Температурне поле розпилювальної камери з дисківим розпиленням.



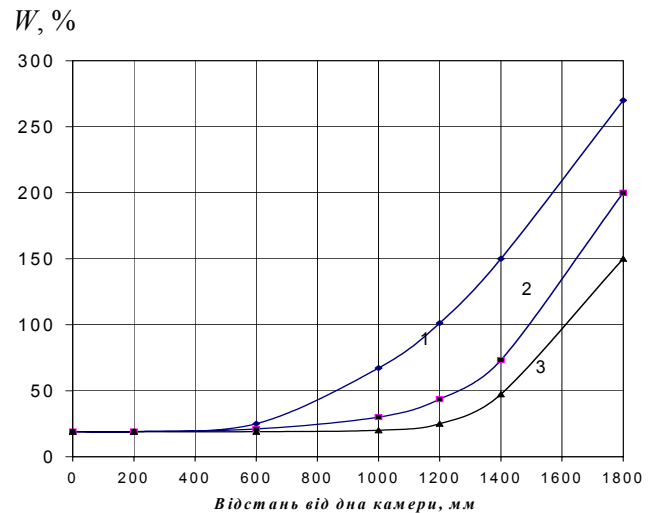
**Рис. 3. Залежність залишкової вологості від висоти сушильної камери.**

прийшов до висновку, що доцільно зменшити висоту сушильної камери за рахунок підвищення температури сушильного агента, що входить або вводу його додаткової кількості по висоті, що відповідає досягненню вологості продукту 8...12 %.

І.І. Борде і Д.М. Левін [7] при дослідженні кінетики розпилювальної сушарки кормових дріжджів зафіксували зміни вологості частинок по висоті сушильної камери (рис. 4). Нагрітий газ подавався рівномірно по перерізу камери зверху до низу, розпилення відбувалось за допомогою диску. Ними встановлено, що в перерізі площини диску в напрямку від центру до периферії відбувається значне спадання вологості продукту (рис. 4, криві 1 і 2), а в інших перерізах вологість продукту практично не змінюється (криві 3 і 4). Аналогічні дані отримані Ю.І. Шишацьким і В.І. Поповим [7] які досліджували процес розпилювального сушіння хлібопекарських дріжджів.

Отримані вище експериментальні дослідження гідродинаміки розпилю дають можливість отримати співвідношення для розрахунку дисперсності розпилю, діаметру факелу розпилю, а також визначення щільності розпилення по радіусу факела. Ці дослідження необхідні для визначення числа Нусельта та об'ємного коефіцієнта тепловіддачі.

На основі обробки даних роботи експериментальних і промислових сушарок були визначені співвідношення для розрахунків критерія Ну-



**Рис. 4. Криві зміни вологості по висоті сушильної камери при температурі теплоносія: 1 – 571К; 2 – 623К; 3 – 673К.**

сельта та об'ємного коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_v$  отримані в роботі - Ликова М.В. [5]:

$$Nu_v = 1,58 \cdot 10^{-3} (g_2 / \rho_{\text{ч}} F_{\text{к}}) \cdot \{\delta_{\text{ср}}^{0,4} / (v_{\text{вит}} + v_{\text{г}})^{0,8}\}, \quad (1)$$

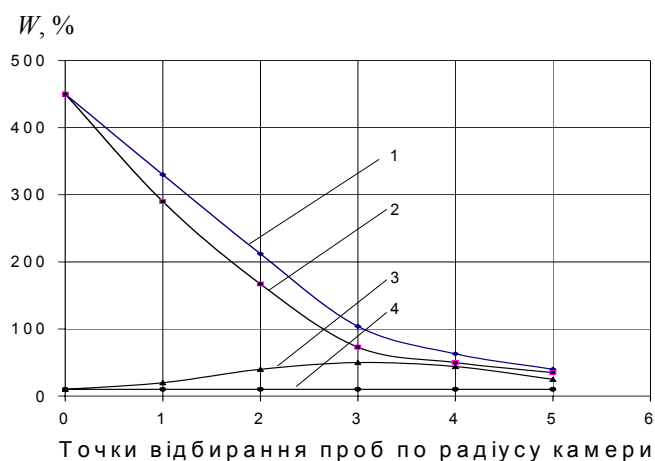
$$\alpha_v = 1,58 \cdot 10^{-3} (\lambda g_2 / \rho_{\text{ч}} F_{\text{к}}) (1 / \delta_{\text{ср}})^{1,6} \{1 / (v_{\text{вит}} + v_{\text{г}})\}^{0,8} \quad (2)$$

$$Nu_v = 160 (g_1 \mu / \pi D_{\text{к}}^2 \rho v_0) \cdot Ar^{0,2} Re^{-0,4}, \quad (3)$$

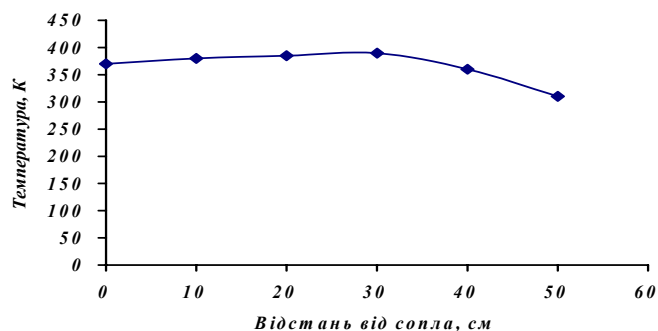
$$\alpha_v = 160 \mu \lambda g_1 / \rho_{\text{р}} F_{\text{к}} (1 / \delta_{\text{ср}}^{1,8}) \{g (\rho_{\text{р}} - \rho_{\text{г}}) / \rho_{\text{г}}\}^{0,2} \quad (4)$$

Взаємодія крапель рідини з газовим потоком в процесі їх руху супроводжується одночасно процесами тепло- і масопереносу. Основна складність при розв'язку системи загальних диференціальних рівнянь пов'язана з нелінійною залежністю коефіцієнтів масо- і теплопереносу від вологовмісту, температури та інших параметрів змінних в часі. Ці залежності у більшості випадків невідомі і потрібне їх попереднє експериментальне визначення. Складну аналітичну задачу часто спрощують шляхом заміни нелінійного функціонального зв'язку більш простою залежністю, наприклад, прямою пропорційністю, або засобом східчастого рахунку, коли в межах одного дуже малого розрахункового кроку коефіцієнти стали, або шляхом чисельного розв'язку за допомогою ЕОМ.

Слід відзначити значну складність аналітичних методів аналізу, що обумовлена комплексним характером взаємопов'язаних факторів і явищ, які відбуваються в процесі розпилювальної сушки:



**Рис. 5.** Криві вологості кормових дріжджів по радіусу камери. 1, 2- у перерізі площини диску; 3 - переріз у камері на відстані 800 мм від диску; 4 – 1200 мм.



**Рис. 6.** Залежність температури крапель аерозолі відстані від сопла до факела.

внутрішній тепло- і масообмін в краплі, зовнішній тепло- і масообмін між краплею та сушильним агентом, балістика і аеродинаміка потоків в сушильній камері, кінетика утворення відкладень на стінках сушильної камери.

Встановлено, що процес сушки розчинів з відносно малою концентрацією твердої фази визначається в основному аеродинамічними умовами, а при високій концентрації вирішальне значення має тепло- і масообмін всередині краплі.

В даний час особливості гідродинамічних процесів та тепломасообміну розглядаються на основі чисельних методів моделювання. Так, в роботі [8] наведені результати чисельного моделювання процесу зневоднення розпилю аерозоллю, використовуючи методику Computational Fluid Dynamics (CFD). Дана модель показує залежність температури крапель аерозоллю при різній відстані від

сопла до факела на експериментальній установці (рис. 6) і описує масу, температуру нагріву, імпульс між часточками (краплями).

Ця методика дозволяє аналізувати ефективність процесу тепломасообміну в активній зоні розпилювальної камери і запропонувати оптимальні конструкції систем взаємодії факела розпилю з потоком теплоносія. В ряді робіт [8, 9] наведені графічні картини аеро- та гідродинамічних потоків, що дозволяє обґрунтовувати оптимальні габарити розпилюючих сушарок.

### Висновки

Подальший розвиток зазначених досліджень з урахуванням особливостей кінетики зневоднення одиничних крапель дасть можливість прогнозувати, особливо при використанні одного типу розпилюючої сушарки, при широкому асортименті висушуваної продукції найбільш ефективні режимні параметри роботи.

Це дає змогу досягти максимальної продуктивності установки по кінцевому продукту, одержати його з необхідними якісними показниками.

### ЛІТЕРАТУРА

1. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. Учебник для вузов. Изд.2-е, М., Гостехтеориздат, 1953, 736 с.
2. *Андреев В.А.* Дисперсное обезвоживание белково-коллоидных веществ, сб. "Сушка в пищевой промышленности", Профиздат, 1959.
3. *Кремнев О. А., Боровский В. Р., Долинский А.А.* Скоростная сушка.- К.: Гостехиздат, 1963.- 382 с.
4. *Долинский А. А, Иваницкий Г.К.* Оптимизация процессов распылительной сушки.- К.: Наукова думка, 1984.- 240 с.
5. *Лыков А.В., Леончик Е.И.* Распылительные сушилки. - М.: Машиностроение, 1966.- 331 с.
6. *Малецька К.Д.* Теплофізичні основи створення нових технологій та удосконалення техніки зневоднювання рідинних матеріалів у диспергованому стані: Автореф. дис. ...д-ра техн. наук.- Київ, 2003.- 40 с.
7. *Гинзбург А.С.* Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности.- М.: Агропромиздат, 1985.- 240 с.
8. *Athanasia M.* Simulation of a Spray Drying Process Using Computational Fluid Dynamics // Aristotle University of Thessaloniki.- Greece, 2000, pp.112-119.
9. *Masters K.,* 1991, Spray Drying Handbook, 5<sup>th</sup> Ed., Published by Longman Group Ltd., London, pp.491 – 497.

Одержано 12.10.2004 р.