

## ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ І КІНЕТИКИ ТЕПЛО- ТА МАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ РОЗПИЛЮВАЛЬНОГО СУШІННЯ МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ

Однією з актуальних проблем переробного комплексу є підвищення ефективності переробки та утилізації молочної сироватки. Найефективнішим способом вирішення цієї проблеми є організація переробки сироватки в концентрати, зокрема в сухий порошок. Досягається це способом розпилювального сушіння сироватки. Аналіз наукових і технічних знань про процес розпилювального сушіння показав, що на сьогодні ефективність цього процесу обмежується недостатністю досліджень його гідродинаміки та кінетики тепломасообміну, а тому немає методів оптимізації розпилювального сушіння молочної сироватки.

В умовах науково-дослідних лабораторій НУХТ, НТК "Технічної теплофізики" НАН України, а потім в умовах виробництва було виконано науково-дослідні роботи з цієї проблеми, основний зміст яких наведено в цій статті. Зокрема, аналітично досліджено рух в'язкої нестисливої рідини по бічних поверхнях конусного розпилювача в біконічній системі координат, для якої були розв'язані система рівнянь Нав'є—Стокса та рівняння нерозривності потоку за допомогою методу Н.А. Сльозкіна—С.М. Тарга. В результаті виведено залежності, які дають змогу розрахувати в біконічних координатах складові вектора швидкості елементарного об'єму рідини, що рухається по поверхнях конусного розпилювача, м/с:

$$v_r = \frac{3Q}{2\delta^3 \pi \sin \beta} \frac{z(\delta - z/2)}{r}; \quad v_\phi = \frac{\omega Q}{\pi v \delta^3} \frac{z \left( \frac{z^3}{8} - \frac{z^2}{2} \delta + \delta^3 \right)}{r}, \quad (1)$$

де  $Q$  — продуктивність розпилювача, м<sup>3</sup>/с;  $\delta$  — товщина плівки рідини, що рухається по розпилювачу, м;  $\beta$  — кут нахилу твірної конуса до осі його обертання, град.;  $r, z, \phi$  — біконічні координати елементарного об'єму рідини;  $\omega$  — кутова швидкість конуса, с<sup>-1</sup>;  $v$  — кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м<sup>2</sup>/с.

На основі аналізу руху плівки рідини під дією відцентрових сил вздовж поверхні конусного розпилювача встановлено, що у зв'язку із зміною гідравлічних харак-

теристик вздовж ліній потоку, граничному значенню тиску в плівці буде відповідати граничне значення швидкості потоку рідини  $v_{\text{lim}} = 14,2$  м/с. Подальше збільшення швидкості руху плівки призведе до передчасного її руйнування, що, у свою чергу, погіршить дисперсні характеристики процесу розпилювання.

Залежність між продуктивністю розпилювача і товщиною плівки рідини, яка рухається по його поверхні, визначали припускаючи, що рушійна сила, яка діє на елементарний об'єм рідини, дорівнює силі опору рухові цього об'єму. Внаслідок цього дістали рівняння для визначення товщини плівки, м,

$$\delta = \left( \frac{3Qv}{2\pi\omega^2 R^2 \sin \beta} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

де  $R$  — відстань елементарного об'єму рідини до осі обертання конуса, м.

У разі використання порожнистого конуса, коли плівка рухається по внутрішній і по зовнішній поверхнях, компоненти вектора швидкості та товщини плівок визначають за рівняннями (1) і (2), підставляючи в них відповідні величини окремо для зовнішньої та внутрішньої поверхонь.

У результаті аналізу факторів, що впливають на процес руху рідини по поверхні обертового конуса, та проведених експериментів отримано загальні критеріальні залежності для визначення продуктивності конусних розпилювачів різних типів, м<sup>3</sup>/с: із суцільним конусом

$$\frac{Q}{\omega D_n^3} = 0,7 \left( \frac{h}{D_n} \right)^{2,27} \left( \frac{v}{D_n^2 \omega} \right)^{0,49} \left( \frac{D_n \omega^2}{g} \right)^{0,52} \text{tg}^3 \beta; \quad (3)$$

із порожнистим конусом

$$\frac{Q}{D_n^3 \omega} = 1,55 \left( \frac{h}{D_n} \right)^{1,08} \left( \frac{v}{D_n^2 \omega} \right)^{0,41} \left( \frac{D_n \omega^2}{g} \right)^{0,5} \text{tg}^3 \beta, \quad (4)$$

де  $D_n$  — нижній діаметр порожнистого конуса, м;  $D_v$  — верхній діаметр (основи) суцільного конуса, м;  $h$  — глиби-

на занурення конуса в рідину,  $m$ ;  $g$  — прискорення вільного падіння,  $m/c$ .

Визначаючи витрати потужності на валу конусних розпилювачів, частково занурених у рідину, встановили, що загальну потужність  $N_n$  на валу, без урахування витрат на привід та тертя в опорах, можна розглядати як суму потужностей на: надання кінетичної енергії рідині  $N_1$ ; подолання сил тертя, що виникають під час руху плівок рідини догори по поверхні конуса  $N_2$ ; подолання тертя конуса об газове середовище  $N_3$ ; подолання тертя зануреної частини конуса об рідину  $N_4$ ; підймання рідини від вільного рівня її до верхнього краю конуса  $N_5$ . Виявлено, що сумарне значення витрат енергії на надання кінетичної енергії рідині та на подолання сил тертя, що виникають під час руху плівок рідини по розпилювачу, становить 90...95 % від загальної потужності (рис. 1).

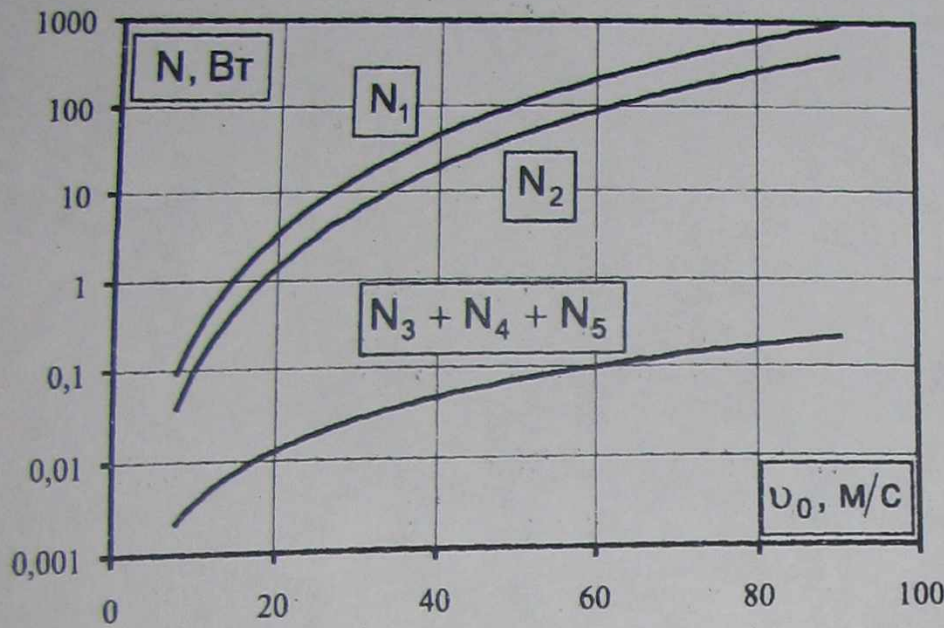


Рис. 1. Співвідношення між окремими складовими потужності при різних колових швидкостях розпилювача

Для наближених інженерних розрахунків отримано вирази для обчислення потужності на валу розпилювача, Вт: із суцільним конусом

$$N_{n.c} = 1,8 \cdot 10^{-3} Q_c \rho_p (\omega^2 \sin \beta + 320 v^2); \quad (5)$$

із порожнистим конусом

$$N_{n.p} = 1,8 \cdot 10^{-3} Q_p \rho_p (\omega^2 \sin \beta + 320 v^2), \quad (6)$$

де  $Q_c$  і  $Q_p$  — загальна продуктивність відповідно суцільного та порожнистого розпилювачів,  $m^3/c$ ;  $\rho_p$  — густина рідини,  $kg/m^3$ ;  $v$  — абсолютна швидкість рідини,  $m/c$ , при сході її з розпилювача, яка дорівнює геометричній сумі колової швидкості розпилювача та відносної швидкості рідини в момент відриву її від розпилювача, обчисленій за рівняннями (1).

Теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки процесу розпилення конусним відцентровим розпилювачем, частково зануреним у рідину, дали змогу вивести критеріальну залежність для визначення середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплин,  $m$ :

$$d_{32}/\delta = 73,1 We^{-0,43} Lp^{-0,4} N^{0,485}, \quad (7)$$

де  $\delta$  — товщина плівки рідини при сході її з розпилювача,  $m$ ;  $We$  — критерій Вебера, який обчислюється за абсолютною швидкістю рідини в момент зриву її з конуса;  $Lp$  — критерій Лапласа;  $N$  — критерій, який характеризує співвідношення сил в'язкості газового середовища і рідини, що розпилюється.

Оцінюючи вплив відносної швидкості повітря на процес розпилення, виявлено існування режиму вторинного подрібнення краплин внаслідок руйнування їх потоком повітря, що набігає. Це підтверджується виглядом кривих розподілу максимальних розмірів краплин; криві отримано при оцінюванні впливу зміни швидкості повітря, що подається вздовж периферії конуса (рис. 2). Залежності показують,

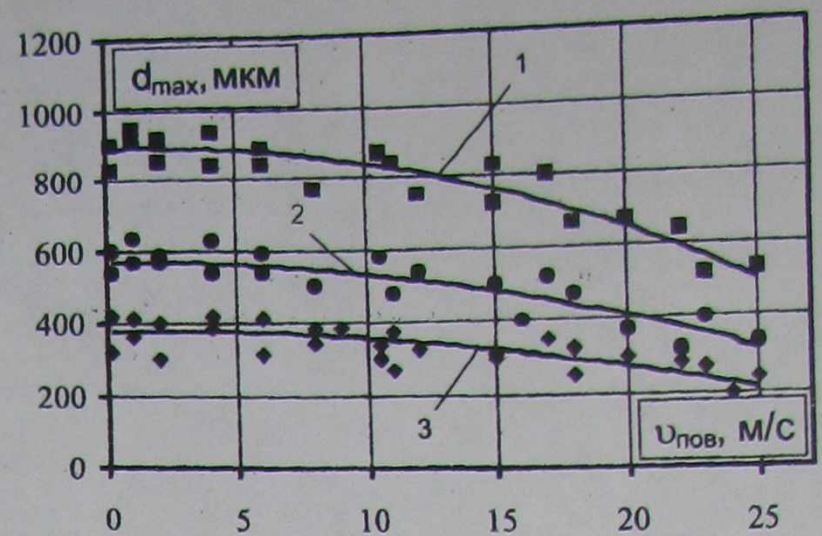


Рис. 2. Залежність розподілу максимальних розмірів краплин  $d_{max}$  від швидкості повітря  $v_{пов}$ :

1 — машинне масло,  $n = 950 \text{ хв}^{-1}$ ; 2 — машинне масло,  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$ , 3 — вода,  $n = 3000 \text{ хв}^{-1}$

що чітко зменшення максимальних розмірів розпиленних краплин починається вже при  $v_{пов} > 6 \text{ м/с}$ . При подальшому збільшенні швидкості повітря розміри краплин зменшуються інтенсивніше. Такий характер зміни залежностей пояснюється тим, що при помірних значеннях  $v_{пов}$  вторинному подрібненню підлягає лише та частина краплин, що потрапляє в найбільш сприятливі умови; відносна кількість більших краплин при цьому зменшується, а дрібних — збільшується. У міру збільшення швидкості повітря частина краплин, що зазнає подрібнення, також збільшується, що значно змінює дисперсність факела розпиленої рідини (рис. 3).

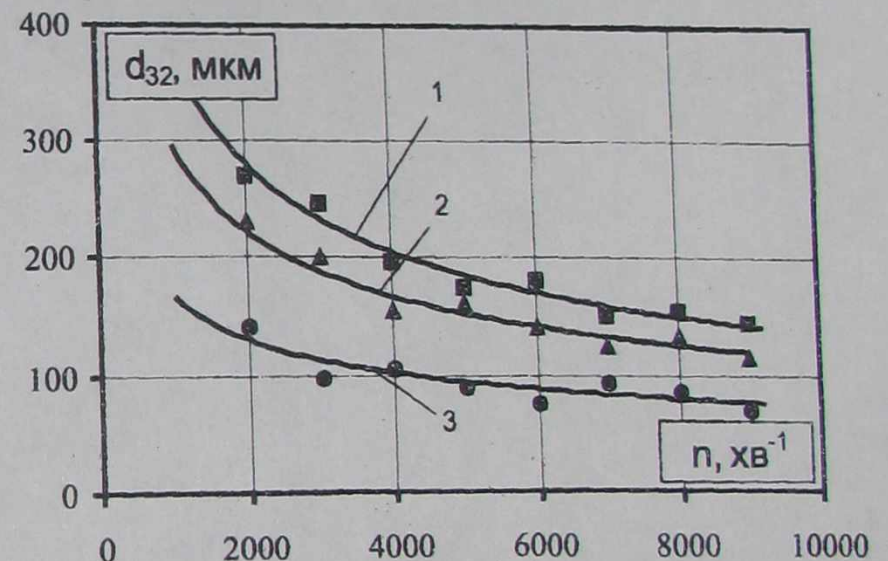


Рис. 3. Порівняння зміни середнього діаметра  $d_{32}$  від параметрів розпилення: 1 — без подачі повітря; 2 — при подачі повітря в корінь факела розпилення зі швидкістю  $v_{пов} = 10,5 \text{ м/с}$ ; 3 — те саме, зі швидкістю  $v_{пов} = 25 \text{ м/с}$

Вивчаючи явище вторинного подрібнення краплин, з метою встановлення залежності його від критерію Вебера ( $We$ ), який визначає межу стійкості краплин, встановлено, що стійкий режим вторинного подрібнення краплин при різко прикладеному навантаженні на них з боку потоку повітря починається при  $We \geq 4$ . Середній об'ємно-поверхневий діаметр краплин  $d_{32}$ ,  $m$ , (рис. 3) як основна характеристика процесу розпилювання, залежно від частоти обертання розпилювача  $n = 2000 \dots 9000 \text{ хв}^{-1}$  та швидкості повітря  $v_{пов} = 0 \dots 25 \text{ м/с}$ , описується залежністю

$$d_{32} = 349 - 0,04n + 1,706 \cdot 10^{-6} n^2 + 4,87 \cdot 10^{-4} n v_{пов} - 6,8 v_{пов} \quad (8)$$

Дослідженням геометричних характеристик факела розпиленої рідини було встановлено, що відношення довжини шляху, по спіралі якого рухається частинка в конусі факела розпилення, до висоти її підйому не залежить від кута розкриття факела, а отже, всі частинки розчину будуть описувати в конусі факела однакову траєкторію. Внаслідок цього утворюються умови отримання однорідної газорідинної суміші, що, у свою чергу, поліпшить процес розпилення і буде сприяти інтенсифікації тепло- та масообміну.

Кінетику процесу розпилювального сушіння окремих краплин сироватки з-під кисломолочного сиру досліджували при початковій масовій частці сухих речовин  $CP = 7...60\%$  та температурі теплоносія  $t_c = 100...200\text{ }^\circ\text{C}$ .

У загальному випадку весь процес сушіння краплин сироватки з підвищеною початковою вологістю та при температурі теплоносія, що перевищує температуру кипіння розчину, поділяють на п'ять періодів: I — прогрівання краплини; II — сушіння з постійною швидкістю при температурі краплини, близькій до температури мокрого термометра; III — утворення кірки і нагрівання краплини до температури кипіння розчину; IV — сушіння з постійною швидкістю при температурі краплини, що відповідає температурі кипіння розчину; V — зменшення швидкості сушіння при температурі краплини, близькій до температури навколишнього середовища (рис. 4 і 5).

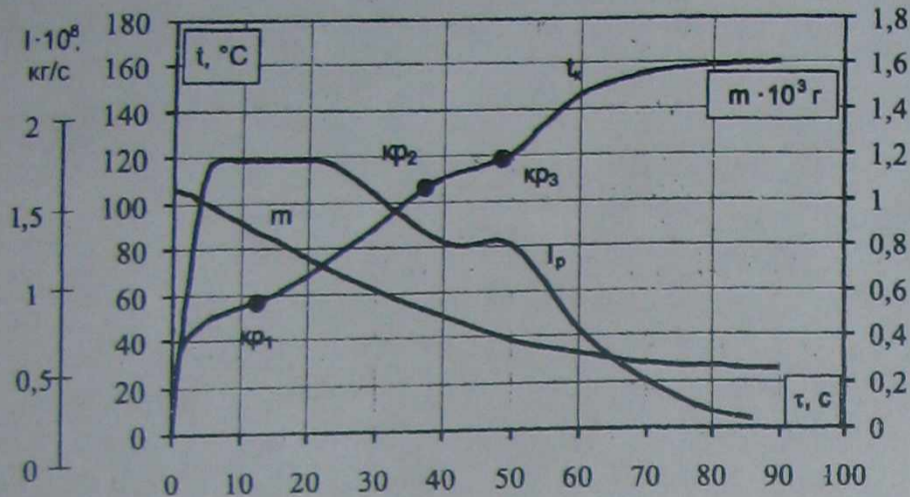


Рис. 4. Кінетичні залежності зневоднення краплин молочної сироватки з  $CP = 30\%$  від тривалості процесу при  $t_c = 160\text{ }^\circ\text{C}$

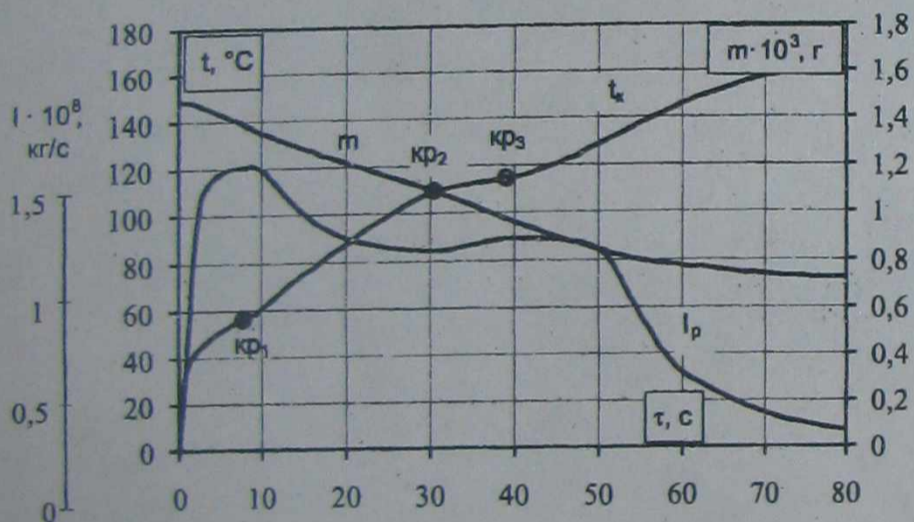


Рис. 5. Кінетичні залежності зневоднення краплин молочної сироватки з  $CP = 60\%$  від тривалості процесу при  $t_c = 160\text{ }^\circ\text{C}$

Період кіркоутворення  $kr_1 - kr_2$  (рис. 4 і 5), характеризується погіршенням випаровування вологи крізь плівку, що утворюється на поверхні краплини, і як наслідок, підвищенням температури краплини  $t$  від температури рівноважного випаровування до температури кипіння. З часом товщина кірки збільшується, що ускладнює дифузію вологи до поверхні краплини і при досягненні розчином температури кипіння починається період кипіння розчину під плівкою, який закінчується видаленням фізично зв'язаної вологи (рис. 4 і 5,  $kr_2 - kr_3$ ). Температура частинки в цьому періоді, як видно з термограм процесу, є близькою до температури кипіння розчину з певним вмістом сухої речовини.

Закінчується процес сушіння краплин молочної сироватки, коли температура частинки різко збільшується до температури теплоносія; при цьому відбувається остаточне видалення фізико-хімічно зв'язаної вологи.

Дослідження температурно-вологих характеристик молочної сироватки в процесі її зневоднення дали змогу встановити залежність між температурою частинки та її вологовмістом. На основі отриманих температурно-вологих залежностей визначено температурний коефіцієнт

сушіння  $b = dt/du$  молочної сироватки. Встановлено, що з підвищенням температури середовища температурний коефіцієнт сушіння збільшується, тобто з підвищенням температури середовища стадія кіркоутворення починається при більшому вологовмісті краплини молочної сироватки (таблиця).

#### Значення температурного коефіцієнта сушіння в період кіркоутворення при зневодненні молочної сироватки

Початкова концентрація молочної сировини, %	Температура середовища, $^\circ\text{C}$					
	100	120	140	160	180	200
7	22	37,3	46	51,4	56,05	57,8
30	51	68,03	75	79,5	82,02	—
60	87	114	132,5	135,1	—	—

При визначенні вологовмісту в критичних точках було встановлено, що в разі збільшення початкової концентрації молочної сироватки значення критичного вологовмісту  $u_{kp1}$  зменшуються (рис. 6), що вказує на необхідність попереднього концентрування молочної сироватки до  $CP > 30\%$ .

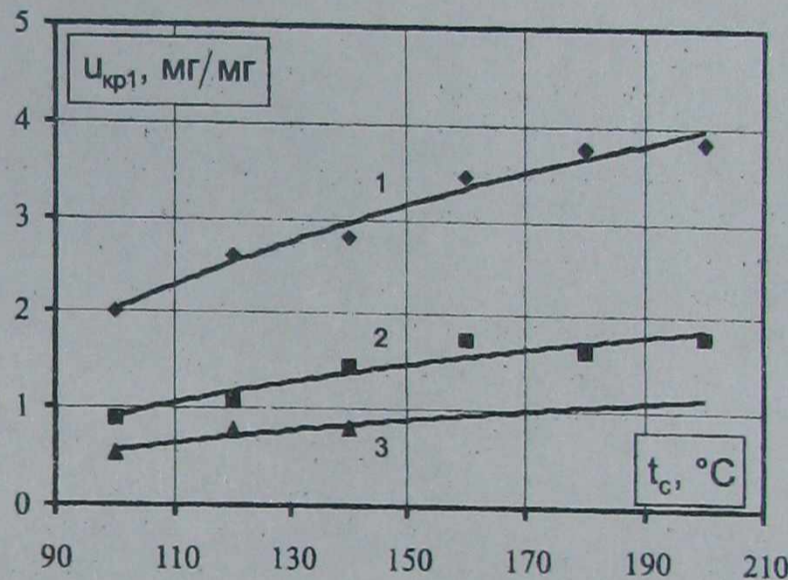


Рис. 6. Залежність критичного вологовмісту краплин молочної сироватки  $u_{kp1}$  від температури середовища і масових часток сухих речовин, %: 1 — 7; 2 — 30; 3 — 60

Залежність критичного вологовмісту,  $\text{кг/кг}$ , від температури середовища при зневодненні краплин молочної сироватки в межах  $t_c = 100...200\text{ }^\circ\text{C}$  та  $CP = 7...60\%$  описується таким рівнянням:

$$u_{kp} = 0,658 + 0,021t_c - 4,8 \cdot 10^{-6}t_c^2 - 2,34 \cdot 10^{-4}t_c CP - 0,062CP + 8,51 \cdot 10^{-4}CP^2 \quad (9)$$

Це рівняння характеризує значення критичного вологовмісту і дає можливість оптимізувати процес сушіння молочної сироватки. Адекватність цієї математичної моделі перевіряли за критерієм Фішера

$$F_{розр} = S_{ад}^2 / S_{відт}^2$$

де  $S_{ад}$  — дисперсія адекватності, що характеризує відхилення результатів експерименту відносно лінії регресії;  $S_{відт}$  — дисперсія відтворюваності, що характеризує похибку досліду при незмінних значеннях факторів.

Для даної моделі  $F_{розр} = 0,193$ , що менше від табличного його значення ( $F_{табл} = 3,050$ ), визначеного для рівня значущості 5%.

Отже, з підвищенням температури теплоносія спостерігається більш раннє утворення плівки на поверхні краплини і середньоінтегральний вологовміст її в першій критичній точці збільшується. Але вже при  $t_c \geq 120\text{ }^\circ\text{C}$  температура середовища практично не впливає на  $u_{kp1}$  і їхні значення при високих температурах близькі між собою (рис. 6).

Вересочкин,  
Орлов  
Богданов

**Висновки:**

1. Запропоновано критеріальні рівняння для визначення продуктивності та витрат потужності суцільних і порожнистих конусних відцентрових розпилювачів.
2. Запропоновано узагальнене критеріальне рівняння розпилення для розрахунку середнього об'ємно-поверхневого діаметра краплин.
3. Визначено, що подача повітря в корінь факела розпилення зі швидкістю до 25 м/с дає можливість зменшити середній розмір краплин в 1,5–2 рази та збільшити сумарну поверхню контакту між краплинами продукту

і теплоносієм до 40 %. Виявлено, що стійкий режим вторинного подрібнення краплин при різко прикладеному навантаженні до них потоку повітря починається при  $We \geq 4$ .

4. Отримано кінетичні та температурно-вологі характеристики процесу сушіння окремих краплин сироватки з-під кисломолочного сиру; ці характеристики рекомендуються для розрахунку тепломасообміну при конструюванні розпилювальних сушильних установок.

*Надійшла до редколегії 30.03.02 р.*