

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРОБНИЦТВА, ПЕРЕРОБКА ПРОДУКТІВ ТВАРИННИЦТВА ТА ЇХ ЗБЕРІГАННЯ

TECHNOLOGICAL ENSURING OF PRODUCTION, PROCESSING OF PRODUCTS OF ANIMAL ORIGIN AND THEIR PRESERVATION

УДК 664.661.12.021.3

Білонога Ю.Л., д.т.н., професор¹, **Білонога Д.М.**, к.ф.-м.н., доцент²,
Максисько О.Р., к.т.н., доцент¹, **Турчин І.М.**, к.т.н., доцент¹©

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини
та біотехнологій імені С.З. Гжицького, м. Львів, Україна

²Національний Університет «Львівська Політехніка», м. Львів, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ВІДЦЕНТРОВОЇ СУШАРКИ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ В СИСТЕМІ ТВЕРДЕ ТІЛО – ПОВІТРЯ

Визначені пріоритетні шляхи оптимізації параметрів псевдозрідженого шару (ПЗШ) у відцентрових сушарках в системі тверде тіло – повітря (ТТ-П). Подана формула для розрахунку оптимального значення числа Рейнольдса з точки зору максимальної тепловіддачі потоку повітря, а також формули для визначення числа Рейнольдса початку та кінця існування ПЗШ в системі ТТ-П. Подана схема відцентрової сушарки з ПЗШ. Показано, що виведені формули розрахунку параметра оптимізації дифузійних процесів, середньої оптимальної товщини приграничного ламінарного шару (ПЛШ), оптимального діаметра подрібнення сировини перед процесом сушіння можуть застосовуватися для мінімізації енерговитрат в умовах дифузійних процесів, зокрема сушіння в полі відцентрових сил. Розраховані критерій оптимізації B_{ψ} , оптимальне значення числа Рейнольдса Re_{1opt} , модифіковане оптимальне число Архімеда Ar_{opt}^M , робоче значення числа Рейнольдса для перехідного (П) режиму осадження, оптимальне значення кутової швидкості обертання відцентрової сушарки з ПЗШ, а також оптимальна швидкість подачі повітря і оптимальна товщина приграничного ламінарного шару (ПЛШ), де сушільним агентом виступає повітря за температури $150^{\circ}C$. Показано, що дані дослідження добре узгоджуються з літературними даними, а оптимальне значення числа Рейнольдса 263 попадає у діапазон існування ПЗШ за даних умов

відцентрового сушіння. Подано алгоритм розрахунку оптимальних параметрів роботи відцентрової сушарки з ПЗШ.

Ключові слова: псевдозрідений шар, приграничний ламінарний шар, поверхнева енергія, відцентрова сушарка, комп'ютерний експеримент.

УДК 664.661.12.021.3

Билонога Ю.Л., д.т.н., професор¹, **Билонога Д.М.**, к.ф.-м.н., доцент²,

Максисько А.Р., к.т.н., доцент¹, **Турчин І.Н.**, к.т.н., доцент¹

¹Львовський національний університет ветеринарної медицини
і біотехнологій імені С.З. Гжицького, г. Львов, Україна

²Національний Університет «Львівська Політехніка», г. Львов, Україна

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СУШИЛКИ С ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ В СИСТЕМЕ ТВЕРДОЕ ТЕЛО - ВОЗДУХ

Определены приоритетные пути оптимизации параметров псевдооживленного слоя (ПОС) в центробежных сушилках в системе твердое тело - воздух (ТТ-В). Представленная формула для расчета оптимального значения числа Рейнольдса с точки зрения максимальной теплоотдачи потока воздуха, а также формулы для определения числа Рейнольдса начала и конца существования ПОС в системе ТТ-В. Представленная схема центробежной сушиллки с ПОС. Показано, что выведены формулы расчета параметра оптимизации диффузионных процессов, средней оптимальной толщины пограничного ламинарного слоя (ПЛС), оптимального диаметра измельчения сырья перед процессом сушки могут применяться для минимизации энергозатрат в условиях диффузионных процессов, в частности сушки в поле центробежных сил. Рассчитаны критерий оптимизации $В_{\text{ц}}$, оптимальное значение числа Рейнольдса $Re_{\text{опт}}$, модифицированное оптимальное число Архимеда, рабочее значение числа Рейнольдса для переходного (П) режима осаждения, оптимальное значение угловой скорости вращения центробежной сушиллки с ПОС, а также оптимальная скорость подачи воздуха и оптимальная толщина пограничного ламинарного слоя (ПЛС), где сушильным агентом выступает воздух при температуре 1500С. Показано, что данные исследования хорошо согласуются с литературными данными, а оптимальное значение числа Рейнольдса 263 попадает в диапазон существования ПОС при данных условиях центробежной сушки. Представлен алгоритм расчета оптимальных параметров работы центробежной сушиллки с ПОС.

Ключевые слова: псевдооживленный слой, пограничный ламинарный слой, поверхностная энергия, центробежная сушиллка, компьютерный эксперимент.

UDC 664.661.12.021.3

Bilonoha Yu, Professor¹, **Bilonoha D.**, Associate Professor²,
Maksysko O., Associate Professor¹, **Turchin I.**, Associate Professor¹
¹Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies
named after S.Z. Gzhytskyj., Lviv, Ukraine
²National University "Lviv Polytechnic", Lviv, Ukraine

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF CENTRIFUGAL FLUIDIZED BED SOLID SYSTEM – AIR

Priority ways to optimize the parameters of the fluidized bed in centrifugal dryer in the system solid - air (S-A). Apply the formula to calculate the optimal values of Reynolds number in terms of the maximum heat flux of air as well as formulas for determining the Reynolds number beginning and end of the PZSH in the system S-A. The present scheme of centrifugal dryers the fluidized bed.. It is shown that the formulas for calculation of the parameter optimization of diffusion processes, the average thickness of the near-boundary optimal laminar layer the fluidized bed , the optimal diameter grinding raw materials by a process of drying can be used to minimize energy consumption in terms of diffusion processes, including drying in the field centrifugal forces. The calculated optimization criterion, the optimal value of the Reynolds number Re_{lopt} , modified optimal number of Archimedes, operating value of the Reynolds number for the transition (P) mode of deposition, the optimal value of the angular velocity of centrifugal dryers the fluidized bed and optimum air feed rate and optimum thickness of the laminar layer near-boundary the fluidized bed , which acts as a drying agent for air temperature 1500C. Shown that these studies are in good agreement with literature data, and the optimal value of the Reynolds number 263 falls in the range of existence the fluidized bed under these conditions, centrifugal drying. Posted algorithm for calculating the optimal parameters of centrifugal dryers with the fluidized bed..

Key words: fluidized bed, near-boundary laminar layer, surface energy, centrifugal dryer, a computer experiment.

Вступ. На основі багатьох експериментів встановлено [1], що оптимальна швидкість подачі повітря в ПЗШ відповідає емпіричному співвідношенню 1:

$$Re_{omn} = \frac{Ar_{omn}}{18 + 5,22\sqrt{Ar_{omn}}}, \quad (1)$$

де Ar – число Архімеда.

Так можна визначити оптимальну швидкість подачі гарячого повітря в сушарку для найбільш енергоефективної її роботи, тобто з максимальною швидкістю висушування і з мінімальними за даних умов енергетичними витратами.

Мета даної роботи – показати оптимальні значення критерію Рейнольдса в ПЗШ в системі ТТ-П, тобто оптимальну швидкість подачі гарячого повітря у

відцентрову сушарку з ПЗШ, а також оптимальну кутову швидкість обертання барабана сушарки.

Результати дослідження. Нами з метою підвищення інтенсивності висушування запропонована відцентрова сушарка з ПЗШ з наступними конструктивними елементами (рис.1).

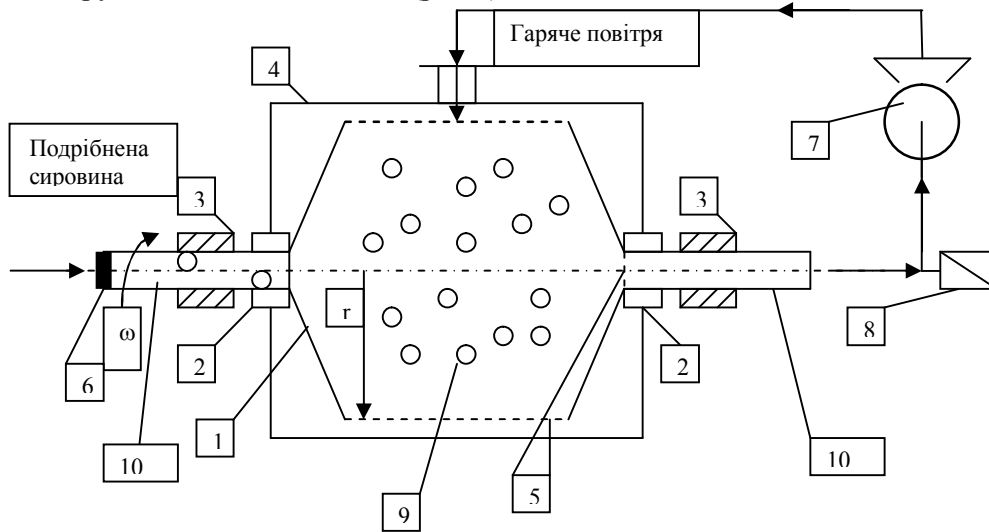


Рис 1. Схема відцентрової сушарки з ПЗШ:

1 – пустотілий конічний барабан; 2 – сальники; 3 – опори; 4 – герметичний корпус; 5 – металева решітка з кроком 0,5 мм; 6 – герметичний люк; 7 – вентилятор; 8 – двосторонні крани; 9 – подрібнена сировина; 10 – пустотілі цапфи.

Радіус конічного барабана r залежить від заданої продуктивності сушарки. Приймаємо $r = 0,2$ м. Сушарка працює в наступній послідовності:

Сировина, що подрібнена до середнього діаметра $d_c \approx 1 \cdot 10^{-3}$ м, відповідною порцією подається у ліву пустотілу цапфу 10, після чого герметичний люк 6 закривається. Вентилятором 7 подається нагріте повітря, що заповнює корпус 4. Кран 8 закривається, а гаряче повітря піддається рециркуляції. Далі пустотілому барабану 1 з цапфами 10 надається обертовий рух з відповідною кутовою швидкістю ω . Гаряче повітря з відповідною швидкістю V та витратою Wt вентилятором 7 нагнітається в корпус 4, що створює ПЗШ подрібненої сировини в полі відцентрових сил. Сушарка працює до моменту максимально ефективного сушіння в системі ТТ-Г. Зволене повітря періодично випускається через кран 8 і через нього нагнітається свіже нагріте повітря. Кутова швидкість обертання барабана 1 для конкретної сировини ω визначається за допомогою параметра оптимізації для умов відцентрового сушіння з ПЗШ.

Загально відомі формули для визначення т. К і В, тобто початку і кінця виникнення ПЗШ (Рис. 1) 2:

$$\text{Re}_K = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad \text{Re}_B = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}} \quad (2)$$

В ідеальних умовах тверда частинка в ПЗШ перебуває в стані невагомості. Потік повітря, що рухається навколо частинки за перехідного (П) чи турбулентного (Т) режиму, омиваючи її, формує приграничний ламінарний шар (ПЛШ) [2].

Якщо користуватися формулою 1 для можливості оптимізації процесу псевдозрідження в системі ТТ-П то необхідно мати оптимальне число Архімеда, яке входить у формулу. Фізичні характеристики повітря, які входять в число Архімеда, задаються автоматично, оскільки продиктовані параметрами сухого повітря, яке подається на сушіння. Однак, домінуючий параметр числа Архімеда є середній діаметр подрібнення сировини в сушарці, який є невідомим. Отже, якщо задатися середнім діаметром подрібнення сировини, тоді для умов відцентрового сушіння в сушарці (рис.2) необхідно знати оптимальну кутову швидкість обертання барабана 1 для створення ПЗШ.

Методом аналізу розмірностей та методом комп'ютерного експерименту нами [3, 4] виведений параметр оптимізації для дифузійних процесів, зокрема для відцентрового сушіння у ПЗШ. Використовуючи параметр оптимізації B_u нами показано, що оптимальні параметри ЛПШ, зокрема середня оптимальна товщина ЛПШ $\delta_{u,onn}$, що виникає при осадженні подрібненої частинки в ПЗШ з оптимальним діаметром d_{onn} , будуть розраховуватися за рівностями 3,4,5 [3, 4].

$$\delta_{u,onn} = 3 \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\omega^2 r (\rho_u - \rho_c) \rho_c}}, \quad (3)$$

де ρ_u, ρ_n – густина подрібненої сировини та повітря кг/м^3 ; $\omega^2 r$ – доцентрове прискорення, м/с^2 ; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

В ПЗШ визначальним є число Архімеда, тому параметр оптимізації B_u може бути застосований для розрахунку оптимальних його параметрів в системі ТТ-Г для відцентрового сушіння [3, 4] (4).

$$B_u = 3,07 \cdot 6 \sqrt[3]{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \rho_c^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_u - \rho_c)}}, \quad (4)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу повітря, ;

$\cos \theta$ – гідрофільність поверхні подрібненої фази (для повітря $\cos \theta = 1$);

Крім цього, може бути використане співвідношення (5) для розрахунку оптимального середнього діаметра подрібнення сировини за відцентрового сушіння.

$$\frac{d_{onn}}{\delta_{onn}^u} \approx \sqrt[3]{Ar_{onn}^M}, \quad (5)$$

де d_{onn} – оптимальне значення середнього діаметра подрібненої сировини, м; δ_{onn}^u – оптимальні значення товщини ЛПШ за осадження частинки

в полі відцентрових сил; m ; Ar_{opt}^M – оптимальне значення числа Архімеда модифікованого для відцентрового сушіння.

Виходячи з вищесказаного, нами розраховані: критерій оптимізації B_u , оптимальне значення числа Рейнольдса Re_{1opt} , модифіковане оптимальне число Архімеда Ar_{opt}^M , робоче значення числа Рейнольдса для П режиму осадження, оптимальне значення кутової швидкості обертання відцентрової сушарки з ПЗШ, а також оптимальна швидкість подачі повітря і оптимальна товщина ЛПШ, де сушильним агентом виступає повітря за температури 150°C , оскільки ця температура визначена нами раніше, як оптимальна [5]. Тверда частинка має густину $\rho_u=2000\text{ кг/м}^3$. Значення поверхневої енергії капілярно-пористого тіла (продукту) приймали $0,2\text{ Дж/м}^2$. Фізичні характеристики повітря взяті з довідника.

1. Параметр оптимізації за відцентрового сушіння з рівності 4 [3,4]:

$$B_u = 3,07 \cdot 6 \sqrt{\frac{(\sigma \cos \theta)^3 \rho_c^2}{\mu^4 \omega^2 r (\rho_u - \rho_c)}} = 3,07 \cdot 6 \sqrt{\frac{(0,2)^3 0,815^2}{(2,45 \cdot 10^{-5}) \omega^2 0,2(2000 - 0,815)}} = \frac{560}{\omega^{0,33}};$$

2. Оптимальне значення числа Рейнольдса: $Re_{1opt} = 2B_u = \frac{2 \cdot 560}{\omega^{0,33}} = \frac{1120}{\omega^{0,33}};$

3. Модифіковане число Архімеда:

$$Ar^M = \frac{\omega^2 r d^3 (\rho_u - \rho_c) \rho_c}{\mu^2} = \frac{\omega^2 0,2 (1 \cdot 10^{-3})^{-3} (2000 - 0,815) 0,815}{(2,45 \cdot 10^{-5})^2} = 542,8 \cdot \omega^2;$$

4. Робоче оптимальне значення числа Рейнольдса для П режиму осадження:

$$Re_{2opt} = 0,152 (\Psi Ar^M)^{0,715} = 0,152 (0,77 \cdot 542,8 \omega^2)^{0,715} = 11,37 \omega^{1,43};$$

де Ψ – коефіцієнт форми.

Прирівнюємо оптимальні значення числа Рейнольдса, що знайдені в п. 2 і 4.

5. Оптимальне значення кутової швидкості обертання сушарки для створення ПЗШ:

$$Re_{1opt} = Re_{2opt}; \frac{560}{\omega^{0,33}} = 11,37 \omega^{1,43}; 11,37 \omega^{1,43} \cdot \omega^{0,33} = 560;$$

$$\omega^{1,763} = 49,25; \omega = \sqrt[1,763]{49,25} = 9\text{ с}^{-1}; n = \frac{30\omega}{\pi} = 86\text{ об/хв}; Re_{opt} = 11,37 \omega^{1,43} = 11,37 \cdot 9^{1,43} = 263.$$

6. Швидкість подачі повітря: $v = \frac{Re_{opt} \mu}{d_c \rho_c} = \frac{263 \cdot 2,45 \cdot 10^{-5}}{1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,815} = 7,9\text{ м/с}.$

7. Оптимальне модифіковане число Архімеда:

$$Ar^M = \frac{\omega^2 r d^3 (\rho_u - \rho_c) \rho_c}{\mu^2} = 542,8 \cdot \omega^2 = 542,8 \cdot 9^2 = 43967.$$

8. Оптимальна товщина ПЗШ за формулою 3 [3, 4]:

$$\delta_{\text{ц.онм}} = \sqrt[3]{\frac{\mu^2}{\omega^2 r (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \rho_{\text{с}}}} = \sqrt[3]{\frac{(2,45 \cdot 10^{-5})^2}{9^2 \cdot 0,2(2000 - 0,815)0,815}} = 0,028 \text{ мм}$$

9. Оптимальний діаметр подрібнення сировини зі співвідношення 5[3, 4]:

$$d_{\text{онм}} = \delta_{\text{онм}} \cdot \sqrt[3]{Ar_{\text{онм}}} = 28 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt[3]{43967} = 0,99 \approx 1 \text{ мм}$$

За температури 150 °С нами розраховане число Рейнольдса на початку і в кінці існування ПЗШ за співвідношенням (2а і 2б), тобто значення:

$$Re_{\text{к}} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} = \frac{43967}{1400 + 5,22\sqrt{43967}} = 17,6$$

$$Re_{\text{в}} = \frac{Ar}{18 + 0,575\sqrt{Ar}} = \frac{43967}{18 + 0,575\sqrt{43967}} = 317$$

Бачимо, що наші дослідження добре узгоджуються з літературними даними і попередньо прийнятими значеннями, а оптимальне значення числа Рейнольдса **263** попадає у діапазон існування ПЗШ за даних умов відцентрового сушіння.

Підсумовуючи вищенаведене, подаємо наступний алгоритм розрахунку оптимальних параметрів роботи відцентрових сушарок з ПЗШ в системі ТТ – П:

1. Визначають параметр оптимізації відцентрового процесу висушування, $B_{\text{ц}}$.
2. Розраховують оптимальне число Рейнольдса, $Re_{\text{онм}} = 2 \cdot B_{\text{ц}}$
3. Визначають оптимальне число Архімеда модифіковане, $Ar_{\text{онм}}^M$ для П або Т режиму відцентрового осадження.
4. Розраховують оптимальні значення товщини ПЛШ, $\delta_{\text{онм}}^{\#}$.
5. Визначають оптимальний середній діаметр подрібнення сировини, $d_{\text{онм}} = \delta_{\text{онм}} \cdot \sqrt[3]{Ar_{\text{онм}}^M}$
6. За відомим середнім діаметром подрібнення визначають оптимальну швидкість подачі середовища в апарат.

Висновки.

1. Запропоновані конструктивні елементи сушарки з ПЗШ.
2. Виведені нами співвідношення [3,4] можуть застосовуватися для умов відцентрового сушіння з ПЗШ.
3. Представлений алгоритм розрахунку оптимальних параметрів сушіння у відцентрових сушарках з ПЗШ.

Перспективи подальших досліджень.

Подальші наукові дослідження будуть спрямовані на удосконалення конструктивних елементів відцентрових сушарок з ПЗШ, а також на оптимізацію параметрів їх ефективної роботи.

Література

1. Аэров М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем [Текст] / М.Э. Аэров, О.М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 510 с.

2. Білонога Ю.Л. Про доцільність розгляду гідромеханічних процесів з урахуванням сил поверхневого натягу на границі контакту тверде тіло – рідина [Текст] /Інтегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №2. – С. 56 - 64.

3. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів подрібнення твердої сировини під час розчинення та екстракції в полі гравітаційних або відцентрових сил [Текст] / Вісник НУ “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2004. – № 515. – С. 104 – 116.

4. Білонога Ю.Л. Критерій оптимізації гравітаційного процесу екстракції в системі тверде тіло-рідина або рідина-рідина [Текст] /Ю.Л. Білонога, Д.М. Білонога // Вісник НУ “Львівська політехніка” Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2003. – № 480. – С. 3 – 6.

5. Білонога Ю.Л. Оптимізація параметрів псевдозрідженого шару в системі тверде тіло – газ (ТТ-Г) [Текст] // Науковий вісник ЛНУВМ та БТ імені С.З.Гжицького – Львів, 2013. – Т.15, № 1, Серія «Харчові технології». – Ч. 3.– С. 7-11.

Рецензент – д.т.н., професор Ціж Б.Р.