

компонентів, яка визначається рельєфом, гідрогеологічними умовами, рН, редокс-потенціалом та дифузійними характеристиками.

Для уменьшения вредного воздействия подвижных токсичных компонентов в поверхностные и грунтовые воды необходимо применять рациональные агротехнические приемы, безопасные органо-минеральные удобрения и пестициды. Кроме того, целесообразно разработать долгосрочный экологичный прогноз, который включает грунтово-геохимические карты. Компьютерное моделирование сезонных массообменных процессов в грунтово-водных системах должно учитывать миграцию экологично опасных компонентов, которая определяется рельефом, гидрогеологическими условиями, рН, редокс-потенциалом и диффузионными характеристиками.

Дата надходження в редакцію: 08.04.2012. р.
Рецензент: д.т.н., професор Павлюченко А.М.

УДК 664.72.001.2

ВИЗНАЧЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАВІТАЦІЙНОЇ ПОЛИЧНОЇ СУШАРКИ

Н.О. Артюхова, аспірант, Сумський державний університет
М.П. Юхименко, к.т.н., доцент, Сумський державний університет

Аеродинамічні характеристики взаємодії потоків дисперсного матеріалу та сушильного агента визначають ефективність тепломасообмінних процесів на кожному ступені поличної сушарки і мають бути оптимізовані. Запропоновані аналітичні залежності для розподілу витрат продукту та сушильного агента, витрат тиску та оцінювання інших енергетичних показників при оптимізації конструктивних характеристик сушарки.

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Гравітаційні багатоступеневі сушарки з протитечієм або комбінованим рухом взаємодіючих потоків знайшли широке застосування при сушінні дисперсних матеріалів в хімічній, фармацевтичній, харчовій та інших галузях промисловості. Завдяки технологічним перевагам відносно простих конструктивних рішень доля гравітаційних сушарок в АПК досягає 70-80% виробничої потужності підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з основних способів зниження вологості є сушіння в камерних сушарках періодичної дії [1]. Незважаючи на ряд переваг, коефіцієнт корисної дії камерних сушарок не перевищує 30-35% від теоретично можливого, що складає лише 55-60% ефективності кращих шахтних протитечієвих зерносушарок, в тому числі багатоступеневими та комбінованими режимами сушіння [2].

Існують значні резерви підвищення ефективності подібних сушарок після вирішення проблем нерівномірності швидкості руху дисперсних часток, деформації температурного (концентраційного) профілю в поперечному перерізі апарату та пов'язане з цим зниження якості зернового матеріалу. Вказані обставини слід мати на увазі при проектуванні гравітаційних поличних сушарок, тому що зособливості їх роботи вивчені значно менше, чим інших подібних апаратів. Таким чином, отримання додаткових аеродинамічних характеристик та аналіз процесу

взаємодії потоків дозволить зробити більш обґрунтований вибір конструктивних параметрів.

Формулювання цілей статті (постановка завдання).

Мета дослідження полягає у визначенні аеродинамічних характеристик та енергетичних витрат взаємодіючих потоків в гравітаційній поличній сушарці для оптимізації її конструкції та технологічних режимів.

Виклад основного матеріалу досліджень.

Розглянемо рух взаємодіючих потоків на ділянці між перерізами А та В двох суміжних ступенів сушарки, які працюють в усталеному режимі. Цей рух можна описати деякою сукупністю усереднених ліній току. При цьому потік сушильного агента, що рухається назустріч зернистому матеріалу, в турбулентному режимі утворює систему вихорів різної локалізації та масштабу, які підтримують зважений шар зі змінною локальною концентрацією дисперсних частинок і аеродинамічним опором. Очевидно, що при відсутності перфорації полиці траєкторії руху частинок та лінії газового потоку будуть найдовшими і, в залежності від довжини полиці та зазору пересипання оцінюватимуться, в середньому, порядком подвійної довжини полиці (рисунок 3.5, а). При наявності перфорації довжина найкоротшої траєкторії дорівнюватиме відстані між перерізами А та В (рисунок 3.5, б). При цьому слід звернути увагу, що сумарні втрати енергії сушильного агента вздовж будь-якої лінії току між вказаними перерізами будуть однаковими.

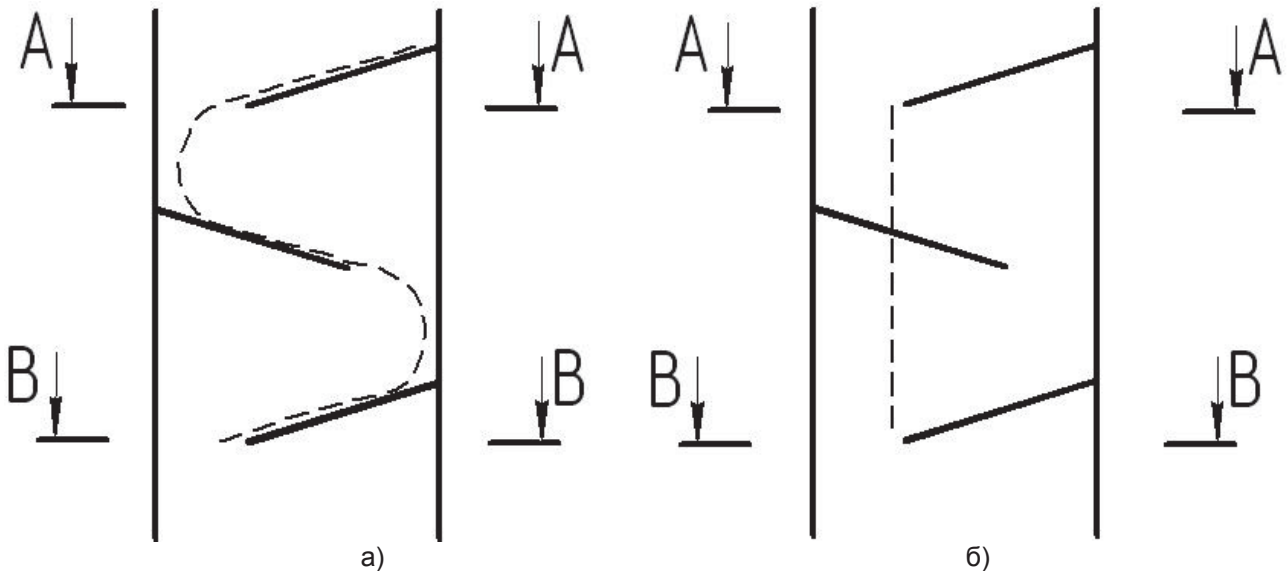


Рисунок 1 - Теоретично можливі траєкторії руху частинок: а – найдовша; б - найкоротша

Рух частинок під дією висхідного газового потоку визначається на основі закону Ньютона:

$$m \left(\frac{dW_{\pm}}{d\tau} \right) = \sum F_i \quad (1)$$

де m – маса частинки;

W_{\pm} - швидкість зернини;

τ - час,

$\sum F_i$ - сума сил, які діють на тверду частинку.

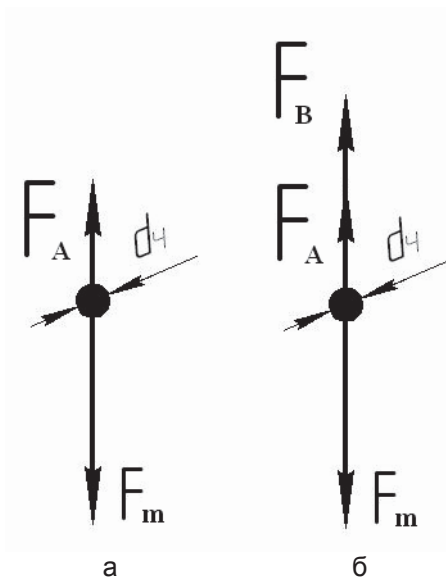


Рис. 2 - Сили, що діють на зернину в сушарці: а – в нерухомому газовому середовищі; б – у висхідному газовому потоці.
 F_m – сила тяжіння, F_A – Архімеда, F_B – аеродинамічна сила повітряного потоку.

Таким чином, в умовах рівноваги діючих сил $\left(\frac{dW_{\pm}}{d\tau} \right) = 0$, результуючу силу, що діє на сферичну зернину діаметром d , можна визначити через різ-

ницю густини зернини та двофазної системи Т:Г, враховуючи її порізність ε :

$$F = F_m - F_a = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_c - \rho_g) g = \frac{\pi d^3}{6\varepsilon} (\rho_c - \rho_g) g, \quad (2)$$

де d – діаметр твердої частинки, м;

ρ_c, ρ_g, ρ_c – відповідно густини частинки, газу та двофазної суміші, кг/м³;

ε – порізність;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Аеродинамічна сила висхідного повітряного потоку знаходиться по формулі:

$$F_g = \zeta \frac{\rho_g W_g^2 \pi d^2}{2 \cdot 4}, \quad (3)$$

де ζ – коефіцієнт опору частинки в умовах стисненого руху;

W_g – швидкість повітря в порах зваженого шару, м/с.

При цьому коефіцієнт опору визначається аеродинамічним режимом згідно [3]:

$$\zeta = \begin{cases} \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,33}} - i \delta \varepsilon \zeta \dot{a} \dot{a} i^3 & Re < 1000; \\ 0,44 - i \delta \varepsilon \zeta \dot{a} \dot{a} i^3 & Re \geq 1000. \end{cases}$$

Зважений режим сушіння зернин в системі Т:Г виникає за умови, коли рівнодіюча сил тяжіння та Архімеда буде дорівнювати аеродинамічній силі висхідного повітряного потоку. Прирівнюючи (2) і (3), знаходимо швидкість, яка підтримує частинку у зваженому стані:

$$W_{z1} = \sqrt{\frac{4dg(\rho_c - \rho_g)}{3 \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_g}}, \quad (4)$$

Для визначення швидкості газового потоку, яка відповідає початку винесення частинок із апарата, можна використовувати як критеріальні рівняння типу $Re_a = f(Ar)$ відповідно для ламінарного, перехідного та турбулентного режимів [4] так і універсальну формулу Тодеса для всіх

режимів [5]:

$$Re_a = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}, \quad (5)$$

де Re_a - критерій Рейнольдса при швидкості

винесення W_{a2} , $Re_a = \frac{W_{a2} \cdot d \cdot \rho_a}{\mu_a}$;

Ar - критерій Архімеда, $Ar = \frac{d^3 \rho_a (\rho_s - \rho_a) g}{\mu_a^2}$;

μ_a - динамічний коефіцієнт в'язкості газового потоку, Па·с.

Дослідження аеродинаміки потоків на ступенях сушарки

Розглянемо рух зернини в міжполицевому просторі. У зваженому стані вона буде підтримуватись при мінімальній висхідній швидкості повітря в порах W_{g1} . Якщо фактична швидкість W буде меншою, то ця різниця швидкостей $\Delta W = W_{a1} - W$ зумовить рух частинки зверху вниз. Час такого руху вздовж полиці з кутом нахилу γ та довжиною L буде дорівнювати:

$$\tau = \frac{L}{\Delta W \sin \gamma} \quad (6)$$

Слід звернути увагу, що результуюча швидкість ΔW , яка визначає рух зернини в міжполицевому просторі, матиме реально лише скочуючу складову $\Delta W \cdot \sin \gamma$, тому що нормальна сила

тиску частинки на полицю i , відповідно, нормальні складові прискорення та швидкості будуть компенсовані нормальною реакцією полиці. Таким чином, час руху (термін сушіння) зернини, що рухається вздовж полиці, є обернено пропорційною функцією синусів кута її нахилу:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_1} \quad (7)$$

З цих міркувань можна визначити можливість конструктивного впливу на час перебування зерна в міжполицевому просторі і регулювання процесу сушіння. Зменшуючи кут нахилу полиці, ми досягаємо збільшення часу перебування зернини на цьому ступені.

На рис.3 показана експериментальна залежність профілю висхідних швидкостей від конструктивних характеристик міжполицевого простору, зокрема, довжини, ступеню перфорації та кута встановлення полиць. При відсутності перфорації характерний профіль висхідних швидкостей матиме характерний пік в міжполицевому просторі (рис.3а). Наявність перфорації зменшує величину піка відповідно збільшенню витрат сушильного агента через отвори секціонуючих полиць (рис.3б). Оптимізація профілю висхідних швидкостей може бути досягнута не лише зміною розвантажувального зазору та кута нахилу полиць, а й за рахунок варіювання ступеню перфорації по довжині полиць (рисунок 3в).

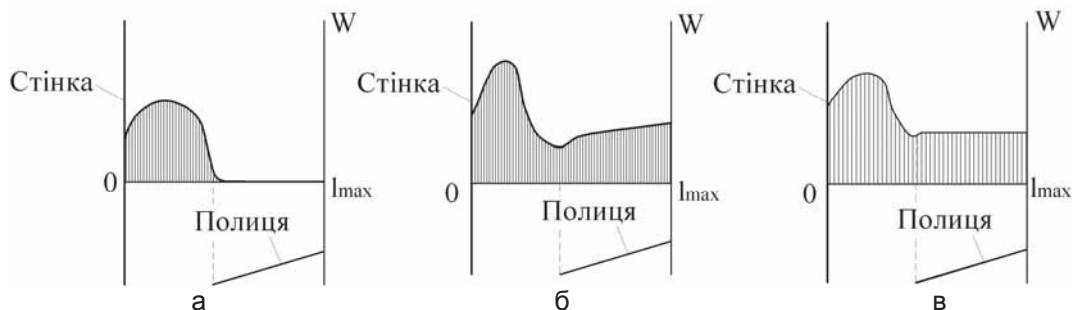


Рисунок 3 – Профілі швидкості газового потоку:

а – неперфорована полиця; б – перфорована полиця з незмінною по довжині перфорацією; в – перфорована полиця зі змінною по довжині перфорацією

Для визначення сумарного аеродинамічного опору розглянемо його як сукупність опорів окремих ступенів сушарки:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta p_i \quad (8)$$

В свою чергу, аеродинамічний опір кожного ступеню залежить від характеру взаємодії сушильного агента з полицями, встановленими під деяким кутом, кількості дисперсного матеріалу в міжполицевому просторі, що характеризується порізністю та наявністю перфорації полиць. Рух сушильного агента вздовж полиці можна розраховувати аналогічно загальноприйнятій проектній процедурі визначення втрат опору повітря в тру-

бах.

При цьому слід зауважити, що вказаний перепад тиску буде зменшуватись вздовж полиці, відповідно і продуктивність перфораційних отворів однакового діаметру також буде знижуватись з наближенням до розвантажувального міжполицевого зазору. Втрати тиску для елементарного струменя (лінії току), що рухається вздовж перфорованої полиці можна розглядати як суму втрат по довжині полиці з поточною координатою x та місцевих втрат через отвори перфорації:

$$\Delta p_i = \Delta p_0 + zx, \quad (9)$$

де Δp_i - втрати тиску на i -у ступені сушарки між контрольними перерізами А-А та В-В, Па;

Δp_0 - місцеві втрати тиску в отворах перфорациї, Па;
 z - питомі втрати тиску по довжині, Па/м;
 x - поточна координата отвору перфорациї, м.

Звідки:

$$\Delta p_0 = \Delta p_i - zx \quad (10)$$

Швидкість повітря в отворах перфорациї буде зменшуватись пропорційно втратам тиску по довжині:

$$\omega_0 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_0}{\rho}} = \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - zx}{\rho}}, \quad (11)$$

де φ - коефіцієнт швидкості.

Враховуючи, що z є коефіцієнтом питомих втрат тиску по довжині та залежить від шорсткості поверхні полиць та дисперсних часток, з якими контактує потік повітря, що рухається вздовж полиці, методика визначення втрат по довжині аналогічна аеродинамічним розрахункам повітроводів систем вентиляції. У першому наближенні можна використати довідкові дані для коефіцієнтів шорсткості повітроводів та вентиляційних решіток [4].

Запишемо витрату повітря через отвори перфорациї полиці:

$$V = \int_0^L \omega_0 dS = \varphi \int_0^L \psi \sqrt{\frac{\Delta p_i - zx}{\rho}} dx \quad (12)$$

де S - площа полиці, м² ($dS = dx \cdot B$);

ψ - ступінь перфорациї полиці.

Зауважимо, що вираз (12) в такому вигляді стосується одиничної ширини полиці ($B=1$).

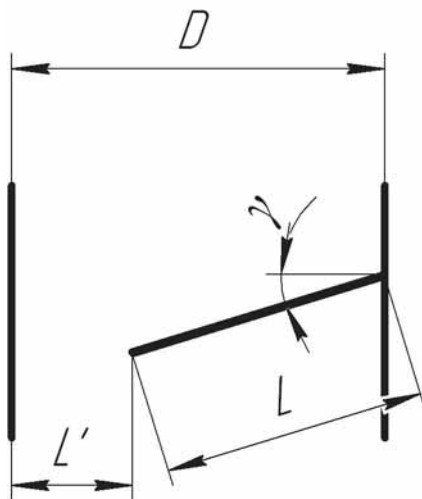


Рис.4 – Основні елементи конструкції полиці.

В розвантажувальному зазорі L' перепад тиску Δp буде мінімальним:

$$\Delta p = \Delta p_i - zL, \quad (13)$$

а витрата повітря через нього при одиничній ширині апарату визначиться як:

$$V' = \varphi \cdot L' \sqrt{\frac{\Delta p_i - zL}{\rho}} \quad (14)$$

Сумарні витрати повітря складуть $V + V'$. Інтегруючи функцію висхідної швидкості по довжині перфорованої полиці і приймаючи ступінь перфорациї ψ (живий перетин полиці) постійною, знайдемо витрати повітря:

$$V = \int_0^L \omega_0 dx = \varphi \psi \int_0^L \sqrt{\frac{\Delta p_i - zx}{\rho}} dx \quad (15)$$

Результат інтегрування в межах (0, L) дає:

$$V = \varphi \psi L \sqrt{\frac{\Delta p_i}{\rho}} - \frac{2}{3} \varphi \psi \sqrt{\frac{z \cdot L^3}{\rho}} \quad (16)$$

В балансове рівняння витрат повітря по всьому перерізу сушарки додається частина потоку через розвантажувальний зазор:

$$W_c \cdot D = V + V' = \varphi \psi L \sqrt{\frac{\Delta p_i}{\rho}} - \frac{2}{3} \varphi \psi \sqrt{\frac{z \cdot L^3}{\rho}} + \varphi \cdot L' \sqrt{\frac{\Delta p_i - zL}{\rho}} \quad (17)$$

де $W_c \cdot D$ - сумарні витрати повітря (сушильного агента) в апараті довжиною D одиничної ширини.

Аналіз рівняння (17) дозволяє встановити значення швидкості руху газового потоку, який відповідає переходу зернистого матеріалу у зв'язаний стан над перфорованою полицею одиничної ширини з площею вільного перерізу $S = \psi L$:

$$W_{c1} = \varphi \sqrt{\frac{\Delta p_i}{\rho}} - \frac{2}{3} \varphi \sqrt{\frac{z \cdot L}{\rho}} \quad (18)$$

або з урахуванням формули (4):

$$\sqrt{\frac{4dg(\rho_c - \rho_s)}{3 \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \rho_s}} = \varphi \sqrt{\frac{\Delta p_i}{\rho}} - \frac{2}{3} \varphi \sqrt{\frac{z \cdot L}{\rho}} \quad (19)$$

З цього співвідношення неважко знайти втрати тиску в межах одного ступеня сушарки Δp_i . При цьому є можливість варіювання конструктивними параметрами полиці (її довжиною та ступенем перфорациї).

Для режиму унесення зернистого матеріалу, при підстановці в ліву частину рівняння (18) значення швидкості W_{a2} з формули (5), одержується відповідне значення Δp_i . Таким чином, стає можливим визначити конструктивні параметри перфорованих полиць у робочому діапазоні функціонування апарату та отримати профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі по приведеному нижче алгоритму.

Аналіз виразу (11) показав, що місцева швидкість вертикального потоку над отвором перфорациї буде лінійно залежати від ступеню перфорованості полиці ψ та від координати розташування отвору по довжині полиці x :

$$\bar{\omega}_0 = \psi \cdot \omega_0 = \psi \varphi \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_i - zx}{\rho}} \quad (19)$$

Аналіз результатів аеродинамічного розрахунку.

Профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі будуть вза-

ємозалежними з можливістю їх змінювання за рахунок варіювання вказаних конструктивних характеристик, що і показано на рис. 5.

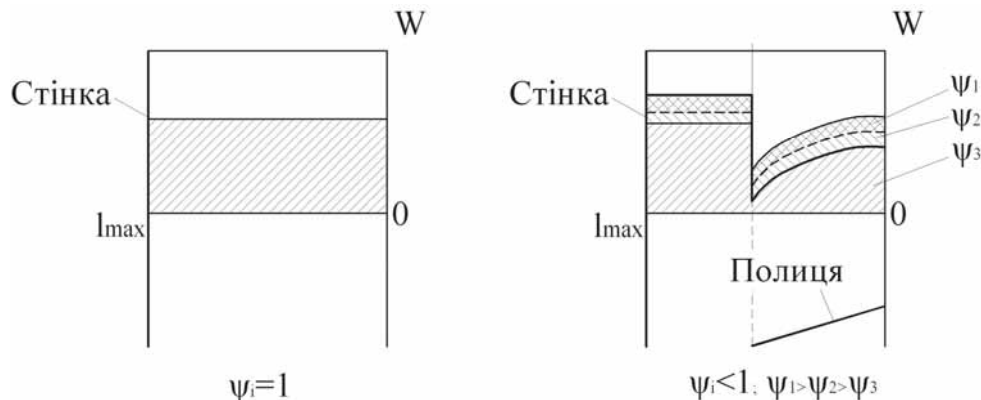


Рисунок 5 – Розрахункові профілі вертикальних швидкостей над полицею та в розвантажувальному зазорі залежно від ступеню перфорації полиці ψ .

Збільшення перфорованості полиці призводить до зменшення витрат сушильного агента через розвантажувальний зазор. Аналіз теоретичних епюр розподілу висхідної швидкості потоку (рис.5) показав задовільну кореляцію з експериментальними даними (рис. 3) та аналогічними розрахунками інших авторів [5].

Висновки.

Аеродинамічні характеристики взаємодії по-

токів дисперсного матеріалу та сушильного агента визначають ефективність тепломасообмінних процесів на кожному ступені полицної сушарки і мають бути оптимізовані. Запропоновані аналітичні залежності для розподілу витрат продукту та сушильного агента, втрат тиску та оцінювання інших енергетичних показників при оптимізації конструктивних характеристик сушарки.

Список використаної літератури:

1. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности./ Лыков М.В.- М.: Химия, 1970. – 432с.
2. Гинзбург А.С. Расчёт и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. / Гинзбург А.С. - М.: Агропромиздат, 1985. – 336с.
3. Шрайбер А.А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым полидисперсным веществом./ Шрайбер А.А., Милютин В.Н., Яценко В.П. – К.: Наукова думка, 1980. – 252с.
4. Идельчик Н.Е. Аэродинамика технологических аппаратов. / Идельчик Н.Е. – М.: Машиностроение, 1983. – 351с.
5. Вакал С.В. Розрахунок перфорованих оболонок відцентрових диспергаторів// Вакал С.В., Борозенец Н.С., Шандиба О.Б. / Водне господарство України, 2002.- № 1-2.- С.39-41.

Аэродинамические характеристики взаимодействия потоков дисперсного материала и сушильного агента определяют эффективность тепломассообменных процессов на каждой ступени полочной сушилки и должны быть оптимизированы. Предложены аналитические зависимости для распределения расходов продукта и сушильного агента, потерь давления и оценки других энергетических показателей при оптимизации конструктивных характеристик сушилки.

The aerodynamic characteristics of the interaction flows of disperse material and drying agent at each stage of the shelving dryer should be optimized. Proposed analytical expressions for the product rate and drying air distribution, pressure losses and other energy estimates provide a good base for equipment development.

Дата надходження в редакцію: 01.03.2012. р.

Рецензент: д.т.н., професор Павлюченко А.М.