

УДК 621.928.9.

Номер державної реєстрації: 0112U003127

Міністерство аграрної політики та продовольства України

Сумський Національний аграрний університет

м. Суми, вул. Г. Кондратьєва 160

Затверджую

Ректор

“ ” _____ 2014р.

ЗВІТ

про науково-дослідну роботу по темі:

“Інтенсифікація процесу сушіння післяспиртової барди з удосконаленням системи пилоуловлення” (заключний)

Проректор з наукової роботи

та економічних питань к.е.н., доцент

_____ О.М. Маслак
Підпис

Дата

Науковий керівник доктор технічних наук,

професор

_____ О. Р. Якуба
Дата Підпис

Результати роботи розглянуті вченою радою

Протокол №

від

2014р.

Суми – 2014 рік

Головний виконавець
(керівник теми)

Якуба О. Р.

Науковий співробітник

Сабадаш С. М.

ЗМІСТ

Вступ

1. Загальна методика сушіння післяспиртової барди на інертних тілах в псевдозрідженому шарі.
 - 1.1. Механізм проведення процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах
2. Механізм пиловловлення сухої післяспиртової барди.
 - 2.1. Фракційна ефективність конічних циклонних пиловловлювачів
 - 2.2. Розрахунок ефективності уловлення післяспиртової барди конічними циклонами
 - 2.3. Поле швидкостей в циліндро -конічних циклонах пиловловлювачів
3. Розробка сушильної установки у псевдозрідженому шарі інертного носія із системою пилоуловлення

Висновки

Література

ВСТУП

Актуальність теми. Останнім часом в Україні утилізація відходів від підприємств харчової промисловості набуває все більшої актуальності. У зв'язку з значним об'ємом промислової переробки різноманітної сировини рослинного походження на переробних підприємствах агропромислового комплексу утворюється велика кількість цінних і для подальшої переробки вторинних сировинних ресурсів (відходи від виробництва). Значна їхня частина просто витрачається, оскільки не знаходить раціонального застосування в промисловості. Однією із початкових стала утилізація відходів від підприємств спиртової промисловості (післяспиртова барда). Зливання цього продукту на поля призводить до екологічного забруднення навколишнього середовища, а саме до втрати родючості ґрунтів.

Барда являє собою високобілковий продукт, що у своєму складі містить білки, жири, вуглеводи, а також незамінні амінокислоти, які не можуть синтезуватися в організмі тварини і тому вони повинні надходити до їхнього організму разом з кормом. Отже, звідси, зливаючи барду ми не тільки забруднюємо навколишнє середовище, а й разом із тим позбуваємося такого цінного для тварин корму.

Нині, барду використовують тільки частково в сільському господарстві для згодовування великій рогатій худобі в осінньо-зимовий період. Але розв'язання проблеми у такий спосіб неефективне, адже при потужності спиртзаводу в 1500 дал спирту вихід барди становить орієнтовано 195 тонн за добу. Однак особливі проблеми виникають у виробників спирту у весняно-літній період, коли використання зернової барди в згодовуванні худоби різко знижується. Тому спиртовим заводам не залишається нічого іншого, як зливати її в накопичувальні ями (відстійники), або на поля фільтрації (ділянка землі, на поверхні якої розміщують каналізаційні та інші стічні води з метою їх очищення; різновид водоочисної споруди). Тому

питання раціонального використання післяспиртової зернової барди на сьогодні постало у край гостро.

За радянських часів в країні із досить розвинутим сільським господарством питань щодо утилізації барди не виникало – її згодовували в натиному вигляді, навіть деякі комплекси з вирощування худоби будували поряд із спиртовими заводами. Але з розпадом Радянського Союзу було майже втрачено не лише поголів'я худоби, а й комплекси, на яких її вирощували. Вирішенням проблеми, яка є нагальною для спиртової промисловості, на нашу думку, може стати переробка барди методом попередньої підготовки її до процесу сушіння та сушіння барди. При цьому переваги сухої барди перед натиною полягають у наступному:

- можливість транспортування на великі відстані;
- тривалий термін зберігання сухої післяспиртової барди (до 6 місяців згідно з ТУ на суху барду);
- використання, як білкової добавки в годівлі тварин.

Наукові основи процесу сушіння, які здійснюються різними способами, були викладені у роботах О.В.Ликова, М.Ю. Лур'є, П.Д. Лебедева, А.Н. Плановського, А.С. Гінзбурга, Н.Е. Федорова. Крім того, значним є внесок з досліджень цього питання таких відомих вчених сучасності, як А.М. Поперечний, М.І. Погожих, В.О. Потапов, М.А. Грішин та ін.

Для підприємств спиртової промисловості проблеми з утилізації післяспиртової барди є надто важливими, вони потребують раціонального вирішення із застосуванням нових технологій, інших удосконалених методів та способів.

Зважаючи на наведене вище, можна зробити висновок, що актуальною задачею є дослідження процесу сушіння післяспиртової зернової барди в сушарках псевдозрідженого шару інертного носія і вдосконалення на цій основі процесу, способів та обладнання для його здійснення, що й стало метою дисертаційного дослідження.

1. ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА СУШІННЯ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ НА ІНЕРТНИХ ТІЛАХ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

Різноманіття матеріалів, що піддаються сушінню і значний різновид їх по природі, фізичним і гігроскопічним властивостям обумовлюють необхідність класифікації об'єктів сушіння. Класифікація висушуваних матеріалів по визначальним характеристикам істотно полегшує задачу вибору раціонального способу сушіння і ефективного типу сушильного апарату. Однією із найважливіших класифікацій матеріалу згідно визначенню А.В. Ликова, що всі вологі матеріали розділяються на три групи: капілярно – пористі, колоїдні і капілярно – пористі колоїдні тіла. Ця класифікація вологих матеріалів має велике практичне значення при узагальненні результатів досліджень процесу сушіння матеріалів.

1.1. Механізм проведення процесу сушіння післяспиртової барди на інертних тілах

Процес сушіння післяспиртової зернової барди в псевдозрідженому шарі може бути представлений, як процес конвективного теплообміну, який ускладнений перенесенням речовини. Одночасно з переносом енергії відбувається і перенос речовини. Пар, який утворився в результаті перенесення тепла, потрапляє в оточуюче середовище в напрямленні, перпендикулярному від поверхні матеріалу. В залежності від густини поперечного потоку речовини в процесі сушіння, тобто в залежності від інтенсивності переносу тепла, проходить відповідна зміна в прилеглому ламінарному пограничному шарі. Пор, який поступає із зони випаровування,

порушує стан ламінарного підшару у поверхні тіла, турбулізує його, що призводить до різкого збільшення інтенсивності теплообміну. В процесі сушіння післяспиртової барди на інертних тілах збільшується густина поперечного потоку речовини в наслідок наявності контактного теплообміну між гарячими інертними тілами і вологим матеріалом. Експерименти показали, що для проведення процесу сушіння на інертних тілах необхідно, щоб тільки частина загальної поверхні була б покрита висушуваним матеріалом і таким чином, приймала б участь в процесі сушіння. Друга частина загальної поверхні інертного тіла повинна бути вільною від вологого матеріалу і вона приймає участь тільки в теплообміні. Ця вільна від вологого матеріалу частина поверхні інертних тіл нагрівається нестационарно до температури вище температури мокрого термометра ($t_n > t_m$). Нагріті інертні тіла, потрапляючи в зону подачі пастоподібної післяспиртової зернової барди, покриваються плівкою вологого матеріалу, який має температуру $t_0 < t_n$. В результаті контактного теплообміну проходить випаровування вологи в середині плівки. Пароутворення в середині плівки вологого матеріалу складає загальний градієнт тиску в плівці, який релаксується тільки при перенесенні разом з паром субмікроскопічних частинок вологи із пор в пограничний шар і в ядро турбулентного потоку, де вони і випаровуються.

Дана теорія об'ємного випаровування краплин в пограничному шарі, розроблена А.В. Ликовим, яку підтвердили шведські дослідники, яким вдалося сфотографувати процес випаровування краплини в пограничному шарі.

По цій теорії має місце молярне диспергування субмікроскопічних частинок вологи в ламінарному пограничному шарі, яке визвано хвилеподібним рухом в поперечному шарі (ефект Папалексі). У випадку сушіння на інертних тілах в фонтануючому шарі головною рушійною силою молярного диспергування являється надлишковий тиск в плівки матеріалу в наслідок контактного теплообміну. Поперечний потік речовини, який потрапив у вигляді пара із пор матеріалу у пограничний шар, частково

конденсується в ньому, що призводить до різкого зменшення об'єму і до порушення структури пограничного шару.

Порушення пограничного шару поперечним потоком речовини, визваного градієнтом тиску в середині матеріалу і процесами конденсації пара, і випаровування частинок в пограничному шарі, призводять до збільшення коефіцієнта теплообміну.

Густина поперечного потоку речовини в пограничному шарі (в наслідок молярного диспергування) може бути збільшена шляхом покращення теплофізичних властивостей інертних тіл. Рушійною силою молярного диспергування речовини в пограничному шарі являється загальний градієнт тиску в плівці, яка в свою чергу являється функцією переданої кількості тепла або кількості випареної вологи при контактному теплообміну. Відомо, що для нестационарного теплообміну кількість переданого тепла визначається при однакових режимних параметрах процесу критеріями F_0 і V_i . При однаковому часі нагрівання і охолодження кількість переданого тепла визначається температуропровідністю і теплопровідністю інертних тіл. Таким чином, критерій, враховуючий вплив молярного диспергування частинок в пограничному шарі в рівнянні теплообміну для процесу сушіння на інертних тілах в фонтануючому шарі, являється функцією теплофізичних властивостей інертних тіл.

Розглядаючи механізм, який проходить при контактному теплообміні між пастоподібною післяспиртовою бардою і інертними тілами, потрібно відмітити, що контактний теплообмін може значно прискорити процес так, як він оказує вплив на зовнішню обставину обтікання тіл в зв'язку із зміною структури ламінарного пограничного шару і на вирівнювання температурних полів всередині плівки.

При сушінні післяспиртової зернової барди на інертних тілах на обтікаємом сушильному агенті поверхні висихаючої плівки проходить безперервна якісна зміна механічних властивостей плівки із зміною її вологовмісту. При сушінні пастоподібною післяспиртовою зерновою барди

проходе безкінечне зіткнення інертних тіл, яке призводить до неперервного руйнування поверхні сухої кірки щільно - крихкого матеріалу, яка була утворена в процесі. В щільно - пластичному стані стирання з поверхні інертних тіл не може бути значним так, як сили зчеплення окремих твердих частинок між собою, які обумовлені наявністю водяних плівок між дотичними твердими частинками, які достатньо велика і при зіткненні інертних тіл в такому стані проходить пластична деформація плівки, але не її стирання. При переході матеріалу у щільно – крихкий стан, коли міцність каркаса із твердих частинок визначається тільки силами зчеплення між твердими частинками при відсутності водяних плівок, стирання становиться фактором, який лімітує швидкість процесу.

Виходячи із представленого про послідовність перетворення щільно – пластичного стану матеріалу у щільно – крихке в процесі сушіння післяспиртової барди на інертних тілах, цей процес може бути розділений умовно на дві стадії:

- стадія, яка визначається кінетикою сушіння;
- стадія, яка визначається кінетикою стирання сухої крихкої плівки барди з поверхні інертних тіл.

В залежності від властивостей висушуваного матеріалу на інертних тілах та або інша стадія може являтися лімітуючою і визначати протікання процесу. У випадку, якщо лімітуючою стадією буде являтися кінетика стирання (велика механічна міцність плівки) то застосування цього методу технічно та економічно неприйнятно так, як тепловий коефіцієнт корисної дії сушарки буде зменшуватися внаслідок того, що плівка на протязі деякого часу буде безперервно наростати.

У випадку, якщо лімітуючою стадією процесу являється стадія сушіння (низька механічна міцність плівки до стирання) і протікання процесу визначається швидкістю випаровування вологи з поверхні інертних тіл, процес можна розглядати, як процес конвективного сушіння і застосування

цього методу сушіння післяспиртової барди технічно та економічно можливим. Таким чином, загальна кінетика процесу визначається, окрім кінетики сушки, кінетикою стирання або швидкістю відновлення поверхні, що залежить від механічної міцності матеріалу до стирання.

Безперервне руйнування сухої крихкої плівки матеріалу на поверхні інертного тіла призводить до зниження дифузійного опору настільки, що процес практично протікає тільки в першому періоді швидкості сушіння (випаровування з поверхні). Тому процес сушіння на інертних тілах післяспиртової барди може бути описаний системою диференціальних рівнянь для першого періоду сушіння у псевдозрідженому шарі і рівнянням, яке враховує кінетику стирання.

Якщо виходячи із теорії об'ємного розширення, явище тепло – і масообміну описується системою диференціальних рівнянь, які відражають розподілення швидкості і температур з урахуванням випаровування вологи з поверхні у в'язкому ламінарному пограничному шарі. Рівняння кількості руху:

$$W_x \frac{dW_x}{dx} + W_y \frac{dW_y}{dy} = \nu \frac{d^2 W_x}{dy^2} + W_g \frac{dW_g}{dx} \quad (1.1)$$

Рівняння суцільності має вигляд:

$$\frac{dW_x}{dx} + \frac{dW_y}{dy} = 0 \quad (1.2)$$

Рівняння переносу енергії з допоміжним виразами об'ємного випаровування (негативне джерело теплоти) має вигляд:

$$C_p \rho (W_x \frac{dt}{dx} + W_y \frac{dt}{dy}) = \lambda \frac{d^2 t}{dy^2} - rM \quad (1.3)$$

криві умови:

$$\alpha \Delta t = -\lambda \frac{dt}{dy} \Big|_{y=0} \quad (1.4)$$

умови існування псевдозрідженого шару:

$$\frac{\pi}{6} \rho_M - \rho_g \cdot g d^3 = \psi \cdot g \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_g W_g^2}{2} \quad (1.5)$$

Складені диференціальні рівняння кінетики стирання щільно-крихкого матеріалу і визначення механічних і фізичних характеристик післяспиртової барди, являються не лінійними функціями вологовмісту які повинні враховуватися в кривій рівнянні, у вигляді їх складності неможливо. Виходячи із представленого про послідовність перетворення щільно-пластичного стану у щільно-крихке, необхідно ввести безрозмірний коефіцієнт, який буде враховувати ступінь відхилення дійсного процесу від процесу випаровування з поверхні в фонтануючому шарі:

$$C_n = \frac{\sum E}{\Delta u \cdot r} - 1 \quad (1.6)$$

де:

$$\sum E = E_{\text{нагрівання}} + E_{\text{продування}}$$

$E_{\text{нагрівання}}$ – витрати енергії на нагрівання повітря;

$E_{\text{продування}}$ – витрати енергії на нагнітання повітря у фонтануючому шарі;

Δu – кількість випареної вологи;

r – теплота пароутворення.

Даний безрозмірний коефіцієнт G_n характеризує стирання кірки пастоподібного матеріалу на інертних тілах і процесом випаровування з поверхні інертних тіл.

Таким чином, процес сушіння післяспиртової барди описується системою рівнянь (1.1), (1.2), (1.3), (1.4), (1.5), (1.6).

Аналітичне рішення даної системи рівнянь не представляється можливим. Тому для розрахунку було використано теорію подібності.

Перетворивши цю систему рівнянь в безрозмірний вигляд, отримаємо критерій подібності, яка характеризує процес сушіння післяспиртової барди.

Нехай є два подібні процеси. Всі величини відносяться до першого із них, будемо відмічати нижнім індексом 1, а до другого – індексом 2. Тоді маємо для першого процесу наступне рівняння:

$$W_{x_1} \frac{dW_{x_1}}{dx_1} + W_{y_1} \frac{dW_{y_1}}{dy_1} = \nu_1 \frac{d^2 W_{x_1}}{dy_1^2} + W_{g_1} \frac{dW_{g_1}}{dx_1}$$

$$\text{div } W_1 = 0$$

$$Cp_1\rho_1(Wx_1 \frac{dt_1}{dx_1} + Wy_1 \frac{dt_1}{dy_1}) = \lambda_1 \frac{d^2t_1}{dy_1^2} - r_1M_1$$

$$\alpha_1 \Delta t_1 = -\lambda_1 \frac{dt_1}{dy_1} \Big|_{y_1=0} \quad (1.7)$$

$$\frac{\pi}{6} \rho_M - \rho_\Gamma \cdot g_1 d_1^3 = \psi \operatorname{Re} g_1 \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 \cdot \frac{\rho_\Gamma W_{g_1}^2}{2}$$

для другого процесу маємо відповідно:

$$Wx_2 \frac{dWx_2}{dx_2} + Wy_2 \frac{dWy_2}{dy_2} = v_2 \frac{d^2Wx_2}{dy_2^2} + Wg_2 \frac{dWg_2}{dx_2}$$

$$Cp_2\rho_2(Wx_2 \frac{dt_2}{dx_2} + Wy_2 \frac{dt_2}{dy_2}) = \lambda_2 \frac{d^2t_2}{dy_2^2} - r_2M_2 \quad (1.8)$$

$$\alpha_2 \Delta t_2 = -\lambda_2 \frac{dt_2}{dy_2} \Big|_{y_2=0}$$

$$\frac{\pi}{6} \rho_M - \rho_\Gamma \cdot g_2 d_2^3 = \psi \operatorname{Re} g_2 \cdot \frac{\pi}{4} d_2^2 \cdot \frac{\rho_\Gamma W_{g_2}^2}{2}$$

Так, як явища подібні, то із визначення подібності виникають наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}
W_2 &= C_w \cdot W_1 & r_2 &= C_r \cdot r_1 & \rho_{\Gamma_2} &= C_\rho \cdot \rho_{\Gamma_1} \\
X_2 &= C_2 \cdot X_1 & M_2 &= C_M \cdot M_1 \\
v_2 &= C_v \cdot v_1 & \alpha_2 &= C_\alpha \cdot \alpha_1 \\
C_p &= C_c \cdot C_{p1} & \rho_{M-\rho_{\Gamma_2}} &= C_{\rho_{M-\rho_{\Gamma}}} \cdot \rho_{M-\rho_{\Gamma_1}} \\
\rho_2 &= C_\rho \cdot \rho_1 & g_2 &= C_g \cdot g_1 \\
t_2 &= C_t \cdot t_1 & d_2 &= C_2 \cdot d_1
\end{aligned} \tag{1.9}$$

Підставляючи відношення (2.9) в рівняння (2.8), маємо:

$$\begin{aligned}
\frac{C_w^2}{C_L} W_{x1} \frac{dW_{x1}}{dx_1} + \frac{C_w^2}{C_L} W_{y1} \frac{dW_{y1}}{dy_1} &= \frac{C_D \cdot C_w}{C_L^2} v_1 \frac{d^2 W_{x1}}{dy_1^2} + \frac{C_w^2}{C_L} W_{g1} \frac{dW_{g1}}{dx_1} \\
\frac{C_w}{C_L} \operatorname{div} W_1 &= 0 \\
\frac{C_c C_\rho C_w C_t}{C_L} C_{\rho_1} \rho_1 \left(W_{x1} \frac{dt_1}{dx_1} + W_{y1} \frac{dt_1}{dy_1} \right) &= \frac{C_\lambda C_t}{C_L^2} \lambda_1 \frac{dt_1}{dy_1^2} - C_\rho \cdot C_M \cdot r \cdot M_1 \\
C_\alpha \cdot C_t \cdot \alpha_1 \cdot \Delta t_1 &= -C_\lambda \frac{C_t}{C_L} \lambda_1 \frac{dt_1}{dy_1} \Big|_{y_1=0} \\
\frac{\pi}{6} C_{\rho_{M-\rho_{\Gamma}}} C_g \cdot d_1^3 &= C_L^2 \cdot C_{\rho_T} \cdot C_w^2 \frac{\pi}{4} \cdot \psi \cdot \rho_{\Gamma} \cdot W_{g1}^2
\end{aligned} \tag{1.10}$$

Тепер одночасно існують дві системи рівнянь з однаковими змінними, причому константи подібності можуть бути зв'язані між собою, але не яким чином не визначаються через змінні. Це можливо тільки при умові тотожності рівнянь. Для цього необхідно, щоб комплекси, які складені із постійних множників, в рівняння (2.10) скоротились. На основі цієї вимоги отримаємо ряд обумовлюючих умов для вибору констант подібності, а саме:

$$\frac{C_w^2}{C_L} = \frac{C_w^2}{C_L} = \frac{C_v \cdot C_w}{C_L} = \frac{C_w^2}{C_L} \tag{1.11}$$

$$\frac{C_c \cdot C_\rho \cdot C_w \cdot C_t}{C_L} = \frac{C_\lambda C_t}{C_L^2} = C_r \cdot C_M \tag{1.12}$$

$$C_{\alpha} C_t = \frac{C_{\lambda} C_t}{C_L} \quad (1.13)$$

$$C_{\rho} C_g \cdot C_L^2 = C_L^2 \cdot C_{\rho} C_W^2 \quad (1.14)$$

Із рівняння (2.11) отримано:

$$\frac{C_v C_W}{C_L^2} = \frac{C_W^2}{C_L}; \quad \frac{C_W \cdot C_L}{C_v} = 1; \quad \text{Re} = \frac{w \cdot L}{\nu} = idem$$

Із рівності (2.12) було отримано:

$$\frac{C_c \cdot C_{\rho} \cdot C_W \cdot C_t}{C_L} = \frac{C_{\lambda} C_t}{C_L^2}; \quad \frac{C_c \cdot C_{\rho} \cdot C_W \cdot C_t}{C_{\lambda}} = 1; \quad \text{Re} = \frac{w \cdot L}{a} = idem$$

Помноживши цей критерій на критерій Re^{-1} , тоді отримаємо:

$$\text{Pr} = \frac{w \cdot L}{a} \cdot \left(\frac{wL}{\nu} \right)^{-1} = \frac{\nu}{a}$$

$$\frac{C_{\lambda} C_t}{C_L^2} = C_r \cdot C_M; \quad \frac{C_r C_M C_L^2}{C_{\lambda} C_t} = 1; \quad \text{Ki} = \frac{r \cdot M \cdot L^2}{\lambda} = idem$$

Із рівняння (1.13) одержимо:

$$C_{\alpha} C_t = \frac{C_{\lambda} C_t}{C_L}; \quad \frac{C_{\alpha} C_L}{C_{\lambda}} = 1; \quad \text{Nu} = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} = idem$$

Із рівняння (1.14) отримаємо:

$$C_{\rho_M - \rho_\Gamma} C_g \cdot C_L^2 = C_L^2 \cdot C_{\rho_\Gamma} C_W^2; \quad \frac{C_{\rho_M - \rho_\Gamma} C_g \cdot C_L}{C_{\rho_\Gamma} C_W^2} = idem$$

Цей критерій можна виразити в наступному вигляді через комбінацію його з критерієм Re^2 :

$$\frac{C_{\rho_M - \rho_\Gamma} C_g \cdot C_L}{C_{\rho_\Gamma} C_W^2} \cdot \frac{C_w^2}{C_v^2} = \frac{C_{\rho_M - \rho_\Gamma} C_g \cdot C_L}{C_{\rho_\Gamma} C_W^2} = 1$$

$$Ar = \frac{gL^3(\rho_M - \rho_\Gamma)}{v^2 \rho_\Gamma} = idem$$

Таким чином використавши метод теорії подібності, було отримано із системи диференціальних рівнянь наступні критерії подібності: Re , Pr , Ki , Nu , Ar .

Усі отримані критерії, крім критерія подібності Ki , достатньо обґрунтовані і визначаються безпосередньо величинами, які входять в даний комплекс. Комплекс Ki представляє собою новий критерій, який отримав наближений математичний висновок тільки на основі теорії об'ємного випаровування. Критерій Ki характеризує розгалуження загального кондуктивного потоку тепла, яке іде на об'ємне випаровування субмікроскопічних частинок і на випаровування вологи з поверхні.

$$Ki = \frac{rML^2}{\lambda \cdot t} \quad (1.15)$$

В комплексі Ki величина M представляють собою масу субмікроскопічних частинок в одиниці об'єму, яка виноситься в одиницю часу з поверхні тіла. Все тепло, яке подається до субмікроскопічним частинкам, передається теплопровідністю через прилеглий шар біля цих частинок δ . Тоді кількість переданого тепла до одиниці поверхні частинок рідини буде дорівнювати:

$$q_r = \frac{\lambda}{\delta} (T_{\text{я}} - T_{\text{м}}) \quad (1.16)$$

При цьому частинки рідини мають температуру, яка дорівнює температурі мокрого термометра (перший період сушки). $T_{\text{я}}$ - температура ядра турбулентного потоку. Ця кількість тепла іде на випаровування:

$$q_r = rM\delta \quad (1.17)$$

Прирівнюючи вирази (1.16) і (1.17), вони будуть мати вигляд:

$$rM\delta = \frac{\lambda}{\delta} (T_{\text{я}} - T_{\text{м}}) \quad (1.18)$$

Підставивши вираз (1.18) у вираз (1.15), вираз має вигляд:

$$Ki = \frac{\lambda}{\delta^2} \frac{c_{я-T_M} \tilde{L}^2}{\lambda T_{я}} \quad (1.19)$$

При цьому приймається, що у (1.15) $t = T_{я} \text{ const}$, де y – напрямлення, перпендикулярно до поверхні тіла. При обтіканні кульки в якості характерного розміру L застосовується завжди діаметр частинок d (діаметр інертного тіла).

Розмір субмікроскопічних частинок в пограничному шарі в першу чергу залежить від структури (розміру пор) висушеного тіла і від фізичних властивостей рідини.

У випадку сушіння післяспиртової барди на гарячих інертних тілах розміри пор в плівці матеріалу, через які продувається пар і субмікроскопічні частинки рідини, визначається градієнтом тиску в середині плівки, яка являється функцією переданої кількості тепла.

Із обзору літературних джерел відомо, що коефіцієнт тепловіддачі α пропорційний діаметру частинок d , тобто з ростом d збільшується при однакових умовах кількість переданого тепла від повітряного потоку до вільним від вологого матеріалу інертним тілам. Внаслідок цього зростає кількість утвореного пара в плівці, і загальний градієнт тиску, визиваючий пропорційно - дотичне напрямлення в порах щільно – пластичної плівки вологого матеріала. Дотичні напруги в плівці орієнтує тверді частинки з утворенням пор, розміри яких пропорційні інтенсивності випаровування вологи в середині плівки і залежать тільки від діаметра інертних тіл d . Розміри пор визначають розміри субмікроскопічних частинок, які випаровуються в пограничному шарі.

Таким чином, діаметр інертного тіла і розміри субмікроскопічних частинок зв'язані між собою для даного процесу $\mathcal{C} = d \sim \delta_1 \sim \delta_2$, і в якості характерного розміру може бути прийнятий діаметр інертного тіла. Тоді із формули (2.19) отримуємо:

$$Ki = \frac{\lambda}{d^2} \frac{\mathcal{C} \sim d^2}{\lambda T_{\text{я}}} = \frac{T_{\text{я}} - T_{\text{м}}}{T_{\text{я}}} = Cu \quad (1.20)$$

Відповідно, критерій Гухмана являється параметричним критерієм і представляє собою початковий (максимальний) відносний потенціал сушіння. В ньому відражається вплив всієї сукупності ефектів, які обумовлені пароутворенням і інтенсифікуючих теплообмін. Критерій Гухмана враховує в інтегральному вигляді вплив масообміну на теплообмін в процесі сушіння.

До числа отриманих критеріїв доцільно додати симплекс $\frac{H_0}{d}$, який враховує в деякому ступені вплив геометрії у фонтануючому шарі.

Процес сушіння післяспиртової барди на інертних тілах у фонтануючому шарі з врахуванням подрібнення і стирання матеріала з поверхні інертних тіл характеризуються наступними критеріями і симплексами подібності і безрозмірним фактором, який визначає в першому приближенні стирання і подрібнення частинок:

$$\varphi_1 \left(Nu, Ar, Re, Pr, Gu, \frac{H_0}{d} \right) = 0 \quad (1.21)$$

Так як критерій $Pr \approx const$ для повітря при порівняно невеликій зміні температури повітря, то він заїде в коефіцієнт рівняння і тоді матиме вигляд:

$$\varphi_2 \left(Nu, Ar, Re, Pr, Gu, \frac{H_0}{d} \right) = 0 \quad (1.21)$$

Константа рівняння і показники ступеня повинні бути знайдені експериментально.

Висновок до розділу: таким чином, процес сушіння післяспиртової барди описується системою рівнянь (1.1), (1.2), (1.3), (1.4), (1.5), (1.6).

2. МЕХАНІЗМ ПИЛОВЛОВЛЕННЯ СУХОЇ ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ

В технологічному процесі сушіння післяспиртової барди постає необхідність уловлення готового продукту пиловловлювачами. Пиловловлювання – відповідальна операція, вихід готового продукту в кінцевому результаті залежить від ефективності виділення дисперсних частинок із газів.

Найбільш розповсюджене центробіжне пиловловлювання – циклони. Вони прості у використанні і експлуатації, забезпечують високу ефективність уловлення частинок більше 10 мкм.

2.1. Фракційна ефективність конічних циклонних пиловловлювачів

Конічні циклони мають найбільш високі показники ефективності пиловловлення із всіх відцентрових пиловловлювачів. Розрахунки ефективності уловлення пилу в конічних апаратах ґрунтуються на спрощених математичних модулях структури потоків.

В роботі одержані залежності розрахунку ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП) на основі модулів структури потоків конічних апаратів одержаних в сферичній системі координат. Однак вони не можуть бути використані для розрахунку циклонів, так як подача запиленого газу тільки по одному, верхньому каналі, призводить до зміни структури потоку в усьому об'ємі апарату і ускладнює математичні моделі розрахунку ефективності.

Для поставленої мети, ми використовували метод для розрахунку ефективності циклонних протиточних конічних апаратів.

В конічних циклонах, як і в (АЗЗП) утворюється два окремих потоки, які зміщуються в середній частині по конічній поверхні з кутом нахилу θ_* .

Вхідний потік L_3 , як єдиний потік, поступаючи через тангенціальний завихрювач у верхній частині апарата, розділяється на периферійний вихор, який рухається після повороту в нижній частині, вверх до вихідної труби. З другого боку обидва потоки обмінюються витратами газу при взаємному обтіканні поверхні розділу. Частина потоку $L_{10}=(1-K\varepsilon)L_3$, приходить до самого низу циклону без відхилення і потім рухається знизу вверх. Друга частина потоку $L_{20}=K\varepsilon \cdot L_3$, проникає через конічну поверхню розділу з кутом θ_* і змішується із центральним вихідним потоком. У вихідній трубі обидва потоки з'єднуються до

$$L_3=L_{10}+L_{20} \quad (2.1)$$

де $K\varepsilon$ - коефіцієнт розподілу потоків.

В даний період неможливо теоретичним шляхом розрахувати кількість проникнення потоку із зовнішнього у внутрішню привісну частину потоку L_{20} . Тому на першому етапі запропоновано обчислювати змішування потоків з використанням напівемпіричних залежностей по найбільш загальній функції.

$$V=A \cdot \exp(-K/R_{\max}) \quad (2.2)$$

Для $K=0$, зовнішній потік змішується з внутрішнім рівномірно, зверху до низу; при $K>0$ зниження до низу становиться більш інтенсивним; при $K<0$ змішування затихає до низу.

Константу A в даному рівнянні розраховують, як параметр змішування потоків:

$$A = \frac{-L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot K_1}{2\pi \sin \theta_* \left[\left(R_{\max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\max} - \left(R_{\min} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\min} \right]}, \quad (2.3)$$

де K параметр змішування потоків; $K\varepsilon = \frac{L}{L_3}$ - параметр роздвоєння потоків;

$$K_1 = \frac{K}{R_{\max}}.$$

На рис.4.2 представленні позначення основних параметрів циклону. На рис.4.3, приведена схема взаємодії потоку і частинок. Для $d < 100 \mu\text{м}$ опір руху частинок характеризується законом Стокса.

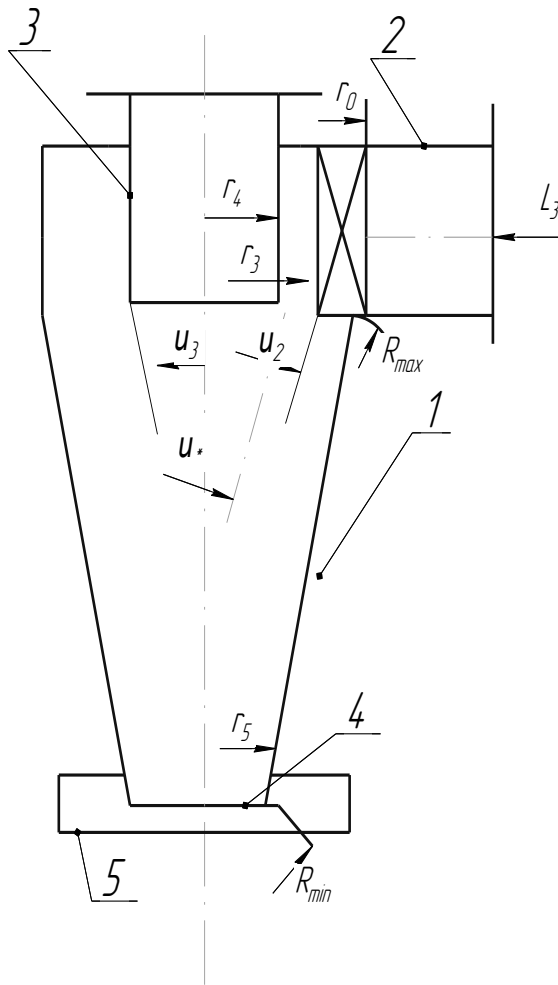


Рис. 2.2. Конічний циклон

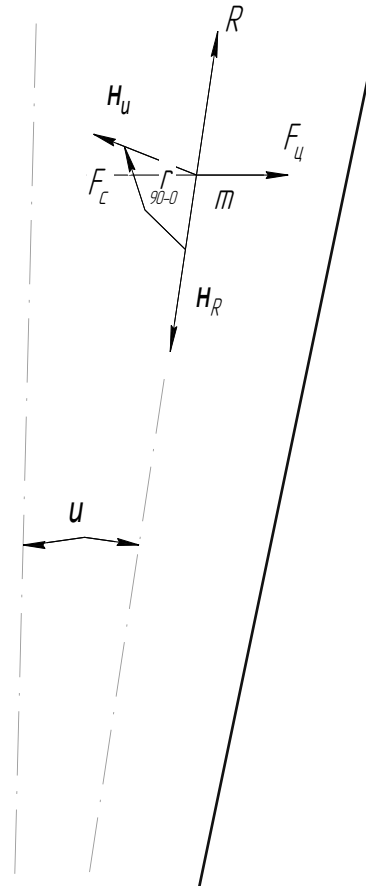


Рис. 2.3. Взаємодія потоку і частинки

- 1. – корпус; 2. – вхідний канал;
- 3. – вихідна труба; 4. – пиловий отвір;
- 5. – бункер.

Загальну швидкість обтікання частинок по напрямку радіусу r можна розкласти на три складових: радіальної швидкості руху частинок dr/dt ; проекції радіальної швидкості газу V_R на радіус r , проекції меридіальної

швидкості V_θ . Для повільного положення частинки з радіусом r можна записати умову рівноваги у вигляді закону Ньютона:

$$m \cdot \frac{v_\phi^2}{r} = 3\pi d\mu \left(\frac{dr}{dt} + v_\theta \cos \theta + v_R \sin \theta \right)$$

Значення складових витрат газу і швидкості одержані в:

$$L_2 R = L_3 + \frac{A_1}{K_1} \left[\left(R_{\max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\max} - \left(R + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R \right]. \quad (2.4)$$

$L_1 R$ ототожнює $L_2 R$ так, як $L_1 R = L_2 R$

$$A_1 = \frac{L_3 K_\varepsilon K_1}{\left[\left(R_{\max} + \frac{1}{K_\varepsilon} \right) \exp -K_1 R_{\max} - \left(R_{\min} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\min} \right]}$$

$$A = \frac{A_1}{2\pi \sin \theta}.$$

$$v_{R2} = -\frac{L_2 R}{S_2 R_2}; \quad v_{R1} = \frac{L_1 R}{S_1 R}$$

$$S_2 = \pi R_{\max}^2 a_2; \quad S_1 = \pi R_{\max}^2 a_1$$

$$a_2 = 2 \cos \theta - \cos \theta_0;$$

$$a_1 = 1 - \cos \theta + \sin^2 \theta.$$

$$S_2 R = \pi R^2 a_2; \quad S_1 = \pi R^2 a_1$$

$$v_{2\theta} = \frac{\cos \theta_0 - \cos \theta}{\sin \theta} \left[\frac{A_1 \exp -K_1 R}{\pi a_2} \right]$$

$$v_{1\theta} = \frac{\cos \theta - 1}{\sin \theta} \left[\frac{A_1 \exp -K_1 R}{\pi a_1} \right]$$

$$v_\phi = \frac{C_o \cdot S_1 \cdot \psi}{2L_3 R \cdot \sin \theta / 2}, \quad C_o = \frac{2M_{\text{вх}} r^2}{\rho L_3 r_4^4}$$

$$\psi_2 = \frac{\cos \theta - \cos \theta_0}{\pi a_2} \left\{ L_3 K_\varepsilon + \frac{A_1}{K_1} \left[\left(R_{\max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\max} - \left(R + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R \right] \right\} + \frac{\cos \theta - \cos \theta_0}{\pi a_2} L_3 K_\varepsilon$$

$$\psi_1 = \frac{1 - \cos \theta}{\pi a_1} \left\{ L_3 + \frac{A_1}{K_1} \left[\left(R_{\max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\max} - \left(R + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R \right] \right\}$$

Де ψ - Функція току.

Значення інших величин рівняння (2.5)

$$m = \frac{1}{6} \pi d^3 \rho; \quad r = R \cdot \sin \theta; \quad \frac{dr}{dt} = \left(\frac{dR}{dt} \right) \sin \theta;$$

$$dt = \frac{dR}{v_R}; \quad v_\theta = R \frac{d\theta}{dt} = R \cdot v_R \frac{d\theta}{dt}$$

Після підстановки в (2.5), інтегрування рівнянь одержані рівняння розрахунку фракційної ефективності.

Зовнішній шар.

$$\eta_{cp2} = \frac{d^2 \rho_\tau \cdot C_o \cdot S_1^2 \cos \theta_{cp1} - \cos \theta_0^2}{18 L_3^2 \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot a_2^2 \sin \theta_0 + \sin \theta_{cp2} \cdot \sin \theta_0 - \sin \theta} \cdot \frac{a}{\epsilon} - K_1 \left[\frac{\exp -K_1 R_{\min}}{R_{\min}} - \frac{\exp -K_1 R_{\max}}{R_{\max}} \right] -$$

$$- \frac{8 \sin^2 \theta_{cp2} \cdot \sin^2 \frac{\theta_{cp2}}{2} \ln R_{\max} - \ln R_{\min}}{\sin \theta_0 + \sin \theta_{cp2} \cdot \sin \theta_0 - \sin \theta} - \frac{2}{3} \frac{\cos \theta_{cp2} - \cos^3 \theta_0}{\sin \theta_0 + \sin \theta_{cp2} \cdot (\ln \theta_0 - \sin \theta)}$$

Звідси:

$$a = \left\{ \frac{L_3 + \frac{A_1}{K_1} \left(R_{\max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\max}}{\left(R_{cp} + \frac{1}{K} \right) \exp -K_1 R_{cp}} - \frac{A_1}{K_1} \right\}^2$$

$$\epsilon = \sqrt{a}; \quad \theta_{cp2} = \frac{\theta_0 + \theta}{2}; \quad R_{cp} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}$$

Внутрішній шар.

$$h_{cp1} = \frac{d^2 \rho_T \cdot C_o \cdot S_1^2 \cdot 1 - \cos \theta_{cp2} \cdot \frac{a}{K_1} \left[\frac{\exp -K_1 R_{min}}{R_{min}} - \frac{\exp -K_1 R_{max}}{R_{max}} \right]}{18L_3^2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot a_1 \sin \theta \cdot \sin \theta + \sin \theta_{cp1}}$$

$$- \frac{8 \sin^2 \theta_{cp1} \cdot \sin^2 \frac{\theta_{cp1}}{2} \ln R_{max} - \ln R_{min}}{\sin \theta \cdot \sin \theta + \sin \theta_{cp1}} - \frac{2}{3} \left[\frac{\cos^3 \theta_{cp1} - \cos^3 \theta_0}{\sin \theta \cdot \sin \theta + \sin \theta_{cp1}} \right]$$

$$a = \left\{ \frac{L_3 + \frac{A_1}{K_1} \left(R_{max} + \frac{1}{K_1} \right) \exp \left(-K_1 R_{max} \right) \cdot A_1}{\left(R_{cp} + \frac{1}{K_1} \right) \exp \left(-K_1 R_{cp} \right) \cdot K_1} \right\}$$

Показники ефективності розраховані для зразку циклона -200, представлені в таблиці 2.1. Геометричні та технологічні параметри роботи циклону:
 $L_3=0,036\text{м}^3/\text{год}$; $\rho_T=1500$ кг/м³; $\rho_r=1,21$ кг/м³; $r_0 = 50$ мм; $r_3=35$ мм; $r_4=30$ мм; $r_5=20$ мм;

$a_2 \times \omega_2 = 90 \times 20$; $H=200$ мм; $R_{min} = 132$ мм; $R_{max} = 335$ мм; $\theta_0 = 9,47^\circ$; $\theta_1 = 6,2^\circ$; $\theta_2 = 6,66^\circ$; $\theta_{cp2} = 7,835^\circ$; $\theta_3 = 5,71^\circ$; $\theta_{cp1} = 3,1^\circ$.

Таблиця 2.1. Показники фракційної ефективності (η_{cp} %) конічного циклону $D=200$ мм

Найменування зони	Діаметр, мкм			
	1	2	3	4
Зовнішній шар	-33,57	+4,92	+69,074	158,88
Внутрішній шар	-72,9	+120,0	-	-

Теоретичні показники фракційної ефективності циклону в цілому нижче ніж АЗЗП. Практика використання теоретичних рівнянь показує, що мають місце значні відхилення від експериментальних і виробничих показників.

2.2. Розрахунок ефективності уловлення післяспиртової барди конічними циклонами

Прогнозування ефективності пиловловлювачів є важливою науково - технічною задачею. В більшості випадків користуються емпіричними методами розрахунку ефективності, які не враховують всі фактори, які впливають на технологічні і геометричні параметри пиловловлювачів, а також на гідродинамічну структуру потоків у сепараційній зоні циклонних апаратів.

При дослідженні ми використовували теоретичний метод розрахунку ефективності циклонів на основі аналізу руху частинок протиточних циклонних уловлювачах з подальшим залученням експериментальних даних науково - дослідного інституту очищення газів, отриманих під час проведення випробувань дослідних зразків спірально – конічних циклонів, які на теперішній час являються самими ефективними апаратами.

Авторами цієї роботи раніше були отримані теоретичні залежності фракційної ефективності конічних циклонів.

При розгляді руху частинок у вихровому потоці конічних циклонів, виникли значні труднощі встановлення теоретичних залежностей в циліндричній системі координат. Так при встановленій структурі потоків конічних апаратів в циліндричній системі координат одержані дуже складні залежності, якими неможливо скористатися для одержання рівнянь фракційної ефективності.

На рис. 2.4 представлена конструктивна схема конічних циклонів з основними геометричними параметрами, використовуючи які були одержані рівняння розрахунку структури потоків в сферичній системі координат.

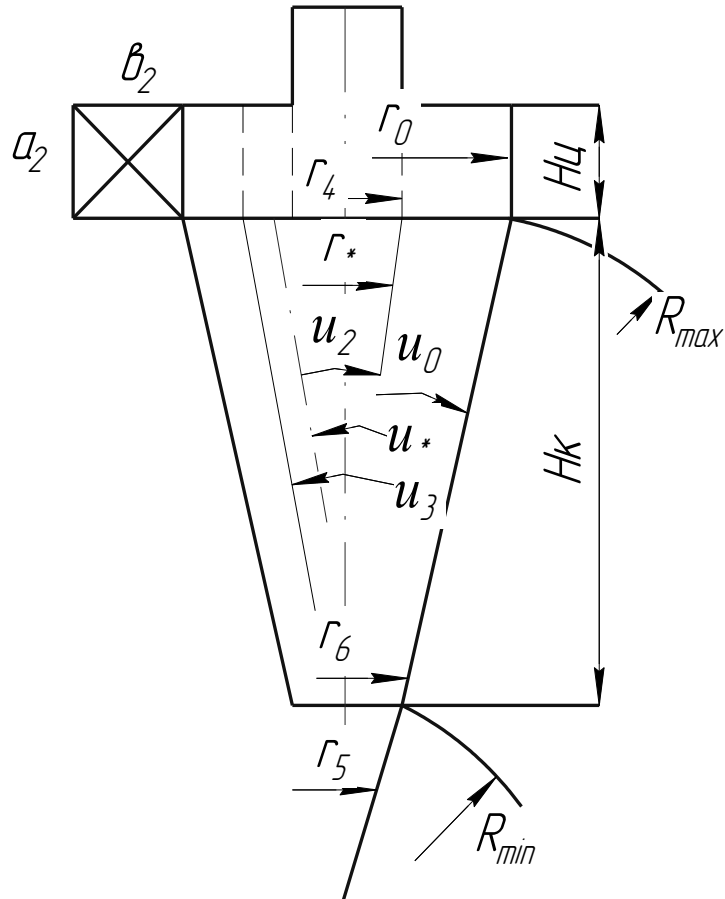


Рис. 2.4. Схема конічного циклону

На їх основі розглянуто рівняння руху частинок у вихровому полі циклона і одержано рівняння розрахунку фракційної ефективності.

$$h_{cp} = \frac{d^2 \cdot \rho_T \cdot C_0^2 \cdot S_1^2 \cos \theta_{cp} - \cos \theta_0^2}{18L \cdot \pi^2 \cdot \mu \cdot a_2^2 \sin \theta_0 + \sin \theta_{cp} \sin \theta_0 - \sin \theta} \cdot \frac{a}{\nu K_1} \left[\frac{\exp -K_1 R_{min}}{R_{min}} - \frac{\exp -K_1 R_{max}}{R_{max}} \right] - \frac{8 \sin^2 \theta_{cp} \cdot \sin^2 \theta_{cp} / 2 \ln R_{max} - \ln_{min}}{\sin \theta_0 + \sin \theta_{cp} \sin \theta_0 - \sin \theta} - \frac{2}{3} \frac{\cos \theta_{cp}^3 - \cos^3 \theta_0}{\sin \theta_0 + \sin \theta_{cp} (\ln \theta_0 - \sin \theta_{cp})}; \quad (2.6)$$

де $C_0 = \frac{2M_{вх}}{\rho_2 \cdot L \cdot r_4^2}$ - кутова швидкість у вихідній трубі $\frac{1}{c}$;

$M_{вх} = \frac{2}{3} \rho_2 v_{вх} L \cdot \frac{r_0^3 - r_3^3}{r_0^2 - r_3^2}$ - вхідний момент кількості газу;

$$v_{\text{вх}} = \frac{L}{a_2 \rho_2} - \text{вхідна швидкість газу; м/с.}$$

L- витрата запиленого газу, м³/с

$$S_1 = \pi R_{\text{max}}^2 \cdot a_3 - \text{площа сфери на виході із циклону; м}^2$$

$a_3 = 1 - \cos \theta \cdot \cos^2 \theta + \sin^2 \theta$ - параметр кута нахилу поверхні розподілу зовнішнього і внутрішнього шару;

$$\theta_{\text{сп}} = \frac{\theta + \theta_0}{2} - \text{кут нахилу положення частинки в середині зовнішнього шару;}$$

μ - в'язкість газу; Па·с

$$a_2 = 2 \cos \theta - \cos \theta_0 - \text{параметр;}$$

$R_{\text{min}}, R_{\text{max}}$ - мінімальний і максимальний радіус сфери на кінцях конусу м;

$$A_1 = - \frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot K_1}{\left[\left(R_{\text{max}} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\text{max}} - \left(R_{\text{min}} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\text{min}} \right]}; \quad (2.7)$$

K_ε - коефіцієнт роздвоєності потоків на зовнішній $L_{10}=L(1-K_\varepsilon)$ та внутрішній $L_{20}=L \cdot K_\varepsilon$.

$K_1 = \frac{K}{R_{\text{max}}}$; K- коефіцієнт змішування потоків; K=0- змішування рівномірне;

K>0- змішування наростає до низу; K<0- змішування затухає при руху вниз;

$$A = \frac{A_1}{2\pi \sin \theta}; - \text{параметр потоку;}$$

$$a = \left\{ \frac{L + \frac{A_1}{K_1} \left(R_{\text{max}} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\text{min}}}{\left(R_{\text{сп}} + \frac{1}{K_1} \right) \exp -K_1 R_{\text{сп}}} \right\}^2; \quad (2.8)$$

$v = \sqrt{a}$; - параметри.

Значення фракційної ефективності розраховувались для спірально-конічних циклонів типу СДК-ЦН-33 та СК-ЦН-34 діаметром циліндричної частини $D_0=300$ мм. Теоретичні показники порівнювались з експериментальними даними випробувань дослідних зразків. Зразки мали такі параметри:

$$r_0 = 150\text{мм}; r_4 = 50\text{мм}; r_5 = 50\text{мм}; a_2 = 160\text{мм};$$

1. Циклон СДК- ЦП-33: $H_k = 900\text{мм}; L=510 \text{ м}^3 / \text{год}; r_3 = 70\text{мм};$

$$R_{\max} = 1358\text{мм}; R_{\min} = 458\text{мм};$$

Розрахунок фракційної ефективності по рівнянню (4.1) дав такі результати: $\eta_{cp} = d^2 \cdot 1,037 \cdot 10^{11} - 0,31$.

Було прийнято $K=12$ - встановлено експериментально.

Експериментальні доні, наведені в роботі мають такі значення:

$$d_1 = 2\text{мкм}; \eta = 63\%; d_2 = 10\text{мкм}; \eta_i = 97,3\%$$

Порівнявши рівняння (2.6) з введеним коефіцієнтом кореляції дає наступне рівняння:

$$h_{cp} = K_1 \cdot d^2 \cdot 1,037 \cdot 10^{10} - 0,31K_2$$

і при порівнянні їх значення дає значення коефіцієнтів кореляції: $K_1=0,0342$; $K_2=1,986$.

2. Циклон СК-ЦП-34. Параметри:

$$r_0 = 150\text{мм}; a_2 = 75\text{мм}; v_2 = 65\text{мм}; H_{\text{ц}} = 155\text{мм};$$

$$H_k = 653\text{мм}; r_4 = 50\text{мм}; r_5 = 34\text{мм}; r_3 = 85\text{мм};$$

$$L=445\text{м}^3 / \text{год}; R_{\max} = 832\text{мм}; R_{\min} = 188\text{мм};$$

Розрахунки ефективності по рівнянню (2.6) дали такі результати:

$$\eta_{cp} = d^2 \cdot 2,53 \cdot 10^{12} - 0,56;$$

із рівняння (2.7) зведенням коефіцієнтів кореляції приводять до рівняння:

$$\eta_{cp} = K_1 d^2 \cdot 2,53 \cdot 10^{12} - 0,56 \quad \text{кг} ;$$

Експериментальні значення наведені в роботі мають такі значення

$$d = 2 \text{ мкм}; \eta_i = 70\%; d=10 \text{ м}; \eta=98\%$$

Порівняння експериментів з теорією дало наступні значення коефіцієнтів кореляції $K_1=0,0015$; $K_2=1,23$.

Запропоновані теоретичні рівняння розрахунку конічних циклонних пилоуловлювачів, які надають можливість враховувати вплив основних технологічних і геометричних параметрів на фракційну ефективність апаратів. Порівнянням залежностей з експериментальними даними дозволяє одержати об'єктивні показники ефективності.

2.3. Поле швидкостей в циліндро -конічних циклонах пиловловлювачів

У процесі сушіння післяспинртової барди знаходить широке застосування процес очищення газу від твердих мілко дисперсних часток. Відділення таких часток від відпрацьованого теплоносія є складним технічним завданням. Одним з поширених методів улавлювання часток є використання відцентрових пиловловлювачів - циклонів, з доочисткою в тканинних фільтрах або мокрих скруберах.

Найбільш ефективним і часто використовуваним являються циліндро-конічні циклони (рис.2. 5).

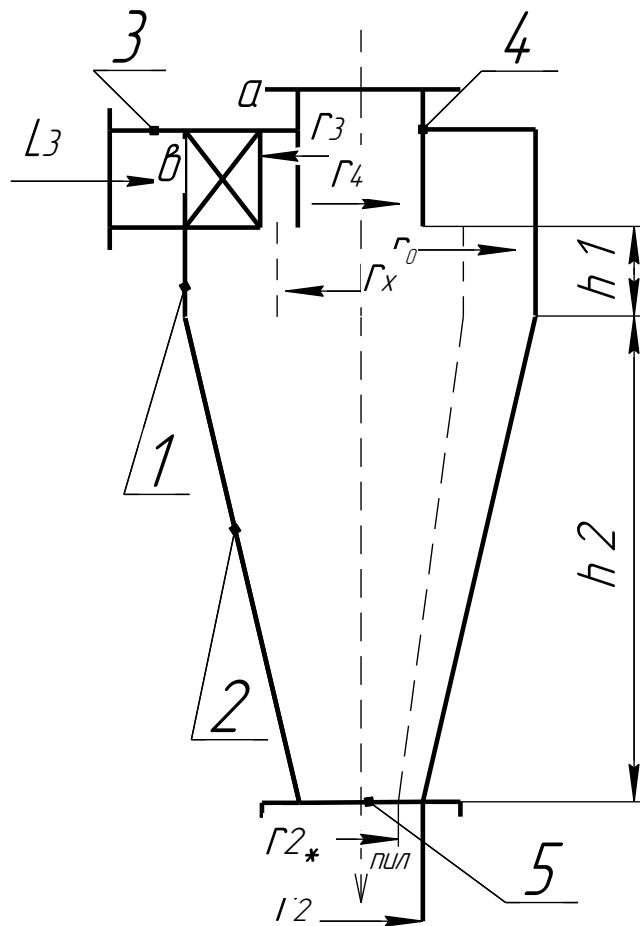


Рис. 2.5. Циліндро- конічний циклон

1 - циліндричний корпус; 2 - конічна частина корпусу; 3 - вхідний патрубок;
4 - вихідний патрубок очищеного газу; 5 - патрубок виходу пилу.

Він забезпечує ефективність очищення 90-95 %. Апарати з циліндричним корпусом найбільш вивчені, але їх ефективність нижче 85-90 %. Циліндро- конічні апарати менш вивчені і не мають строго обґрунтованих методів розрахунку ефективності пиловловлювання, гідравлічного опору і обґрунтованого вибору геометричних параметрів.

Для оптимального проектування циліндро- конічних циклонів в першу чергу потрібна розробка методів розрахунку, що становлять швидкості в зоні сепарації. У інженерній практиці найчастіше використовуються спрощені моделі руху газових потоків зі встановленням межі розподілу їх на дві складових і встановленням межі розподілу між потоками.

Гази з твердими частками рухаються по периферії (зовнішній потік), опускаючись по спіральній траєкторії вниз, потім піднімаються вгору в приосевій зоні (внутрішній потік) і виходять через осьовий вихідний патрубок 4 (рис.2.3). Пил виходить через патрубок в нижній частині корпусу 2 через отвір 5.

Попередніми дослідженнями [76] встановлено, що велика частина потоку, що входить, з об'ємною витратою L_3 опускається до самого нижнього пилового отвору $L_{r0} = L_3(1 - K_\varepsilon)$ з поворотом вгору до вихідного патрубка 4. Інша частина потоку поступово входить у внутрішній шар $L_{r0} = L_3 \cdot K_\varepsilon$. Значення коефіцієнта розподілу потоку складає $K_\varepsilon = 0,25 \div 0,4$.

Позначення основних геометричних параметрів циліндро - конічного циклону приведені на рис. 2.3. Межа розподілу є циліндро - конічна поверхня з радіусом r : r_0 - радіус корпусу; r_2 - радіус пилового отвору; r_3 - радіус входу запиленого потоку; r_4 - радіус вихідного патрубка газової очищеної суміші; r_{ox} ; r_{2x} - радіуси зони розподілу потоків.

Розглянемо циліндричну і конічну частину окремо. Визначимо значення витрат. Конічна частина. Внутрішній шар. $h_2 > z > 0$

$$L_1(Z + \Delta Z) - L_1(Z) = V r_* \cdot \Delta S_{бок} \quad (2.9)$$

$$\Delta S_{бок} = \pi \frac{\Delta Z}{\cos \alpha_*} (2r_{2*} + 2z \cdot \operatorname{tg} \alpha_* + \Delta z \cdot \operatorname{tg} \alpha_*) \quad (2.10)$$

де $L_1(z)$ - витрата внутрішнього потоку $0 < r < r_*$

Останнім складовим в дужках нехтуємо оскільки вираз $\Delta r \cdot \Delta z$ дає величину другого порядку малості. Отримаємо після перетворення:

$$\Delta L_1 z = \frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot \frac{\Delta z}{\cos \alpha_*} \cdot 2r_{2*} + 2z \cdot \operatorname{tg} \cdot \alpha_*}{\left[r_{0*} \cdot h_1 + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \cdot r_{2*} + r_{0*} \right]} \quad (2.11)$$

$$\frac{\Delta L_1}{\Delta Z_1} = \frac{dL_1}{dZ} = \frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot 2r_{2*} + 2z \cdot \operatorname{tg} \cdot \alpha_*}{\left[r_{0*} \cdot h_1 \cdot \cos \alpha_* + h_2 \cdot r_{2*} + r_{0*} \right]} \quad (2.12)$$

Після інтеграції:

$$L_1 Z = \frac{L_3 K_\varepsilon \cdot 2r_{2*} + z^2 \operatorname{tg} \cdot \alpha_*}{\left[r_{0*} \cdot h_1 \cdot \cos \alpha_* + h_2 \cdot r_{2*} + r_{0*} \right]} + C_1 \quad (2.13)$$

Гранична умова: $z=0$; $L_1(Z)=L_3(1 - K_\varepsilon)$

$$C_1 = L_3(1 - K_\varepsilon)$$

$$L_1 Z = L_3 \left\{ \left(-K_\varepsilon \right) + \frac{K_\varepsilon \left(r_{2*} \cdot Z + Z^2 \operatorname{tg} \cdot \alpha_* \right)}{\left[r_{0*} \cdot h_1 \cdot \cos \alpha_* + h_2 \cdot r_{2*} + r_{0*} \right]} \right\} \quad (2.14)$$

Аналогічно отримано:

$$L_2 Z = L_3 \left\{ \left(-K_\varepsilon \right) + \frac{K_\varepsilon \left(r_{2*} \cdot Z + Z^2 \operatorname{tg} \cdot \alpha_* \right)}{\left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \left(r_{2*} + r_{0*} \right) \right]} \right\} \quad (2.15)$$

$L_2(Z)$ - витрата в зовнішньому потоці

Циліндрична частина. Внутрішній шар.

$$H > Z > h_2; H = h_2 + z \quad (2.16)$$

$$L_1(Z + \Delta Z) - L_1(Z) = V_{r^*} \cdot \Delta S_{бок}$$

$$L_1(\varphi) = L_3 + \frac{2L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot r_* (\varphi - H)}{\left[h_0 \cdot Z_{0_*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (\varphi_{2_*} + r_{0_*}) \right]} \quad (2.17)$$

Циліндрична частина. Зовнішній шар

$$L_2(\varphi) = L_3 \left\{ 1 + \frac{2K_\varepsilon \cdot r_* (\varphi - H)}{\left[h_1 \cdot r_{0_*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (\varphi_{2_*} + r_{0_*}) \right]} \right\} \quad (2.18)$$

По значеннях поточної витрати встановлено значення осьових швидкостей. Рівняння радіальних швидкостей газового потоку встановлені з поняття нерозривності потоку. Тангенціальні швидкості газового потоку встановлені з умови збереження кількості руху. При цьому прийнято, що внутрішній шар обертається за законом твердого тіла, а в зовнішньому за законом потенційного обертання.

Розрахункові залежності для розрахунку поля швидкостей приведені в таблиці 4.3.

Назва параметра	Розрахункова залежність	Розмірність
Швидкість у вхідному патрубку	$V_{ax} = \frac{L_3}{ab}$	м/с

Кутлова швидкість у вихідному патрубку	$C_0 = \frac{2M_{ax} \cdot r_*^2}{\rho \cdot r_4 \cdot L_3}$	1/с
Поточне значення кутової швидкості в циліндричній частині	$\omega_1 \varphi = C_0 \cdot \left[\frac{2K_\varepsilon r_{0*} \left(\varphi - h \right) + r_{0*} \cdot h_1 + l_2 \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right)}{z_{0*} \cdot h_1 + l_2 \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right)} \right]$	1/с
Кутлова швидкість в конічній частині	$\omega_1 \varphi = C_0 \cdot \frac{\left(-K_\varepsilon \right) \left[r_{0*} \cdot h_1 + l_2 \cdot \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right] + K_\varepsilon \cdot \left(r_{2*} \cdot z + z^2 \operatorname{tg} \alpha_* \right) r_{0*}^2}{\left(-K_\varepsilon \right) \left[r_{0*} \cdot h_1 + l_2 \cdot \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right] + K_\varepsilon \cdot \left(r_{2*} \cdot H + h^2 \operatorname{tg} \alpha_* \right) r_{2*}^2}$	1/с
Осьові швидкості		
Циліндрична частина	$V_{z_1} = \frac{L_3 \left\{ 1 + \frac{2K_\varepsilon \cdot r_* \left(\varphi - H \right)}{\left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right]} \right\}}{\pi \cdot r_{0*}^2}$	м/с
	$V_{z_2} = \frac{L_3 \left\{ 1 + \frac{2K_\varepsilon \cdot r_{0*} \left(\varphi - H \right)}{\left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right]} \right\}}{\pi \cdot \left(r_0^2 - r_{0*}^2 \right)}$	м/с
Конічна частина	$V_{z_1} = \frac{L_3 \left\{ \left(-K_\varepsilon \right) \left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right] + K_\varepsilon \left(r_{2*} \cdot z + z^2 \operatorname{tg} \alpha_* \right) \right\}}{\pi \cdot r_{z*}^2}$	м/с
	$V_{z_2} = \frac{L_3 \left\{ \left(-K_\varepsilon \right) \left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} \left(\varphi_{2*} + r_{0*} \right) \right] + K_\varepsilon \left(r_{2*} \cdot z + z^2 \operatorname{tg} \alpha_* \right) \right\}}{\pi \cdot \left(r_z^2 - r_{z*}^2 \right)}$	м/с
Радіальна швидкість		

Циліндрична частина	$V_{r_1} = - \frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot r}{\pi \cdot r_{0*} \cdot \left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (r_{2*} + r_{0*}) \right]}$ $V_{r_1} = - \frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot r_*}{\pi \cdot (r_0^2 - r_{0*}^2) r_{0*} \cdot \left[h_1 \cdot r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (r_{2*} + r_{0*}) \right]} \cdot \frac{r^2 - r_0^2}{r^2}$	
Конічна частина	$V_{r_1} = - \frac{\varphi_1}{2} \cdot r$ $V_{r_2} = \frac{\varphi_2}{2} \cdot \frac{r_z^2 - r^2}{r}$	
Тангенціальні швидкості		
Зовнішній шар	$V_{\varphi_2} = \omega_1 \cdot \frac{r_*^2}{r}$	
Внутрішній шар	$V_{\varphi_1} = \omega_1 \cdot r$	

Значення параметра $\varphi_1(z)$:

$$\varphi_1(r) = \frac{\pi (r_{2*} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_*) \cdot \left[\frac{L_3 \cdot K_\varepsilon \cdot (r_{2*} + 2z \cdot \operatorname{tg} \alpha_*)}{h_1 \cdot z_* + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (r_{2*} + r_{0*})} \right]}{\pi^2 (r_{2*} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_*)^2} = \quad (2.19)$$

$$= L_3 \left\{ -K_\varepsilon + \frac{K_\varepsilon (r_{2*} \cdot z + z^2 \operatorname{tg} \alpha_*)}{\left[r_{0*} + \frac{h_2}{\cos \alpha_*} (r_{2*} + r_{0*}) \right]} \right\} 2\pi \operatorname{tg} \alpha_* (r_{2*} + z \cdot \operatorname{tg} \alpha_*)$$

$$\varphi_2(r) = \frac{r_{0*}^2}{r_{0*}^2 - r_{z*}^2} \varphi_1(r) \quad (2.20)$$

Порівняння набутих теоретичних значень швидкостей проведене зі значеннями поля швидкостей класичного циклону Тер-Ліндена, описаного в багатьох джерелах.

Відхилення теоретичних швидкостей від експериментальних даних склало: $V_{\phi} = - 30-40\%$; $V_z=40-55\%$; $V_r=60-80\%$. Значне відхилення V_{ϕ} пов'язане з труднощами її експериментального визначення.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Одержано теоретичне рівняння розрахунку ефективності уловлення частинок пилу в конічних циклонах.
2. Теоретичні рівняння не дають задовільного сходження з експериментами.
3. Введення кореляційних коефіцієнтів приводить до задовільного співпадіння розрахункових даних з експериментальними.
4. Надання рекомендацій по регіональному конструювання пиловловлювачів.
 - 4.1. Найбільш поширеними апаратами, які використовуються в промисловості є циклонні відцентрові пиловловлювачі.
 - 4.2. Використання апаратів із зустрічними закрученими потоками приводить до підвищення продуктивності апаратів.
 - 4.3. Використання конічних апаратів приводить до зростання ефективності за рахунок зниження продуктивності і росту енергетичних втрат.
 - 4.4. Приведені рівняння розрахунку фракційної ефективності відцентрових пиловловлювачів, які мають використані для зрівняння пиловловлювачів.
 - 4.5. для об'єктивного і повного співставлення показників пиловловлювачів необхідно продовжити теоретичні дослідження в напрямку зрівняння по показникам

3. Розробка сушильної установки у псевдозрідженому шарі інертного носія

При сушінні пастоподібних матеріалів у харчовій промисловості широко використовується техніка псевдозрідження шару в якості одного із найбільш ефектних середовищ інтенсифікації процесу сушіння матеріалів.

В роботах Б.С. Сажиним, И.Л. Любошицом, Я. Баранеком було відмічено створення високоінтенсивних сушильних установок, де підвищення інтенсивності тепломасопереноса і активність гідродинамічного режиму досягається при:

- мінімальному опорі руху потоку сушильного агента;
- стабільності гідродинамічної обстановки в часі по всьому об'єму апарата;
- створенні максимально можливої не стаціонарності процесу руху частинки для зменшення товщини ламінарного пограничного підшару, зниження дифузійного опору на поверхні висушуваних частинок і збільшенні швидкості зняття вологи з поверхні матеріалу.

На основі приведеного аналізу літературних даних про конструкції сушарок, які відносяться до даного класу і результатів дослідження процесу сушіння після спиртової барди нами була розроблена і запатентована конструкція установки для сушіння, яка представлена на рис. 3.1.

Установка для сушіння харчових продуктів складається із циліндро-конічної камери 1, в нижній частині якої розташована газорозподільна решітка 2 і мішалка для інтенсифікації руху інертного носія 4. Вхідний патрубок 5 з'єднаний з електрокалорифером 6 для нагріву повітря, яке

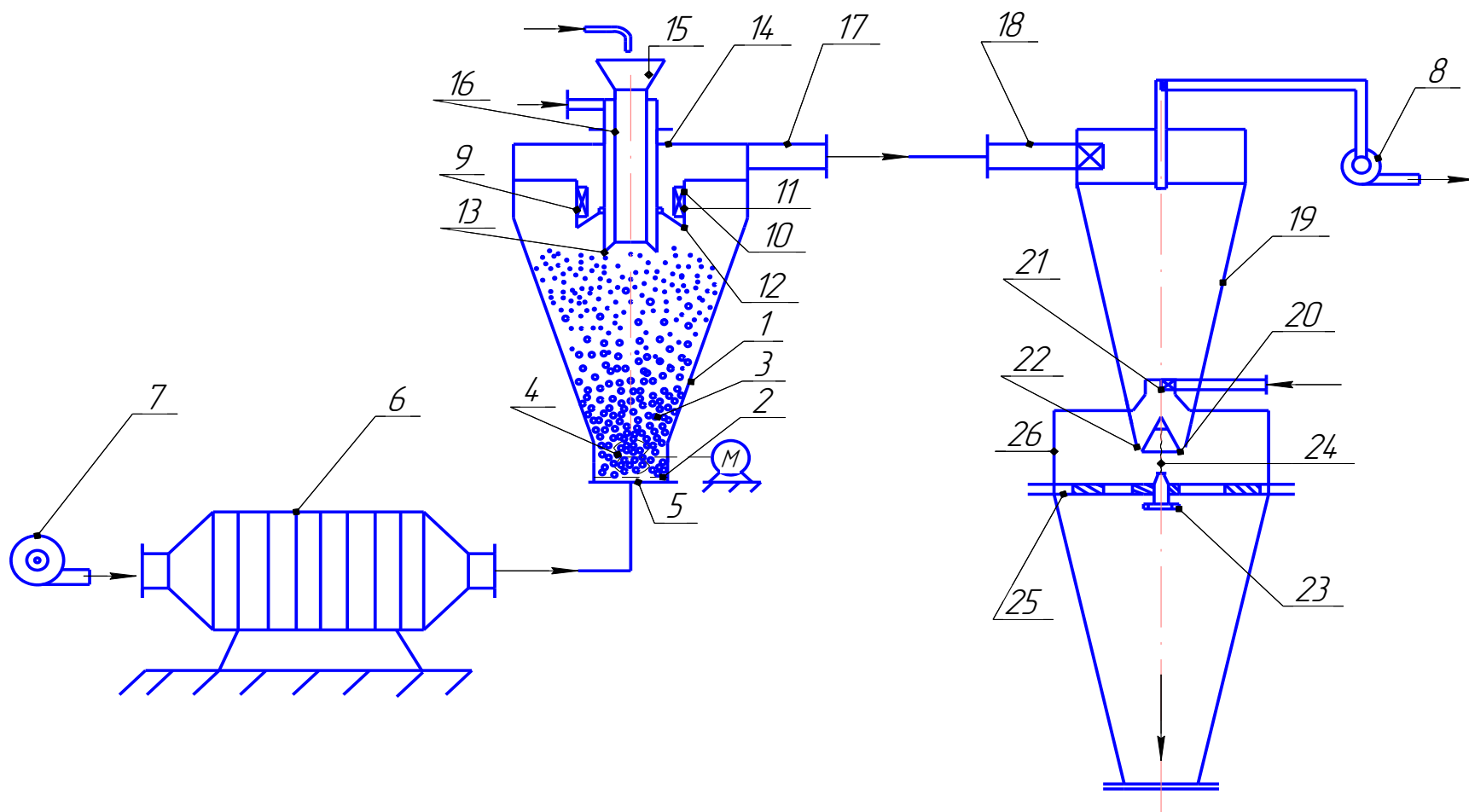


Рис. 3.1. Установа для сушіння:

1 – сушильна камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – електрична лопатева мішалка; 4 – нижня частина камери; 5 – вхідний патрубок; 6 – електрокалорифер; 7 – нагнітальний вентилятор; 8 – вхідний всмоктувальний вентилятор; 9 – уловлювач; 10 – циліндричний стакан; 11 – направляючі пластини; 12 – гайка; 13 – конічний затвір; 14 – різьба корпусу форсунки; 15 – воронка; 16 – внутрішня труба; 17 – вихідний патрубок; 18 – вхідний патрубок; 19 – вихідна труба циклона; 20 – конічний затвір; 21 – циліндро – конічне сопло; 22 – нижній отвір; 23 – гвинт; 24 – пружина; 25 – перфорована пластина; 26 – бункер для зсипання готового продукту.

подається в камеру 1 нагнітальним вентилятором 7 і вихідним всмоктувальним вентилятором 8. В верхній частині камери 1 розташований уловлювач 9 винесених із зони сушіння частинок інертного носія і великих частинок продукту. Він складається із циліндричного стакану 10, в якому розташовані направляючі пластинки 11, які забезпечують закручення відпрацьованого повітря. До циліндричного стакану 10 на гайках 12 примикає конічний затвор 13. Гайка 12 накручується на різьбу корпусу форсунки 14. Через воронку 15 по внутрішній трубі 16 форсунки 14 подається пастоподібний продукт. Вихідний патрубок 17 з'єднаний з вхідним патрубком 18 циклонного пиловловлювача 19. Вихідна труба циклона 19 з'єднана з вентилятором 9, а в нижній частині, де збирається сухий пиловидний матеріал, по осі апарату, розташований конічний затвор 20, а над ним циліндро-конічне сопло 21. Затвор 20 притискається до нижнього отвору 22 в циклоні 19 за допомогою гвинта 23 з пружиною 24. Гвинт 24 розташований на перфорованій пластині 25 бункеру 26, куди осипається готовий продукт.

Установка для сушіння харчових продуктів працює наступним чином.

В сушильну камеру 1, через розподільчу решітку 2 подається нагріте повітря, яке проходить через калорифер 6 де воно нагрівається, за допомогою вентиляторів 7,8. Нагріте повітря переводить інертний носій 3 в стан псевдозрідження, в якому частинки носія 3 інтенсивно рухається одна відносно одної. На частинки носія за допомогою форсунки 14 напиллюється пастоподібний продукт, який обволакує їх у вигляді тонкої плівки. Під дією теплоносія плівка висихає і подрібнюється на дрібнодисперсні частинки продукту. Далі відпрацьоване повітря з продуктом поступає через завихрювачі 11 в стакан 10. Так в полі відцентрових сил відокремлюються від теплоносія великі частинки продукту і інертного носія які накопичуються на конусному затворі 12. Вологий продукт постійно обновлюється в камері 11, поступаючи через трубу 12 і далі напиллюється на частинки інертного носія 3 за допомогою холодного повітря, яке подається тангенційно між трубками 14 і 16 форсунки. Інтенсифікації руху частинок в псевдозрідженому шарі сприяє мішалка 4, яка

розташована над решіткою 4 під штуцером входу 5. Відпрацьоване повітря з частинками повітря має температуру 50-80°C поступає на відділення в пиловловлювач 19. Під дією відцентрових сил частинки продукту зсипається по поверхні конічного корпусу і отвір 23 в бункер 26 готового продукту. Перед входом в бункер нагріті частинки обдуваються холодним повітрям, яке вдувається в нижню частину циклону через сопло 21 з завихрювачем. Закручений потік холодного повітря діє на частинки зверху, охолоджує їх і сприяє їх зсипанню в бункер 26 через отвір 22, який регулюється клапаном 20 за допомогою пружини 24 з гвинтом 23. Продукт у вигляді порошку зберігається в охолодженому стані в бункері 26 і періодично вивантажується через нижню частину (отвір) в приймальну тару.

Запропоноване технічне рішення було перевірене на експериментальному зразку продуктивністю 50-60м³/годину нагрітого повітря до температури на вході 100-150°C і на виході 50-60°C. Об'єм сушильної камери 1,6 л., її діаметр 120мм, висотою корпусу 140мм, циліндра 90мм. Розподільча решітка виконана у вигляді сітки 1x1 мм або решітки діаметром 90 мм або решітки з діаметром отвору 1,2 мм. Діаметр решітки 50 мм. Мішалка виконана у вигляді пропелерів із нержавіючої сталі у вигляді листочків. Пиловловлювач грубої очистки мав діаметр стакану 80 мм з трьома пластинами для закрутки 10x20мм і конічного затвору діаметром внизу 100мм височиною 50мм. Штуцери входу і виходу повітря із камери мали діаметр 50мм. Циклон для уловлення продукту з діаметром циліндричної частини 80мм, конічної 150мм. Діаметр пилового отвору 50мм. Сопло для охолоджувального повітря діаметром 30мм, височиною 20мм з конусним розширенням височиною 30мм діаметром 40мм. Розташоване сопло на висоті 50 мм від пиловипускного отвору.

Таким чином використання установки для сушіння пастоподібних матеріалів дозволяє за рахунок охолодження продукту на вході в бункер і в самому бункері одержати більш якісний продукт, який можна використовувати в сільському господарстві.

ВИСНОВКИ

1. Представлені теоретичні залежності по розрахунку структури потоків у відцентрових пиловловлювачах.
2. На основі розрахунку структури потоків відцентрових пиловловлювачів одержані теоретичні рівняння розрахунку фракційної ефективності апаратів.
3. Теоретичні рівняння були співставлені з експериментально-промисловими дослідями. Одержані коефіцієнти кореляції, які дозволяють проводити розрахунки з високою точністю.
4. Використання апаратів АЗЗП з конічним корпусом не рекомендується із-за їх складності і значними енергетичними і експлуатаційними витратами по їх виготовленню.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Лукачевський Б.П., Джунисбаков М.Ж., Гудим Л.И., Коротченко С.И. Исследования движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками. Журнал (ТОХТ) (теоретические основы химической технологии, Россия), том 19, №5, 1985.-с.687-690.
2. Герасимів В.М., Якуба О.Р., Тимчук С.О. Структура потоку апаратів із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ (м.Суми). Серія "Механізація і автоматизація виробничих процесів" (М і А). Вип.9., 2002.-с.138-138.
3. Таліч Р.В., Якуба О.Р., Галіч В.М. Поле швидкостей в апаратах із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ. С.М.і А., вип.12, 2004.-с.16-20.
4. Якуба О.Р., Таліч Р.В., Калашніков О.М. Удосконалення моделей розрахунку структури потоків в апаратах із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ, С.М.і А., вип.9(15), 2006.-с.48-55.
5. Гудим Л.И. Разработка, исследование и внедрение в промышленность первичной обработки текстильного сырья высокоэффективных систем очистки с вихревыми пылеуловителями. Дисс. докт. техн. наук., Москва. 1992.
6. Якуба О.Р., Калашніков О.М., Фарісей Л.І., Сєдих І.Д., Хрущ Г.О. Структура потоків у протитечному циліндричному циклоні. Вісник СНАУ, С.М.і А., вип.5, 2000.-с.184-188.
7. Якуба О.Р., Савченко М.Ю., Колодка Г.В. Удосконалення рівнянь для розрахунку структури потоків у циліндричних протитечних апаратах. Вісник СНАУ. С.М.і А., вип.11 (14), 2005.-с.124-130.
8. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. –м.: Стройздат, 1981.-с.129.
9. Сажин Б.С., Лукачевский Б.Л., Джунисбаков М.Ж., Гудим Л.И., Коротченко С.И. Исследования движения газа в аппаратах со встречными закрученными потоками. Журнал (ТОХТ) (теоретические основы химической технологии, Россия), том 19, №5, 1985.-с.687-690.

10. Якуба О.Р.,Таліч Р.В.,Калашніков О.М. Удосконалення моделей розрахунку структури потоків в апаратах із зустрічними закрученими потоками.Вісник СНАУ, С.М.і А., вип.9(15), 2006.-с.48-55.
11. Корпн Г.,Корн Т. Справочник по математике. Москва.: Наука, 1984.-с.831.
12. Гудим Л.И. Разработка и исследование систем очистки воздуха в ВУ. Дисс. докт.техн.наук.,Москва,1992.
13. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. –м.: Стройздат, 1981.-с.296.
14. Пирумов А.И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Стройздат СССР. –М.6 1961.-с.124.
15. Ciliberti D.F.,Lancaster B.W. In Improvement of the Simple, Model for rotary flow Cyclones. Alche jornal, Vol.rr., №6, 1976.-p.1150-1152/
17. Ciliberti D.F.,Lancaster B.F. Fine dust collection in a Rotary Flow Cyclone. Chem. Eng. Sci. V.31,№8, 1976.-p.499-506.
18. Якуба О.Р.,Таліч Р.В.,Калашніков О.М. Уточнення залежностей фракційної ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ. С.М.і А.,вип.9 (18), 2006.-с.32-41.
19. Якуба О.Р.,Савченко М.Ю.Рівняння розрахунку фракційної ефективності апаратів із зустрічними закрученими потоками. Вісник СНАУ. С.М.і А.,вип.1 (18), 2008.-с.34-38
20. Якуба О.Р.,Тимчук С.О., Таліч Р.В. Розрахунок ефективності кожевловлювачів очищення газів компресорних станцій. Вісник СНАУ. Серія.М.і А.,вип.10, 2005.-с.277-282.
21. Бронштейн И.Н., Селендяев К.А. Справочник по математике. –М.: Наука, 1980. –с.720.
22. Юхименко М.П.,Якуба А.Р.,Тимчук С.А. Оптимальное проектирование конических циклонных пылеуловителей. Научно-технический журнал "Механіка та машинобудування", №1,том 2, 2003.-с.321-325.

23. Сабадаш С.М., Якуба А.Р. Поле скоростей в цилиндрико-конических циклонах пылоуловителей. Вісник СумДУ. Серія "технічні науки", №1. 2009.-с.73-78.
24. Белоусов А.С. Структура встречных закрученных потоков. Дисс.канд.т.наук. МТИ-М.: 1986.
25. Якуба О.Р. Гідродинаміка та ефективність пиловловлювачів з закрученими потоками. Автореферат дисертації докт.техн.наук. –Київ.:НТУУ КПІ, 1996.-с.38.
26. Сабадаш С.М.,Якуба А.Р. Ефективність конічних циклонів.Збірник наукових праць. Харківський державний університе харчування і торгівлі. Збірник "Прогресивні техніка та технологія харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі". –Харків, 2009.вип.2 (10).-с.269-275.
27. Фукс Н.А..Механіка аерозолей. –М.: изд.АНСССр, -с.349.