

І. В. Севостьянов, д.т.н., професор

Вінницький національний технічний університет

ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ПОТОКУ ВОЛОГОГО ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ ПІД ЧАС ЙОГО ЗНЕВОДНЕННЯ

У даний момент багато уваги приділяється удосконаленню процесів зневоднення вологих дисперсних матеріалів в напрямках підвищення їх продуктивності, зниження енергоємності та забезпечення заданих кінцевих показників матеріалів. Зокрема, актуальною проблемою для харчової та переробної промисловості є підвищення ефективності зневоднення спиртової барди, пивної дробини, буякового жому, кавового шламу та інших подібних відходів, що також відносяться до вологих дисперсних матеріалів і після зневоднення можуть використовуватись як цінні добавки до сільськогосподарських кормів або в якості палива.

За результатами проведених автором розрахунків та експериментів [1], одним з найбільш ефективних способів зневоднення вологих дисперсних матеріалів є їх віброударне пресування на установках з гідроімпульсним приводом, яке забезпечує продуктивність за матеріалом, що зневоднюється 20 – 25 т/год, при енергоємності 2,7 кВт·год/т та кінцевій вологості матеріалу (кавового шламу) – 21% [1]. Але вказаних показників можна досягти при застосуванні віброударного пресування лише на завершальній стадії видалення рідкої фази після попереднього зневоднення матеріалу до вологості $U_n = 60 - 70\%$. У зв'язку із цим, нами для забезпечення вказаних значень U_n пропонується попереднього зневоднення матеріалу з використанням конічного звуження з фільтрувальними отворами та шнекового пресу (рис. 1).

Задачею даного дослідження є одержання залежностей, що описують динамічні процеси у потоку вологого дисперсного матеріалу під час його зневоднення у пропонованій системі (рис. 1), зокрема залежностей для визначення тисків у середовищі матеріалу у перерізах на початку і наприкінці звуження та шнекового преса, а також витрат видаленої рідкої фази матеріалу. Дані залежності можуть у подальшому використовуватись для розробки методики проектного розрахунку обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів. При цьому з врахуванням високої початкової вологості досліджуваних матеріалів (у вказаних вище відходів харчових виробництв вона складає порядку 93 – 95%) їх можна розглядати як Ньютонівські рідини, використовуючи відповідний математичний апарат гідравліки.

У наведеній на рис. 1 схемі оброблюваний матеріал періодично подається по трубі через заслінку 4, відкривання і закривання якої забезпечує гідроциліндр 2, у бункер 5. Поршень гідроциліндра 1 періодично опускається та піднімається, в результаті поршень 3 витискає оброблюваний матеріал у конічне звуження 7. При цьому на початку етапів піднімання поршня 3 втулка 14 з чотирма секторними заслінками 15 (див. розріз А – А на рис. 1) повертається на кут 45° і, таким чином, з'єднує поверхню під поршнем 3 через пази 17 з атмосферою, запобігаючи підніманню разом з поршнем 3 матеріалу, що знаходиться в нижній частині бака 5. У подальшому перед початком кожного наступного етапу опускання поршня 3 втулка 14 повертається у зворотному напрямку, перекриваючи пази 17. Дані повороти втулки 14 забезпечуються неповноповоротним гідродвигуном через зубчасті рейку та вінець 16 втулки 14 (гідродвигун та рейка на схемі не показані). Внаслідок зменшення площі прохідного перерізу звуження 7, тверді частинки матеріалу, який проходить через нього, зближуються та ущільнюються. В результаті рідка фаза витискається з каналів між твердими частинками та з капілярів у самих частинках і витікає через дрібні наскрізні отвори 13 у стінках звуження, закритих з середини фільтрувальною

сіткою, у бак 11. Після проходження через звуження оброблюваний матеріал потрапляє у шнековий прес 8, особливістю якого є конічний корпус, що розширюється від вхідного до вихідного патрубків преса. Останнє сприятиме збереженню високого тиску у середовищі оброблюваного матеріалу, що проходить через прес, оскільки за законом Бернуллі для потоку рідини або газу [2], при збільшенні площі його прохідного перерізу середня швидкість потоку зменшується, але тиск в ньому зростає. Крім цього, нагнітання тиску забезпечується за рахунок зменшення від входу до виходу кроку шнека преса. Все це сприяє подальшому стисканню матеріалу та видаленню з нього вільної та капілярно зв'язаної рідкої фази [3]. По завершенню зневоднення у шнековому пресі матеріал через звуження 9 та гумовотканинний рукав 10 завантажується у прес-форму для здійснення його остаточного зневоднення з використанням способів статичного та віброударного пресування [1].

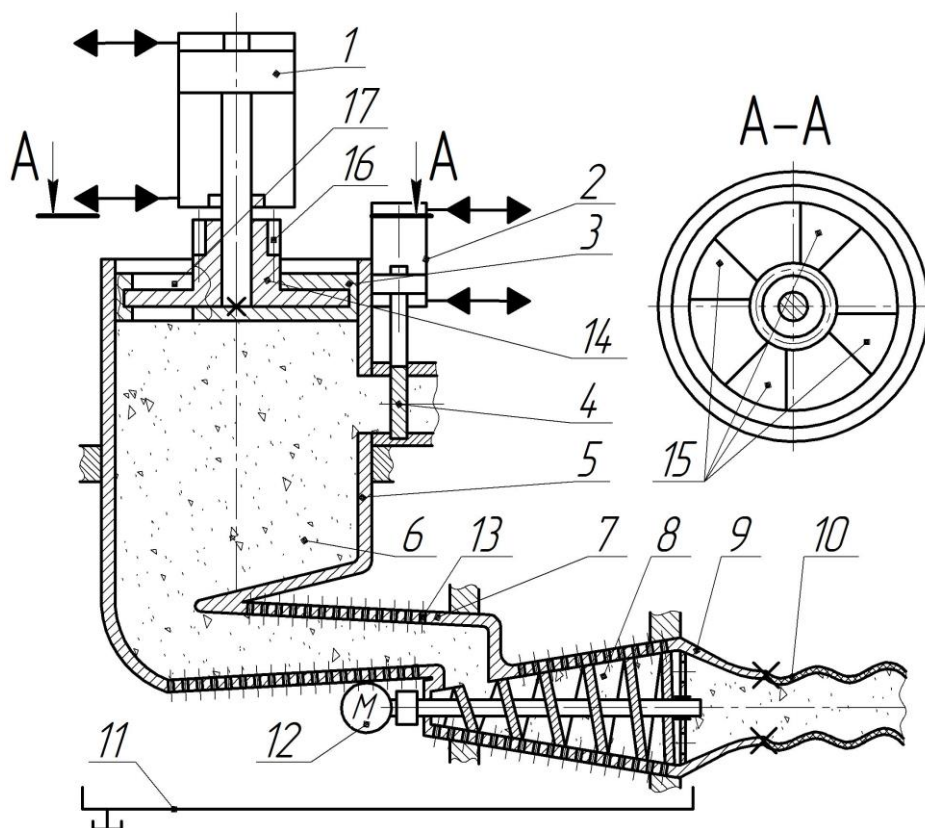


Рисунок 1 – Схема попереднього зневоднення вологих дисперсних матеріалів

Запишемо залежність для визначення тиску $p_{1-l}(t)$ у середовищі оброблюваного матеріалу на вході у звуження 7 у продовж часу t_o опускання поршня 3 з початкового у кінцеве положення

$$\begin{aligned}
 p_{1-l_0}(t) &= p_{1-l_{cm.o}}(t) + p_{1-l_{d.o}}(t) - \Delta p_{звло} - \Delta p_{noslo} = \\
 &= \rho_m \cdot g \cdot h_{\bar{o}.o}(t) + E_m \frac{\Delta W_{\bar{o}.o}(t)}{W_{\bar{o}.n}} - \zeta_{звл} \frac{\rho_m v_{звло}^2}{2} - \zeta_{nosl} \frac{\rho_m v_{noslo}^2}{2}; \quad 0 \leq t \leq t_o, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де $p_{1-l_{cm.o}}(t)$, $p_{1-l_{d.o}}(t)$ – статична та динамічна складові тиску; $\Delta p_{звло}$, Δp_{noslo} – втрати тиску у середовищі матеріалу при його проходженні звуження на виході з баку та повороту русла на вході у звуження 7 [3]; ρ_m – густина матеріалу; g – прискорення сили тяжіння; $h_{\bar{o}.o}(t)$ – змінна висота стовпа матеріалу у баку при опусканні поршня; E_m – модуль об'ємної пружності матеріалу [1, 3]; $W_{\bar{o}.o}(t)$ – зміна об'єму матеріалу, обумовлена опусканням

поршня та його стисканням; $W_{\delta,n}$ – початковий об’єм матеріалу у баку 5 до початку опускання поршня; $\zeta_{3\delta 1}$, $\zeta_{no\delta 1}$ – коефіцієнти місцевих опорів звуження та на повороті русла; $v_{3\delta 1o}$, $v_{no\delta 1o}$ – середня швидкість потоку матеріалу у звуженні та на повороті русла, які можна виразити за допомогою рівнянь витрат через швидкість $v_{2,o}$ опускання поршня гідроциліндра 1. Час t_o можна знайти як відношення

$$t_o = \frac{l_2}{v_{2,o}},$$

де l_2 – довжина ходу поршня гідроциліндра 1.

В свою чергу $v_{2,o}$ можна розрахувати, виходячи з номінальної подачі насоса Q_{H1} та ефективної площі $S_{u,2}$ поршня гідроциліндра 1 з боку штокової порожнини

$$v_{2,o} = \frac{Q_{H1}}{S_{u,2}}.$$

З врахуванням вищевикладеного рівняння (1) перепишеться у вигляді

$$\begin{aligned} p_{1-1o}(t) &= \rho_M \cdot g \cdot v_{2,o}t + E_M \frac{S_{\delta} v_{2,o}t}{W_{\delta,n}} - \zeta_{3\delta 1} \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,o})^2}{2 \cdot S_{3\delta 1}^2} - \zeta_{no\delta 1} \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,o})^2}{2 \cdot S_{no\delta 1}^2} = \\ &= v_{2,o}t \cdot \left(\rho_M \cdot g + E_M \frac{S_{\delta}}{W_{\delta,n}} \right) - \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,o})^2}{2} \left(\frac{\zeta_{3\delta 1}}{S_{3\delta 1}^2} - \frac{\zeta_{no\delta 1}}{S_{no\delta 1}^2} \right); \end{aligned} \quad 0 \leq t \leq t_o, \quad (2)$$

де S_{δ} , $S_{3\delta 1}$, $S_{no\delta 1}$ – площі поперечного перерізу бака, звуження на виході з баку та повороту русла.

Для етапів піднімання поршня 3 за відсутності впливу на матеріал у звуженні 7 динамічної складової тиску $p_{1-1n}(t)$ (див. формулу 1) залежність 2 зміниться до вигляду

$$\begin{aligned} p_{1-1n}(t) &= \rho_M \cdot g \cdot v_{2,n}t - \zeta_{3\delta 1} \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,n})^2}{2 \cdot S_{3\delta 1}^2} - \zeta_{no\delta 1} \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,n})^2}{2 \cdot S_{no\delta 1}^2} = \\ &= v_{2,n}t \cdot \rho_M \cdot g - \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,n})^2}{2} \left(\frac{\zeta_{3\delta 1}}{S_{3\delta 1}^2} - \frac{\zeta_{no\delta 1}}{S_{no\delta 1}^2} \right); \end{aligned} \quad t_o < t \leq t_n, \quad (3)$$

де час t_n та швидкість $v_{2,n}$ повернення поршня 3 можна визначити за формулами

$$t_n = \frac{l_2}{v_{2,n}}; \quad v_{2,n} = \frac{Q_{H1}}{S_{n,2}}, \quad (4)$$

де $S_{n,2}$ – площа поршня гідроциліндра 1 з боку поршневої порожнини.

Рівняння для визначення тиску у середовищі оброблюваного матеріалу на виході зі звуження на етапах піднімання та опускання поршня 3 можна подати як

$$p_{2-2o}(t) = p_{1-1o}(t) - \zeta_{3\delta 2} \frac{\rho_M (S_{\delta} v_{2,o})^2}{2 \cdot S_{3\delta 2}^2}; \quad 0 \leq t \leq t_o; \quad (5)$$

$$p_{2-2n}(t) = p_{1-1n}(t) - \zeta_{362} \frac{\rho_m (S_{\delta} v_{z,n})^2}{2 \cdot S_{362}^2}; \quad t_o < t \leq t_n,$$

де S_{362} – площа кінцевого поперечного перерізу звуження; ζ_{362} – коефіцієнт його місцевого опору.

Зміну тиску $p_{3-3o}(t)$, $p_{3-3n}(t)$ у середовищі оброблюваного матеріалу у перерізі на виході з шнекового пресу на етапах піднімання та опускання поршня 3, з врахуванням підвищення тиску за довжиною циліндра преса [4] визначаємо як

$$\begin{aligned} p_{3-3o}(t) &= \frac{e^{A l_{uu}}}{\rho_m \cdot g} \left(p_{2-2o}(t) - \zeta_{no62} \frac{v_{no62o}^2}{2} \rho_m \right) + \frac{v_{uu,n,o}^2}{2 \cdot g} - \frac{v_{uu,\kappa}^2}{2 \cdot g} - \zeta_{poz} \frac{v_{uu,\kappa}^2}{2} \rho_m = \\ &= \frac{e^{A l_{uu}}}{\rho_m \cdot g} \left(p_{2-2o}(t) - \zeta_{no62} \frac{(S_{\delta} v_{z,o})^2}{2 \cdot S_{no62}^2} \rho_m \right) + \frac{(S_{\delta} v_{z,o})^2}{2 \cdot g \cdot S_{uu,n}^2} - \frac{(n_{uu} t_{uu,n} k_{\kappa,\delta} l_{uu})^2}{2 \cdot g} - \zeta_{poz} \frac{(n_{uu} t_{uu,n} k_{\kappa,\delta} l_{uu})^2}{2} \rho_m = \\ &= \frac{e^{A l_{uu}}}{\rho_m \cdot g} \left(p_{2-2o}(t) - \zeta_{no62} \frac{(S_{\delta} v_{z,o})^2}{2 \cdot S_{no62}^2} \rho_m \right) + \frac{(S_{\delta} v_{z,o})^2}{2 \cdot g \cdot S_{uu,n}^2} - \frac{(n_{uu} t_{uu,n} k_{\kappa,\delta} l_{uu})^2}{2} \left[\frac{1}{g} + \zeta_{poz} \rho_m \right]; \quad (6) \end{aligned}$$

$$0 \leq t \leq t_o;$$

$$p_{3-3n}(t) = \frac{e^{A l_{uu}}}{\rho_m \cdot g} \left(p_{2-2n}(t) - \zeta_{no62} \frac{(S_{\delta} v_{z,n})^2}{2 \cdot S_{no62}^2} \rho_m \right) + \frac{(S_{\delta} v_{z,n})^2}{2 \cdot g \cdot S_{uu,n}^2} - \frac{(n_{uu} t_{uu,n} k_{\kappa,\delta} l_{uu})^2}{2} \left[\frac{1}{g} + \zeta_{poz} \rho_m \right]; \quad (7)$$

$$t_o < t \leq t_n,$$

де A – постійний коефіцієнт [4]; l_{uu} – довжина внутрішньої порожнини циліндра шнекового преса 8; ζ_{no62} , ζ_{poz} – коефіцієнти місцевих опорів повороту русла на вході у шнековий прес та при розширенні потоку в середині преса; v_{no62} , $v_{uu,n}$, $v_{uu,\kappa}$ – середні швидкості потоку відходів на повороті русла, у початковому та кінцевому перерізах шнекового преса; S_{no62} , $S_{uu,n}$ – площа поперечного перерізу повороту русла та площа початкового поперечного перерізу шнекового преса; n_{uu} – номінальна частота обертання шнека 8; $t_{uu,n}$ – початковий крок шнека; $k_{\kappa,\delta}$ – коефіцієнт зміни кроку шнека за довжиною.

Витрати при витіканні рідкої фази відходів з отворів звуження 7 на етапах опускання – $Q_{36,o}(t)$ та піднімання – $Q_{36,n}(t)$ поршня 3 визначаємо з врахуванням того, що основний опір цьому витіканню створюють тверді частинки оброблюваного матеріалу. При цьому частина рідини видаляється за рахунок перепаду тиску, створюваного поршнем 3 та стовпом матеріалу у баку 5, а інша частина – завдяки зменшенню займаного матеріалом об'єму у звуженні 7. Таким чином, можна записати

$$\begin{aligned} Q_{36,o}(t) &= \mu_{m,cl} S_{36}^2 \sqrt{\frac{2[(p_{1-1o}(t) - p_{2-2o}(t))l / l_{362} - p_a]}{\rho_m}} + \\ &+ \frac{(\pi \cdot l_{362} (r_{no6l}^2 + r_{no6l} r_{362} + r_{362}^2) / 3 - S_{362} l_{362})}{l^2 \pi \cdot (r_{no6l} - r_{362})^2 / S_{\delta} v_{z,o} l_{362}}; \quad 0 \leq t \leq t_o; \quad 0 \leq l \leq l_{362}, \quad (8) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{36,n}(t) &= \mu_{m,cl} S_{36}^2 \sqrt{\frac{2[(p_{1-1n}(t) - p_{2-2n}(t))l / l_{362} - p_a]}{\rho_m}} + \\ &+ \frac{(\pi \cdot l_{362} (r_{no6l}^2 + r_{no6l} r_{362} + r_{362}^2) / 3 - S_{362} l_{362})}{l^2 \pi \cdot (r_{no6l} - r_{362})^2 / S_{\delta} v_{z,n} l_{362}}; \quad 0 \leq l \leq l_{362}, \quad t_o < t \leq t_n, \end{aligned}$$

де $\mu_{m.c1}$ – питомий коефіцієнт витрат для одиниці площі шару оброблюваного матеріалу, що знаходиться у середньому за довжиною перерізі звуження й товщина якого складає половину суми вхідного - r_{nov1} та вихідного - r_{362} перерізів звуження (може бути визначений експериментально при пропусканні через зразок даного шару відходів рідкої фази, з використанням датчиків витрат та тиску); S_{36} – площа поверхні звуження; l , l_{362} – поточна та максимальна довжина звуження; p_a – атмосферний тиск.

Витрати рідкої фази оброблюваного матеріалу, що витікає з циліндру шнекового для етапів опускання та піднімання поршня 3 визначаємо за формулами

$$Q_{u.o}(t) = \mu_{e.c2} S_{u.n}^2 \sqrt{\frac{2[(p_{3-3o}(t) + p_{2-2o}(t))l / l_u - p_a]}{\rho_m}}; 0 \leq t \leq t_o; 0 \leq l \leq l_u; \quad (9)$$

$$Q_{u.n}(t) = \mu_{e.c2} S_{u.n}^2 \sqrt{\frac{2[(p_{3-3n}(t) + p_{2-2n}(t))l / l_u - p_a]}{\rho_m}}; t_o < t \leq t_n, 0 \leq l \leq l_u,$$

де $\mu_{m.c2}$ – питомий коефіцієнт витрат для одиниці площі шару оброблюваного матеріалу, що знаходиться у середньому за довжиною перерізі корпусу шнекового преса (також може бути визначений експериментально); $S_{u.n}$ – площа поверхні корпусу шнекового преса.

Висновки

1. У виконаному дослідженні запропонована схема попереднього зневоднення вологих дисперсних матеріалів перед остаточним видаленням з них рідкої фази способами статичного та віброударного пресування.

2. У розробленій схемі пропонується послідовно стискати оброблюваний матеріал у кінцічному звуженні та у шнековому пресі, що дозволить з мінімальними витратами енергії та часу видалити значну частину вільної та капілярно зв'язаної рідини, а також сприятиме підвищенню ефективності остаточного зневоднення.

3. Запропоновані залежності, що описують динамічні процеси у середовищі оброблюваного матеріалу на етапах його попереднього зневоднення, за допомогою яких можна визначити перепади тисків у різних перерізах схеми зневоднення та витрати видаленої рідкої фази.

4. Вказані залежності та рівняння можуть послужити основою для створення у подальшому методики проектного розрахунку високоефективного обладнання для зневоднення вологих дисперсних матеріалів.

Література

1. Севостьянов И. В. Процессы и оборудование для виброударного разделения пищевых отходов [Текст]: монографія / И. В. Севостьянов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 417 с.

2. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы [Текст] / Т. М. Башта, Б. Б. Некрасов. – М. : Машиностроение, 1982. – 423 с.

3. Ребиндер П. А. Физико-химические основы пищевых производств / П. А. Ребиндер. – М. : Химия, 1952. – 320 с.

4. Соколов В. И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств / В. И. Соколов. – М. : Машиностроение, 1983. – 447 с.