

Гідравлічна сепарація в пристроях для відмивання насіння ґрунтується на відмінності об'ємних мас кондиційного насіння та інших рослинних і органічних складових попередньо переробленої робочої маси. Застосування такого способу як правило відбувається у машинах, які мають форму циліндричної ємності, а тверді частинки, знаходячись у потоці, що обертається, піддаються дії відцентрової сили. При цьому частинки більшої маси (як правило це кондиційне насіння) переносяться до периферії, а частинки меншої об'ємної маси (часточки кірки, м'якоті, некондиційне насіння, та інші включення) збираються в центральній частині, підіймаються і видаляються з робочого рідкого середовища.

Як правило, гідравлічний спосіб застосовують на фінальній стадії технологічного процесу – відмивання насіння, інтенсифікацію якого можна одержати шляхом поєднання гідравлічного і пневматичного інструментів впливу на процес доробки. Завдяки такому підходу змінюються властивості робочого рідкого середовища, адже воно насичується повітрям, що перетворює характер його динаміки, на газорідинне середовище. Робочі органи, що реалізують пневматичний спосіб доробки забезпечують інтенсивне тертя шарів рідини за допомогою барботації, що дає можливість прискорити розмивання слизу і желатиноподібної плівки до стану клітковини і соку та забезпечити високу якість.

Дослідження процесів, що протікають в такому складному рідкому середовищі включають в себе процеси барботації, кавітації та флотації, які мають вирішальний вплив на якісні показники роботи технологічного обладнання. Власне барботування, містить у собі три стадії: утворення бульбашок барботерами, спливання бульбашок, механічне перемішування рідини і складових, що знаходяться в ній.

Завданням даного наукового повідомлення є розгляд аналітичної моделі впливу окремих (гідравлічної і пневматичної) складових процесу на відмивання насіння від складових технологічної насінневої маси під час її гідропневматичної обробки.

На першому етапі рідке середовище з різними включеннями вважаємо умовно однорідною, в'язкою, нестискуваною рідиною. Як було відзначено раніше, рух такого середовища у загальному вигляді описується системою рівнянь Нав'є-Стокса, яка в циліндричній системі координат (r, z, φ) має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u^2}{r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - \frac{2\partial v}{r^2 \partial \varphi} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]; \\ \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial V}{\partial \varphi} + \frac{uV}{r} + w \frac{\partial V}{\partial z} &= F_\varphi - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \nu \left[\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right]; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v}{r} \frac{\partial w}{\partial \varphi} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

де u, V, w – відповідно радіальна, окружна і осьова швидкості; ν – кінематична в'язкість; ρ – густина рідини; F_r, F_φ, F_z – проекції масових сил на осі координат; t – час; p – тиск.

До системи рівнянь руху (1) додаємо рівняння нерозривності для нестискуваної рідини

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Розглядаємо область руху рідкого середовища нижче живлячих трубок і вище живлячих трубок, які вмонтовані в стінку ємності циліндричної форми. У нижній області рух рідини змінюється вздовж вертикальної осі z і при $z = 0$ вважаємо, що середовище знаходиться у спокої. У верхній області вважаємо, що середовище рухається з однаковою осьовою швидкістю вздовж координати z .

Через сталий режим руху маси рідини в нижній області похідні за часом рівні нулю ($\partial/\partial t = 0$). Враховуючи циліндричну (осесиметричну) форму камери очищення вважаємо, що похідні по координаті (куту) φ і масові сили рівні нулю. Далі, через малість, нехтуємо осьовим і радіальним рухом рідини. В результаті прийнятих допущень система рівнянь (1), (2) приймає вигляд:

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} - \frac{V}{r^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

де r – радіальна координата ($R_1 \leq r \leq R_2$); z – осьова координата направлена вгору, на якій точка 0 розташована в центрі кола (днища сепаратора) ($0 \leq z \leq H$).

Розв'язання рівняння (3) шукаємо методом розділення змінних, вважаючи

$$V(r, z) = V_1(r) \cdot V_2(z). \quad (4)$$

Підставляючи (4) в рівняння (3) і розділяючи змінні отримаємо

$$\left[\frac{\partial^2 V_1(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_1(r)}{\partial r} - \frac{V_1(r)}{r^2} \right] \frac{1}{V_1(r)} = - \frac{\partial^2 V_2(z)}{\partial z^2} \cdot \frac{1}{V_2(z)} = -\lambda^2 \quad (5)$$

де λ – стала величина.

Після ряду перетворень рівняння (5) отримаємо

$$\frac{\partial^2 V_1(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_1(r)}{\partial r} + V_1(r) \left[\lambda^2 - \frac{1}{r^2} \right] = 0 \quad (6)$$

Рішенням цього рівняння, згідно [2] буде

$$V_1(r) = C_1 J_1(\lambda r) + C_2 Y_1(\lambda r), \quad (7)$$

де $J_1(\lambda r)$, $Y_1(\lambda r)$ – функції Бесселя; C_1 , C_2 – постійні інтегрування.

Відповідно, рішенням крайової задачі (3) – (7) вважатиме

$$V_1(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} C_{1n}(r) \cdot J_1(\lambda_n r) \cdot \frac{sh(\lambda_n r)}{sh(\lambda_n H)}. \quad (8)$$

Якщо обмежитися у (8) одним членом ряду і прийняти $n = 1$, то отримаємо наближену оцінку вихрової течії (9)

$$V_n(r, z) = C_{11} \cdot J_1\left(\frac{5\pi r}{4R_2}\right) \cdot \left[\frac{sh\left(\frac{5\pi}{4R_2}z\right)}{sh\left(\frac{5\pi}{4R_2}H\right)} \right] \quad (9)$$

Здійснення наступних перетворень дозволяє визначити, що найвища колова швидкість потоку досягається при $z = 0$ $r = R_2/2$.

З метою більш якісного очищення насіння від мезги в циліндричному об'ємі камери очищення, використовуємо процес гідродинамічної кавітації [3], який проходить під час продування повітря крізь технологічну рідину. Ця технологічна операція викликає спливання його крупних бульбашок при барботуванні. Завдяки руйнуванню барботажних бульбашок в окремих об'ємах робочої рідини з'являється більша кількість менших за розміром кавітаційних повітряних бульбашок. Наявність бульбашок в рідких середовищах змінює їх властивості, що визначає динаміку таких газорідних середовищ. При їхньому схлопуванні спостерігається зростання амплітуди імпульсу, що сприяє активізації кавітаційних процесів, які інтенсифікують відмивання насіння.

Застосовуючи рівняння Релея [4], розглянемо особливості поведінки таких бульбашок

$$R \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 = \pm \Delta P, \quad (10)$$

де $(+ΔP)$ – відповідає фазі розширення; $(-ΔP)$ – фази схлопування.

Такий підхід (10) не враховує стисливість рідини, що іноді призводить до помилок. Інші відомі рівняння сферичних пульсацій бульбашки в середовищі що стискується, мають як правило лише чисельні рішення.

Якщо на початку процесу очищення насінневої маси у циліндричній ємності гідропневмосепаратора рідина має всі фізичні властивості води, то з часом в ній іде накопичення рідинних залишків соку й клітковини, які змінюють її в'язкість. Такі процеси здійснюють відповідний вплив на фізичні властивості робочої рідини, на порядок і більше збільшуючи її в'язкість. Це відображається в першу чергу на зміні швидкості спливання бульбашок і як наслідок, на якості відмивання насіння.

Рівноважна швидкість спливання u_0 означимо з умови рівності сили опору підйомній силі

$$\frac{4}{3} \pi a_0^3 (\rho_T - \rho_{ж}) g = c_y \rho_{ж} \pi a_0^2 \frac{u_0^2}{2}$$

де c_y – коефіцієнт опору; a_0^3 – радіус бульбашки у момент відриву; ρ_T – густина маси; d_0 – отвори барботера; $\rho_{ж}$ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Звідки маємо (11)

$$u_0 = \frac{8}{3} \frac{a_0 g}{c_y(u_0)} \quad (11)$$

де $c_y = 0,116 \left[1 + \sqrt{1 + 8,6(24 / \text{Re})} \right]^2$,

та відповідно (12)

$$\text{Re} = \frac{2a_0 u_0}{\nu} \quad (12)$$

Підставляючи (12) в (11), отримаємо рівняння (13) для визначення рівноважної швидкості спливання бульбашки u_0

$$u_0 = \frac{2,18 \cdot R_0}{(\nu_0 / a_0) + 31,6 \sqrt{R_0}}, \quad (13)$$

де a_0 – радіус; ν – в'язкість.

Масштабуючи це на спливання великої кількості бульбашок та приймаючи за умову їх рівномірний розподіл за об'ємом, можна одержати залежність (14) за якою описати швидкість колективного спливання:

$$\frac{u_k}{u_0} = \frac{1}{1 + k \cdot \mathcal{G}^{1/3}}, \quad (14)$$

де u_0 , u_k – відповідно, швидкості спливання однієї і групи бульбашок; \mathcal{G} – об'ємна концентрація бульбашок; $k = 1,3 \div 2,1$ – коефіцієнт, що зважає на розподіл бульбашок у просторі робочої рідини.

Список літератури

1. ДСТУ 8439:2015 Насіння овочевих і баштанних рослин та кормових коренеплодів. Документація. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2017. 44 с.
2. Диференціальні рівняння: теорія, приклади, розв'язання : навч. посіб. / Т. С. Кагадій та ін. Дніпро: ДДАЕУ, 2022. 190с.
3. Powers J.M. Lecture notes on gas dynamics. Notre Dame, Indiana, USA: University of Notre Dame. 2019. 166 p.
4. Турик В. М. Основи газодинаміки : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. 139 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/84b79ac9-f963-404b-a07f-f5f3c749d32c/content> (дата звернення 21.11.2024).

To the issue of modeling the hydropneumatic influence on the liquid medium of the seed mass

Pastushenko Sergey, Pastushenko Andrii

The technologies for obtaining seeds of pumpkin, melon, and a wide range of vegetable crops, along with the technological equipment that implements them, are directly dependent on the physical and mechanical properties of the objects being processed. According to the authors, the results of this study provide a promising solution for succulent crops that contain a large number of liquid components in their structure – a combined method that integrates hydraulic and pneumatic influences on the processing environment to achieve a more complete and high-quality extraction of conditioned seeds. The analytical study traced the hydrodynamic field of vortex flow in a conditionally homogeneous and continuous medium with a certain density, followed by an examination of particle dynamics in a centrifugal fluid field under the influence of cavitation and bubbling. The approximation of an analytical model that describes the physical essence of the seed mass cleaning process to real processes allows for the selection of constructive and technological parameters of the developed equipment during the design phase.

Keywords. Technological equipment; bubbling; hydrodynamic cavitation; seed mass cleaning; gas-liquid medium.