

ЛУЦ ПАВЛО

Вінницький національний аграрний університет

<https://orcid.org/0000-0002-3776-8940>e-mail: lutspm@gmail.com

ІВЛЄВ ВІТАЛІЙ

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4878-4794>e-mail: ivliev.v.v@dsau.dp.ua

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЖИМНОЇ НАСАДКИ ДВОГВИНТОВОГО ПРЕСУ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ КОРМІВ

Результатами проведених досліджень дозволили отримати теоретичні залежності розподілу тиску за довжиною віджимної насадки пресу, визначено геометрію віджимної насадки у вигляді функції та розподіл фільтруючих отворів. Розроблена фізико-математична модель, яка описує взаємодію поверхні віджимної насадки з оброблюваною сировиною, зокрема пивною дробиною.

Ключові слова: двогвинтовий прес, віджимна насадка, корм, вологість, параметри, фізико-математична модель, тиск, напруженість, розподіл.

LUTS Pavlo

Vinnytsia National Agrarian University

IVLEV Vitalii

Dnipro State Agrarian and Economic University

ANALYTICAL STUDIES OF THE PRESSING NOZZLE OF THE TWIN-SCREW PRESS FOR FEED DEHYDRATION

Technological equipping is an important storage part of a double-screw press for squeezing highly moist fodder. The quality of squeezing these feeds, which are viscous-plastic materials, by the method of pressing with screw working bodies depends on the rational and optimal choice of the geometry of the squeezing nozzle and the density of the distribution of filter holes.

The theoretical justification of the design parameters of the pressing nozzle is based on the rheological properties of high-moisture feed, in particular on the example of beer pellet. However, the pressing of beer pellet is a complex process, the description of its non-stationary behavior during movement in the pressing nozzle of a screw press is difficult to carry out. In addition, the properties of beer pellet change during pressing, related to the degree of compaction of the material. The main feature of the pressing process is the accompanying deformation, which affects the permeability of the channels of the solid phase.

This feature makes it difficult to obtain adequate mathematical relationships and analysis of pressing and squeezing processes. Accordingly, without an accurate mathematical description, it becomes difficult to design presses of new designs.

The purpose of the research is to develop a physical-mathematical model of the process of interaction between the surface of the extraction nozzle and the processed raw material (beer pellet).

A physico-mathematical model was developed that describes the interaction of the surface of the extraction nozzle with the processed raw material, in particular, beer pellet. This model established a relationship between the pressure distribution in the contact zone between the medium and the surface of the nozzle and its design parameters. The geometry of the surface of the wringer nozzle was described as an exponential function with a step factor of $k = 0.0065 \text{ mm}^{-1}$. Density of the distribution of filter holes along the length was $L = 210 \text{ mm}$, taking the required production capacity.

Keywords: twin screw press, wringer nozzle, fodder, humidity, parameters, physico-mathematical model, pressure, tension, distribution.

Постановка проблеми

Потенціал тваринницької галузі в Україні є величезним, але наразі він не використовується повністю. Щоб змінити цю ситуацію і повністю задовольнити державні потреби, необхідний комплексний підхід до вирішення проблем у кормозабезпеченні тваринництва [1].

Одним із компонентів заявленого комплексного підходу є розробка науково обґрунтованих технологій та технічних засобів, які забезпечують економічно доцільне використання продуктів переробки рослинної сировини для виробництва кормів і подальшого тривалого зберігання. Щодо постачання сировини для виробництва кормів, можна використовувати залишки та відходи від пивоваріння, виноробства, спиртової промисловості, виробництва крохмалю, цукру та інших галузей. Ці матеріали мають високий вміст води (70–90 %), який є проблематичним для ефективного використання у своєму природному стані [2]. Однак, після певної обробки вони можуть стати додатковим джерелом поживних речовин у виробництві кормів. Тому існує проблема розробки ефективних технологій та технічних засобів для переробки вологих кормів, які б дозволяли зберігати їх корисні характеристики протягом тривалого періоду [3]. Одним із способів вирішення цієї проблеми є видалення надлишкової води шляхом пресування.

На даний момент вивчення роботи гвинтових пресів та процесу пресування ґрунтується переважно на експериментальних дослідженнях і емпіричних залежностях. Незважаючи на велику кількість проведених досліджень, що присвячені загальній теорії пресування та використанню гвинтових пресів у виробничій практиці, існує багато теоретичних і практичних питань, які залишаються невирішеними. Тому актуальним напрямком досліджень є проведення досліджень, спрямованих на підвищення ефективності процесу видалення води з високовологих кормів (таких як пивна дробина, післяспиртова та квасна барда, буряковий жом, виноградні вичавки, дріжджова гуща та інші) за допомогою двогвинтових пресів [4]. Ці дослідження мають важливе значення для народногосподарського сектора.

Аналіз останніх джерел

Технологічне оснащення є важливою складовою частиною двогвинтового пресу для віджимання високовологих кормів. Якість віджимання цих кормів, які також є в'язко-пластичними матеріалами, методом гвинто-пресування, залежить від раціонального і оптимального вибору геометрії віджимної насадки та щільності розподілу фільтруючих отворів. Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів віджимної насадки базується на реологічних властивостях високовологих кормів, зокрема на прикладі пивної дробини [5, 6].

Однак, віджимання пивної дробини є складним процесом, опис його нестационарної поведінки під час переміщення у віджимній насадці гвинтового пресу важко здійснити. Крім того, властивості пивної дробини змінюються під час віджимання, пов'язані зі ступенем ущільнення матеріалу. Основною особливістю процесу віджимання пресуванням є супутня деформація, яка впливає на проникність каналів твердої фази [7, 8]. Ця особливість ускладнює отримання адекватних математичних залежностей та аналіз процесів пресування і віджимання. Відповідно, без точного математичного опису стає важким проектування пресів нових конструкцій.

Метою досліджень є розробка фізико-математичної моделі процесу взаємодії поверхні віджимної насадки з оброблюваною сировиною (пивною дробиною).

Виклад основного матеріалу

Для віджимання рідкої фази з пористого скелету отримано наступні рівняння розвитку тиску [9, 10]:

– для скелету твердої фази:

$$\frac{\partial P_C}{\partial \tau} = \frac{\eta}{-\frac{\partial \xi}{\partial P_C}(1+\xi)\rho_P g} \cdot \frac{\partial^2 P_C}{\partial x^2}, \quad (1)$$

– для віджимаємої рідини:

$$\frac{\partial P_P}{\partial \tau} = \frac{\eta}{-\frac{\partial \xi}{\partial P_C}(1+\xi)\rho_P g} \cdot \frac{\partial^2 P_P}{\partial x^2}, \quad (2)$$

де P_P , P_C – тиски в скелетах рідини та твердої фази, Па; ξ – коефіцієнт пористості; ρ_P – щільність рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; τ – час, с; x – координата; η – коефіцієнт фільтрації.

У рівняннях (1) і (2) приймається, що вираз $\frac{\partial \xi}{\partial P_C} = a$ є коефіцієнтом ущільнення. Його частина в рівняннях (1) і (2) позначається, як коефіцієнт $K = \frac{\eta}{-\frac{\partial \xi}{\partial P_C}(1+\xi)\rho_P g}$, який виконує роль параметра, що характеризує швидкість вирівнювання напорів в рідині або тисків в скелеті, і називається коефіцієнтом напоропровідності. Попри те, що η та a змінюються несуттєво і це дозволяє прийняти коефіцієнт напоропровідності величиною постійною.

На початку процесу пресування, зовнішній тиск матеріалу передається рідиною, а в кінці пресування – скелетом, математичним записом

$$\begin{cases} \tau = 0 \Rightarrow P = P_P, \\ 0 < \tau < \infty \Rightarrow P = P_P + P_C, \\ \tau > \infty \Rightarrow P = P_C. \end{cases} \quad (3)$$

На початку процесу, весь тиск спочатку переноситься рідиною. Протягом віджимання, коли рідина видаляється з матеріалу, тиск поступово розподіляється між рідиною та скелетом твердої фази. В кінці віджимання уся реакція на зовнішній тиск сприймається від скелету твердої фази. Це підтверджує можливість розв'язання поставленої задачі віджимання, зосереджуючись на тиску, що діє на скелет твердої фази.

При постановці задачі було враховано, що ущільнення матеріалу призводить до його деформації, яка, в свою чергу, впливає на процес фільтрації. Тому необхідно враховувати пружно-пластичні деформації матеріалу.

Поперечний переріз віджимної насадки має форму криволінійної трапеції (рис. 1).

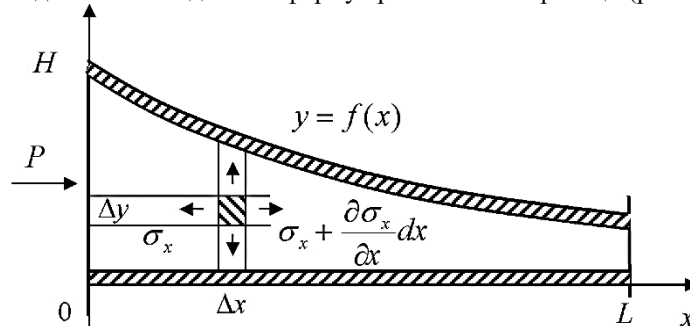


Рис. 1. Віджимна насадка (повздовжній переріз)

Для вирішення поставленої задачі, ми будемо розглядати плоску задачу теорії пружності у прямокутних координатах. Для цього використовуємо основні рівняння теорії пружності, а саме закон Гука та диференціальні рівняння рівноваги:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_y), \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu \sigma_x). \end{cases} \quad (5)$$

де σ_x, σ_y – нормальні напруженості вздовж O_x, O_y ; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – відносне видовження вздовж O_x, O_y ; τ_{xy} – дотична напруженість; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона.

Припустимо, що верхня поверхня насадки (рис. 1) задана функцією $y = f(x)$, тоді відносне видовження по осі O_y (ε_y) має вигляд:

$$\varepsilon_y = \frac{\Delta y}{y} = \frac{f'(x)\Delta x}{f(x)} = \frac{f'(x)}{f(x)} \cdot \frac{\Delta x}{x} \cdot x = \varepsilon_x \frac{f'(x)}{f(x)} \cdot x. \quad (6)$$

З урахуванням пружно-пластичних деформацій, ми оберемо визначальне співвідношення інтенсивності деформації у такому вигляді [11]:

$$\varepsilon_y = -kx\varepsilon_x, \quad (7)$$

де k – критерій пропорційності.

Вираз (6) підставляємо у (7), отримуємо

$$\frac{f'(x)}{f(x)} \cdot x = -kx. \quad (8)$$

Знайдемо рішення рівняння (8)

$$f(x) = Ce^{kx}. \quad (9)$$

Враховуючи початкові умови, а саме $f(0) = H$, вираз (9) і його похідна набуває вигляду:

$$f(x) = He^{-kx}, \quad (10)$$

$$f'(x) = -kHe^{-kx}. \quad (11)$$

Підставивши (10) і (11) у (6), маємо

$$\varepsilon_y = \varepsilon_x \frac{-kHe^{-kx}}{He^{-kx}} \cdot x = -kx\varepsilon_x. \quad (12)$$

Враховуючи, що $\varepsilon_y = -kx\varepsilon_x$ перепишемо закон Гука (5), який матиме вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_y) \\ -kx\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu \sigma_y) \end{cases} \quad (13)$$

Розділивши друге рівняння системи (13) на перше, маємо:

$$-kx = \frac{\sigma_y - \nu \sigma_x}{\sigma_x - \nu \sigma_y}. \quad (14)$$

Виражаючи з (14) σ_x знайдемо часткові похідні $\frac{d\sigma_x}{dx}$ і $\frac{d^2\sigma_x}{dx^2}$:

$$\sigma_x = \sigma_y \frac{1 - kvx}{v - kx}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{1 - kvx}{v - kx} + \sigma_y \frac{-kv(v - kx) + k(1 - kvx)}{(v - kx)^2} = \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{1 - kvx}{v - kx} + \sigma_y \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} \frac{1 - kvx}{v - kx} + 2 \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2} + \sigma_y \frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3}, \quad (17)$$

Продиференціюємо рівняння рівноваги (4):

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y \partial x} = 0, \\ \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x \partial y} = 0. \end{cases} \quad (18)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \tau_{xy}}{\partial y \partial x} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x \partial y}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2}. \quad (20)$$

Підставимо (18) у (20):

$$\frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} \frac{1 - kvx}{v - kx} + 2 \frac{\partial \sigma_y}{\partial x} \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2} + \sigma_y \frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3}. \quad (21)$$

Граничними умовами для рівняння (21) є:

$$\sigma_y|_{x=0} = P, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial x}|_{x=0} = 0. \quad (23)$$

Представимо σ_y у вигляді:

$$\sigma_y = X(x) \cdot Y(y), \quad (24)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = X(x) \cdot \frac{\partial Y(y)}{\partial y}, \quad \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial y^2} = X(x) \cdot \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial x} = \frac{\partial X(x)}{\partial x} \cdot Y(y), \quad \frac{\partial^2 \sigma_y}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} \cdot Y(y). \quad (26)$$

Підставимо (24), (25) і (26) у (21):

$$X(x) \cdot \frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} \cdot Y(y) \frac{1 - kvx}{v - kx} + 2 \frac{\partial X(x)}{\partial x} Y(y) \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2} + X(x) \cdot Y(y) \frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3}. \quad (27)$$

Перетворивши рівняння (27), маємо:

$$\frac{\frac{\partial^2 Y(y)}{\partial y^2}}{Y(y)} = \frac{\frac{\partial^2 X(x)}{\partial x^2} \frac{1 - kvx}{v - kx} + 2 \frac{\partial X(x)}{\partial x} \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2} + X(x) \frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3}}{X(x)} = \lambda^2. \quad (28)$$

Враховуючи граничні умови (22) і (23), отримаємо два диференціальних рівняння другого порядку:

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - \lambda^2 Y = 0, \quad Y|_{x=0} = P, \quad \left. \frac{dY}{dx} \right|_{x=0} = 0, \quad (29)$$

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} \cdot \frac{1 - kvx}{v - kx} + 2 \frac{dX(x)}{dx} \cdot \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2} + X(x) \cdot \left(\frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3} - \lambda^2 \right) = 0, \quad (30)$$

$$X|_{x=0} = 1, \quad \left. \frac{dX}{dx} \right|_{x=0} = 0.$$

Рішенням рівнянь (29)–(30) є наступні функції:

$$X(x) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B}{\sqrt{B^2 - 4AC}} \right) e^{-\frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} x} + \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B}{\sqrt{B^2 - 4AC}} \right) e^{-\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} x}, \quad (31)$$

$$Y(x) = \frac{P}{2} e^{-\lambda x} (1 + e^{2\lambda x}),$$

$$\text{де } A = \frac{1 - kvx}{v - kx}, \quad B = 2 \frac{k(1 - v^2)}{(v - kx)^2}, \quad C = \frac{2k^2(1 - v^2)}{(v - kx)^3} - \lambda^2.$$

Після аналізу рівняння (31), ми приходимо до висновку, що при значенні тиску $P(x) = 0$ виникає заклинювання матеріалу у порожнині віджимної насадки. З метою зменшення довжини, найбільш оптимальним варіантом є вибір геометрії віджимної насадки у вигляді наступної функції (для $0 < x < 210$ мм) – рис. 2:

$$y = 100 \times e^{-0,0064x}, \quad (32)$$

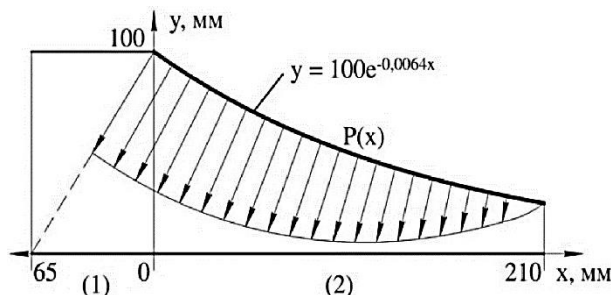


Рис. 2. Розподіл тиску вздовж довжини насадки у зонах первинного (1) та вторинного (2) видалення вологи

Враховуючи (24), остаточно маємо:

$$P(x) = \frac{P_0}{4} e^{-\lambda x} (1 + e^{2\lambda x}) \left[\left(1 - \frac{B}{\sqrt{B^2 - 4AC}} \right) e^{-\frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} x} + \left(1 + \frac{B}{\sqrt{B^2 - 4AC}} \right) e^{-\frac{B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} x} \right]. \quad (33)$$

Враховуючи, що тиск становить $P = 2,8$ МПа [12] і коефіцієнт Пуассона дорівнює $\nu = 0,5$, маємо рівняння (27) і (28) функцій, добуток яких наведено на графіках (рис. 3) при різних коефіцієнтах k .

З графіків на рисунку 3 видно, що тиск за довжиною віджимної насадки знижується. Це пов'язано з виникненням тертя між матеріалом (пивною дробиною) і стінками насадки, тобто при тиску $P = 0$ виникає заклинювання матеріалу в порожнині віджимної насадки. Враховуючи зменшення довжини віджимної насадки, вибір геометрії її поверхні найбільш оптимальним є у вигляді функції, на основі вирішення диференціального рівняння (1): $f(x) = 100e^{-0,0064x}$, за умови $0 < x < 210$ мм.

Для рівномірного розподілу потоку рідини по довжині віджимної насадки $q(x) = q_{\max} = \text{const}$ необхідно, щоб отримати:

$$N(x) = \frac{q_{\max}}{S \sqrt{2 \frac{P(x)}{\rho P}}}, \quad (35)$$

Знайдемо значення q_{\max} , виходячи з визначення вологості матеріалу і продуктивності гвинтового пресу. Початкову і кінцеву вологість матеріалу можна представити у вигляді:

$$W_0 = \frac{m_{P_0}}{m_{P_0} + m_{C_0}}, \quad (36)$$

$$W = \frac{m_{P_0} - \Delta m_P}{m_{P_0} + m_{C_0} - \Delta m_{P_0}}, \quad (37)$$

де m_{P_0} , m_{C_0} – відповідно маси скелету твердої фази і рідини, кг; Δm_P – маса рідини, що віджалась, кг; W_0 – початкова вологість, %; W – кінцева вологість, %.

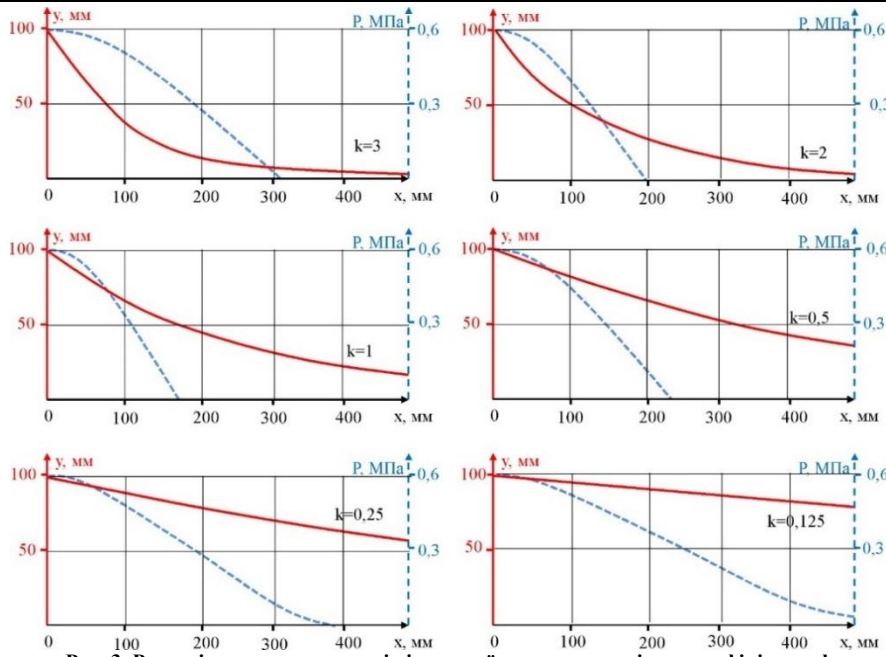


Рис. 3. Розподіл тиску по довжині віджимної насадки при різних коефіцієнтах k

Виразимо Δm_p з виразів (36) і (37):

$$\Delta m_p = m_{p0} \frac{1 - \frac{W}{W_0}}{1 - W} \tag{38}$$

Враховуючи, що $\Delta m_p = \rho_p \cdot q_{max} \cdot t$, отримуємо:

$$q \frac{m_{p0} \frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\rho_p t}}{1 - W_{max}} \tag{39}$$

Враховуючи, що продуктивність гвинтового пресу можна представити у вигляді $Q = m_{p0}/t$, отримаємо:

$$q \frac{Q \frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\rho_p}}{1 - W_{max}} \tag{40}$$

Підставляючи (40) у (35), остаточно маємо:

$$N(x) = \frac{Q \cdot (1 - \frac{W}{W_0})}{\rho_p \cdot a \cdot (1 - W) \cdot S \sqrt{2 \frac{P(x)}{\rho_p}}} \tag{41}$$

Враховуючи задані значення вологості ($W_0 = 0,83$; $W = 0,72$) і продуктивності двогвинтового пресу (для зневоднення сировини – пивної дробини): $Q = 700$ кг/год, отримуємо розподіл фільтруючих отворів за довжиною віджимної насадки (рис. 4).

За результатами проведених досліджень отримана теоретична залежність розподілу тиску за довжиною віджимної насадки, визначено геометрію віджимної насадки у вигляді наступної функції $y = 100 \cdot e^{0,0064x}$ (при $0 < x < 210$ мм) і розподіл фільтруючих отворів.

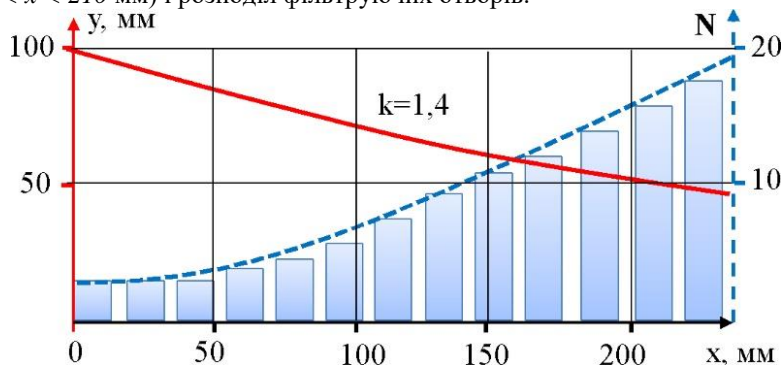


Рис. 4. Розподіл фільтруючих отворів по довжині віджимної насадки

Висновки

Виконана розробка фізико-математичної моделі, яка описує взаємодію поверхні віджимної насадки з оброблюваною сировиною, зокрема пивною дробиною. Ця модель встановила зв'язок між розподілом тиску в зоні контакту між середовищем та поверхнею віджимної насадки та її конструктивними параметрами. Геометрія поверхні віджимної насадки була описана, як експоненційна функція зі ступеневим коефіцієнтом $k = 0,0065$ мм⁻¹. Щільність розподілу фільтруючих отворів по поверхні за довжиною становила $L = 210$ мм, враховуючи необхідну виробничу продуктивність.

Література

1. Національний проект «Відроджене скотарство». – Київ: ДІА, 2011. – 44 с.
2. Карунський О. Й. Використання сухої пивної дробини у годівлі курчат-бройлерів / О. Й. Карунський, В. Є. Браженко. // *Зернові продукти і комбікорми*. Одес. держ. акад. харч. технол. – 2017. – №17(2). – С. 38–42.
3. Продуктивна дія силосованої пивної дробини у раціонах лактуючих корів. / [Я. І. Півторак, О. С. Наумюк, Р. А. Петришак та ін.]. // *Науковий вісник ЛНУВМБТ імені С.З. Гжицького*. – 2016. – №18,2 (67). – С. 183–186. DOI: 10.15421/nvlvet6741.
4. Безпалов Р. І. Результати досліджень процесу консервування пивної дробини на кормові цілі у плівкових рукавах / Р.І. Безпалов, О.О. Троїцька, П.М. Луц // *Зб. наук. праць Таврійського державного агротехнологічного університету*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – 10 (4). – С. 156–164.
5. Кожушко Л. Ф. Шнековий прес для виготовлення багатощарових виробів / Л.Ф. Кожушко, Л.С. Серілко // *Зб. наук. праць Національного університету водного господарства та природокористування «Ресурсоекономічні матеріали, конструкції, будівлі та споруди»*. – Рівне: НУВГП, 2008. – 16 (1). – С. 69-73.
6. Горбенко О. А. Аналіз теоретичних досліджень процесу пресування олійної сировини / О.А. Горбенко, В.В. Стрельцов, Н.А. Горбенко // *Праці Таврійського агротехнологічного університету*. – Мелітополь: ТДАТУ, 2011. – 11 (6). – С. 59-64.
7. Aliiev E. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander / E. Aliiev, V. Dudin, M. Linko. // *Machinery & Energetics*. – 2022. – №13. – С. 9–16. DOI: [https://doi.org/10.31548/machenergy.13\(3\).2022.9-16](https://doi.org/10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16).
8. Техніко-технологічне забезпечення безвідходної переробки зернової сировини у харчові продукти і корми : колективна монографія / Е. Б. Алієв, С. Ю. Миколенко, Н. А. Сова, О. Ю. Алієва, Р. Д. Малегін, К. О. Лупко, М. О. Лінко, Я. В. Гезь, Л. С. Безуглаза ; заг. ред. Е. Б. Алієва ; МОН України ; Дніпровський держ. аграр.-екон. ун-т. – Дніпро : ПП «Ліра ЛТД», 2022. – 192 с. – Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/7935>.
9. Scott K. Industrial Membrane Separation Technology / K. Scott, R. Hughes // Springer Dordrecht. – Berlin: Springer Science, 2012. – 305 с. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0627-6>.
10. Алієв Е. Б. Симуляція процесу експандованого приготування кормів / Е. Б. Алієв, М. О. Лінко, О. Ю. Алієва // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : зб. наук. пр.* – Кропивницький : ЦНТУ, 2022. – Вип. 5 (36). – Ч. 2. – С. 176–185. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185).
11. Timoshenko S. P. Theory of elasticity / S. P. Timoshenko, J. N. Goodier // *Monographs*. – New York : McGraw-Hill, 1970. – 338 с.
12. Алієв Е.Б. Визначення конструктивних параметрів формуючих кулачків установки для виготовлення пелет / Е.Б. Алієв, Ю.М. Лабатюк, О.М. Пацула // *Вісник Степу. Науковий збірник. «Стан та перспективи розвитку агропромислового виробництва України»*. – Вип. 13. – Кіровоград, КОД, 2016. – С. 125-128. – ISBN 978-617-653-010-7.

References

1. Natsionalnyi projekt "Vidrodzhene skotarstvo." (2011) Ministerstvo ahromoi polityky ta prodovolstva Ukrainy, Natsionalna akademiia ahrarykh nauk Ukrainy. K.: DIA. 44 s.
2. Karunskyi O. Y., Brazhenko V. Ye. (2017) Vykorystannia sukhoi pivnoi drobyny u hodivli kurchat-broileriv. Zernovi produkty i kombikormy. 17 (2). S. 38-42.
3. Pivtorak Ya. I., Naumyuk O. S., Petryshak R. A., Holodiuk I. P., Semchuk I. Ya., Dolynskiy V. M. (2016) Produktivna dia sylosovanoi pivnoi drobyny u ratsionakh laktuiuyuchykh koriv. Naukovyi visnyk LNUVMBT imeni S.Z. Hzytskoho. 18, 2 (67). S. 183-186. doi: 10.15421/nvlvet6741.
4. Bezpalo R. I., Troitska O. O., Luts P. M. (2010) Rezultaty doslidzhen prohresu konservuvannia pivnoi drobyny na kormovi tsili u plivkovykh rukavakh. Zb. nauk. prats Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol: TDAHTU. 10 (4). S. 156-164.
5. Kozhushko L. F., Serilko L. S. (2008) Shnekoviy pres dlia vyhotovlennia bahatosharovykh vyrobiv. Zb. nauk. prats Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia "Resursoekonomni materialy, konstruktсии, budivli ta sporudy". Rivne: NUVHP. 16 (1). S. 69-73.
6. Horbenko O. A., Streltsov V. V., Horbenko N. A. (2011) Analiz teoretychnykh doslidzhen protsesu presuvannia olinoi syrovyny. Pratsi Tavriiskoho ahrotekhnolohichnoho universytetu. Melitopol: TDAHTU. 11 (6). S. 59-64.
7. Aliiev E., Dudin V., Linko M. 2022. Physico-mathematical apparatus for numerical modelling of feed expander. *Machinery & Energetics*. 13(3). P. 9-16. doi: 10.31548/machenergy.13(3).2022.9-16.
8. Aliiev E. B., Mykolenko S. Yu., Sova N. A. et al. (2022) Tekhniko-tekhnologichne zabezpechennia bezvidkhdnoi pererobky zernovoi syrovyny u kharchovi produkty i kormy: kolektyvna monohrafiia / za zah. red. E. B. Aliieva. Dnipro: LIRA. 192 s. ISBN 978-966-981-687-0.
9. Scott K., Hughes R. (2012) *Industrial Membrane Separation Technology*: Springer Dordrecht. 305 c. DOI <https://doi.org/10.1007/978-94-011-0627-6>
10. Aliiev E. B., Linko M. O., Aliieva O. Yu. (2022) Simuliatsiia protsesu ekspandovanoho pryhotuvannia kormiv. Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky. Vyp. 5(36), ch.II. S. 176-185. DOI: 10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185.
11. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. (1970) *Theory of elasticity*. McGraw-Hill, New York.
12. Aliiev E. B., Labatiuk Yu. M., Patsula O. M. (2016) Vyznachennia konstruktivnykh parametriv formuiuyuchykh kulachkv ustanovky dlia vyhotovlennia pellet. Visnyk Stepu. Naukovyi zbirnyk. "Stan ta perspektyvy rozvytku ahropromyslovoho vyrobnytstva Ukrainy". Vyp. 13. Kirovohrad, KOD. S. 125-128.