

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В ПРЕСОВАНОМУ МАТЕРІАЛІ У ПРЕС-ГРАНУЛЯТОРАХ З КІЛЬЦЕВОЮ МАТРИЦЕЮ

Н. І. Болтянська, А. С. Комар

Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, Україна.

Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: nataliia.boltianska@tsatu.edu.ua.

Історія статті: отримано – серпень 2019, акцептовано – листопад 2019.

Бібл. 19, рис. 1, табл. 0.

Анотація. У статті розглянуто взаємодію пресованого матеріалу з робочими органами прес-гранулятора в умовах торцевого обмеження клиновидного простору У прес-грануляторах з торцевим обмеженням клиновидного простору між робочими органами механічна енергія передається пресованому матеріалу через контактні поверхні матриці, пресуючих роликів і обмежувальних кілець. Мірою переданої енергії доцільно вважати напружений стан елементарного об'єму продукту на цих поверхнях, яке є основою для визначення параметрів ефекту, що характеризують процес гранулювання. З урахуванням цього описано напружений стан пресованого матеріалу в клиновидному просторі між робочими органами прес-гранулятора та представлено математичну модель процесу пресового гранулювання рослинної сировини в умовах замкненого клиновидного простору між матрицею і кожним з пресуючих роликів. Для вирішення завдання по визначенню напружень в пресованому матеріалі, що знаходиться в умовах плоского деформованого стану, було застосовано інженерний метод, який передбачає визначення нормальних і дотичних напружень не в кожній точці об'єму деформованого матеріалу, а лише на контактних поверхнях. Точне рівняння рівноваги було спрощено в припущенні, що нормальні напруження залежать тільки від однієї з координат. Наближене рівняння рівноваги являє собою одне диференціальне рівняння в звичайних похідних. Подано схему взаємодії пресованого матеріалу з робочими органами прес-гранулятора в умовах торцевого обмеження клиновидного простору. Наведено вирази для визначення площі проекції торцевої контактної поверхні елементарного об'єму матеріалу на площину, перпендикулярну осям обертання робочих органів та площі торцевої контактної поверхні елементарного об'єму матеріалу. Виключивши з отриманих рівнянь рівноваги нормальну напруження, нехтуючи нескінченно малими другого порядку малості, було отримано диференціальне рівняння для зони відставання та зони випередження.

Ключові слова: тваринництво, гранульовані корми, прес-гранулятор, матриця, пресуючі ролики, напруження.

Постановка проблеми

Тваринництво та рослинництво є основою для виробництва якісних продуктів харчування. Для розвитку галузі тваринництва потрібно створення міцної кормової бази. Раціональна годівля сільськогосподарських тварин багато в чому визначає їх ріст, розвиток і продуктивність. Підвищення виробництва комбікормів є, таким чином, найважливішим завданням комбікормової промисловості, але розсипний комбікорм має ряд недоліків, таких як гігроскопічність, мала об'ємна маса, схильність до розшарування при транспортуванні, що негативно впливають на його якість. Найефективніший спосіб усунення цих недоліків - це гранулювання [1-3]. Зі збільшенням випуску комбікормів необхідно підвищувати їх якість і розширювати асортимент, забезпечувати механізацію процесу годівлі тварин, поліпшення умов навантаження, зберігання і транспортування комбікормів, краще збереження в них поживних речовин, вітамінів та інших біологічно активних речовин. Збільшення виробництва гранульованих кормів потребує вдосконалення застосовуваних технологій, машин і устаткування в напрямку зменшення енергоємності машин і підвищення якості одержуваних кормів [4-6].

Аналіз останніх досліджень

Дослідженням процесів пресування ударним способом приділялась увага в роботах в роботах Задоріна Г.І. Ефективність вібраційного прикладання навантаження при пресуванні доведена Васильєвим Г.К. та Киженцевим М.Р.. Шестеренні гранулятори виділені в окремому класифікацію пресуючих пристроїв в книзі Мельникова С.В., одне з найперших досліджень робочого органу з зубчастими колесами для брикетування виконано Сімакіним Ю.А. Преси з матрицями набули найбільшого розповсюдження, як в Україні так і за її межами. Деякі гранулятори такого типу навіть випускались серійно (ОПК-2, ОПК-3). Однак, на сьогоднішній день, залишається ще багато питань стосовно основних напрямів пресування зерновмісних сумішей у тваринництві, що потребують вирішення [7-9].

Мета досліджень

Мета досліджень є визначити напруження, які виникають в пресованому матеріалі, що знаходиться в умовах плоского деформованого стану, визначити нормальні і дотичні напруження на контактних поверхнях робочих органів та отримати диференціальне рівняння для зони відставання та зони випередження.

Результати досліджень

У прес-грануляторах здійснюють переробку агросировини при виробництві гранульованих комбікормів і їх окремих компонентів, при виробництві паливних гранул з відходів АПК (наприклад, з соломи, лущиння), а також з метою отримання гранульованих проміжних продуктів для підвищення ефективності подальшого технологічного процесу (наприклад, гранулювання макухи на олійно-екстракційних заводах).

З використанням гранулятора аграрії отримують можливість ефективно використовувати виробничі відходи шляхом їх переробки на пресоване біодобриво та паливні гранули (пелети). Гранулювання тирси, сіна, соломи, лущиння та інших відходів дозволяє економити на паливі та підвищити рентабельність роботи підприємства в цілому [10, 11].

Паливні гранули мають значні переваги порівняно з традиційними видами палива. Так для їх виробництва витрачається близько 3% енергії, при цьому під час виробництва нафти ці енерговитрати становлять близько 10%, а при виробництві електроенергії – 60%, їх теплотворна здатність коливається у межах від 4,5 до 5,0 кВт/кг, що в 1,5 рази більше, ніж у звичайної деревини і вугілля. При спалюванні 2000 кг паливних гранул виділяється стільки ж теплової енергії, як і при спалюванні: 3200 кг деревини, 957 м³ газу, 1000 л дизельного палива, 1370 л мазуту. Горіння паливних гранул в топці котла відбувається більш ефективно – кількість залишків (золи) не перевищує меж від 0,5 до 1,0% від загального об'єму використаного палива. При спалюванні паливні гранули не впливають негативно на оточуюче середовище [11-13].

Одним з доцільних шляхів вдосконалення процесу пресового гранулювання є розробка нових і оптимізація існуючих конструкцій прес-грануляторів. Однак огляд наукових джерел дає підстави вважати, що за останнє двадцятиріччя конструкції вітчизняних і зарубіжних [14-16] пресуючих механізмів з кільцевої матрицею хоча і досягли більш високого технічного рівня, але по структурним ознаками змінилися незначно.

З аналізу напружено-деформованого стану пресованого матеріалу в незамкненому клиновидному просторі (умовно розділеному на зону відставання, зону видавлювання в філь'єри і зону випередження) між матрицею і кожним з пресуючих роликів витікає, що для робочого процесу всіх існуючих і знов проєктованих прес-грануляторів з кільцевою матрицею характерно бічне видавлювання продукту. Бічне видавлювання – переміщення матеріалу в напрямку торців робочих органів і його видавлювання за межі області контакту – особливо виражено в зоні відставання і менш інтенсивно в зоні видавлювання в філь'єри матриці. Інтенсивність поперечної течії матеріалу визначається його напруженим станом в клиновидному просторі, а також істотно залежить, як і саме напружений стан, від ряду факторів: структурно-механічних (реологічних) властивостей оброблюваного продукту (границі текучості при стисненні, коефіцієнта контактного тертя), конструктивних параметрів прес-гранулятора [17].

В результаті бічного видавлювання матеріалу значно знижується продуктивність прес-гранулятора. Частина матеріалу, що видавлюється за межі робочої області, надходить на повторне стиснення, що збільшує енерговитрати на гранулювання. При вдосконаленні процесу гранулювання у прес-грануляторах з кільцевою матрицею процес бокового видавлювання і пов'язані з ним недоліки досі не враховувалися ні вітчизняними, ні зарубіжними фахівцями.

Процес пресування без бокового видавлювання можливий тільки в умовах, коли контактні поверхні робочих органів прес-гранулятора утворюють замкнений контур поперечного перерізу шару продукту. Це може бути забезпечено шляхом створення додаткових торцевих контактних поверхонь, що дозволяють реалізувати в зонах відставання і видавлювання в філь'єри матриці схему плоского деформованого стану пресованого матеріалу. Важливим завданням дослідження багатопараметричного нелінійного процесу пресового гранулювання в вальцово-матричному прес-грануляторі є його математичний опис. Математична модель процесу пресування повинна відображати енергетичний стан системи «прес-гранулятор - відпрацьований матеріал», який виступає в якості її внутрішньої характеристики.

У прес-грануляторах з торцевим обмеженням клиновидного простору між робочими органами механічна енергія передається пресованому матеріалу через контактні поверхні матриці, пресуючих роликів і обмежувальних кілець. Мірою переданої енергії доцільно вважати напружений стан елементарного об'єму продукту на цих поверхнях, яке є основою для визначення параметрів ефекту, що характеризують процес гранулювання. Таким чином, необхідно описати напружений стан пресованого матеріалу в клиновидному просторі між робочими органами прес-гранулятора.

Пресований матеріал в клиновидному просторі будемо вважати суцільним ізотропним середовищем, що володіє властивостями пружного тіла. Можливість поширення даної моделі пресованого матеріалу на процес гранулювання рослинної сировини і переваги її застосування обґрунтовані різними авторами [17-19]. При цьому, розглядаючи пластичну деформацію продукту, можна виходити як з теорії малих пружно деформаций (деформаційної теорії пластичності), так і з теорії пластичної течії.

Пресований матеріал в клиновидному просторі будемо вважати суцільним ізотропним середовищем, що володіє властивостями пружного тіла. Можливість поширення даної моделі пресованого матеріалу на процес гранулювання рослинної сировини і переваги її застосування обґрунтовані різними авторами [17-19]. При цьому, розглядаючи пластичну деформацію продукту, можна виходити як з теорії малих пружно деформаций (деформаційної теорії пластичності), так і з теорії пластичної течії.

$$\frac{d \ln \rho(\vec{x}, t)}{dt} + \operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (1)$$

де $\rho(\vec{x}, t)$ – щільність продукту в деякій точці клиновидного простору, заданої радіусом-вектором \vec{x} (напружений стан в даній точці відомо), кг/м³;

t – час, с;

\vec{v} – поле швидкостей руху частинок пресованого матеріалу.

Пластичне деформування матеріалів, що ущільнюються завжди супроводжується об'ємною деформацією зі зміною або без зміни геометричної форми [11]. Початок зони відставання характеризується найбільш інтенсивним ущільненням продукту і переважно структурною деформацією. Однак тут контактні напруги, що виникають на поверхні шару матеріалу, що контактує з робочими органами пресуючого механізму ще не роблять помітного впливу на продуктивність преса, потужність сил корисного опору і інші параметри ефекту. При дослідженні напруженого стану пресованого матеріалу основний інтерес представляє активна, з точки зору впливу контактних напружень на параметри ефекту, частина зони відставання. У цій області клиновидного простору матеріал все більше проявляє пружно-пластичні властивості (цьому сприяє і попередня волого-теплова обробка сировини) і його щільність вже досить висока. Подальше зростання щільності частково компенсується збільшенням витрат в зону видавлювання в філь'єри матриці, де значення щільності стабілізується і його можна вважати постійним і рівним щільності гранул в філь'єрах. У зоні випереження ущільнення відсутнє.

Уже при відносній щільності порядку 0,8 і порівняно невеликих значеннях середнього тиску (що справедливо для процесу пресового гранулювання) поведінка матеріалу, що ущільнюється мало відрізняється від поведінки нестискуваних тіл, що припускає використання методів теорії пластичності нестискуваних тіл [17].

Ґрунтуючись на вищесказаному, для опису напруженого стану пресованого матеріалу приймемо допущення:

$$\rho(\vec{x}, t) = \rho = const \quad (2)$$

де ρ – середня щільність пресованого матеріалу в активній частині клиновидного простору, кг / м³.

В такому випадку буде справедливо умова сталості елементарного об'єму пластично деформованого матеріалу. З урахуванням (2) повна похідна $d \ln \rho / dt$. Тензор градієнта швидкості обертається в нуль, і рівняння нерозривності (1) запишеться наступним чином:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0 \quad (3)$$

На елементарний об'єм dV пресованого матеріалу, що переміщується в клиновидному просторі з полем швидкостей \vec{v} , діє зовнішня масова сила $\rho \vec{F} dV$, де \vec{F} – вектор одиничної масової сили. На кожен елемент dS поверхні, що обмежує довільний об'єм продукту V , м³, діє зовнішня по відношенню до цього об'єму сила $\vec{\sigma} \vec{n} dS$, де $\vec{\sigma}$ – вектор поверхневих напружень на площі dS з зовнішньої нормаллю \vec{n} . Тоді рівняння зміни кількості руху матеріалу в клиновидному просторі пресгранулятора матиме вигляд:

$$\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \vec{v} dV = \iint_S \vec{\sigma} \vec{n} + \iiint_V \rho \vec{F} dV \quad (4)$$

З огляду на те, що $\frac{d}{dt} \iiint_V \rho \vec{v} dV = \iiint_V \rho \frac{d\vec{v}}{dt} dV$ і $\iint_S \vec{\sigma} \vec{n} dS = \iiint_V \operatorname{div} T_{\sigma} dV$, з рівняння (4) отримуємо в загальному вигляді диференціальне рівняння руху продукту в клиновидному просторі:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \operatorname{div} T_{\sigma} + \rho \vec{F} \quad (5)$$

де T_{σ} – тензор напружень в пресованому матеріалі (складений для схеми плоского деформованого стану).

У прес-грануляторі інерційним членом $\rho \frac{d\vec{v}}{dt}$, а також масовою силою, що представляє собою величину третього порядку малості, можна знехтувати в порівнянні з компонентами тензора напружень в оброблюваному матеріалі. Таким чином, рівняння (5) перетворюється в рівняння рівноваги:

$$\operatorname{div} T_{\sigma} = 0. \quad (6)$$

що описує параметри напруженого стану в пресованому матеріалі в усіх точках замкнутого клиновидного простору.

Для вирішення завдання по визначенню напружень в пресованому матеріалі, що знаходиться в умовах плоского деформованого стану, доцільно застосувати інженерний метод [11]. Даний метод передбачає визначення нормальних і дотичних напружень не в кожній точці об'єму деформованого матеріалу, а лише на контактних поверхнях. Точне рівняння рівноваги (6) може бути спрощено в припущенні, що нормальні напруги залежать тільки від однієї з координат. Наближене рівняння рівноваги буде являти собою одне диференціальне рівняння в звичайних похідних.

Введемо відповідно до рисунком 1 циліндричну систему координат (r, φ, z) з полюсом в точці O_M , що лежить на осі обертання матриці O_M . Ось збігається з віссю обертання $O_M z$. Полярна вісь $O_M \rho$ вибирається на прямій, утвореній перетином площини радіального перетину шару продукту з мінімальною висотою, h_{δ} , м, і площині, перпендикулярній осям обертання робочих органів. Циліндрична контактна поверхня матриці з радіусом r_M , м, задається координатною поверхнею $r = r_M = const$.

Мінімальна висота h_{δ} шару пресованого матеріалу забезпечується поворотом ексцентрикової осі пресуючого ролика на кут ϑ , рад:

$$\vartheta = \arccos \frac{a_0^2 + e^2 - [r_M(1 - k_r) - h_{\delta}]^2}{2a_0 \cdot e}, \quad (7)$$

де a_0 – міжосьова відстань, $O_M O_e$ м;

e – ексцентриситет, м;

$k_r = r_p / r_M$ – відносний радіус пресуючого ролика (r_p – радіус циліндричної контактної поверхні обичайки пресує ролика, м).

При цьому кут ϑ , відлічуваний від лінії $O_M O_e$ (що з'єднує центри матриці і ексцентрикової осі) в напрямку, протилежному обертанню матриці, знаходиться в межах:

$$0 \leq \vartheta \leq \arccos \frac{a_0^2 + e^2 - r_M^2(1 - k_r)^2}{2a_0 \cdot e}$$

Виділимо в зоні відставання елементарний об'єм пресованого матеріалу, обмежений циліндричними поверхнями матриці 1 і пресуючого ролика 2, контактними поверхнями обмежувальних кілець 3, а також двома радіальними перерізами з елементарним кутом $d\varphi$ між ними. Кордон, на якій припиняється контакт торцевих поверхонь обмежувальних кілець з шаром матеріалу, задамо полярним рівнянням:

$$r = \hat{r} = \sqrt{k_r^2 r_M^2 - [r_M(1 - k_r) - h_{\delta}]^2 \sin^2 \varphi} + [r_M(1 - k_r) - h_{\delta}] \cos \varphi + (h - h_{butt}), \quad (8)$$

де φ – кут повороту кільцевої матриці, рад;

h – радіальна висота шару пресованого матеріалу в клиновидному просторі, м;

h_{butt} – радіальна висота проекції торцевої контактної поверхні шару матеріалу на площину, перпендикулярну осям обертання робочих органів, м.

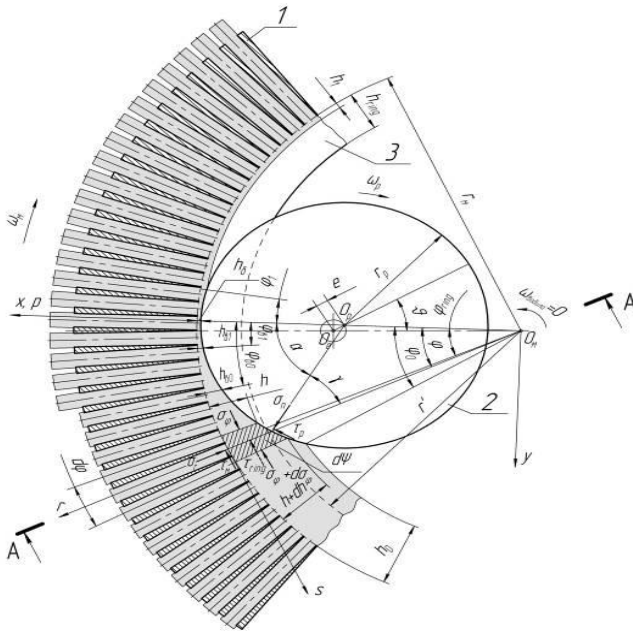


Рис. 1. Схема взаємодії пресованого матеріалу з робочими органами прес-гранулятора в умовах торцевого обмеження клиновидного простору: 1 – кільцева матриця; 2 – пресуючий ролик; 3 – обмежувальне кільце.

Fig. 1. The scheme of interaction of the pressed material with the working bodies of the pelletizer in terms of end limitation of the wedge-shaped space: 1 - annular matrix; 2 - pressing roller; 3 - restrictive ring.

Параметр h_{butt} залежить від співвідношення h_{ring}/h_0 , де h_{ring} – радіальна висота проекції торцевої контактної поверхні обмежувального кільця на площину, перпендикулярну осям обертання робочих органів, м; h_0 – радіальна висота вільного від тиску робочих органів шару матеріалу, що залежить від подачі продукту в робочу камеру преса, м.

Якщо $h_{ring}/h_0 \geq 1$ то:

$$h_{butt} = h \text{ при } -\varphi \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad (9)$$

де φ_0 – кутова координата радіального перетину, де починається зона відставання і виникає контакт шару матеріалу з пресуючим роликом, рад;

φ_1 – кутова координата радіального перетину, де закінчується зона випередження і припиняється контакт шару матеріалу з пресуючим роликом, рад.

Якщо $h_{ring}/h_0 < 1$ то:

$$\begin{cases} h_{butt} = h \text{ при } -\varphi \leq \varphi \leq \varphi_{ring} \\ h_{butt} = h_{ring} \text{ при } \varphi_{ring} \leq \varphi \leq \varphi_0 \end{cases} \quad (10)$$

де φ_{ring} – кут повороту матриці, при якому утворюється замкнутий клиновидний простір, рад.

$$\varphi_{ring} = \arccos \frac{(r_m - h_{ring})^2 - k_r^2 r_m^2 + [r_m(1 - k_r) - h_\delta]^2}{2(r_m - h_{ring}) \cdot [r_m(1 - k_r) - h_\delta]} \quad (11)$$

Площа $d\Psi$ проекції торцевої контактної поверхні елементарного об'єму матеріалу на площину, перпендикулярну осям обертання робочих органів, з урахуванням рівняння (8), записаного в короткій формі, виразиться в такий спосіб:

дикулярну осям обертання робочих органів, з урахуванням рівняння (8), записаного в короткій формі, виразиться в такий спосіб:

$$d\Psi = \left(r_m h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2 \right) d\varphi, \quad (12)$$

Тоді площа торцевої контактної поверхні елементарного об'єму матеріалу можна отримати, скорегувавши $d\Psi$ множенням на коефіцієнт k_{ring} , що враховує форму зазору Δ , м, між бічними поверхнями обмежувальних кілець і торцями пресуючих роликів [17,19].

У разі, коли торцева контактна поверхня обмежувального кільця перпендикулярна контактної поверхні матриці,

$$k_{ring} = 1 \quad (13)$$

Коли торцева контактна поверхня обмежувального кільця розташована під кутом λ , рад, до контактної поверхні матриці, k_{ring} знаходиться за формулою:

$$k_{ring} = \frac{1}{\sin \lambda} \quad (14)$$

Якщо торцева контактна поверхня обмежувального кільця криволінійна і утворена в діаметральному перетині опуклою стороною звичайної циклоїди з початковою точкою, що лежить на колі з радіусом

$r_m - h_{ring}$, k_{ring} то знаходиться за формулою:

$$k_{ring} = \frac{\frac{16R^2}{3}(\cos^3 \chi - 3\cos \chi) - 8R(r_m - h_{ring})\cos \chi + 8R(r_m - h_{ring})}{2r_m h_{ring} - h_{ring}^2}, \quad (15)$$

де R – радіус, виробляє коло циклоїди, м;

$$\chi = \frac{1}{2} \arccos \left(1 - \frac{h_{ring}}{R} \right)$$

Регулюванням величини зазору Δ і оптимізацією його форми забезпечується можливість зміни опору видавлювання матеріалу через цей зазор.

Через точку з кутовою координатою φ , що належить контактній поверхні матриці і бісектрисі кута $d\varphi$, проведемо вісь r в радіальному напрямку (по нормалі до даної поверхні) і вісь s в окружному напрямку (по дотичній до напрямної даної поверхні). Докладемо до елементарного об'єму реакції зв'язків і спроекуємо елементарні сили на осі r і s (рис 1).

Приймемо, що на виділений об'єм з боку шару матеріалу, що примикає до радіального перетину з висотою h , діє нормальне тангенціальна напруга σ_φ , Па. Тоді в радіальному перетині з висотою шару $h + dh$ буде діяти напруга

$$\sigma_\varphi + \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} d\varphi = \sigma_\varphi + d\sigma_\varphi$$

Друга частина останнього рівності отримана з урахуванням припущення, що σ_φ не залежить від координати r і є середнім по висоті перетину, тобто для контактної поверхні справедливо умова

$$\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} = \frac{d\sigma_\varphi}{d\varphi}$$

Виключивши з двох отриманих рівнянь рівноваги нормальну напругу, σ_n Па, нехтуючи нескінченно малими другого порядку малості, вважаючи $\sin \frac{d\varphi}{2} \approx \frac{d\varphi}{2}$, $\cos \frac{d\varphi}{2} \approx 1$ і $d\varphi = \frac{dh}{tg \gamma (r_m - h)}$ (з точністю до малих вищого порядку), з урахуванням виразу (12) і подальших перетворень, отримаємо диференціальне рівняння у вигляді:

$$d\sigma_{\varphi} + \left(\frac{r_m}{r_m-h}\right) (\sigma_{\varphi} - \sigma_r) \frac{dh}{h} + \left[k_b \left(1 + \frac{2\Delta}{b}\right) \left(\frac{r_m}{r_m-h}\right) \tau_m + \right. \\ \left. (\operatorname{tg}^2 \gamma + 1) \tau_p + \frac{2k_{ring}}{b(r_m-h)} \left(r_m h_{butt} - \frac{1}{2} h_{butt}^2\right) \tau_{ring} \right] \frac{dh}{h \operatorname{tg} \gamma} = 0$$

де σ_r – нормальне радіальне напруження в продукті, Па;

τ_m , τ_p , τ_{ring} контактних поверхнях матриці, пресуючих роликів і обмежувальних кілець, Па;

γ – кут, утворений дотичними до контактних поверхонь матриці і ролика в точках, що лежать в одній площині радіального перетину шару продукту і одній площині, перпендикулярній осям обертання – дотичні тангенціальні напруги відповідно на робочі органи, і пов'язаний з координатою φ залежністю:

$$\gamma = \arcsin \left[\frac{r_m(1-k_r)-h_{\delta}}{k_r r_m} \right] \quad (16)$$

b – робоча ширина кільцевої матриці, м;

k_b – коефіцієнт, який визначається конфігурацією обмежувальних кілець: контактна поверхня вертикальна – $k_b = 1$, похила – $k_b = 1 + \frac{2hring}{\operatorname{tg} \lambda (b+2\Delta)}$, циклоїдальних – $k_b = 1 + \frac{2R(2\chi - \sin 2\chi)}{b+2\Delta}$.

Для зони випередження диференціальне рівняння буде відрізнятися від рівняння (16) знаками контактних дотичних напружень.

На підставі викладеного можна зробити висновок, що бічне видавлювання матеріалу є важливим недоліком в робочому процесі всіх існуючих прес-грануляторів з кільцевою матрицею і його необхідно враховувати з метою підвищення продуктивності і зниження енергоємності пресуючих механізмів, що проектується. Теоретично бічне видавлювання характеризується різною інтенсивністю в залежності від напруженого стану, виду і реологічних властивостей оброблюваного матеріалу, конструктивних параметрів преса. Сформована в результаті теоретичних досліджень математична модель процесу пресового гранулювання в умовах торцевого обмеження клиновидного простору відображає енергетичний стан системи «прес-гранулятор – опрацьований матеріал».

Висновки

1. Для повної реалізації потенційної надійності машини необхідно, щоб система технічного обслуговування і ремонту, а також міжремонтні ресурси і термін служби машини були науково обґрунтованими.

2. Наведено рівняння для визначення терміну окупності заходів щодо підвищення надійності та експлуатаційних витрат з підвищенням надійності.

3. Визначено умову економічної доцільності проведення робіт по підвищенню рівня надійності.

Список літератури

1. Болтянська Н. І. Сучасний стан машинно-тракторного парку підприємств агропромислового комплексу. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2008. Вип. 36. С. 3–7.

2. Роговський І. Л. Технічні вимоги до гарантійного технічного обслуговування сільськогосподарських машин. Науковий вісник національного університету біоресурсів та природокористування України. Серія: техніка та енергетика АПК. 2010. Вип. 166, ч. 1. С. 286–291.

3. Скляр О. Г., Болтянська Н. І. Механізація технологічних процесів у тваринництві: навчальний посібник. Мелітополь: Колор Принт, 2012. 720 с.

4. Болтянська Н. І. Зниження енергоємності виробництва продукції тваринництва за рахунок скорочення енергії на кормоприготування. Інженерія природокористування. 2018. №1(9). С. 57–61.

5. Роговський І. Л. Відновлення працездатності складальних одиниць сільськогосподарської машини. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Харків. 2015. Т. 159. С. 224.

6. Скляр О. Г., Болтянська Н. І. Основи проектування тваринницьких підприємств: підручник. Київ. Видавничий дім «Кондор», 2018. 380 с.

7. Болтянська Н. І. Система чинників ефективного застосування ресурсозберігаючих технологій в молочному скотарстві на підприємстві. Науковий вісник ТДАТУ. 2016. Вип. 6. Т. 1. С. 55–64.

8. Кондря Д. І., Болгов О. В., Фомин С. Є. Обґрунтування конструкції роторного гранулятора з плоскою матрицею. Збірник наукових праць магістрантів та студентів ТДАТУ. 2015. С. 172–173.

9. Гайденко О. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва [Електронний ресурс]. Агробізнес сьогодні. Режим доступу: <http://agro-business.com.ua/agro/idei-trendy/item/8366-tverde-biopolyvo-tekhnologichni-vymohy-vlastyosti-komponentiv-ta-tekhnohiiia-vyrobnytstva.html>.

10. Boltyanska N. Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow, 2018. Vol. 18. No 2. P. 23–29.

11. Комар А. С., Болтянська Н. І. Переробка пташиного посліду на добриво шляхом його гранулювання. Тези V Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва». Умань. 2019. С. 18–20.

12. Назаров В. И. Булатов И. А., Макаренко Д. А. Особенности разработки процесса пресового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. №2. С. 35 – 39.

13. Болтянская Н. И., Болтянский О. В. Анализ основных направлений ресурсосбережения в животноводстве. Motrol: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, 2016. Vol. 18. No13, b. P.49–54.

14. Комар А. С. Анализ конструкций пресов для приготовления кормовых гранул та паливных брикетов. Науковий вісник ТДАТУ. 2018. Вип. 8. Т. 2. С. 44–56.

15. Грануляторы комбикормов [Електронний ресурс]. Информационный портал ПИЩЕВИК. Режим доступа: <http://mppnik.ru/publ/491-granulyatory-kombikormov.html>.

16. Болтянська Н. І. Аналіз конструкцій шестерених пресів-грануляторів. Науковий вісник ТДАТУ. 2018. Вип. 8. Т.2. С. 29–43.
17. Дружанов, Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел. Москва. Машиностроение, 1989. 168 с.
18. Болтянська Н. І., Комар А. С. Напрями удосконалення робочого процесу вальцово-матричних прес-грануляторів Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції: мат. Міжн. наук.-практ. форуму. ТДАТУ ім. Дмитра Моторного. 2019. Ч.1. С. 33–36.
19. Унксов, Е. П. Инженерная теория пластичности: методы расчета усилий деформирования. Москва. Машгиз, 1959. 328 с.

References

1. *Boltyanska N. I.* (2008). The current state of the machine-tractor fleet of enterprises in the agro-industrial complex. Proceedings of the Tavrida State Agrotechnological University. No. 36, 3–7.
2. *Rogovskii I. L.* (2010). Technical Requirements for Agricultural Machinery Warranty Maintenance. Scientific Bulletin of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. APK Engineering and Energy series. Issue 166, Part 1. 286–291.
3. *Sklar O. G., Boltyanska N. I.* (2012). Mechanization of technological processes in animal husbandry: textbook. manual. Color Print. 720.
4. *Boltyanska N. I.* (2018). Reducing the energy consumption of livestock production by reducing energy for feed production. Preengineering engineering. No. 1 (9). 57–61.
5. *Rogovsky I. L.* (2015). Restoration of capacity of assembly units of agricultural machinery. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. P. Vasilenko. T. 159. 224.
6. *Sklar O. G., Boltyanska N. I.* (2018). Fundamentals of Livestock Enterprise Design: A Textbook. Condor Publishing House, 380.
7. *Boltyanska N. I.* (2016) System of factors of effective application of resource-saving technologies in dairy cattle breeding at the enterprise. TDATU Scientific Bulletin. Issue 6. T.1. 55–64.
8. *Kondra D. I., Bolgov O. V. Fomin S. E.* (2015). Justification of the design of a flat matrix rotary pelletizer. Collection of scientific works of undergraduates and students of TDATU. 172–173.
9. *Gaidenko O.* (2019). Solid biofuels: technological requirements, properties of components and technology of production [Electronic resource]. Agribusiness today. Access mode: <http://agro-business.com.ua/agro/idei-trendy/item/8366-tverde-biopolyvo-tekhnohichni-vymohy-vlavyosti-komponentiv-ta-tekhnohichni-vyrobnytstva.html>.
10. *Boltyanska N.* (2018). Ways to Improve Structures Gear Pelleting Presses. TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow, Vol. 18. No 2. 23–29.
11. *Komar A. S., Boltyanska N. I.* (2019). Fertilizer manure processing by granulation. Abstracts of the 5th International Scientific and Practical Conference "Innovative Technologies for Growing, Storage and Processing of Horticulture and Crop Production". Uman. 18–20.
12. *Nazarov V. I., Bulatov I. A., Makarenkov D. A.* (2009). Features of the development of the press granulation process of biofuels based on wood and vegetable waste Chemical and oil and gas engineering. No. 2. from. P. 35 – 39.
13. *Boltyanskaya N. I., Boltyanskiy O. V.* (2016). Analysis of the main areas of resource conservation in animal husbandry. Motrol: Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, Vol. 18. No13, P. 49–54.
14. *Komar A. S.* (2018). Analysis of press constructions for the preparation of feed pellets and fuel briquettes. TDATU Scientific Bulletin. Issue 8. V.2. 44–56.
15. Granulators of compound feeds (2019). [Electronic resource]. Information portal PISCHEVIK. Access Mode: <http://mppnik.ru/publ/491-granulyatory-kombikormov.html>
16. *Boltyanska N. I.* (2018). Analysis of the design of pinion pellets. TDATU Scientific Bulletin. Issue 8. V.2. 29–43.
17. *Druyanov, B. A.* (1989). Applied theory of plasticity of porous bodies. M.: Engineering, 168.
18. *Boltyanskaya N. I., Komar A. S.* (2019). Areas of improvement of the working process of roller-matrix press granulators Modern scientific researches on the way to European integration: mat. Int. Research Practice forum. TDAT them. Dmitry Motorny. Part 1, 33–36.
19. *Unksov, E. P.* (1959). Engineering theory of plasticity: methods for calculating the strain forces. M.: Mashgiz, 328.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕССОВАННОМ МАТЕРИАЛЕ В ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРАХ С КОЛЬЦЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Н. И. Болтянская, А. С. Комар

Аннотация. В статье рассмотрено взаимодействие прессованного материала с рабочими органами пресс-гранулятора в условиях торцевого ограничения клиновидного пространства. В пресс-грануляторах с торцевым ограничением клиновидного пространства между рабочими органами механическая энергия передается прессованному материалу через контактные поверхности матрицы, прессующих роликов и ограничительных колец. По мере передаваемой энергии целесообразно считать напряженное состояние элементарного объема продукта на этих поверхностях, которое является основой для определения параметров эффекта, характеризующие процесс гранулирования. С учетом этого описано напряженное состояние прессованного материала в клиновидном пространстве между рабочими органами пресс-гранулятора и представлена математическая модель процесса прессового гранулирования растительного сырья в условиях замкнутого клиновидного пространства между матрицей и каждым из прессующих роликов. Для решения задачи по определению напряжений в прессованном материале, которые находятся в условиях плоского деформированного состояния, было применено инженерный метод, который предполагает определе-

ние нормальных и касательных напряжений не в каждой точке объема деформированного материала, а лишь на контактных поверхностях. Точное уравнение равновесия было упрощено в предположении, что нормальные напряжения зависят только от одной из координат. Приближенное уравнение равновесия представляет собой одно дифференциальное уравнение в обычных производных. Представлена схема взаимодействия прессованного материала с рабочими органами пресс-гранулятора в условиях торцевого ограничения клиновидного пространства. Приведены выражения для определения площади проекции торцевой контактной поверхности элементарного объема материала на плоскость, перпендикулярную осям вращения рабочих органов и площади торцевой контактной поверхности элементарного объема материала. Исключив из полученных уравнений равновесия нормальное напряжение, пренебрегая бесконечно малыми второго порядка малости, было получено дифференциальное уравнение для зоны отставания и зоны опережения.

Ключевые слова: животноводство, гранулированные корма, пресс-гранулятор, матрица, прессующие ролики, напряжение.

Key words: animal husbandry, granular feed, press granulator, die, pressing rollers, tension.

Н. І. Болтянська ORCID 0000-0002-7887-4715.

А. С. Комар ORCID 0000-0001-7037-8402.

VOLTAGE DETERMINATION IN PRESSED MATERIAL IN RING DIE PELLET MILL

N. I. Boltianska, A. S. Komar

Abstract. The article discusses the interaction of the pressed material with the working bodies of the press granulator in the face of wedge-shaped limited space. As energy is transmitted, it is advisable to consider the stress state of the elemental volume of the product on these surfaces, which is the basis for determining the effect parameters characterizing the granulation process. With this in mind, the stress state of the pressed material in the wedge-shaped space between the working bodies of the press granulator is described and a mathematical model of the process of pressing granulation of plant materials in the closed wedge-shaped space between the matrix and each of the pressing rollers is presented. To solve the problem of determining the stresses in the extruded material, which are in a plane deformed state, an engineering method was applied, which involves determining the normal and tangential stresses not at each point of the volume of the deformed material, but only on the contact surfaces. The exact equilibrium equation was simplified on the assumption that normal stresses depend only on one of the coordinates. The approximate equilibrium equation is a single differential equation in ordinary derivatives. The scheme of interaction of the pressed material with the working bodies of the press granulator in the conditions of the end restriction of the wedge-shaped space is presented. The expressions for determining the area of the projection of the end contact surface of the elementary volume of the material on a plane perpendicular to the axes of rotation of the working bodies and the area of the end contact surface of the elementary volume of material are given. Eliminating normal stress from the obtained equilibrium equations, neglecting the infinitesimal of the second order of smallness, a differential equation was obtained for the lagging zone and the lead zone.

