

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та  
інженерії агроecosистем

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Корінчук Віктор Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 662.636.3

(індекс)

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**Дослідження процесу та обґрунтування параметрів**

**обладнання для виробництва паливних гранул**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ В. В. Корінчук

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Н.М.

(прізвище, ім'я, по батькові)

доцент канд. тех. наук

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

## АНОТАЦІЯ

Корінчук В. В Дослідження процесу та обґрунтування параметрів обладнання для виробництва паливних гранул. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Здійснено аналіз конструкцій грануляторів та технологічних процесів виробництва паливних гранул з рослинної сировини. Встановлено, що конструкційні параметри механізму пресування гранулятора мають найбільший вплив на якість вироблених гранул та ефективність і енергоємність процесу. Представлено математичну модель, яка описує напружений стан подрібненої рослинної сировини між робочими механізмами гранулятора та у каналі філь'єри. Методом проведення експериментальних досліджень встановлено параметри гранулятора та процесу виробництва паливних гранул з соломи-січки, при яких ефективність процесу буде найвищою. Математична модель має високу відповідність результатам експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** гранулятор, матриця, рослинна сировина, напружений стан, пресувальні ролики.

## SUMMARY

Korinchuk VV Research of process and substantiation of parameters of equipment for production of fuel pellets. - Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 - agroengineering. - Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The analysis of granulator designs and technological processes of production of fuel granules from vegetal raw material is carried out. It is established that the design parameters of the granulator's pressing mechanism have the greatest influence on the quality of the produced granules and the efficiency and energy consumption of the process. A mathematical model is presented, which describes the stress state of crushed vegetal raw material between the working mechanisms of the granulator and in the die channel. The parameters of the granulator operation and the process of production of fuel pellets from chopped straw were established by the method of experimental research, at which the efficiency of the process will be the highest. The mathematical model has a high correspondence to the results of experimental research.

Key words: granulator, matrix, vegetal raw material, stress state, pressing rollers

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	7
1.1. Аналіз фізико-хімічних властивостей сировини для виробництва паливних гранул.....	7
1.2. Аналіз конструкцій обладнання та технологічного процесу виробництва паливних гранул з рослинної сировини.....	9
1.3. Аналіз досліджень впливу конструкційних параметрів механізму пресування на параметри процесу гранулювання рослинної сировини.....	11
1.4. Висновки до розділу 1.....	13
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ.....	14
2.1. Моделювання напруженого стану подрібненої рослинної сировини в каналі філь'єри.....	14
2.2. Моделювання напруженого стану подрібненої рослинної сировини між робочими механізмами гранулятора.....	20
2.3. Висновки до розділу 2.....	23
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ СОЛОМИ-СІЧКИ ПШЕНИЦІ.....	24
3.1. Матеріали та методи дослідження.....	24
3.2. Результати експериментальних досліджень процесу гранулювання соломи-січки.....	26
3.3. Висновки до розділу 3.....	33
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $\xi$  – коефіцієнт дії рівномірно розподіленого бічного тиску;  
 $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_n$  – відповідно нормальні осьова, радіальна, окружна та нормальна напруги в оброблюваній рослинній сировині, МПа;  
 $\sigma_{r(k-1)}$  та  $\sigma_{rk}$  – значення нормальної радіальної напруги на початку та в кінці  $k$ -го відрізка відповідно, МПа;  
 $\sigma_T$  – границя текучості гранули з біомаси за нормальних умов, МПа;  
 $\sigma_{T(k-1)}$  та  $\sigma_{Tk}$  – значення границі текучості на початку та в кінці  $k$ -го відрізка відповідно, МПа;  
 $\sigma_{T1}$  – границя текучості гранули при атмосферному тиску, МПа;  
 $\sigma_p$  – тиск рідини, близький до гідростатичного, МПа.  
 $\chi$  – коефіцієнт рівномірно розподіленого бічного тиску під час пресування;  
 $\tau$  – дотична напруга в оброблюваній біомасі на гладкій поверхні контакту, МПа;  
 $\tau_T$  – границя текучості зсуву оброблюваної рослинної сировини, МПа;  
 $\mu$  – коефіцієнт тертя на поверхнях контакту сировини та металевих елементів механізму пресування;  
 $\tau', \mu_1$  – постійні, які залежать від молекулярної взаємодії поверхні контакту та оброблюваної сировини;  
 $\mu_2$  – постійна, яка враховує вплив деформації частинок оброблюваної сировини на пружну поверхню контакту;  
 $\mu_{(k-1)}$  та  $\mu_k$  – значення коефіцієнта тертя на поверхнях контакту на початку та в кінці  $k$ -го відрізка відповідно, МПа;  
 $D_{\text{кф}}, z_c$  – відповідно діаметр та довжина каналу філь'єри циліндричної форми, м;  
 $\sigma$  – інтенсивність нормальної напруги, МПа;  
 $\theta_k, \alpha_k$  – кутовий коефіцієнт хорди апроксимуючої діаграму залежності  $\mu$  від  $\sigma_n$  та  $\sigma_T$  від  $\sigma_p$  відповідно, на  $k$ -тій довжині відрізка;  
 $E$  – модуль пружності рослинної сировини першого роду, МПа;  
 $\nu$  – коефіцієнт поперечної деформації рослинної сировини.  
 $\varepsilon_r, \varepsilon_{r1}$  – відповідно відносна радіальна деформація рослинної сировини у вхідному та вихідному перерізах циліндричного каналу філь'єри;  
 $\varphi$  – кут повороту матриці, град;  
 $r_1$  – радіус робочої поверхні матриці, м.  
 $\sigma_m$  – нормальна напруга в елементарній частинці рослинної сировини у повздожньому напрямку протяжності порожнини  $m$ ;  
 $\tau_{(y)}$  – дотична напруга в елементарній частинці рослинної сировини, що діє на поверхні контакту з робочими механізмами ( $y$  – набір реологічних параметрів);  
 $\Phi(n)$  – функція параметрів конусної порожнини взаємодії оброблюваної сировини з робочими механізмами гранулятора  $n$ .

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** За винятком операції сушіння технологія виробництва паливних гранул є подібною до технології виробництва комбікормів гранульованого типу з використанням грануляторів. Однак, на світовому ринку, хоча властивості рослинної сировини суттєво відрізняються від властивостей комбікормів, виробники технологічного устаткування випускають гранулятори без врахування зазначених особливостей. У наявних наукових дослідженнях відомості про фізико-механічні властивості рослинної сировини, які є важливими для гранулювання, представлені обмежено.

Потрібно дослідити залежність продуктивності пресувального механізму та потужності сил корисного опору від конструктивних параметрів та кутової швидкості робочих механізмів. У відомих дослідженнях вибір параметрів робочих механізмів грануляторів не має належного наукового обґрунтування.

З огляду на викладене, дослідження процесу та обґрунтування параметрів обладнання для виробництва паливних гранул є актуальним завданням, вирішення якого сприятиме розвитку агроінженерної галузі в частині виробництва технологічного обладнання для переробки рослинних залишків сільськогосподарського виробництва.

**Мета роботи** – визначити закономірності взаємодії робочих органів грануляторів з подрібненою рослинною сировиною та шляхи вдосконалення конструкції грануляторів. Це дозволить підвищити ефективність процесу виробництва паливних гранул з рослинної сировини.

### **Завдання роботи:**

- 1) здійснити аналіз відомих процесів виробництва паливних гранул з рослинної сировини шляхом використання грануляторів;
- 2) розробити математичну модель процесу взаємодії робочих механізмів гранулятора, а саме пресувальних роликів та матриці з сировиною;
- 3) розробити конструкцію експериментального обладнання для дослідження процесу гранулювання рослинної сировини;

4) встановити закономірності впливу фізико-механічних властивостей сільськогосподарської рослинної сировини на параметри процесу її гранулювання та перевірити адекватність розробленої математичної моделі.

**Предмет дослідження** – закономірності взаємодії робочих механізмів гранулятора з рослинною сировиною.

**Об'єкт дослідження** – процес виробництва паливних гранул з сільськогосподарської рослинної сировини з використанням грануляторів.

**Методи дослідження.** Дослідження виконані з використанням законів теоретичної механіки, методів математичної статистики та теорії пластичності. Експериментальні дослідження виконані з використанням існуючих методик та наявного на факультеті інженерії та енергетики устаткування та вимірювального обладнання. Достовірність наукових положень, представлених в кваліфікаційній роботі, підтверджена використанням апробованої методологічної бази дослідження, обґрунтованістю прийнятих допущень під час створення розрахункових моделей, високою відповідністю експериментальних даних результатам власних аналітичних досліджень і результатам, отриманим іншими авторами.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження:**

Результати кваліфікаційної роботи надруковано в збірниках праць «Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичних конференцій «Студентські читання – 2020». Житомир: Поліський національний університет, 2020, які проходили 5-6 березня та 26 жовтня 2020 року.

**Практичне значення отриманих результатів:**

- науково-обґрунтовані рекомендації щодо конструювання механізмів пресування гранулятора для виробництва паливних гранул з соломи-січки;
- запропонована конструкція гранулятора з матрицею і роликами, що відрізняється підвищеною жорсткістю та надійністю роботи;

**Структура та обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, кожен з яких включає три підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 40 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 35 арк.

## РОЗДІЛ. 1

# АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ З РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

### 1.1 Аналіз фізико-хімічних властивостей сировини для виробництва паливних гранул

Технологія виробництва паливних гранул з рослинних залишків с.-г. виробництва набула широкого впровадження. Гранулами називають частинки екструдованої подрібненої рослинної сировини, як правило циліндричної форми, довжина яких приблизно вдвічі більша за діаметр [1–5, 8].

Процес гранулювання здійснюється шляхом безперервного пресування подрібненої сировини через отвори в штампі діаметром від 6 до 8 мм. [4] Утворюються довгі витягнуті гранули круглого поперечного перерізу, які відрізаються в розмір 20...30 мм. Максимальний діаметр гранул може сягати 25 мм (один дюйм) [6]. Під дією тиску та високих температур частинки сировини з'єднуються між собою [10]. Традиційний процес гранулювання включає наступні етапи: попередня обробка (сушіння, подрібнення, кондиціювання); виробництво гранул (стиснення сировини під дією високих температур); остаточна обробка (охолодження, зберігання) [11–14].

З метою виробництва якісних гранул з високою механічною міцністю та паливними характеристиками потрібно вдало поєднати ряд факторів таких як фізико-хімічні параметри сировини, технічні параметри обладнання для гранулювання, умови підготовки сировини до обробки та умови зберігання готової продукції [9]. Техніко-технологічні параметри процесу гранулювання впливають на ступінь міцності зв'язків між частинками гранул [15–17]. Достеменно природа цих зв'язків не досліджена. Зв'язки можуть бути ковалентними чи нековалентними, водневими, зумовленими силами Ван-дер-Ваальса чи мати гідрофобну природу [18]. Морфологія частинок також відіграє важливу роль, оскільки може протікати процес механічного зчеплення, під час якого поверхневі структури «зчіплюються» одна з одною [19–20]. Крім того,

фізико-хімічні параметри сировини можуть змінюватися в процесі гранулювання, тобто під дією високих температур деякі компоненти сировини можуть частково оплавлятися та твердіти при охолодженні, набуваючи скловидної форми [21, 22]. Дія високої температури спричиняє біохімічні модифікації молекул, що, в свою чергу, погіршує паливні властивості гранул [23]. Отже, хіміко-механічний зв'язок між частинками сировини в процесі гранулювання є складним для дослідження [24, 25]. Дослідження [26–28] свідчать про недостатність знань щодо впливу фізико-хімічних параметрів сировини та параметрів процесу гранулювання на ступінь міцності механічних зв'язків між частинками гранули [24, 25].

Однією з причин, чому досі не встановлено природу міцних механічних зв'язків між частинками сировини в гранулі, є різноманітність рослинної сировини за хімічним складом [26]. Один із способів пояснити природу механічних зв'язків за хімічними властивостями рослинної сировини представлено в [27], де сировина поділяється на дві категорії – та, що містить високомолекулярні та низькомолекулярні сполуки. Категорія високомолекулярних сполук включає лігнін, полісахариди та білки. До низькомолекулярних належать органічні та неорганічні речовини, де органічні включають екстрактивні речовини, такі як жир, віск та дубильні речовини, а неорганічні – зольні речовини [29, 30].

Дослідження [31–32] показали, що є відмінності в групі геміцелюлоз, оскільки ксилани мають більш гнучкі ланцюги ніж глюкоманани. Компоненти з низькою молекулярною вагою, особливо неорганічні, відіграють менш важливу роль у визначенні механічних властивостей гранул, однак іони кальцію можуть переносити властивості карбоксильних кислот полісахаридів, а неорганічні компоненти відіграють негативну роль, перетворюючись на попел [38]. Однак, органічні речовини в сировині заважають іншим речовинам зв'язуватися. В залежності від вмісту органічних речовин в сировині і їх виду вони можуть як заважати так і сприяти утворенню механічних зв'язків в гранулах [35]. Наприклад віск може збільшувати адгезивні та когезивні сили за рахунок ефекту «заповнювання» через свою пластичність, однак ця властивість може



перешкоджати встановленню міцних водневих та Ван-дер-Ваальсових зв'язків між полісахаридами [26]. Встановлено, що міцність гранул зменшується із збільшенням кількості екстрактивних речовин у сировині. Одним із методів покращити процес гранулювання є додавання зв'язувальних речовин [22].

У камері пресування сировина затягується між пресувальними роликками та матрицею, що обертається, потім продавлюється у радіальні отвори матриці, де під дією високого тиску здійснюється процес формування гранул [33]. Гранули, які під дією тиску видавлюються з отворів, стикаються з нерухомим ножом і зрізуються (поворотом ножа на осі регулюється довжина гранул) [40].

Канали складаються з вхідних отворів конічної форми, активної частини каналів, де відбувається процес пресування сировини, та неактивної частини з великим діаметром [33]. Неактивна частина забезпечує потрібну товщину стінок матриці і, як наслідок, її високу міцність. Силами тертя в активній частині каналу створюється тиск, який рівний по величині і протилежний за напрямком тиску, з яким діють роликові колеса на сировину [36]. Це забезпечує робочі параметри процесу, необхідні для виробництва високоякісних гранул. Довжина активної частини каналу називається довжиною стиснення, а її розміри залежать від фізико-хімічних параметрів сировини [34]. Коли гранула збільшується в довжину зворотний тиск зростає в геометричній прогресії. Робоча температура матриці становить  $100...130^{\circ}\text{C}$ , а тиск –  $115...300$  МПа. Отже, важливо знати механізм створення тертя та протитиску для різних видів сировини [33]. Використання гранулятора – це контрольований спосіб експериментальної перевірки ступеня стиснення сировини залежно від температури матриці, часу перебування сировини в активній зоні, тиску тощо. Також це спосіб вимірювати силу тертя та енергію під час виробництва гранул.

## **1.2 Аналіз конструкцій обладнання та технологічного процесу виробництва паливних гранул з рослинної сировини**

Вимоги до параметрів виробленого продукту визначають геометрію робочого простору механізму пресування сировини і технологічні вимоги щодо попередньої підготовки рослинної сировини до процесу гранулювання. Вибір

механізму обумовлений вимогами до напружено-деформованому стану сировини, що пресується, після її ущільнення під дією тиску, рівномірно розосередженого з усіх сторін, до стану, коли об'ємною деформацією можна нехтувати. Схеми механізмів пресування з циліндричними робочими органами наведені на рис. 1.1 [33].

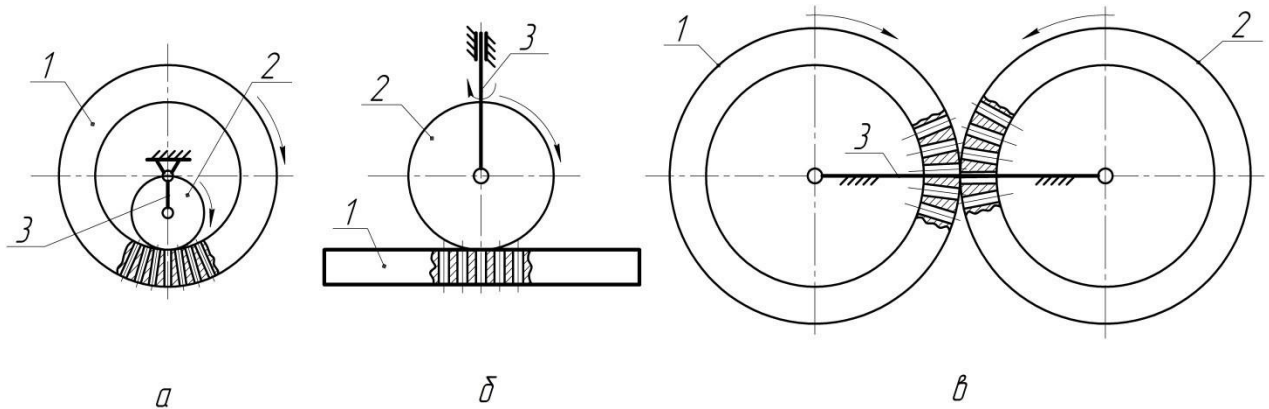


Рис. 1.1. Схеми механізмів пресування з циліндричними робочими органами [33]: *a* – робочі механізми з внутрішнім контактом; *б* – з плоскою матрицею; *в* – робочі механізми із зовнішнім контактом

1 – матриця; 2 – ролик ущільнюючий; 3 – водило роликів ущільнюючих

Матриця 1 – це деталь, яка густо перфорована формуючими порожнинами – філь'єрами [4]. Сировина, що пресується, переміщаючись по філь'єрам, утворює гранули. Гранули, як правило, мають циліндричну форму, а їх довжина у декілька разів більша за діаметр. Шар сировини, що обробляється, дотичною напругою на поверхнях контакту пресувального ролика 2 та матриці 1 зтягується в звужуючу по радіальній висоті зону у напрямку швидкості обертання матриці при її прямому чи оберненому русі [6].

Як результат, сировина, що обробляється, починає відставати від початкового положення, в якому вона перебувала до контакту з пресувальним роликом. Частина робочого простору, яку займає сировина, що пресується, називається зоною відставання. Зона відставання межує із зоною витискання сировини в радіальному перерізі, де нормальна радіальна напруга в оброблюваній сировині досягає величини, при якій починається її випресовування у філь'єри [6].

Зона витискання оброблюваної сировини у філь'єри граничить із зоною випередження в радіальному перерізі, де нормальна радіальна напруга в оброблюваній рослинній сировині досягає величини, при якій припиняється процес випресовування сировини у філь'єри [10]. При цьому оброблювана сировина починає випресовуватися в сторону перерізу площини між роликком і матрицею з мінімальною висотою, і швидкість руху шару оброблюваної сировини перевищує швидкість руху контактної поверхні матриці [10].

Отже, процес гранулювання оброблюваної рослинної сировини здійснюється шляхом її затягування в зону витискання поверхнями робочих механізмів. В процесі гранулювання пресований матеріал рухається по філь'єрах – «поршнеподібним» рухом, коли пластичні деформації є незначними порівняно з переміщенням подрібненої рослинної сировини вздовж філь'єри [29]. В даному випадку енергоємність процесу пресування є меншою за енергоємність шнекових механізмів пресування за рахунок менших пластичних деформацій оброблюваного матеріалу, однак величина тиску, який рівномірно діє з усіх сторін, є більшою [18]. Зменшення величини тиску, який рівномірно діє з усіх сторін, можна досягти шляхом збільшенням вмісту добавок-пластифікаторів в оброблювальну сировину, які одночасно є змащувальним матеріалом для поверхні філь'єри. Такий технологічний прийом зменшує енергоємність процесу пресування. Добавки-пластифікатори також зменшують крихкість вироблених гранул. Отже, якщо для виготовлення гранул достатньо обмежитися величиною тиску, який рівномірно діє з усіх сторін, тоді достатньо застосувати механізм пресування з циліндричними робочими механізмами [18].

### **1.3. Аналіз досліджень впливу конструкційних параметрів механізму пресування на параметри процесу гранулювання рослинної сировини**

Аналітичні дослідження, в яких розглядається взаємодія оброблюваної сировини з робочими органами механізму пресування, містить різні рішення задачі математичного опису зазначеного технологічного процесу, які відрізняються реологічними моделями середовища, яке гранулюється.

Основним параметром, що визначає величину напруги в сипкому середовищі, яке пресується в замкнутому вісесиметричному просторі, є коефіцієнт бічного тиску  $\xi$ , пов'язаний з осьовою нормальною напругою  $\sigma_z$  і радіальною нормальною напругою  $\sigma_r$  залежністю [37]:

$$\xi = \sigma_z / \sigma_r, \quad (1.1)$$

Параметр  $\xi$  є безрозмірним, змінним і залежить від величини гідростатичного тиску. Для певних інтервалів значень напруги він є постійним.

В роботі [37] представлено залежність границі текучості стиснутого зразка гранули і коефіцієнта поперечної деформації від гідростатичного тиску. Границя текучості сировини  $\sigma_T$  пов'язана з тиском  $\sigma_c$  залежністю [37]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} \cdot \exp(\beta \cdot \sigma_c), \quad (1.2)$$

де  $\sigma_{T0}$  – границя текучості гранули при атмосферному тиску, МПа;

$\beta$  – коефіцієнт дії рівномірно розподіленого бічного тиску, МПа<sup>-1</sup>.

Для вираження дотичних напруг  $\tau$  на контактних поверхнях робочих органів гранулятора використовують закон Кулона [37]:

$$\tau = f \cdot \sigma_n, \quad (1.3)$$

де  $f$  – коефіцієнт поверхонь тертя при контакті;  $\sigma_n$  – нормальна напруга від спресованої сировини на контактній поверхні робочих органів. В дослідженні [37] коефіцієнт контактного тертя сировини по сталевій поверхні представлено у вигляді функції виду:

$$f = \frac{\tau_0}{\sigma_n} + f_1 + f_2 \cdot \sigma_n, \quad (1.4)$$

де  $\tau_0, f_1$  – постійні, які залежать від молекулярної взаємодії пресованого матеріалу і контактної поверхні;  $f_2$  – постійна, яка враховує деформаційну дію частинок пресованої сировини на пружну контактну поверхню.

В [37] також запропоновано на ділянці філь'єри, для якої справедливою є умова (1.3), прийняти наступну умову зв'язку між нормальною радіальною  $\sigma_r$  і осьовою  $\sigma_z$  напругою:

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_T. \quad (1.5)$$

В даному випадку справедливою є умова  $\sigma_c = \sigma_z$ .

Якщо на контактній поверхні філь'єри є ділянка, де величина напруги зсуву дорівнює граничній, умова (1.5) запишеться наступним чином [37]:

$$\sigma_r - \sigma_z = 0. \quad (1.6)$$

Обґрунтуванням використання теорії пластичності для описування процесу гранулювання в механізмах пресування з циліндричними робочими органами може служити "поршнеподібний" характер руху оброблюваної сировини у філь'єрі, коли на стінці філь'єри шари сировини, окрім тонкого шару, не перемішуються.

Під час гранулювання допустимі значення вологості і температури оброблюваної сировини обмежені допустимою консистенцією гранул.

#### **1.4. Висновки до розділу 1**

Відповідно до мети дослідження на основі проведеного огляду літературних джерел щодо сучасного стану засобів гранулювання і методів аналізу зазначеного процесу визначені наступні завдання роботи:

- 1) здійснити аналіз відомих процесів виробництва паливних гранул з рослинної сировини шляхом використання грануляторів;
- 2) розробити математичну модель процесу взаємодії робочих механізмів гранулятора, а саме пресувальних роликів та кільцевої матриці з сировиною;
- 3) розробити конструкцію експериментального обладнання для дослідження процесу гранулювання рослинної сировини;
- 4) встановити закономірності впливу фізико-механічних властивостей сільськогосподарської рослинної сировини на параметри процесу її гранулювання та перевірити адекватність розробленої математичної моделі.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ

В відомих конструкціях грануляторів процес виробництва гранул з рослинної сировини можна розглядати як систему, функціонально-структурне уявлення про яку описані диференціальними рівняннями рівноваги оброблюваної сировини, які відрізняються граничними умовами середовища взаємодії подрібненої сировини з робочими органами гранулятора [35, 37]. Це підсистема криволінійного клиноподібного простору між пресувальним роликком, матрицею і порожниною каналів філь'єр.

Канали філь'єр мають асиметричну форму порожнини. Диференціальні рівняння, що описують напружений стан рослинної сировини в підсистемі каналу філь'єри, залежно від форми порожнини змінюються, тому елементи цієї підсистеми співпадатимуть з окремими геометричними видами порожнини каналу філь'єри. Як правило ця порожнина є циліндричною, а вхідна порожнина має конічну форму або криволінійну твірну.

Поведінка рослинної сировини в умовах стиснутого напружено-деформованого стану описують їх параметри пластичного стану та пружні характеристики [37].

#### **2.1. Моделювання напруженого стану подрібненої рослинної сировини в каналі філь'єри**

Розташуємо циліндричну систему координат  $\theta, r, \varphi, z$  в каналі філь'єри циліндричної форми довжиною  $z_c$  з діаметром  $D$ . Початок координат має місце у вихідному перерізі каналу. В напрямку вхідного отвору направлена вісь  $z$ . Осьовий переріз каналу філь'єри представлено на рис. 2.1. Оскільки об'ємні сили, які виникають при русі подрібненої рослинної сировини значно менші за напруги, що виникають в цій сировині, ми ними нехтуємо. Диференціальні рівняння руху оброблюваної сировини такі ж як диференціальні рівняння

рівноваги. Припустимо, що дотичні напруги досягають максимального значення  $\tau$  на контактній поверхні каналу філь'єри, а нормальні осьові напруги  $\sigma_z$  є постійними по площині поперечного перерізу каналу філь'єри.

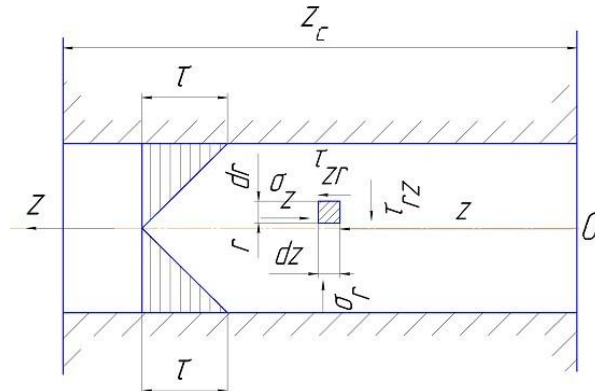


Рис. 2.1. Напруги, що діють в рослинній сировині, в каналі філь'єрів

В [41] представлено диференціальне рівняння напруженого стану оброблюваної сировини при пластичній течії в циліндричній порожнині:

$$d\sigma_z/dz - 4\tau/D_{кф} = 0. \quad (2.1)$$

У рівнянні (2.1) враховано, що напруги в оброблюваній сировині будуть стискаючими вздовж усієї порожнини філь'єри і мають додатні значення. Цим залежність (2.1) відрізняється від аналогічного рівняння, представленого в інженерній теорії пластичності [41]. Початкові умови до розв'язку диференціального рівняння (2.1) на виході з каналу філь'єри наступні:

$$z = 0, \sigma_r = \sigma_{T1}, \sigma_z = 0. \quad (2.2)$$

Значення напруг (2.2) відповідають граничному стану оброблюваної сировини. Особливістю напруженого стану оброблюваної рослинної сировини в початковий момент руху за умов такого режиму пресування є умова [41]:

$$\sigma_z > \sigma_r = \sigma_\theta. \quad (2.3)$$

Із співвідношення (2.3) витікає, що величина тиску  $\sigma_p$ , рівномірно діючого з усіх сторін, в оброблюваній сировині, визначена напругою  $\sigma_r$ :

$$\sigma_p = \sigma_r. \quad (2.4)$$

Інтенсивність нормальної напруги  $\sigma'$  у будь-якому поперечному перерізі каналу циліндричної форми за цього режиму пресування складатиме:

$$\sigma' = \sigma_z - \sigma_r. \quad (2.5)$$

За умовою Мізеса пов'яжемо між собою інтенсивність нормальної напруги  $\sigma'$  з границею текучості рослинної сировини  $\sigma_T$ . Для описання залежності границі текучості від дії бічного рівномірно розподіленого тиску скористаємося полігональною апроксимацією. Функція зміни границі текучості залежно від величини тиску на  $k$ -му відрізку складатиме:

$$\sigma_T = \sigma_{T(k-1)} + \delta_k(\sigma_r - \sigma_{r(k-1)}), \sigma_{r(k-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{rk}. \quad (2.6)$$

$$\delta_k = (\sigma_{Tk} - \sigma_{T(k-1)}) / (\sigma_{rk} - \sigma_{r(k-1)}). \quad (2.7)$$

З урахуванням рівнянь (2.5) і (2.6) запишемо диференціальне рівняння:

$$\tau = \tau_T = \sigma_T / \sqrt{3} \rightarrow \frac{d\sigma_r}{dz} - \frac{4\tau}{(1+\alpha_k)D_{\text{кф}}} = 0, \sigma_{r(k-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{rk}. \quad (2.8)$$

Дотична напруга подрібненої рослинної сировини на контактній поверхні циліндричного каналу філь'ери визначається залежністю  $\sigma_n = \sigma_r$ .

Скористаємося припущенням про лінійну залежність коефіцієнта тертя від радіальної напруги  $\sigma_r$ , тоді запишемо:

$$\mu = \mu_{k-1} + \theta_k(\sigma_r - \sigma_{r(k-1)}), \sigma_{r(k-1)} \leq \sigma_r \leq \sigma_{rk} \quad (2.9)$$

$$\theta_k = (\mu_k - \mu_{(k-1)}) / [\sigma_{rk} - \sigma_{r(k-1)}]. \quad (2.10)$$

Граничне значення нормальної напруги рослинної сировини на стику двох площин контактної поверхні в точці  $b$  визначається рівнянням неперервності дотичних напруг і нормальних осьових напруг:

$$\mu\sigma_{rb} = \tau_T(\sigma_{zb}). \quad (2.11)$$

Разом з початковими умовами на виході з циліндричного каналу філь'ери (2.2) вираз (2.5) показує, що рослинна сировина поблизу вихідного перерізу каналу знаходяться в пружному стані. Визначимо напругу в цій частині каналу, зробивши припущення, що границя текучості має сталі значення, а коефіцієнт контактного тертя змінюється лінійно на усій довжині пружної ділянки ( $k=1$  у формулі (2.9)). Для пружного тіла, яке знаходиться в умовах об'ємно-напруженого і об'ємно-деформованого станів, відносна радіальна деформація з напругами пов'язана законом Гука наступним чином:

$$\varepsilon_r = [\sigma_r - \nu(\sigma_z + \sigma_\theta)] / E \quad (2.12)$$



Отже пружна радіальна деформація рослинної сировини для вихідного перерізу циліндричного каналу філь'ери з умов (2.2) і (2.3) матиме вигляд:

$$z = 0, \quad \varepsilon_{r1} = \sigma_{T1} \cdot (1 - \nu)/E. \quad (2.13)$$

На усій довжині ділянки пружного стискування рослинної сировини в циліндричному каналі відносні радіальні деформації рівні між собою і становлять:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_{r1} \quad (2.14)$$

Підставляючи в рівняння (2.14) вираз (2.12), (2.13) і враховуючи співвідношення (2.3), після перетворень отримаємо залежність, яка пов'язує нормальну осьову і радіальну напруги в пружній ділянці:

$$\sigma_r = \sigma_{T1} + \sigma_z \cdot \nu/(1 - \nu), \quad (2.15)$$

Для знаходження розподілу нормальної напруги на ділянці пружного стискування рослинної сировини в циліндричному каналі скористаємося диференціальним рівнянням (2.1). Підставляючи в нього вирази (2.9) і (2.15), після задоволення граничних умовам (2.2) та інтегрування отримаємо:

$$\sigma_r = \left( (\mu_0 - \theta_1 \sigma_{T1}) / \left( \frac{\mu_0}{\sigma_{T1}} \exp \left[ \frac{4}{D_{\text{кф}}} (\theta_1 \sigma_{T1} - \mu_0) \frac{\nu}{1-\nu} \right] \right) \right) - \theta_1. \quad (2.16)$$

У рівнянні (2.16) в зв'язку з незначною величиною напруги стискування, яка рівномірно діє з усіх сторін, прийнято, що границя текучості є сталою величиною, рівною  $\sigma_{T1}$ . Також припустимо, що коефіцієнт тертя знаходиться в межах першої ділянки полігональної апроксимації для усієї області пружного стискування. Напруга  $\sigma_z$  для пружної області представлена рівнянням (2.15).

Для визначення межі між областю пружно-пластичних деформацій рослинної сировини аграрного походження в циліндричному каналі і областю пружно-стиснутого стану рослинної сировини застосуємо умову початку її пластичної течії (2.5) і застосуємо зв'язок між компонентами напруги та відносною радіальною деформацією, який визначається за рівнянням (2.12).

$$z = z_a, \quad \varepsilon_{ra} = (\sigma_{ra}(1 - 2\nu) - \nu \sigma_{T1})/E \quad (2.17)$$

Підставляючи вирази (2.12) та (2.13) в залежність (2.14) і враховуючи співвідношення (2.3), після перетворень матимемо:

$$\sigma_{ra} = \sigma_{T1}/(1 - 2\nu). \quad (2.18)$$

Встановити границю між пластичною і пружною областями напруженого стану сировини можна шляхом підстановки в рівняння (2.18) рівняння (2.16) і визначивши граничне значення нормальної радіальної напруги  $\sigma_{ra}$ :

$$z_a = \frac{D_{\text{кф}}(1-\nu)}{4(\theta_1\sigma_{T1}-\mu_0)\nu} \ln \left[ \left( \frac{\mu_0-\theta_1\sigma_{T1}}{\sigma_{ra}} + \theta_1 \right) \frac{\sigma_{T1}}{\mu_0} \right] \quad (2.19)$$

Для області пружно-пластичного стану рослинної сировини в циліндричному каналі філь'єри диференціальне рівняння напруженого стану (2.8) з врахуванням (2.9) і граничних значень (2.18), (2.19) має розв'язок при:

$$z = z_{k-1}, \quad \sigma_r = \sigma_{r(k-1)} \quad (2.20)$$

Отримаємо:

$$\sigma_r = \frac{(\mu_{k-1}-\theta_k \sigma_{r(k-1)}) \exp \left[ (1+\alpha_k)(\mu_{k-1}-\theta_k \sigma_{r(k-1)}) \frac{4}{D_{\text{кф}}} (z-z_{k-1}) \right]}{D_{\text{кф}}-\theta_k \exp \left[ (1+\alpha_k)(\mu_{k-1}-\theta_k \sigma_{r(k-1)}) \frac{4}{D_{\text{кф}}} (z-z_{k-1}) \right]} \quad (2.21)$$

Умова існування кожного розв'язку (2.21) визначається наступними значеннями  $z_{k-1} \leq z \leq z_k$ , де значення верхніх границь області існування рішень  $z_k$ :

$$z_k = \frac{D_{\text{кф}} \ln \left| \frac{\sigma_{rk}}{\sigma_{rk}\theta_k + \mu_{k-1} - \sigma_{r(k-1)}\theta_k} \right|}{4(1+\alpha_k)(\mu_{k-1} - \sigma_{r(k-1)}\theta_k)}. \quad (2.22)$$

Рішення (2.22) диференціального рівняння (2.8) існує до тих пір, поки осьова напруга не досягне значення  $\sigma_{zb}$ , яке визначається рівнянням (2.11). Верхня границя існування функції (2.21) на  $n$ -ділянці  $\sigma_{z(n-1)} \leq \sigma_{zb} \leq \sigma_{zn}$ :

$$\theta_n(1-\alpha_n)^2\sigma_{zb}^2 + \left[ (1-\alpha_n)(B-\theta_n A) - \frac{1}{\sqrt{3}}\alpha_n \right] \sigma_{zb} - A \left( B + \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = 0 \quad (2.23)$$

Для визначення  $n$ -ої ділянки слід послідовно підставити номери ділянок, починаючи з першої до отримання дійсного кореня рівняння (2.22).

Розглянемо напружений стан в циліндричному каналі філь'єри після дотримання вимоги (2.11). Умова переходу рослинної сировини в пластичний стан залишається незмінною, але оскільки на поверхні, перпендикулярній до однієї з осей координат, дотична напруга досягає граничної напруги зсуву  $\tau_T$ , після перетворень умова пластичності буде відповідати:

$$\sigma_z - \sigma_r = 0 \quad (2.24)$$

Розв'язок диференціального рівняння напруженого стану рослинної сировини сільськогосподарського походження в циліндричному каналі філь'єри (2.8) з врахуванням умови контактної тертя, зміни границі текучості рослинної сировини (2.6) і умови пластичності (2.24) після дотримання граничних умов на ділянці  $k=n$  при:

$$z = z_b, \sigma_z = \sigma_{zb} \quad (2.25)$$

формула прийме наступний вигляд:

$$\sigma_z = \frac{\sigma_{T(k-1)}}{\alpha_i} \left\{ \exp \left[ \frac{4\alpha_i}{\sqrt{3}D_{\text{кф}}} (z - z_{k-1}) \right] - 1 \right\} + \sigma_{z(k-1)}, \sigma_{z(k-1)} \leq \sigma_z \leq \sigma_{zk}. \quad (2.26)$$

Залежність розподілу напруги в циліндричному каналі філь'єри під час переходу оброблюваної сировини із стану спокою в рух наведені в Додатку А.

Межі існування кожного розв'язку (2.26) визначаються відповідно значеннями  $z_{(k-1)} \leq z \leq z_k$ . Значення кожної верхньої границі області існування рішень (2.26) визначається наступним методом:

$$z_k = \frac{\sqrt{3}D_{\text{кф}}}{4\alpha_k} \left\{ \ln \left[ \frac{\alpha_k}{\sigma_{T(k-1)}} (\sigma_z - \sigma_{z(k-1)}) \right] + 1 \right\} + z_k - 1. \quad (2.27)$$

## **2.2. Моделювання напруженого стану подрібненої рослинної сировини між робочими механізмами гранулятора**

Гранулятори використовують для виробництва гранул з рослинної сировини «сухим» способом. Конструкція пресувального механізму гранулятора з кільцевою матрицею дозволяє пресувати матеріал з різною консистенцією – від кормових дріжджів до подрібненої рослинної сировини сільськогосподарського походження [33, 37].

Під час пресування попередньо підготовлений рослинний матеріал потрапляє на внутрішню поверхню кільцевої матриці і подається в клиноподібну порожнину між матрицею і пресувальним роликом. Тут матеріал під дією тиску, який рівномірно діє з усіх сторін, екструдується у філь'єри матриці. Між роликом і матрицею завжди існує зазор [33]. Тому деяка частина матеріалу, що спресовується, залишається на внутрішній поверхні матриці, і пресований матеріал подається на цей шар. На контактній поверхні ролика

присутні нерівності у вигляді поглиблень, заповнених пресованим матеріалом. Таким чином, поверхні робочих органів покриті спресованим матеріалом. Це дозволяє зробити припущення про наявність граничної напруги зсуву шару рослинної сировини на контактних поверхнях робочих органів гранулятора [36]. Віднесемо пресувальний механізм до прямокутної системи координат  $Oxy$  (рис. 2.2) і до системи координат  $O_{sh}$  (рис. 2.3), причому:

$$s = \varphi \cdot r_1, \quad (2.28)$$

На схемі, зображеній на рис. 2.3, кільцева матриця з радіусом робочої поверхні  $r_1$ , перфорована радіальними філь'єрами, обертається з кутовою швидкістю  $\omega$  відносно водила. На її робочій поверхні розташовані пресувальні ролики з радіусом робочої поверхні  $r_2$ , що вільно обертаються. Пресований матеріал, який радіально (завдяки обертовому руху) подається на внутрішню поверхню матриці шаром висотою  $l_0$ , контактує з пресувальним роликом в точці з координатою  $m_0$  (при куті повороту матриці  $\varphi_0$ ), ущільнюється в клиноподібній порожнині між робочими механізмами і видавлюється через канали філь'єр. При цьому на робочі механізми гранулятора діють значні навантаження. Кут клину порожнини між матрицею і роликом  $\vartheta$  визначається радіусами матриці  $r_1$  і ролика  $r_2$ , які проходять через точку на поверхні ролика з радіальною висотою  $l$ , з поточною координатою  $s$  при куті повороту матриці  $\varphi$ .

Численними дослідженнями обґрунтовано характер пластичної течії сировини, що пресується, проти напрямку обертання робочих механізмів в зоні відставання, що примикає до входу в клиноподібної порожнини між матрицею і роликом. З боку контактної поверхні матриці на сировину, що пресується, діє дотична напруга  $\tau < 0$ . Пластична течія сировини, що пресується, у зоні випередження клиноподібної порожнини (ця зона примикає до перерізу з мінімальною висотою  $l_0$  з координатою  $m=0$ ) співпадає з напрямом руху робочих механізмів, тобто  $\tau > 0$ . Між зонами випередження і відставання розташована зона витискання в канали філь'єр сировини, що пресується. Зазначену зону характеризує поступове зменшення величини дотичної напруги

$\tau$  на контактних поверхнях робочих органів від максимальної величини (на границі із зонами випередження і відставання) до нульового значення (в нейтральному перерізі клиноподібної порожнини).

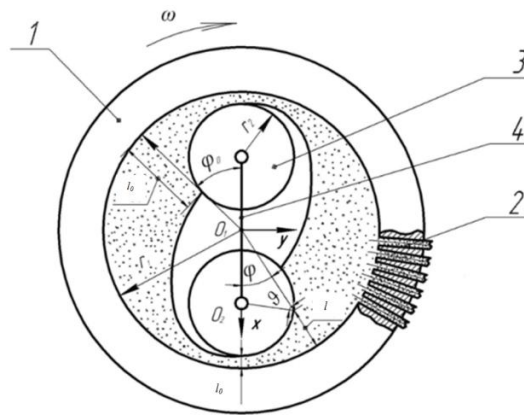


Рис. 2.2. Схема взаємодії оброблюваної сировини з робочими механізмами в механізмі пресування: 1 – матриця кільцева; 2 – філь'єра; 3 – ролик пресувальний; 4 – водило механізму пресування

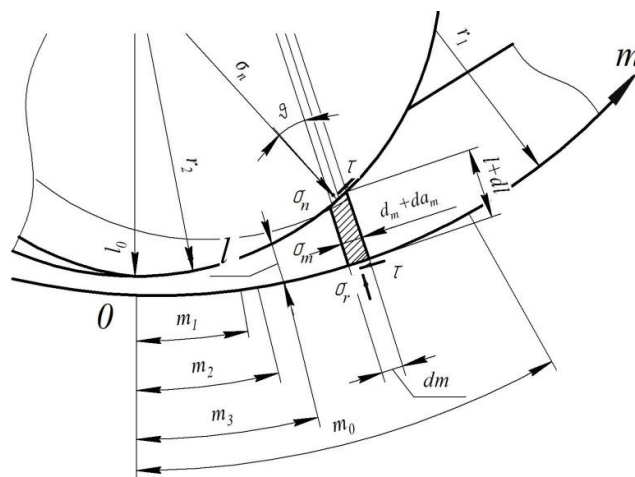


Рис. 2.3. Схема клиноподібної порожнини між матрицею і роликом

Припустимо, що в радіальних перерізах клиноподібної порожнини напружений стан подрібненої сільськогосподарської рослинної сировини є однорідним, а об'ємні сили настільки малими, що ними можна знехтувати. Тоді рівняння руху подрібненої сільськогосподарської рослинної сировини співпадають з рівняннями рівноваги.

Розглянемо рівновагу елементарної частинки пресованої рослинної сировини, виділеної двома нескінченно близькими радіальними перерізами

клиноподібної порожнини (рис. 2.3). На рис. 2.3 зазначено межі зон клиноподібної порожнини і її геометричні параметри.

В якості одновимірної математичної моделі процесу гранулювання використовуємо рівняння рівноваги. Напружений стан елементарної частинки рослинної сировини в усіх точках порожнини за умови її взаємодії з робочими органами прес-гранулятора можна описати рівнянням [2]:

$$d\sigma_m/dm - \tau(y)\Phi(n) = 0, \quad (2.29)$$

Значення  $\Phi(n)$  для клиноподібної порожнини між робочими механізмами:

$$\Phi(n) = \frac{1}{l \cdot t \cdot q \cdot \vartheta} \left( \frac{2r_1 - l}{r_1 - l} + tq^2\vartheta \right) \frac{dl}{dm}. \quad (2.30)$$

Радіальна висота  $l$  клиноподібної порожнини між роликком та матрицею:

$$l = r_1 - (r_1 - r_2 - l_a) \cos \frac{m}{r_1} - \sqrt{r_2^2 - (r_1 - r_2 - l_a)^2 \sin^2 \frac{m}{r_1}}. \quad (2.31)$$

Кут клину порожнини між матрицею і роликком  $\vartheta$  визначається:

$$\vartheta = \arcsin(\sin(m/r_1) (r_1 - r_2 - l_a)/r_2). \quad (2.32)$$

Припустимо, що на значення межі текучості  $\sigma_m$  впливає високий тиск  $\sigma_m$ , який діє з усіх сторін на елементарну частинку сировини:

$$\sigma_T = \sigma_{T(k-1)} + \alpha_k (\sigma_m - \sigma_{m(k-1)}), \quad \sigma_{m(k-1)} \leq \sigma_m \leq \sigma_{mk}, \quad (2.33)$$

$$\alpha_k = (\sigma_{Tk} - \sigma_{T(k-1)}) / (\sigma_{mk} - \sigma_{m(k-1)}). \quad (2.34)$$

В зонах випередження та відставання дотична напруга  $\tau$  на поверхнях контакту є рівною граничній напрузі зсуву елементарної частинки рослинної сировини  $\tau_T$ . Математична залежність для визначення дотичної напруги з врахуванням зв'язку між  $\sigma_T$  та  $\tau_T$  та напрямку дії  $\tau$ :

$$\tau_T = \sin(\tau) \frac{1}{\sqrt{3}} [\sigma_{T(k-1)} + \alpha_k (\sigma_m - \sigma_{m(k-1)})]. \quad (2.35)$$

Межі зони видавлювання  $m_1$  та  $m_3$  (рис. 2.3) визначені тиском в клиноподібній порожнині  $\sigma_m$ , який необхідний для запресовування подрібненої сировини в філь'ери. Тертя на поверхні контакту ролика та матриці виникає через нерівності, присутні на їх поверхнях. Припустимо, що це тертя частинок сировини між собою під дією граничної напруги зсуву  $\tau_T$ . Умова пластичності:

$$\sigma_r - \sigma_m = 0;$$

$$\sigma_m = \sigma_{m(k-1)} + \frac{\sigma_{T(k-1)}}{\alpha_k} \left[ \exp \left( \text{sign}(\tau) \frac{\alpha_k}{\sqrt{3}} \int_{m_{k-1}}^{m_k} \Phi dm \right) - 1 \right], \quad m_{(k-1)} \leq m \leq m_k \quad (2.36)$$

Границя ділянки  $m_k$  визначається за математичним виразом:

$$\int_{m_{k-1}}^{m_k} \Phi dm = \text{sign}(\tau) \frac{\alpha_m}{\sqrt{3}} \ln \frac{\sigma_T}{\sigma_{T(k-1)}}. \quad (2.37)$$

Інтегрування рівняння (2.37) здійснюється при границях зони випередження від 0 до  $m_1$  і зони відставання від  $m_0$  до  $m_3$ . Зона видавлювання містить нейтральний переріз з координатою  $m_2$ , де нормальна напруга  $\sigma_m$  є найвищою в клиноподібній порожнині, а дотична напруга  $\tau=0$ .

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} [\sigma_{T(k-1)} + \alpha_k (\sigma_m - \sigma_{m(k-1)})] \left( \frac{m - m_2}{m_3 - m_2} \right)^p, m_2 \leq m \leq m_3 \quad (2.38)$$

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} [\sigma_{T(k-1)} + \alpha_k (\sigma_m - \sigma_{m(k-1)})] \left( \frac{m_2 - m}{m_2 - m_1} \right)^p, m_1 \leq m \leq m_2 \quad (2.39)$$

де  $p$  – визначається емпіричним шляхом.

В зонах випередження та відставання формула матиме вигляд:

$$\sigma_m = \sigma_{m(k-1)} + \frac{\sigma_{T(k-1)}}{\alpha_k} \left\{ \exp \left[ -\frac{\alpha_k}{\sqrt{3}} \int_{m_{k-1}}^{m_k} \left( \frac{m - m_2}{m_3 - m_2} \right)^p \Phi dm \right] - 1 \right\}, m_2 \leq m \leq m_3 \quad (2.40)$$

Границю ділянки  $m_i$  визначимо за залежністю:

$$\int_{m_{k-1}}^{m_i} \left( \frac{m - m_2}{m_3 - m_2} \right)^p \Phi dm = -\frac{\sqrt{3}}{\alpha_k} \ln \frac{\sigma_{Tk}}{\sigma_{T(k-1)}} \quad (2.41)$$

Для рівняння (2.41) межа зони відставання складає від  $m_2$  до  $m_3$ .

$$\sigma_m = \sigma_{m(k-1)} + \frac{\sigma_{T(k-1)}}{\alpha_k} \left\{ \exp \left[ -\frac{\alpha_k}{\sqrt{3}} \int_{m_{k-1}}^{m_k} \left( \frac{m_2 - m}{m_2 - m_1} \right)^p \Phi dm \right] - 1 \right\}, m_1 \leq m \leq m_2 \quad (2.42)$$

Інтегральне рівняння для визначення координати  $m_2$ :

$$\int_{m_3}^{m_2} \left( \frac{m - m_2}{m_3 - m_2} \right)^p \Phi dm = -\int_{m_1}^{m_2} \left( \frac{m_2 - m}{m_2 - m_1} \right)^p \Phi dm \quad (2.43)$$

Рівняння (2.43) можна розв'язати чисельними методами.

### 2.3. Висновки до розділу 2

1. Розроблено математичну модель процесу взаємодії сировини з поверхнями контакту робочих механізмів гранулятора, яка описує напружений стан оброблюваної сировини на цих поверхнях.

2. Розроблена модель дозволяє визначити опір руху оброблюваної сировини в циліндричних філь'єрах з кінчними вхідними площинами, а також їх напружений стан в порожнині між пресувальними роликками та матрицею.

## РОЗДІЛ 3

# РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ГРАНУЛЮВАННЯ СОЛОМИ-СІЧКИ ПШЕНИЦІ

### 3.1. Матеріали та методи дослідження

Для проведення експериментальних досліджень було спроектовано гранулятор рис. 3.1, технічні характеристики якого представлені в Додаток Б.



Рис. 3.1. Експериментальна установка: 1 – електродвигун; 2 – привод живильника матриці, 3 – редуктор приводу шнека; 4 – захисний кожух нагрівних елементів; 5 – формувальна матриця, 6 завантажувальна горловина

Розробка експериментальної установки зводилася до виготовлення конструкції пристрою для вимірювання робочого зусилля механізму пресування з модулем обробки і зберігання інформації. Методика експерименту включала визначення як зовнішніх величин моделі, так і уточнення залежностей щодо внутрішніх величин моделі. Аналіз результатів передбачав статистичну оцінку достовірності отриманих результатів.

Особливістю конструкції гранулятора (рис. 3.1.) є те, що кільцева матриця з робочою поверхнею, яка перфорована радіальними філь'єрами, обертається відносно нерухомої осі, на якій на ексцентриковій втулці встановлений ролик, що вільно обертається. Конструкція забезпечує можливість регулювати розмір порожнини між матрицею та робочими



механізмами. Осі обертання ролика та матриці розташовані у вертикальній площині. Подрібнена рослинна сировина (солома), яка подається в зону пресування, контактуючи з пресувальним роликом, ущільнюються в клиноподібній порожнині між робочими механізмами і видавлюються через канали філь'єр. Для грануляторів суттєвим питанням є визначення оптимальних розмірів робочих поверхонь роликів і матриці та вибір підшипників.

Для визначення напруженого стану подрібненої соломи в зоні пресування для гранулятора (рис. 3.1) виготовлено пристрій для вимірювання зусилля, який було вмонтовано в пресувальний ролик, який містив наступні зміни: в обичайці ролика на внутрішній поверхні виконано наскрізний паз перерізом 18×6 мм. В пазу розташовано вимірювальний елемент, встановлений на опорній балочці у вигляді швелера, зі стінкою, оберненою до внутрішньої поверхні обичайки. Стінкою балочка опирається на зовнішні кільця підшипників пресувального ролика, тому стінка балочки, яка контактує із зовнішніми кільцями підшипників, виконана по радіусу зовнішньої посадочної поверхні підшипника. На поличках опорної балочки встановлені тензометричні пластини, на кожну з яких наклеєні фенолформальдегідним клеєм БФ2 тензодатчики 2ФКП-5-200 таким чином, що вісь вимірювання датчика спрямована в окружному напрямку обичайки. З метою полімеризації клею датчики були відповідно термооброблені. Тензометричні пластини виготовлені із сталі 45 ГОСТ 1050-88 товщиною 3 мм. Від тензодатчиків виведено провідники електричні МГТФ-0,56 до аналого-цифрового перетворювача через нормалізатори (рис. 3.2).

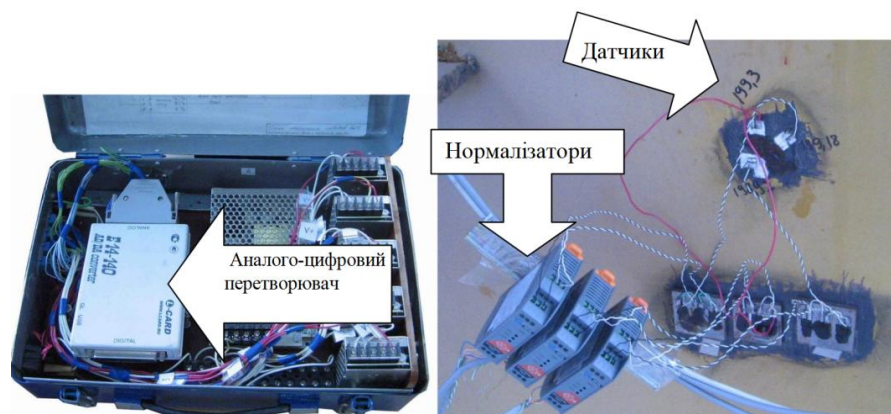


Рис. 3.2. Тензометрична станція (загальний вигляд)

У корпусі обичайки навпроти центру кожної пластини виконано три циліндричні отвори, в які з можливістю вільно переміщатися, вставлені штифти  $\varnothing 3$  мм. Відстані між осями отворів і від осей отворів до торця обичайки становлять 11 мм. Пресувальний ролик з вимірювальним пристроєм представлено в Додатку В.

Тарування тензометричної системи виконано шляхом навантаження тензометричних пластин на повіреному грануляторі марки ПГМ-0,5. Цифровим контактним термометром виміряно температуру поверхні пресувального ролика в процесі гранулювання подрібненої соломи і встановлено, що ця температура складає  $60^{\circ}\text{C}$ . Тому тарування датчиків здійснювали при температурі  $60^{\circ}\text{C}$ . Методики, які використовувалися при експериментальних дослідженнях, представлені в Додатку Г.

## **3.2. Результати експериментальних досліджень процесу гранулювання соломи-січки**

### **3.2.1. Дослідження відповідності математичної моделі процесу гранулювання експериментальним даним**

Обмеженням до використання математичної моделі до процесу гранулювання подрібненої соломи-січки є відсутність відомостей про значення їх граничної напруги зсуву. Під час проведення натурних досліджень намагалися визначити ці параметри на основі даних експериментальних вимірювань нормальної напруги на контактній поверхні пресувального ролика.

Запис даних з тензодатчиків здійснювали через 10 хвилин після виходу лабораторного стенду на встановлений робочий режим. Записи тензодатчиків свідчать, що в процесі пресування напруга, яка вимірюється, має постійний встановлений період. Явище прослизання пресувального ролика відносно кільцевої матриці слід віднести до стохастичних процесів. Оскільки явища флуктуації періоду не були зафіксовані, зроблено припущення, що прослизанням ролика відносно матриці можна нехтувати.

Зробимо оцінку величини протяжності області нормальної напруги на поверхні пресувального ролика. Протяжність епюри нормальної напруги на поверхні пресувального ролика, яка визначена експериментальним шляхом, перевищує половину довжини кола його робочої поверхні. Тому зроблено припущення про повне заповнення робочого простору механізму пресування рослиною сировиною і на основі цього припущення визначено положення координати мінімальної висоти шару сировини в механізмі пресування.

Нормальна напруга, за якою встановлюють опір філь'єри, і границі зон випередження та відставання із зоною витискання під час експериментів склали  $\sigma_{m3} = \sigma_{m1} = 28,4 \dots 28,8$  МПа. Значення координат  $m'_3$  і  $m'_1$  обраховані в програмі MS Excel і склали відповідно  $m'_3 = 0,077 \dots 0,134$  м,  $m'_1 = 0,0208 \dots 0,260$  м.

Адекватність математичної моделі в зонах відставання і випередження, тобто точний збіг діаграм аналітичної і експериментальної напруг, як визначення невідомих зовнішніх величин моделі  $\tau_{TO}$ ,  $\chi$  та  $l_a$  є одночасно ідентифікацією цієї математичної моделі. Цикл ідентифікації розпочинається з підбору величини  $\chi$ , яка визначає кривизну діаграми, потім підбирається величина  $\tau_{TO}$ , яка визначає верхню межу діаграми, а шляхом визначення параметру  $l_a$  вирівнюються положення верхньої межі діаграми. Цикл повторюється доки не отримуємо прийнятні значення збігу аналітичної та експериментальної діаграм. Величини  $\chi$   $\tau_{TO}$  є однаковими для зон випередження і відставання. Перевірку математичної моделі ілюструє рис. 3.3.

В результаті математичної обробки отримано наступні значення параметрів матмоделі  $\tau_{TO} = 1,35 \pm 0,18$  МПа;  $\chi = 0,02$  МПа<sup>-1</sup>;  $l_a = 0,004 \dots 0,0065$  м.

В результаті натурального експерименту отримано параметри граничної напруги зсуву соломи-січки вологістю 10% з коефіцієнтом достовірності апроксимації  $R^2 > 0,95$ , які доцільно використовувати при проектуванні нових або удосконаленні існуючих грануляторів [39]. За отриманими даними побудовано полігональну апроксимацію границі текучості пресованої соломи-січки від напруги в робочій зоні гранулятора (напруги стискання  $\sigma_p$ ).

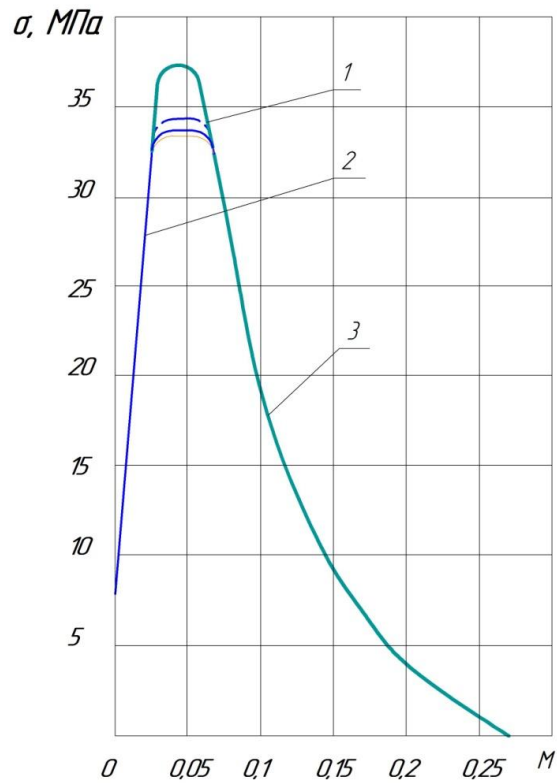


Рис. 3.3. Розподіл напруг в робочій зоні механізму пресування: 1 – значення напруги, отримані експериментально; 2, 3 – значення напруги для зон випередження та відставання відповідно, отримані аналітичним шляхом

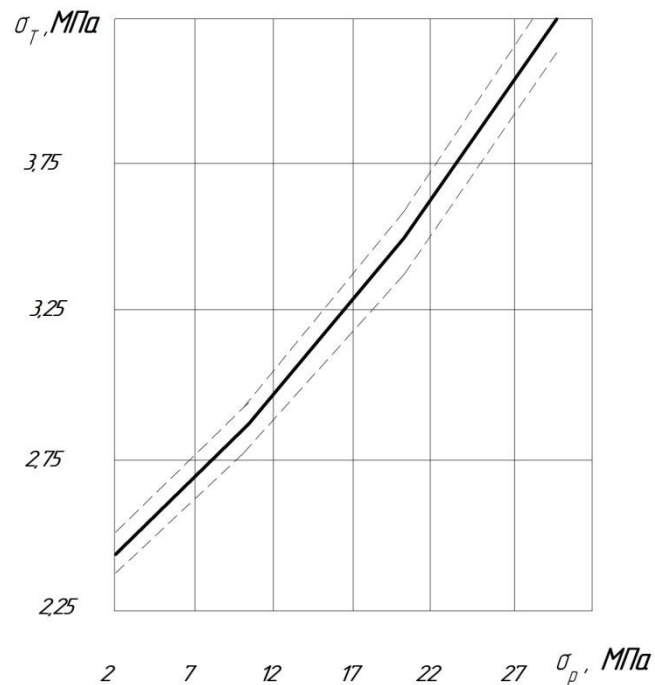


Рис. 3.4. Лінійна апроксимація залежності границі текучості соломи-січки від дії напруги стискання

Параметри залежності лінійної апроксимації границі текучості від напруги стискання соломи-січки, яка рівномірно діє з усіх сторін, представлено на рис. 3.4. Зазначимо, що під величиною напруги стискання  $\sigma_p$  приймаємо менше значення з діючих нормальних напруг:  $\sigma_r$  на початку руху соломи-січки у філь'єрі або  $\sigma_z$  для режиму безперервного пресування в каналі філь'єри. Отриманий результат дозволяє використати залежності для розрахунку напруженого стану оброблюваної сировини в робочих зонах гранулятора.

Графік границі текучості оброблюваної соломи-січки представлено на рис. 3.4 суцільною лінією. Пунктиром показано границі довірчого інтервалу цієї залежності.

### **3.2.2. Вплив параметрів робочих механізмів на енергоємність процесу виробництва гранул з соломи-січки**

Геометричні розміри робочих механізмів гранулятора чинять значний вплив на енергоємність процесу виробництва гранул [32]. Розглянемо, яким чином збільшення радіусу робочої поверхні матриці з величини, наявної у гранулятора ПГМ-05 до величини, прийнятої в проекті, впливає на енергоємність процесу виробництва гранул з соломи-січки [31, 32].

Під час здійснення обчислювального експерименту прийнято наступні припущення стосовно геометричних параметрів робочих механізмів (табл. 3.1).

Радіус робочої поверхні матриці для проектованого варіанту гранулятора вибрано довільно. При цьому відношення  $r_2/r_1$  однакове як у базового варіанту гранулятора, так і у проектованого. Значення параметру  $l_n$  прийнято за результатами натурного експерименту. Одинична ширина робочої зони  $b$  дозволяє не зв'язувати результат розрахункового експерименту з шириною робочої поверхні матриці. Значення параметрів  $m_{01} \dots m_{06}$  характеризують різний рівень заповнення робочої зони гранулятора.

Також прийнято припущення щодо фізико-механічних властивостей соломи-січки та параметрів її напруженого стану, які наведено в додатку Д.

Геометричні параметри робочих механізмів гранулятора

Параметр	Базовий гранулятор	Проектований	
Радіус робочої поверхні матриці $r_1$ , м	0,0985	0,120	
Радіус робочої поверхні ролика $r_2$ , м	0,0721	0,0876	
Відношення радіусів робочих поверхонь ролика та матриці $r_2/r_1$	0,73		
Відстань між робочими механізмами у разі припинення контакту з соломою-січкою $l_n$ , м	0,00615		
Мінімальна відстань між робочими механізмами $l_a$ , м	0,0038		
Одинична ширина робочої зони $b$ , м	0,012		
Координата початку контакту оброблюваної соломи-січки з робочими механізмами, м	$m_{06}$	0,26	0,31
	$m_{05}$	0,25	0,28
	$m_{04}$	0,20	0,27
	$m_{03}$	0,18	0,22
	$m_{02}$	0,15	0,19
	$m_{01}$	0,12	0,14

Щільність гранул визначалася за методикою, наведеною в додатку Г. Середня щільність гранул дорівнює  $\rho=1240\pm 80$  кг/м<sup>3</sup>.

Для визначення енергоємності процесу виробництва гранул потрібно визначити потужність сил корисного опору на одиничній ширині робочої зони. До робочої зони входять: зона відставання на відрізьку осі координат  $[m_3; m_0]$ , що відповідає відрізьку відстані між робочими механізмами  $[l_3; l_0]$ ; зона пресування на відрізьку осі координат  $[m_1; m_3]$ , що відповідає відрізьку відстані між робочими механізмами  $[l_1; l_3]$ ; зона випередження на відрізьку осі координат  $[0; m_1]$ , що відповідає відрізьку відстані між робочими механізмами  $[l_a; l_1]$ ; зона випередження на відрізьку осі координат  $[0; m_n]$ , яка відповідає відрізьку відстані між робочими механізмами  $[l_a; m_n]$ .

Знаючи координати визначимо довжину відрізьку  $m_n$ . Для базового варіанту гранулятора  $m_n=0,033$  м, а для проектованого варіанту  $m_n=0,0398$  м.

Математичний опис напруженого стану соломи-січки на відрізку  $[0; m_n]$  не розглядається. Припустимо, що гранична напруга зсуву на зазначеному відрізку  $\tau_k$  дорівнює середньому від значень на границях відрізку за рівнянням:

$$\tau_n = -\frac{1}{2}\tau_{TO} [\exp(\chi\sigma_a) + 1] \quad (3.1)$$

Знак мінус в рівнянні (3.1) визначає напрямок граничної напруги зсуву відносно осі координат. Потужність сил корисного опору на одиничній ширині цього відрізка розраховується за рівнянням, кВт:

$$N_n = 1000\tau_n m_n b \omega r_1. \quad (3.2)$$

Для базового варіанту  $N_n = -1,08$  кВт, для проектованого  $N_n = -1,35$  кВт. Знак мінус означає, що потужність передається від оброблюваного матеріалу до матриці гранулятора рослинної сировини. Для відрізка  $[0; m_l]$  першим завданням є визначити координати границі зони відрізка  $m_l$ . Зазначену границю визначаємо застосувавши залежності для визначення нормальної напруги [15] за умови, що крок інтегрування  $\Delta m_l = 0,001$  м. Чисельна інтеграція виконана методом трапецій. Для точного визначення координати  $m_l$  крок інтегрування, що містить напругу  $\sigma_l$ , пропорційно розділений для визначення координати цієї напруги. В результаті отримано для базового варіанту гранулятора  $m_l = 0,02133$  м, для проектованого варіанту  $m_l = 0,019132$  м. Розмір зазору між матрицею і роликком з координатою для базового гранулятора  $l_l = 0,004299$  м, для проектованого  $l_l = 0,0041083$  м.

Гранична напруга зсуву на поверхні контакту матриці для відрізка  $[0; m_l]$   $\tau_k$  на кожному кроці інтегрування встановлено за рівнянням:

$$\tau_k = -\tau_{TO} \exp\left(\frac{\sigma_{mk} + \sigma_{m(k+1)}}{2}\right), 1 \leq k \leq n, \sigma_{m(n+1)} = \sigma_1 \quad (3.3)$$

де  $\sigma_{mk}, \sigma_{m(k+1)}$  – нормальна напруга на початку та у кінці  $k$ -го кроку інтегрування.

Знак мінус у рівнянні (3.3) вказує на напрям граничної напруги зсуву відносно осі координат. Потужність сил корисного опору на одиничній ширині відрізка  $[0; m_l]$   $N_l$  в цьому випадку визначена виразом, кВт:

$$N_k = 1000b \omega r_1 \left\{ \Delta m_l \sum_{k=1}^{n-1} \tau_k + [m_l - \Delta m_l (n-1)] \tau_n \right\} \quad (3.4)$$

Для базового варіанту  $N_I = -0,598$  кВт, а для проектового  $N_I = -0,714$  кВт. Знак мінус означає, що потужність передається від оброблюваної сировини до матриці гранулятора. Для зони випресовування на відрізку осі координат  $[m_1; m_3]$  для простоти вважатимемо потужність сил корисного опору рівної нулю.

Для зони відставання на відрізку  $[m_1; m_3]$  першим завданням є встановлення координати границі зони відрізка  $m_3$ . Цю границю визначимо з використанням залежності для визначення нормальної напруги [37] при кроці інтегрування  $\Delta m_I = 0,005$  м. Чисельне інтегрування виконано методом трапецій. З метою точного визначення координати  $m_3$  крок інтегрування, що містить напругу  $m_3$ , пропорційно розділений для визначення координати цієї напруги. Результати розрахунків границі зони відставання  $m_3$  і відстані між робочими механізмами на цій границі  $l_3$ , наведені в таблиці 3.2. Гранична напруга зсуву на поверхні контакту матриці для  $[m_0; m_3]$   $\tau_k$  на кожному кроці інтегрування:

$$\tau_k = \tau_{TO} \exp \frac{\sigma_{mk} + \sigma_{m(k+1)}}{2}, 1 \leq k \leq n, \sigma_{m(n+1)} = \sigma_3 \quad (3.5)$$

Таблиця 3.2

## Геометричні параметри зони відставання

Базовий варіант гранулятора			Проектований варіант гранулятора		
$l_3$ , м	$m_3$ , м	$m_0$ , м	$l_3$ , м	$m_3$ , м	$m_0$ , м
0,006425	0,048667	0,132	0,007608	0,056108	0,157
0,007208	0,052047	0,173	0,008298	0,064877	0,204
0,007901	0,056933	0,189	0,008972	0,070145	0,229
0,008198	0,059012	0,209	0,009593	0,074098	0,259
0,009101	0,063876	0,253	0,010099	0,078674	0,285
0,009387	0,069208	0,281	0,010695	0,082961	0,327

Потужність сил корисного опору на одиничній ширині відрізка  $[m_0; m_3]$   $N_0$ , кВт:

$$N_0 = 1000b \cdot \omega r_1 \left\{ \Delta m_1 \sum_{k=1}^{n-1} \tau_k + [m_0 - m_3 - \Delta m_1 (n-1)] \tau_n \right\} \quad (3.6)$$

Повна потужність сил корисного опору на одиничній ширині робочої зони  $N$  виражена рівнянням:  $N = N_0 + N_1 + N_k$  (3.7)

Потужність сил корисного опору, енергоємність і продуктивність механізму пресування визначені на ширині робочої зони  $b=0,01$  м (рис. 3.5).



Мінімальна відстань між робочими механізмами  $l_a=0,004$  м. Кутова швидкість обертання матриці  $\omega_1=20,1$  рад/с;  $\omega_2=26,4$  рад/с. Щільність гранул  $\rho=1240\pm 80$  кг/м<sup>3</sup>. Гранична напруга зсуву при атмосферному тиску  $\tau_{TO}=1,35$  МПа. Коефіцієнт дії тиску, рівномірно розосередженого з усіх сторін  $\chi=0,02$  МПа<sup>-1</sup>. Нормальна напруга в перерізі механізму висотою  $l_a=7,8$  МПа.

Аналіз графічних залежностей 1 і 2 на рис. 3.5 свідчить, що пропорційне збільшення радіусів робочих механізмів гранулятора на 20 % призводить до збільшення продуктивності і зниження енергоємності процесу гранулювання. За умови однакової енергоємності продуктивність процесу зростає на 60 %. Із збільшенням енергоємності продуктивність знижується. При однаковій продуктивності енергоємність знижується на 32 %.

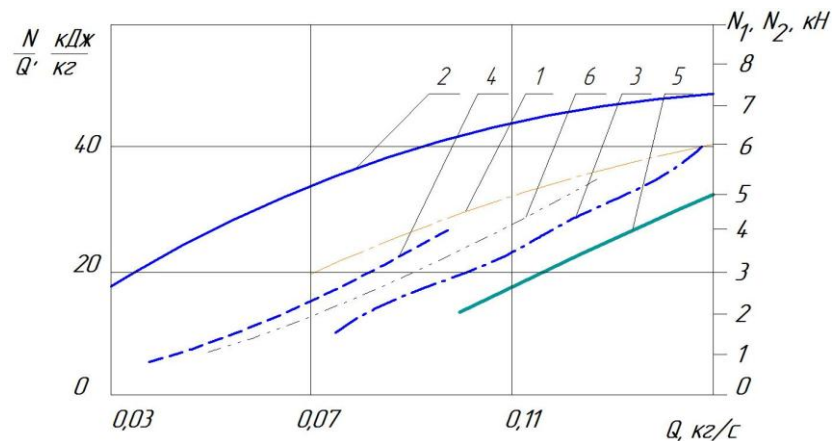


Рис. 3.5. Залежність енергоємності механізму пресування і потужності сил корисного опору від продуктивності: 1 –  $N/Q$   $r_1=0,0983$  м; 2 –  $N/Q$   $r_1=0,0881$  м; 3 –  $N_1=f(Q_1, \omega_1)$   $r_1=0,0983$  м; 4 –  $N_1=f(Q_1, \omega_1)$   $r_1=0,0881$  м; 5 –  $N_2=f(Q_2, \omega_2)$   $r_1=0,0983$  м; 6 –  $N_2=f(Q_2, \omega_2)$   $r_2=0,0881$  м.

### 3.3. Висновки до розділу 3

1. Експериментально встановлено значення граничної напруги зсуву і коефіцієнта тиску, рівномірно розподіленого з усіх сторін, для соломи-січки, які можуть бути використані при моделюванні процесу гранулювання.

2. Пропорційне збільшення радіусів робочих елементів механізму пресування призводить до зростання продуктивності і зниження енергоємності процесу гранулювання соломи-січки.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел свідчить, що до сьогодні не розроблено математичну модель взаємодії рослинної сировини робочими механізмами гранулятора з пресувальними роликами та матрицею.

2. Удосконалена математична модель процесу взаємодії рослинної сировини з поверхнями контакту робочих механізмів гранулятора дозволяє визначати техніко-економічні параметри процесу гранулювання.

3. Розроблена конструкція експериментального обладнання, що включає пресувальний ролик з вимірювальним пристроєм для визначення нормальної напруги на поверхнях контакту, що дозволяє досліджувати напружений стан подрібненої рослинної сировини в робочій зоні гранулятора для уточнення математичної моделі процесу гранулювання.

4. В результаті експериментальних досліджень отримано дані про граничну напругу зсуву для соломи-січки вологістю 10 % з коефіцієнтом детермінації  $R^2 > 0,95$ , які доцільно використовувати при проектуванні і модернізації грануляторів для рослинної сировини.

5. Збільшення радіусів робочих поверхонь пресувального ролика та матриці на 20 % знижує енергоємність процесу гранулювання на третину і більше, ніж у 1,5 рази збільшує продуктивність процесу.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Agar D. A., Rudolfsson M., Kalén G., Campargue M., Da Silva Perez D., Larsson S. H. A systematic study of ring-die pellet production from forest and agricultural biomass. *Fuel Processing Technology*. 2018. № 180. P. 47–55.
2. Alizadeh R., Lund P. D., Soltanisehat L. Outlook on biofuels in future studies: A systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. doi:10.1016/j.rser.2020.110326
3. Carone M.T, Pantaleo A, Pellerano A. Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of pellets from the pruning residues of *Olea europaea* L. *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35. P. 402–410.
4. Córdova-Noboa H. A., Oviedo-Rondón E. O., Ortiz A., Matta Y. et. al. Effects of corn kernel hardness and grain drying temperature on particle size and pellet durability when grinding using a roller mill or hammermill. *Animal Feed Science and Technology*. 2020. 114715. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114715
5. Ebadian M., van Dyk S., McMillan J. D., Saddler J. Biofuels policies that have encouraged their production and use: An international perspective. *Energy Policy*. 2020. Vol. 147. doi:10.1016/j.enpol.2020.111906
6. Frodeson S., Henriksson G., Berghel J. Pelletizing Pure Biomass Substances to Investigate the Mechanical Properties and Bonding Mechanisms. *BioResources*. 2018. Vol. 13, № 1. P. 1202–1222.
7. Gilvari H., de Jong W., Schott D. L. Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors – a review. *Biomass Bioenergy*. 2019. Vol. 120. P. 117–34.
8. Golub G., Kukharets S., Tsyvenkova N., Yarosh Ya., Chuba V. Experimental study into the influence of straw content in fuel on parameters of generator gas. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 5, № 8. P. 76–86. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.142159>
9. Golub G., Kukharets S., Yarosh Y., Kukharets V. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51, № 1. P. 93–100.

10. Kaliyan N., Morey R. V., Schmidt D. R. Roll press compaction of corn stover and perennial grasses to increase bulk density. *Biomass and Bioenergy*. 2013. Vol. 55. P. 322–330. doi:10.1016/j.biombioe.2013.02.031
11. Kaliyan N., Vance Morey R. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*. 2009. Vol. 33, № 3. P. 337–359.
12. Kashaninejad M., Tabil L. G, Knox R. Effect of compressive load and particle size on compression characteristics of selected varieties of wheat straw grinds. *Biomass Bioenergy*. 2014. Vol. 60. P. 1–7.
13. Kashaninejad M., Tabil L. G. Effect of microwave-chemical pretreatment on compression characteristics of biomass grinds. *Biosystems Engineering*. 2011. Vol. 108, № 1. P. 36–45.
14. Kirsten C., Lenz V., Schroder H. W., Repke J. U. Hay pellets – the influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production. *Fuel Processing Technology*. 2016. Vol. 148. P. 163–174.
15. Labbé R., Paczkowski S., Knappe V., Russ M., Wöhler M., Pelz S. Effect of feedstock particle size distribution and feedstock moisture content on pellet production efficiency, pellet quality, transport and combustion emissions. *Fuel*. 2020. Vol. 263. 116662. doi:10.1016/j.fuel.2019.116662
16. Malmgren A., Riley G. Biomass power generation. *Comprehensive Renewable Energy*. 2012. Vol. 5. P. 27–53.
17. Mani S., Tabil L. G., Sokhansanj S. Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses. *Biomass Bioenergy*. 2006. Vol. 30, Issue 7. P. 648–54.
18. Mostafa M. E., Hu S., Wang Y. et al. The significance of pelletization operating conditions: an analysis of physical and mechanical characteristics as well as energy consumption of biomass pellets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Vol. 105. P. 332–48. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.053>.
19. Pegoretti de Souza H., Muñoz F., Mendonça R. T. et. al. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 163. P. 1802–1816. doi:10.1016/j.renene.2020.10.065

20. Pradhan P., Mahajani S. M., Arora A. Production and utilization of fuel pellets from biomass: a review. *Fuel Process. Technology*. 2018. № 181. P. 215–232.
21. Pradhan P., Mahajani S. M., Arora A. Pilot scale production of fuel pellets from waste biomass leaves: Effect of milling size on pelletization process and pellet quality. *Fuel*. 2021. Vol. 285. 119145. doi:10.1016/j.fuel.2020.119145
22. Ramírez-Gómez Á. Research needs on biomass characterization to prevent handling problems and hazards in industry. *Particulate Science and Technology*. 2016. Vol. 34, Issue 4. P. 432–441.
23. Ruksathamcharoen S., Chuenyam T., Stratong-on et. al. Effects of hydrothermal treatment and pelletizing temperature on the mechanical properties of empty fruit bunch pellets. *Applied Energy*. 2019. Vol. 251. 113385.
24. Stasiak M., Molenda M., Bańda M., Wiącek J., Parafiniuk P., Gondek E. Mechanical and combustion properties of sawdust – Straw pellets blended in different proportions. *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 156. P. 366–375.
25. Stelte W., Holm J. K., Sanadi A. R., Barsberg S., Ahrenfeldt J., Henriksen U.B. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*. 2011. Vol. 90, Issue 11. P. 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
26. Theerarattananoon K., Xu F., Wilson J., Ballard R., Mckinney L., Staggenborg S. et al. Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem. *Industrial Crops and Products*. 2011. Vol. 33, Issue 2. P 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.11.014>.
27. Tymoszuk M., Mroczek K., Kalisz S., Kubiczek H. An investigation of biomass grindability. *Energy*. 2019. Vol. 183. P. 116–126.
28. Whittaker C., Shield I. Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 71. P. 1–11. doi:10.1016/j.rser.2016.12.119
29. Альтернативна енергетика : навч. посібник / М. Д. Мельничук, В. О. Дубровін, В. Г. Мироненко та ін. К. : Аграр Медіа Груп, 2011. 612 с.
30. Берин А. Л. Воловик А. Н., Потапенко Е. И. Влияние гранулометрического состава агломерата на его массовые и газодинамические характеристики. *Сталь*. 1979. № 11. С. 821–824.

31. Блюм Я., Гелетуха Г., Григорюк І., Дубровін В., Мироненко В. та ін. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива : монографія. К.: «Аграр Медіа Груп», 2010. 408 с.
32. Дубровін В. О., Корчемний М. О., Масло І. П., Шептицький О. та ін. Біопалива (технології, машини і обладнання). Київ : ЦТІ “Енергетика і електрифікація”. 2004. 256 с.
33. Братішко В. В. Узгодження конструкційних параметрів матриць гвинтових грануляторів кормів за тиском та пропускною здатністю. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в с.-г. вир-ві, галузеве маш. буд., автомат.* 2014. Вип. 27. С. 187–191.
34. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А., Матвеев Б. Ю., Жовнір М. М. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні. *Промислова теплотехніка.* 2006. Т. 28, № 2. С. 85–93.
35. Голуб Г. А., Кухарець С. М., Чуба В. В., Марус О. А. Виробництво і використання біопалив в агроєкосистемах. *Механіко-технологічні основи : монографія.* Київ : НУБіП, 2018. 254 с.
36. Голуб Г. А., Дубровін В. О. Інженерні проблеми виробництва і використання біопалив в АПК. *Вісник аграрної науки.* 2010. Вип. 10. С. 82–87.
37. Матвейкина Ж. В. Совершенствование технологии и параметров гранулятора для приготовления жиробогащенных кормов : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01. *Зерноград,* 2004. 148 с.
38. Калетник Г. М. Розвиток ринку біопалив в Україні : монографія. К. : Аграрна наука, 2008. 464 с.
39. Мельников С. В., Ацелкин В. Р., Роцин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л. : Колос, 1980. 168 с.
40. Червоткіна О. О., Олексієнко В. О., Фучаджи Н. О. Обґрунтування параметрів робочого органу гранулятора для отримання гранул на основі овочевої сировини. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.* 2013. Вип. 13, № 7. С. 57–62.
41. Унксов Е. П. Инженерная теория пластичности. М.: Машгиз, 1959. 328 с.

# ДОДАТКИ

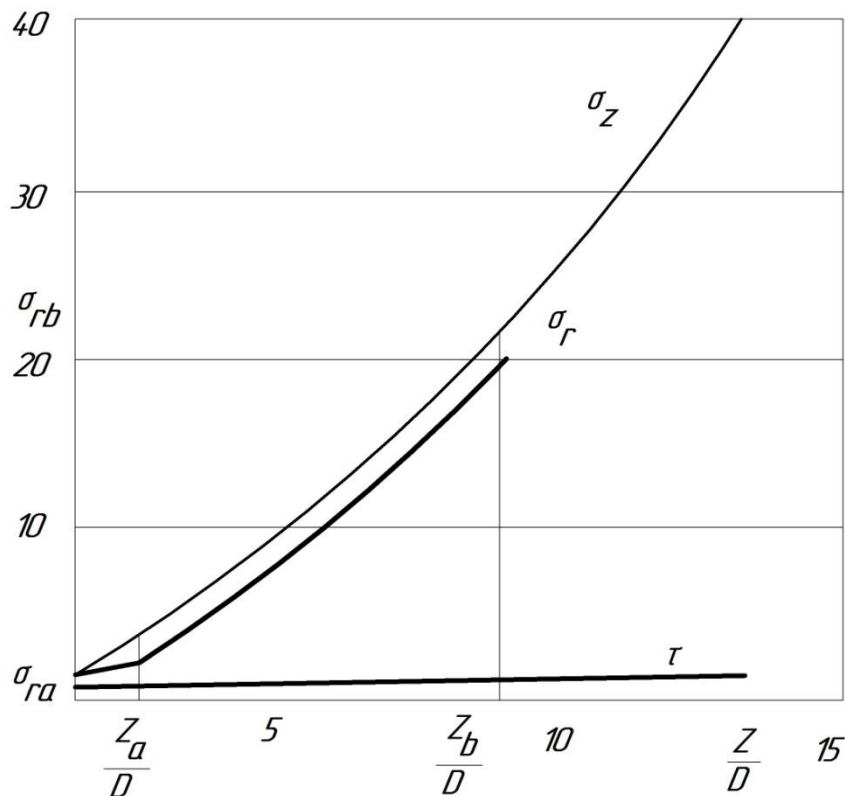


Рис. 1. Залежність параметрів напруженого стану на початку руху рослинної сировини в циліндричному каналі філь'єри

### Технічні характеристики гранулятора

Показник	Розмірність	Значення
Продуктивність на пелетах	кг	100
Діаметр філь'єр матриці	мм	8
Діагональ матриці: двостороння	мм	205
Довжина гранул	мм	3...35
Потужність двигуна	кВт	5,5
Робоча напруга	В	380
Частота обертання матриці	об/хв	250
Частота обертання двигуна	об/хв	1500
Кількість вальців	шт	2
Кількість обламуючих ножів	шт	1
Температура гранул	градусів	60
Ресурс матриці	тон	40
Ресурс роликів	тон	80
Габаритні розміри	мм	800×400×900





Рис. 1. Пресувальний ролик

#### Додаток Г

Методики, використані під час проведення експериментальних досліджень

##### *1. Характеристика сировини для виробництва паливних гранул*

В якості рослинної сировини використовували подрібнену соломку пшениці. На її основі виготовлено поліфракційну суміш: циліндричні стебла довжиною  $\sim 35$  мм з потовщеннями, з товщиною стінок  $0,5\text{--}1,1$  мм; циліндричні гладкі стебла довжиною  $15\text{--}35$  мм з товщиною стінок  $0,2\text{--}0,3$  мм і зовнішнім діаметром  $2\text{--}4$  мм; сплющені стебла довжиною  $20\text{--}40$  мм, з товщиною стінок  $0,3\text{--}0,5$  мм; дрібні розщеплені стебла довжиною  $10\text{--}30$  мм, з товщиною стінок  $0,15\text{--}0,25$  мм; дрібні розщеплені стебла довжиною  $\sim 8$  мм і товщиною стінок  $0,15$  мм; вміст усіх інших фракцій в суміші менше  $3\%$ . Хімічний склад соломи за сухою масою  $N=0,52\%$ ,  $C=44,43\%$ ,  $H=5,86\%$ ,  $O=44,43\%$ ,  $S=0,11\%$ , вміст золи  $6,5\%$ . Відносна вологість подрібненої рослинної сировини при гранулюванні складала  $10\%$ .

##### *2.1. Визначення відносної вологості подрібненої рослинної сировини*

Вологість соломи визначали за ГОСТ 13586.5-93. З ексикатора достали дві чисті просушені металеві бюкси і зважили їх з точністю до другого десяткового знаку. У кожному бюксі помістили  $5$  грам подрібненої соломи. Коли контактний термометр шафи СЭШ-3МЭ показував температуру  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$  в шафу ставили бюкси з навіскою із соломи. У вільні гнізда шафи ставили порожні бюкси.

Солому висушували впродовж 40 хвилин з моменту встановлення в шафі температури 130 °С. Після закінчення експозиції висушені бюкси доставали з шафи, закривали кришками і переносили в ексікатор до повного охолодження приблизно на 20 хвилин. Охолоджені бюкси зважували з точністю до 0,01 г і ставили в ексікатор до завершення розрахунків.

Початкову вологість подрібненої соломи  $W_1$  у відсотках обчислювали за формулою:

$$W_1 = 100(m_1 - m_2)/(m_1 - m_2) \quad (1)$$

де  $m$  – маса бюкси з кришкою, г;  $m_1, m_2$  – маса бюкси з кришкою і навіскою соломи до висушування та після висушування відповідно, г.

Допустима розбіжність результатів двох паралельних дослідів не повинна перевищувати 0,2 %. Масу сухої речовини партії соломи-січки  $M_2$  визначали за:

$$M_2 = M(1 - W_1), \quad (2)$$

де  $M$  – початкова маса партії соломи-січки.

Масу води  $M_3$ , кг, що додається для зволоження партії гранульованої соломи-січки до необхідної вологості визначали за формулою:

$$M_3 = M_2(W_2 - W_1)/(100 - W_2) \quad (3)$$

де  $W_2$  – необхідна відносна вологість партії гранульованої соломи %.

## 2. Визначення щільності гранул

Щільність вироблених гранул визначали піктометричним методом.

Для цього в мірний скляний циліндр 1-500-2 ГОСТ 1770-74 заливали 0,1 дм<sup>3</sup> води. Після чого циліндр з водою зважували на електронних терезах марки MWP-300h з точністю зважування 0,005 гр. Навіску з гранул масою близько 0,05 кг додавали в циліндр і фіксували зміну рівня вологи в циліндрі і покази терезів. Щільність гранул  $\rho$  визначали за формулою.

$$\rho = (m_2 - m_1)/(V_2 - V_1),$$

де  $V_2$  та  $V_1$  – об'єм води в циліндрі з навіскою з гранул і без навіски з гранул відповідно;  $m_2$  і  $m_1$  – маса циліндра з водою і навіскою з гранул та без навіски з гранул відповідно.

## Параметри напруженого стану та фізико-механічні властивості соломи-січки

№	Параметр	Позначення	Одиниці виміру	Значення параметру при вологості $W^p$	
				10 %	30 %
1.	Насипна щільність	$\rho$	кг/м <sup>3</sup>	145±9	154±9
2.	Кут природного ухилу	$\varphi_{пр.ух.сол ом}$	град	42±1	55±1
3.	Коефіцієнт тертя сировини металевою поверхнею камери	$\mu$		0,46±0,02	0,32±0,02
4.	Порозність	$\varepsilon$		0,61	0,54
5.	Уявна щільність	$\rho_{уяв.щіл}$	кг/м <sup>3</sup>	350±15	
6.	Еквівалентний діаметр	$d_e$	м	0,0035±0,0015	
7.	Найбільша ширина щілини, що створює склепіння	$x$	мм	122±1,2	
8.	Зольність	$A$	%	6,5±0,1	
9.	Насипна щільність золи	$\rho_{від}$	кг/м <sup>3</sup>	190±6,1	
10.	Коефіцієнт тертя золи металевою поверхнею	$\mu_{золи}$		0,38±0,02	
11.	Кут природного ухилу золи	$\varphi_{пр.ухил}$	град	28±1	
12.	Гранична напруга зсуву при атмосферному тиску	$\tau_{ГО}$	МПа	1,35	
13.	Коефіцієнт дії тиску, рівномірно розподіленого з усіх сторін	$\beta$	МПа <sup>-1</sup>	0,02	
14.	Кутова швидкість обертання матриці	$\omega$	рад/с	19,9	
15.	Нормальна напруга в соломі-січці на границі зони випередження із зоною випресовування	$\sigma_{н1}$	МПа	28,5	
16.	Нормальна напруга в соломі-січці на границі зони відставання із зоною випресовування	$\sigma_{но}$	МПа	28,5	
17.	Нормальна напруга в перерізі з мінімальною відстанню між робочими механізмами	$\sigma_a$	МПа	7,8	

Обчислення виконувалися з використанням пакету програм MS Excel.