

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Механіко – технологічний факультет

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри

охорони праці та біотехнічних систем у
тваринництві

(назва кафедри)

д.т.н., проф. Хмельовський В.С.

(підпис)

(ПІБ)

“ _____ ” _____ 2025 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**на тему «Обґрунтування виробничого процесу та параметрів брикетного преса з
розробленням засобів колективного захисту працівників»**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

Гарант освітньої програми

Д.т.н., професор
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Братішко В.В.
(ПІБ)

Керівник магістерської роботи

К.т.н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Єременко О.І.
(ПІБ)

Виконав

_____ (підпис)

Куліш А.О.
(ПІБ студента)

КИЇВ – 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Механіко – технологічний факультет**

**ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри**

охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві

д.т.н., проф. Хмельовський В.С.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (ПБ)
“ _____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
на виконання кваліфікаційної роботи магістранту**

Кулішу Артему Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)

Тема магістерської роботи «**Обґрунтування виробничого процесу та параметрів брикетного преса з розробленням засобів колективного захисту працівників**», затверджена наказом ректора НУБІП України від “13” 11 2024 р. № 2038

Термін подання завершеної роботи на кафедру 11 листопада 2025 р.
(число, місяць, рік)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи:

Аналітичні і статистичні огляди щодо розвитку твердопаливних виробництв. Технічна і технологічна документація на процеси виготовлення твердих видів палива. Науково-практичні розробки стосовно виробничого процесу та параметрів брикетного преса з розробленням засобів колективного захисту працівників.

Перелік питань, які потрібно розробити в розрахунково-пояснювальній записці

1. Аналіз сучасного стану проблеми та обґрунтування напрямків досліджень
2. Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів
3. Програма та методика проведення експериментальних досліджень
4. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування паливних брикетів
5. Засоби колективного захисту
6. Економічна ефективність використання обладнання для виготовлення паливних брикетів

Перелік обов'язкових слайдів презентації

Дата видачі завдання “20” грудня 2024 р.

Керівник магістерської роботи

(підпис) Єременко О.І.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

(підпис) Куліш А.О.
(прізвище та ініціали)

Зміст

Анотація.....	5
Вступ.....	7
1. Аналіз сучасного стану проблеми та обґрунтування напрямків досліджень.....	8
1.1. Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні.....	8
1.2. Основні види та характеристики твердого біопалива з рослинних відходів	8
1.3. Аналіз технологій комплексної безвідхідної переробки насіння олійних культур.....	11
1.4. Аналіз конструкцій установок для виготовлення паливних брикетів.....	16
1.5. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми обладнання для виготовлення паливних брикетів.....	20
1.6. Мета та завдання досліджень.....	22
1.7. Висновки з розділу.....	23
2. Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів.....	24
2.1. Обґрунтування глибини та радіуса скруглення основи каналу гвинта.....	24
2.2. Обґрунтування центра мас перерізу каналу гвинта	30
2.3. Обґрунтування довжини гвинтової лінії та площі внутрішньої поверхні робочої камери	36
2.4. Обґрунтування ширини та глибини каналу гвинта	39
2.5. Висновки з розділу.....	41
3. Програма та методика проведення експериментальних досліджень.....	42
3.1. Мета та програма експериментальних досліджень.....	42
3.2. Методика лабораторних досліджень процесу ущільнення лушпинної фракції макухи.....	42
3.3. Опис експериментального стенду для проведення досліджень.....	48
3.4. Методика експериментальних досліджень обладнання для виготовлення паливних брикетів.....	47

	4
3.5. Висновки з розділу.....	49
4. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування паливних брикетів.....	50
4.1. Результати лабораторних експериментальних досліджень.....	50
4.2. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів.....	51
4.3. Висновки з розділу.....	57
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	58
5.1. Вимоги безпеки під час виконання робіт на установці для виготовлення паливних брикетів.....	58
5.2. Розміщення обладнання в приміщенні	59
5.3. Розрахунок штучного освітлення приміщення.....	60
5.4. Розрахунок вентиляції приміщення.....	62
5.5. Висновки з розділу.....	66
6. Економічна ефективність використання обладнання для виготовлення паливних брикетів.....	67
6.1. Вихідні дані.....	67
6.2. Визначення економічної ефективності проектної машини.....	67
6.3. Висновки з розділу.....	71
Загальні висновки.....	72
Список використаних джерел.....	74

Анотація

Магістерська робота складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 57 найменувань. Основна частина роботи викладена на 79 сторінках, містить 27 рисунків та 16 таблиць.

В першому розділі «Аналіз сучасного стану проблеми та обґрунтування напрямків досліджень» проведено аналіз основних видів та характеристик твердого біопалива з рослинних відходів, з врахуванням аналізу конструкцій установок для виготовлення паливних брикетів обґрунтовано конструктивно-технологічну схему нового брикетувальника.

Другий розділ «Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів» включає математичну модель визначення конструктивних параметрів гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів.

Третій розділ присвячено програмі та методиці експериментальних досліджень.

В четвертому розділі приведені результати експериментальних досліджень обладнання для виготовлення паливних брикетів та обґрунтовані параметри його роботи.

Частина з охорони праці, розглядає питання з удосконалення організаційної та технічної сторони охорони праці при роботі на розробленій машині.

В розділі 6 приведена техніко-економічна оцінка та показана економічна доцільність прийнятих рішень.

Ключові слова: технологічний процес, установка, брикети, паливо.

Вступ

Сьогодні Україна залишається енергодефіцитною державою, яка покриває свої потреби в енергоспоживанні приблизно на 53%, імпортуючи при цьому 75% необхідного обсягу природного газу та 8 5% сирової нафти та нафтопродуктів [1].

Дефіцит первинних джерел енергії повинен активно покриватися ВДЕ. Так, в ЄС було прийнято директиву щодо активізації розвитку відновлювальної енергетики, відповідно до якої країни Євросоюзу до 2020 року зобов'язані збільшити частку відновлювальних джерел енергії при видобутку тепла та електроенергії до 20% [2]. Національним планом дій з відновлюваної енергетики до 2020 року встановлено загальну мету, згідно якої внесок ВДЕ до валового кінцевого енергоспоживання має досягти 11% в відповідності до зобов'язань України як члена Енергетичного співтовариства [3].

Біомаса є ваговою складовою ВДЕ та має великий потенціал, доступний для енергетичного використання – більше 27 млн. тон у. п./ рік. Шляхом залучення цього потенціалу до виробництва енергії в найближчій перспективі можна задовольнити 1315% потреби держави в первинній енергії [4].

Однією з причин низького значення відсотку залученої біомаси в енергоспоживанні країни та безпосередньо в аграрному комплексі є відсутність дешевого та енергоефективного обладнання.

Отже дослідження та розробки, направлені на розширення бази застосування біомаси в автономних енергетичних установках, удосконалення технологій виготовлення біопалива, зокрема з твердих рослинних відходів та композитів на їх основі, є актуальними для вирішення завдань заміщення природного газу альтернативними видами палива та важливими для забезпечення енергетичної безпеки України.

1. Аналіз сучасного стану проблеми та обґрунтування напрямків досліджень

1.1. Енергетичний потенціал рослинних відходів в Україні

Основними складовими потенціалу біомаси в Україні є первинні агровідходи (солома, відходи виробництва кукурудзи на зерно та соняшника), які залишаються на полях як побічні продукти після збору врожаю первинних сільськогосподарських культур та енергетичні культури, вирощування яких в промислових масштабах активно розвивається в країні останніми роками [1-3]. Вторинні відходи сільського господарства виробляються та нагромаджуються при обробці сільськогосподарських культур для виробництва харчових продуктів та корму. До них відносять: лущиння соняшнику, рису, горіхова шкаралупа, відходи квасолевих бобів та інші види біомаси подібного типу. Загалом економічний потенціал відходів сільського господарства складає 12,2 млн. тон у.п./рік, енергетичних культур - 10 млн. тон у.п./рік [4].

Для агробіомаси основним фактором, що впливає на потенціал, є щорічна урожайність агрокультур, що суттєво коливається в залежності від кліматичних умов кожного року. Крім того, вбачаючи тенденцію росту урожайності в Україні в найближчі роки, потенціал агробіомаси також зростатиме [5].

1.2. Основні види та характеристики твердого біопалива з рослинних відходів

Найбільш широко застосовують тверде біопаливо, виготовлене з твердих рослинних відходів в вигляді пелет та брикетів [6-7].

Пелети – це спресовані частинки рослинного походження, що мають форму циліндрів максимального діаметра до 25 мм та завдовжки від 10 до 50 мм. Вони можуть бути виготовлені з деревини, торфу, трави, лущиння, соломи, вугільного пилу та багатьох інших видів рослинної сировини, а також їх сумішей (рис. 1.1) [8]. Циліндрична форма паливних гранул забезпечує їм сипкість та дозволяє застосовувати автоматизацію в подавальних пристроях енергетичних установок.



Рисунок 1.1. Зразки пелет із різної сировини:

а – лушпиння гречки; б – солома зернових культур; в – деревна стружка;
г – торф; д – лушпиння соняшника; ж – лушпиння рису

Паливні брикети – це спресовані вироби циліндричної, прямокутної, шестигранної або будь-якої іншої форми, довжиною 100-300 мм (рис. 1.2) [9]. При виготовленні брикетів циліндричної форми, їх довжина не повинна перевищувати діаметр в п'ять разів, котрий більший ніж 25 мм, та зазвичай становить 60x75 мм. Стандартних розмірів в даній продукції немає.

Паливні пелети та брикети мають високу конкурентоспроможність порівняно з іншими видами традиційного 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 в 1,5 рази більше, ніж в звичайної деревини та вугілля. При спалюванні 2000 кг пелет виділяється стільки ж теплової енергії, як та при спалюванні: 3200 кг деревини, 957 м³ газу, 1000 л дизельного палива, 1370 л мазуту. Горіння такого палива в топці котла відбувається більш ефективно – кількість золи не перевищує 0,5-1,0% від загального об'єму використаного палива. Крім того, ціни на таке паливо не залежать від зростання цін на викопні види палива та на підвищення екологічних податків. Порівняльну характеристику різних видів твердого біопалива наведено в таблиці 1.1 [10].



Рисунок 1.2. Форми брикетів з рослинних відходів.

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика різних видів твердого біопалива

Вид палива	Вологість матеріалу, %	Теплотворна здатність, МДж/кг	Вміст сірки, %	Вміст золи, %
Гілки плодкових дерев	20	10,5	—	—
Виноградна лоза	20	14,2	—	—
Тріски дерев, тирса	40-45	10,5-12,0	0	2
Брикетти з деревини	7-8	16,8-21,0	—	—
Пелети з деревини	9-10	17,5-19,5	0,1	1
Солома	20	10,5-12,5	—	—
Солома в тюках	14-17	14,2	—	—
Пелети з соломи	8-10	16,5-18,8	0,2	4
Брикетти з соломи	6-10	15,4-21,0	—	—
Брикетти з полови	—	16,7	—	—
Стебла соняшнику	20	12,5	—	—
Брикетти з лушпиння соняшнику	6-8	21,0-21,8	—	—
Пелети з лушпиння соняшнику	6-8	18,5-20,0	—	—
Стебла кукурудзи	20	12,5	—	—
Брикетти з качанів	—	18,0	—	—

Аналізуючи таблицю 1.1 та масштабність не використаної сировини соняшника можна стверджувати, що ефективними є брикети та пелети з лушпиння соняшнику, які мають високу теплотворну здатність 18,5- 21,8 МДж/кг.

1.3. Аналіз технологій комплексної безвідхідної переробки насіння олійних культур

Існуюче устаткування для переробки макухи, одержаної із нешеретованого насіння соняшнику, забезпечує лише процес подрібнення з подальшим введенням в комбікорми [11], в зв'язку з чим використання її для годівлі свиней та птиці неефективне через підвищений вміст клітковини, тому для поліпшення поживної цінності й розширення сфери використання високолушпинної макухи для годівлі усіх видів тварин та птиці необхідна додаткова операція з розділення її на білкову та лушпинну фракції – сепарація.

Білкова фракція може бути використана на кормові цілі в якості гранул (пелет), а лушпинна – в якості сировини для твердого біопалива (паливних брикетів).

Технологія отримання твердого біопалива із рослинної сировини основана на ущільненні біомаси під впливом високого тиску до 30 МПа. При цьому клітинна структура матеріалу руйнується, численні порожнечі зникають, в результаті чого щільність матеріалу збільшується в десятки разів від свого первинного стану та становить 900–1400 кг/м³ [12].

Для визначення основних етапів технології комплексної безвідхідної переробки макухи культур олійних проведемо аналіз існуючих технологій виготовлення паливних брикетів та кормових пелет (гранул).

Виробництво біопаливних гранул зі свіжозрубаної деревини (сирого матеріалу) складається з наступних етапів. Спочатку з деревини шляхом попереднього дроблення отримують тріску, підсушують її, видаляючи зайву вологу, та знову подрібнюють до тирсоподібного стану. Під час сушіння важко

отримати оптимальну вологість матеріалу, тому пересушену деревину зволожують до необхідного значення та піддають гранулюванню. Потім гранули охолоджують, просіюють та фасують. Технологічна схема отримання паливних гранул зі свіжозрубаної деревини наведена на рисунку 1.3 [13]

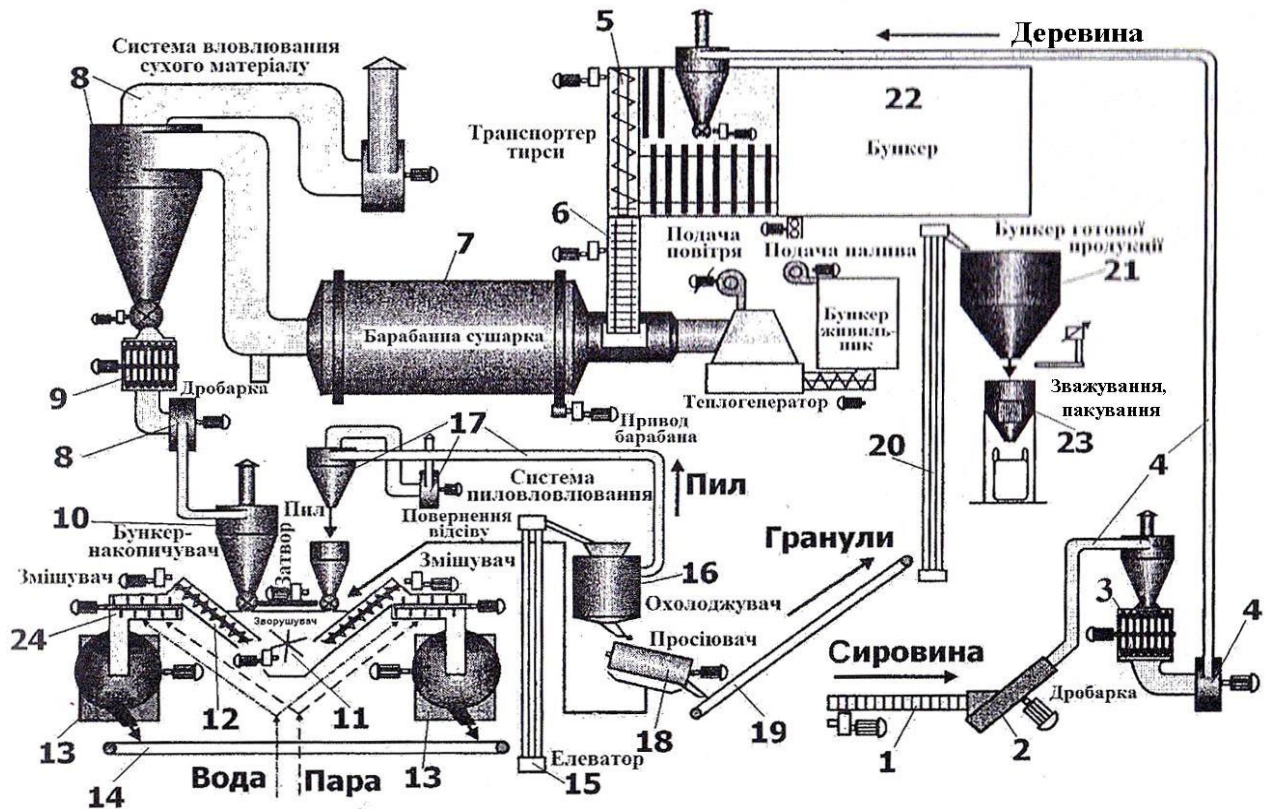


Рисунок 1.3. Технологічна схема виробництва гранульованого біопалива з вологих матеріалів:

1, 6, 14, 19 – стрічковий транспортер; 2, 3, 9 – дробарка; 4, 8 – пневмотранспортер; 5, 12 – шнековий транспортер; 7 – барабанна сушарка; 10 – бункер-накопичувач; 11 – дозатор; 13 – прес-гранулятор; 15, 20 – норія; 16 – охолоджувач; 17 – система пилловловлення; 18 – просіювач; 21 – бункер готової продукції; 22 – бункер; 23 – пакувальна машина; 24 – змішувач.

Для попереднього подрібнення деревину подають транспортером 1 до двох послідовно розміщених дробарок 2 та 3. Після цього зрубки деревини пневмотранспортером подають до бункера 22, звідки вони шнековим 5 та стрічковим 6 транспортерами направляються до барабанної сушарки 7. Для

якісного гранулювання вологість сировини повинна бути в межах 8–10%. Тому деревні відходи піддають сушінню. Після сушіння зрубки деревини пневмотранспортером 8 подаються на кінцеве дроблення до дробарки 9, котра подрібнює сировину на частки розміром не більше 4 мм, після чого подрібнений матеріал пневмотранспортером 8 подається до бункера-накопичувача 10. В подальшому сировина з вологістю до 8% через дозатор 11 за допомогою шнекового транспортера 12 подається на змішувач 24, куди також подається гаряча вода або пара.

Після цього суміш подається до прес-гранулятора 13, де відбувається виробництво біопаливних гранул, температура яких сягає 70–90 °С. Для їх охолодження використовується охолоджувач 16, до якого гранули подаються за допомогою норії 15. Пил, системою пиловловлювання 17, та дрібна фракція, виділена за допомогою вібраційного сита 18, направляються на повторне використання. Кондиційні гранули за допомогою стрічкового транспортера 19 та норії 20 подаються до бункера готової продукції 21, звідки йдуть на зважування та фасування до пакувальної машини 23.

Технологічна схема виробництва біопаливних гранул (пелет) із соломи наведена на рисунку 1.4 [12].

Подрібнення тюків соломи відбувається в дві стадії. Спочатку тюки подрібнюються в різальній машині 2, потім на дробарці 4, де солома подрібнюється до розмірів, необхідних для грануляції. Після цього тонкоподрібнений матеріал змішується з парою в змішувачі 6 та пресується в гранули на грануляторі 7. Після грануляції продукт за допомогою норії 8 подається до охолоджувача 9, після чого просіюється на вібраційному ситі 11. Норією 12 гранули подаються до бункера готової продукції 13, а потім до пакувальної машини 14.

Аналогічно виробництву пелет сировина для виготовлення паливних брикетів поділяється на вологу (деревна тирса) та суху (солома).

В Інституті культур олійних НААН розроблена технологія переробки макухи з насіння культур олійних з отриманням протеїнових добавок та твердого

біопалива з лушпинної фракції [14-18], яку та прийнято в якості базової.

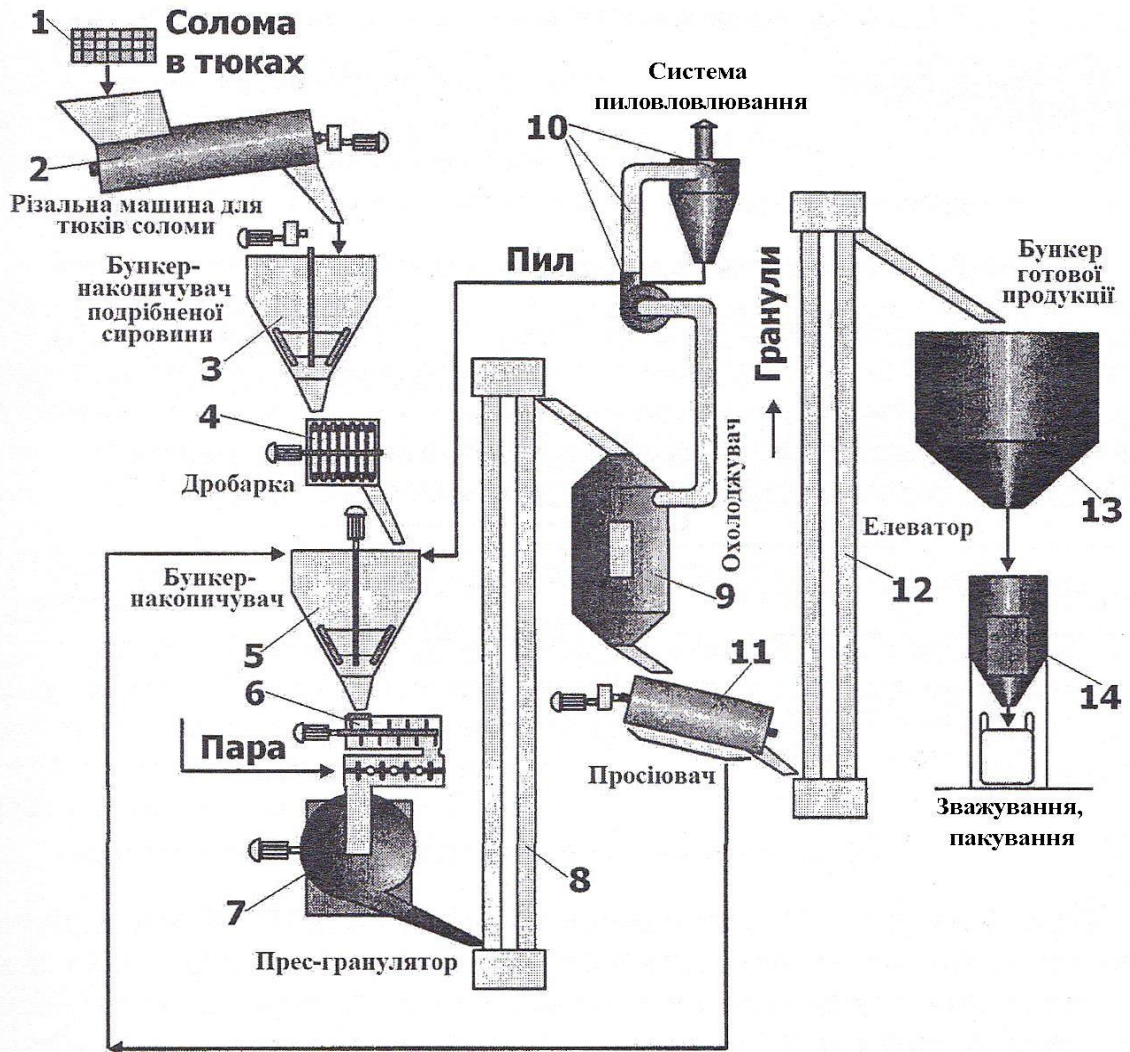


Рисунок 1.4. Технологічна схема виробництва біопаливних гранул із сухого матеріалу:

1 – солома в тюках; 2 – різальна машина для тюків соломи; 3 – бункер-накопичувач подрібненої сировини; 4 – дробарка; 5 – бункер-накопичувач розмеленої сировини; 6 – змішувач; 7 – прес-гранулятор; 8, 12 – норія; 9 – охолоджувач; 10 – система пиловловлювання; 11 – просіювач; 13 – бункер готової продукції; 14 – пакувальна машина.

Технологічна схема виготовлення паливних брикетів з лушпинних фракцій макухи насіння культур олійних представлена на рисунку 1.5.

Насіння культур олійних шнековим транспортером 1 подається до прес-екструдера 2, де відбувається видавлювання олії та отримання макухи. Макуха

шнековим транспортером 3 подається до молоткової дробарки 4, подрібнюється та направляється на механічне фракціонування до щіткового роторного просіювача 6. Просіяна білкова фракція накопичується в накопичувачі 7, а сходова лушпинна фракція подається до прес-брикетувальника 13. Видавлена олія самопливом заповнює ємність 9, звідки насосом 10 через фільтр 11 направляється до накопичувальної ємності 12. При відсутності процесу екструдерного чавлення насіння культур олійних макуха шнековим транспортером 8 подається до молоткової дробарки 4.

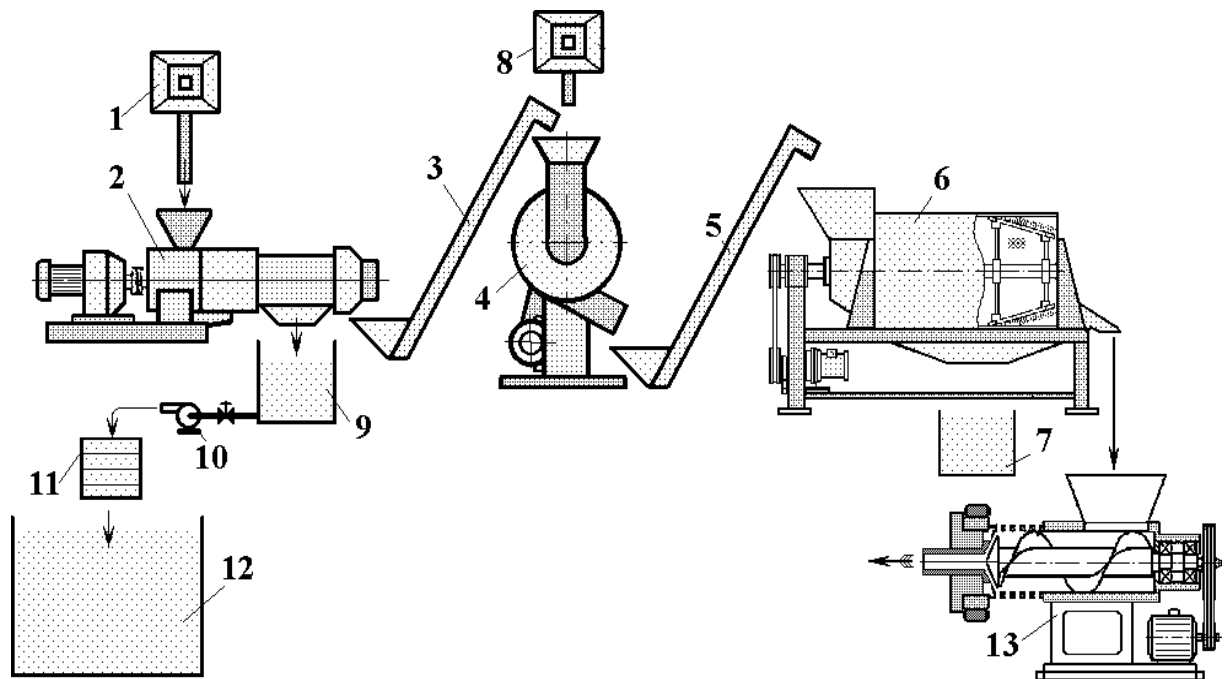


Рисунок 1.5. Технологічна схема виробництва паливних брикетів з лушпинних фракцій макухи насіння олійних культур:

1, 3, 5, 8 – шнековий транспортер; 2 – прес-екструдер; 4 – молоткова дробарка; 6 – щітковий роторний просіювач; 7 – накопичувач білкової фракції; 9 – проміжна ємність для олії; 10 – насос; 11 – фільтр; 12 – накопичувальна ємність для олії; 13 – прес-брикетувальник

Насіння культур олійних шнековим транспортером 1 подається в прес-екструдер 2 де відбувається вичавлення олії та отримання макухи. Макуха шнековим транспортером 3 подається в молоткову дробарку 4, подрібнюється та направляється на механічне фракціонування в щітковий роторний просіювач 6.

Просіяна білкова фракція накопичується в накопичувачі 7, а сходова лушпинна фракція подається в прес-брикетувальник 13. Відчавлена олія самопливом заповнює ємність 9 звідки насосом 10 через фільтр 11 направляється в накопичувальну ємність 12. При відсутності процесу екструдерного чавлення насіння культур олійних макуха шнековим транспортером 8 подається в молоткову дробарку 4.

1.4. Аналіз конструкцій установок для виготовлення паливних брикетів

Брикетви виготовляються методом екструдерного пресування при високих температурах, зв'язуючою речовиною є лігнін – натуральний продукт, що виділяється при нагріванні, такий вид палива не містить ніяких додаткових хімічних добавок. Основні етапи виробництва паливних брикетів складаються з [21-26]:

- подрібнення сировини до фракції, котра підходить для брикетування;
- сушки сировини до рівня вологості 12% або нижчого;
- пресування сировини екструдерним методом.

Деяка сировина, така як наприклад соняшник, не потребує подрібнення та сушки додатковим обладнанням, а достатньо тільки гранулювання екструдерним методом. Це тому, що його вологість нижча ніж 12%, а фракція достатньо м'яка. Для більш твердої сировини, як дерево, рекомендується включати процес подрібнення та сушки. Дане обладнання не ліцензії, воно поки що не стандартне та виготовляється за техзавданням. В якості приміщення для виробництва підійде будь-який ангар, підігрів та водопостачання не обов'язкові. Навчання персоналу відбувається, як правило, під час пусконаладжувальних робіт [27- 32].

Лушпинну фракцію, котра залишається, можна використовувати для годівлі ВРХ, виготовлення паливних брикетів, або пелет.

Сировиною для виробництва паливного брикету може бути тирса м'яких та твердих порід дерев, лушпиння соняшнику, гречки, солома та інші рослинні

відходи. Вимоги до сировини та паливних брикетів наведені в таблиці 1.2 [33-40]

Таблиця 1.2.

Вимоги до сировини та паливних

Сировина	Характеристики вихідної сировини			Характеристики брикету
	Насипна маса, кг/м ³	Вологість, %	Фракція, мм	Питома вага, кг/м ³
Лушпиння соняшнику	100	4–9	6–10	1150
Лушпиння соняшнику (подрібнене)	260	6–9	2–5	1090
Лушпиння гречки	160	5–12	2–5	1030
Рисове лушпиння	125	5–12	2–6	1010
Тирса дубова	270	6–12	2–5	1250
Тирса соснова	125	6–8	2–5	1150

Брикету, незалежно від того з якої сировини їх виготовляють, різні – це може бути «цеглина» чи циліндрична та шестигранна форма з отвором всередині або без. Стандартних розмірів в цього виду палива немає. Загальноприйнята довжина брикету 20–30 см.

Основним фактором, котрий визначає механічну міцність, водостійкість та калорійність брикету, є його питома вага. Чим більша питома вага брикету, тим вищі показники його якості. Наприклад, якщо питома вага брикету 650–750 кг/м³, калорійність дорівнює 12–14 МДж/кг; при питомій вазі 1200–1300 кг/м³ калорійність складає 25–31 МДж/кг.

Якість брикетів значною мірою залежить від вологості вихідної сировини. Оптимальна вологість брикетів знаходиться в межах 4–10%.

Для виготовлення паливних брикетів використовуються шнекові брикетні преси або преси ударної дії.

На рисунку 1.6 представлений шнековий прес ПШ-250, розроблений фірмою «Ера», м. Марганець. Продуктивність преса – 250 кг/год. Встановлена

потужність двигуна – 15 кВт. Вологість сировини – 12%. Розмір фракції – 8 мм. Процес пресування проходить при температурі 250–400 °С залежно від виду сировини. Вихід готового брикету в вигляді прямокутного бруса, з отвором в центрі.



Рисунок 1.6. Загальний вигляд прес-брикетувальника ПШ-250.

На рисунку 1.7 представлений прес ударної дії РВ-500, розроблений ТОВ «ЧеркасиЕлеваторМаш». Продуктивність преса – 500 кг/год. Встановлена потужність двигуна – 35 кВт. Вологість сировини – 10–12%. Розмір фракції – 12 мм.



Рисунок 1.7. Загальний вигляд ударного преса РВ-500.

Найбільше поширення отримали шнекові преси. Технічна характеристика

найбільш розповсюджених пресів представлена в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

Технічна характеристика шнекових прес-брикетувальників

Марка преса. Розробник	Продуктивність, кг/год	Потужність двигуна, кВт	Вологість сировини, %	Розмір фракції, мм
ПШ-200 ДП «Тривад», м. Київ	180–230	11	8–10	до 5
ШБП-700 ТОВ «Теплодар», м. Полтава	650–700	67	8–10	до 10
ПБ-300 Вільнянська виправна колонія	400–500	46	до 10	до 8
BIOMASSER Національний аграрний університет	50–60	8,2	10–12	до 16
Екструдер ЄВ-350-70 ТОВ «Черкаси- ЕлеваторМаш»	350–400	47,2	10–12	до 20

Максимальний розмір фракції 16–20 мм допускається при виготовленні паливних брикетів з соломи. При виготовленні брикетів з лущиння соняшникового насіння, гречки, тирси розмір фракції повинен бути не більше 10 мм.

Вологість сировини в усіх випадках не перевищує 12%. Значна питома енергоємність виготовлення брикетів до 100 кВт/т стримує їх широкомасштабне виробництво. Однак завдяки тому, що теплотворність паливних брикетів знаходиться на рівні теплотворності кам'яного вугілля, 15–18 МДж/кг, їх виробництво може бути перспективним.

Дослідження [19], проведені нами на експериментальному обладнанні лінії з

механічного фракціонування подрібненої макухи, показали, що при першому подрібненні та просіюванні білкової фракції з подальшим подрібненням лушпинної фракції та додатковим просіюванням можна одержати білкової фракції на 8% більше ніж при одноразовому подрібненні та просіюванні (таблиця 1.4).

Таблиця 1.4.

Результати досліджень виходу білкової фракції від кількості подрібнень

Приклад	Кількісні та якісні показники макухи	Величина показників
1	Вихід борошна,%	$26,6 \pm 0,77$
	Вміст білка,%	$39 \pm 0,75$
	Вміст клітковини,%	$6,3 \pm 0,61$
2	Вихід борошна,%	$34,7 \pm 0,82$
	Вміст білка,%	$38,2 \pm 0,78$
	Вміст клітковини,%	$6,6 \pm 0,57$

В першому випадку на молотковій дробарці було встановлено решето з діаметром отворів 3 мм. При подрібненні лушпинної фракції було встановлено решето з діаметром отворів 2 мм.

Попередні дослідження з виготовлення паливних брикетів з лушпинних фракцій насіння ріпаку та гірчиці на шнековому пресі ПШ-250 показали, що питома енергоємність знижена до 25–30 кВт/т. Зниження енергоємності відбулося за рахунок того, що лушпинна фракція в своєму складі має деяку кількість олії, 8–12%, та процес брикетування проходить при температурі 100–110 °С.

1.5. Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми обладнання для виготовлення паливних брикетів

Прес ПШ-250 може бути аналогом при розробці брикетувальника лушпинної фракції.

Запропонована установка (рисунок 1.8) складається з рами 1, до якої закріплено електропривод 2, що приводить в обертовий рух вал 3, розміщений в циліндричному корпусі 4 з підшипниковим вузлом 5. Над циліндричним корпусом закріплено бункер 6, з якого матеріал подається на гвинт 7, що примикає до вала 3, та виконаний в формі гвинта з конусом на торці. Гвинт обертається в перфорованій гільзі 8 з отворами 9, котра з одного боку примикає до циліндричного корпусу 5, а з іншого – до філь'єри 10, котра має конічну з переходом в циліндричну поверхню 14. Філь'єра знаходиться в стакані 11 та має можливість переміщуватись щодо гайки 12, на зовнішній поверхні якої закріплено електронагрівач 13.

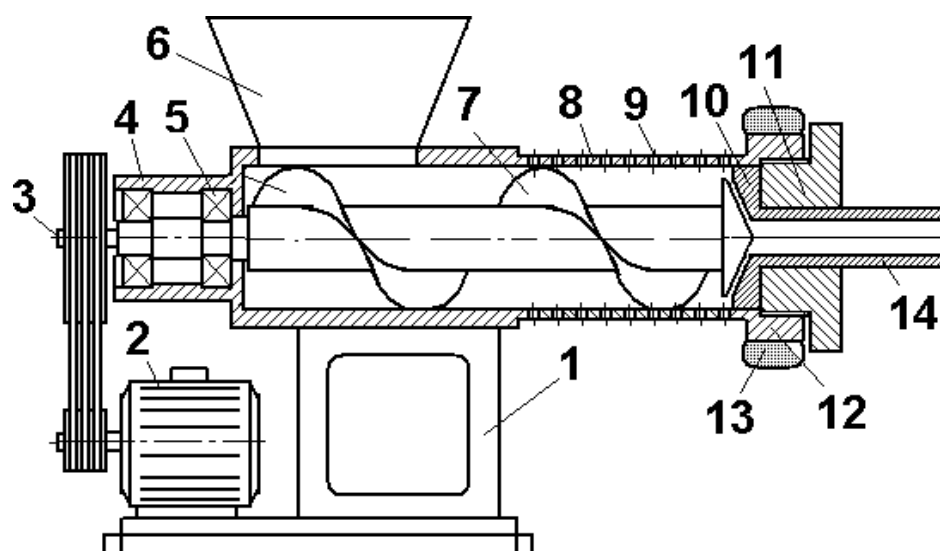


Рисунок 1.8. Конструктивно-технологічна схема обладнання для виготовлення паливних брикетів:

1 – рама; 2 – електропривод; 3 – вал; 3, 4 – корпус; 5 – підшипниковий вузол; 6 – бункер; 7 – гвинт; 8 – перфорована гільза; 9 – отвори; 10 – філь'єра; 11 – стакан; 12 – гайка; 13 – електронагрівач; 14 – циліндрична частина філь'єри.

Установка для виготовлення паливних брикетів працює таким чином. Лушпинна фракція подається до завантажувального бункера 6 та далі самопливом – на гвинт 7, котрий обертається в підшипниковому вузлі 5,

розміщеному в циліндричному корпусі 4. Обертання гвинта відбувається через вал 3 від електропривода 2, закріпленого на рамі 1. Гвинтом матеріал транспортується до камери стиснення, котра знаходиться між конічними поверхнями гвинта 7 та філь'єри 10. Переміщення стакана 11 з філь'єрою 10 щодо гайки 12 дає можливість регулювати об'єм зони пресування та таким чином сам тиск, що при роботі обладнання призводить до виходу олії через отвори 9 гільзи 8. При проході через зону пресування матеріал, маючи в своєму складі певну кількість олії, з метою запобігання її загорання нагрівається до температури 120–150 °С електронагрівачем 13. Наявність олії значно знижує затрати на брикетування [20].

1.6. Мета та завдання досліджень

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності технологічного процесу виробництва паливних брикетів з лушпинної фракції культур олійних шляхом обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів обладнання для його здійснення.

Основні задачі досліджень полягають в наступному:

1. На основі аналізу сучасного технологічного обладнання для брикетування відходів агропромислового виробництва запропонувати конструктивно-технологічну схему нової машини.

2. Теоретично дослідити та визначити основні конструктивні параметри обладнання для виготовлення паливних брикетів.

3. На підставі експериментальних досліджень визначити раціональні конструктивні та режимні параметри обладнання для виготовлення паливних брикетів за якісними та енергетичними показниками роботи.

Об'єкт дослідження: процес взаємодії робочого органу обладнання для виготовлення паливних брикетів із лушпинною фракцією макухи олійних культур.

Предмет досліджень: закономірності впливу конструктивно-технологічних

параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів на якісні та енергетичні показники його роботи.

1.7. Висновки з розділу

Аналізуючи теплофізичні властивості різних видів твердого біопалива з рослинних відходів та їх масштабність виробництва встановлено, що ефективними є брикети та пелети з лушпиння соняшнику, які мають високу теплотворну здатність 18,5-21,8 МДж/кг.

На основі проведених патентно-інформаційних досліджень сучасних технологій та аналізу конструкцій робочих органів пресуючих машин, встановлено, що найбільш прийнятною конструкцією є шнекова установка.

Розроблена конструктивно-технологічна схема обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння культур олійних в складі технологічної лінії, котра складається з рами, електропривода, вала, корпуса підшипникового вузла, бункера, гвинта, перфорованої гільзи, філь'єри, стакану, гайки та електронагрівача.

2. Теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів установки для виготовлення паливних брикетів

2.1. Обґрунтування глибини та радіуса скруглення основи каналу гвинта

Для здійснення математичного аналізу робочого процесу знайдемо залежності, які пов'язують між собою всі геометричні параметри гвинта, представлених на рис. 2.1. Зокрема, отримаємо залежності для визначення площ F та F_ϕ перерізів витків гвинта, зайнятих сумішшю (фігури ABCD), та залежності довжин L та L_ϕ відповідних частин периметрів перерізів витків гвинта (лінії ABCD).

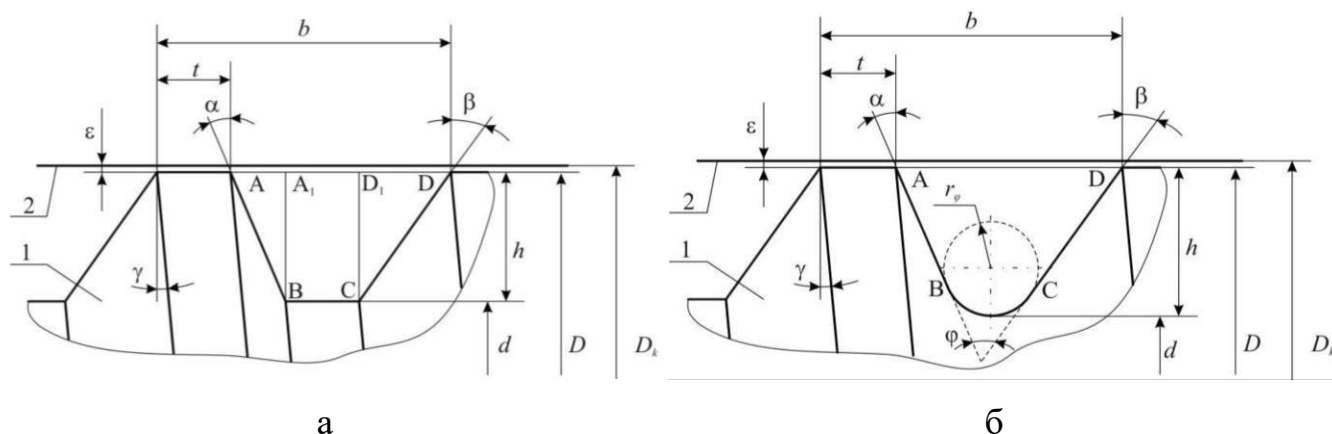


Рисунок 2.1. Схема гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів з каналом трапецієподібної форми (а) та зі закругленою основою каналу гвинта (б):

1 – гвинт; 2 – внутрішня стінка робочої камери; h – глибина каналу гвинта; m ; α – кут нахилу передньої стінки витка гвинта, рад.; β – кут нахилу задньої стінки витка гвинта, рад.; b – крок гвинта, м; t – ширина крайки витка гвинта, м; D – зовнішній діаметр гвинта, м; D_k – внутрішній діаметр робочої камери, м; d – діаметр основи гвинта, м; ϵ – зазор між гвинтом та робочою камерою, м; γ – кут нахилу гвинтової лінії по зовнішньому діаметру гвинта, рад; r_ϕ – радіус кола твірної основи каналу гвинта, м; ϕ – кут між стінками каналу гвинта, рад.

За результатами аналізу рис. 2.1 (а) можемо записати вираз площі F перерізу каналу гвинта, зайнятої сумішшю:

$$F = F_{ABCD} = F_{ABA_1} + F_{A_1BCD_1} + F_{CDD_1}. \quad (2.1)$$

З врахуванням того, що:

$$AA_1 = htg\alpha, \quad (2.2)$$

$$DD_1 = htg\beta, \quad (2.3)$$

$$BC = b - t - h(tg\alpha + tg\beta), \quad (2.4)$$

де h – глибина каналу гвинта, м;

α – кут нахилу передньої стінки витка гвинта, рад.;

b – крок гвинта, м; t – ширина витка гвинта, м;

запишемо:

$$F_{ABA_1} = \frac{1}{2}h^2tg\alpha, \quad (2.5)$$

$$F_{A_1BCD_1} = h[b - t - h(tg\alpha + tg\beta)], \quad (2.6)$$

$$F_{CDD_1} = \frac{1}{2}h^2tg\beta. \quad (2.7)$$

Тоді залежність для визначення площі перерізу каналу гвинта, зайнятої сумішшю (2.1), після спрощення можна записати так:

$$F = h\left[b - t - \frac{1}{2}h(tg\alpha + tg\beta)\right]. \quad (2.8)$$

У свою чергу, з аналізу рис. 2.1 (а) вираз довжини L частини периметру перерізу каналу гвинта, що контактує із сумішшю, запишеться як

$$L = L_{ABC} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD}. \quad (2.9)$$

Ураховуючи рис. 2.1 (а), можна записати:

$$AB = \frac{h}{\cos \alpha}, \quad (2.10)$$

$$CD = \frac{h}{\cos \beta}. \quad (2.11)$$

З врахуванням залежностей (2.4), (2.10) та (2.11), після деяких перетворень отримаємо:

$$L = b - t - h \left(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta - \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \beta} \right). \quad (2.12)$$

Для знаходження залежності площі F_φ перерізу каналу гвинта зі закругленою основою розглянемо схему, представлену на рис. 2.2.

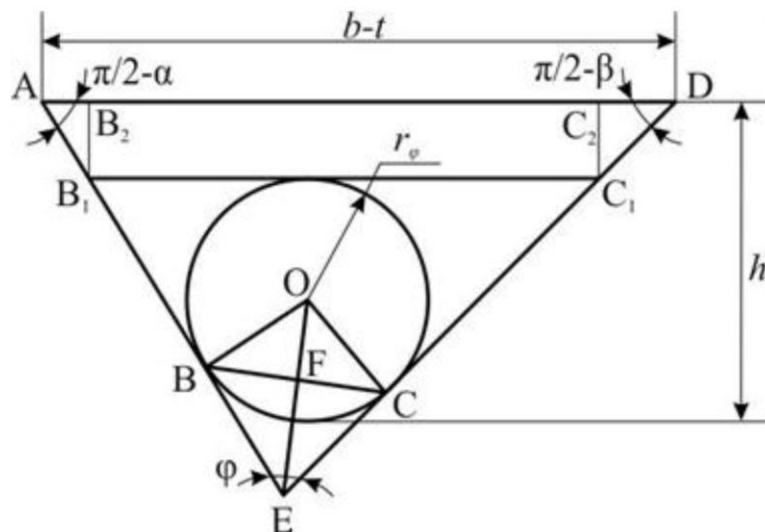


Рисунок 2.2. Схема для визначення геометричних параметрів гвинта зі закругленою основою каналу.

Площу перерізу каналу гвинта зі закругленою основою F_φ , тобто фігури ABCD (рис. 2.1, б), представимо за допомогою фігур з рис. 2.2 у вигляді:

$$F_\varphi = F_{AED} - F_{BECO} + F_{OBC}. \quad (2.13)$$

З аналізу рис. 2.1 (б) та 2.2 із застосуванням теореми синусів можемо записати:

$$(2.14)$$

$$ED = \frac{(b-t)\cos\alpha}{\sin(\alpha+\beta)}, \quad (2.15)$$

де $\varphi = \alpha + \beta$ (рис. 2.2).

Після перетворень отримаємо залежність для визначення площі трикутника AED:

$$F_{AED} = (b-t)^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha+\beta)}. \quad (2.16)$$

У свою чергу:

$$OE = \frac{r_\varphi}{\sin\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right)}, \quad (2.17)$$

З рис. 2.2 запишемо:

$$(2.18)$$

З врахуванням рівняння (2.18) площу фігури BECO можна записати:

$$F_{BECO} = 2F_{BEO} = r_\varphi^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right). \quad (2.19)$$

Виходячи з рис. 2.2, запишемо рівняння довжини дуги BC:

$$BC = r_\varphi(\pi - \alpha - \beta). \quad (2.20)$$

$$F_{BC} = \frac{r_\varphi^2}{2}(\pi - \alpha - \beta). \quad (2.21)$$

Отже, з врахуванням залежностей (2.16), (2.19) та (2.21) можемо записати рівняння площі перерізу каналу гвинта зі закругленою основою:

$$F_\varphi = (b-t)^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha+\beta)} - r_\varphi^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + \frac{r_\varphi^2}{2}(\pi - \alpha - \beta). \quad (2.22)$$

Ураховуючи залежності (2.14), (2.15), (2.18) та (2.20), запишемо рівняння довжини частини периметру перерізу каналу гвинта Б9, що контактує із сумішшю, для гвинта зі закругленою основою каналу:

$$L_{\varphi} = \frac{(b-t)(\cos\alpha + \cos\beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - 2r_{\varphi} \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) + r_{\varphi}(\pi - \alpha - \beta). \quad (2.23)$$

Залежності (2.22), (2.23) не враховують глибини каналу гвинта h . Однак очевидно, що при дослідженні та проектуванні гвинтових робочих органів подібного типу необхідно узгоджувати параметри радіуса скруглення основи r_{φ} та глибини гвинта h .

Для цього скористуємось відомою залежністю, що пов'язує радіус кола,

$$AB_1 = \frac{h - 2r_{\varphi}}{\cos\alpha}, \quad (2.24)$$

$$C_1D = \frac{h - 2r_{\varphi}}{\cos\beta}, \quad (2.25)$$

$$B_1C_1 = b - t - (h - 2r_{\varphi})(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta). \quad (2.26)$$

$$r_{\varphi} = \frac{2(b-t - (h - 2r_{\varphi})(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta))^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha + \beta)}}{b - t - (h - 2r_{\varphi})(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) + \frac{(b-t)(\cos\alpha + \cos\beta)}{\sin(\alpha + \beta)} - \frac{h - 2r_{\varphi}}{\cos\alpha} - \frac{h - 2r_{\varphi}}{\cos\beta}}. \quad (2.27)$$

вписаного в трикутник, з площею та напівпериметром останнього.

Ураховуючи рис. 2.2, запишемо:

$$\begin{aligned} r_{\varphi} = & \frac{1}{8\cos\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} \left(\cos\frac{\alpha}{2} + \sin\frac{\alpha}{2} \right) \left(\cos\frac{\beta}{2} + \sin\frac{\beta}{2} \right) \left[-b + t + \frac{h}{\cos\alpha} + \frac{h}{\cos\beta} + \right. \\ & + \frac{\cos\beta}{\cos\alpha \sin(\alpha + \beta)} (-4h\sin^2\alpha + (b-t)\cos\alpha(4\sin\alpha - 1)) - \frac{8h\sin\alpha \sin\beta}{\sin(\alpha + \beta)} + \\ & + \frac{\cos\alpha}{\cos\beta \sin(\alpha + \beta)} (-4h\sin^2\beta + (b-t)\cos\beta(4\sin\beta - 1)) + h(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) + \\ & \left. + \sqrt{\frac{(h\cos\beta \sin\alpha + \cos\alpha((-b+t)\cos\beta + h\sin\beta))^2}{\sin^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)(\sin\alpha - 1)(\sin\beta - 1)}} \right]. \quad (2.28) \end{aligned}$$

Розв'язавши рівняння (2.27) відносно r_{φ} , отримаємо рівняння для визначення радіуса скруглення основи каналу гвинта:

Графічна інтерпретація залежності (2.28) наведена на рис. 2.3.

Розв'язавши рівняння (2.27) відносно h , отримаємо залежність для визначення глибини каналу гвинта:

$$h = \frac{1}{2 \sin(\alpha + \beta)} \left[r_\varphi \cos \beta (3 \sin \alpha - 1) - \cos \alpha (r_\varphi + \cos \beta \times \right. \\ \left. \times \left(-2b + 2t + \sqrt{2} \sqrt{\frac{r_\varphi^2 (1 + \cos(\alpha + \beta))}{(\sin \alpha - 1)(\sin \beta - 1)}} - 3r_\varphi \sin \beta \right) \right]. \quad (2.29)$$

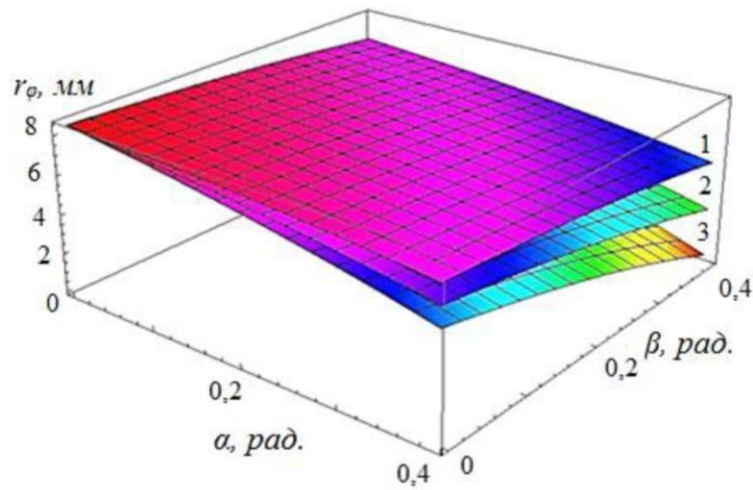


Рисунок 2.3. Залежність радіуса скруглення основи каналу гвинта r_φ від кутів нахилу передньої α та задньої β стінок каналу гвинта при $b = 22$ мм, $t = 5$ мм:

1 – $h = 12$ мм; 2 – $h = 16$ мм; 3 – $h = 20$ мм.

Графічна інтерпретація залежності (2.29) наведена на рис. 2.4.

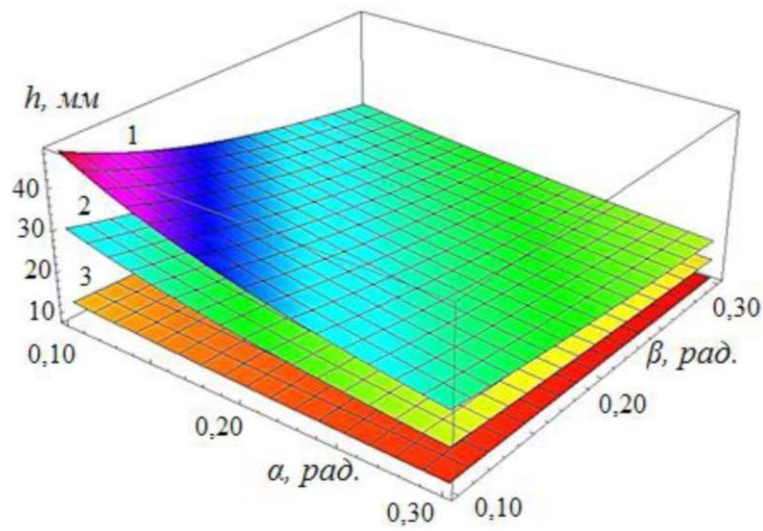


Рисунок 2.4. Залежність глибини каналу гвинта h від кутів нахилу передньої

α та задньої β стінок каналу гвинта при $b = 22$ мм, $t = 5$ мм:

1 – $r_\varphi = 4$ мм; 2 – $r_\varphi = 6$ мм; 3 – $r_\varphi = 8$ мм.

2.2. Обґрунтування центра мас перерізу каналу гвинта

При дослідженні впливу параметрів робочого процесу на показники енергоємності та продуктивності обладнання для виготовлення паливних брикетів виникає необхідність в встановленні залежностей, які б враховували зв'язок геометричних параметрів гвинта з об'ємом та площею поверхонь каналу гвинта за його довжиною, тобто об'ємом матеріалу, котрий знаходиться в каналі гвинта, та площ тертя матеріалу по поверхнях гвинта та робочої камери.

На основі другої теореми Гюльдена [41], запишемо рівняння площі поверхні S та об'єму каналу гвинта V за його довжиною для гвинта з трапецієподібною формою каналу:

$$S = Ll_s, \quad (2.30)$$

$$V = Fl_s, \quad (2.31)$$

де l_s – довжина гвинтової лінії, описаної центром мас площі перерізу каналу гвинта за довжиною гвинта, м.

Відповідно, для гвинта із закругленою основою каналу залежності (2.30) та (2.31) запишемо:

$$S_\varphi = L_\varphi l_s, \quad (2.32)$$

$$V_\varphi = F_\varphi l_s. \quad (2.33)$$

Складові L , L_φ , F та F_φ залежностей (2.30)-(2.33) визначаються за рівняннями (2.8), (2.12), (2.22), (2.23).

У свою чергу, для знаходження рівняння довжини гвинтової лінії l_s , описаної центром мас площі перерізу координати центрів мас каналу гвинта за довжиною гвинта, потрібно знайти перерізів каналів гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів з плоскою та із закругленою основою, а саме відстані від центру мас перерізу каналу гвинта до осі гвинта.

Відомо, що координата центра мас фігури дорівнює відношенню статичного моменту інерції цієї фігури щодо визначеної осі до площі цієї фігури [42], тобто

для перерізу каналу гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів з плоскою основою можна записати:

$$y_c = \frac{S_{ABCD}}{F}, \quad (2.34)$$

або для перерізу каналу гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів із закругленою основою:

$$y_{c\varphi} = \frac{S_{\varphi ABCD}}{F_{\varphi}}, \quad (2.35)$$

де S_{ABCD} , $S_{\varphi ABCD}$ – відповідно статичні моменти інерції перерізів каналів гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів з плоскою та із закругленою основою, m^3 .

Скориставшись відомою залежністю для визначення гвинта обладнання координати центра мас трапеції для перерізу каналу для виготовлення паливних брикетів з плоскою основою (рис. 2.1, а) запишемо рівняння відстані від центру мас перерізу каналу гвинта до осі гвинта:

$$y_c = \frac{D}{2} - \frac{h}{3} \left[\frac{2b - 2t - h(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)}{3b - 3t - h(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)} \right], \quad (2.36)$$

Графічно поверхня, побудована з використанням рівняння (2.36), представлена на рис. 2.5.

Якщо розглядати переріз каналу гвинта із закругленою основою як сукупність геометричних фігур (рис. 2.6), а саме, трикутника AED та сегмента кола з центром в точці O, обмеженого хордою BC, без урахування площі трикутника BEC, то його статичний момент інерції можна представити як суму добутків площ відповідних фігур та відстаней від центрів їх мас в до відповідної осі, тобто:

$$S_{\varphi ABCD} = F_{AED} y_{cAED} + F_{BC} y_{cBC} - F_{BEC} y_{cBEC}. \quad (2.37)$$

Відомо, що центрами мас прямокутників є точки перетину їх діагоналей, а трикутників – точки перетину їх медіан, центроїди.

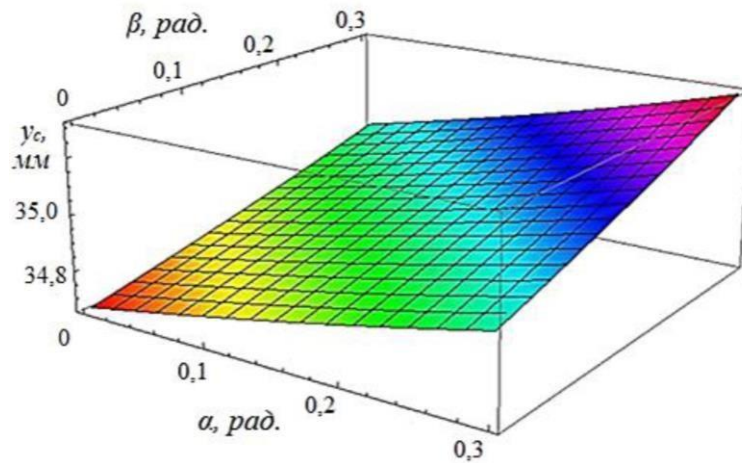


Рисунок 2.5. Залежність відстані від центру мас перерізу каналу гвинта з плоскою основою до осі гвинта y_c від кутів нахилу передньої α та задньої β стінок каналу гвинта при $b = 22$ мм, $t = 5$ мм, $h = 16$ мм.

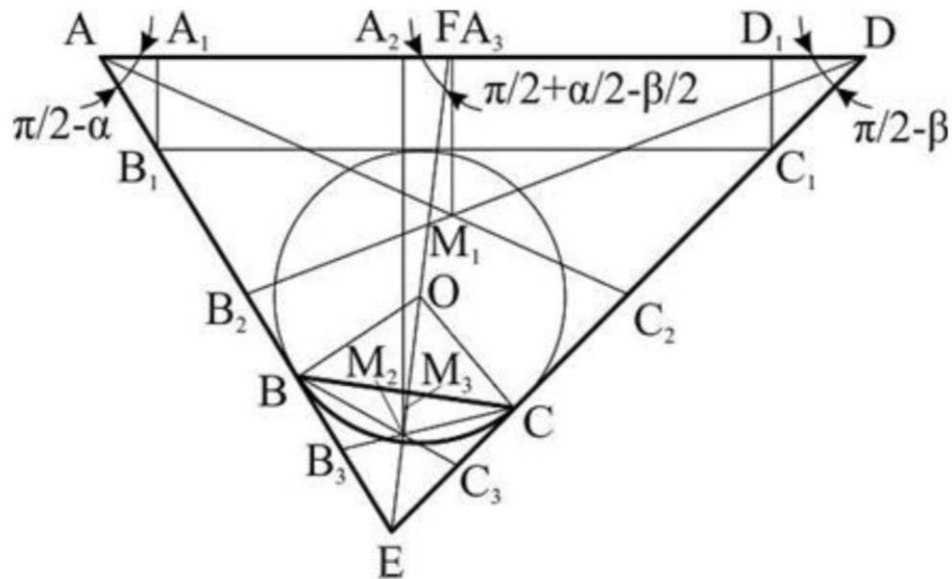


Рисунок 2.6. Схема до визначення центру мас перерізу каналу гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів із закругленою основою.

У свою чергу координата центра мас сегмента кола визначається за залежністю [43]:

$$OM_3 = \frac{4}{3} \frac{r_\varphi \cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{(\pi - \alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)}. \quad (2.38)$$

У свою чергу рівняння площі сегмента кола, обмеженого хордою ВС можна записати як [43]:

$$F_{BC} = \frac{r_\varphi^2}{2} [(\pi - \alpha - \beta) - \sin(\alpha + \beta)]. \quad (2.39)$$

За результатами аналізу рис. 2.6 із застосуванням теореми синусів та залежності (2.14) запишемо довжину відрізка EF:

$$(2.40)$$

Тоді, з врахуванням рівнянь (2.17) та (2.28) можемо записати залежність для визначення відстані від центра мас сегмента кола до осі гвинта (рис. 2.6):

$$y_{cBC} = \frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left[\frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{\frac{r_\varphi}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} + \frac{4}{3} \frac{r_\varphi \cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{(\pi - \alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)} \right]. \quad (2.41)$$

З врахуванням того, що відстань від сторони трикутника до центра проведеної перпендикулярно його мас дорівнює третині його висоти, до відповідної сторони, для трикутника AED запишемо вираз відстані від центра його мас до осі гвинта (рис. 2.6):

$$y_{cAED} = M_1 A_3 = \frac{D}{2} - \frac{1}{3} \frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)}. \quad (2.42)$$

Площа трикутника AED (рис. 2.6) відома із залежності (2.16). Площу трикутника BEC запишемо з рис. 2.6 як:

$$F_{BEC} = \frac{1}{2} r_\varphi^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin(\alpha + \beta). \quad (2.43)$$

З результатів аналізу рис. 2.6 та із використанням рівняння (2.18) запишемо залежність для визначення довжини відрізка EM₂:

$$EM_2 = \frac{2}{3} r_\varphi \frac{\cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}. \quad (2.44)$$

Із використанням рівнянь (2.40) та (2.44) можемо записати залежність для визначення мас трикутника ВЕС до осі гвинта (рис. 2.6):

$$y_{cBEC} = M_2 A_2 = \frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left[\frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{2}{3} r_\varphi \frac{\cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} \right]. \quad (2.45)$$

Отже, знаючи площі та розташування центрів мас усіх фігур – складових перерізу каналу гвинта зі закругленою основою (рис. 2.6) можемо записати значення статичного моменту інерції перерізу зазначеного каналу (2.37):

$$\begin{aligned} S_{\varphi ABCD} = F_{AED} y_{cAED} + F_{BC} y_{cBC} - F_{BEC} y_{cBEC} = (b-t)^2 \frac{\cos\alpha\cos\beta}{2\sin(\alpha + \beta)} \times \\ \times \left[\frac{D}{2} - \frac{1}{3} \frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right] + \frac{r_\varphi^2}{2} [(\pi - \alpha - \beta) - \sin(\alpha + \beta)] \times \\ \times \left[\frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left(\frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{r_\varphi}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{4}{3} \frac{r_\varphi \cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{(\pi - \alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)} \right) \right] + \frac{1}{2} r_\varphi^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin(\alpha + \beta) \times \\ \times \left(\frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left[\frac{(b-t)\cos\alpha\cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{2}{3} r_\varphi \frac{\cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} \right] \right). \quad (2.46) \end{aligned}$$

Із використанням рівняння (2.46) та отриманого раніше рівняння (2.22) можемо записати залежність для визначення відстані від осі гвинта до центра мас перерізу гвинта, котрий має закруглену основу:

$$\begin{aligned}
y_{c\varphi} = \frac{S_{\varphi ABCD}}{F_{\varphi}} = & \frac{1}{(b-t)^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha+\beta)} - r_{\varphi}^2 \operatorname{ctg}\left(\frac{\alpha+\beta}{2}\right) + \frac{r_{\varphi}^2}{2}(\pi - \alpha - \beta)} \times \\
& \times \left[(b-t)^2 \frac{\cos\alpha \cos\beta}{2\sin(\alpha+\beta)} \times \left[\frac{D}{2} - \frac{(b-t)\cos\alpha \cos\beta}{3\sin(\alpha+\beta)} \right] + \frac{r_{\varphi}^2}{2} [(\pi - \alpha - \beta) - \sin(\alpha + \beta)] \right] \times \\
& \times \left[\frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left(\frac{(b-t)\cos\alpha \cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{r_{\varphi}}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} + \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{4}{3} \frac{r_{\varphi} \cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{(\pi - \alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)} \right) \right] + \frac{1}{2} r_{\varphi}^2 \operatorname{ctg}^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \sin(\alpha + \beta) \times \\
& \times \left(\frac{D}{2} - \cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right) \left[\frac{(b-t)\cos\alpha \cos\beta}{\sin(\alpha + \beta)\cos\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)} - \frac{2}{3} r_{\varphi} \frac{\cos^2\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right)} \right] \right) \right] \quad (2.47)
\end{aligned}$$

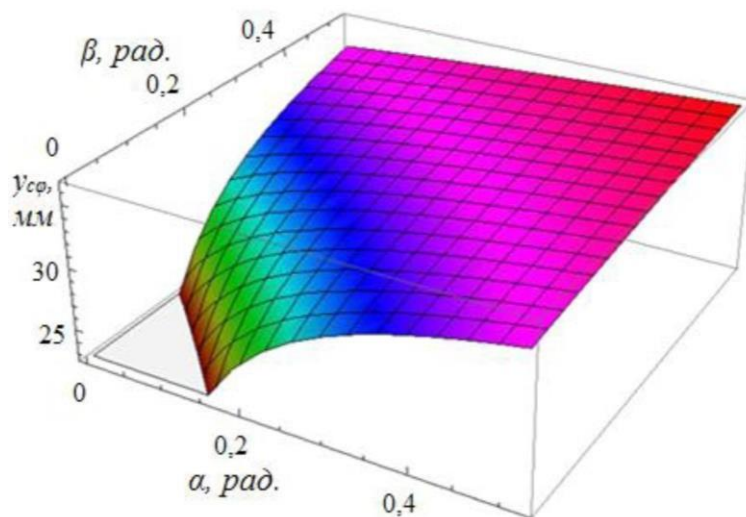


Рисунок 2.7. Залежність відстані від центра мас перерізу каналу гвинта зі закругленою основою до осі гвинта $y_{c\varphi}$ від кутів нахилу передньої α та задньої β стінок каналу гвинта при $b = 22$ мм, $t = 5$ мм, $r_{\varphi} = 6$ мм, $D = 80$ мм.

Графічно залежність, побудована з використанням рівняння (2.47), представлена на рис. 2.7.

2.3. Обґрунтування довжини гвинтової лінії та площі внутрішньої поверхні робочої камери

Для знаходження довжини гвинтової лінії, описаної центром мас площі перерізу каналу гвинта за довжиною гвинта, скористуємось способом, наведеним в праці К. Раувендаала [44] та використаємо автoрами праць [45-47] при дослідженні впливу кута при вершині гребня витка на працездатність шнека екструдера.

Для цього побудуємо схему розгортки гвинтових ліній гвинта (рис. 2.8). З рис. 2.8 можемо записати рівняння кроку гвинта b :

$$b = \pi D \operatorname{tg} \gamma = 2\pi y_c \operatorname{tg} \gamma_s = \pi d \operatorname{tg} \gamma_d, \quad (2.48)$$

де γ – кут нахилу гвинтової лінії по зовнішньому діаметру гвинта, рад.;

γ_s – кут нахилу гвинтової лінії, котра відповідає положенню центру мас перерізу каналу гвинта, рад.;

γ_d – кут нахилу гвинтової лінії по основі гвинта, рад.;

d – діаметр основи гвинта, м.

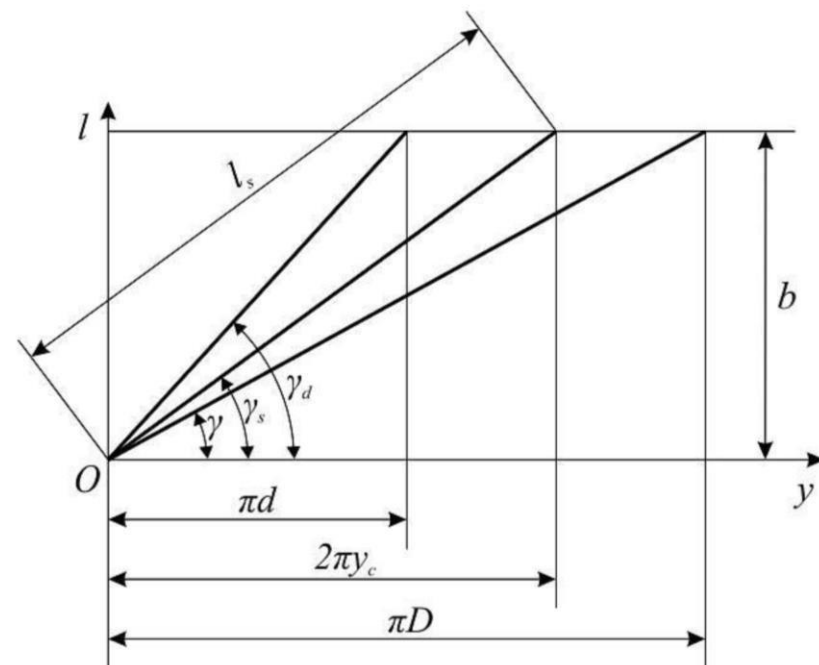


Рисунок 2.8. Розгортки гвинтових ліній гвинта.

Із залежності (2.48) запишемо рівняння для кута нахилу гвинтової лінії, котра відповідає положенню центра мас перерізу каналу гвинта γ_c :

$$\gamma_s = \operatorname{arctg}\left(\frac{D \operatorname{tg} \gamma}{2y_c}\right), \quad (2.49)$$

$$\gamma_s = \operatorname{arctg}\left(\frac{b}{2\pi y_c}\right). \quad (2.50)$$

Деякі вчені для розрахунків в якості кута нахилу гвинтової лінії пропонують приймати середнє арифметичне значення відповідних витка та по валу гвинта [48]. Проте такий спосіб визначення кута нахилу гвинтової лінії не дозволяє врахувати геометричні особливості каналів гвинтів.

Із використанням рис. 2.8, запишемо рівняння довжини гвинтової лінії, описаної центром мас перерізу каналу гвинта:

$$l_s = \frac{l}{\sin \gamma_s} = \frac{l}{\sin \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{b}{2\pi y_c} \right) \right]} = l \frac{2\pi y_c}{b} \sqrt{1 + \frac{b^2}{4\pi^2 y_c^2}} = 2\pi l \sqrt{\frac{y_c^2}{b^2} + \frac{1}{4\pi^2}}, \quad (2.51)$$

де y_c визначається за залежністю (2.36) для каналу гвинта з плоскою основою або за залежністю (2.47) для каналу гвинта зі закругленою основою. Отримана залежність (2.51) є трансформованим параметричним рівнянням гвинтової лінії щодо параметра її довжини [49].

Тобто, для гвинта з плоскою основою каналу та незмінними за його довжиною геометричними параметрами рівняння довжини гвинтової лінії, описаної центром мас перерізу каналу, матиме вигляд:

$$l_s = 2\pi l \sqrt{\frac{\left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \left[\frac{2b - 2t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}{3b - 3t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)} \right] \right)^2}{b^2} + \frac{1}{4\pi^2}}. \quad (2.52)$$

Графічно залежність, побудована з використанням залежності (2.52), представлена на рис. 2.9.

З врахуванням отриманої залежності (2.52) та залежностей (2.8), (2.31), запишемо рівняння для об'єму каналу гвинта обладнання для виготовлення

паливних брикетів за його довжиною за умови незмінності його геометричних параметрів для гвинта з плоскою основою каналу:

$$V = 2\pi h \left[b - t - \frac{1}{2} h (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta) \right] \sqrt{\frac{\left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \left[\frac{2b - 2t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}{3b - 3t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)} \right] \right)^2}{b^2} + \frac{1}{4\pi^2}} \quad (2.53)$$

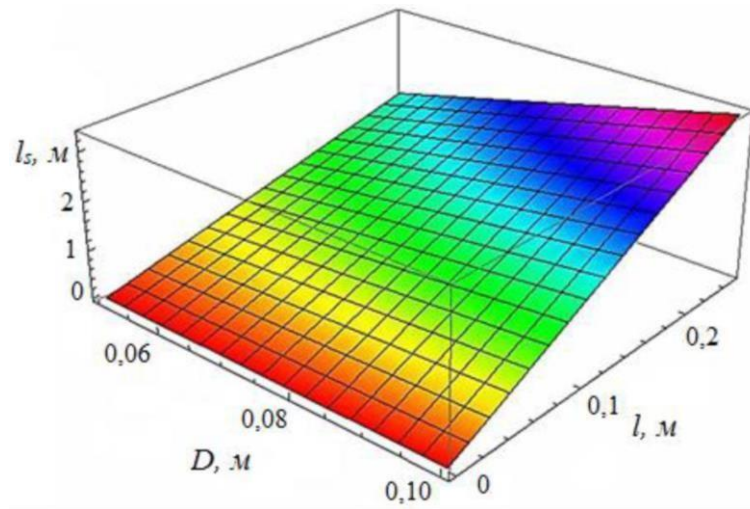


Рисунок 2.9. Залежність довжини гвинтової лінії l_s , описаної центром мас перерізу каналу гвинта, від довжини l та зовнішнього діаметру D гвинта з плоскою основою каналу при $b = 22$ мм, $t = 5$ мм, $h = 16$ мм, $\alpha = \beta = \pi/12$.

Також з використанням залежностей (2.52), (2.12) та (2.30) запишемо рівняння для площі поверхні об'єму каналу гвинта обладнання для виготовлення паливних брикетів за його довжиною за умови незмінності його геометричних параметрів для гвинта з плоскою основою каналу:

$$S = 2\pi l \left[b - t - h \left(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta - \frac{1}{\cos \alpha} - \frac{1}{\cos \beta} \right) \right] \times \sqrt{\frac{\left(\frac{D}{2} - \frac{h}{3} \left[\frac{2b - 2t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)}{3b - 3t - h(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \beta)} \right] \right)^2}{b^2} + \frac{1}{4\pi^2}} \quad (2.54)$$

Характери рівнянь (2.53) та (2.54) відповідають залежності, представленій на рис. 2.9.

За результатами аналізу рис. 2.8 та на основі залежностей (2.48) і (2.51) запишемо рівняння для довжини гвинтової лінії по зовнішньому діаметру гвинта l_{sD}

$$l_{sD} = \frac{l}{\sin \gamma} = \pi l \sqrt{\frac{D^2}{b^2} + \frac{1}{\pi^2}}. \quad (2.55)$$

Звідси рівняння площі внутрішньої поверхні робочої камери обладнання для виготовлення паливних брикетів, котра контактує з каналом гвинта S_D , запишеться так:

$$S_D = \pi l (b - t) \sqrt{\frac{D^2}{b^2} + \frac{1}{\pi^2}}. \quad (2.56)$$

Отже, в результаті проведеного аналізу основних типів конструкцій гвинтів обладнання для виготовлення паливних брикетів були отримані залежності, які характеризують вплив усіх геометричних гвинта, площа поверхні параметрів гвинтів на такі показники, як площа перерізу каналу та об'єм каналу гвинта для гвинтів з незмінними за довжиною геометричними параметрами.

Зазначені залежності можна використати для обґрунтування раціональних параметрів робочих органів установок для виготовлення паливних брикетів при створенні їх нових зразків. Отримані залежності також дозволяють здійснити аналіз впливу інтенсивності зміни геометричних параметрів гвинтів на показники їх роботи.

2.4. Обґрунтування ширини та глибини каналу гвинта

З основ гідродинаміки [50-51] відомо, що основними параметрами, які описують рух рідини (рідкого середовища), є живий переріз та змочений периметр потоку та їх співвідношення - гідравлічний радіус. Моделювання руху рідини в закритих та моделювання та його моделлю відкритих руслах передбачає узгодження цих параметрів між об'єктом, коли в вигляді універсального масштабного коефіцієнта для будь-яких перерізів зазвичай обирається деякий «еквівалентний гідравлічний радіус» [52].

З врахуванням цього припускаємо, що використання геометричної моделі гвинта, для аналізу процесів роботи гвинтів з трапецієподібною формою каналу (зображено раніше на рис. 2.1, а) та зі периметрів перерізів закругленою основою каналу (рис. 2.1, б) буде можливе за умови рівності їх діаметрів, площ перерізів каналів гвинтів та співвідношень частин витка гвинта, що контактує із сумішшю, та, відповідно, робочої камери обладнання для виготовлення паливних брикетів, тобто для гвинта з плоскою основою каналу:

$$\begin{cases} WH = F, \\ \frac{W}{2H + W} = \frac{b - t}{L}, \end{cases} \quad (2.57)$$

та для гвинта зі закругленою основою каналу:

$$\begin{cases} W_{\varphi} H_{\varphi} = F_{\varphi}, \\ \frac{W_{\varphi}}{2H_{\varphi} + W_{\varphi}} = \frac{b - t}{L_{\varphi}}, \end{cases} \quad (2.58)$$

де складові визначаються за залежностями (2.8), (2.12), (2.22), (2.23).

Розв'язуючи системи рівнянь (2.57) та (2.58) за допомогою програмного комплексу Wolfram Mathematica [53], отримаємо рівняння приведених ширини каналу гвинта W та глибини каналу гвинта H .

Для трапецієподібного гвинта з плоскою основою каналу:

$$H = \frac{h}{2b - 2t} \sqrt{\left(\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta \right) (b - t) (2b - 2t - h \operatorname{tg} \alpha - h \operatorname{tg} \beta)}, \quad (2.59)$$

$$W = \frac{\sqrt{(b - t) (2b - 2t - h \operatorname{tg} \alpha - h \operatorname{tg} \beta)}}{\sqrt{\frac{1}{\cos \alpha} + \frac{1}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta}}. \quad (2.60)$$

Для гвинта з зі закругленою основою:

$$\begin{aligned} H_{\varphi} &= \frac{1}{2(b - t)} \times \\ &\times \sqrt{(b - t) \left[r_{\varphi}^2 (\alpha + \beta - \pi) + 2r_{\varphi}^2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) - (b - t)^2 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]} \times \\ &\times \sqrt{b - t + 2r_{\varphi} \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) - \frac{b - t}{\sin(\alpha + \beta)} (\cos \alpha + \cos \beta) + \pi r_{\varphi} (\alpha + \beta - \pi)}, \end{aligned} \quad (2.61)$$

$$W_{\varphi} = \sqrt{\frac{(b-t) \left[\pi r_{\varphi}^2 (\alpha + \beta - \pi) + 2r_{\varphi}^2 \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) - (b-t)^2 \frac{\cos \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \right]}{b-t + 2r_{\varphi} \operatorname{ctg} \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) - \frac{b-t}{\sin(\alpha + \beta)} (\cos \alpha + \cos \beta) + \pi r_{\varphi} (\alpha + \beta - \pi)}}. \quad (2.62)$$

2.5. Висновки до розділу

У результаті геометричного моделювання робочих органів гвинтової обладнання для виготовлення паливних брикетів були отримані в загальному вигляді залежності впливу геометричних параметрів на площу перерізу каналу гвинта, площу поверхні каналу гвинта, об'єм каналу гвинта для гвинтів основних поширених виконань.

Для гвинта зі закругленою основою каналу було отримано залежність, що пов'язує глибину каналу з радіусом твірної основи гвинта.

Запропоновано умову та отримано залежності для приведення параметрів гвинтів з каналами основних поширених виконань до параметрів відповідних гвинтів з каналами прямокутної форми.

Установлено, що для забезпечення найвищої продуктивності обладнання для виготовлення паливних брикетів, зменшення його матеріалоємності та вартості виготовлення, раціональними є співвідношення між довжиною та початковою шириною каналу гвинта $l/W_0 \approx 19-21$ та, відповідно, між початковою шириною каналу та зовнішнім діаметром гвинта $W_0/D = 0,20-0,25$.

3. Програма та методика проведення експериментальних досліджень

3.1. Мета та програма експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є визначення раціональних конструктивно-режимних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів.

Програмою досліджень передбачено виконання наступних завдань:

- провести лабораторні дослідження процесу ущільнення лушпинної фракції макухи насіння культур олійних
- підготувати та створити експериментальний зразок обладнання для виготовлення паливних брикетів для проведення досліджень;
- розробити методику експериментальних досліджень;
- провести експериментальні дослідження та визначити вплив конструктивно-режимних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів на продуктивність та витрати енергії;
- провести аналіз та узагальнення отриманих експериментальних даних.

3.2. Методика лабораторних досліджень процесу ущільнення лушпинної фракції макухи

Для проведення досліджень макетного зразка обладнання для виготовлення брикетів виготовлено лабораторний стенд (рисунки 3.1-3.2), котрий складається з макетного зразка преса, матриці, гільзи та пуансона. Між пуансоном та гвинтом преса розміщений динамометр ДОСМ. Лушпинна фракція з макухи насіння соняшнику засипається в гільзу на поверхню матриці на задану висоту. За допомогою гвинта преса, через ювалася через отвір матриці. При цьому визначалася величина сили, необхідної для продавлювання досліджуваного матеріалу. При дослідженні брались матриці товщиною 4, 6 та 8 мм з діаметрами отворів 2, 4 та 6 мм. Після отримання спресованих зразків визначалась її питома вага.

Матрицю лабораторних досліджень представлено в таблиці 3.1.

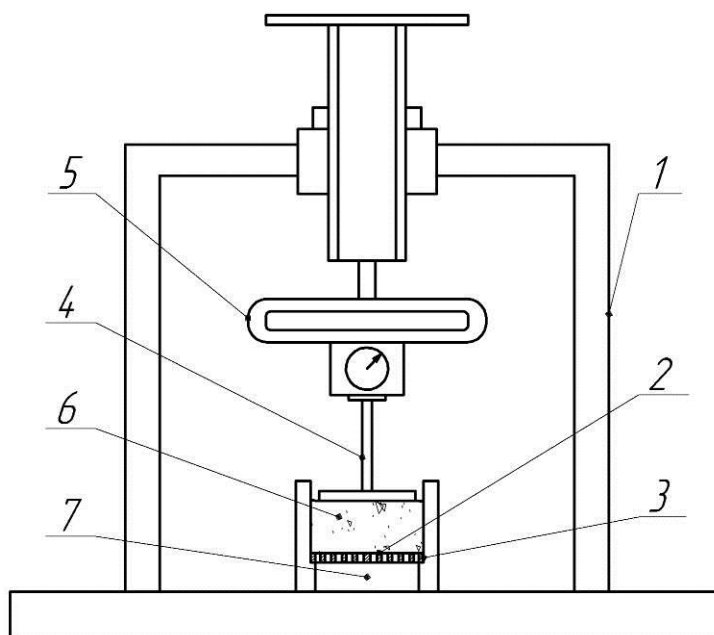


Рисунок 3.1. Схема обладнання для проведення досліджень процесу ущільнення лушпинної фракції макухи:

1 – макетний зразок преса; 2 – матриця; 3 – гільза; 4 – пуансон; 5 – динамометр ДОСМ; 6 – лушпинна фракція; 7 – спресовані зразки.

Лабораторні дослідження процесу ущільнення лушпинної фракції макухи проводилися з використанням математичного методу планування експерименту, котрий дозволяє визначити математичні моделі процесів в вигляді рівнянь регресії (полінома) другого порядку [54]:

$$y = a_0 + \sum_{k=1}^k a_i x_i + \sum_{k=1}^k a_{ij} x_i x_j + \sum_{k=1}^k a_{ii} x_i^2 \quad (3.1)$$

де a_0, a_i, a_{ij}, a_{ii} – коефіцієнти регресії;

x_i, x_j – незалежні змінні фактори.



Рисунок 3.2. Загальний вигляд обладнання для проведення лабораторних досліджень.

Таблиця 3.1.

Матриця лабораторних досліджень

Товщина матриці t , мм	Діаметр отвору матриці d , мм
4	2
4	4
4	6
6	2
6	4
6	6
8	2
8	4
8	6

Рівняння регресії другого порядку визначаються в кодованому вигляді. Кодування факторів здійснюється за формулою:

$$X_i = \frac{A_i - A_{oi}}{\varepsilon} \quad (3.2)$$

де X_i – кодоване значення фактора (безрозмірна величина, рівні: верхній, нижній та в центрі позначаються відповідно +1; -1; 0);

A_i – натуральне значення фактора;

A_{oi} – натуральне значення фактора на нульовому рівні;

ε – натуральне значення інтервалу варіації фактора.

Обробка результатів досліджень, проведених методом математичного факторного планування експериментів [55], виконувались за допомогою комп'ютерної програми «Mathematica».

3.3. Опис експериментального стенду для проведення досліджень

Експериментальні дослідження проводилися на установці, що складалася з експериментального зразку обладнання для виготовлення паливних брикетів, устаткування для зміни параметрів робочого процесу формування паливних брикетів (блок керування з частотним регулятором Danfoss) та контрольно-вимірювальної апаратури (відеографічного реєстратора Екограф-Т та персонального комп'ютера з встановленим програмним забезпеченням). Загальний вигляд експериментального стенду та контрольно-вимірювальної апаратури представлено на рисунку 3.3.



а



б

Рисунок 3.3. Загальний вигляд обладнання для виготовлення паливних брикетів (а) та контрольно-вимірювальної апаратури (б).

Установка для виготовлення паливних брикетів приєднується через вал привода до мотор-редуктора максимальної потужності – 7,5 кВт, котрий з'єднується із частотним перетворювачем Danfoss VLT Micro Drive. З є можливість змінювати частоту обертання вала привода в діапазоні – 0-400 об/хв. Схема електрична принципова підключення частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive до електродвигуна мотор-редуктора представлена на рисунку 3.4.

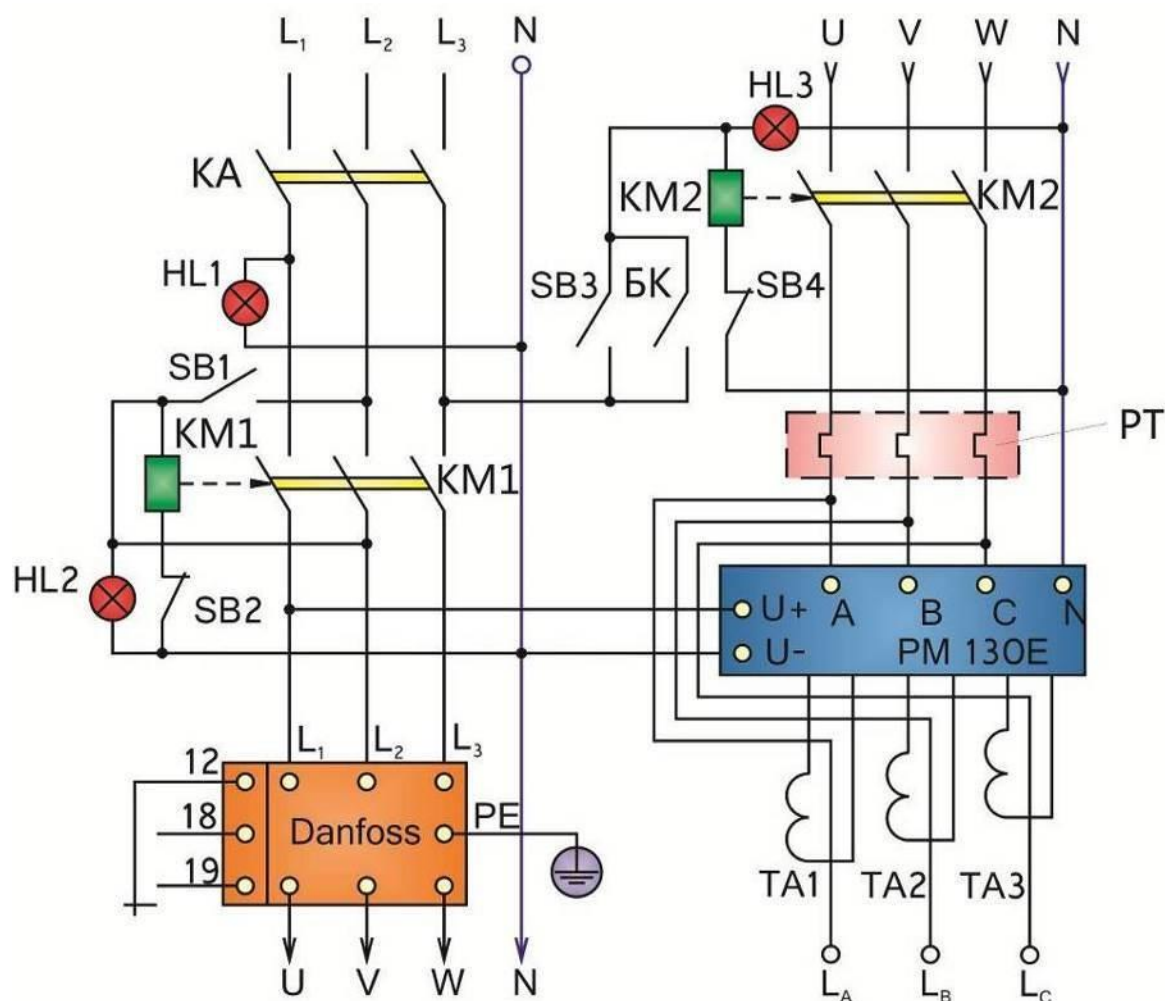


Рисунок 3.4. Схема електрична принципова підключення частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive до електродвигуна мотор-редуктора:

L1, L2, L3, A, B, C – фазні проводи на вході та виході шафи керування відповідно; N – нульовий провід; KA – комутаційний апарат (автоматичний вимикач); KM1, KM2 – контактори; SB1, SB3 – кнопки «Пуск»; SB2, SB4 – кнопки «Стоп».

3.4. Методика експериментальних досліджень обладнання для виготовлення паливних брикетів

Задана подача лушпинної фракції в завантажувальний бункер здійснюється за допомогою регулюючої заслінки. Швидкість подачі лушпинної фракції можна змінювати в діапазоні – 0-80 кг/год.

Перед початком експериментальних досліджень необхідно визначити умови проведення досліджень та підготувати лушпинну фракцію насіння культур олійних (соняшника) масою 10 кг для кожного досліду.

Для кожної порції лушпинної фракції насіння культур олійних необхідно визначити вологість за ДСТУ 27548-97 «Корма рослинні. Методи визначення вологи» [56] та олійність за ДСТУ 13496.15-97 «Корма, комбікорма, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту сирого жиру» [57].

Об'ємна маса кожної порції лушпинної фракції насіння культур олійних визначається за методикою [58], котра передбачає зважування маси лушпинної фракції, розміщеної в ящику розмірами не менше 10 см × 10 см × 10 см без з його краями, при вільному падінні лушпинної фракції з висоти 10 см від його верхнього краю. Маса зразка лушпинної фракції визначається шляхом статичного зважуванням на електронних вагах АА-200.

Для проведення досліду включається електродвигун мотор-редуктор та за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT Micro Drive встановлюється необхідна частота обертання вала привода обладнання для виготовлення паливних брикетів.

Лушпинна фракція масою 10 кг засипається в бункер та за допомогою відкаліброваної регулюючої заслінки встановлюється задана швидкість подачі матеріалу в установку.

В процесі дослідження фіксується значення витрачаємої потужності електродвигуна на частотному перетворювачі Danfoss VLT Micro Drive та час проходження 10 кг матеріалу крізь установку для виготовлення паливних брикетів.

Тривалість виробничого циклу заміряються секундоміром. Початком виробничого циклу вважався процес завантаження вихідного матеріалу. Закінчення виробничого циклу – по завершенню процесу накопичення паливних брикетів.

В кінці досліду установка вимикається та готується до наступного.

В якості олійної культури обрано соняшник.

Факторами досліджень є такі параметри процесу брикетування (таблиця 3.2): довжина філь'єри L , мм; частота обертів гвинта n , об/хв.

Дослідження проводяться за планом двофакторного експерименту 32, при варіюванні факторів використовувалась матриця планування експериментів Бокса-Бенкіна. Досліди проводяться в триразовій повторності.

Таблиця 3.2.

Інтервали та рівні варіювання факторів при експериментальних дослідженнях обладнання для виготовлення паливних брикетів

Позначення факторів		Найменування факторів та одиниці вимірювання	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Кодове	Натуральне		+1	0	- 1	
X_1	L	Довжина філь'єри, мм	180	150	120	30
X_2	n	Частота обертів гвинта, об/хв.	360	240	120	120

За критерії досліджень обрано продуктивність Q (т/год) та потужність приводу N (кВт), що витрачається на здійснення процесу.

Продуктивність виробничого процесу визначається шляхом розрахунку за формулою

$$Q = \frac{m}{t}, \quad (3.2)$$

де m – маса лушпинної фракції, $m = 10$ кг;

t – тривалість виробничого циклу, год.

В якості критерію оптимізації факторів досліджень обрано питомі енерговитрати, які визначаються за формулою:

$$E = \frac{P}{Q}, \quad (3.4)$$

Відтворення дослідів визначається по однорідності результатів вимірювань. Умови однорідності формалізуються так, щоб усі вимірювання, які входять в дану сукупність, могли однієї випадкової величини, підпорядкованої нормальному розподілу.

3.4. Висновки з розділу

Визначено програму та методику експериментальних досліджень з визначення раціональних параметрів робочих органів обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння олійних культур.

4. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу формування паливних брикетів

4.1. Результати лабораторних експериментальних досліджень

В результаті пресування лушпинного порошку на лабораторному стенді отримані спресовані зразки з макухи насіння соняшника.

В результаті обробки експериментальних даних одержані математичні моделі залежності сили, необхідної для продавлювання лушпинної фракції через отвори матриць та питомої ваги отриманих при цьому зразків (рисунок 4.1-4.2):

$$P = 834,634 + 190,284 d - 158,841 t - 9,1875 dt + 7,35 t^2; \quad (4.1)$$

$$\rho = 649,0556 + 10,6667 d - 47,5417 t + 2,0417 d^2 + 1,3125 dt, \quad (4.2)$$

де P – сила видавлювання, Н;

ρ – питома вага зразків, кг/м³;

d – діаметр отвору матриці, мм;

t – товщина матриці, мм.

Виходячи з проведених досліджень можна зробити висновок, що при збільшенні товщини матриці та зменшенні діаметра отворів сила видавлювання лушпинного порошку та питома вага отриманих зразків збільшується. Отримані залежності можуть бути використані при розрахунку конструктивних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів.

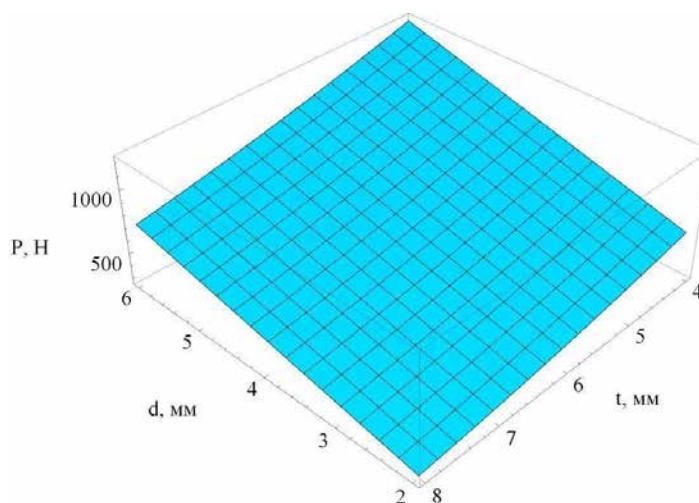


Рисунок 4.1. Залежності сила видавлювання P від діаметру отворів матриці d та товщина матриці t .

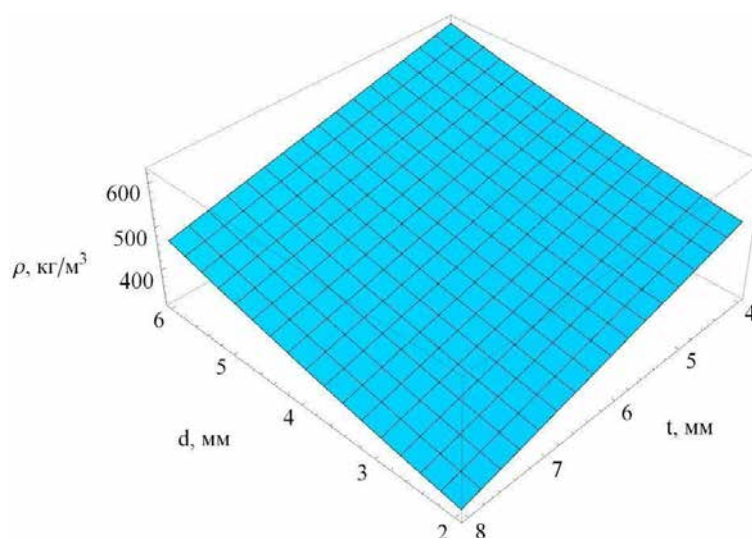


Рисунок 4.2. Залежності питомої ваги зразків ρ від діаметру отворів матриці d та товщина матриці t .

4.2. Оптимізація конструктивно-технологічних параметрів обладнання для виготовлення паливних брикетів

Залежність продуктивності Q (т/год.), потужності приводу N , кВт від діаметра філь'єри D , мм представлена відповідно виразами:

$$Q = -0,315D^2 + 35,85D - 741, \quad (4.3)$$

$$N = -0,006D^2 + 0,31D + 8,8, \quad (4.4)$$

які графічно наведені на рисунку 4.3.

Значення коефіцієнтів детермінації обох виразів наближаються до одиниці, що свідчить про достовірність математичного опису отриманих даних.

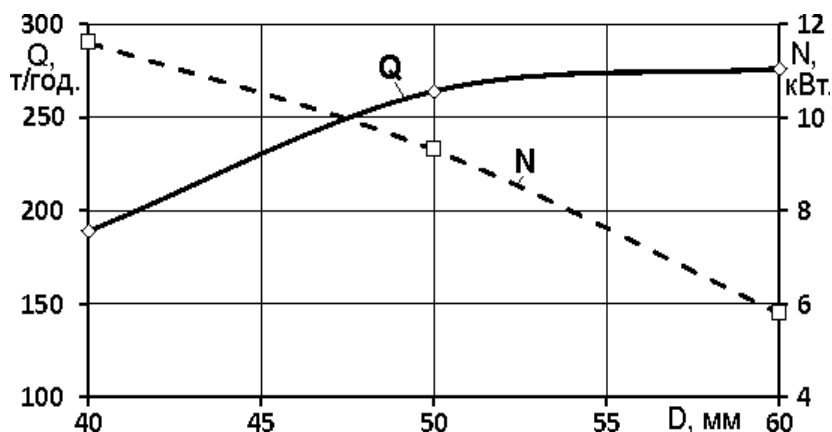


Рисунок 4.3. Залежність продуктивності Q (т/год.) та потужності приводу N , кВт від діаметра філь'єри D , мм.

Виходячи з аналізу аналітичних та експериментальних досліджень, найбільш прийнятною філь'єрою обладнання для виготовлення паливних другого пункту брикетів є філь'єра діаметром 50 мм.

Для планування досліджень використовувалася трирівнева матриця оптимального плану Бокса-Бенкіна другого порядку для двох факторів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1.

**Трирівнева матриця оптимального плану Бокса-Бенкіна
другого порядку для двох факторів**

Фактор	№ дослідю								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
X_1	1	-1	1	-1	1	-1	0	0	0
X_2	1	1	-1	-1	0	0	1	-1	0

У результаті експериментальних досліджень процесу роботи обладнання для виготовлення паливних брикетів з філь'єрою діаметром 50 мм отримано результати, представлені в таблицях 4.2-4.4.

При дослідженнях продуктивності за отриманими дисперсії однорідні даними маємо, що на 95% рівні довірчої ймовірності та значення критерію Кохрена $G = 0,2412$, що менше критичного табличного значення, яке становить $G = 0,4775$.

У результаті статистичної обробки даних за допомогою ППП Statistica відгуку, тобто регресійну отримано рівняння функції модель продуктивності брикетування в вигляді квадратичного полінома, а її графічне представлення подано на рисунку 4.4.

$$Q = 295,4456 - 0,6946 L + 0,344 n + 0,0026 L^2 - 0,0021 L n + 0,0003 n^2. \quad (4.5)$$

Статистична оцінка отриманої функцій відгуку продуктивності брикетування представлена в таблиці 4.5.

Таблиця 4.2.

Результати досліджень визначення продуктивності брикетування Q (кг/год.)

№	Значення замірів			Середнє Y_{cp}
	Y_1	Y_2	Y_3	
1	283	286	279	283
2	321	328	318	322
3	258	249	251	253
4	264	261	263	262
5	267	263	272	267
6	295	289	295	293
7	304	311	299	305
8	263	267	261	264
9	272	266	268	269

Таблиця 4.3.

Результати досліджень визначення потужності приводу N , кВт

№	Значення замірів			Середнє Y_{cp}
	Y_1	Y_2	Y_3	
1	6,1	6,3	6,4	6,27
2	5,4	5,2	5,5	5,37
3	9,8	9,4	9,2	9,47
4	8,5	8,8	8,6	8,63
5	7,2	7,3	6,9	7,13
6	7,4	7,2	7,5	7,37
7	6,6	6,5	6,8	6,63
8	8,8	8,5	8,7	8,67
9	6,9	6,7	6,8	6,8

Таблиця 4.4.

Зведені дані щодо результатів експериментальних досліджень

Довжина філь'єри L , мм	Частота обертів гвинта n , об/хв.	Продуктивність брикетування Q , кг/год.	Потужність приводу N , кВт
180	360	283	6,27
120	360	322	5,37
180	120	253	9,47
120	120	262	8,63
180	240	267	7,13
120	240	293	7,37
150	380	305	6,63
150	120	264	8,67
150	240	269	6,8

Таблиця 4.5.

Статистична оцінка математичної моделі продуктивності брикетування

Оціночний показник	Значення
Дисперсія неадекватності математичної моделі, S_2	37,6862
Дисперсія похибки дослідів, S_{s2}	16,7407
Критерій Фішера, $F_{05}(5, 30)$	2,2512
Множинний коефіцієнт регресії моделі, R	0,9864
Коефіцієнт детермінації моделі, R_2	0,9730

Згідно з оцінкою за критерієм Фішера модель адекватна, оскільки $P = 0,1173 > P\{F_{v_1, v_2}\} = 0,05$.

Характерні точки рівняння регресії, тобто мінімальні, максимальні значення продуктивності та її значення в нульовій точці наведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6.

Характерні точки математичної моделі продуктивності брикетування

Показник	Максимальне значення	Мінімальне значення	Значення в нульовій точці
Довжина філь'єри, мм	120	180	150
Частота обертання ротора, 1/хв.	360	120	240
Продуктивність, кг/год.	323,565	254,898	269

За даними таблиць 4.5 та 4.6 бачимо, що розбіжність між експериментальними значеннями продуктивності брикетування та отриманими за рівнянням регресії для максимального та мінімального значень не перевищують 1%.

За результатами дослідження потужності процесу брикетування видно, що на 95% рівні довірчої однорідності та ймовірності дисперсії значення критерію Кохрена $G = 0,3256$, що менше критичного табличного значення, яке становить $G = 0,4775$.

У результаті статистичної обробки даних за допомогою ППП Statistica отримано рівняння функції відгуку, тобто регресійну модель потужності процесу брикетування в вигляді квадратичного полінома:

$$N = 10,5281 + 0,0105L - 0,0292 n - 1,061 \cdot 10^{-5} L^2 + 4,1667 \cdot 10^{-6} L n + 3,5328 \cdot 10^{-5} n^2. \quad (4.6)$$

Статистична оцінка отриманої функції відгуку потужності процесу брикетування представлена в таблиці 4.7.

Згідно з оцінкою за критерієм Фішера модель адекватна з достовірністю 0,416686, проте коефіцієнт детермінації моделі становить $R_2 = 0,9218$, тобто він перевищує 0,75, що свідчить про її роботоздатність.

Таблиця 4.7.

Характерні точки математичної моделі продуктивності брикетування

Оціночний показник	Значення
Дисперсія неадекватності математичної моделі, S_2	0,3603
Дисперсія похибки дослідів, S_{s2}	0,0319
Критерій Фішера, $F_{05}(5, 30)$	11,3114
Множинний коефіцієнт регресії моделі, R	0,9601
Коефіцієнт детермінації моделі, R_2	0,9218

Характерні точки рівняння, тобто мінімальні, максимальні значення потужності та її значення в нульовій точці наведені в таблиці 4.8.

За даними таблиці 4.7 бачимо, що розбіжність між експериментальними значеннями продуктивності брикетування та отриманими за рівнянням регресії для максимального значення становить 3,3% та для мінімального 7,1%, тобто знаходиться в допустимих межах для інженерних розрахунків.

Таблиця 4.8.

Характерні точки математичної моделі потужності процесу брикетування

Показник	Максимальне значення	Мінімальне значення	Значення в нульовій точці
Довжина філь'єри, мм	180	120	150
Частота обертання ротора, об/хв.	120	360	240
Потужність, кВт	9,158	5,824	6,8

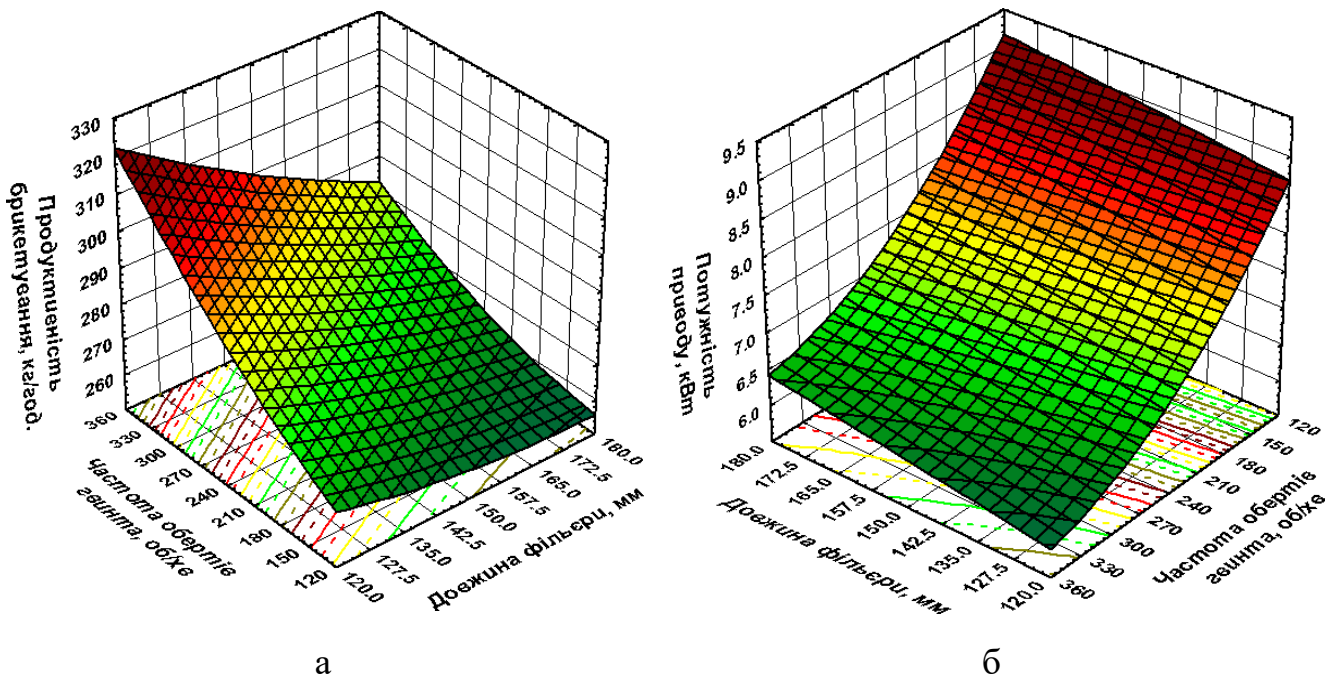


Рисунок 4.4. Залежність показників роботи преса від довжини філь'єри L (мм) та частоти обертання гвинта n (об/хв.):

а – продуктивність Q , т/год.; б – потужність приводу N , кВт.

4.3. Висновки з розділу

Для проведення лабораторних досліджень процесу ущільнення лушпинної фракції макухи насіння олійних культур, виготовлено лабораторний стенд, котрий складається з макетного зразка преса, матриці, гільзи та пуансона. В результаті обробки експериментальних даних одержані математичні моделі залежності сили, необхідної для продавлювання лушпинної фракції через отвори матриць (400-1200 Н) та питомої ваги отриманих при цьому зразків (400-700 кг/м³).

В результаті експериментальних досліджень встановлено залежності показників роботи преса (продуктивності Q та потужності приводу N) від довжини філь'єри L та частоти обертання гвинта n . Встановлено, що найбільш ефективним є установка на брикетувальник філь'єри діаметром 50 мм та частотою обертання 240 об/хв. При цьому продуктивність брикетування становить 264 кг/год, затрати потужності на брикетування – 7,2 кВт.

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5.1. Вимоги безпеки під час виконання робіт на установці для виготовлення паливних брикетів

1. Робітник повинен бути одягнутий в спецодяг.
2. Перед виконанням робіт слід включити освітлення та вентиляцію, оглянути робоче місце, перевірити наявність, справність та міцність перехідних містків, майданчиків, сходів та поручнів.
3. Перед виконанням робіт слід звільнити проходи, підходи до рубильників, вимикачів від сторонніх предметів, сировини та відходів.
4. При змінній роботі слід приймати робоче місце від змінника. Необхідно упевнитися в справності машин, інструменту, обладнання.
5. Необхідно перевірити надійність кріплення машин, обладнання, захисних кожухів та огорож, частин (пасів, ланцюгів, шківів, валів, шестерінок, муфт), кришок, затворів, а також запірної арматури.
6. Необхідно впевнитися в відсутності сторонніх предметів на подавальних транспортерах, в бункерах.
7. Необхідно перевірити наявність та комплектність засобів пожежогашіння, аптечки першої допомоги, справність засобів сигналізації.
8. Інструмент та пристрої повинні бути розміщені так, щоб було зручно використовувати їх.
9. Підготувати необхідну кількість маси, котра підлягає просіюванню.
10. Під час запуску обладнання для виготовлення паливних брикетів спочатку необхідно включити транспортер на зворотній хід, щоб викинути предмети, які випадково потрапили на нього.
11. Спочатку необхідно запустити установку для виготовлення паливних брикетів на холостому ходу, впевнитися в відсутності сторонніх шумів, вібрації, нагріву підшипників, підтікання мастила з корпусів підшипників, прослідкуйте за роботою натяжних ланцюгів, перевірити роботу контрольних та сигнальних пристроїв.

12. Забороняється проштовхувати руками або будь-якими предметами перероблюваний матеріал в горловину приймального бункера працюючої обладнання для виготовлення паливних брикетів.

13. Під час роботи обладнання для виготовлення паливних брикетів не знаходиться напроти викидання маси, тому що в неї може попасти металевий предмет та нанести травму.

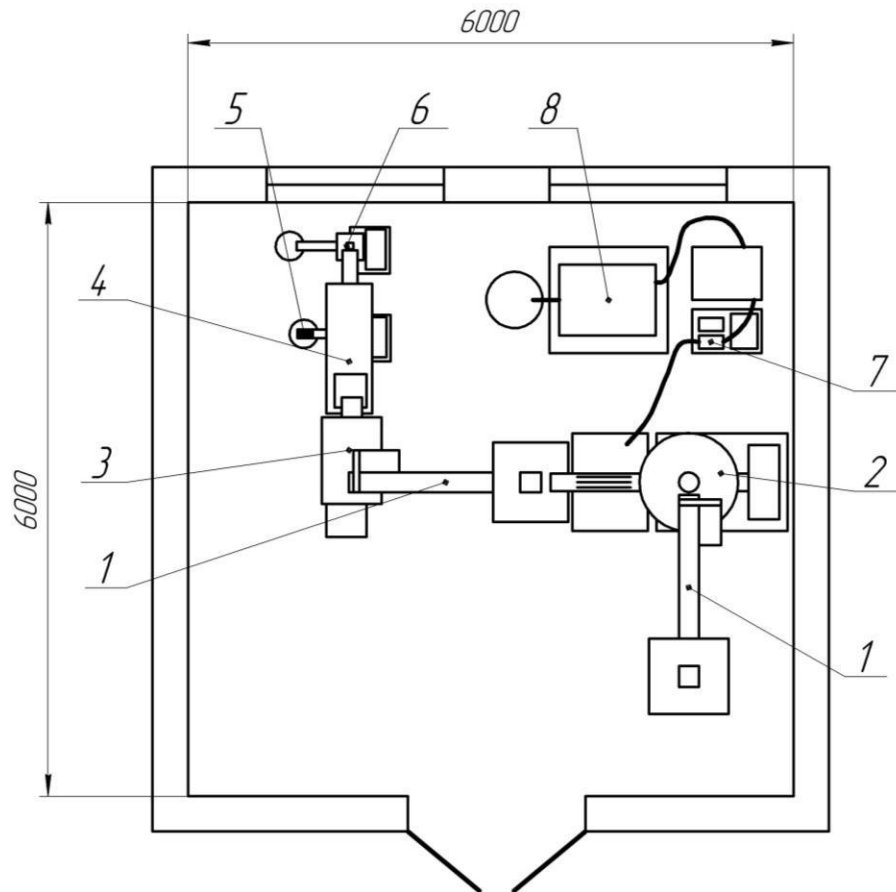
14. Продукти, які зависають в бункері обладнання для виготовлення паливних брикетів та застрягли в приймальних горловинах, необхідно звільнити за допомогою проштовхувача довжиною не менше 1 м, виготовленого із дерева або пластмаси, що легко зруйнується в разі захоплення.

15. В процесі роботи необхідно слідкувати за справністю та ефективністю роботи технологічного обладнання, аспіраційних та вентиляційних систем, ущільнювачів, електрообладнання, засобів контролю та сигналізації.

16. Очищення робочих органів обладнання для виготовлення паливних брикетів від завалів технологічним матеріалом або сторонніми предметами проводьте після повної зупинки машини за допомогою спеціальних пристроїв (скребків, чистиків, щіток).

5.2. Розміщення обладнання в приміщенні

Згідно норм пожежної безпеки та ергономіки виробничого приміщення обладнання відповідно до розробленої технологічної лінії комплексної безвідхідної переробки культур олійних з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок в вигляді пелет та твердого біопалива (розділ 1) повинно розміщуватися за схемою, котра представлена на рисунку 5.1.



Рисунку 5.1. Схема розміщення обладнання відповідно до розробленої технологічної лінії комплексної безвідхідної переробки макухи:

1 – шнековий транспортер; 2 – прес-екструдер; 3 – молоткова дробарка; 4 – щітковий роторний просіювач; 5 – пелетератор; 6 – обладнання для виготовлення паливних брикетів; 7 – насос; 8 – фільтр.

5.3. Розрахунок штучного освітлення приміщення

У виробничому приміщенні розміром 6×5 м, для забезпечення обслуговування обладнання рівень освітленості повинен бути не менше $E_n = 150$ лк, при цьому коефіцієнт запасу $K_z = 1,3$.

Вибираємо світильник за показником економічності, виходячи з формули

$$(5.1)$$

де h – висота підвісу світильників, приймаємо $h = 2,5$ м.

Відповідно до показника економічності $lg m = 1,2$, вибираємо світильник типу ЛСП-18 з лампою ЛБР-40.

Оптимальну відстань L_0 визначаємо за формулою

$$L_0 = \lambda_{c.y.} \cdot h = 1,57 \cdot 2,5 = 3,95 \text{ м.} \quad (5.2)$$

Визначаємо число світильників уздовж приміщення:

$$h_a = \frac{a}{L_0}, \quad (5.3)$$

де a – робоча довжина приміщення, $a = 6$ м.

Маємо

$$h_a = \frac{6}{3,95} = 1,52, \text{ округляємо до 2 шт.}$$

$$h_b = \frac{b}{L_0}, \quad (5.4)$$

де b – ширина приміщення, $b = 6$ м.

Одержимо:

$$h_b = \frac{6}{3,95} = 1,52, \text{ округляємо до 2 шт.}$$

Тоді загальне число світильників дорівнює

$$N = h_a \cdot h_b = 2 \cdot 2 = 4 \text{ шт.} \quad (5.5)$$

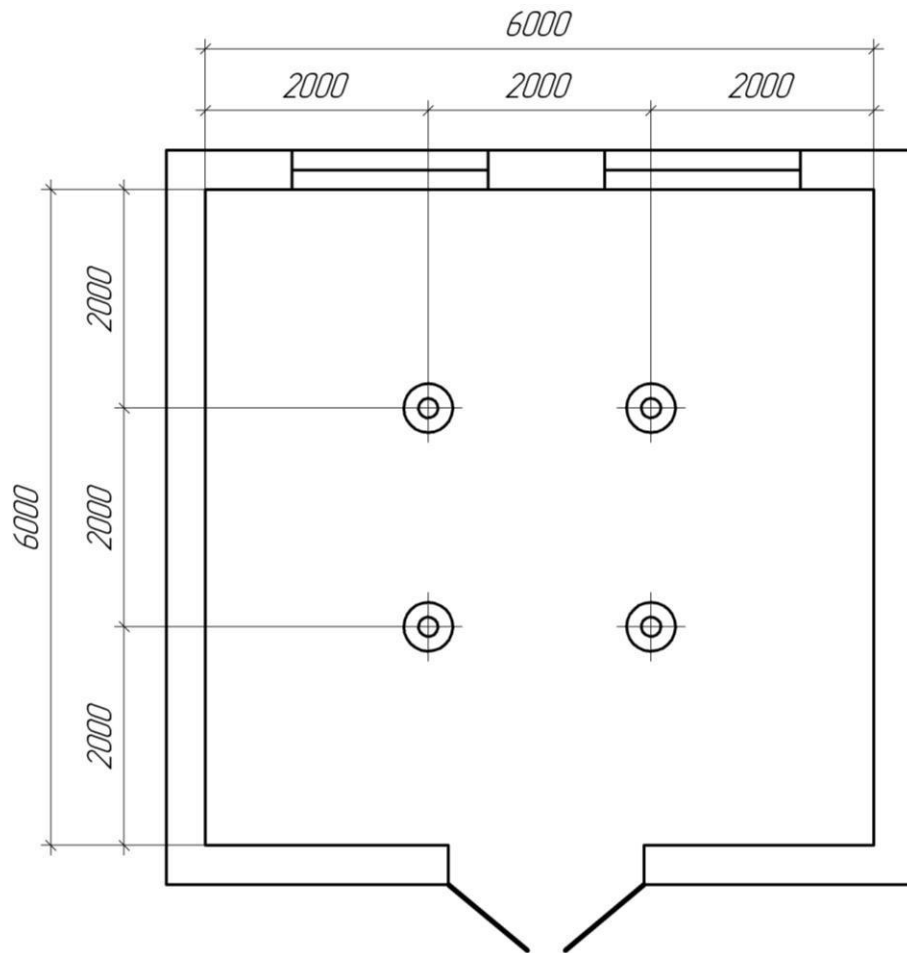
Відстань між центрами світильників уздовж приміщення:

$$L_a = \frac{a}{h_a + 1} = \frac{6}{2 + 1} = 2 \text{ м.} \quad (5.6)$$

Відстань між центрами світильників поперек приміщення:

$$L_b = \frac{a}{h_b + 1} = \frac{6}{2 + 1} = 2 \text{ м.} \quad (5.7)$$

Схема розміщення світильників в приміщенні наведено на рисунку 5.2.



Рисунку 5.2. Схема розміщення світильників в приміщенні.

5.4. Розрахунок вентиляції приміщення

Приміщення із обладнанням відповідно до розробленої технологічної лінії комплексної макухи забруднюється пилом, тому проведемо розрахунок вентиляції.

Потрібний повітрообмін $L_{номр}$, м³/год., залежить від кількості шкідливих речовин, що виділяються в повітря приміщення, гранично допустимої концентрації (ГДК) шкідливої речовини, та обчислюється за формулою (5.8).

$$L_{номр} = \frac{G}{q_{ГДК} - q_0}, \quad (5.8)$$

де $q_{ГДК}$ – гранично допустима концентрація пилу, м³/год., приймаємо $q_{ГДК} = 6$ м³/год.;

q_0 – концентрація пилу в чистому повітрі, м³/год., приймаємо $q_0 = 1$ м³/год.;

G – кількість шкідливої речовини, що виділяє обладнання за годину, кг/год.,
приймаємо $G = 0,8$ кг/год.

$$L_{\text{норм}} = \frac{0,8 \cdot 10^6}{6-1} = 160000 \text{ кг / год.}$$

До (20-30)% повітрообміну здійснюється за рахунок неорганізованої вентиляції, чистого повітря потрібно подати в приміщення за допомогою організованої природної вентиляції.

Розрахунок організованої природної вентиляції.

Він зводиться до визначення площі поперечного перерізу трубопроводу S , м²,

$$S = \frac{L_{\text{норм}}}{V_{\text{в}} \cdot 3600}, \quad (5.9)$$

де $V_{\text{в}}$ – швидкість руху повітря в повітрозбірнику, м/с.

Швидкість руху повітря в повітрозбірнику визначаємо за формулою:

$$V = \mu \sqrt{\frac{2\Delta H}{\rho_3}}, \quad (5.10)$$

де μ – коефіцієнт опору повітря в повітропроводі, приймаємо 0,5-0,6;

$\rho_3, \rho_{\text{вн}}$ – щільність повітря в середині та зовні приміщення, кг/м³;

ΔH – перепад тиску в повітропроводі, Па;

Він розраховується по формулі:

$$\Delta H = 9,8 \cdot h \cdot (\rho_3 - \rho_{\text{вн}}), \quad (5.11)$$

де h – висота відкритої з обох кінців вентиляційної труби, приймаємо $h = 6$ м.

Щільність повітря ρ , кг/м³, розраховується за формулою:

$$\rho = \frac{353}{(273 - t)}, \quad (5.12)$$

де t – температура повітря

Якщо температура в середині приміщення – 25, а зовні – 17, то

$$\rho_3 = 353 / (273 + 25) = 1,184 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_{\text{вн}} = 353 / (273 + 17) = 1,217 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Delta H = 9,8 \cdot 6 \cdot (1,217 - 1,184) = 1,94 \text{ Па};$$

$$V_6 = 0,6 \sqrt{\frac{2 \cdot 1,94}{1,184}} = 1,08 \text{ м/с.}$$

Потрібний повітрообмін з врахуванням неорганізованої вентиляції (30%),
 $L_{номр}$ м³/год.

$$L_{номр} = \frac{100-30}{100} \cdot 160000 = 112000 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Розраховуємо потрібний переріз повітряних проводів S , м²:

$$S = \frac{112000}{1,08 \cdot 3600} = 2,8 \text{ м}^2.$$

тобто діаметр трубопроводів повинен бути $D = 2,8$ м. Це нереально. Можна взяти 10 трубопроводів ($n = 10$), діаметром 0,5 м. Тоді

Таким чином за рахунок природної вентиляції можна подати в приміщення повітря, м³/год.:

$$L_{нр} = L_{неорг} + L_{орг} = 0,3 \cdot 160000 + 7630,2 = 55630,2 \text{ м}^3 / \text{год.} \quad (5.13)$$

Розрахунок штучної вентиляції. Потрібний повітрообмін штучної вентиляції $L_{нр}$, м³/год., розраховуємо за формулою:

$$L_{ум} = L_{номр} + L_{нр}, \quad (5.14)$$

$$L_{ум} = 160000 + 55630,2 = 104369,8 \text{ м}^3 / \text{год.};$$

При площі поперечного перерізу повітряних проводів $S = 4,5$ м² (5 труб по 0,8 м), швидкість руху повітря V_6 , м/с розраховуємо по формулі:

$$V_6 = \frac{L_{ум}}{5 \cdot 3600} \quad (5.15)$$

$$V_6 = \frac{104369,8}{5 \cdot 3600} = 5,8 \text{ м/с.}$$

Потрібний тиск напору H , Па, розраховуємо по формулі:

$$H = \left(\frac{V_6}{0,6} \right)^2 \cdot \frac{\rho_{вн}}{2} \quad (5.16)$$

$$H = (5,8/0,6)^2 \cdot (1,184/2) = 54,3 \text{ Па};$$

Втрати напору від опору трубопроводу:

$$H_{\text{вт}} = \tau * \frac{l}{D} * \frac{V^2 * \rho_{\text{вн}}}{2} \quad (5.17)$$

де τ – коефіцієнт, що враховує опір повітряних проводів, приймаємо $\tau = 0,02$;

V – середня швидкість руху повітря, м/с.;

D – довжина повітряних проводів, м;

l – довжина повітряних проводів, м.

$$H_{\text{вт}} = 0,02 \cdot \frac{40}{0,8} \cdot \frac{5,8^2 \cdot 1,184}{2} = 19,5 \text{ Па};$$

$$H_{\text{мо}} = \sum E \cdot \frac{V^2 \cdot \rho}{2} \quad (5.18)$$

де ΣE – коефіцієнт, що характеризує опір елементів в повітропроводі, приймаємо $\Sigma E = 0,25$.

$$H_{\text{мо}} = 0,25 \cdot \frac{5,8^2 \cdot 1,184}{2} = 4,9 \text{ Па};$$

Взагалі потрібний тиск H_3 , Па, розраховуємо за формулою:

$$H_3 = H + H_{\text{ем}} + H_{\text{мо}}, \quad (5.19)$$

$$H_3 = 54,3 + 19,5 + 4,9 = 78,7 \text{ Па}.$$

Потужність двигуна N , Вт розраховуємо за формулою:

$$N = \frac{L_1 \cdot H_3}{3600 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{п}}} \quad (5.20)$$

де L_1 – повітрообмін крізь одну трубу, м³/год;

$$L_1 = \frac{L}{5} = \frac{1044369,8}{5} = 20873,96 \text{ м}^3/\text{год};$$

$\eta_{\text{в}}$ – ККД вентилятора;

$\eta_{\text{п}}$ – коефіцієнт передачі.

Для вентилятора Ц-4-70N10 при частоті обертання $\omega = 300$ об/хв, ККД = 0,8:

До протигазів другої групи належать кисневі ізолюючі пристрої КПП-5, -7,-8., кисень в яких міститься в металевих балонах під тиском.

Дитячі протигази: для дітей від 1,5 до 7 років, протигаз фільтруючий дошкільний (ПДФ), від 7 до 17 років (ПДФ-Ш (шкільний)). Будова та принцип дії дитячих протигазів аналогічний для дорослих.

Для захисту дітей віком до 1,5 року використовують камери захисні дитячі (КЗД-4 або -6).

Респіратори використовують для захисту органів дихання від аерозолів хімічних речовин.

Респіратор Р-2, «Пелюсток» має фільтруючу напівмаску багаторазового використання та можливість перебування у ній до 12 год.

Респіратор Р-2Д (дитячий) - це модифікація Р-2, має менші розміри, забезпечує безперервне перебування у ній протягом 4 год.

Найпростіші засоби захисту органів дихання захищають в певній мірі від хімічних речовин. Ці засоби можуть бути виготовлені самостійно і використані як респіратори. До них належать:

Протипилова тканева маска. (ПТМ-1). Має оглядові отвори з прозорою плівкою. Забруднене повітря очищається всією поверхнею маски.

Ватно-марлева пов'язка (ВМП) готується з марлі розміром 100x50 см. (2 шари марлі і 1 шар. вати)

При відсутності вищезазначених засобів можна використовувати підручні засоби (рушники, шарфи, хустки тощо).

Коробки марок М і СО при збільшенні маси відповідно на 35 і 50 г порівняно із початковою масою (на корпусі вона вказана) вважаються відпрацьованими і мають бути замінені новими.

Засоби захисту шкіри, їх призначення

Захищають відкриті ділянки шкіри та одяг від попадання на них крапельно-рідких отруйних хімічних речовин.

За призначенням їх ділять на табельні та підручні. Табельні, за принципом дії, ділять на фільтруючі (повітропроникні) та ізолюючі (повітронепроникні).

Таким чином необхідно мати двигун потужністю не менше 0,9 кВт.

5.5. Висновки з розділу

Базуючись на нормативній документації та згідно вимог охорони праці розраховано баланс повітряного середовища та штучного освітлення приміщення із обладнанням відповідно до розробленої технологічної лінії комплексної безвідхідної переробки макухи. Розроблені вимоги безпеки праці при експлуатації розробленої обладнання для виготовлення паливних брикетів.

6. Економічна ефективність використання установки для виготовлення паливних брикетів

6.1. Вихідні дані

Економічну ефективність від використання розробленої обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння культур олійних в порівнянні з аналоговим брикетувальником БР-200 (таблиця 6.1) виконано відповідно до загальновідомих методик методом послідовного порівняння показників базового й порівнюваного варіантів згідно [59]. За критерій ефективності були витрати на одиницю напрацювання, як оціночні показники – прямі експлуатаційні витрати, річний економічний ефект за термін служби техніки, витрати праці й енергоресурсів на одиницю напрацювання. Економічний ефект буде розраховано на продуктивність 100 тонн макухи за 1 рік.

Таблиця 6.1.

Технічні характеристики машин

Показник	БР-200	Розроблена установка
Продуктивність, кг/год.	200	264
Потужність, кВт	7,5	7,2
Кількість обслуговуючого персоналу, люд.	1	1
Ціна, грн.	41200	50000

6.2. Визначення економічної ефективності проектної машини

Проектований та базовий варіанти лінії виробництва паливних брикетів відрізняються лише конструкцією брикетувальника, тому порівняння будемо виконувати лише за експлуатаційними показниками роботи цього обладнання, а саме за показниками питомих експлуатаційних витрат та додаткових капітальних вкладень.

Питомі експлуатаційні витрати визначаємо за формулою

$$I = I_3 + I_e + I_a + I_m, \quad (6.1)$$

де I_3 – питомі експлуатаційні витрати на виплату заробітної плати обслуговуючому персоналу, грн./т;

I_e – питомі витрати на електроенергію, грн./т;

I_a – питомі амортизаційні відрахування, грн./т;

I_m – питомі витрати на ремонт та технічне обслуговування обладнання, грн./т.

Питомі експлуатаційні витрати на заробітну плату розрахуємо за виразом:

$$I_3 = \frac{n \cdot f \cdot \delta \cdot D}{P}, \text{ грн.}, \quad (6.2)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу, люд. Для базового та проектного варіанту $n_b = n_n = 1$;

f – годинна тарифна ставка одного працівника, грн./год., приймаємо $f = 21$ грн./год.;

$\delta = 1,372$ – коефіцієнт нарахування на заробітну плату;

D – тривалість виконання певних робіт з обладнанням протягом року,

$$B = \frac{M}{Q}, \text{ год.}, \quad (6.3)$$

$M = 100000$ кг – загальний маса макухи, яку необхідно переробити за рік;

Q – продуктивність пелетератора, кг/год.;

P – об'єм брикетів, що необхідно приготувати за рік. В нашому випадку $P = 100000$ кг.

Для базового варіанту $B = 100000/200 = 500$ год., для проектного – $B = 100000/264 = 378$ год. Питомі експлуатаційні витрати на заробітну плату складають:

- для базового варіанту:

$$I_3^b = 1 \cdot 21 \cdot 1,372 \cdot 500 / 100000 = 0,14 \text{ грн./кг};$$

- для проектного варіанту:

$$I_3^n = 1 \cdot 21 \cdot 1,372 \cdot 378 / 100000 = 0,11 \text{ грн./кг}.$$

Річні питомі затрати на електроенергію визначимо за формулою:

$$I_e = \frac{n \cdot C_e \cdot W_e \cdot t_c}{P}, \text{ грн.}, \quad (6.4)$$

де n – кількість обладнання, що використовується на фермі. Для базового та проєктованого варіантів $n_{\delta} = n_n = 1$;

C_e – ціна 1 кВт·год електроенергії, грн. $C_e = 1,81$ грн.;

W_e – споживана потужність подрібнювача, кВт;

t_c – тривалість роботи обладнання, год.

Річні питомі затрати на електроенергію складають:

для базового варіанту: $I_e^{\delta} = 1 \cdot 1,81 \cdot 7,5 \cdot 500 / 100000 = 0,07$ грн./кг;

для проєктного варіанту: $I_e^n = 1 \cdot 1,81 \cdot 7,2 \cdot 378 / 100000 = 0,04$ грн./кг.

Річні питомі амортизаційні відрахування визначимо за виразом:

$$I_a = \frac{C_{\delta} \cdot \alpha}{100 \cdot P}, \quad (6.5)$$

де C_{δ} – балансова вартість подрібнювачів, грн.;

$\alpha = 15\%$ – річна норма амортизаційних відрахувань.

Балансову вартість подрібнювачів визначимо за виразом:

$$C_{\delta} = n \cdot C_{nrc} \cdot (1 + \varepsilon + \mu), \quad (6.6)$$

де C_{nrc} – преїскурантна (відпускна) ціна установки, грн.;

ε та μ – коефіцієнти, що враховують частку витрат від вартості обладнання та монтаж, відповідно $\varepsilon = 0,13$, $\mu = 0,15$.

Тоді балансова вартість обладнання за варіантами складатиме:

- для базового варіанту:

$$C_{\delta}^{\delta} = 1 \cdot 41200 \cdot (1 + 0,13 + 0,15) = 52736 \text{ грн.};$$

- для проєктного варіанту:

$$C_{\delta}^n = 1 \cdot 50000 \cdot (1 + 0,13 + 0,15) = 64000 \text{ грн.}$$

Отже, згідно (6.6), річні питомі амортизаційні відрахування за варіантами становитимуть:

- для базового варіанту:

$$I_a^{\delta} = 52736 \cdot 15 / (100 \cdot 100000) = 0,08 \text{ грн./кг};$$

- для проектного варіанту:

$$I_a^n = 64000 \cdot 15 / (100 \cdot 100000) = 0,09 \text{ грн./кг};$$

Річні питомі витрати на ремонт та технічне обслуговування визначимо за виразом:

$$I_m = \frac{C_{\delta} \cdot \beta}{100 \cdot P}, \quad (6.7)$$

де $\beta = 15\%$ – норма відрахувань на ТО та ремонт техніки.

Тоді для базового варіанту маємо:

$$I_m^{\delta} = 52736 \cdot 15 / (100 \cdot 100000) = 0,08 \text{ грн./кг};$$

а для проектного варіанту:

$$I_m^n = 64000 \cdot 15 / (100 \cdot 100000) = 0,09 \text{ грн./кг}.$$

Отже, загальні питомі річні експлуатаційні витрати за (6.1) складуть:

- для базового варіанту:

$$I_{\delta}^{\delta} = 0,14 + 0,07 + 0,08 + 0,08 = 0,37 \text{ грн./кг};$$

- для проектного варіанту:

$$I_n^n = 0,11 + 0,04 + 0,09 + 0,09 = 0,33 \text{ грн./кг}.$$

Прямі річні експлуатаційні витрати за варіантами становитимуть:

- базовий

$$I^{np}_{\delta} = I_{\delta} \cdot P = 0,37 \cdot 10000 = 37000 \text{ грн}; \quad (6.8)$$

- проектний

$$I^{np}_n = I_n \cdot P = 0,33 \cdot 10000 = 33000 \text{ грн}. \quad (6.9)$$

Розрахунок річного економічного ефекту. Порівняння річних експлуатаційних витрат при впровадженні запропонованої нами розробки вказує на річний економічний ефект, котрий становить:

$$E_p = I^{np}_{\delta} - I^{np}_n = 37000 - 33000 = 4000 \text{ грн}. \quad (6.10)$$

Строк окупності обладнання за прийнятим нами варіантом при його впровадженні становить:

$$T = \frac{C_n - C_{\delta}}{E_p} = \frac{64000 - 52736}{4000} = 2,81 \text{ року}. \quad (6.11)$$

Отримані результати показників економічної ефективності зводимо в таблицю 6.2.

Таблиця 6.2.

Техніко-економічні показники

Показники	Варіанти	
	Базовий	Проектний
1	2	3
Річний об'єм робіт, кг	100000	100000
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн/кг	0,37	0,33
в тому числі:		
- заробітна плата з нарахуваннями	0,14	0,11
- витрати на електроенергію	0,07	0,04
- амортизація	0,08	0,09
- ремонт та ТО	0,08	0,09
Прямі річні експлуатаційні витрати, грн.	52000	47000
Капіталовкладення, грн.	52736	64000
Додаткові капіталовкладення, грн.	-	11264
Річний економічний ефект, грн.	-	4000
Строк окупності додаткових капіталовкладень, років	-	2,81

6.3. Висновки з розділу

Виконана економічна оцінка обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння культур олійних в порівнянні з існуючим брикетувальником БР-200. Проведена оцінка свідчить, що впровадження обладнання в порівнянні з існуючим устаткуванням дає змогу отримати річний економічний ефект в 4000 грн. Термін окупності пропонованої обладнання в порівнянні існуючим брикетувальником БР-200 становить 2,81 року.

Висновки

В цілому за результатами роботи отримано наступне:

1. Аналізуючи теплофізичні властивості різних видів твердого біопалива з рослинних відходів та їх масштабність виробництва встановлено, що ефективними є брикети та пелети з лушпиння соняшнику, які мають високу теплотворну здатність 18,5-21,8 МДж/кг. На основі проведених патентно- інформаційних досліджень сучасних технологій та аналізу конструкцій робочих органів пресуючих машин, встановлено, що найбільш прийнятною конструкцією є шнекова установка.

2. Розроблена конструктивно-технологічна схема обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння культур олійних в складі технологічної лінії, котра складається з рами, електропривода, вала, корпуса підшипникового вузла, бункера, гвинта, перфорованої гільзи, філь'ери, стакана, гайки та електронагрівача.

3. в результаті геометричного моделювання робочих органів гвинтової обладнання для виготовлення паливних брикетів були отримані в загальному вигляді залежності впливу геометричних параметрів на площу перерізу каналу гвинта, площу поверхні каналу гвинта, об'єм каналу гвинта для гвинтів основних поширених виконань. Для гвинта зі закругленою основою каналу було отримано залежність, що пов'язує глибину каналу з радіусом твірної основи гвинта. Установлено, що для забезпечення найвищої продуктивності обладнання для виготовлення паливних брикетів, зменшення його матеріалоємності та вартості виготовлення, раціональними є співвідношення між довжиною та початковою шириною каналу гвинта $l/W_0 \approx 19-21$ та, відповідно, між початковою шириною каналу та зовнішнім діаметром гвинта $W_0/D = 0,20-0,25$.

4. Для проведення лабораторних досліджень процесу ущільнення лушпинної фракції макухи насіння олійних культур, виготовлено лабораторний стенд, котрий складається з макетного зразка преса, матриці, гільзи та пуансона. В результаті обробки експериментальних даних одержані математичні моделі

залежності сили, необхідної для продавлювання лушпинної фракції через отвори матриць (400-1200 Н) та питомої ваги отриманих при цьому зразків (400- 700 кг/м³).

5. В результаті експериментальних досліджень встановлено залежності показників роботи преса (продуктивності Q та потужності приводу N) від довжини філь'єри L та частоти обертання гвинта n . Встановлено, що найбільш ефективним є установка на брикетувальник філь'єри діаметром 50 мм та частотою обертання 240 об/хв. При цьому продуктивність брикетування становить 264 кг/год, затрати потужності на брикетування – 7,2 кВт.

6. Базуючись на нормативній документації та згідно вимог охорони праці розраховано баланс повітряного середовища та штучного освітлення приміщення із обладнанням відповідно до розробленої технологічної лінії комплексної безвідхідної переробки макухи. Розроблені вимоги безпеки праці при експлуатації розробленої обладнання для виготовлення паливних брикетів.

Виконана економічна оцінка обладнання для виготовлення паливних брикетів з лушпинної фракції макухи насіння культур олійних в порівнянні з існуючим брикетувальником БР-200. Проведена оцінка свідчить, що впровадження розробленої обладнання в порівнянні з існуючим устаткуванням дає змогу отримати річний економічний ефект в 4000 грн. Термін окупності пропонованої обладнання в порівнянні існуючим брикетувальником БР-200 становить 2,81 року.

Список використаних джерел

1. Шевчук В.Я. Екологізація енергетики: [Електронний ресурс]: навчальний посібник/ Шевчук В.Я., Білявський Г.О., Саталкін Ю.М., Навроцький В.М. – К.: Вища освіта, 2002. 111 с. – (Бібліотека КПІ)[SYS:000133273] — Режим доступу до пос.: www.library.kpi.ua/recs.../КМА02.000133273.html.
2. Альтернативна енергетика та ресурсоенергозбереження. [Електронний ресурс] / – Режим доступу до офіційного інтернет-порталу (Промислова екологія): <http://eco.com.ua>.
3. Гелетуха Г.Г. Використання місцевих видів палива для виробництва енергії в Україні [Гелетуха Г.Г., Железная Т.А., Матвеев Ю.Б. та ін.] // Пром. теплотехніка. –2006. – № 2. – С. 85–93.
4. Гелетуха Г. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник/За ред. Г. Гелетуха. – К.: «Поліграф плюс», 2015. – 72 с.
5. Лакида П.І. Енергетичний потенціал біомаси в Україні / [Лакида П.І., Гелетуха Г.Г., Василюшин Р.Д., та ін.], відповід. наук. ред. д.с.-г.н., проф. П.І. Лакида; Навчально-науковий інститут лісового та садово-паркового господарства НУБіП України. – К.: Видавничий центр НУБіП України, 2011. – 28 с. ISBN 9784966480064838.
6. Технологія виробництва різних видів біопалива [Електронний ресурс]. «Біопаливо та котли України», 03 листопада 2012 – Режим доступу: <http://bio.ukrbio.com/ua/articles/2344/>.
7. Торгівля торішнім листям або екологічний бізнес [Електронний ресурс] / Великобританія, альтернативні джерела енергії.// 22 вересня 2008 року — Режим доступу: <http://www.ecolive.com.ua/content/blogs/torg-vlya-tor-shn-m-listyam-abo-ekolog-chnii-bznes?page=8>.
8. V. Karkania, E. Fanara, A. Zabaniotou, "Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece," Renewable and Sustainable Reviews, vol. 16, no. 3, pp. 1426–1436, April 2012.

9. Dian Andrianaand Tinton Dwi Atmaja. Alternative mixing scenarios and pretreatment manner to optimize wood fuel pellet. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA) Inna Garuda Hotel, Yogyakarta, Indonesia, 6 – 7 November 2012, pp. 21-26.

10. Тверде біопаливо: технологічні вимоги, властивості компонентів та технологія виробництва. [Електронний ресурс] Газета "Агробізнес сьогодні" №19(290), 22 жовтня 2014, за ред. О. Гайденко, К.- : вид-во ТОВ "Прес-медіа" 2014./ Режим доступу: <http://www.agrobusiness.com.ua/ideii-i-trendy/2424-tverde-biopalyvo-hnologichni-vymogyvlastyvosti-komponenttiv-ta-tekhnologiia-vyrobnytstva.html>.

12. Біопалива (технології, машини та обладнання) / В. О. Дубровін, М. О. Корчемний, І. П. Масло. – К. : ЦТІ «Енергетика та електрифікація», 2004. – 256 с.

13. Дубровін В. О. Напрямки розвитку вітчизняної техніки для твердопаливних виробництв / В. О. Дубровін, О. І. Єременко // Механізація та електрифікація сільського господарства. Міжвідомчий тематичний науковий збірник Національного наукового центру «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства». – Глеваха, 2013. – Том 2. – Вип. 97. – С. 13–24.

14. Гриценко В.Т. Розробка технології переробки насіння культур олійних та їх макух / В.Т. Гриценко, Ю.О. Дурін // Современные вопросы создания и использования сортов и гибридов масличных культур : сб. тезисов Междунар. конф. ИМК УААН. – Запорожье, 2002. – С. 25.

15. Пат. 87579, Україна, МПК С10L 5/40. Спосіб одержання паливних брикетів з олійної сировини / Гриценко В. Т., Чехов А. В.; заявник та патентовласник Запорізький Інститут культур олійних УААН. – № 200712549 ; заявл. 12.11.2007 ; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 14, 2009.

16. Пат. 74880, Україна, МКИ А 23 j 1/14. Спосіб одержання білкового борошна із макухи олійного насіння / Гриценко В. Т., Чехов А. В. – № 2003109430; заявл. 20.10.2003; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11, 2005.

17. Тульчинська С.О., Кириченко С.О. Дослідження методичних підходів оцінки розвитку соціальної інфраструктури в регіонах. Економічний вісник НТУУ "КПІ". Вип. 14. К.: Видавництво "Політехніка", 2017. С. 67—74.
18. Машины та обладнання для тваринництва. І.І. Ревенко, М.В. Брагінець, В.С. Хмельовський. – К.: ТОВ «ЦП Компрінт», 2018. 567.
19. Проектування механізованих технологічних процесів у тваринництві : навч. посіб. з викон. диплом. проектів з механізації тваринництва на освіт.-кваліфікац. рівні Бакалавр / Бендера І. М. [та ін.] ; [за ред. І. М. Бендери, В. П. Лаврука] ; Поділ. держ. аграр.-техн. ун-т. - Кам'янець-Подільський : Сисин О.В. : Абетка, 2011. 564 с.
20. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Borys, A., Dnes, V., Kharchenko, S., Rogovskii, I., Golub, G., Berezovyi, M., Lutsiuk, A. (2025). Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (2 (136)), 81–92. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124> Q3.
21. Golub, G., Tsyvenkova, N., Rogovskii, I., Chuba, V., Nadykto, V., Omarov, I., Yarosh, Y., Chuba, I. (2025). Determining the influence of design features in agrivoltaics systems on tracking efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (8 (135)), 14–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.329837>
22. Mushtruk Mikhailo, Rogovskii Ivan, Illiashenko Ivan, Melnik Viktoria, Melnik Valentina. Technological solutions for increasing the resource of crushers. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2025. Springer, Cham. DSMIE 2025, LNME, P. 47-59. https://doi.org/10.1007/978-3-031-95218-0_5 Scopus.
23. Tarelnyk V.B., Haponova O.P., Tarelnyk N.V., Rogovskii I.L. Improvement of surface layer quality parameters of steel parts after nitrocarburizing by electrospark alloying method. Part 1. Features of the structural state and topography of steel surfaces after nitrocarburizing. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2025. Volume 2025, Issue 2, pp. 131-137. <https://doi.org/10.46813/2025-156-131>. Q4.
24. Nadiia Reznik, Ivan Rogovskii, Volodymyr Havrylyuk, Inna Riepina, Volodymyr Khodakyvskyy, Tetyana Demchenko, Valerii Kotliarov. (2025). Engineering and security management of technological transformation trends of

agrotronics. *Studies in Big Data*. Springer. volume 164. pp 289–298
https://doi.org/10.1007/978-3-031-75095-3_23. Scopus. WoS.
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-75095-3_23. Q3.

25. Yablonskyi P., Rogovskii I., Virchenko G., Borek K., Volokha M., Golova O. Geometric modeling of disc furrow profile. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, (2025). Vol. 12(1), pp. E1–E9. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).e1](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e1). Scopus. WoS. Q4.

26. Ivan Rogovskii, Valerii Kotliarov, Valerii Bondarenko, Volodymyr Havrylyuk, Chen Gaojiang & Li Zehao. (2024). Engineering and security management of Smart technology of agrotronics of crop production. *Contributions to Finance and Accounting*. Springer, Cham. Part F4082. pp 93–102 https://doi.org/10.1007/978-3-031-75960-4_10. Scopus. WoS. Q4

27. Malanchuk, O., Tryhuba, A., Rogovskii, I., Titova, L., Berezova, L., Korobko, M. (2024). Differential-symbolic approach and tools for management of medical support projects for the population of communities. *Project Management: Industry Specifics*. P. 105–134. <https://doi.org/10.15587/978-617-8360-03-0.CH4>. Scopus. Q3

28. Sheichenko, V., Rogovskii, I., Skoriak, Y., Petrachenko, D., Shevchuk, M., Sheichenko, D., Titova, L., Sivak, I. (2024). Defining patterns in the intensification of hemp stalk retting processes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (132)), 50–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.3150>. Scopus. Q3

29. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., & Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1 (130)), 54–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869> Q3

30. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Tykhyi, A., Kuzyk, A., Dvornyk, A., Derkach, O., Lysenko, S., Banniy, O., & Hryniv, A. (2024). Revealing patterns of change in the tribological efficiency of composite materials for machine parts based on phenylone and polyamide reinforced with arimide-t and fullerene. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12 (129)), 6–18. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.304719> Q3

31. Rogovskii, I., Sivak Igor, Shatrov Ruslan, Nadtochiy Oleksandr. Agroengineering studies of tillage and harvesting parameters in soybean cultivation. *Engineering of Rural Development*. 2024. Vol. 23. P. 965-970. DOI: 10.22616/ERDev.2024.23.TF195. Scopus. WoS. Q3
32. Yablonskyi P., Rogovskii, I., Sobczuk H., Virchenko G., Volokha M., Vorobiov O. Computational approach to geometric modeling of plow bodies. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 11(1), 2024, pp. E9–E18. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).e2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).e2), Scopus Q4.
33. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M., & Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern- European Journal of Enterprise Technologies*, 2(1 (128), 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>. Q3
34. Aulin, V., Rogovskii, I., Lyashuk, O., Titova, L., Hrynkiv, A., Mironov, D., Volianskyi, M., Rogatynskyi, R., Solomka, O., & Lysenko, S. (2024). Comprehensive assessment of technical condition of vehicles during operation based on Harrington's desirability function. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (127), 37–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.298567>. Q3
35. Rogovskii, I., Reznik, N.P., Druzhynin, M.A., Titova, L.L., Nychay, I.M., Nikulina, O.V. Non-uniform field of concrete deformations of circular cross-section columns under cross bending applying digital image correlation method. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 489. pp 939–951. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_79. Scopus. Q2
36. Rogovskii, I., Reznik N.P., Osadchuk N.V., Ivanova T.M., Zinchenko M.M., Ryzhakova H. Institutional aspects of development of budget system: theory and practice of Ukraine. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 489. pp 925–937. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_78. Scopus. Q2
37. Volokha M., Rogovskii I., Fryshev S., Sobczuk H., Virchenko G., Yablonskyi P. (2023). Modeling of transportation process in a technological complex of beet

harvesting machines. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 10(2), pp. F1–F9. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).f1. DOI: 10.21272/jes.2023.10(2).f1 Q4

38. Romaniuk W. Rogovskii I., Polishchuk V. Titova L. Borek K. Shvorov S. Roman K. Solomka O. Didur V. Biletskii V. Study of technological process of fermentation of molasses vinasse in biogas plants. *Processes*. 2022. Vol. 10. Issue 10. P. 2011. <https://doi.org/10.3390/pr10102011>. Q2.

39. Romaniuk W., Rogovskii I., Polishchuk V., Titova L., Borek K., Wardal W.J., Shvorov S., Dvornyk Y., Sivak I., Drahnev S., Derevjanko D. Study of methane fermentation of cattle manure in the mesophilic regime with the addition of crude glycerine. *Energies*. 2022. Vol. 15. Issue 9. P. 3439. <https://doi.org/10.3390/en15093439>. Scopus. Q1.

40. Rogovskii I., Titova L., Sivak I., Berezova L., Vyhovskyi A. Technological effectiveness of tillage unit with working bodies of parquet type in technologies of cultivation of grain crops. *Engineering for Rural Development*. 2022. Vol. 21. P. 884–890. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF279>. Q3

41. Rogovskii I., Titova L., Shatrov R., Bannyi O., Nadtochiy O.: Technological effectiveness of machine for digging seedlings in nursery grown on vegetative rootstocks. *Engineering for Rural Development*. 2022, Vol. 21, pp. 924–929. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2022.21.TF290>. Q3

42. Rogovskii, I., Lyubarets, B., Borek, K. Analyticity of non-stationary processes of change in diagnostic parameters of hydrostatic transmissions of harvesters. *Machinery and Energetics*, 2022, 13(1), pp. 67–76 Q4

43. Kresan, T., Pylypaka, S., Ruzhylo, Z., Rogovskii, I., Trokhaniak, O. Construction of conical axoids on the basis of congruent spherical ellipses. *Archives of Materials Science and Engineering*, 2022, 113(1), pp. 13–18.

44. Войналович О.В. Охорона праці у сільському господарстві. / Войналович О.В., Марчишина Є.І. / – К.: Видавництво «Основа», 2014. 176 с.

45. Кравчук В.І. Ергатичні вирішувальні системи та штучний інтелект в управлінні агропромисловим виробництвом / В.І. Кравчук, Г.Л. Баранов // *Стратегія розвитку України: економіка, соціологія, право*. № 12, 2007, С. 565–568.

46. Богданов Г.А. Кормление сельскохозяйственных животных. – К.: Агропромиздат, 1990. 624 с.
47. Погорілий Л.В. Шляхи стабілізації та відтворення потенціалу агроєкосистем /Л.В. Погорілий, В.С. Таргоня // Вісті Академії інженерних наук України. 2003. №2. С. 15–20.
48. Теорія планування експериментів: Виконання розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 131 «Прикладна механіка», спеціалізації «Технологія машинобудування» / С.М. Лапач ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,31 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 86 с.
49. Машини та обладнання для тваринництва. Ревенко І.І., Брагінець М.В., Ребенко В.І. – К.: Кондор, 2009. 730 с.
50. Хорунженко В.Е. и др. Состояние и перспективы развития комбинированных агрегатов/ В.Е. Хорунженко, А.И. Мордухович, В.А. Юзбашев // Механизация и электрификация сельского хоз-ва. – 1985. – № 5. – С. 33-35.