

Наукова праця

на тему:

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ПЕРЕРОБКИ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО З  
ОТРИМАННЯМ ПРОДУКТІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА  
СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОМБІКОРМІВ

«Гранули»

шифр

## **ЗМІСТ**

<b>ВСТУП</b> .....	3
<b>РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	7
<b>РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ МАТЕРІАЛУ РОБОЧИМ ОРГАНОМ ГРАНУЛЯТОРА</b> .....	14
<b>РОЗДІЛ 3 ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	18
<b>РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	23
<b>ВИСНОВОК</b>	37
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.</b>	39

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Підвищення ефективності виробництва, створення сучасних технологій і машин нового покоління є одними з факторів, що забезпечують стабільну роботу підприємств переробних галузей.

Комбіновані корми, складені на основі макухи олійних культур, є одними з основних видів кормів в раціоні сільськогосподарських тварин, і розробка та конструювання обладнання, заснованого на останніх досягненнях науки і техніки, для фермерських господарств та міні-заводів, має актуальне значення.

Одним з основних постачальників якісної макухи в комбікормову промисловість є олійно-жирова галузь. Найважливіша продукція галузі – цінні білкові матеріали, макухи та шроти, що використовуються для забезпечення протеїнової і амінокислотної поживності комбікормів. Основною сировиною отримання даної продукції є насіння соняшнику, бавовнику, сої, ріпаку, льону, рицини та інших культур, а найважливішим видом устаткування, яке застосовується при стандартних методах переробки олійної сировини (пресуванні та форпресуванні), є масловіджимні шнекові преси, якими витягується до 80% масла.

В даний час застосовуються стандартні способи отримання якісних компонентів комбінованих кормів і рослинних масел, що відрізняються тривалістю підготовчих операцій, підвищеними енерговитратами і наявністю канцерогенних речовин, які одержуються в процесі виробництва, що негативно впливають на якість кінцевих продуктів.

Одним із способів зменшення розглянутих вище явищ, є спосіб холодного пресування олійної рослинної сировини. Даний спосіб дозволяє отримувати основний і допоміжний продукти без попереднього подрібнення, термічної обробки і з меншими енерговитратами.

Одним з традиційних для України видів рослинного продукту є насіння льону. Льон - «*Linum Usitatissimum*» - культурна рослина, здавна обробляється людиною. Однак в останні роки насіння льону використовується незначно і, в основному, для виробництва лляної олії.

Реалізація політики, спрямованої на забезпечення здорового харчування населення країни, привернула увагу вчених до насіння льону як джерела біологічно активних речовин. У той же час, відомості про комплексне дослідження споживчих властивостей та безпеки насіння льону як харчового продукту, їх зміни при зберіганні й переробці в літературі практично відсутні.

У зв'язку з вищесказаним актуальним є вивчення споживчих властивостей та розробка комплексної технології використання насіння льону, вирощеного в умовах Західного Полісся, пошук оптимальних способів його переробки та використання у виробництві харчових продуктів та комбінованих кормів.

Насіння і продукти їх переробки, крім олії та білка містять багатий комплекс біологічно активних речовин, таких як вітаміни і провітаміни, фосфатиди, мінеральні солі та ін. Однією з цілей процесу переробки насіння є збереження всіх цих речовин, підвищення якості продукції – рослинних олій та макухи.

В даний час велика частина вторинних ресурсів, що утворюються в результаті промислової переробки олійної сировини, що не використовується ефективно. Зазвичай все це йде у відвали або скидається в водойми, що завдає природі значний екологічний збиток. Тому необхідно звернути особливу увагу на підвищення ефективності використання відходів харчових і переробних підприємств для виробництва енергоресурсів і вторинних ресурсів, що значно забезпечить збільшення ефективності виробництва, а також знизить шкідливий вплив підприємств на навколишнє середовище.

Гранулювання жмиху перед екстракцією дозволяє збільшити виробництво основного продукту – соняшникової олії. Крім того, позитивний ефект виражається в збільшенні продуктивності екстракції не менше, ніж 30%; в зменшенні витрат розчинника – до 50% (за рахунок збільшення швидкості руху розчинника в пористих каналах); в зниженні залишкової олійності в макусі – на 30% і більше, що гарантує збільшення виходу олії; без пилу при попаданні в екстрактор (відсутність борошністої фракції); в забезпеченні

необхідної температури продукту перед екстракцією; в можливості отримання олії з ексклюзивних продуктів. В результаті отримується гранульований високопротеїновий шрот, який є ліквідним продуктом на ринку.

Насіння льону та продукти їх переробки відрізняються за своїми технологічним і функціональними властивостями від традиційної сировини олійного виробництва. У зв'язку з цим необхідні наукові та практичні дослідження щодо їх впровадження в харчові та переробні технології. Використання насіння льону та продуктів їх переробки: борошна з різним вмістом ліпідів та білку, гранульованого жмиху та макухи, білкового концентрату, дозволить розширити сировинну базу як харчової промисловості, так й комбікормової.

**Мета і завдання досліджень.** Метою цієї наукової роботи є розробка комплексних технологічних рішень переробки насіння льону для підвищення ефективності отримання олії та гранульованого високопротеїнового жмиху, як складової комбінованих кормів.

У відповідності з поставленою метою були сформульовані такі задачі:

- обґрунтувати комплексну технологічну схему отримання лляної олії з поглибленою переробкою вторинної сировини для використання в комбікормовій промисловості;
- визначити залежності конструктивних параметрів шестеренних пресів з показниками технологічного процесу гранулювання;
- визначити кришимість отриманих гранул лляного жмиху;
- провести оптимізацію співвідношень параметрів гранулятора з використанням метода математичного моделювання.

**Об'єктом дослідження** є насіння льону, технологічні процеси гранулювання лляного жмиху та пристрій для його здійснення з зубчастими пресуючими колесами.

**Предметом досліджень** є взаємозв'язок технологічних та конструктивних параметрів процесу й шестеренного гранулятора, а також режиму його роботи в процесі виготовлення гранул лляного жмиху.

**Методи дослідження.** Завдання поставлені в роботі, вирішувалися за допомогою сучасних методів теоретичних та експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проводились за галузевими та розробленими методиками на спеціально спроектованих та виготовлених установках і приладах. При проведенні експериментальних досліджень застосовувались методи математичного планування експерименту і статичні методи аналізу його результатів.

Статистичну обробку результатів досліджень здійснювали із застосуванням методів математичної статистики з використанням персонального комп'ютера і програмних пакетів “MathCAD”, “Microsoft Office Excel 2003” та “Microsoft Office Word 2003”.

**Загальна характеристика наукової роботи.** Наукова робота виконана на 37 сторінках комп'ютерного набору тексту, має 11 таблиць, 13 рисунків. При написанні роботи використано 14 літературних джерел.

**Набір ключових слів:** льон олійний, насіння, подрібнення, гранулятор, льняний жмих, подача матеріалу, кришимість.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз наведеної проблеми показав великі потенційні можливості технології пресування як кормових культур, так й вторинної сировини харчових технологій у фазі найбільшого біологічного врожаю не лише як самостійного продукту, а й в якості складової частини технології фракціонування зеленої маси рослин з кінцевим цільовим продуктом у вигляді харчового білку та вітамінно-білкових добавок в пресованому стані для тривалого їх зберігання.

Шестеренні гранулятори із зубчастими колесами характеризуються стійким технологічним процесом формування гранул (брикетів), відрізняються компактністю, низьким рівнем енергоємності гранулювання до 36...40 кДж/кг, а брикетування сумішей до 80 кДж/кг.

В останні роки, коли дієтологи виявили медично-біологічні переваги льняної олії, маргарина промисловість, в першу чергу Канади та США, переходить на використання льняної олії при виготовленні маргаринів.

Аналізуючи наведені дані, стає зрозумілим, чому зацікавленість льняним насінням постійно зростає. Однак дослідження в даному плані мають розрізнений характер, практично відсутні відомості про зміну харчової цінності насіння льону в процесі зберігання та переробки напівфабрикатів.

Фізико-механічні властивості насіння льону різко відрізняються від насіння зернових та інших культур.

Насіннева маса льону надзвичайно щільна, яка важко продувається та «текуча». Багато бур'янів важко відокремлюються від насіння основної культури. У свіжозібраного насіння спостерігається висока інтенсивність процесів обміну, вони нестійкі в зберіганні, характеризуються зниженими технологічними властивостями. Тому післязбиральна обробка насіння льону олійного більш складна. Вона включає в себе, як і в інших культур, попереднє очищення, сушіння та кінцеве очищення.

Насіння льону очищують від домішок шляхом продування інтенсивним потоком повітря на решетах діаметром 1,7-2,0 мм. Сушіння насіння льону здійснюється в рухомому, розрихленому шарі при температурі 48-50 °С, при цьому температура насіння на виході з сушарки повинна складати 38-39°С.

Нагрівання насіння викликає в них ряд взаємозалежних біохімічних процесів, зокрема здійснюється зниження кислотного числа льняної олії в результаті утворення білково-ліпідного комплексу, що зв'язує жирні кислоти, які утворюються при гідролізі жирів.

Аналіз літературних джерел показав, що зі всіх способів переробки насіння льону найбільш добре вивчений процес отримання олії. Також достатньо уваги приділено можливостям використання олійного виробництва – жмиху та шроту. Жмих отримують при виробництві олії за допомогою пресування, шрот – при отриманні олії екстрагуванням. В жмиху кількість сирого жиру складає 5-6, в шротах – 2-3%. Льняні жмих та шрот – відмінний білковий корм.

З метою підвищення ефективності виробництва та зниження собівартості продукції (підвищення дохідності) багато олієекстракційних підприємств здійснюють модернізацію класичної схеми отримання олій.

Вибір методу підготовки матеріалу до екстракції залежить від складу технологічної схеми, виду сировини та устаткування екстрактора. Традиційні методи підготовки – отримання крупки або пелюстки.

Більш широке поширення набула пелюсткова структура, яка формується з крупки. Схема отримання пелюстки містить всі елементи виробництва крупки. Тільки додатково після кондиціонування крупка транспортується на утворення пелюстки, що проводиться за допомогою двохпарних вальцевих верстатів, які є громіздкими, важкими в експлуатації та енергоємними. Це великий недолік способу.

Крім того, виходять частинки різних розмірів й неминуче утвориться борошниста фракція, що погіршує перколяцію розчинника в шар матеріалу, забруднює місцеллу та ускладнює процес її фільтрації, ускладнює відгонку



розчинника зі шроту, підвищує вибухонебезпечність шроту в складських приміщеннях.

Один зі способів вирішення даного питання – встановлення ліній гранулювання жмиху перед екстракцією. При такій обробці створюється пориста гранула, створюється оптимальна зовнішня та внутрішня структура матеріалу для кращого вилучення олії розчинником при екстракції.

Щоб зрозуміти, чому в екстрактор краще подавати пористу гранулу в порівнянні з пелюсткою чи крупкою, потрібно звернутися до фізико-хімічних властивостей матеріалу. До основних характерних його особливостей відноситься: наявність незруйнованих клітин, певну пористість з різними за величиною та формою порами, що утворюються в процесі підготовки матеріалу до екстракції. Так як основний критерій підготовки продукту – це створення сприятливих умов для більш ефективного проникнення розчинника всередину кожної частинки, а також розподілу його між частинками продукту та поверненню розчиненої олії у зовнішній розчин.

Зі збільшенням пористості збільшується питома поверхня, що є важливим параметром, який визначає проникність – здатність пористого матеріалу пропускати крізь себе рідину. Таким чином, розчинник інтенсивніше проникає крізь пори всередину гранули, вилучаючи олію з капілярів, розміщених не лише на поверхні, але й в глибині частинки. Взаємодія рідини та простору, який заповнений олією з відгородженою або незруйнованою клітинною мембраною, призводить до збільшення її виходу та зниженню залишкової олійності шроту.

Переробка насіння льону для отримання олії являє послідовність ряду технологічних стадій. Поетапне видалення олії з насіння льону сприяє підвищенню білка в кінцевому продукті.

Технологічний цикл в цьому випадку можна представити таким чином: подрібнення природнього насіння льону – видалення олії методом «холодного» пресування – подрібнення льняної макухи – видалення залишкової олії методом екстракції – подрібнення льняного шроту. При цьому для цілей харчового виробництва необхідне проведення промивання та термообробки

сировини, в даному випадку насіння льону. Промивання насіння льону ускладнюється наявністю добре розчинного у воді слизу і значної кількості водорозчинних білків.

Для створення пористих гранул жмиху з певними параметрами у виробничий ланцюжок між подрібненням та екстракцією вводять лінію гранулювання. Жмих у вигляді ракушки потрапляє на ділянку подрібнення, де він подрібнюється до крупки розміром менше 3 мм та крізь циклон потрапляє в проміжний бункер для зберігання сировини. Перед гранулятором встановлений магнітний сепаратор, на якому крупка очищується. Потім вона дозується та подається в змішувач безперервної дії, в якому здійснюється змішування та обробка парою для надання продукту однорідності та пластичності. Додавання пари сприяє зниженню витрат енергії, зменшенню зношування робочих органів гранулятора. Підготовлений продукт потрапляє в гранулятор. В камері пресування за рахунок проштовхування його зубчатими колесами відбувається гранулювання.

Гарячі гранули (температура біля 80°C) охолоджуються потоком повітря в охолоджувачі до температури, необхідної для екстракції – 55–60°C. Охолоджені гранули після вивантаження з охолоджувача відокремлюються від дрібних частинок на просіювачі та направляються в екстракційний цех, а дрібні частинки – на повторне гранулювання.

Для найбільш повного видалення олії екстракційним методом з олійної сировини зазвичай використовуються традиційні розчинники: етиловий спирт, гексан. Тому необхідно визначити оптимальний розчинник для видалення залишкового масла з льняної макухи.

Використання всіх перерахованих технологічних операцій дозволить обґрунтувати комплексну технологію використання насіння льону для отримання різних функціональних властивостей.

Особливості структури насіння льону визначають своєрідність технологічного процесу отримання кінцевого продукту. Насіння льону відносяться до дрібно насінневих, оболонка яких щільно прилягає до ядра, тому

в технологічний процес не вводять стадії фракціонування та обрушення. Оболонка насіння льону містить значну кількість цінних харчових компонентів. На відміну від інших насіння олійних культур в оболонці насіння льону міститься незначна кількість целюлози (не більше 18% в перерахунку на суху речовину) і до 62% інших вуглеводів, в першу чергу слизу, що представляють собою легко диспергуючі в воді вуглеводи, а також жири, протеїни, мінеральні речовини. Збереження всього комплексу харчових речовин насіння льону в кінцевому продукті підвищує його харчову та біологічну цінність.

Насіння проходить потрібне очищення: очищення від металоманітних домішок в металоманітному сепараторі; очищення від органічних домішок на повітряно-ситовому сепараторі; видалення мінеральних домішок на вібропневматичному каменевідбірнику.

Таким чином, технологічна схема включає в себе наступну послідовність основних стадій:

- очищення льняного насіння від мінеральних, органічних та металоманітних домішок;
- короткочасне промивання насіння льону протягом 5-10 хв;
- термообробка насіння льону конвекційним способом при  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$  протягом 5 хв;
- подрібнення харчового насіння для отримання повножирного льняного борошна;
- видалення олії з насіння льону методом «холодного» пресування;
- подрібнення знежиреного насіння льону (ляного жмиху) для отримання напівзнежиреного льняного борошна;
- гранулювання ляного жмиху;
- додаткове видалення олії екстракцією;
- просіювання перемеленого насіння послідовно на ситах з діаметром отворів 1 мм і 0,5 мм.

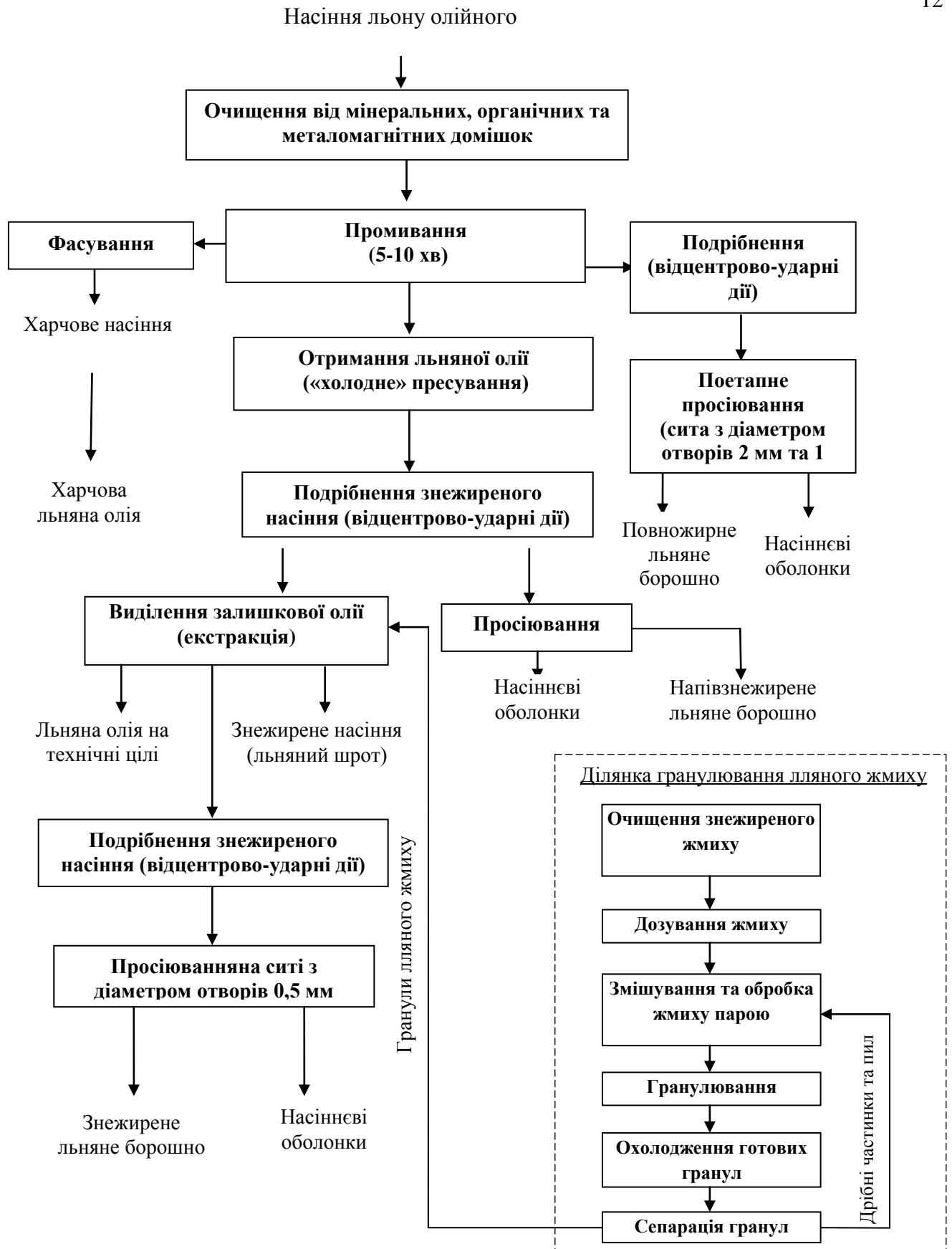


Рисунок 1 – Технологічна схема комплексної переробки насіння льону олійного з отриманням продуктів різного функціонального призначення та сировини для виробництва комбікормів

Кінцевими продуктами при цьому є наступні продукти: харчове насіння льону; олія лляна харчова та технічна; повножирне, напівзнежирене та знежирене лляне борошно. Для використання фракції оболонки з високим вмістом лігнанів в якості сировини для біологічно активної добавки до їжі потрібно її додатково подрібнити до розмірів не більше 0,4 мм (технологічні особливості подальшої переробки).

На основі результатів проведених теоретичних досліджень для забезпечення процесу гранулювання лляного жмиху розроблений гранулятор, що дозволяє підвищити продуктивність процесу гранулювання матеріалу та технологічність виготовлення, а також знизити складність конструкції.

Гранулювання жмиху перед екстракцією дозволить збільшити виробництво основного продукту – олії. Крім того, позитивний ефект досягається за рахунок збільшення продуктивності екстракції – не менше, ніж 30%; в зменшенні витрат розчинника – до 50% (за рахунок збільшення швидкості руху розчинника в пористих каналах); в зниженні залишкової олійності в жмиху – на 30% і більше, що гарантує збільшення виходу олії; у відсутності пилу при потраплянні в екстрактор (відсутність борошнистої фракції); в забезпеченні необхідної температури продукту перед екстракцією; в можливості отримання олії з ексклюзивних продуктів.

Гранульований жмих, в порівнянні з розсипним, менш гігроскопічний, тому зберігається довше нього; має меншу об'ємну масу, що дозволяє не збільшувати потужності з його зберігання, а також знизити затрати на транспортування.

## РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ МАТЕРІАЛУ РОБОЧИМ ОРГАНОМ ГРАНУЛЯТОРА

Регламентуються наступні вимоги до технологічних операцій і якості готових гранул:

- однорідність змішування компонентів суміші повинна бути не нижче 95%;

- щільність гранул – 900-1300 кг / м<sup>3</sup>, а їх діаметр 4-20 мм.

При роботі зубчастого преса в бункері-живильнику створюється запас суміші перед робочим органом. Зубчасті колеса, які обертаються назустріч один одному втягують суміш в простір, що звужується, стискають її і під дією зуба, який входить в западину, продавлюють в отвори матричних каналів.

Гранули, що виходять з каналів обламуються ножами та поділяються на кондиційні гранули й крихту. Крихта повертається в бункер-накопичувач.

Особливості технологічного процесу гранулювання зубчастим пресом:

- подача матеріалу не нормується і обмежується лише умовами захоплення матеріалу зубчастими колесами, тобто забезпечується саморегуляція кількості матеріалу на вході в прес на максимально можливому рівні;

- стиснення матеріалу починається в просторі, що звужується між зубчастими колесами і може закінчуватися, в залежності від обраних співвідношень параметрів преса, до, в момент або після утворення обмеженої замкнутої камери пресування в западині при входженні в неї головки зуба спряженого колеса;

- в силу порційності процесу вдавнення матеріалу в матричний канал та достатній тривалості перебування матеріалу в отворі до виходу готової гранули релаксаційні процеси в значній мірі сприяють зміцненню матеріалів, однак, виділити релаксацію напружень в суміші та зміну матеріалу під тиском в окремий відокремлений етап гранулювання досить важко;

- при гранулюванні дисперсного матеріалу, яким може вважатися лляний жмих, всі зазори зубчастого зачеплення, обумовлені геометрією або технологією виготовлення евольвентного профілю, заповнюються раніше спресованим матеріалом та при сталому технологічному процесі не впливають, як об'ємні елементи, на зміну щільності матеріалу;

- при обертанні спряжених коліс об'єми зубів, що входять у западини сусіднього колеса, взаємно рівні (при рівновеликих колесах), тому стиснення матеріалу може бути прирівняне до ущільнення матеріалу циліндричними вальцями (до моменту утворення закритої камери в западині), причому, при дотриманні умови торкання початкових (ділільних) кіл зубчастих коліс можуть бути умови, коли весь захоплюваний матеріал повинен вдавлюватися в матричні отвори і перетворюватися в гранули.

Згідно мети наукової роботи та поставлених завдань необхідно розробити і провести комплекс лабораторних випробовувань для вирішення наступних питань:

1. На основі проведеного аналізу роботи відомих конструкцій грануляторів та пресів сільськогосподарських матеріалів та аналізу фізико-механічних та технологічних властивостей лляного жмиху обґрунтувати технологічну схему комплексної переробки насіння льону олійного з отриманням продуктів різного функціонального призначення та сировини для виробництва комбікормів, запропонувати конструктивно-технологічну схему гранулятора лляного жмиху.

2. Розробити лабораторну установку для визначення оптимальних параметрів гранулювання лляного жмиху та обґрунтувати основні параметричні показники необхідні для забезпечення якісного процесу гранулювання.

3. Провести лабораторні дослідження з уточнення основних фізико-механічних властивостей м'ятки та жмиху в частині оцінки пружно-в'язких властивостей, що впливають на процес стиснення, визначення коефіцієнту тертя насіння, м'ятки та жмиху льону олійного.

4. Оцінити якість процесу гранулювання лляного жмиху.

5. Оптимізувати режим роботи гранулятора за допомогою математичного планування багатофакторного експерименту. Критеріями відгуку вибрані подача (кг/год) гранулятора з виробництва якісних гранул та їх якість за кришимістю. Факторами, що змінюються в експерименті прийняті: частота обертання та подача лляного жмиху.

Перше завдання з дослідження фізико-механічних властивостей лляного жмиху обумовлена необхідністю подальшої розробки технології та вдосконаленого обладнання для гранулювання. Вони визначають технологічну сторону та впливають на інтенсивність утворення брикетів.

Існуючі деякі дані про фізико-механічні властивості м'ятки та жмиху незначні та не дозволяють прийняти конкретне рішення в аналізі запропонованої технологічної схеми комплексної переробки насіння льону олійного з отриманням продуктів різного функціонального призначення та сировини для виробництва комбікормів (рис.1). При пресуванні фізико-механічні властивості матеріалу визначають енергетичні та якісні показники процесу і є вирішальними факторами при виборі геометричних параметрів робочих органів гранулятора.

У Західному Поліссі фізико-механічні властивості насіння льону олійного, м'ятки та жмиху вивчені недостатньо. Нами вивчалися вони в умовах, близьких до умов процесу видалення олії холодним пресуванням.

Вологість визначали за стандартною методикою. Дослідження проводили із сортом льону олійного – “Лірина”, який занесений до державного реєстру сортів рослин із сортів льону-кудряшу. Сорт льону олійного “Лірина” створений у Німеччині. Рослини заввишки до 80 см. Кущ рихлий, стебло округле, гіллясте. Плід – округла, загострена догори світло-жовта коробочка. Насіння яйцеподібне, плоске, світло-коричневе. Маса 1000 зернин – 6,9 г. Вегетаційний період – 110...120 днів. Урожайність – до 28,2ц/га, вміст жиру – 42,7%. Сорт технологічний, не вилягає, не осипається. Рекомендовано для зони Степу.





Рисунок 2 – Структурна схема експериментальних досліджень з вивчення фізико-механічних властивостей насіння льону олійного, м'ятки та жмиху

Щільність отриманого жмиху визначається за ГОСТ 10974-95. Методика полягає в застосуванні градуйованого посуду, при якій наважку поміщали в градуйований скляний циліндр з водою. Знаючи рівень води до і після поміщення зразка, встановлюють об'єм наважки. Потім на основі маси та об'єму наважки визначали її щільність ( $\text{г/см}^3$ ) за формулою:

$$\rho = \frac{P}{V}, \quad (1)$$

де  $P$  – маса, г;

$V$  – об'єм зерна,  $\text{см}^3$ .

М'ятку отримували наступним чином: олійний прес холодного віджиму зупиняли в режимі паспортного завантаження. Знімали корпус зерної камери та збирали м'ятку з робочих шнеків. Потім знімали корпус додаткової камери та знімали м'ятку з відповідних шнеків.

Насіння льону олійного брали з урожаю 2018 р. Повторюваність дослідів при експериментальних дослідженнях складає 3 – 6 разів. Математичну обробку отриманих результатів проводили з використанням програмного пакету MathCAD.

### РОЗДІЛ 3 ЛАБОРАТОРНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПРИЛАДИ ТА АПАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для підтвердження теоретичних передумов і визначення ефективності запропонованого методу гранулювання лляного жмихута визначення конкретних параметрів обробки насіннябула розроблена, сконструйована і виготовлена лабораторна установка, схема якої зображена на рисунку 3.



Рисунок 3 – Лабораторна установка для визначення параметрів гранулювання лляного жмиху



Рисунок 4 – Обладнання для визначення коефіцієнтів тертя

Для визначення кутів тертя використовували прилад «похила площина» (рис.4). Він складається з нерухомої горизонтальної основи і шарнірно з'єднаної з нею рухомої площини. На нерухомій основі вмонтовані рівні та регульовальні гвинти для контролю горизонтальності приладу. Крім цього до

нерухомої горизонтальної основи прикріплений кутомір, а на рухомій площині – пристрій для закріплення змінних поверхонь тертя, на який встановлюються випробувані зразки.

**Методика досліджень з уточнення фізико-механічних властивостей насіння льону олійного, м'ятки та жмиху.** Важливим технологічним показником зернової маси є сипкість, яка характеризується кутом природного відкосу, статичним та динамічним коефіцієнтами тертя об поверхню будь-якого матеріалу, а також коефіцієнтом внутрішнього тертя.

Послідовність проведення дослідів така. Встановлюємо прилад горизонтально. Для цього користуємось рівнями та регульовальними гвинтами. Потім встановлюємо на нахиленій дошці приладу «похила площина» брусок з наклеєним матеріалом льону олійного. Після цього плавно повертаємо вгору нахилену дошку до початку ковзання бруска по ній. Кут, який при цьому зафіксуємо, буде кутом тертя спокою  $\varphi_0$ . Дослід повторюємо 10 разів. Тоді встановлюємо похиле положення дошки під кутом тертя спокою, ставимо на дошці брусок з матеріалом, який тут же починає ковзати донизу. Одночасно нахилену дошку плавно повертаємо вниз до зупинки бруска на ній. Зафіксований при цьому кут буде кутом тертя ковзання  $\varphi$ . Дослід повторюємо 10 разів. Отримані таким чином дані заносимо в таблицю, а також вносимо значення коефіцієнтів тертя спокою і ковзання  $f$ , рівних тангенсу відповідного кута.

Для пошуку динамічного коефіцієнту тертя матеріалу об решітку, необхідно визначити критичний кут нахилу планок до горизонту, у якому матеріал під час падіння на решітку з висоти 0,1м, тобто, маючи деяку початкову швидкість, рухається вниз похилою поверхнею, створеною планками. При меншому куті нахилу матеріал не переміщається або при русі зупиняється.

**Методика визначення кришимості гранул.** Кришимість гранул визначалася відповідно до вимог ГОСТ 23513-79. Для випробування гранул використовувалися ваги технічні по ГОСТ 29329-92.

Ящик розміром 150x150x200 мм являє собою металеву коробку обтягнуту сіткою з розмірами отворів 1x1 мм. При проведенні випробувань від об'єднаної проби відбиралося 200 г гранул. Гранули відділялися від борошна та крихти й потім виділялася наважка масою 50 г, яка поміщалася в ящик установки. Ящик з гранулами обертася протягом 10 хв. зі швидкістю 50 об / хв. Після цього гранули висипалися з ящика і зважувалися з похибкою  $\pm 0,01$  г.

Кришимість визначалася за результатами триразових випробувань.

За відомим виразом в процентах визначали кришимість отриманих гранул:

$$W = (m - m_2) / m \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $m$  – маса гранул до випробування, г;

$m_2$  – маса гранул після випробування, г.

**Методика дослідження процесу стиснення лляного жмиху при зміні параметрів профілю зуба.** Методика дослідження процесу стиснення кормів при зміні параметрів евольвентного профілю зуба ґрунтувалася на принципах геометричного моделювання.

Змінюваними параметрами профілю зуба прийняті всі величини, що зустрічаються в формулах об'єму зуба та западин між ними: кут зачеплення рейки (кут верстатного зачеплення); діаметр ділильного кола зубчастих коліс; модуль зуба (основна характеристика геометричних розмірів); виконання головки зуба (радіус зовнішньої поверхні головок зуба по вершині аж до загострення головки).

Геометричне моделювання процесу стиснення матеріалу під зубом пресуючого колеса полягало в профілюванні зубчастих коліс зі зміненим параметром на щільному папері (ватман). Змодельовані колеса закріплювалися на стенді з дотриманням розрахункової міжосьової відстані. Повертаючи колеса, на підкладеній смузі щільного креслярського паперу окреслювалися фігури під зубом. Площа окреслених фігур визначалася методом зважування і розрахунком за еталонним зразком паперу.

Таблиця 1 – Межі зміни параметрів евольвентного зуба

	Од. вимірювання	Межі вимірювання
Кут зачеплення	градус	від 15 до 25
Діаметр ділительного кола колес	мм	від 240 до 480
Модуль зуба	мм	від 8 до 16
Висота головки зуба	в частках модуля зуба	від 1 (модуля) до повного загострення головки

Оцінка процесу стиснення матеріалу під зубом та порівнювання варіантів здійснювалися за кутом утворення замкнутого простору під зубом та за зміною площі фігури під зубом (об'єм простору під зубом в розрахунку на одиницю ширини зуба), ступеня стиснення жмиху під зубом, зміни щільності матеріалу й за значенням кута, що відповідає початку проштовхування жмиху корми в канал пресування.

Кут утворення замкнутого простору під зубом фіксувався при повороті коліс в момент контакту профілю зуба з профілем западини. Значення кута поділялося на 4 ділянки. Інтервали вимірювань відповідали значенням  $\varphi$ ,  $\frac{3}{4}\varphi$ ,  $\frac{1}{2}\varphi$ ,  $\frac{1}{4}\varphi$ , 0, де  $\varphi$  – початкове значення кута утворення замкнутого простору під зубом. За наміченими п'ятьма точками вимірювалася площа фігури під зубом.

Ступінь стиснення розраховувався як відношення значення поточної площі фігури під зубом до значення початкової площі під ним.

Щільність матеріалу під зубом визначалася добутком початкової щільності матеріалу на ступінь стиснення.

Кут початку проштовхування матеріалу в канал пресування визначено за графіком зміни щільності матеріалу під зубом. При заданому інтервалі щільності готових гранул від 900 до 1300 кг/м<sup>3</sup> прийнято, що проштовхування настає при досягненні щільності зжатого жмиху 1000 кг/м<sup>3</sup>.

Найбільш кращим вважається варіант виконання зубчастих коліс, коли відокремлення порції матеріалу під зубом настає раніше (кут утворення

замкнутого простору має більше значення), маса відокремленої порції матеріалу більша (площа фігури під зубом в момент утворення замкнутого простору має більше значення); прошовхування стисненого жмиху в канал пресування починається раніше.

**Методика оптимізації параметрів зубчастих коліс, що виконують одночасно функції пресування матеріалу та передачі крутного моменту.**

Методика оптимізації параметрів зуба для пресуючих коліс, які одночасно з пресуванням передають крутний момент, заснована на багатофакторному плануванні активного експерименту. Факторами, що змінюються в експерименті прийняті:

X1—частота обертання зубчастих коліс (зубчасті колеса однакові рівновеликі);

X2 – подача матеріалу (ляного жмиху).

Інші фактори, розглянуті в попередніх експериментах, не включені в план експерименту тому, що в умовах передачі крутного моменту вони не прийнятні.

Збільшувати висоту головки зуба аж до загострення не можна з міркувань міцності головки зуба. Крім того, збільшена головка зуба підрізає ніжку зуба спряженого колеса, тим самим послаблюючи міцність зуба біля основи. Для подвійного навантаження зуба колеса, що не лише передає крутний момент, але й одночасно пресує матеріал, ослаблення зуба біля основи і в вершині головки неприпустимо.

Експериментальні дослідження з визначення якості процесу гранулювання ляного жмиху проводяться на спеціально розробленій лабораторній установці.

Обробку отриманих даних експериментального масиву проводили за загальновідомими методиками та методами статичної обробки з використанням методик кореляційного та регресійного аналізу експериментальних даних для отримання у кінцевому результаті емпіричних рівнянь регресії.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Результати визначення фізико-механічних властивостей лляного жмиху та м'ятки.** Насіння льону олійного різних сортів відрізняються за своїм хімічним складом та анатомічній будові, що визначає різницю їх щільності, а також різницю щільності м'ятки та жмиху. Якщо об'ємна маса характеризує зернову масу, то щільність характеризує властивості окремого зерна, частинки. Від величини щільності окремого зерна залежить властивість зернової маси як об'єкта пресування.

В табл. 2 наведені середні значення щільності насіння льону олійного, м'ятки та жмиху в повітряно-сухому стані.

Таблиця 2 – Середня щільність зразків

№п/п	Вид	Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
1	Насіння льону олійного	1215
2	М'ятка	1190
3	Жмих	1223

Відомо, що речовини, які входять в склад насіння льону олійного, мають різну щільність. Так, наприклад, щільність жиру складає 924-928; клейковини – 1240-1313; крохмалю – 1428-1630; клітковини – 1250-1404; глюкози – 1465кг/м<sup>3</sup>.

Відповідно, дані табл. 2 мають деяку різницю, із-за різного вмісту жиру та відмінностей в структурі деформованого матеріалу.

Отримана щільність для жмиху льону олійного склала в середньому 1,223 г/см<sup>3</sup>, що перевищує в 1,56 раз щільність пелюстки лляного жмиху.

Надалі щільність насіння льону та м'ятки незначно зростає зі збільшенням вологості від 4 до 16,5%.

Це можна пояснити контракцією системи тверда речовина +адсорбована вода. Надалі, у міру збільшення вологості, спостерігається зменшення щільності. Очевидно, навколо окремих частинок, під дією

молекулярних сил зчеплення, на поверхні твердої частинки утворюється плівка, що перешкоджає контакту твердих частинок. При постановці дослідів обмежилися вологістю 16,5%, оскільки ГОСТ допускає вологість насіння льону олійного при зберіганні не більше 15%, а оптимальна технологічна вологість процесу видалення олії 6-9%. Таким чином, в результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що щільність насіння льону олійного, м'ятки при вологості в досліджуваних межах має несуттєві зміни і в розрахунках може прийматися постійною.

Насіння льону олійного та продукти його переробки є добре сипучими матеріалами. Про це свідчать результати дослідів з визначення кутів природного укусу (табл. 4).

Таблиця 4 – Кут природного відкошу зразків, град

№п/п	Вид	Кут відкошу, град
1	Насіння льону олійного	25-31
2	М'ятка	26-42
3	Жмих	30,5-42

Таблиця 5 – Зміна кута тертя зразків різної вологості

№п/п	Вид	Інтервал вологості, %	Кут тертя в градусах		
			по сталевому листу	По гладкій дошці	По транспортній стрічці
1	Насіння льону олійного	6-15,6	6-26	8-27	6-33
2	М'ятка	6-14,5	17-35	19-36	24-40
3	Жмих	5-12	18-40	18-36	26-52

Результати дослідів показали, що збільшення вологості зразків призводить до зростання кута природного укусу. Одночасно кут природного укусу сипких тіл залежить від щільності укладання і форми частинок. Кут тертя зразків про різні поверхні також збільшується з зростанням вологості. У табл. 4



наведені діапазони зміни кутів тертя зразків при різному значенні вологості від 5 до 15,6%.

**Результати дослідження процесу стиснення лляного жмиху при зміні параметрів профілю зуба.** Шестеренний гранулятор формує гранули в отворах, розташованих в міжзубових западинах зубчастих коліс. Пресуючі колеса виконані рівновеликими з евольвентним профілем зубів за ГОСТ 13 755-81. Колеса захоплюють матеріал та при утворенні під зубом замкнутого простору витісняють його з міжзубової западини в канал пресування (радіальний отвір).

Ефективність процесу залежить від моменту утворення замкнутого простору та інтенсивності стиснення лляного жмиху. Інтенсивність стиснення матеріалу визначає момент часу, для якого характерно ущільнення жмиху до щільності, достатньої для вдавнення його в канал пресування. Чим раніше утворюється замкнутий простір під зубом, тим стабільніше процес ущільнення корму. Стиснення здійснюється за типом пресування штемпелем в обмеженому з усіх боків просторі, де обмежуючими поверхнями є поверхні зуба та міжзубової западини. Природно, що параметри евольвентного профілю зубів будуть впливати на процес стиснення.

Лабораторні експерименти здійснювалися шляхом профілювання зубчастих коліс із заданими параметрами на цупкому картоні, закріпленні їх на дерев'яній поверхні відповідно до розрахункової міжосьової відстані та окресленням фігури на ватмані в момент утворення замкнутого простору й далі через одну чверть кута утворення замкнутого простору до моменту проходження міжосьової лінії. Отримані п'ять фігур характеризують площу під зубом, що прямо пропорційні об'ємам матеріалу, що стискається. Площа вимірювалася методом зважування вирізаних фігур на електронних вагах з триразовою повторністю.

Перерахунок маси фігур здійснювався за зваженим еталонним зразком того ж листа ватману. Вплив кута зачеплення на процес стиснення лляного жмиху в міжзубовій западині оцінювався за величиною кута утворення

замкнутого простору під зубом, за ступенем стиснення (стосовно початкової площі до поточної площі фігури під зубом в залежності від кута повороту колеса), за щільністю матеріалу.

Таблиця 6 – Експериментальні дані зубчастих коліс діаметром 480 мм, з модулем зуба 12 мм, кутом зачеплення 25°.

№ п/п	Назва	Од. вим.	Кут повороту колеса від моменту утворення замкнутого простору під зубом до проходження міжосьової лінії (град)				
			<b>10,44</b>	<b>7,83</b>	<b>5,22</b>	<b>2,61</b>	<b>0</b>
1	Маса фігури під зубом	г	0,0163	0,0146	0,0068	0,0032	0,0027,
2	Площа під зубом	мм <sup>2</sup>	93,29	78,56	38,92	18,31	16,00
3	Площа, що заповнюється матеріалом	мм <sup>2</sup>	77,29	67,56	22,92	2,31	0
4	Ступінь стиснення	раз.	1	1,14	3,37	33,46	
5	Щільність матеріалу (при початковій 500 кг/м <sup>3</sup> )	кг/м <sup>3</sup>	500	570	1686	0,0032	

Таблиця 7– Експериментальні дані зубчастих коліс діаметром 480мм, з модулем зуба 12мм та кутом зачеплення 15°.

№ п/п	Назва	Од. вим.	Кут повороту колеса від моменту утворення замкнутого простору під зубом до проходження міжосьової лінії (град)				
			<b>11,30</b>	<b>8,48</b>	<b>5,65</b>	<b>2,83</b>	<b>0</b>
1	Маса фігури під зубом	г	0,0272	0,0243	0,0170	0,0043	0,0028
2	Площа під зубом	мм <sup>2</sup>	155,67	139,07	97,29	24,61	16,02
3	Площа, що заповнюється матеріалом	мм <sup>2</sup>	139,65	123,05	81,27	8,59	0
4	Ступінь стиснення	раз.	1	1,14	1,72	16,24	
5	Щільність матеріалу (при початковій 500 кг/м <sup>3</sup> )	кг/м <sup>3</sup>	500	570	860	8120	

Інтерпретація даних таблиць 6 та 7 у вигляді графічних залежностей зміни площі під зубом, заповненої матеріалом, з моменту утворення замкнутого простору в міжзубовій западині до моменту проходження міжосьової лінії дає

наочне уявлення про вплив кута зачеплення профілюючої рейки на інтенсивність процесу стиснення лляного жмиху (рис. 5).

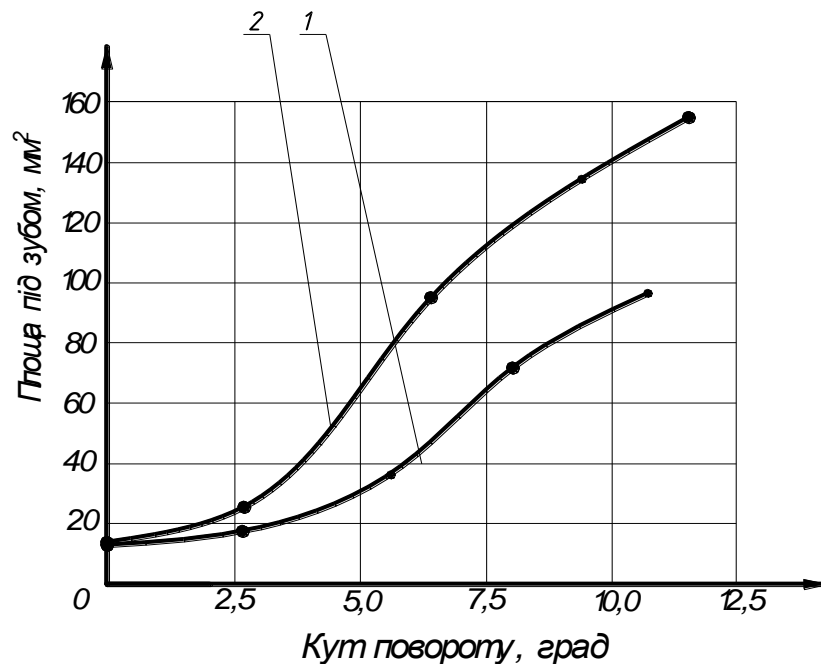


Рисунок 5 – Залежність площі під зубом, що заповнюється матеріалом від кута повороту коліс: 1 – кут зачеплення 25°; 2 – кут зачеплення 15°.

На графіку наведено зміну площі під зубом, що характеризує, по-перше, початок утворення замкнутого простору, по-друге, масу жмиху, що вміщається в замкнутому просторі, по-третє, інтенсивність стиснення матеріалу.

Аналізуючи дані рис. 5 можна зробити висновок, що зі зменшенням кута зачеплення раніше настає утворення замкнутого простору.

Маса матеріалу під зубом теж стає більше по мірі зменшення кута зачеплення. Так при  $\alpha = 15^\circ$  маса жмиху в 1,7 рази більше, ніж при  $\alpha = 20^\circ$ .

Стискання матеріалу відбувається більш інтенсивно при куті зачеплення 25° (рис. 6).

За даними рис. 7 видно, що утворення достатньої щільності матеріалу при  $\alpha = 25$  настає за 6° до міжосьової лінії, а при  $\alpha = 15$  – за 5,5° до міжосьової лінії. Ці значення близькі один до одного.

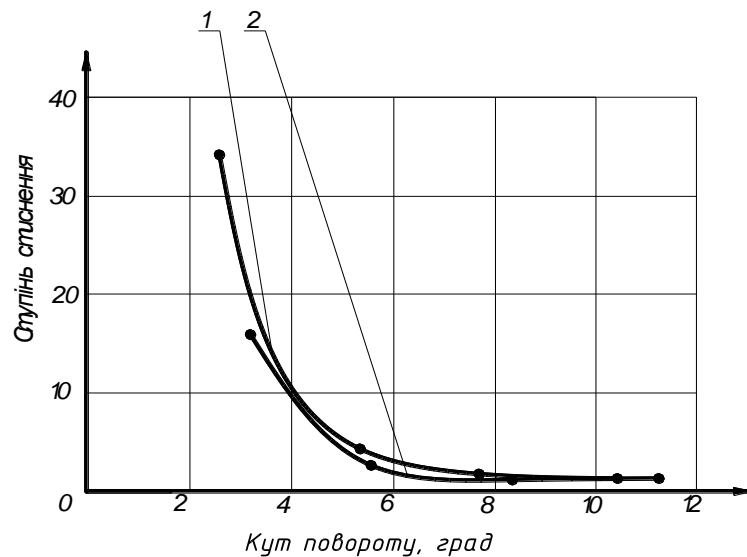


Рисунок 6 – Залежність ступеня стиснення лляного жмиху від кута повороту коліс: 1 – кут зачеплення 25°; 2 – кут зачеплення 15°.

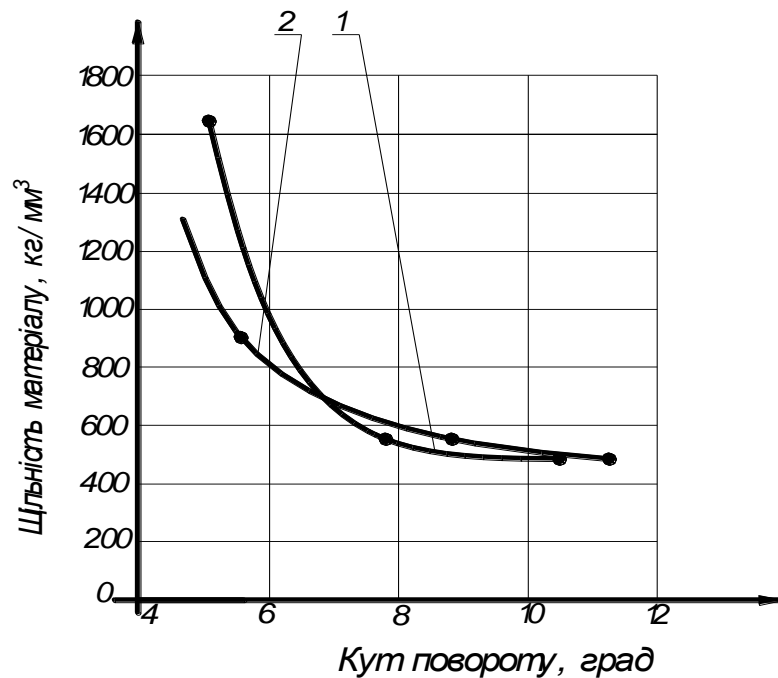


Рисунок 7 – Залежність щільності матеріалу від кута повороту коліс: 1 – кут зачеплення 25°; 2 – кут зачеплення 15°.

Зміна площі (об'єму) під зубом, що заповнюється матеріалом, в функції кута повороту коліс описується залежністю:

для коліс з кутом зачеплення 25 градусів при  $10,44^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$S = 0,4056\varphi^2 + 4,1903\varphi - 4,4123, R^2 = 0,935;$$

для коліс з кутом зачеплення 15 градусів при  $11,30^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$S = -0,1308\varphi^2 + 15,416\varphi - 10,353, R^2 = 0,9427.$$

Ступінь стиснення матеріалу під зубом змінюється згідно залежності:

для коліс з кутом зачеплення 25 градусів при  $10,44^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\lambda = 350,89\varphi^{-2,6492}, R^2 = 0,9608;$$

для коліс з кутом зачеплення 15 градусів при  $11,30^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\lambda = 129,48\varphi^{-2,1084}, R^2 = 0,9705.$$

Загальний висновок з аналізу цих експериментальних даних вказує на те, що зменшення кута зачеплення зубчастого вінця сприяє збільшенню відокремленої маси матеріалу під зубом в западині а, отже, перспективно для збільшення продуктивності гранулятора з зубчастими колесами.

Діаметр коліс є основним фактором в дослідженнях зубчастих пресів для сільськогосподарських матеріалів. Він, беззаперечно, впливає на продуктивність гранулятора. Однак характер зміни процесу ущільнення матеріалів зі збільшенням діаметра не з'ясований. Відомо, що одночасно зі збільшенням діаметра коліс збільшується кількість міжзубових западин й, відповідно, кількість каналів пресування, розташованих в них. Залежність ця нелінійна. Інтенсивність процесу стиснення, також повинна якимось чином залежати від зміни діаметра. Щоб дослідити вплив діаметра на характер процесу стиснення профілювалися зубчасті колеса однакового модуля 16 мм та кута зачеплення  $20^\circ$ , але різних діаметрів 480 і 240 мм.

При моделюванні процесу стиснення лляного жмиху зубами коліс вимірювалися кут повороту колеса та площа замкнутого простору під зубом.

Аналізуючи дані дослідів можна зробити наступні висновки: утворення замкнутого простору під зубом (відокремлення одиничної порції лляного жмиху) настає раніше для коліс з меншим діаметром:  $14,86^\circ$  та  $12^\circ$  відповідно для діаметрів коліс 240 мм і 480 мм.

Маса одиничної відокремленої порції матеріалу для колеса діаметром 480 мм в 1,03 рази більше, ніж для колеса діаметром 240 мм, тому що площа під зубом, відповідно, дорівнює  $253 \text{ мм}^2$  і  $245 \text{ мм}^2$  (рис. 8).

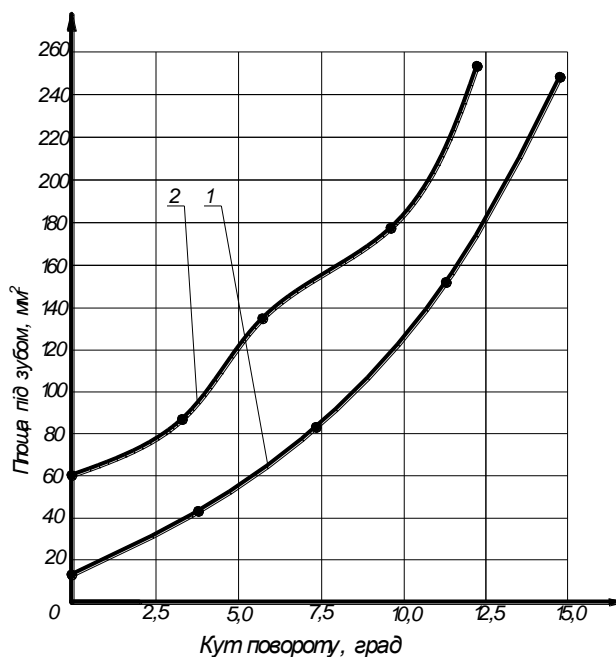


Рисунок 8 – Залежність площі під зубом, що заповнюється матеріалом від кута повороту коліс: 1 – діаметр 240 мм; 2 – діаметр 480 мм.

Зміна площі (об'єму) під зубом, що заповнюється лляним жмихом (рис.9), описується залежністю від функції кута повороту коліс:

для коліс с діаметром 480мм при  $12^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$S = 0,6895\varphi^2 + 7,7164\varphi - 0,6146, R^2 = 0,9961;$$

для коліс з діаметром 240 мм при  $14,86^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$S = 0,7026\varphi^2 + 4,7636\varphi - 0,7634, R^2 = 0,9966.$$

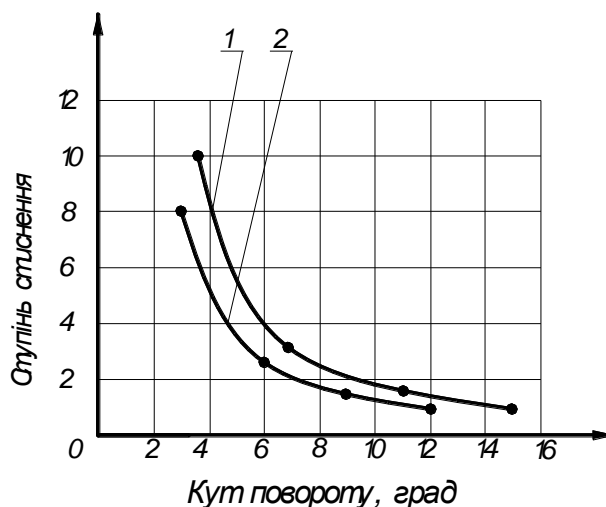


Рисунок 9 – Залежність ступеня стиснення лляного жмиху від кута повороту коліс: 1 – діаметр 240 мм; 2 – діаметр 480 мм.

Ступінь стиснення матеріалу під зубом змінюється за залежністю (рис. 10):

для коліс з діаметром 480мм при  $12^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\lambda = 39,011\varphi^{-1,4777}, R^2 = 0,994;$$

для коліс з діаметром 240 мм при  $14,86^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\lambda = 82,562\varphi^{-1,6361}, R^2 = 0,9945.$$

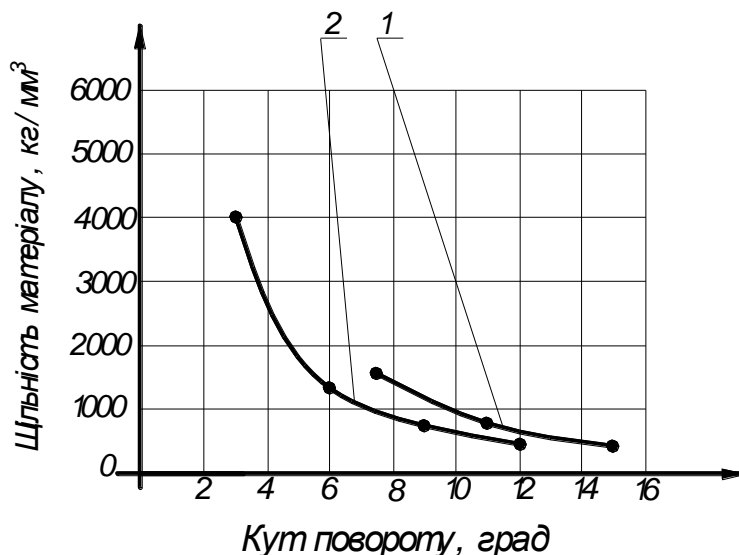


Рисунок 10 – Залежність щільності матеріалу від кута повороту коліс: 1 – діаметр 240 мм; 2 – діаметр 480 мм.

Щільність лляного жмиху під зубом (рис.10) збільшується по мірі повороту коліс до утворення замкнутого простору до проходження міжосьової лінії за залежністю:

для коліс з діаметром 480мм при  $12^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\rho = 39,01\rho_0\varphi^{-1,4777}, R^2 = 0,994;$$

для коліс з діаметром 240 мм при  $14,86^\circ \geq \varphi \geq 0$

$$\rho = 82,562\rho_0\varphi^{-1,6361}, R^2 = 0,9945.$$

Ступінь стиснення (рис.9) швидше зростає для колеса з меншим діаметром. Достатня для утворення гранули щільність матеріалу досягається раніше для колеса з меншим діаметром. Для колеса з діаметром 240мм впресовування стисненого до щільності  $1000 \text{ кг/м}^3$  лляного жмиху може

починатися за  $11^\circ$ , а для колеса діаметром 480 мм за  $6^\circ$  до проходження зубом міжосьової лінії (рис. 10).

В силу суперечливих тенденцій слід спробувати розмежувати області переважного застосування коліс різних діаметрів.

Для подальшого аналізу розглянемо випадок ущільнення більш легких матеріалів. Прийmemo щільність таких матеріалів під зубом дорівнює  $100 \text{ кг/м}^3$ . Різниця в часі досягнення достатньої для утворення гранул щільності матеріалу стає дуже відчутною.

Отже, колеса з великим діаметром ділильного кола є кращими для впливу на матеріал за типом поршня.

За один оберт колеса з великим діаметром мають більшу продуктивність. Обмежуючою умовою частоти обертання таких коліс залишається лише час знаходження матеріалу в каналі пресування, достатній для необхідного зміцнення гранул. Ймовірно, що для більш в'язко-пластичних матеріалів (комбікорм, дерть, корми зі значною кількістю в'язучих речовин) з великою вихідною насипною масою (густиною) переважні колеса з мінімально можливим діаметром, які впливають на корм як лопатевий прес.

Для матеріалів, що характеризуються великою пружністю й більш тривалим часом релаксації напружень, слід вибирати колеса великого діаметру з впливом на корм за типом поршневого преса.

Модуль зуба впливає на розміри мізубової западини та зуба. Тому задача дослідження може складатися в альтернативі: краще трохи, але великих зубів або багато, але дрібних на колесі одного і того ж ділильного діаметра, з одним і тим же кутом зачеплення.

### **Аналіз результатів досліджень продуктивності шестеренного гранулятора**

Для визначення режиму роботи пресу використовувалася методика двохфакторного планування. Прийнятий ортогональний план для двох факторів, які змінювалися в межах: частота обертання –  $140 \dots 180 \text{ хв}^{-1}$  та подача лляного жмиху –  $35 \dots 55 \text{ г/с}$ . Критеріями відгуку вибрані подача  $\text{кг/год}$



гранулятора з виробництва якісних гранул та їх якість за кришимістю. Матриця плану представлена в таблиці 8.

Таблиця 8 – Матриця плану та середні значення продуктивності гранулятора та кришимості гранул

№ п/п	Рівні факторів в досліді		Середні значення продуктивності, кг/год	Середні значення кришимості, %
	$X_1$ , об/хв	$X_2$ , г/с,		
1	-1	-1	105,9	5,3
2	-1	+1	128,7	6,7
3	+1	-1	161,9	12,1
4	+1	+1	201,5	18,6
5	+1	0	182,8	14,8
6	-1	0	118,2	6,1
7	0	+1	161,3	12,6
8	0	-1	135,8	8,1
9	0	0	149,3	11,3

Для забезпечення рівня значимості результату 0,05 прийнято трьохкратна кількість повторностей дослідів.

Оцінку відтворюваності результатів експериментів здійснювали за критерієм Кохрен, який для прийнятого рівня значимості результатів 0,05 не повинен бути більше табличного значення.

Значення критерію Кохрена для дослідів № 6 дорівнює:

$$G_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum S_n^2} = 0,23 \quad (3)$$

Для рівня значимості 0,05 та числа ступенів вільності

$$f = N \cdot (n - 1) = 9 \cdot (3 - 1) = 18. \quad (4)$$

табличне значення його  $G_{\text{ТАБЛ}}=0,373$ .

Отримані наступні коефіцієнти рівняння регресії:

$$b_0 = 149,411; b_1 = 32,233;$$

$$b_2 = 14,65; b_{12} = 4,2; b_{11} = 1,033; b_{22} = -0,917.$$

Значимість їх перевірялася в програмі MathCAD v15:

$$\Delta b_0 = 5,317; \quad \Delta b_1 = 2,912; \quad \Delta b_2 = 2,912; \quad \Delta b_{12} = 3,567;$$

$$\Delta b_{11} = 5,045; \quad \Delta b_{22} = 5,045.$$

В рівнянні регресії для продуктивності гранулятора значимість коефіцієнтів  $b_{12}$ ,  $b_{11}таb_{22}$  не підтверджується.

Продуктивність гранулятора в результаті представлена рівнянням:

$$Y_1 = 149,411 + 32,233X_1 + 14,65X_2 + 4,2X_1X_2. \quad (5)$$

Перевірку адекватності рівняння на збіжність розрахункових дослідних даних подачі гранулятора здійснювали за критерієм Фішера. Для рівняння продуктивності гранулятора отриманий результат F-теста=0,998.

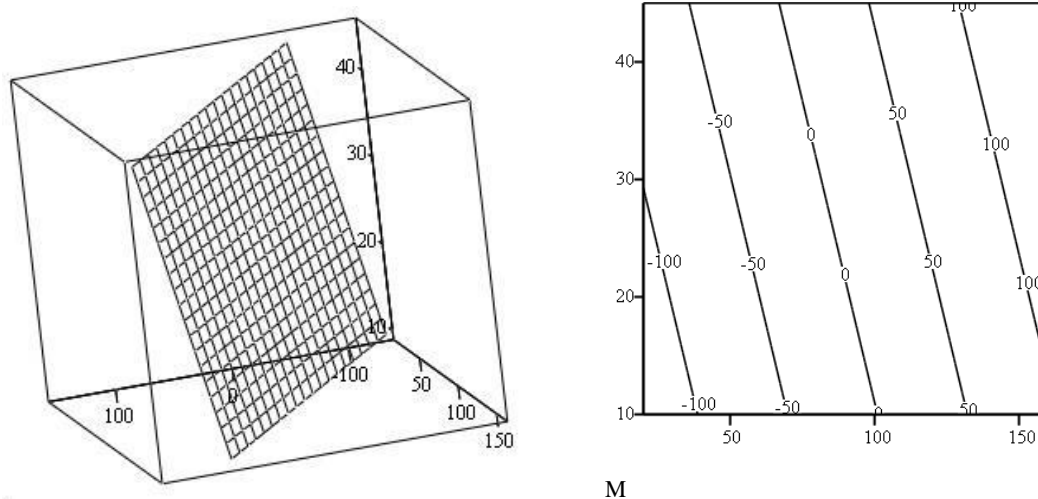


Рисунок 11 – Поверхня відгуку продуктивності гранулятора в функції частоти обертання коліс

Поверхня відгуку функції продуктивності гранулятора представлена на рис. 11. За цими даними на продуктивність гранулятора найбільш суттєво впливає подача матеріалу.

Таблиця 9 – Результати порівняння продуктивності гранулятора за теоретичною залежністю та за даними дослідів

№ п/п	Назва	Подача матеріалу, г/с				
		35	40	45	50	55
1	Теоретична продуктивність, кг/год	101,3	110,2	120,1	130,9	143,4
2	Експериментальні значення продуктивності, кг/год	135,8	142,5	149,3	155,3	161,3
3	Похибка теоретичної залежності, $\frac{Q_T - Q_E}{Q_E} \cdot 100\%$	-25,41	-22,67	-19,56	-15,71	-11,1

Результати порівняння отриманих за результатами експерименту значень подачі гранулятора наведені в табл.9. Вони показують, що фактична продуктивність гранулятора вище теоретичної на 11...25%, що потребує внесення в теоретичні залежності поправочних коефіцієнтів, які згладжують цю різницю. Для другого критерію оптимізації – кришимості гранул відтворюваність дослідів також уточнена з визначенням критерію Кохрена.

Значення критерію Кохрена розраховано для досліду №9 за формулою:

$$G_{\text{розр}} = \frac{S_{\text{max}}^2}{\sum S_n^2} = 0,178 \quad (6)$$

Табличне значення  $G_{\text{табл}} = 0,373 > G_{\text{розр}} = 0,178$ .

Розрахункові коефіцієнти членів рівняння зведені в табл. 10.

Таблиця 10 – Результати розрахунку коефіцієнтів членів рівняння регресії кришимості гранул

№ п/п	$X_1 \bar{Y}$	$X_1 \bar{Y}$	$X_1 \bar{Y}$	$X_1^2 \bar{Y}$	$X_2^2 \bar{Y}$
1	-5,3	-5,3	5,3	5,3	5,3
2	-6,7	6,7	-6,7	6,7	6,7
3	12,1	-12,1	-12,1	12,1	12,1
4	18,6	18,6	18,6	18,6	18,6
5	14,8	0	0	14,8	0
6	-6,1	0	0	6,1	0
7	0	12,6	0	0	12,6
8	0	-8,1	0	0	8,1
9	0	0	0	0	0
сума	27,4	12,4	5,1	63,6	63,4

Коефіцієнти рівняння кришимості гранул дорівнюють:

$$b_0 = 10,778; \quad b_1 = 4,567; \quad b_2 = 2,067; \quad b_{12} = 1,275; \quad b_{11} = -0,067; \\ b_{22} = -0,167.$$

Значимість їх за довірчими інтервалами:

$$\Delta b_0 = 2,532; \quad \Delta b_1 = 1,387; \quad \Delta b_2 = 1,387; \quad \Delta b_{12} = 1,699; \quad \Delta b_{11} = 2,402; \\ \Delta b_{22} = 2,402.$$

В рівнянні регресії для кришимості гранул значимість коефіцієнтів  $b_{12}$ ,  $b_{11}$  та  $b_{22}$  не підтверджується. Для умови підтримання рівня значимості рівняння кришимості гранул всі коефіцієнти збережені.

Тоді рівняння регресії в кодованому вигляді для кришимості гранул представлено залежністю:

$$Z_1 = 10,778 + 4,567X_1 + 2,067X_2. \quad (7)$$

Перевірку адекватності рівняння на збіжність розрахованих за рівнянням кришимості гранул та отриманих за результатами дослідів даних здійснювали за критерієм Фішера. Для рівняння кришимості гранул отриманий результат F-теста=0,994.

Поверхня відгуку функції кришимості гранул представлена на рис. 12.

Обидва рівняння, отримані в результаті дослідів, є математичною моделлю процесу гранулювання кормів на досліджуваному грануляторі:

$$\begin{cases} Y_1 = 149,411 + 32,233X_1 + 14,65X_2 \\ Z_1 = 10,778 + 4,567X_1 + 2,067X_2 \end{cases} \quad (8)$$

В розкодованому вигляді рівняння (4.5) представлені залежності:

$$\begin{cases} Q_1 = -1,0697q - 0,1597n + 24,3647 \\ K_1 = -0,7983q - 0,0049n + 3,1707 \end{cases} \quad (9)$$

Розв'язок їх являє компромісну задачу.

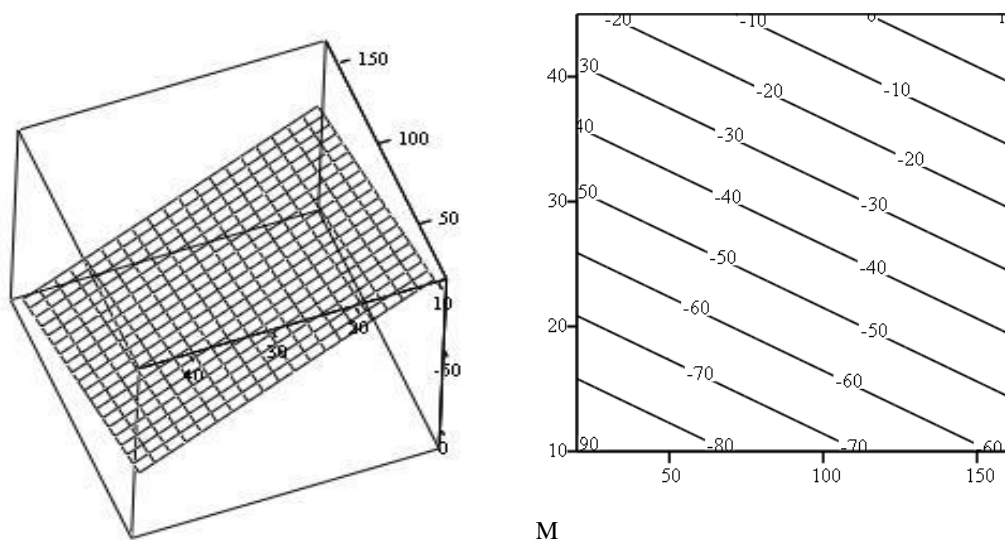


Рисунок 12 – Поверхня відгуку функції кришимості гранул

Для знаходження області оптимальних значень параметрів режиму роботи гранулятора, використаний графічний метод двохмірних перерізів. На графіку (рис. 13) зображені, поряд із ізолініями подачі гранулятора, ізолінії кришимості отриманих гранул. Розглядаючи зображення двохмірних перерізів поверхней продуктивності гранулятора та кришимості отриманих гранул, можна признати раціональною зоною область в інтервалі подачі матеріалу 47...49 кг/с до ізолінії кришимості 12% згідно ГОСТ 23513.

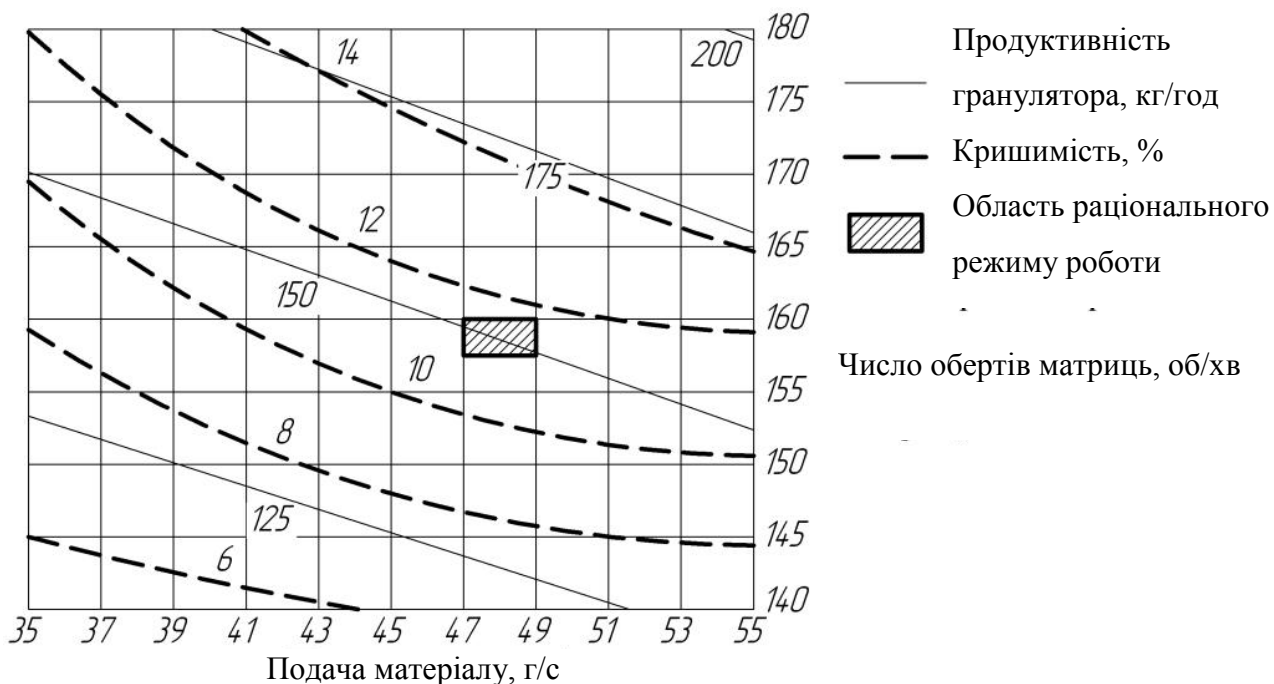


Рисунок 13 – Розв'язок компромісної задачі

## ВИСНОВОК

1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження показують доцільність використання насіння льону та продуктів їх переробки в рецептурах харчових продуктів для підвищення їх харчової цінності, вмісту незамінних амінокислот і полі ненасичених жирних кислот, а також розробки комбікормів на їх основі.

2. Розроблено комплексну технологію переробки насіння льону олійного з отриманням продуктів різного функціонального призначення та сировини для виробництва комбікормів (рис. 1), яка дозволяє знизити втрати олії в екстракційній машині завдяки введенню операції гранулювання, а також

підвищити ефективність використання розчинника при проходженні крізь пористу гранулу лляного жмиху.

3. Проведено аналіз технологічного процесу пресування матеріалу шестеренним робочим органом гранулятора та встановлено, що при обертанні спряжених коліс об'єми зубів, що входять у западини сусіднього колеса, взаємно рівні (при рівновеликих колесах), тому стиснення матеріалу може бути прирівняне до ущільнення матеріалу циліндричними вальцями (до моменту утворення закритої камери в западині), причому, при дотриманні умови торкання початкових (ділительних) кіл зубчастих коліс можуть бути умови, коли весь захоплюваний матеріал повинен вдавлюватися в матричні отвори і перетворюватися в гранули.

4. Отримана математична модель для оцінки режиму роботи гранулятора з рівновеликими зубчастими матрицями. За результатами досліджень визначення раціонального режиму роботи гранулятора оптимальне співвідношення його продуктивності та якості гранул отримано при частоті обертання матриць 155...160 об/хв та подачі матеріалу 47...49 г/с. Гранулятор з матрицями діаметром 450 мм при обертах 160 об/хв має продуктивність 131 кг/год, що відповідає енергоємності технологічного процесу 19,2 кВт·год/т.

7. Встановлено, що оптимальними параметрами шестеренного гранулятора з горизонтальними рівновеликими матрицями для гранулювання лляного жмиху є:

частота обертання матриць, об/хв	155...160
подача матеріалу, г/с	47...49
діаметр матриці по ділительному колу, мм	450
модуль зубчастої матриці, мм	8...9
коефіцієнт висоти головки у зуба	0,6...1
кут зачеплення евольвентного типу	15...17°
переріз матричних каналів, мм	8,0×8,0
кількість матричних каналів пресування, шт.	42...46

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Покровский А.А. О биологической и пищевой ценности пищевых продуктов/А.А. Покровский //Вопросы питания. – 1975. – № 3. – С.25-40.
2. Практическое руководство по переработке и использованию сои /под ред. Д.Р. Эриксона. – М.: Изд. «Макцентр». – 2002. – 672с.
3. Щербаков В.Г. Технология получения растительных масел. – 3-те изд.перераб. и дополнен. – Москва: "Колос", 1992. – 207 с.
4. Масликов В. А. Технологическое оборудование производства растительных масел. – М., Пищепромиздат, 1962. – 428 с.
5. Лихочвор В.В. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур / В.В. Лихочвор, В.Ф. Петриненко – Львів: Українські технології, 2006. – 730 с.
6. Льон олійний: біологія, сорти, технологія вирощування / [А.В. Чехов, О.М. Лапа, Л.Ю. Міщенко, І.О. Полякова]. – К. – Українська академія аграрних наук, Інститут олійних культур, 2007. – 59 с.
7. Пешук Л.В., Біохімія та технологія оліє-жирової сировини / Л.В. Пешук, Т.Т. Косенко. – Навчальний посібник. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://ebooktime.net/book\\_171.html](http://ebooktime.net/book_171.html).
8. Доморощенкова М.Л. Современные технологии получения пищевых белков из соевого шрота/ М.Л. Доморощенкова //Пищевая промышленность. – 2001. – №4. – С.6-10.
9. Щербаков В.Г. Биохимия и товароведение масличного сырья. Учебник для вузов– 5-е изд. перераб. и доп. /В.Г. Щербаков, В.Г.Лобанов. – М.:КолосС, 2003. – 360с.

10. Долгов И. А. Научные основы методики расчета рабочих органов прессующих, брикетирующих и прокатывающих сеноуборочных машин / И. А. Долгов. – Ростов-н/Д: РИСХМ, 1988. – 109 с.

11. Ладыгин Е.А. Технология и пресс для гранулирования кормолекарственных смесей: Дис. ... канд. техн. наук. – зерноград, 1992. – 159 с.

12. Некрашевич В. Ф. Научно-техническое обоснование технологии и средств механизации приготовления кормовых гранул и брикетов с заданными физико-механическими свойствами: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Л. – Пушкин, 1983. – 40 с.

13. Кучинская З.Н. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / З.Н. Кучинская, В. И. Особов, Ю. Л. Фрегер. – М.: Агропромиздат, 1988. – 207 с.

14. Кассандрова О.Н. Обработка результатов наблюдений / О.Н. Кассандрова, В.В. Лебедев. – М.: Наука, 1970. – 104с.