

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Факультет механізації сільського господарства

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідуючий кафедри ПОПХВ,
к.т.н., доц.
В.П.Янович
“ _____ ” _____ 2017 р.

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРУШЕННЯ НАСІННЯ
СОНЯШНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ
ІНФРАЧЕРВОНОГО ОПРОМІНЕННЯ

Робота на здобуття освітньо – кваліфікаційного рівня магістр
за спеціальністю 8.10010103 – «Механізація сільського
господарства»

Виконав: ст.гр 61Ммаг
Штепан Микола Олександрович
Науковий керівник:
к.т.н. проф. Бандура В.М.

2017

ВСТУП

Пошук ресурсозберігаючих та екологічно чистих технологій і технічних рішень при виробництві харчової продукції повинен відбуватися через розробку і розвиток нових аналітичних методів та конструктивних заходів, що призведе до прогресу у даній галузі не тільки у нашій державі, але й за її межами. Ефективне використання потужностей переробного виробництва завжди характеризувалося його високим рівнем механізації. Крім того, проведення глибоких економічних реформ та перехід до різних форм власності також вимагає якісно нового забезпечення виробників продукції ефективними засобами механізації.

В сучасних умовах стану вітчизняного ринку важливе місце в забезпеченні продовольчої безпеки країни займає харчова та переробна промисловість.

Зростання показників якості продукції харчової промисловості та, як наслідок, її конкурентоспроможність безпосередньо залежать від рівня і стану технології переробки і обладнання, що застосовується.

Підвищення якості та розширення асортименту продукції на основі вдосконалення технології і техніки неможливе без всебічного вивчення процесів харчових виробництв, і поліпшення на цій основі техніко-економічних показників устаткування. Удосконалення процесів технології та застосовуваного при цьому устаткування слід вести, як в напрямку оптимізації за критеріями техніко-економічних показників (підвищення продуктивності, зниження енерговитрат і т.п.), так і в напрямку підвищення споживчих властивостей вироблених продуктів переробки (різноманітні показники якості).

Найважливішою галуззю харчової промисловості була і залишається олійножирова промисловість. У промисловості йде робота в напрямку підвищення конкурентоспроможності. На підприємствах нарощуються

потужності, йде заміна застарілого обладнання, впроваджується нова техніка. Одночасно зростає кількість нових цехів середньої і малої потужності для переробки олійної сировини в місцях найбільш наближених до місця виробництва сировини. Для цих виробництв необхідно також створювати спеціальне і ефективне обладнання, що дозволить їм бути конкурентоспроможними.

Підвищення якості готової продукції олійножирової промисловості (рослинні олії, маргарини і т.д.) і вторинних продуктів (макуха, шрот) також неможливо без дослідження і вдосконалення процесів, що протікають в ході переробки олійної сировини, особливо в разі застосування нової техніки.

Різноманітність природи і видів процесів, що мають місце при переробці насіння соняшнику, залишає широке поле діяльності в напрямку дослідження з метою управління цими процесами для досягнення найкращих техніко-економічних і технологічних показників. Це процеси перенесення тепла, маси (зміна вологості, концентрацій), фізико-механічні процеси (сепарування, обрушення, дроблення, віджимання, фільтрація).

Одним з процесів, які вимагають нових підходів до його вивчення і вдосконалення, є процес обрушення, тобто руйнування плодової оболонки насіння соняшнику з метою її подальшого відділення і отримання ядрової фракції, що підлягає подальшій переробці.

Предметом розгляду в даній роботі є операція обрушення насіння соняшнику, а також вироблення методів підвищення ефективності цієї операції із застосуванням удосконаленого обладнання.

Важлива роль операції обрушення соняшникового насіння і її вплив на технологічні показники, відзначається багатьма вітчизняними вченими [1,2,3]. В обґрунтування необхідності даної операції наводяться закономірності зміни якісних показників одержуваних продуктів переробки [1,3].

В даний час стан парку обладнання підготовчих цехів олійно-жирових підприємств виробництва рослинних олій таке, що не дозволяє істотно поліпшити якість одержуваної рушанки з насіння соняшнику без

застосування попередньої підготовки насіння до обрушення. Можна намітити кілька підходів до підвищення якості обрушення. Це попереднє фракціонування насіння за розмірами і аеродинамічним властивостям, підготовка із застосуванням обробки електроактивованих рідкими системами (ЕАЖС); підготовка з застосуванням інфрачервоного опромінення.

Невисоким, але стабільним попитом користується обрушене ядро соняшнику. Якість такого ядра і рушанки має бути особливо високим за змістом цілих ядер і лущиння. Воно застосовується для виготовлення кондитерських виробів (халва, козинаки), що користуються популярністю у населення. Саме на випуск таких продуктів і можуть бути націлені малі підприємства олієжирової промисловості.

У зв'язку з цим, завданням досліджень стало вдосконалення технології для руйнування плодової оболонки соняшнику, стосовно до малих виробництв, націленим на вироблення ядрового продукту високої якості.

Пропоновані в даній роботі методи вдосконалення технологічної операції обрушення засновані на пошуку комбінованого процесу, тобто поєднання власне руйнування плодової оболонки і попередньої підготовки, яка дозволила б змінити властивості насіння в такому напрямку, щоб оболонка (шолуха) придбала властивість крихкості, а ядро стало пластичним і міцним. Пропонується застосування попередньої підготовки насіння до обрушення за допомогою впливу на них інфрачервоними променями, для досягнення оптимальних пружно пластичних властивостей лущиння і ядра, з негайно подальшим обрушенням. Обрушення підготовленого насіння здійснюється одноразовим спрямованим ударом запропонованої конструкції відцентрової рушки.

Метою роботи є наукове обґрунтування застосування попередньої підготовки насіння соняшнику до обрушення способом термообробки і оцінка її впливу на ефективність обрушення одноразовим ударом запропонованої конструкції відцентрової насіннерушки.

Відповідно до поставленої мети визначено такі основні **завдання дослідження**:

- Удосконалити математичну модель відцентрового обрушення і визначити основні фактори, що визначають ефективність процесу;
- Проаналізувати вплив повітряного потоку на рух насіння в насіннерушці і оцінити вплив положення деки на роботу насіннерушки;
- Спробувати вирішити задачу пов'язаного тепломасопереносу в насінні соняшнику з урахуванням форми і наявності оболонки;
- Провести математичне моделювання розвитку полів вологості і температури в складових частинах (ядрі і лушпинні) насіння соняшнику і обґрунтувати раціональні режими вологотеплової обробки при підготовці насіння соняшнику до обрушення;
- Удосконалити конструкцію відцентрової насіннерушки;
- Запропонувати агрегат, що складається з термоапарату і відцентрової насіннерушки.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СТАНУ ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ ПЛОДОВОЇ ОБОЛОНКИ НАСІННЯ СОНЯШНИКА

1.1 Стан техніки і технології виробництва рослинних олій і роль обрушення

Процес обрушення насіння соняшнику є однією з важливих технологічних операцій, від ефективності проведення якої залежить якість рушанки, а отже, і готової продукції (олії, макухи, шроту) [1-3,21,25,26], а також продуктивність заводу, навантаження на устаткування і його знос [10].

У зв'язку з селекцією сортів соняшнику на високу олійність, були отримані високоолійні насіння соняшнику, технологічні властивості яких в порівнянні з насінням, раніше перероблюваних сортів, різко погіршилися [1,21,25]. Це обумовлено будовою насіння, при якому спостерігається зрощення плодової оболонки (лушпиння) з ядром. За своїми фізико-механічними властивостями, насіння соняшнику має досить складну систему взаємозв'язку між окремими морфологічними частинками насіння, що ускладнює ведення процесу відділення плодової оболонки від ядра. Втрати олії з лушпинням, в результаті переробки високоолійних насіння соняшнику збільшуються, і в деяких випадках перевищують величину втрат зі шротом, складаючи значні загальні втрати олії у виробництві [11,26].

В даний час виробництво соняшникової олії здійснюється двома основними способами - механічним віджиманням мезги (подрібненої ядерного продукту, що пройшов вологотеплову обробку) на шнекових пресах з отриманням макухи з залишком олії (олійність приблизно 20%) і наступною екстракцією вуглеводневим розчинником (екстракційним бензином) цієї олії з макухи (спеціально підготовленого у вигляді пелюстки або крупки) [1,21,25].

Присутність досить високого вмісту оболонки (лушпиння) у складі насіння (змінюється в діапазоні 20 - 30% в залежності від сорту і головним чином містить сиру клітковину і незначну кількість жиру) [30] не тільки викликає швидкий знос рухомих частин шнекових пресів, але також зменшує повний вихід олії. При цьому в олію переходять небажані компоненти (воску, вільні жирні кислоти, продукти окислення, барвники), що веде до підвищених витрат при рафінації олії. Присутність оболонки в макусі, веде до випуску макухи і шроту нижчої поживної цінності.

Соняшникове ядро і його знежирений шрот має кілька переваг перед шротами іншого олійного насіння, яке містить протеїн придатний для харчування людини через відсутність антипоживних або токсичних чинників, ароматів і його високою засвоюваністю і біологічною цінністю. Багато дослідників рекомендували введення або знежиреного борошна, або смаженої соняшnikової крупи як збагачення білковими речовинами хлібобулочних і кондитерських виробів [27,28].

Тому напрямок досліджень з метою вдосконалення обрушення насіння соняшнику приваблює численних дослідників [4,5,11-13,28]. Показано [28,29], що висока якість обрушення призведе до збільшення виходу олії при пресуванні підготовленого (подрібненого) ядра соняшnikового насіння.

1.2 Розвиток наукових положень і розробка пропозицій щодо вдосконалення обрушення

З огляду на важливість технологічної операції обрушення насіння соняшнику у виробництві рослинних олій, незадоволеність ефективністю її проведення на сучасному етапі на існуючому обладнанні за минулий час були запропоновані різні способи відділення плодових оболонок від ядра.

Відомий спосіб руйнування оболонки насіння соняшнику методом миттєвого скидання тиску повітря або водяної пари [4,5], який полягає в

створенні умов для проникнення надлишкового тиску газу або водяної пари під оболонку сім'янки з подальшим миттєвим скиданням тиску зовні насіння до атмосферного. В результаті миттєвого створення різниці тиску по обидві сторони оболонки, остання руйнується. При цьому контакт між оболонкою і ядром практично відсутній, що сприяє низькому замаслюванню оболонки.

По одному з варіантів оформлення процесу застосовувався повітря з надлишковим тиском 0,9 - 1,1 МПа (рисунок 1.1). В результаті була отримана рушанка з вмістом необрушеного насіння 10 - 12%.

За іншим варіантом в якості робочого агента застосовувалась водяна пара (0,9 - 1,1 МПа). У цих умовах вміст цілого насіння в рушанці склало 3 - 10%. Поліпшення ефекту обрушення при використанні водяної перегрітої пари, пов'язано зі зміною міцності плодової оболонки насіння при дії на неї тепла і вологи, що конденсується. Однак дослідниками було проаналізовано ступінь впливу перегрітої пари на пружно пластичні властивості соняшникового лущиння і очевидним недоліком є зволоження рушанки.

Як уже зазначалося, позитивним фактором цього процесу є відсутність тісного контакту між оболонкою і ядром. Але слід зазначити, що апаратурне оформлення цього методу пов'язано з істотними труднощами, так як процес здійснюється при відносно високому тиску і вимагає високих енергетичних витрат. У зв'язку з наявністю високого тиску викликає труднощі безперервне підведення насіння в зону обрушення, а також відведення рушанки і робота установки в безперервному циклі. Енергетичні витрати на обрушення соняшнику способом скидання тиску водяної пари складає 15-30 МДж/т насіння.

Є відомості про спосіб обрушення аеродинамічним лущенням, де обрушення проводилося струменем повітря з надзвуковою швидкістю. Сутність цього методу полягає в тому, що через сопло Лавалю у воронку, в яку надходить насіння, подається попередньо стиснене повітря. Насіння захоплюються струменем повітря і викидаються через трубу в розвантажувач

вже у вигляді рушанки. Основними факторами, що забезпечують руйнування оболонки, є фрикційний вплив струменя повітря на оболонку, деякий надлишковий тиск зсередини насіння під оболонкою і осьову інерційну навантаження насіння.

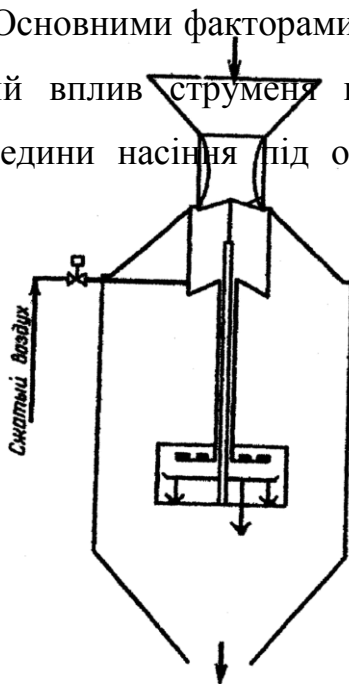


Рисунок 1.1 - Пристрій для обрушення насіння методом миттєвого скидання тиску повітря

Процес аерошелушіння складний і залежить від багатьох фізико-механічних факторів, що ускладнює його регулювання. В експериментальних дослідженнях обрушення насіння соняшнику цим способом не було отримано задовільних показників (зокрема, відзначалася висока олійність відходів лушпиння). Відзначено високу витрату електроенергії і підвищений шум від обрушуючої установки (в межах 75 Дб).

В Одеській національній академії харчових технологій проводилися дослідження по виявленню впливу ультразвуку на фізико-механічні властивості зерна. Зерно пшениці оброблялося ультразвуком з частотою 15,

23, 55 кГц з інтенсивністю 3-4 Вт/см, з експозицією 14 секунд за допомогою генератора УЗГ-15. В результаті впливу ультразвуку, опірність зерна ударному навантаженню зменшувалася на 15 - 20%. Даний досвід може бути поширений і на соняшникове насіння.

Відомі роботи [5], в яких досліджується електро-гідравлічний ефект обрушення насіння соняшнику. Принцип методу полягає в застосуванні електричного розряду високої напруги в рідині, де навколо зони розряду виникають імпульси щодо високого гідравлічного тиску миттєвого стиску, здатного здійснити роботу по руйнуванню оболонки.

При здійсненні обрушення електрогідрударом під напругою 70 кВ отримана рушанка з вмістом необрушеного насіння близько 13%. Однак через значних витрат електроенергії на подальше висушування ядра і лушпиння, а також на очистку технологічної води, цей метод практичного застосування в промисловості не отримав.

Розглянуті методи відділення плодових оболонок від ядра, пов'язані з підвищеними енерговитратами, складнощами в апаратурному оформленні не набули поширення на підприємствах олійних галузі.

Механічні способи обрушення представляються найбільш практичними і їх вдосконалення повинно дати прийнятний результат.

Ряд робіт [35,36], виконаних останнім часом, повідомляють про механічні способи обрушення соняшnikового насіння, що включають розколювання оболонок валками, молотковими дробарками, рушанками ударної дії і відцентровими, з наступним поділом і видаленням оболонок, але без вказівки будь-яких оптимальних значень змінних параметрів процесу.

Обладнання з дією ударного навантаження до плодових оболонок залишається основним застосовуваним способом обрушення, а обладнанням є відцентрова і бичова насіннерушка.

Як було зазначено вище, не дивлячись на різноманіття запропонованих способів вдосконалення процесу обрушення, основним обладнанням заводів олійно-жирової промисловості було і залишається засноване на властивості

плодової оболонки розколюватися при ударі. В силу цього використовуються машини ударної дії, які в даний час представлені двома основними видами: машини багаторазового удару (бичова насіннерушка), і машини одноразового удару (відцентрова насіннерушка) [10,16].

Розквіт теорії і практики застосування бичової насіннерушки доводиться на роки перших п'ятирічок, коли переробка насіння соняшнику ставилася на промислову основу. При цьому перероблялися насіння старих низькоолійних сортів, що характеризуються хорошою обрушуваністю через наявність зазору між оболонкою і ядром.

Великий внесок у створення теоретичних основ роботи і розробку конструкції бичової насіннерушки вніс І.В. Дьомін. Ним був визначений коефіцієнт відновлення для соняшникового насіння (0,33-0,43), що дозволило оцінити ступінь пружних властивостей соняшникового насіння і врахувати їх при проектуванні обладнання для обрушення [2,10,16,29].

І.В. Гавриленко дає опис рушального барабана системи «Млинбуду». Продуктивність описаної конструкції насіннерушки становила 30 т/добу по насінню соняшнику. При цьому величина охоплення декою бичевого барабана становила 240° при кількості бичів 10 шт.

Існувала конструкція бичової насіннерушки заводу ім. Воробйова, де при діаметрі барабана 700 мм обрушення проводилося з використанням деки, що складається з двох частин - передньої і задньої, які мали самостійне управління за допомогою штурвалів.

Н.Н. Кудрявцевим були проведені дослідження роботи даної бичової насіннерушки, що дозволило виявити дослідно - практичні закономірності процесу обрушення в машинах існуючих конструкцій. Була встановлена мала ефективність існуючих регульовальних пристроїв деки; визначено, що задня дека, в основному, негативним чином впливає на обрушення насіння (перетирає вже обрушене ядро). В результаті, автором за участю І.Г. Васильєва була запропонована нова конструкція насіннерушки для

соняшникового насіння, яка отримала назву насіннерушки Кудрявцева - Васильєва.

Надалі протягом багатьох років ця конструкція практично не змінювалася. Змінилися форма і матеріал колосників деки, з'явилися варіатори швидкостей. Було змінено кількість бичів ротора. Внаслідок цих змін насіннерушка отримала позначення МНР [10].

Насіннерушка МНР (рисунок 1.2) має чавунну деку 3, шарнірно закріплену в напрямних площинах 4, барабан 1 з шістнадцятьма бичами 2. Для завантаження насіннерушки влаштований приймальний бункер 6 з рифленим живильним валиком 7, рівномірно розподіляє насіння по довжині бичевого барабана. Пристрій 5 служить для регулювання зазору між декою і бичами. Цей зазор може змінюватися від 8 до 30 мм в залежності від вологості насіння і їх розміру. Дека набирається з чавунних колосників, що відливаються окремими секціями по 4-5 рифлів діаметром 25 мм. Бичі виконані зі смужової сталі шириною 100 мм і товщиною 10-12 мм. Краї бичів, звернені до деки, злегка закругляються щоб уникнути дроблення насіння і ядра. Діаметр бичевого барабана 800 мм, довжина 972 мм. Кут нахилу бичів до радіальної лінії барабана $50 - 53^\circ$, кут охоплення деками барабана 110° . В обертання бичевий барабан приводиться електродвигуном потужністю 5,5 кВт через варіатор швидкостей, за допомогою якого можна змінювати частоту обертання барабана від 560 до 630 об/хв. Практично продуктивність насіннерушки коливається від 50 до 70т соняшникового насіння на добу в залежності від вологості і окружної швидкості бичевого барабана.

Бічерушка працює наступним чином. Насіння, що надходять в живильний бункер, валиком рівномірно розподіляються по довжині бичевого барабана. Пройшовши живильну щілину, насіння потрапляють на бичі, тут вони вдаряються об них, і при достатній окружній швидкості відбувається обрушення насіння. Якщо окружна швидкість не достатня, то при ударі об бичі насіння не обрушується, але відкидаються з великою швидкістю на деку, де і відбувається обрушення.

З розгляду роботи бичерушки стає очевидним, що рух насіння всередині неї носить хаотичний характер, що не може не відбитися на якості її роботи.

Сила удару бича по насінню залежить від того, на яке місце бича потрапляє насіння. Найбільша сила удару спостерігається у тих насіннин, які потрапляють на зовнішню кромку бича (діаметр 800 мм), найменша - у насіння, що потрапляє на внутрішню кромку бича (діаметром 640 мм). Тому ясно, що при одній і тій же частоті обертання бичевого барабана одночасно може бути і недорущ, і січка і нормальне обрушення. Крім того, хвиляста поверхня деки також обумовлює нерівномірність удару насіння про ній.

Таким чином, недоліками рушки є можливість повторного обрушення, непорядкований рух насіння в машині, велика протяжність деки, неоднакова сила удару бичів по насінню, наявність хвилястої деки. Велика кількість недоліків, властивих бичерушці, зумовлює і відносно низькі показники її роботи.

Проводилися подальші модернізації з метою підвищення продуктивності бичової насіннерушки. Так в Болгарії були створені агрегати типу АЛС-80 і АЛС-100, які здійснюють дві технологічні операції – обрушення і поділ рушанки [11]. Однак машина являє собою чисто механічне агрегування в один блок бичерушки збільшених розмірів і сепаратора для розділення рушанки.

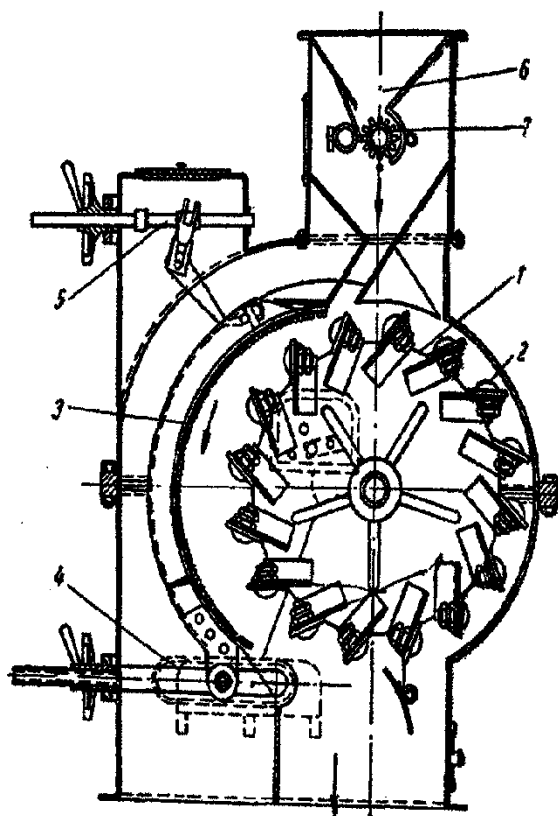


Рисунок 1.2 - Пристрій бичовий насіннерушки МРН.

У нашій країні робилися численні спроби вдосконалення обрушуючих машин багаторазового удару і, зокрема, бичової насіннерушки [12,13].

Серед недоліків, що перешкоджають підвищенню якості рушанки, одержуваної на бичовій насіннерушці, В.А. Масликов [10] зазначає особливості, закладені в самій конструкції, отже, не можна усунути підбором одних лише технологічних режимів. Це наявність хвилястої деки достатньої довжини, що, з одного боку, викликає нерівність умов обрушення насіння на ній і, з іншого боку, створює умови для повторного обрушення. Крім того, неупорядкований рух насіння всередині машини сприяє утворенню ціляка і недоруша.

Всі вище перераховані недоліки, незважаючи на численні спроби поліпшення роботи бичової насіннерушки, не дозволяють докорінно підвищити якість соняшникової рушанки. Таким чином, вдосконалення

процесу обрушення має вестися в напрямку дослідження одноразового удару і застосуванні нової конструкції відцентрових машин, що і пропонується в даній роботі.

Відома конструкція бичевої насіннерушки одноразового удару (рисунок 1.3). Основною особливістю установки є наявність деки, виконаної з пружного матеріалу, що і забезпечує наявність одноразового удару тільки об бичі насіннерушки.

Особливістю конструкції вузла обрушення є застосування бичевого ротора 6, закріпленого на вертикальному валу, який обертається двигуном 2 через пасову передачу. При цьому подача насіння на обрушення проводиться по трубі 1 до направляючої конічної поверхні 3. Далі насіння потрапляють на обертовий (разом з ротором) ковпак 4 і відкидаються до кільцевого живильника 5, який складається з верхнього нерухомого кільця з конічними стінками і нижнього рухомого (принцип діафрагми) рівномірно в радіальному напрямку. Це дозволяє регулювати положення попадання насіння на бичі в радіальному напрямку і тим самим плавно регулювати силу удару. Отримана рушанка падає вниз, відбивається від конуса 7 і кільцевим потоком спрямовується в нижню частину установки на поділ. У нижній частині установки розташована система конічних сит 10,11, 13 з піддоном 16, зібрана в пакет і спирається на три кульові опори 12. Сита здійснюють круговий поступальний рух за допомогою балансира 15 і поділяють рушанку на необхідні за технологією фракції. При всіх позитивних сторонах даної установки головним недоліком є низька продуктивність.

Безумовно відцентровий принцип обрушення дозволяє розраховувати на більш високу продуктивність і реалізує обрушення одноразовим ударом вздовж довгої осі насіння [29], однак якість обрушення соняшнику на сучасних насіннерушках залишає бажати кращого.

Роботи зі створення відцентрових обрушуючих машини ведуться порівняно давно.

Першою відцентровою насіннерушкою була конструкції Беляєва [10]. В ході подальшої експлуатації були виявлені окремі недоліки конструкції і низькі технологічні показники, внаслідок чого дана конструкція не набула поширення.

Згодом, в результаті узагальнення досвіду експлуатації і розвитку теоретичної бази, були створені кілька типових конструкцій, які і знайшли застосування в олійно-жировій промисловості.

Відома відцентрова насіннерушка ВНДІЖ (рисунок 1.4), що складається з ротора 1, укріпленого на валу 2. У середині ротора є кільцевий живильник 3, 19 звідки по каналах ротора при обертанні насіння відкидаються до деки 4. При ударі об деку насіннева оболонка руйнується і рушанка падає в камеру 5 і потім по каналу 6 виводиться з машини. При діаметрі робочого ротора 700 мм і частоті обертання 1500...2500 об/хв, продуктивність відцентрової насіннерушки становить від 150 до 200т на добу соняшникового насіння. Потужність електродвигуна 14 кВт.

З розвитком і поліпшенням конструктивних параметрів і технологічних показників була запропонована конструкція насіннерушки [10] з перепуском повітряних потоків, що описуються нижче (рисунок 1.5). На чавунній анкерній плиті 1 укріплені три стійки 2. До верхнього кінця стійок кріпиться чавунне кільце 3, в яке вставлена сталева гладка дека 4, що має нахил робочої площини 10° . Робочий вал рушанки 5 встановлений в підшипниках 6 і поміщений в трубу 7, що спирається на кришку картера 8 зубчастої передачі 13.

Послідовна модернізація відцентрових обрушуючих машин привела до створення відцентрової насіннерушки А1-МРЦ [29]. Вона складається з живильника 1, ротора 2, що обертається на вертикальному валу 5 і електроприводу 6 (рисунок 1.6). Виведення рушанки з машини здійснюється через два патрубкa, до яких приєднані труби 4 для аспірації. Зазначена модель насіннерушки може мати як рухливу деку 7, встановлену безпосередньо на роторі, так і деку 8, що складається з обичайки, до якої

прикріплено в два ряди по горизонталі 48 пластин. Діаметр ротора становить 700 мм з 16 робочими каналами висотою 32 мм, утворених ребрами.

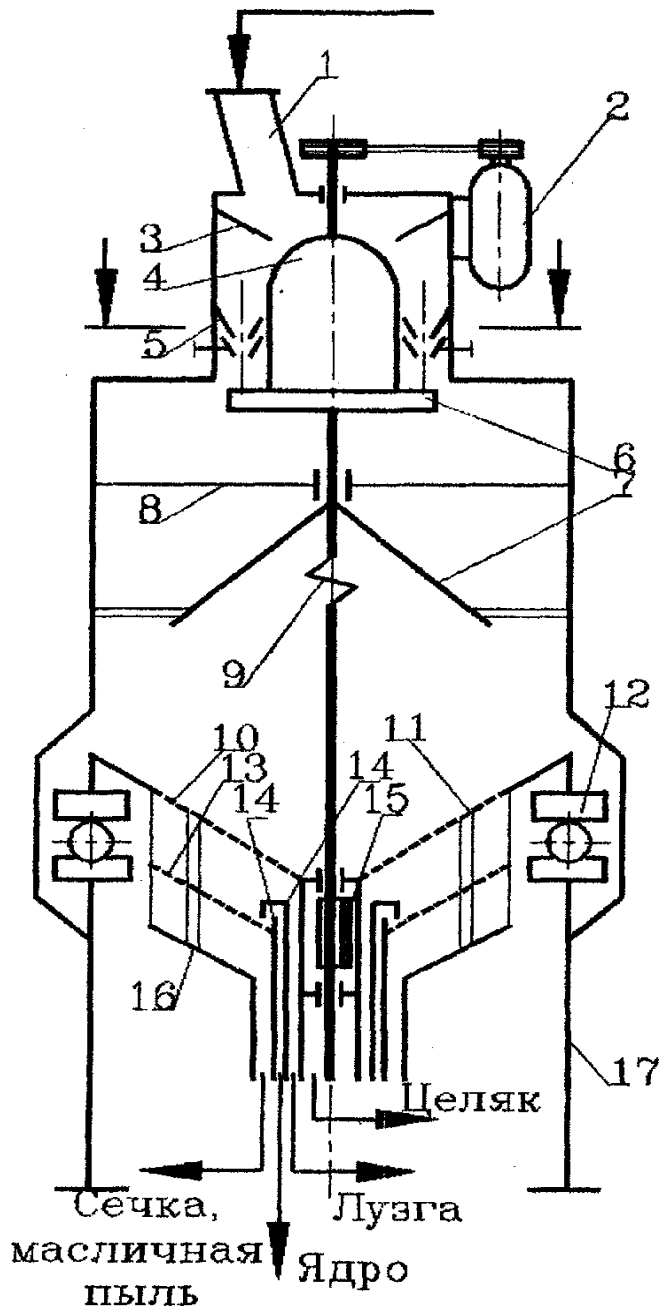


Рисунок 1.3 - Пристрій для обрушування насіння соняшника і розділення рушанки.

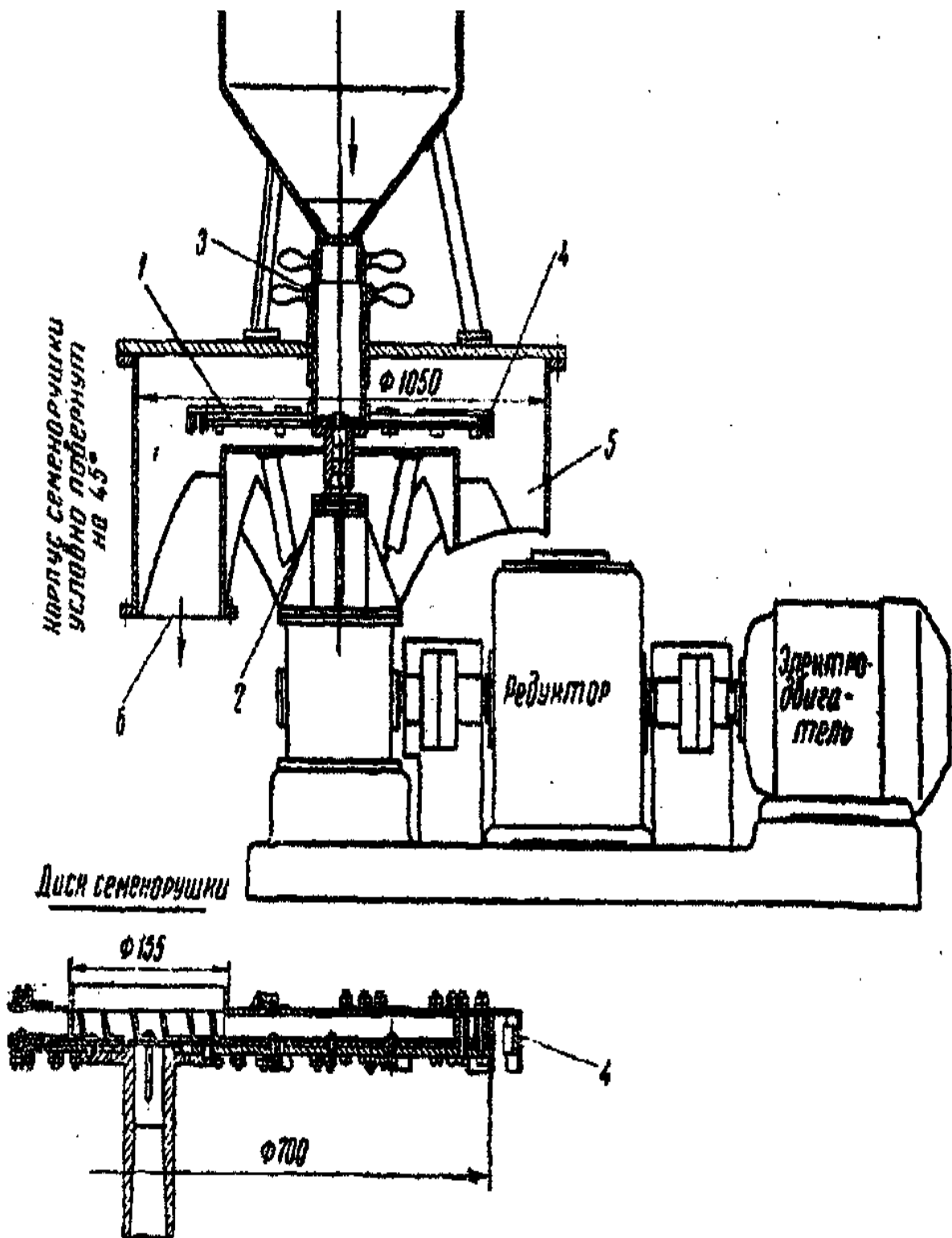


Рисунок 1.4 - Пристрій відцентрової насіннерушки ВНДІЖ.

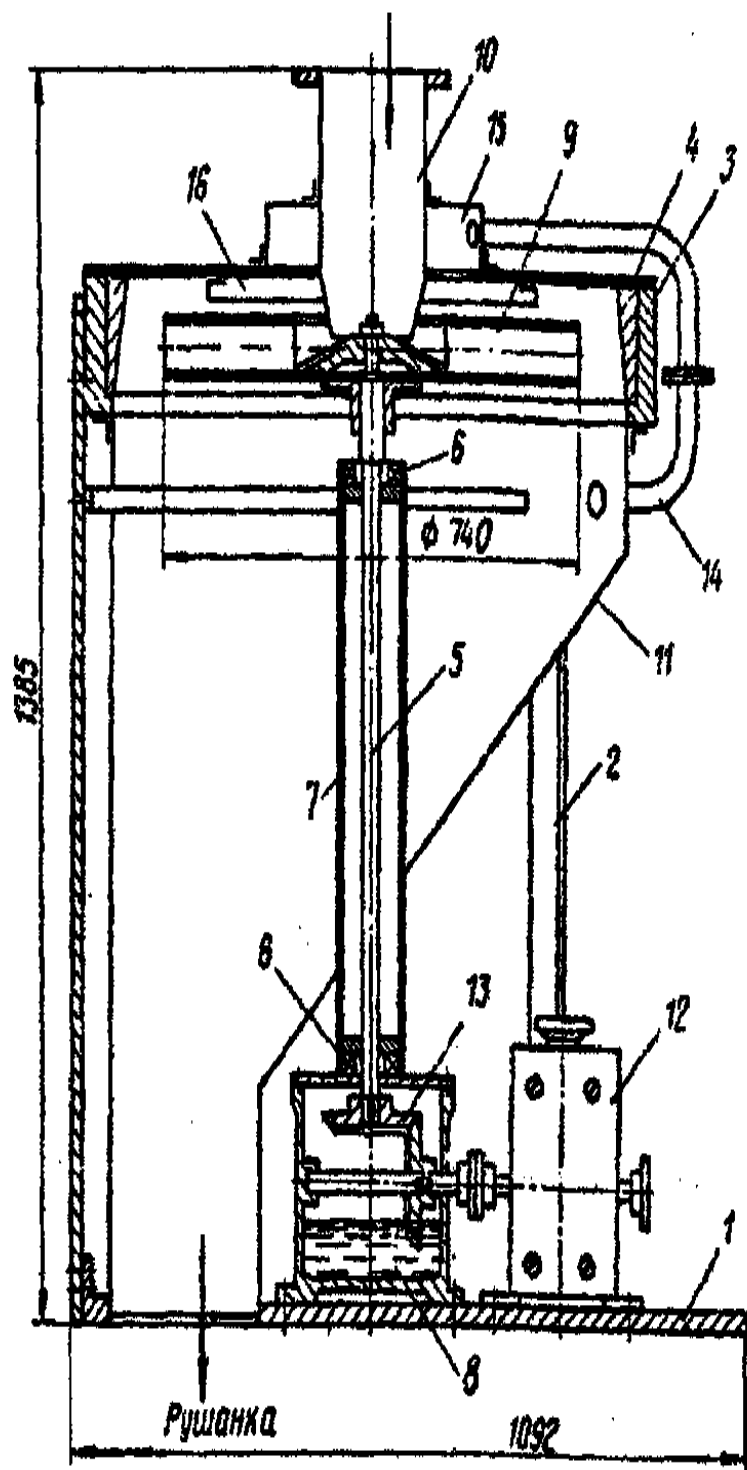


Рисунок 1.5 - Відцентрова насіннерушка с перепуском повітряних потоків.

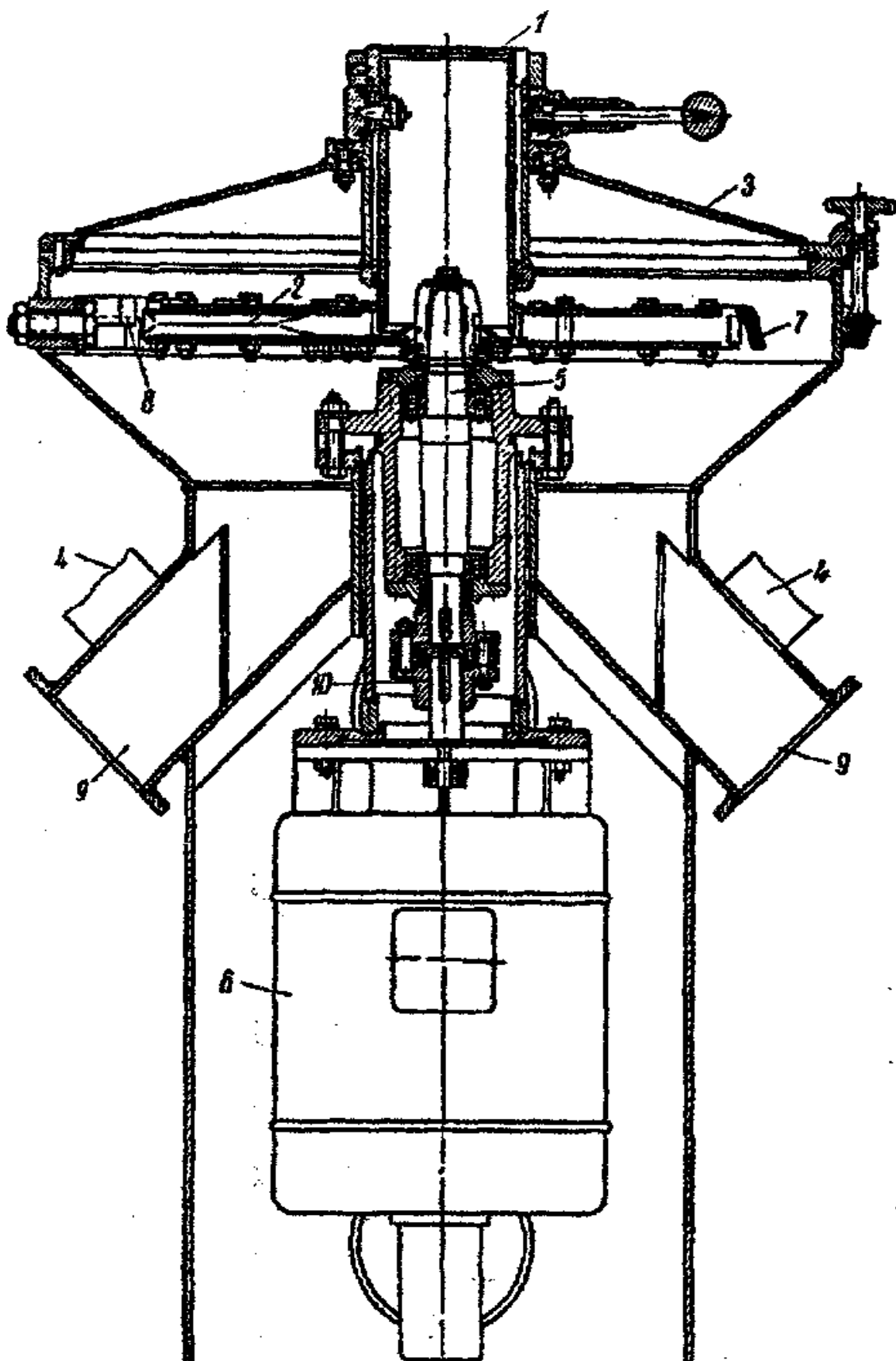


Рисунок 1.6 - Пристрій відцентрової насіннерушки А1-МРЦ.

В результаті проведених досліджень була створена відцентрова насіннерушка РЗ-МОС, в якій реалізована технологія, що забезпечує

спрямований удар, з одночасним відділенням олійного пилу з рушанки (рисунок 1.7). Пристрій складається з чотирьох робочих дисків радіальними напрямними каналами, розташованими в шаховому порядку. Стінки каналів футеровані зносостійкою металокерамікою, а відділення олійного пилу проводиться в циклонах з циліндричними ситами.

Незважаючи на велику кількість робіт [2,10,29], присвячених дослідженню кінематики та динаміки роботи відцентрової насіннерушки, моделювання та пошуку оптимальних конструктивних параметрів приділено недостатньо уваги.

В роботі [17] розглядаються і обґрунтовуються причини, що викликають нерівномірний знос лопаток ротора, зокрема, наявність так званих «лунок тертя» і зони повного зносу. Це пояснюється залежністю коефіцієнта тертя ковзання насіння вздовж лопаток ротора від динамічної швидкості. Якщо в рішенні основного рівняння динаміки відносного руху насіння уздовж лопатки ротора використовувати «статичний» коефіцієнт тертя $f = 0,31$, то величина доданка, що визначає залежність руху від маси насіння, виявиться рівним 1- 2% від впливу інших параметрів.

Однак встановлено значне збільшення коефіцієнта тертя зі зростанням швидкості руху насіння в каналах насіннерушки. У зв'язку з цим сума доданку, що визначає залежність руху насіння від їх маси, може пояснити нерівномірність зносу лопаток ротора. Проведений в роботі якісний аналіз руху насіння в лунках тертя пояснює рельєфно виражені лінії фронтів зносу робочої поверхні каналу. Однак авторами не пропонується конкретних технічних рішень та способів усунення нерівномірності зносу робочої поверхні лопаток.

Традиційною для відцентрових насіннерушок є прямолінійна радіальна конструкція лопатки ротора. Однак останнім часом, стали проводитися дослідження пов'язані з профілюванням лопаток ротора і відмовою від застосування прямолінійних лопаток.

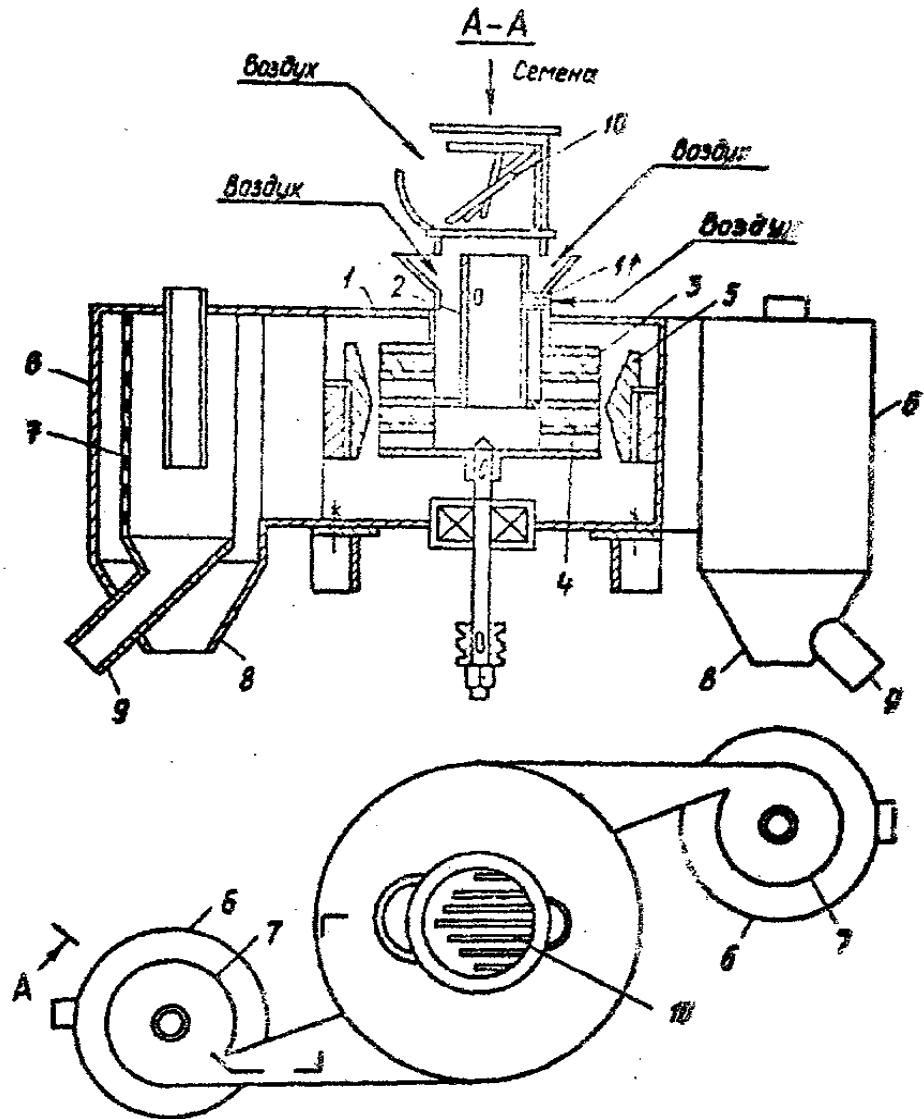


Рисунок 1.7 - Відцентрова насіннерушка РЗ-МОС.

С. Дас і Р. Гупта в роботах [18] приводять аналіз ступеня впливу профілю лопатки при русі частинок (соняшникове насіння) на відцентровому роторі. Наведено діаграми, на яких показані залежності вимірних швидкостей насіння при сходженні з лопаток ротора від форми лопаток при незмінних частотах обертання ротора. Авторами окреслена область діаграми, де, на їхню думку, значення змінних параметрів профілю лопатки найбільш оптимальні. Однак авторами не ставилося завдання цілеспрямованого пошуку рівняння кривої, яке утворюють лопатки, що задовольняє наперед заданим значенням швидкостей насіння на вильоті і частотам обертання ротора.

А.В. Некрасовим досліджено рух частинок по поверхні кривої (Рисунок 1.8). Запропоновано метод і алгоритм математичного моделювання форми розділяє поверхні при сумі сил опору руху. Крива характеризується найменшим часом руху частки по траєкторії від початкової точки А до кінцевої точки В під дією сили тяжіння. Тобто, частка, рухаючись по даній траєкторії, набуває на виході з неї велику швидкість, ніж при русі по похилій прямій при впливі рівних значень сил. У відомому задачу Я. Бернуллі введена існуюча в дійсності сила тертя і додаткові умови на початку кривої (початкова швидкість частинки V_0 і кут нахилу дотичної до кривої α).

Стосовно до вирішення завдання руху насіння соняшнику уздовж лопатки ротора відцентрової насіннерушки, може бути вище викладений відомий досвід розрахунку такої кривої. Відмінність розрахунку і самої форми кривої буде обумовлено дією відцентрових і коріолісових сил в розглянутому нами випадку. Однак, як впливає з передумов, виконання лопаток за формою такої кривої дозволить домогтися більшої швидкості насіння на вильоті з ротора, ніж при русі по радіальній прямій лопатці, при тому ж значенні кутової швидкості ротора.

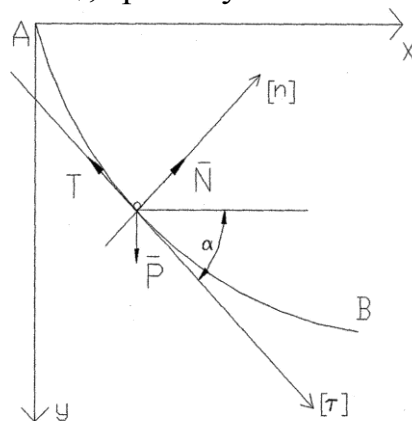


Рисунок 1.8 – Сили, що діють на частку при русі по кривій

1.3 Властивості насіння соняшнику

Насіння соняшнику нових гібридних високоолійних сортів істотно відрізняються за своїми технологічними властивостями [1, 6].

На відміну від старих сортів для нових характерна анізотропія властивостей міцності. Так за даними Л.Д. Попової питома робота руйнування для положення насіння "пластом" становить 156 Дж/кг, при положенні вздовж довжини 76,12 Дж/кг, а при положенні "на ребро" - 266,6 Дж/кг.

Останнім часом виконано дослідження [18,19] опору руйнуванню насіння соняшнику і його ядра, а також ріпаку. При цьому було виміряно при руйнуванні стисканням зусилля, деформація і енергії, поглинута на одиницю об'єму. Зразки при різних вологостях були навантажені в вертикальних і горизонтальних напрямках. Сила, необхідна для руйнування оболонки насіння або ядра, збільшилася, коли вологість збільшилася від 4% до 20%. Середні стискаючі зусилля, необхідні, щоб викликати руйнування ядра, були в основному нижче (13,4-8,5 Н) ніж ті, що були потрібні, щоб зруйнувати насіння (65,2-35,3Н) в обох напрямках. Максимальні деформації насіння при руйнуванні були 1,34 і 1,46 мм при горизонтальному і вертикальному напрямках навантаження. Відповідно, для ядра усі параметри були 1,73 і 2,32 мм. Енергія, поглинена на одиницю об'єму при руйнуванні, збільшилася зі збільшенням вологості. Насіння, навантажені в вертикальному напрямку, потребували більшу кількість енергії (144,7-222,9 кДж/м³) до руйнування, ніж насіння, які навантажили в горизонтальному напрямку (95.2-184.2 кДж /м³). Ядра, навантажені в вертикальному напрямку, вимагали меншу кількість енергії для руйнування (18.1-54.3 кДж/м³), ніж ядра, які навантажили в горизонтальному напрямку (38.9-65.8 кДж/м³).

Пропонуються методи вдосконалення процесу відділення обрушенням плодкових оболонок від ядра, пов'язані з фракціонування насінневої маси перед обрушенням і розділенням на велике і дрібне насіння [6]. Відзначається, що руйнування ядра відбувається при деформаціях в 5 разів менших, ніж руйнування лушпиння, що відбувається при деформаціях

порядку 200-620 мкм, таким чином, завдання обрушення повинно бути спрямоване на максимальне руйнування оболонки при збереженні цілісності ядра при підборі режимів обрушення окремо для кожної фракції насіння. Встановлено наявність діапазону зміни тиску руйнування оболонки (60 – 73 Па) при обрушенні. Однак між міцністю оболонок і лінійними розмірами насіння, як встановлено, відсутня кореляція [6-8], а також існують відмінності міцнісних властивостей оболонок в залежності від сортових ознак. Тому висновок про необхідність фракціонування насіння за розмірами і аеродинамічними властивостями не вичерпує всіх можливостей впливу на насіння в процесі підготовки до обрушення.

У зв'язку з цим, була зроблена спроба якісної оцінки різних способів підготовки насіння до обрушення [9] на основі використання уявлень про характер внутрішнього тепло- і масопереносу в насінні при різних режимах обробки.

Збільшення відносного вмісту в рушанці товарного, відповідного технічним умовам, ядра соняшнику, неможливо без вдосконалення обладнання і застосування процесу вологотеплової підготовки насіння перед обрушенням. Теоретичні передумови процесу кондиціонування насіння соняшнику по вологості і температурі (в різній машинно-апаратній реалізації) дозволяють припустити можливість керування властивостями ядра і лущиння перед обрушенням. У зв'язку з цим, за сучасними уявленнями, операція обрушення повинна складатися з власне руйнування плодової оболонки насіння соняшнику, і підготовки насіння до обрушення.

Кондиціонування зерна по вологості перед наступними технологічними операціями є поширеною і ефективною в різних технологічних схемах переробки зерна [37]. Відзначено ефективність обробки насіння соняшнику електроактивованою водою перед обрушенням.

Процеси зволоження і сушіння зерна з метою вплинути на структурно механічні властивості представляються досить складними.

В роботі [38] характеристики просочення зерна пшениці моделювалися на основі закону дифузії Фіка, приймаючи зерно складовою сферою, що має крохмалисті ядро і зовнішню концентричну оболонку висівок. Моделі дифузії вологи застосовувалися для опису сушіння зерна пшениці, кукурудзи, сої, арахісу, рису-сирцю. Рівняння дифузії в сферичних координатах було вирішено [38], використовуючи метод кінцевих різниць. З даних досліджень, отриманих для шліфованої пшениці (крохмаль) і цілої пшениці (крохмаль і висівки), коефіцієнти дифузії вологи в крохмалі і висівках оцінені, їх значення при температурі середовища відповідно 30°C $1,91533 \times 10^{10}$ і $1,78339 \times 10^{10}$ м²/с. Розроблені моделі для просочення шліфованої і цілої пшениці були здатні передбачати профіль вологості, а також вологості ядра і оболонки в часі.

При сушінні також відбуваються структурні зміни насіння, що має сприяти їх подальшій переробці. В роботі [41] були досліджені зміни розміру і маси окремих насіння і ядер каноли протягом сушіння, використовуючи термогравіметричний аналіз. При низькій вихідній вологості і насіння і ядро в ході сушіння збільшувалось в розмірі. При більш високій вихідній вологості, насіння в ході сушіння збільшували розмір, а потім зменшували. Ядро збільшувалося в розмірах більше, ніж ціле насіння, тобто можливо оболонка обмежує зміну розміру ядра в ході сушіння.

Локальне збільшення або зменшення розмірів насіння протягом сушіння стимулює місцеві напруження, які можуть вести до механічного руйнування. Крім цього скорочення розмірів при сушінні призводить до значного зменшення дифузії вологості в межах насіння [43]. У роботах [44,45] зазначено, що оболонка насіння служить як бар'єр втрати вологи з насіння в ході сушіння. В принципі необхідно включити зміни обсягу і розміру насіння і ядра в рівняння сушіння, щоб поліпшити точність моделювання сушіння. Експериментальні дані щодо розширення і скорочення одиночного насіння важливо в обчисленні напруження, яке виникає через градієнт температури і вологості. Ця інформація особливо

важлива у зв'язку з проблемою обрушення ряду олійного насіння, наприклад ріпаку [30,39,40]. Є відомості [40,46,67] про значну залежність механічних властивостей насіння сої та рису від параметрів сушіння.

Основою опису процесів тепло- і масопереносу при сушінні є фундаментальні роботи [20,21]. Процеси тепло- і масопереносу технологічних операцій виробництва рослинних олій розглянуті в роботах [2,22], в тому числі і для операції кондиціонування олійного насіння [23], і для влаготеплової обробки олійних матеріалів.

Для насіння соняшнику деякі питання залишаються не з'ясованими. Для визначення розподілу вологості і температури за компонентами насіння соняшнику при сушінні, необхідно звернути увагу на питання тепло- і масопереносу в таких складних за структурою і за формою об'єктах. Питання впливу форми на масоперенос при сушінні розглянуті в роботах [48, 49]. Зокрема, на прикладі сушіння частинок у вигляді півсфери показано, що заміна на еквівалентну сферичну частинку веде до суттєвих помилок. У самий останній час з'явилася робота, в якій пропонується застосувати форм-фактор для опису дифузії в тілах складної форми і отримати при цьому точність в межах $\pm 10\%$. Відомі також нові роботи, які містять рішення задачі переносу не тільки в багатовимірних, але і багат шарових (двошарових) тілах. Слід зазначити, що в цих роботах виконані аналітичні рішення для тіл правильної форми, сильно відрізняються від форми насіння.

Для насіння соняшнику при аналізі процесу кондиціонування необхідні дані за коефіцієнтами дифузії вологи в складових частинах насінини [27].

1.4 Висновки з огляду. Мета і завдання дослідження

З вище викладеного видно, що стан техніки і технології підготовки й обрушення насіння соняшнику вимагає нових підходів до вдосконалення даних операцій на основі всебічного дослідження процесів, що відбуваються при обрушенні. Висновки щодо огляду наступні:

– Технологічна операція обрушення насіння соняшнику є однією з важливих у виробництві рослинних олій, від ефективності проведення якої залежить якість рушанки, а, отже, і готової продукції (олії, макухи, шроту), а також продуктивність заводу і навантаження на устаткування.

– Потрібно забезпечити якість обрушення насіння соняшнику не тільки відповідне технологічними регламентами олійних заводів, а й отримати якість ядрового продукту, що відповідає вимогам хлібобулочних і кондитерських виробів з його застосуванням.

– Механічні способи обрушення насіння соняшнику ударом залишаються практично прийнятними в порівнянні з кількома пропозиціями щодо нових способів ведення процесу (вибух з повітрям і парою, аерошелушіння, обробка ультразвуком, електрогідравлічний удар).

– Бичева насіннерушка після неодноразових модернізацій у варіанті багаторазового удару по ряду причин не дозволяє забезпечити однорідні і рівні умови для обробки насіння, що принципово не дозволяє отримати високу якість обрушення, а для очистки рушанки одноразового удару має істотне обмеження по продуктивності.

– Відцентровий принцип обрушення дозволяє розраховувати на більш високу продуктивність і реалізує обрушення одноразовим ударом вздовж довгої осі насіння, проте якість обрушення на сучасному насінні соняшнику залишає бажати кращого.

– Не дивлячись на велику кількість робіт, присвячених дослідженню кінематики та динаміки роботи відцентрової насіннерушки, моделювання та пошуку оптимальних конструктивних параметрів приділено недостатньо уваги.

– Перспективними здаються різні способи підготовки насіння перед обрушенням (фракціонування, вологотеплова обробка).

– Теоретичні передумови процесу кондиціонування насіння соняшнику по вологості і температурі (в різній машинно-апаратурній реалізації)

дозволяють припустити можливість керування властивостями ядра і лушпиння перед обрушенням.

– Математичні моделі процесу сушіння не враховують форму і структуру частинок, а також явище термовологопровідності, які важливі для оцінки супроводжуваних змін властивостей насіння.

Виходячи з цього, можна сформулювати мету і завдання дослідження, яке ми проводимо в даній роботі.

Метою роботи є наукове обґрунтування застосування попередньої підготовки насіння соняшнику до обрушення способом термообробки і оцінка її впливу на ефективність обрушення одноразовим ударом у вдосконаленій конструкції відцентрової насіннерушки.

Відповідно до поставленої мети визначено такі основні завдання дослідження:

– Удосконалити математичну модель відцентрового обрушення і визначити основні фактори, що визначають ефективність процесу;

– Спробувати вирішити задачу пов'язаного тепломасопереносу в насінні соняшнику з урахуванням форми і наявності оболонки;

– Провести математичне моделювання розвитку полів вологості і температури в складових частинах (ядрі і лушпинні) насіння соняшнику і обґрунтувати раціональні режими вологотеплової обробки при підготовці насіння соняшнику до обрушення;

– Удосконалити конструкцію відцентрової насіннерушки;

– Запропонувати агрегат, що складається з термоапарату і відцентрової насіннерушки.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ОБРУШЕННЯ

2.1 Аналіз властивостей соняшникового насіння, як об'єкта обрушення

Дослідженнями [18] встановлено, що значення питомої роботи руйнування насіннєвої оболонки залежить від напрямку навантаження насінини. Причому робота руйнування цілого насіння (руйнування лушпиння) і ядра, як і значення деформацій, розрізняються. Наведено дані для випадку навантаження насіння при різних напрямках (вздовж довгої осі і в положенні насіння «пластом» - бічне навантаження) в розмірностях кДж/м³.

Питома робота руйнування, згідно наведених результатів досліджень [18], визначається регресійними залежностями:

Для насіння при боковому навантаженні:

$$A_{co} = 37,59 + 15,14 \cdot w - 0,38 \cdot w^2, \text{ кДж/м}^3$$

(2.1)

де w - вологість насіння, %.

Для насіння при навантаженні вздовж довгої осі:

$$A_{co} = 92,29 + 12,24 \cdot w - 0,28 \cdot w^2, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.2)$$

Для ядра при бічному навантаженні:

$$A_{яo} = 38,27 - 0,11 \cdot w + 0,07 \cdot w^2, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.3)$$

Для ядра при навантаженні вздовж довгої осі:

$$A_{яo} = 13,21 + 1,02 \cdot w + 0,06 \cdot w^2, \text{ кДж/м}^3 \quad (2.4)$$

Для використання даних [18] при аналізі роботи відцентрової насіннерушки, необхідно перетворити величини питомої роботи на одиницю об'єму до загальноприйнятого у вітчизняній практиці величиною питомої

роботи на одиницю маси, для чого необхідно дані авторів [18] розділити на значення щільності соняшникового насіння ρ , кг /м³, за формулою:

$$A_{\text{см}}(\text{Дж/кг}) = \frac{A_{\text{со}}(\text{кДж/м}^3)}{\rho(\text{кг/м}^3)}, \quad (2.5)$$

Щільність насіння соняшнику ρ , кг/м³, визначається [16] згідно з дослідженнями Г.І. Гарбузової, в залежності від вологості за формулою:

$$\rho = 0,0976 \cdot w^2 + 1,612 \cdot w + 711,3 \quad (2.6)$$

де w - вологість насіння, %.

Функція залежності щільності насіння від вологості, визначена за формулою (2.6) в діапазоні від 1 до 14%, показана на рисунку 2.1.

Таким чином, можна отримати залежність питомої роботи руйнування від вологості. Причому зі зміною вологості буде змінюватися як значення самої питомої роботи руйнування в кДж/м³, так і відношення її до щільності, тобто в перерахунку на Дж/кг. Діапазон змін питомої роботи руйнування на одиницю об'єму для насіння (лушпиння) при одноразовому ударі в залежності від зміни вологості згідно [18] даних наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Залежність питомої роботи руйнування насінневої оболонки для цілого насіння від вологості.

| Рівноважна вологовмістність, % | Питома робота руйнування, кДж /м ³ | |
|--------------------------------|---|--------------------------------|
| | Навантаження насіння боком | Навантаження уздовж довгої осі |
| 4,21 | 95,18 | 144,73 |
| 8,2 | 133,42 | 157,75 |
| 11,84 | 164,24 | 208,81 |
| 16,27 | 180,48 | 217,63 |
| 20,65 | 184,16 | 222,85 |

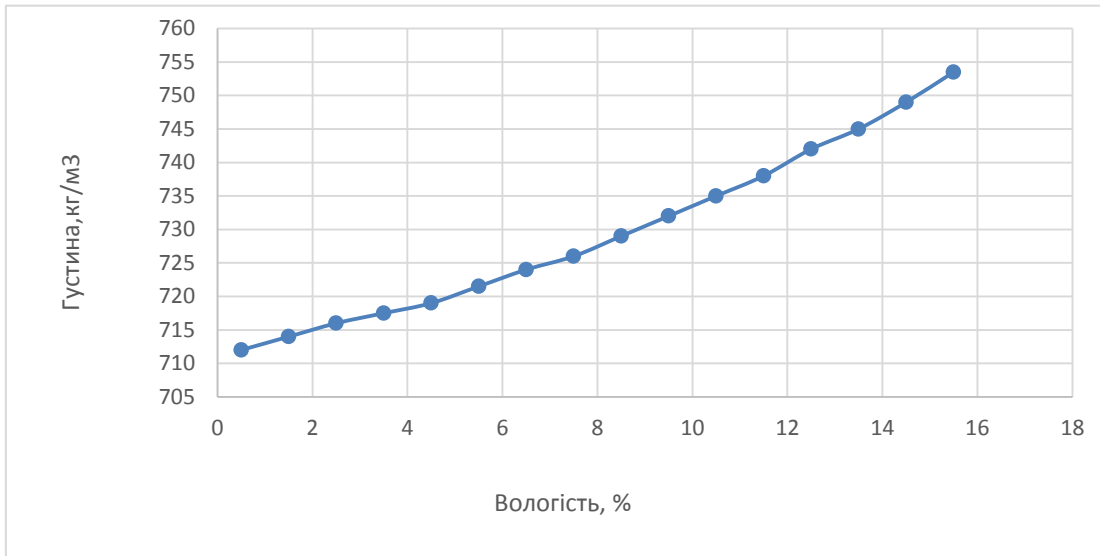


Рисунок 2.1 - Залежність густини насіння соняшника від вологості за Г. І. Гарбузовою

Щільність ядра в $\text{кг}/\text{м}^3$ може бути визначена за формулою [16]:

$$\rho = \rho_T \cdot (1 + u + m), \quad (2.7)$$

де $\rho_T = 418 - 211 \cdot u + 183 \cdot m$, $\text{кг}/\text{м}^3$;

u - вміст вологи, $\text{кг}/\text{кг}$;

m - вміст олії, $\text{кг}/\text{кг}$.

Вміст вологи, $\text{кг} / \text{кг}$, може бути визначено за формулою:

$$u = \frac{W}{100 - W - M} \quad (2.8)$$

де W -вологість, %;

M -олійність, %.

Вміст олії, $\text{кг}/\text{кг}$, може бути визначено за формулою:

$$m = \frac{M}{100 - M - W}. \quad (2.9)$$

Олійність насіння приймається постійною величиною, яка залежить тільки від сорту і лушпинності насіння. Вона може бути визначена зі співвідношення [16]:

$$\frac{M_{\text{я}}}{M_{\text{н}}} = \frac{1}{1 - 0,009 \cdot L}, \quad (2.10)$$

де $M_{\text{я}}$ і $M_{\text{н}}$ – олійність, відповідно, ядра і насіння, %;

L – лушпинність, %.

Олійність насіння за даними для сортової суміші високоолійного соняшнику була прийнята рівною 43,2%, лушпинність 23%. Таким чином, олійність ядра складе:

$$M_{\text{я}} = 43,2 / (1 - 0,009 \cdot 23) = 54,48 \text{ \%}.$$

Отже, при постійній певній олійності, щільність ядра буде лише функцією вологості. Залежність щільності ядра від вологості, визначена за виразами (2.7) - (2.9), наведена на рисунку 2.2.

Необхідність з'ясування характеру, розгляд і аналіз залежності роботи руйнування від вологості насіння і ядра, визначених за формулами у випадку навантаження в різних напрямках (2.1) - (2.4) з урахуванням (2.6). В результаті розрахунків за даними формулами були отримані графічні залежності, наведені на рисунках 2.3 - 2.6, які дозволяють провести порівняння.

При порівнянні залежностей орієнтованого навантаження, можна відзначити, що для випадку одноразового спрямованого удару необхідно враховувати не тільки енергетичні витрати, а й умову неруйнування ядра при обрушенні.

Для отримання математичного вигляду рівняння питомої роботи руйнування на одиницю маси, графіки залежності (відповідно при навантаженні вздовж довгої осі і боковим) були апроксимовані поліномом третього ступеня. При цьому, використовуючи функції програми Excel, був визначений вид алгебраїчної функції, яка описує даний поліном.

Для визначення питомої роботи руйнування при навантаженні насіння уздовж довгої осі отримано рівняння:

$$A_c = 0,0003 \cdot w^3 - 0,4575 \cdot w^2 + 17,994 \cdot w + 112,17, \quad (2.11)$$

де w – вологість, %.

Для визначення питомої роботи руйнування при бічному навантаженні насіння отримано рівняння:

$$A_c = 0,0005 \cdot w^3 - 0,6004 \cdot w^2 + 22,490 \cdot w + 30,908. \quad (2.12)$$

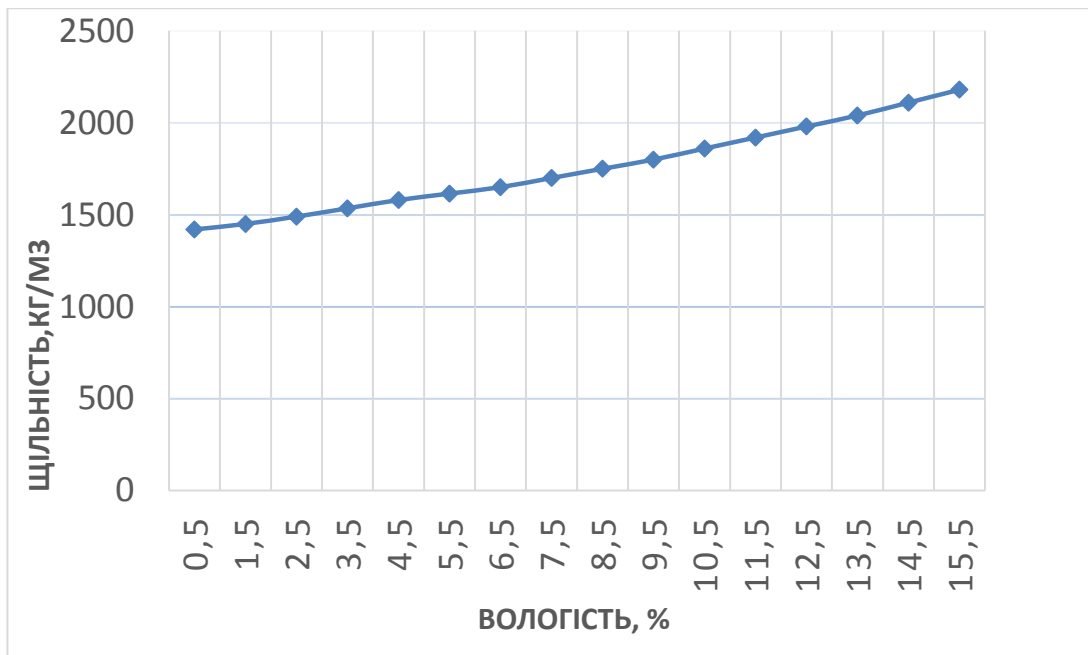


Рисунок 2.2 – Залежність щільності соняшникового ядра від вологості.

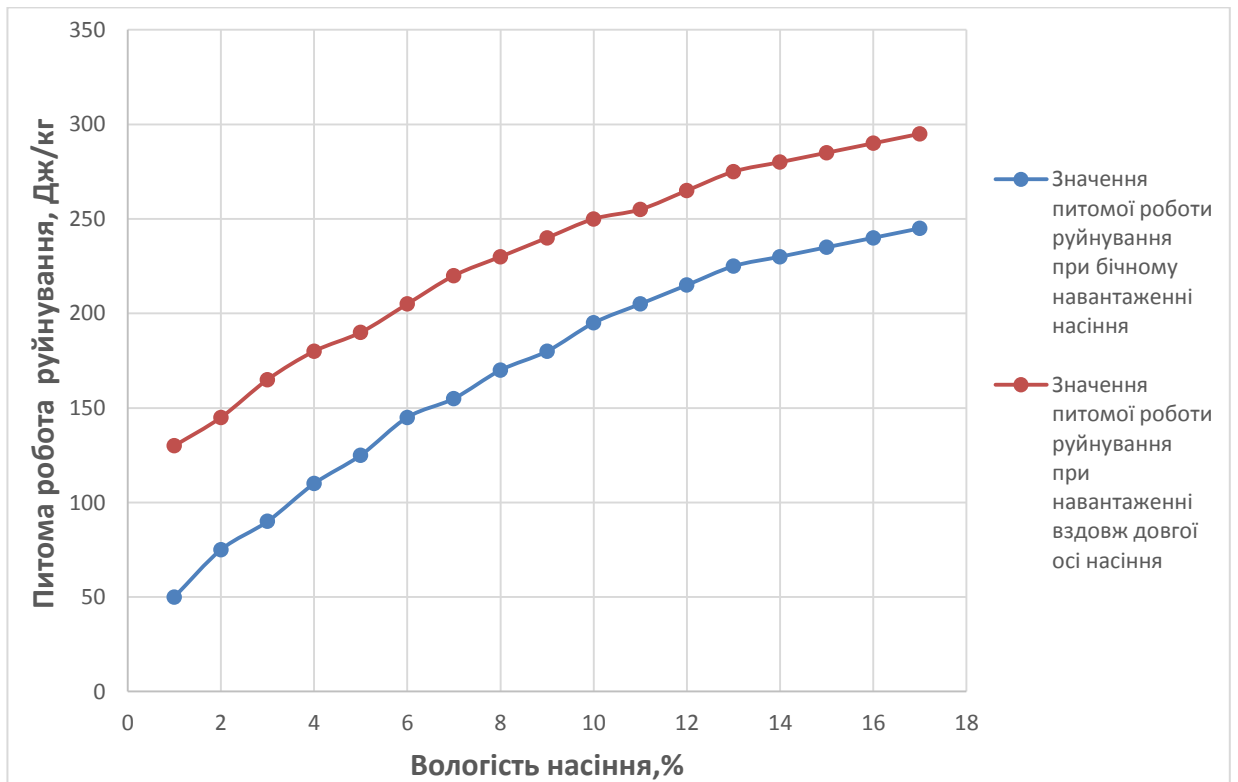


Рисунок 2.3 – Залежність питомої роботи руйнування соняшникового насіння від вологості.

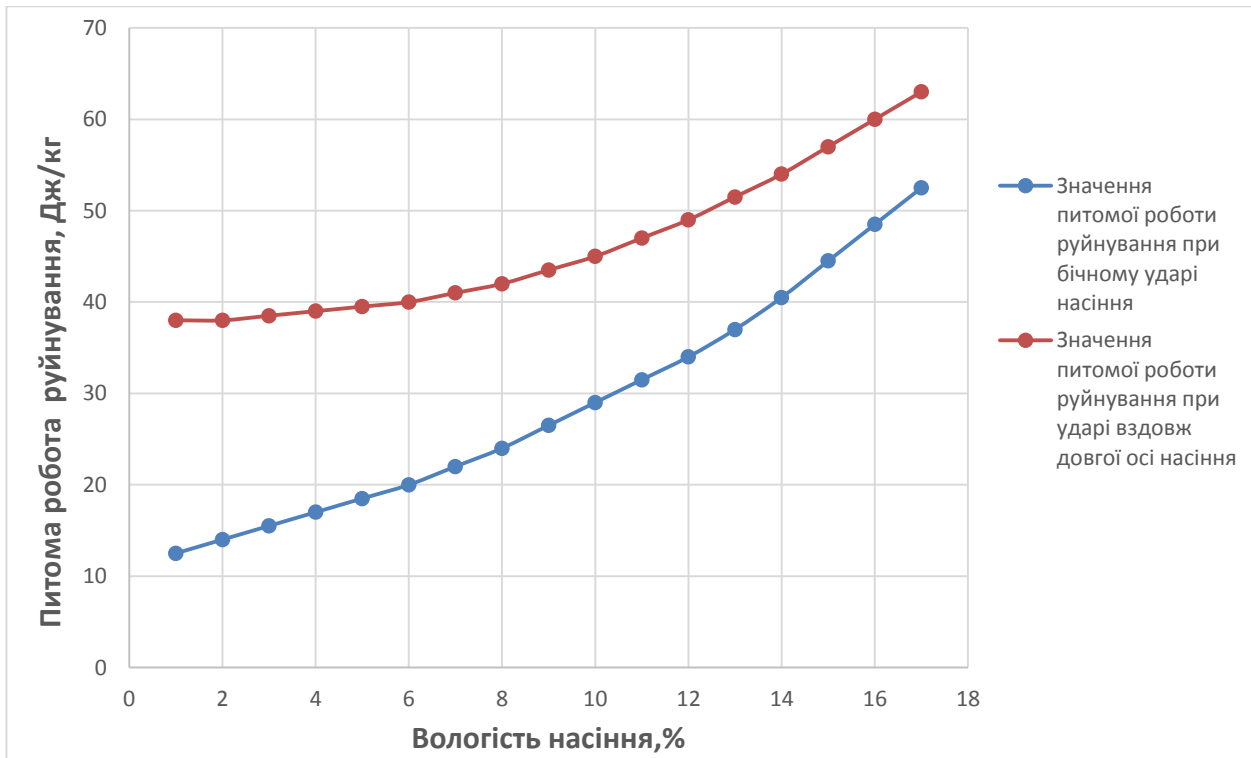


Рисунок 2.4 – Залежність питомої роботи руйнування ядра соняшникового насіння від вологи.

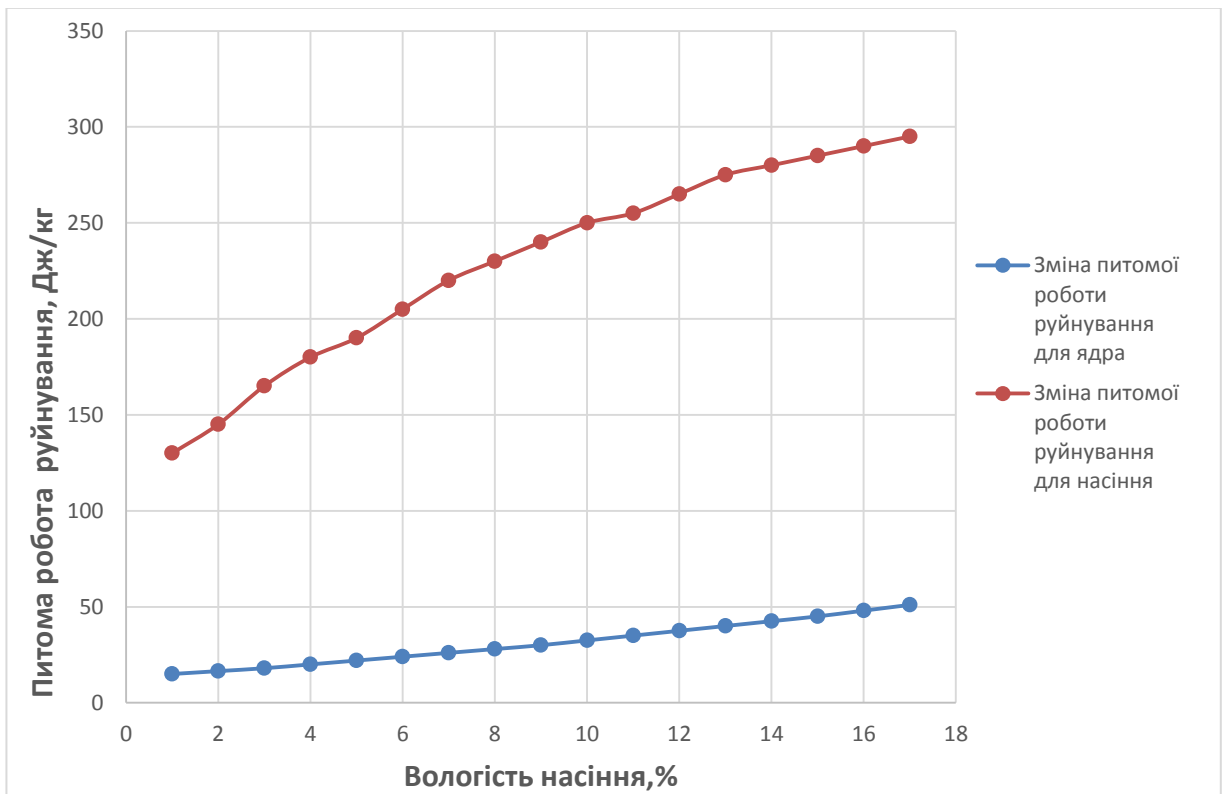


Рисунок 2.5 – Залежність питомої роботи руйнування від вологості при навантаженні насіння і ядра вздовж довгої осі.

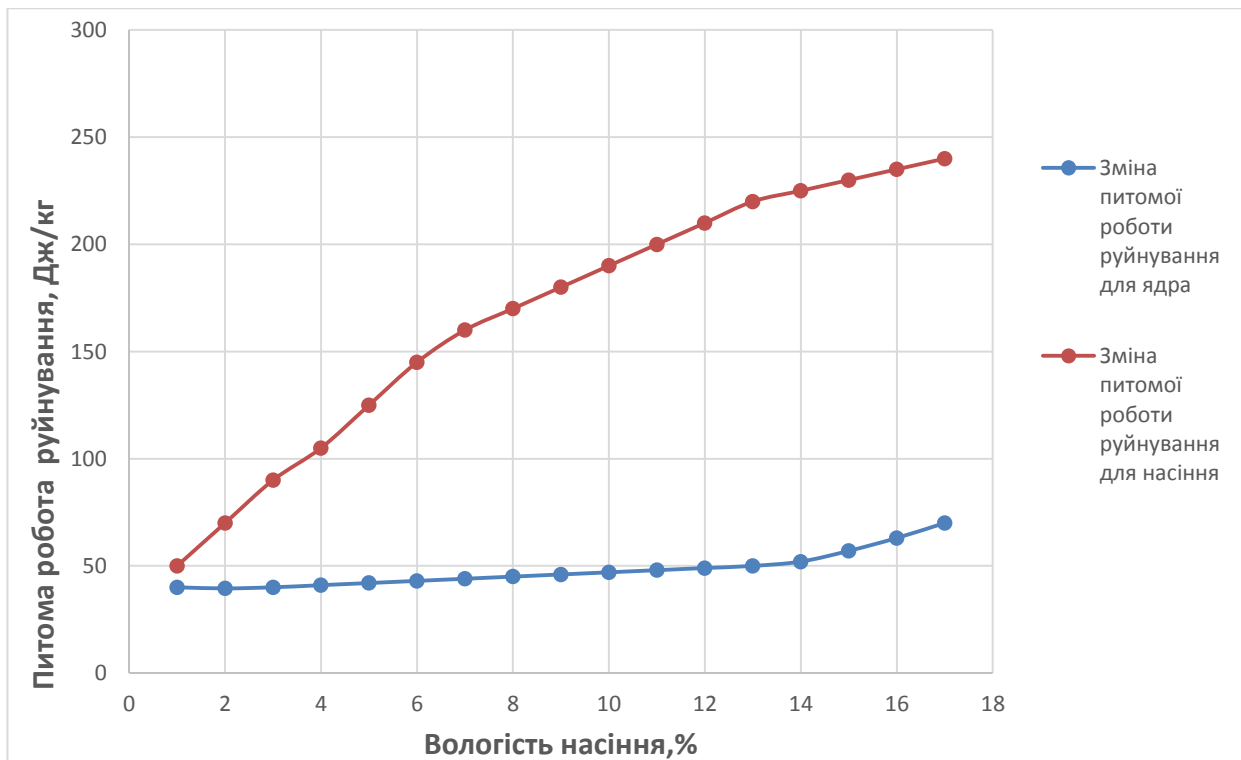


Рисунок 2.6 – Залежність питомої роботи руйнування від вологості при бічному навантаженні насіння і ядра.

З аналізу графіків видно, що питома робота руйнування насіння вздовж довгої осі енергетично менш вигідна, ніж при руйнуванні насіння при бічному навантаженні, однак при цьому спостерігається найбільша розбіжність робіт руйнування лушпиння і ядра. З графіка, наведеного на малюнку 2.5 можна визначити значення вологості, при якому спостерігається найбільша розбіжність між питомими роботами ядра і лушпиння. Таким чином, при визначенні оптимальної вологості компонентів насіння соняшнику (ядра і лушпиння), яку слід отримати при термообробці, необхідно враховувати встановлені залежності.

2.2 Аналіз впливу деяких конструктивних параметрів відцентрової насіннерушки на ефективність обрушення

Негативний вплив на рух і орієнтацію насіння в відцентровій насіннерушці надає потік повітря, що проникає разом з насінням в канали

ротора [29]. Однак, аналіз показав, що повітряні потоки на роторі практично не гальмують і не прискорюють рух насіння і при розрахунку руху можна враховувати лише сили (відцентрові, Кориоліса, тертя), що визначають цей рух [11]. Таким чином, найбільш негативний вплив на рух насіння паразитні повітряні потоки надають уже за ротором насіннерушки, при сходженні насіння з останнього. Внаслідок цього можна вести моделювання роботи відцентрової насіннерушки без урахування аеродинамічного тиску повітря на лопатки ротора, а профіль лопатки слід оптимізувати з тим, щоб знизити необхідну частоту обертання ротора і за рахунок цього послабити вплив повітряних потоків в кільцевому просторі між ротором і декою.

Тому технічні рішення по боротьбі з впливом повітря повинні бути спрямовані на виключення прориву основної маси повітряних потоків в кільцевий простір між ротором і декою. В якості таких рішень пропонується додаткова камера над ротором, що володіє ежекторним ефектом, і затвор на вході насіння на ротор, який створюється за рахунок підтримуваного шару насіння у вхідному патрубку.

Як ефективну міру щодо зниження впливу повітряних потоків, як зазначено вище, можна розглядати зниження швидкості обертання ротора. Як було відзначено в першому розділі, існують теоретичні передумови створення профілю кривої, що забезпечує при сходженні з неї велику швидкість при інших рівних умовах.

Нормальна швидкість зустрічі насіння з декою, м/с, при якій відбувається руйнування, визначається через питому роботу руйнування [16]:

$$C_H = \sqrt{2 \cdot A_c}. \quad (2.13)$$

Абсолютна швидкість насіння, м/с, може бути визначена з виразу:

$$C = \frac{C_H}{\cos \gamma \cdot \cos \alpha}, \quad (2.14)$$

де $\cos \gamma$ - косинус кута зустрічі насіння з декою;

$\cos \alpha$ - косинус кута нахилу деки у вертикальній площині.

З іншого боку, абсолютна швидкість, м/с, може бути виражена через векторну суму переносний і відносній швидкостей:

$$C = \sqrt{v^2 + u^2 + 2 \cdot v \cdot u \cdot \cos \varphi}, \quad (2.15)$$

де $\cos \varphi$ - косинус кута між абсолютною і переносною швидкістю;

v - відносна швидкість, м/с;

u - переносна швидкість, м/с.

$$v = (0,478 \cdot \omega \cdot r_1 + 0,358 \cdot v_1) \cdot e^{0,735 \cdot \omega \cdot r}; \quad (2.16)$$

$$u = \omega \cdot r_2, \quad (2.17)$$

де ω – кутова швидкість ротора, рад/с;

r_1 – радіус початку лопатки ротора, м;

r_2 – радіус кінця лопатки, м.

Таким чином, початкова мета оптимізації параметрів відцентрової насіннерушки – визначити мінімально необхідну для обрушення насіння швидкість обертання ротора. Для цього необхідне рішення трансцендентного рівняння [16], яке пов'язує параметри: вологість насіння, геометрію ротора і деки, кутову швидкість обертання ротора.

$$\Phi(\omega) = \sqrt{v^2 + u^2 + 2 \cdot v \cdot u \cdot \cos \varphi} - \frac{\sqrt{2A_c}}{\cos \alpha \sqrt{1 - \left(\frac{r^2}{r_3}\right)^2 \cos^2 \varphi}} = 0, \quad (2.18)$$

де v - відносна швидкість насіння при сходженні з ротора, м/с;

u - переносна швидкість насіння, м/с.

В результаті вирішення даного рівняння можна отримати залежність частоти обертання ротора від вологості обрушеного насіння, з урахуванням ступеня впливу взаємопов'язаних конструктивних параметрів (радіуса початку і кінця лопатки ротора, радіусу деки) і обумовлених цим значення кутів γ і φ . Виходячи з викладеного в п. 2.1, приймаємо напрямок руйнування уздовж довгої осі.

Для моделювання впливу технологічних і режимних параметрів, необхідно задатися базовими конструктивними параметрами. Тому було

прийнято, що радіус початку лопатки ротора становить 0,05 м (r_1), кінця лопатки 0,25 м (r_2). Для отримання залежності кутової швидкості ротора від вологості насіння, вирази (2.16) і (2.17) були підставлені в (2.15), після чого отримане співвідношення було прирівняне до правої частини рівняння (2.14). отримане співвідношення після перетворень було виражено через величину кутової швидкості. У результаті обробки отриманого рівняння, була побудована графічна залежність, що відображає зміну кутової швидкості ротора в залежності від вологості насіння (рисунок 2.7).

Для аналізу ступеня впливу конструктивних чинників необхідно зафіксувати значення питомої роботи руйнування, відповідно певної вологості насіння. Питома робота руйнування насіння вздовж довгої осі для вологості 8% згідно п.2.1 становить 237,296 Дж / кг.

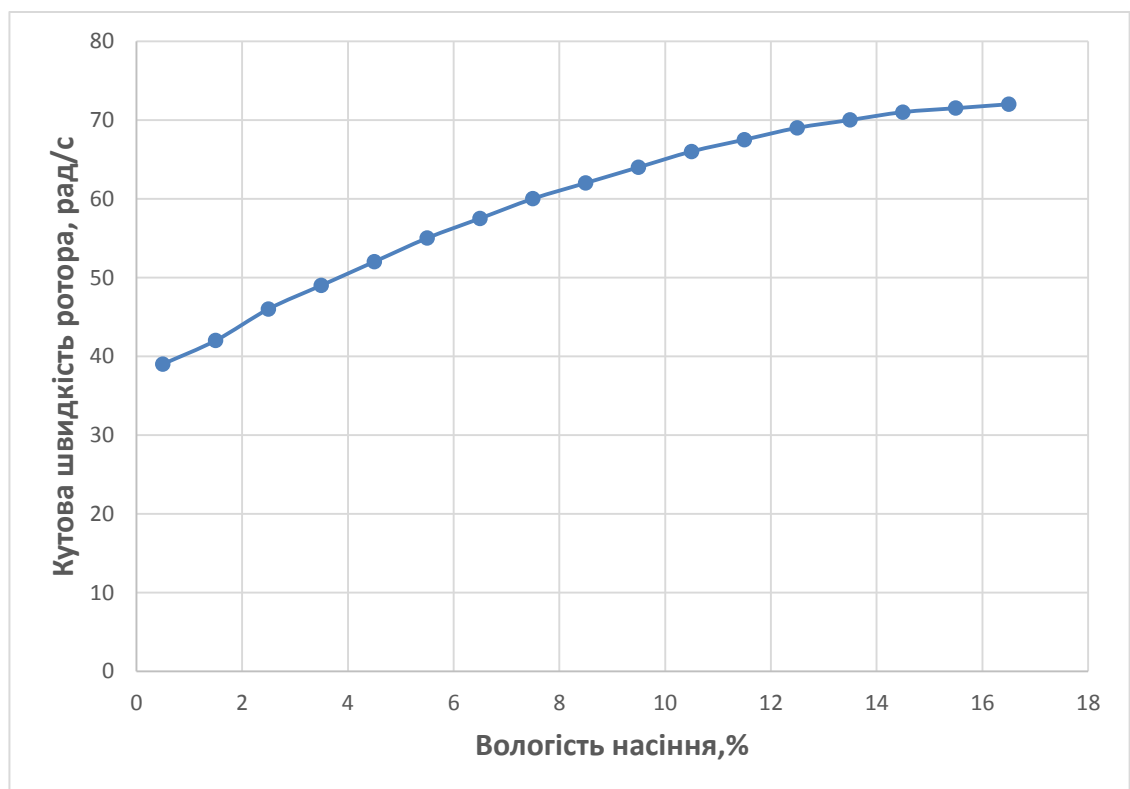


Рисунок 2.7 – Залежність кутової швидкості ротора насіннерушки від вологості поступаючого на обрушування насіння $r_1=0,05\text{м}$, і $r_2=0,25\text{м}$.

В результаті були отримані графічні залежності, що визначають зміну величини, необхідної для досягнення необхідної абсолютної швидкості насіння, частоти обертання ротора з ростом радіусів початку і кінця лопатки ротора (рис. 2.8 і 2.9), а також радіуса деки (рис. 2.10). З аналізу наведених графічних залежностей очевидно, що радіус початку лопатки не відіграє значної ролі в залежності від вологості, а зростання радіуса ротора небажане з міркувань обмеження зростання матеріалоємкості та підвищення технологічності виготовлення. Таким чином, для зменшення кутової швидкості ротора при заданому значенні абсолютної швидкості насіння необхідно розглядати питання профілювання лопаток.

При побудові даних залежностей було прийнято, що в горизонтальній площині насіння зустрічається з декою по нормалі, т. ін. Кут $\gamma = 0$, а його косинус дорівнює одиниці. Однак необхідна оцінка впливу зміни кута зустрічі на кутову швидкість обертання ротора насіннерушки.

Як впливає з теоретичних передумов, найбільш ефективна робота насіннерушки буде спостерігатися при нормальному ударі насіння об поверхню деки уздовж довгої осі. Абсолютна швидкість насіння при виході з ротора є векторною сумою нормальної і тангенціальної швидкостей. Як відомо [16], при заданій вологості насіння визначається питома робота руйнування насінневої оболонки. За значенням цієї роботи визначається швидкість удару насіння, при якій вони будуть критичними. Однак за рахунок впливу тангенціальної швидкості удар відбувається в напрямку, що відхиляється від нормалі до деки на кут зустрічі γ . Проаналізуємо формулу [10, с. 119]:

$$n = C_H \cdot \frac{30 \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \cdot \pi \cdot r^2} \quad (2.19)$$

Дане рівняння дає постійну величину відношення кутів зустрічі насіння з декою, що залежить від конструкції насіннерушки (її конструктивного розміру).

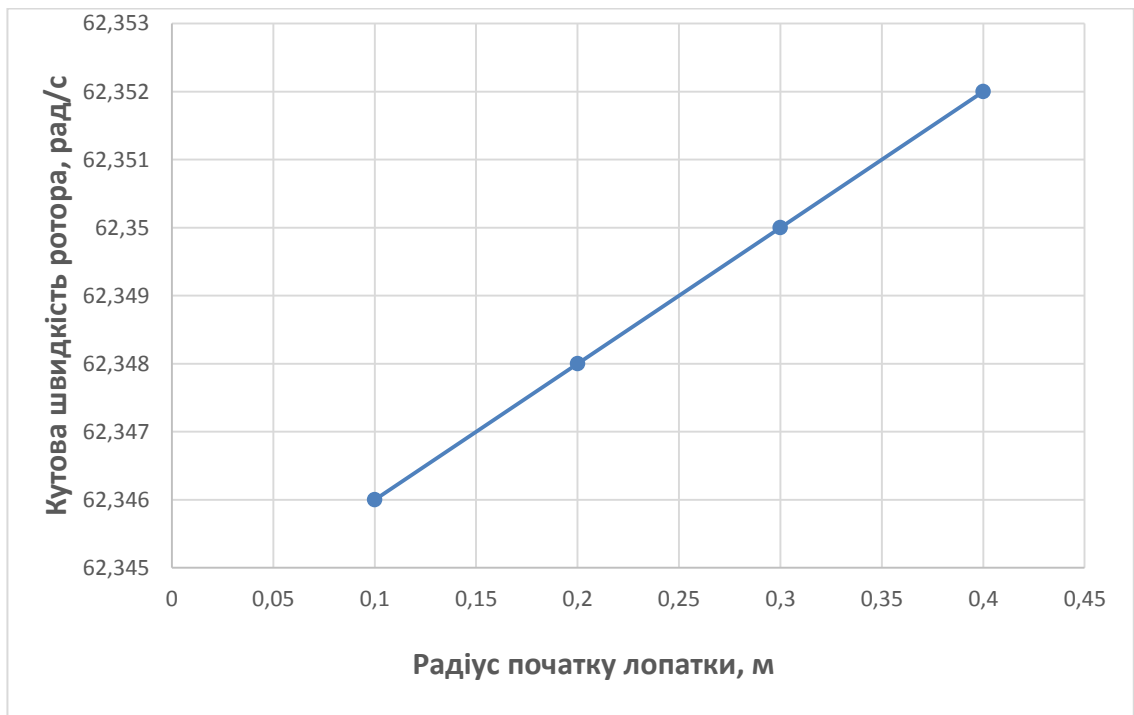


Рисунок 2.8 – Залежність кутової швидкості ротора від величини радіуса початку лопатки ротора.

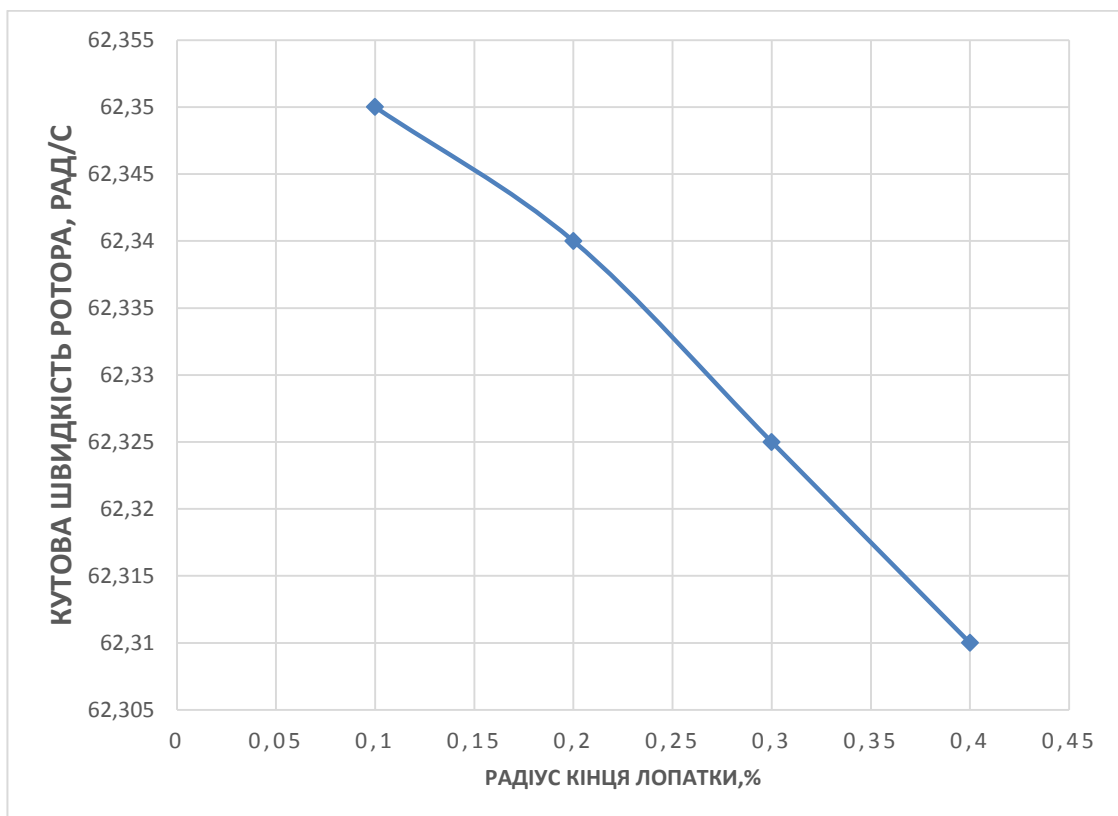


Рисунок 2.9 – Залежність кутової швидкості ротора від величини кінця лопатки ротора (радиус ротора).

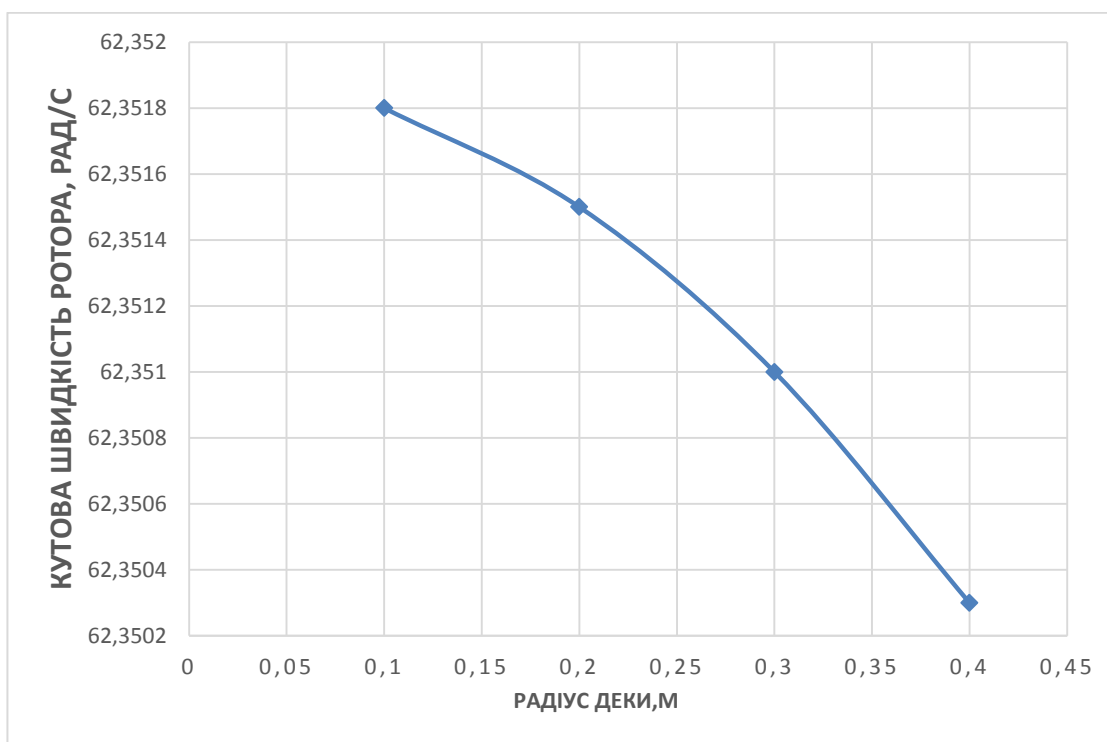


Рисунок 2.10 – Залежність кутової швидкості від величини радіуса деки.

Отже, при відомих конструктивних параметрах ротора (і відповідних їм кутах) потрібно спроектувати деку по відношенню до якої вектор абсолютної швидкості був би спрямований по нормалі.

Очевидно, що кутова швидкість ротора знижується з ростом $\cos\gamma$ і при $\gamma=0$, $\cos\gamma=1$, тобто набуває максимальну величину. Тобто кути α і φ приймаються постійними, то збільшення значення косинуса до одиниці призведе до зменшення значення другого множника рівняння. Це свідчить про підвищення ККД деки і зниженні необхідної для обрухення швидкості ротора. Позитивне значення цього явища було зазначено вище.

Абсолютна швидкість C_{π} коливається в межах від деякого мінімуму до максимуму відповідно з межами зміни вологості надходження насіння і,

відповідно, швидкості обертання ротора. Внаслідок цього буде змінюватися значення кута φ . Тому, по Масликову [10], слід приймати середню розрахункову швидкість, рівну половині суми максимальної та мінімальної швидкостей. Цією середньою розрахунковою швидкістю буде відповідати певна частота обертання ротора. Такий підхід не дозволяє точно підібрати частоту обертання ротора для обрушення партії насіння з певною вологістю, з необхідною саме для даного стану насіння швидкістю. Наявність рухомої регульованої деки, що складається з окремих елементів, дозволяє встановлювати напрямок зустрічі насіння з декою по нормалі, незалежно від зміни значення кута φ . Частота обертання ротора встановлюється тільки з умови досягнення необхідного значення питомої роботи руйнування насінневої оболонки.

Також була зроблена спроба якісно і кількісно оцінити вплив регульованої в вертикальній площині деки на режими роботи насіннерушки (частоту обертання ротора). Дані, наведені на рисунку 2.11 були використані для регулювання відцентрової насіннерушки дослідної установки.

2.3 Постановка і рішення задачі переміщення насіння на роторі відцентрової насіннерушки з криволінійними лопатками

Як було відзначено, рух повітряних потоків, викликаний обертанням ротора, в каналах відцентрової насіннерушки має незначний вплив на рух насіння уздовж лопатки ротора. Таким чином, рух насіння можна розглядати, як рух матеріальної точки, що не відчуває прискорену або уповільнену дії з боку повітряного потоку, яка переміщується вздовж лопатки за рахунок наданих їй відцентрових і коріолісових сил.

Задамо рух насіння (матеріальної точки) по лопатці в полярній системі координат рівнянням:

$$\varphi(t) = f(r(t)) - \omega t, \quad (2.20)$$

де t – момент часу, с;

φ – кут кривизни профілю лопатки, рад.;

r – радіус знаходження частинки на роторі, м.

Як видно з рівняння (2.20), час перебування насіннини на роторі, залежить від швидкості обертання ротора і величини зміни кута φ по радіусу ротора. І якщо між швидкістю і часом простежується зворотна пропорційність (чим більше швидкість, тим менше час перебування), то зміна кута по ходу просування насіння від центру до периферії ротора визначається формою кривої, що задає профіль лопатки (видом функції, яка визначає дану криву). Зі зміною кривизни напрямної лопатки по ходу руху насіння від центра ротора буде змінюватися кут нахилу дотичний α (рисунок 2.12).

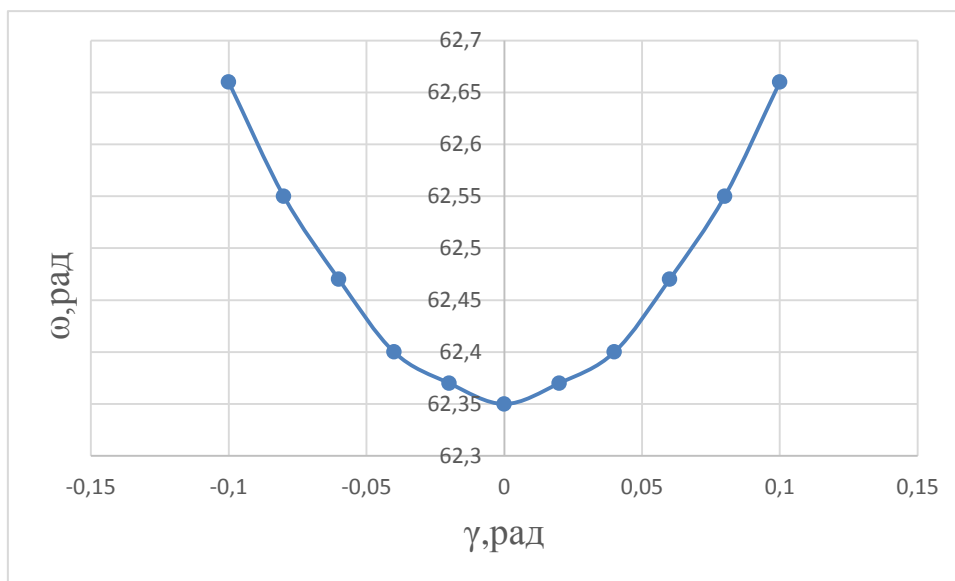


Рисунок 2.11 – Залежність кутової швидкості ротора від кута зустріччі насіння з декою.

Залежність кутової швидкості ротора від кута зустріччі насіння з декою.

Для знаходження кута α перейдемо в декартову систему координат X , Y :

$$\begin{aligned}
 x &= r \cos f(r), \\
 y &= r \sin f(r).
 \end{aligned}$$

(2.21)

Візьмемо похідні:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx}{dr} &= \cos f(r) - r f'(r) \sin f(r) \\
 \frac{dy}{dr} &= \sin f(r) + r f'(r) \cos f(r)
 \end{aligned}$$

(2.22)

Визначимо кут α звівши систему рівнянь (2.22) до рівняння:

$$\cos \alpha \sqrt{1 + r^2 f'(r)^2} = \frac{dx}{dr} \cos f(r) + \frac{dy}{dr} \sin f(r) = 1$$

(2.23)

З використанням виразу тригонометричних перетворень маємо:

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \sqrt{1 + r^2 f'(r)^2} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

звідси можна виразити:

$$\operatorname{tg} \alpha = r f'(r).$$

(2.24)

Форма кривої профілю лопатки може бути приблизно описана рівнянням параболи:

$$f(r) = ar^2 + br + c.$$

(2.25)

Таким чином, завдання зводиться до знаходження коефіцієнтів a , b , c для умови найбільшої абсолютної швидкості частинки при сходженні з ротора при заданих параметрах останнього.

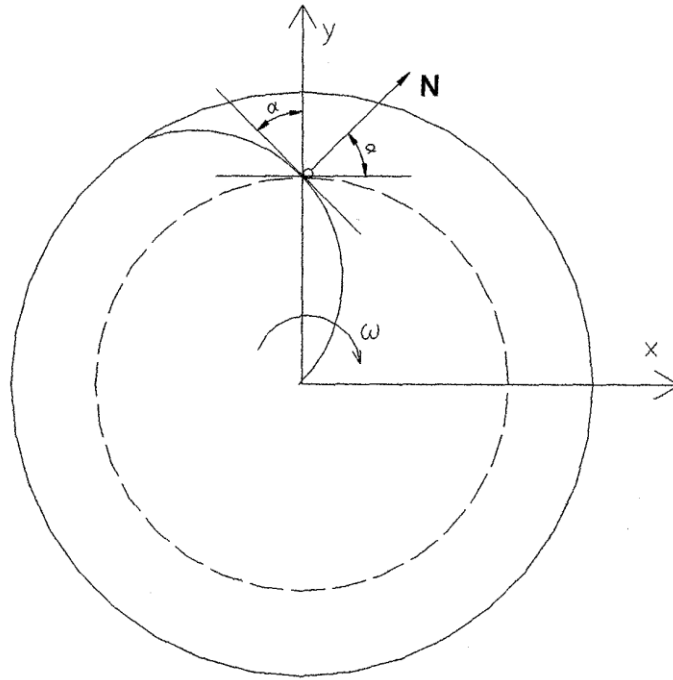


Рисунок 2.12 – Схема профіля лопатки ротора.

Вирази для прискорень в полярній системі координат мають вигляд:

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\varphi}^2; \quad (2.26)$$

$$a_\varphi = r\ddot{\varphi} + 2\dot{r}\dot{\varphi},$$

де a_r – лінійне прискорення в момент часу t , $\text{м}/\text{с}^2$;

a_φ – кутове прискорення момент часу t , с^{-2} .

Запишемо рівняння руху в полярній системі координат:

$$r - r(rf'(r) - \omega)^2 = N \sin \alpha \quad (2.27)$$

$$r(r f''(r) + f'(r)r) + 2r(rf'(r) - \omega) = -N \cos \alpha$$

Після перетворень і виключення N дана система рівнянь була зведена до інтегрального рівняння виду:

$$\frac{V}{2} + \int_0^1 V \left[-r \frac{(-a^2 + a^4 \cdot r^2 + 8a^3 \cdot r^3 \cdot b + 28a^2 \cdot r^4 \cdot b^2 - 10a \cdot b \cdot r + 40a \cdot b^3 \cdot r^5 - 12b^2 \cdot r^2 + 16b^4 \cdot r^6)}{(1 + r^2 \cdot a^2 + 4r^3 \cdot a \cdot b + 4 \cdot r^4 \cdot b^2)^2} \right] dr =$$

$$= \frac{\omega^2 \cdot r}{(1+r^2 \cdot a^2 + 4r^3 \cdot a \cdot b + 4 \cdot r^4 \cdot b^2)^2} dr \quad (2.28)$$

Для оцінки ефективності застосування лопатки криволінійного профілю необхідно зіставити отримані значення кутових швидкостей обертання ротора для криволінійної лопатки зі значенням кутової швидкості для прямолінійного лопатки при інших рівних параметрах конструкції. Прямолінійна лопатка являє собою окремий випадок криволінійної, для отримання якого необхідно покласти в рівнянні (2.25) $a = 0$. Графік залежності кутової швидкості ротора від вологості для прямолінійної і криволінійної лопаток, наведено на рисунку 2.13.

2.4 Моделювання та оптимізація конструктивних параметрів і робочих режимів відцентрової насіннерушки

Для знаходження найбільш вигідних параметрів відцентрової насіннерушки була зроблена спроба оптимізації основних конструктивних параметрів. Рішення являє собою певну групу взаємно впливаючих значень. При цьому значення, які може приймати кожен з параметрів, обмежувалися, виходячи з умови конструктивної доцільності і технологічних можливостей виготовлення насіннерушки. Так кутова швидкість обертання ротора була обмежена в діапазоні від 10 до 100 рад / с, радіус ротора від 0 до 1 м. Значення коефіцієнтів a і b в рівнянні, що описує криву, задану профіль лопатки, обмежувалися, відповідно, в діапазоні від 0 до 3 і від -3 до 3.

Оптимізація параметрів насіннерушки проводилася двома способами.

При оптимізації параметрів першим способом, при заздалегідь запланованій необхідній абсолютній швидкості насіння при сходженні з ротора, значення параметрів визначалися як пошук оптимального їх співвідношення із спочатку заданих значеннях. Необхідна швидкість була визначена для вологості насіння 8% і склала 22,69 м/с за методикою [16] з урахуванням значення питомої роботи руйнування по п. 2.1. Її значення було підставлено в рівняння (2.28), з якого знаходився мінімум кутової швидкості,

підбором параметрів кривої профілю лопатки (a і b) і ротора (радіус ротора $г$).

Спочатку були задані довільні значення оптимізації параметрів, що лежать в діапазоні прийнятих обмежень. В результаті пошуку рішення методом крутого спуску були отримана група параметрів, що відповідає першому наближенню до мінімального значення шуканої кутової швидкості ротора ω .

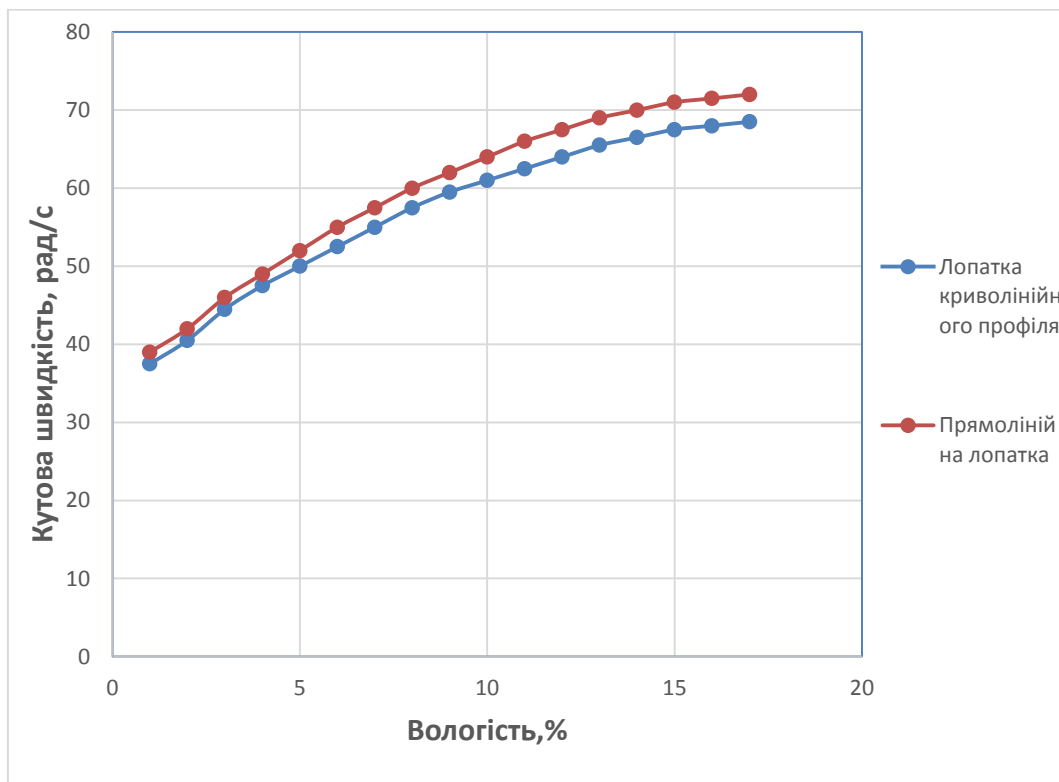


Рисунок 2.13 – Залежність кутової швидкості від вологості насіння при різних профілях лопатки ротора.

Для підтвердження оптимальності знайденого рішення, кожному з параметрів, що задаються було присвоєно початкове значення, відповідне позначення в результаті пошуку оптимуму в попередньому кроці. Потім знову проводився розрахунок шуканих параметрів і отримане рішення присвоювалося як початково заданий параметр. Обрані параметри були взяті за оптимальні коли значення заданих і одержаних в результаті рішення

рівняння параметрів, стали рівні. Остаточоно отримані наступні параметри $r=0,20$ м, $a=1,2$, $b=-2,5$, $\omega = 53,5c^{-1}$.

При моделюванні і оптимізації параметрів другим способом знаходився екстремум (максимум) функції, описуваної інтегральним рівнянням (2.28), після підстановки необхідної швидкості насіння:

$$\frac{2.69}{2} + \int_0^1 22.69 \left[-r \frac{(-a^2+a^4 \cdot r^2+8a^3 \cdot r^3 \cdot b+28a^2 \cdot r^4 \cdot b^2-10a \cdot b \cdot r+40a \cdot b^3 \cdot r^5-12b^2 \cdot r^2+16b^4 \cdot r^6)}{(1+r^2 \cdot a^2+4r^3 \cdot a \cdot b+4 \cdot r^4 \cdot b^2)^2} \right] dr =$$

$$= \int_0^1 \frac{\omega^2 \cdot r}{(1+r^2 \cdot a^2+4r^3 \cdot a \cdot b+4 \cdot r^4 \cdot b^2)^2} dr$$

(2.29)

Для цього перші похідні кутової швидкості по кожній з визначених величин були прирівнені нулю (умова екстремуму), а другі похідні приймають тільки позитивні значення (умова мінімуму).

$$\frac{d\omega}{dr}(r, a, b) = 0; \quad \frac{d\omega}{da}(r, a, b) = 0; \quad \frac{d\omega}{db}(r, a, b) = 0. \quad (2.30)$$

$$\frac{d\omega}{dr}(r, a, b) \geq 0; \quad \frac{d\omega}{da}(r, a, b) \geq 0; \quad \frac{d\omega}{db}(r, a, b) \geq 0.$$

(2.31)

Для пошуку рішення в заданому діапазоні, в системі Mathcad! була використана функція Minner, яка є вектором значень для r , a , b і ω , що представляють собою рішення рівняння в обчислювальному блоці, що відкривається словом Given, з мінімальною похибкою. Отримані результати розрахунків відповідають значенням: $r = 0,21$ м, $a = 1,23$, $b = -2,23$, $\omega = 53c^{-1}$.

Таким чином, отримані дані схожі за значенням і їх слід застосовувати для проектування насіннерушки. За запропонованою методикою можна проектувати конструкції з наперед заданими параметрами ротора, а для цих параметрів отримати шукані значення кривизни лопаток і частоти обертання для заданої абсолютної швидкості насіння на вильоті з ротора, в залежності від вологості.

Після отримання значення коефіцієнтів рівняння кривої профілю лопатки (2.25) була побудована, раніше наведена на малюнку 2.13, залежність

кутової швидкості ротора від вологості для криволінійної лопатки і проведено порівняння з показниками лопатки прямолінійного профілю. Для цього в рівнянні (2.25) коефіцієнт a був прирівнений нулю, тобто вираз виражався в рівнянні прямої лінії.

Висновки. Проаналізовано властивості соняшника. Визначено оптимальну вологість компонентів насіння соняшнику (ядра і лушпиння) 8-9%, яку слід отримати при термообробці. Необхідна швидкість обертання ротора була визначена для вологості насіння 8% і склала 22,69 м/с з урахуванням значення питомої роботи руйнування насіння соняшнику. Відцентрова насіннерушка з лопатками криволінійного профілю при обрушенні насіння соняшнику дозволить отримати рушанку з великим вмістом цілого ядра.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ВОЛОГОТЕПЛОВОЇ ПІДГОТОВКИ НАСІННЯ СОНЯШНИКА ДО ОБРУШЕННЯ

3.1 Об'єкт дослідження

3.1.1 Аналіз фізико-механічних властивостей сировини. Соняшник відноситься до рослин, які пізно дозрівають, до групи олійних культур з тривалішим, ніж в зернових колосових культур, вегетаційним періодом.

Хімічний склад зерна такий: 25...55% олії, 13...19% білка, 22...27% безазотистих екстрактивних речовин, 13...32% клітковини, 1,8...5% мінеральних речовин [1, 69].

Завдяки добрим смаковим якостям соняшникова олія широко використовується безпосередньо в їжу і для приготування хлібобулочних, кондитерських та багатьох інших виробів. Соняшникова макуха, отримувана при переробці зерна на олію, містить понад 36% білка, 20...22% вуглеводів, до 6% олії, вона використовується для виробництва кормових добавок. Досвід показує, що з економічної точки зору є недоцільним продаж сільськогосподарськими підприємствами урожаїв зерна соняшника споживачам одразу від комбайна, оскільки їм не зараховують значну частину фізичної маси урожаю із-за його підвищеної вологості. Одночасно з фізико-механічними показниками зерна соняшника необхідно враховувати й такі його характеристики, як вологість, олійність і наявність домішок, оскільки в їх загальній масі може міститися до 8% обрешених зернин.

Зерно соняшника характеризується значним діапазоном змін геометричних розмірів й інших показників. Узагальнені величини відхилень деяких характеристик за сортами, у гібридному насінні соняшника (таблиця 3.1).

Неоднорідність зерна соняшника за фізико-механічними ознаками пояснюється не лише його сортовою відмінністю, але й різною якістю.

Таблиця 3.1– Фізико-механічні властивості зерна соняшника

| Маса 1000 шт., г | Довжина, мм | Діаметр, мм | Шпаруватість, % |
|------------------|-------------|-------------|-----------------|
| 60...70 | 8...25 | 3...7 | 69...80 |

Коливання розмірних характеристик зерна соняшника спричиняють відмінності величини їх питомої поверхні випаровування, яка значно менша, ніж в зерен колосових культур. Крім того, має місце неоднорідність маси зерна за вологостю, швидкістю сушіння окремих зерен може бути різною, а весь процес відбувається нерівномірно.

Згідно з літературними даними та результатами наших досліджень об'ємна маса зерна соняшника складає 275...440 кг/м³, скважинність насипу 69...80%, кут природнього відкосу зростає від 20...24° в сухого і до 30...42° у вологого зерна.

Збирання зерна соняшника припадає на третю декаду серпня і вересень-жовтень, тобто збігається з періодом підвищеної вологості та зниженої температури зовнішнього повітря. До 50% всього зерна соняшника, що заготовляються олієекстракційними підприємствами та хлібоприймальними пунктами має вологість до 20 % і вище.

Вологість зерна цієї культури залежить від його стиглості. Так, за даними М. К. Фірсова [70] зерна соняшника в період наливання має вологість 20...25%, в період дозрівання – 15...19%. Підвищена вологість зберігається навіть до моменту повного дозрівання та збирання (таблиця 3.2).

Стійке збереження зерна соняшника у зв'язку із запобіганням інтенсивного дихання і обумовленого ним самозігріванням і пліснявіння забезпечується при вологості менше 8%. При терміні зберігання до одного місяця ця величина має бути не вища 7...8%, а при тривалому зберіганні – не вище 7% при засміченості не більше 2%. Зерно соняшника умовно групують за рівнем вологості на чотири стани: сухе, середньої сухості, вологе та сире (таблиця 3.3).

Таблиця 3.2 – Вологість зерна соняшника

| Зона вирощування соняшника | Установа – інформатор | Вологість в різні періоди, % | | |
|----------------------------|---|------------------------------|---------------------------|------------------|
| | | раніше збирання | період повного дозрівання | пізніше збирання |
| Вінницька область | Вінницька обласна дослідна станція | 20...25 | 15...18 | 22...24 |
| Дніпропетровська область | Дослідне господарство «Дослідне» ВНІІ зерна соняшника | 25...30 | 10...15 | 16...22 |
| Закарпатська область | Закарпатська обласна дослідна станція | 20...25 | 12...15 | 18...22 |
| Хмельницька область | Навчально-дослідне господарство | 20...25 | 15...18 | 22...24 |

Таблиця 3.3 – Групування зерна соняшника за вологістю

| Характеристика стану зерна | Значення вологості, % |
|----------------------------|-----------------------|
| Сухе | 7 |
| Середньої вологості | 7...8 |

| | |
|--------|----------|
| Вологе | 8...9 |
| Сире | 9 і вище |

Згідно з даними таблиць 3.2 і 2.3 зерно соняшника, яке вирощується у всіх регіонах України і на всіх стадіях збирання, слід характеризувати як сирий матеріал. На високе значення вологості зерна соняшника під час збирання, що досягає 20...25% вказують і багато інших дослідників.

3.1.2 Вивчення форми зернин

Результати замірів показали, що плодова оболонка зернин соняшнику має складну поверхню з перемінним радіусом кривизни. Маса і геометричні розміри зернин, отримані в результаті вимірів насіння типів № 1, № 2, № 3 і наведені на рис.3.1, дані в табл.3.4.

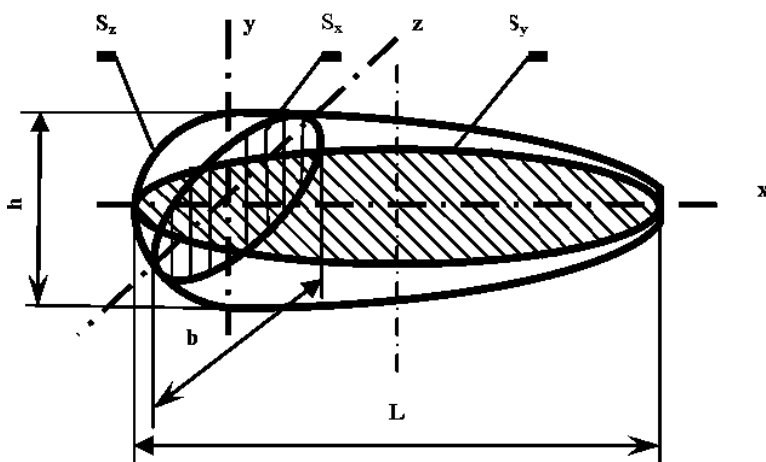


Рисунок 3.1 – Геометрична форма зернини: розміри L, b, h і площа перетину S_x , S_y , S_z в площинах x, y, z

Таблиця 3.4 – Геометричні розміри насіння соняшника

| Параметри | Розмірність | Типорозмір насінин | | |
|-----------|-------------|--------------------|-------|-------|
| | | № 1 | № 2 | № 3 |
| L | мм | 10-11 | 13-14 | 15-17 |
| B | мм | 6 | 8 | 9 |
| H | мм | 5 | 5 | 6 |

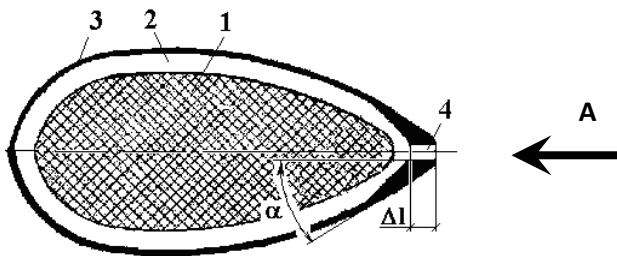


Рисунок 3. **Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.**—Схема зерна сояшника:

1 - ядро; 2 – повітряний канал порожнини; 3 - плодова оболонка; 4 - повітряний канал

Δh - висота каналу; Δb - ширина каналу; Δl - довжина каналу; α - півкут конуса входу у внутрішній канал

| | | | | |
|-----------------------------|---|------|------|-----|
| Маса насінин вологістю 14 % | г | 0.18 | 0.24 | 0.2 |
|-----------------------------|---|------|------|-----|

При вимірах геометричних параметрів у носовій частині плодової оболонки був виявлений повітряний канал. Схема зернини з повітряним каналом представлена на рис. 3.2. Канал має прямокутний по довжині поперечний переріз з конусоподібним входом. Усередині каналу розташований зародок. По поперечному перерізі зародок прямокутної форми. Між зародком і стінкою прямокутного каналу є зазор.

Розміри зерна визначалися за допомогою окулярного гвинтового мікрометра МОВ-1-15. Товщина оболонки зерна склала $h = 0,15 - 0,20$ мм, радіус кривизни сферичної частини складає $r = 10$ мм. Геометричну поверхню

насінної оболонки фізичної моделі можна прийняти у вигляді півсфери з приєднаним до нього конусом.

Результати замірів розмірів повітряного каналу представлені в табл.3.5.

Таблиця 3.5 – Розміри повітряних каналів насінин соняшника

| Параметр | Розмірність | Тип насінин | | |
|------------|-------------|-------------|---------|---------|
| | | № 1 | № 2 | № 3 |
| Δh | мм | 0.096 | 0.136 | 0.13 |
| Δb | мм | 0.18 | 0.24 | 0.35 |
| Δl | мм | 0.5 | 0.8-1.2 | 0.5-0.3 |
| α | град | 25 | 30 | 14 |
| Δl | мм | 1.5 | 1.7-1.3 | 1.3-1.7 |

Отримані результати дозволили висунути робочу гіпотезу. При сушінні зерна соняшнику волога одночасно випаровується з оболонки і ядра (сім'ядолей). Випаровування вологи з ядра відбувається в повітроносну порожнину зернини. Водяна пара з повітроносної порожнини зерна через канал в плодовій оболонці виходить і омиває сім'янку агент сушіння. Вивільнення відбувається за рахунок різниці парціальних тисків у прикордонному шарі ядра і агента сушіння.

Резюмуючи приведений вище аналіз даних різних досліджень, приведемо основні характеристики зерна соняшника, як об'єкта сушіння (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 – Основні характеристики зерна соняшника

| Показник | Значення | Коментар |
|------------------------------------|-----------|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Розміри зернини, мм: | | |
| – довжина | 7...25 | Впливають на вибір конструкції конвеєрної стрічки |
| – ширина | 4...10 | |
| Олійність, % | 25...55 | Обмежує температуру агента сушіння |
| Клітковина, % | 13...32 | – |
| Мінеральні речовини, % | 1,8...5,0 | – |
| Білок, % | 13...19 | – |
| Безазотисті екстрактивні речовини, | 22...27 | – |

| | | |
|--|------------------------------|---|
| % | | |
| Кислотне число, мг/кг їдкого калія – вищий клас – 1 клас – 2 клас | 1,3 2,2 4,0 | При збільшенні показника зменшується тривалість зберігання до сушіння |
| Маса 1000 насінин, г | 53...70 | Впливають на продуктивність сушарки і об'єм сушильної камери |
| Насипна щільність, кг/м ³ | 275...400 | Дані про залежність від вологості відсутні |
| Швидкість витання, м/с | 4,0...14,0 | Обмежує швидкість агента сушіння |
| Шпаруватість, % | 60...80 | Впливає на час пронизування матеріалу агентом сушіння |
| Кут природнього відкосу, град | 20...42 | – |
| Вологість, % – збиральна – для переробки – для тривалого зберігання | 10...45 8 7 | Впливає на витрати теплоти, продуктивність і собівартість сушіння тощо. |
| – рівноважна (залежно від відносної вологості повітря) | 9,7.. 18,9 | Обмежує використання не підігрітого повітря для сушіння |
| Здатність вологовіддачі | Низька порівняно з зерновими | Впливає на швидкість сушіння, затрати тепла та інші показники сушіння |

3.2 Постановка і рішення задачі тепломасообміну в насінні соняшнику

3.2.1 Аналіз метричних коефіцієнтів одновимірного рівняння тепломасопереносу в насінні соняшнику з урахуванням реальної геометрії

Процеси перенесення тепла і маси, як відомо [20], відбуваються ортогонально ізоконцентричними поверхнями. З огляду на цю обставину і, знаючи геометрію такої поверхні, можна, як показано [60], значно полегшити висновок відповідного рівняння переносу.

Для дослідження тепломасопереносу всередині насіння була розглянута реальна геометрія насіння без подання її у вигляді еталонного тіла (кулі). Для цього вирішувалася модельна задача теплопереносу в однорідній за об'ємом тривимірній фігурі, що копіює усереднену по геометрії насіннину. Для знаходження усередненої геометрії насіння були використані дослідні дані ВНДІЖ [24,50]. Згідно з наведеними даними середньоарифметичні розміри соняшникового насіння: довжина $l_{\text{cp}} = 11,06$ мм, ширина $a_{\text{cp}} = 5,30$ мм, товщина $b_{\text{cp}} = 3,36$ мм. Дослідженнями Г.І. Гарбузової [49] встановлено, що середній об'єм одного насіння не є величиною постійною, а змінюється в залежності від вологості насіння. Згідно з наведеними даними, величина середнього об'єму насіння становить $V = 0,096$ см³, при діапазоні зміни вологості від 6,07% до 19,07% (значення об'єму насіння в крайніх точках діапазону відповідно 0,091 см³ і 0,103 см³). Таким чином, з урахуванням досліджуваного діапазону вологостей від 8% і нижче, внаслідок малого значення відношення діапазону зміни об'єму до об'єму насіннини, можна прийняти допущення про сталість об'єму насіння.

Для визначення положення ізопотенціальних поверхонь всередині насіння була поставлена модельна теплова задача.

При цьому розріз по головних осях фігури усередненої насіннини був покритий двомірною регулярною сіткою, у вузлах якої проводилося чисельне рішення завдання теплопереносу.

Для цього рівняння теплопереносу було замінено кінцевими різницями, що дозволяють замінити диференціальне рівняння на його алгебраїчний аналог. Записавши ці рівняння для кожного вузла отримали систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яку вирішували чисельно методом. У вузлах сітки знаходилося значення оператора Лапласа, яке представляє значення другої похідної попереднього кроку стану. В цьому випадку значення температури на новому кроці за часом обчислюється за чотирьох точковою схемою в кінцевих різницях. Загальна кількість вузлів становила 200x200. В результаті було отримано температурне поле, яке і лягло в основу геометрії

ізопотенціальної поверхні, зображених на рисунку 3.3. ці ізопотенціальні поверхні прив'язувалися до безрозмірної координати, нормованої від нуля до одиниці, де одиниця відповідає поверхні насіннини, а нуль центру мас. Таким чином, в об'ємі насіннини були розміщені кілька еквідистантних поверхонь, утворених кривими з відповідно малою та великою осями, які представлені на рисунку 3.4.

Ці криві були апроксимовані статичними поліномами шостого ступеня для малої осі і четвертого для великої осі. одночасно в автоматичному режимі з використанням функції Excel «додати лінію тренда» (у вікні «діаграма» при виділеному полі графіка кривої, що утворює насіннина) з'являлось рівняння, що описує дану криву. Для цього при відкритому вікні «лінія тренда», в закладці «тип» вибиралася поліномальна згладжуюча крива, а в закладці «параметри» піднімався прапорець «показати рівняння на діаграмі». В результаті для опису утвореної кривої по малій осі насіння (товщини насіння) було отримано рівняння:

$$y = -0,00025 \cdot x^6 + 0,00579 \cdot x^5 - 0,05029 \cdot x^4 + 0,19910 \cdot x^3 - 0,35746 \cdot x^2 + 0,54186 \cdot x - 0,00291 \quad (3.1)$$

Рисунок 3.2 – Розміщення полів рівних температур в соняшниковому насінні.

Рисунок 3.4 – Криві - утворюючі ізопотенціальні поверхні насіння соняшнику.

Утворююча крива великої осі (ширини насіння) може бути описана рівнянням виду:

$$y = -0,00289 \cdot x^4 + 0,03251 \cdot x^3 - 0,14691 \cdot x^2 + 0,80343 \cdot x - 0,03259 \quad (3.2)$$

Отримані значення функцій були використані для визначення площі поверхні і об'єму соняшникового насіння. Площа поверхні насіння представляє в даному випадку середнє значення поверхонь обертання, утворених обертанням осі насіння навколо центральної осі симетрії X (рисунок 3.2). В результаті розрахунку за пропонованим методом площа поверхні насіння склала $S = 186,06 \text{ мм}^2$.

Об'єм насіння був визначений як середній об'єм поверхні обертання навколо центральної осі симетрії, утвореною площею, що обмежується кривою функції малої і великої осі насіння і віссю симетрії насіння X. Для цього площа, обмежена кривою була представлена як круговий інтеграл функції, що визначає дану криву. В результаті було отримано значення об'єму насіннини $V = 89,26 \text{ мм}^3$.

Для перевірки отриманих значень слід привести значення, отримані по емпіричних залежностях, що приводяться з урахуванням коефіцієнта форми φ :

$$V = 2,382 \cdot a^{1,7} \cdot b^{0,36} \cdot l^{0,12}, \quad (3.3)$$

$$S = 0,385 \cdot a^{0,7298} \cdot b^{0,0267} \cdot l^{2,0364}. \quad (3.4)$$

$$V = 2,382 * 5,30^{1,7} * 3,36^{0,36} * 11,06^{0,12} = 83,74 \text{ мм}^3.$$

$$S = 0,385 * 5,30^{0,72} * 3,36^{0,0267} * 11,06^{2,0364} = 176,40 \text{ мм}^2.$$

Таким чином, величина розбіжностей між емпіричними формулами з урахуванням коефіцієнта форми і певним розрахунком значень площі поверхні і об'єму насіння мінімальна, і виражені через безрозмірну нормовану координату значення можна вважати достовірними.

Отже для подальших висновків будуть використані значення, виражені через безрозмірну координату. Площа поверхні та об'єм насіння за пропонованою методикою для використання в подальших висновках були виражені через безрозмірну координату ξ . Таким чином, залежність площі поверхні насіннини в м^2 від безрозмірної координати виражається рівнянням виду:

$$S(\xi) = (0,22 \cdot \xi^3 + 185,77 \cdot \xi^2 + 0,08 \cdot \xi - 0,01) \cdot 10^{-6}, \quad (3.5)$$

де $0 \leq \xi \leq 1$ - безрозмірна координата.

Величина об'єму насіннини в м^3 в залежності від безрозмірної координати описується рівнянням виду:

$$V(\xi) = (90,07 \cdot \xi^3 - 5,78 \cdot \xi^2 + 5,44 \cdot \xi - 0,39) \cdot 10^{-9}. \quad (3.6)$$

Графічні залежності, що відображають значення площі поверхні і об'єму насіння, відповідні нормованим значенням координати, наведені на рисунку 3.5.

Рисунок 3.5 – Залежність об'єму і площі поверхні насіння соняшника від значення безрозмірної координати.

3.2.2 Системи рівнянь пов'язаного тепло- і масопереносу для капиллярно-пористого тіла

Насіння соняшнику є системою, в якій волога має різні форми зв'язку з твердим тілом. Класифікація форм зв'язку вологи в колоїдних капілярно - пористих матеріалах, запропонована П.А. Ребиндером [25], враховує як природу різних форм, так і енергію зв'язку їх з матеріалами. Відповідно до класифікації Ребиндера всі форми зв'язку вологи діляться на три великі групи:

- Хімічний зв'язок;
- Фізико-хімічний зв'язок;
- Фізико-механічний зв'язок.

Волога, пов'язана з капиллярно-пористим тілом в межах позитивних температур ($t > 0^\circ$), може бути у вигляді рідини або пари. Специфічною особливістю масо- і теплопереносу в капиллярно-пористих тілах є часткове заповнення вологою пор і капілярів тіла, т. ін. Частина капілярів заповнена рідиною або льодом, а інша частина – парогазовою сумішшю. Кількість вологи в тому чи іншому стані в процесі масо- і теплопереносу змінюється; тому при виведенні рівнянь переносу необхідно враховувати зміну концентрації вологи в капілярах тіла.

При ІЧ-опроміненні процес сушіння інтенсифікується завдяки значній щільності теплового потоку на поверхні матеріалу (на порядок більше, ніж при конвективному сушінні), розсіювання в об'єкті сушіння потоку, поглиненого поверхневим шаром, і частковим проникненням енергії всередину матеріалу. При розгляді диференціальних рівнянь зв'язаного тепло- і масопереносу, записаних для двошарової частинки [20], можна відзначити можливість термоградієнтного руху вологи всередину насіння, у напрямку теплового потоку. Це обумовлено величиною термоградієнтного коефіцієнта і тим, що коефіцієнти масопровідності для ядра і лушпиння відрізняються за своїми значеннями [25], отже матиме місце різна швидкість переміщення вологи в ядрі і лушпинні. Таке явище буде спостерігатися в

проміжок часу x до досягнення підйому температури в центрі насіння. Якщо при сушінні насіння інтенсивність сушіння чергується з періодом так званого «відлежування», для досягнення рівномірної вологості в об'ємі, то при підготовці насіння до обрушення важливо досягти максимального перерозподілу вологи між лушпинням і ядром.

Для з'ясування інтенсивності і тривалості оптимального теплового впливу може бути розглянута система диференціальних рівнянь тепло- і масопереносу для капиллярно-пористого тіла (запропоновані А.В. Ликовим) [20]:

$$\begin{cases} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 t + \frac{\varepsilon \cdot r}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \\ \frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 u + a_m \delta \nabla^2 t \end{cases} \quad (3.7)$$

де a - коефіцієнт теплопровідності, $\text{м}^2/\text{год}$;

a_m - коефіцієнт масопровідності;

∇ - оператор Лапласа;

δ - термоградієнтний коефіцієнт;

ε - коефіцієнт фазового переходу;

r - питома теплота пароутворення, Дж/кг ;

c - питома теплоємність ядра (лушпиння), Дж/кг ;

γ - щільність ядра (лушпиння), кг/м^3 .

Дана система пов'язує тепло- і масообмін, одночасно протікає в насіння соняшнику, по загальній тимчасовій координаті. Як зазначено вище, соняшникова насінина була представлена як система складної геометричної форми. Після того, як була визначена реальна геометрія соняшникового насіння і створена криволінійна система координат, збігається з ізопотенціальними поверхнями температури і вологості, площа поверхні і об'єм, а отже, і лінійні розміри були виражені через безрозмірну координату ξ . Завдання (3.7) в цьому випадку можна звести до одновимірної системи диференціальних рівнянь такого вигляду:

$$\begin{cases} \left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot \frac{\partial t(\xi,\tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial t(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] + \frac{\varepsilon \cdot r}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \tau} \\ \left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] + a_m \cdot \delta \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial t(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] \end{cases} \quad (3.8)$$

Завдання (3.8) для випадку підведення тепла інфрачервоним випромінюванням, являє собою задачу з граничними умовами другого роду, тобто, поверхня нагрівається постійним тепловим потоком $q_c = \text{const}$.

$$t(\xi, 0) = t_0 = \text{const},$$

$$-\frac{\partial t(\xi, 1)}{\partial \xi} + \frac{q_c}{\lambda} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0$$

Дану задачу можна звести до задачі з граничними умовами першого роду, якщо замість змінної x ввести нову змінну q (щільність теплового потоку), яка визначається співвідношенням:

$$q(\xi, \tau) = -\lambda \frac{\Delta t(\xi, \tau)}{\Delta \xi} \quad (3.10)$$

Продиференціюємо перше рівняння системи рівнянь (3.8) по ξ :

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot \frac{\partial t(\xi,\tau)}{\partial \tau} \right] = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[a \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] + \frac{\varepsilon \cdot r}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] \\ \left[\left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \tau} \right] = \left[a_m \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] + a_m \delta \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial t(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] \right] \end{cases} \quad (3.11)$$

Тоді систему диференціальних рівнянь (3.11) можна представити в вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot q(\xi, \tau) \right] = \frac{\partial}{\partial \xi} \left[a \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot q(\xi, \tau) \right] + \frac{\varepsilon \cdot r}{c \cdot \gamma} \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \tau} \right] \\ \left(\frac{d}{d\xi}V(\xi)\right) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \tau} = a_m \cdot \frac{\partial}{\partial \xi} \left[S(\xi) \cdot \frac{\partial u(\xi,\tau)}{\partial \xi} \right] + a_m \delta \left[S(\xi) \cdot q(\xi, \tau) \right] \end{cases} \quad (3.12)$$

Функція вологості в системі (3.12) має граничні умови першого роду, так як на поверхні насіння відбувається випаровування, тобто фазовий перехід і, вміст вологи на поверхні постійний і дорівнює нулю. Отже загальні початкові і граничні умови системи (3.12) мають вигляд:

$$q(\xi, 0) = 0, \quad u(\xi, 0) = u_0,$$

$$q(l, \tau) = q_c. \quad u(l, \tau) = 0, \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} u(0, \tau) = 0.$$

Представлені граничні умови визначають класи пробних функцій тимчасових і координатних проекцій, які можуть бути використані при вирішенні задачі (3.8).

Отже, вихідне завдання може бути коректно вирішене проекційним методом і може бути використане в подальшому для моделювання процесу тепломасопереносу. Для цього соняшникове насіння необхідно розглянути як двошарову частку, що складається з ядра і лушпиння. Тобто з основного тіла і оболонки, що відрізняється від нього по термодинамічних і масообмінними властивостями. Для цього запис параметрів (a , a_m, c , δ) лушпиння і ядра і підстановку їх в початкові рівняння слід проводити незалежно, вирішуючи систему рівнянь (3.7) за пропонованою методикою окремо для ядра і лушпиння з урахуванням товщини останньої. Так як лушпиння і ядро в насінні знаходяться в тісному контакті, то на межі двох різних за властивостями складових насіння, буде виникати додатковий опір переносу вологи, що враховується величиною термоградієнтного коефіцієнта. З рішення системи рівнянь знаходиться зміна вологості і температури відповідно для ядра і лушпиння з плином часу при постійному тепловому потоці на поверхні насіння. Критерієм визначення оптимальної тривалості теплового впливу є момент часу t , при якому настане найбільша різниця вологості між ядром і лушпинням.

Таким чином, використання методу зниження розмірності на основі узагальненої координати, дозволяє редукувати задачі нестационарного тепломасопереносу в одномірні і вирішувати їх проекційними методами.

3.3 Моделювання режимів ІЧ обробки насіння соняшнику

Для моделювання процесу термодифузії при інфрачервоній обробці були записані фізичні властивості і значення коефіцієнтів температуро- і масопровідності для ядра і лушпиння.

В якості інфрачервоних випромінювачів були прийняті електролампи з інфрачервоним спектром КГТ-1000, потужністю 1 кВт. Вони являють собою так звані «світлі» випромінювачі, так як максимальне число хвиль в спектрі мають довжину 4 мкм. Глибина проникнення випромінювання за об'ємом насіння, виражена через величину безрозмірної нормованої координати, з урахуванням відображення і заломлення при $\lambda=4\text{мкм}$ визначена для соняшникового насіння за даними [54]. Для цього дослідні дані апроксимувались поліномом згладжуючої функції. В результаті була отримана графічна залежність, відображена на рисунку 3.6.

Коефіцієнт температуропровідності a , $\text{м}^2/\text{год}$, окремо для ядра і лушпиння може бути визначений за формулою [16]:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \gamma} \quad (3.14)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, $\text{кДж} / (\text{м} \cdot \text{год} \cdot \text{К})$;

c - питома теплоємність, $\text{кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$.

Коефіцієнт теплопровідності λ , для соняшникового насіння залежить від

вологості і може бути визначений за формулою [16]:

$$\lambda = 3,35 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{100 \cdot u}{100 - u} + 125 \right) \cdot \left(\frac{t \cdot \gamma}{273} + \gamma + 225 \right), \quad (3.15)$$

де u - рівноважний питомий вміст води ядра або лушпиння, %.

Рисунок 3.6 – Розподіл потоків тепла Q по об'єму насіння виражене через нормовану безрозмірну координату.

Питома теплоємність насіння в свою чергу також залежить від вологості і температури і може бути визначена за формулою:

$$c = 0,419 \cdot 10^{-3} [(100 - u) \cdot (0,16M_H + 0,04t + 322) + 100 \cdot u] \quad (3.16)$$

За даними [26] при відносній вологості повітря $\varphi = 0,8$ рівноважний питомий вміст води ядра соняшнику становить $u = 0,08$ (8%), а лушпиння $u = 0,094$ (9,4%). Це характеризує гігроскопічні властивості соняшникового лушпиння, тобто лузга поглинає з навколишнього середовища більшу кількість води, ніж ядро. Далі значення питомого вмісту води лушпиння і ядра при обранні вологості повітря 80% були підставлені в формули (3.15) і (3.16), після чого визначалися значення коефіцієнта температуропровідності за формулою (3.14) з урахуванням значень щільності лушпиння і ядра по п. 2.1.

Отримані значення коефіцієнта температуропровідності підставлялися в вихідну систему рівнянь тепломасопереносу. Туди ж підставлялися значення коефіцієнта потенціалопровідності (масопродності) визначені по роботі [27]. Товщина лушпиння була виражена через значення безрозмірної координати ξ .

Було встановлено значення температури на поверхні насіння, яке відповідало щільності теплового потоку 350 Вт/м^2 .

З припущення, що випаровування води, тобто фазовий перехід відбувається з поверхні лушпиння, починаючись частково в її порах, коефіцієнт фазового переходу прийме значення рівне одиниці.

Величина термоградієнтного коефіцієнта, що визначає швидкість перенесення потоку води в речовині, згідно [27] визначена для соняшникового ядра і лушпиння. Значення термоградієнтного коефіцієнта для ядра складає $\delta = 2,626 \cdot 10^{-5}$. Для лушпиння термоградієнтний коефіцієнт дорівнює $\delta = 4,735 \cdot 10^{-5}$.

В результаті розрахунків були отримані дві криві зміни вологості лушпиння і ядра в загальній тимчасовій координаті, які представлені на рисунку 3.7. З графіка очевидно, що в початковий момент ПЧ-обробки вологість лушпиння зменшується швидше, і в якийсь момент часу вона

ставатиме нижче вологості ядра. Найбільша різниця вологостей лушпиння і ядра настає в певний момент часу (в даному випадку через 40 с), потім починається зближення значення вологості лушпиння і ядра і подальша обробка недоцільна.

Рисунок 3.7 – Зміна вологості соняшникових ядра і шолухи в залежності від часу теплової обробки при заданій щільності теплового потоку.

Висновок. Досліджено фізико-механічні властивості соняшника, як об'єкта дослідження. Визначено об'єм і площу поверхні насіння соняшнику. Якщо при сушінні насіння інтенсивність сушіння чергується з періодом так званого «відлежування», для досягнення рівномірної вологості в об'ємі, то при підготовці насіння до обрушення важливо досягти максимального перерозподілу вологи між лушпинням і ядром. При ІЧ-опроміненні процес сушіння інтенсифікується завдяки значній щільності теплового потоку на поверхні матеріалу (на порядок більше, ніж при конвективному сушінні), розсіювання в об'єкті сушіння потоку, поглиненого поверхневим шаром, і частковим проникненням енергії всередину матеріалу. В початковий момент ІЧ-обробки вологість лушпиння зменшується швидше, і в якийсь момент часу вона ставатиме нижче вологості ядра. Найбільша різниця вологостей лушпиння і ядра настає в певний момент часу (в даному випадку через 40 с), потім починається зближення значення вологості лушпиння і ядра і подальша обробка недоцільна.

4 ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОБРУШЕННЯ І ЗМІНИ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НАСІННЯ ПРИ ВОЛОГОТЕПЛОВІЙ ПІДГОТОВЦІ

Основними факторами, які найбільшою мірою впливають на хід процесу обрушення, і якісний склад одержуваної рушанки, є: тривалість теплової обробки перед обрушенням, температура при підготовці (впливають на перерозподіл вологи між ядром і лушпинням), і частота обертання ротора насіннерушки. Для проведення експериментальних досліджень були обрані значення рівнів кожного фактора, з урахуванням діапазонів технологічних параметрів, використовуваних у виробничих умовах при роботі жаровні і насіннерушки.

Таблиця 4.1 – Вибір факторів експерименту.

| Фактор | Тривалість підготовки, с | Температура, °С | Частота ротора об/хв |
|-----------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|
| Нульовий рівень (0) | 60 | 100 | 800 |
| Інтервал вирівнювання | 20 | 15 | 100 |
| Верхній рівень (+1) | 80 | 115 | 900 |
| Нижній рівень (-1) | 40 | 85 | 700 |

Розглянуті фактори мають кількісну природу. Кодування цих кількісних факторів і визначення їх рівнів проводилося з використанням безрозмірних змінних за такими формулами переходу:

– за часом обробки:

$$X_1 = \frac{\tau - 60}{20} \quad (4.1)$$

де τ - місцевий час, с;

– за температурою, °С:

$$X_2 = \frac{T-100}{15} \quad (4.2)$$

– за частотою обертання ротора, об/хв :

$$X_3 = \frac{n-800}{100} \quad (4.3)$$

Всі три кодовані змінні X_1 , X_2 , X_3 приймають значення в діапазоні від -1 до +1. Таким чином для достовірного обліку впливу кожного з факторів потрібно симетричний прямокутний трохфакторний план.

Таблиця 4.2 – Обраний вихідний план експерименту ($A = 0,822$ *)

| № дослідю | X_1 | X_2 | X_3 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 1 | A | A | A |
| 2 | -A | A | A |
| 3 | A | -A | A |
| 4 | A | A | -A |
| 5 | -A | -A | A |
| 6 | -A | A | -A |
| 7 | A | -A | -A |
| 8 | -A | -A | -A |
| 9 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | -1 |
| 11 | 0 | 1 | 0 |
| 12 | 0 | -1 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | -1 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

* - Постійний коефіцієнт плану.

Цей план є план третього порядку, так як при трьох факторах з його допомогою можна оцінити 14 параметрів, вибраних з повної кубічної регресії.

Таблиця 4.3 – Прийнятий план експерименту в кодованих змінних

| № дослідю | X_1 | X_2 | X_3 |
|-----------|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | -1 | 1 | -1 |
| 7 | 1 | -1 | -1 |
| 8 | -1 | -1 | -1 |
| 9 | 0 | 0 | 1 |
| 10 | 0 | 0 | -1 |
| 11 | 0 | 1 | 0 |
| 12 | 0 | -1 | 0 |
| 13 | 1 | 0 | 0 |
| 14 | -1 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

При проведенні дослідів використовувалася сортова суміш насіння соняшнику. Вологість матеріалу склала 7,8%, вміст лушпиння – 23%. Експериментальні дослідження проводилися на дослідно-промисловій установці в наступній послідовності.

З партії насіння відбиралася проба масою близько 9 кг. Узята кількість насіння піддавалося тепловій обробці при заданому часу перебування на заздалегідь встановленій швидкості руху стрічкового конвеєра і температурі обробки. Температура обробки замірялась за допомогою термопар,

встановлених в жаровні на відстані 80 мм від випромінювача і 30 мм від шару насіння.

Рисунок 4.1 – Експериментальна лабораторна установка ІЧ опромінення для визначення тепломасообмінних характеристик при сушінні соняшнику у рухомому шарі

Після теплової обробки насіння подавалось на експериментальну насіннерушку рис.4.2.

Рисунок 4.2. – Загальний вигляд насіннерушки з криволінійними лопатями.

Оброблена в сталому режимі партія насіння, поділялася на три рівні частини приблизно по 3 кг, кожна з яких падали при заданих частотах обертання ротора, що відповідають обраному плану. Відбір рушанки проводився після обрушення кожної частини, з присвоєнням номера проби вмісту кожного пакетика. Надалі відбір проб повторювався і при заданій швидкості руху конвеєра, встановлювалося нове значення температури. Партія насіння поділялася і обрушувалась по викладеній вище методиці при тих же значеннях частоти обертання ротора насіннерушки, відповідно до обраного плану експерименту. На підставі дослідних даних, з урахуванням факторів впливу були визначені види залежностей регресійних рівнянь для коефіцієнта масового вмісту цілого ядра в рушанці $G_{\text{ядра}}$. Тобто, встановлено кількісний вплив значень часу і температури попередньої обробки насіння, а також швидкості обертання ротора на утримання цілого ядра в рушанці. Коефіцієнт масового вмісту цілого ядра в рушанці були визначені з аналізу отриманої рушанки для кожної проби за формулою:

$$G_{\text{ядра}} = \left(1 - \frac{L}{100}\right) - \frac{S1}{100} - \frac{N+C}{100} \cdot \left(1 - \frac{L}{100}\right) \quad (4.4)$$

де $G_{\text{ядра}}$ – вміст цілого ядра в рушанці, %;

$S1$ – вміст олійного пилу і січки в рушанці, %;

$N + C$ – вміст недорушу і ціляку в рушанці, %;

L – лушпинність насіння, %.

Для досліджуваної партії насіння лушпинність була визначена заздалегідь і склала 23%. Аналіз рушанки проводився в лабораторних умовах за методикою [53]. Рушанка попередньо поділялася на фракції на ситах з отворами діаметром 2 і 3 мм. Потім рушанка вручну методом діагонального поділу ділилася на фракції, які зважували на лабораторних вагах з точністю до сотих часток грама. При нульових значеннях трьох факторів впливу вміст недорушу і ціляку в рушанці склали 27,48%, січки 15%, олійного пилу 7%. Таким чином, повністю обрушеними (з утворенням січки й олійного пилу) виявилось 72,52% насіння з партії. Знаючи конструктивні параметри насіннерушки, визначені у другому розділі, і побудувавши графік частоти розподілу насіння в партії по масі [2], можна визначити масу насіння, яке гарантовано буде зруйновано при отриманому співвідношенні ціляку і недорушу в рушанці. Таким чином, можна визначити роботу руйнування, витрачену на обрушення однієї насінини. Для аналізу була обрана крива залежності абсолютної маси від товщини насіння. По осі абсолютної маси було відкладено вниз від величини найбільшої маси однієї насінини 27,48% від всієї величини шкали. Таким чином, опустившись на значення маси одного насіння був знятий звіт 7,32 г, що відповідає від 3,0 до 3,5 мм товщини насіння. Отже, питома робота руйнування для одного насіння A_{c1} , Дж, складе [16]:

$$A_{c1} = \frac{m \cdot v^2}{2}, \quad (4.5)$$

де m – маса насіння, кг;

V – абсолютна швидкість на виході з ротора, м / с.

$$A_{c1} = (0,00732 \cdot (22,65 \cdot \cos 5^\circ)^2) / 2 = 1,8038 \text{ Дж.}$$

$$A_c = 1,8038 \cdot (1000 / 7,32) = 236,42 \text{ Дж/кг.}$$

Питома робота руйнування насіння вздовж довгої осі для початкової вологості 8% згідно п.2.1 становить 237,296 Дж / кг.

| | | | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|---|---|--|--|--|-------|
| | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | |
| 6 | | | | | | | | | | 32,07 |
| | 1 | | 1 | 1 | | 1 | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | 30,80 |
| | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | | 30,15 |
| | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | | 34,12 |
| 10 | | | | | | | | | | 31,24 |
| | | | 1 | | | | | | | |
| 11 | | | | | | | | | | 35,81 |
| 12 | | | | | | | | | | 32,85 |
| | | 1 | | | | | | | | |
| 13 | | | | | | | | | | 31,59 |
| 14 | | | | | | | | | | 31,96 |
| | 1 | | | | | | | | | |
| 15 | | | | | | | | | | 35,48 |

Надалі на підставі методів регресійного аналізу визначено параметри отриманих регресійних рівнянь. В остаточному вигляді для $G_{\text{ядра}}$ отримані наступні залежності:

$$G_{\text{ядра}}=30,698-0,295X_1+0,318X_2+0,204X_3+0,564X_1X_2+0,278X_1X_3-1,521X_2X_3-0,106X_1^2+0,129X_2^2+1,907X_3^2. \quad (4.7)$$

Висновок. З отриманих даних видно, що найбільш високі показники масового вмісту ядра в рушанці спостерігаються на режимах роботи, що відповідають розрахунковим. Отже, під час налаштування комплексу обладнання при заданих конструктивних параметрах, слід вибирати розраховані значення по вище наведеній методиці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Лобанов В.Г., Шаззо А.Ю., Щербаков В.Г. Теоретические основы хранения и переработки семян подсолнечника. - М.: Колос, 2002. - 590 с.
2. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. - М.: Пищевая промышленность, 1966.- 478 с.
3. Арутюнян Н.С., Копейковский В.Н. и др. Влияние лужистости ядра на качественные показатели подсолнечного масла./ Масложировая промышленность. 1973, №5.
4. Зарембо Г.В., Ключкин В.В. Обрушивание семян подсолнечника методом сброса давления воздуха.// Масложировая промышленность. 1976, №9.
5. Масликов В.А., Исавцев К.И. Применение высоковольтного разряда в жидкости для обрушивания семян высокомасличного подсолнечника.// Масложировая промышленность. 1971, №9. с.4- 5.
6. Лобанов В.Г., Шаззо А. Ю. Прогнозирование изменения технологического качества семян подсолнечника в процессе обрушивания и измельчения./ Известия ВУЗов. «Пищевая технология» №2-3, 1999.
7. Ключкин В.В. Прочность плодовых оболочек высокомасличных семян подсолнечника. // Масложировая промышленность. 1958, №9, с. 14 -16.
8. Кузнецов А.Т. Исследование прочности семян высокомасличного подсолнечника. // Масложировая промышленность. 1970, №2, с. 7-9.
9. Viskanta R., Jorgensen K.D. Transient heating of opaque and semitransparent materials by radiation dming processing. Heat and Mass Transfer, 2000, 36,413-421.
10. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел. - М.: Пищевая промышленность, 1974.-439 с.
- 11.Фют А.К. Совершенствование технологии и оборудования подготовительных процессов переработки семян подсолнечника. - М.: АгропромНИИТЭИПП, 1990, сер.20, вып. 5.

12. Фют А.К. Пути совершенствования бичевой семенорушки. // Масложировая промышленность. 1995, № 5-6.
13. Зайцев В.И. Исследование и совершенствование технологии разрушения плодовых оболочек семян подсолнечника методом ударных нагрузок. Автореферат диссертации ... к. т. н. -С.-Пб.; ВНИИЖ, 1999.
14. В.М.Бандура, І.А.Зозуляк, О.В.Зозуляк. Моделювання процесу вібраційного сушіння соняшнику при використанні теорії подібності.// Збірник наукових праць Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса: ОНАХТ, 2015. – Вип.47. – Том1. –С.94-99.
15. Бандура В.М., Зозуляк І.А. Енергоощадне сушіння насіння соняшнику/Енергія, бізнес, комфорт. Матеріали науково-практичної конференції . ОНАХТ 20 листопада 2014.–С.55-56.
16. Кошевой Е.П. Технологическое оборудование предприятий производства растительных масел. - С.-Пб.: ГИОРД, 2001.- 368 с.
17. Деревенко В.В., Выродов И.П. Основы инженерных расчётов и особенности работы центробежной рушки. // Хранение и переработка сельхозсырья. 2002, №1.
18. Gupta R.K., Das S.K. Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading. Journal of Food Engineering, 2000,46, p. 1-8.
19. Бандура В.М., Бережнюк Д.П. Дослідження процесу руйнування оболонки насіння ріпаку сорту «Особливий». Наукові праці ОНАХТ. Випуск 41, Том 1, Одеса 2012. С.223-227.
20. Лыков А.В., Михайлов Ю. А. Теория тепло- и массопереноса. М-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 536с.
21. Лыков А. В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 470 с.
22. Белобородов В.В., Забровский Г.П., Вороненко Б.А. Процессы массо- и теплопереноса масложирового производства. - С-Пб.: ВЕШИЖ, 2000. - 429 с.
23. Вороненко Б.А., Кириевский Б.Н. Решение дифференциальных уравнений тепло- и влагопереноса применительно к процессам

кондиционирования масличных семян по влажности и температуре. // Труды ВНИИЖ. Л. 1979. - с. 20

24. Руководство по технологии получения и переработке растительных масел и жиров. - Л.: ВНИИЖ, т.1, кн. 1, 1975 - 725 с; т.1, кн. 2, 1974. - 591 с; т.П, 1973. 350 с.

25. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. - М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. - 280 с.

26. Кошевой Е.П., Кашеватская Л.А., Морозова В.Ф., Скрипников А.А.. Оценка степени нагрева семян подсолнечника. / Известия ВУЗов «Пищевая технология» №1, Краснодар, 1975.

27. Мамиев А.Х., Кошевой Е.П., Кашеватская Л.А., Масликов В.А.. Влагодпроводность основных компонентов семян подсолнечника./ Известия ВУЗов «Пищевая технология» №2, Краснодар, 1978.

28. Технология производства растительных масел/[В.М. Копейковский, СИ. Данильчук, Г.И. Гарбузова и др.]; под ред. В.М. Копейковского. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 416 с.

29. Подготовительные процессы переработки масличных семян/ [В.В. Белобородов, Ю.П. Мацук, Б.Н. Кириевский, А.Т. Кузнецов]; под ред. В.В. Белобородова - М.: Пищевая промышленность, 1974.- 336 с.

30. Бандура В.М., Бережнюк Д.П., Жегалюк О.В. Підвищення технологічної ефективності отримання ріпакової олії шляхом видалення насінневих оболонок. Зб.наук.пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки. Вип.10 Т.1 (58), Вінниця 2012. С.113-117.

31 Бандура В.М., Друкованый М.Ф., Зозуляк И.А. Обоснование конструкции вибрационной сушилки для подсолнечника// Харчова наука і технологія. Науково-виробничий журнал. – 2012, № 3(20)* вересень. – С.91-94.

32. Leelavathi, K., Haridas Rao, P., Shamanthaka Sastry, M. C. Studies on the utilization of sunflower kernels in bakery products. J. Food Sci. Tech., 1991,28,280-284.

33. Subramanian, R., Shamanthaka Sastry, M. C., Venkateshmurthy, K. Impact dehulling of sunflower seeds: effect of operating conditions and seed characteristics. *J. Food Eng.*, 1990,12, 83-94.
34. Бандура В.М. Оптимізація процесу сушіння насіння ріпаку в інфрачервоному полі. *Зб. наук. пр. ВНАУ. Серія: Технічні науки. Вип. 11 Т. 2 (66)*, Вінниця 2012. С. 343-346.
35. Isobe, S., Zuber, F., Umura, K., Noguchi, A. A new twin-screw press design for oil extraction of dehulled sunflower seeds. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1992,69, 884-889.
36. Tranchino, L., Melle, F., Sodini, G. Almost complete dehulling of high oil sunflower seed. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 1984,61,1261-1265.
37. Технология и оборудование мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности / Г.А. Егоров, Я.Ф. Мартыненко, Т.П. Петренко. - М.: Изд. Комплекс МГАПП, 1996.- 209 с.
38. Igathinathane, C, Chattopadhyay, P.K. Mathematical prediction of moisture profile in layers of grain during pre-conditioning. *Journal of Food Engineering*, 1997,31,185-197.
39. Бандура В.М. Обґрунтування ІЧ-обробки насіння соняшника перед його обрушуванням. // *Збірник наукових праць Одеської національної академії харчових технологій.* – Одеса: ОНАХТ, 2015. – Вип. 47. – Том 2. – С. 131-133.
40. Бандура В.М. Перспективи застосування віброконвеєрного інфрачервоного сушіння сировини олійного виробництва / В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // *Матеріали МНТК [«Сучасні агротехнології: тенденції та інновації»]*. – Вінниця. 2015. – С. 11-13.
41. Thakor, N.J., Sokhansani, C, Sosulski, F.W., Yannacopoulos, C. Mass and dimensional changes of single canola kernels during drying. *Journal of Food Engineering*, 1999,40,153-160
42. Бандура В.М. Перспективи методу сушіння олійних культур з використанням інфрачервоного опромінення / В.М. Бандура, О.В. Жегалюк, В.І. Паламарчук // *Матеріали всеукраїнської наукової конференції молодих*

учених. – Умань. 2012. - С. 151 – 152.

43. FUSCO, A. J., Aguerre, R. J., Gabitto, J. F. A diffiisional model for drying with volume change. *Drying technology*, 1991, 9(2), 397-417.

44. Tang, J., Sokhansanj, S. Geometric changes in lentil seeds caused by drying. *J. Agricul. Eng. Res*, 1993,56, 313-326.

45. Bandura, V. Description of heat exchange in the similarity theory of vibrating drying process of sunflower [Text] / V. Bandura, I. Zozuliak, V. Palamarchuk // *Ukrainian Journal of Food Science*, 2014. Vol. 2. Issue 2. 305-311.

46. Бандура В.М. Експериментальні дослідження кінетики сушіння ріпаку та сої в нерухомому шарі в інфрачервоному полі [Текст] / В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса: 2012 Вип.41, том 2. – С. 110-113.

47. Asota, C.N. Mechanical Seed Quality of Soyabeans Related to Drying Parameters. *Journal of Food Engineering*, 1997,31, 387-394.

48. Tutimcu, M.A., Labuza, T.P. Effect of Geometry on the Effective Moisture Transfer Diffusion Coefficient. *Journal of Food Engineering*, 1996,30,433-447.

49. Гарбузова Г.И. Активное вентилирование высокомасличных семян подсолнечника атмосферным и кондиционированным воздухом. Автореферат диссертации... к.т.н. Краснодар, 1963.

50. Каспаров Г.Н., Белобородов В.В. Корреляционные таблицы для определения размеров семян./Изв. ВУЗов. «Пищевая технология» №5,1964.

51. Куцакова В.Е., Богатырев А. Н. Интенсификация тепло- и массообмена при сушке пищевых продуктов. - М.: Агропромиздат, 1987. -236с.

52 Бандура, В.М. Экспериментальное исследование технологических параметров процесса инфракрасной сушки движущегося шара сырья масличных культур [Текст] / В.М. Бандура, О.В. Цуркан, В.И. Паламарчук // *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture* – 2015. Vol. 17, №4. 211-214.

53. Гинзбург А. С Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. - М.: Агропромиздат, 1985. - 336с.

54. Ильясов С. Г., Красников В. В. Физические основы инфракрасного облучения пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1978. - 358с.
- 55.Лабораторный практикум по технологии производства растительных масел/ Копейковский В. М., Мосян А.К., Тарасов В.Е. и др. - М.: Агропромиздат, 1990. 190с.
- 56.Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. - М.: Издательство технико- теоретической литературы, 1956. - 784 с.
57. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 6.0 PRO. - М.: СК Пресс, 1997. - 336 с.
58. Дьяконов В.П. MathCAD 7 в математике, физике и Internet. - М.: Нолидж, 1999. - 345 с.
59. Флетчер К. Численные методы на основе метода Галёркина. Пер. с англ. - М.: Мир, 1988.-352 с.
60. Кошевой Е.П., Гарус А.А., Фролов Р.Н. Новые подходы к созданию оборудования производств малой мощности для переработки семян. // "Научные подходы к решению проблем предприятий агропромышленного комплекса-2000". Материалы научно практической конференции. В.1, т.1, Ростов-на-Дону, 2000, с.51-52.
61. Кошевой Е.П., Фролов Р.Н. Косачев В.С. Михневич А.И. Моделирование полей температуры и влажности в семени подсолнечника при ИК-облучении. Тезисы докладов международной научной конференции «Прогрессивные пищевые технологии - третьему тысячелетию». Краснодар, КубГТУ 2000, с. 186-187.
62. Друкований М.Ф. Розробка конструктивно-технологічних заходів для підвищення ефективності інфрачервоного сушіння енергонасиченої рослинної сировини / М.Ф. Друкований, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Матеріали МНТК [«Земля України – потенціал економічної і екологічної безпеки держави»]. – Вінниця. 2010. – Випуск 42. – Т.3. – С. 34-40.

63. Кошевой Е.П., Фролов Р.Н. Оценка влияния ИК-обработки семян подсолнечника на эффективность разрушения плодовой оболочки. -// Молодые ученые - пищевым и перерабатывающим отраслям АПК (технологические аспекты производства): Тезисы докладов/ М.: Издательский комплекс МГУПП, 2000. - с. 133-134.
64. Кошевой Е.П., Фролов Р.Н. Совершенствование обрушивания семян подсолнечника. "Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке". Материалы конференции. С.-Пб,2001, с.217.
65. Паламарчук, І.П. Обґрунтування конструктивної та технологічної схеми конвеєрної вібраційної сушарки [Текст] / І.П. Паламарчук, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Вібрації в техніці та технологіях. №2(66). Вінниця, 2012 - С.116-125.
66. Паламарчук, І.П. Анализ динамики виброконвейерной технологической системы с кинематическим комбинированным вибровозбуждением [Текст] / І.П. Паламарчук, В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2013. Vol. 15. No.4. 314-323.
67. Бандура В.М. Розробка конструктивно-технологічних заходів для підвищення ефективності інфрачервоного сушіння енергонасиченої рослинної сировини / В.М. Бандура, В.І. Паламарчук // Матеріали IV МНТК [«Земля України – потенціал економічної і екологічної безпеки держави»]. – Вінниця. 2014. - С. 24-27.
68. Фролов Р.Н., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Постановка и решение задач термодиффузии в семенах подсолнечника. Научные основы процессов, аппаратов и машин пищевых производств. - Материалы международной научно-практической конференции. - Краснодар: Кубан. Гос. Технол. Ун-т, 2002. – С.71-79.
69. Рудобашта С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / Рудобашта С. П. – М. : Химия, 1980. – 248 с.
70. Фирсова М. К. Оценка качества зерна и семян / М. К. Фирсова, Е. П. Попова. – М. : Колос, 1981. – 221 с.
