

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно – технологічний факультет
Кафедра агроінженерії та технічного сервісу

Допущений до захисту:
Завідувач кафедри
к.т.н., професор Бандура В.М.

(Підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)
“ _____ ” грудня 2019 р.

ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО -
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНОВОЇ СУШАРКИ

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 208 «Агроінженерія»

Виконав: студент групи 61-АІ
Фурман Андрій Олександрович

Керівник: к.т.н., професор
Середа Леонід Павлович

Вінниця - 2019р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	
ВСТУП	
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	
1.1. Біологічні особливості сої	
1.2. Аналіз технологій і засобів післязбиральної обробки сої	
1.3. Методи і засоби підготовки зернового матеріалу до сушіння	
1.4. Огляд теоретичних досліджень сушіння зернових матеріалів	
1.5. Висновки до розділу	
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРЕН СОЇ	
2.1. Аналіз методів інтенсифікації сушіння зерен сої та розробка конструкції пристрою підготовки їх до сушіння	
2.2. Обґрунтування швидкості руху зерен сої в пристрої підготовки їх до сушіння в зернові сушарці	
2.3. Моделювання переміщення зерен сої конічним диском з прямолінійними направляючими лопатками	
2.4. Теоретичний аналіз процесу переміщення вологи в зернині сої в процесі сушіння	
2.5. Фізико-механічні і теплофізичні аспекти інтенсифікації процесу сушіння шляхом розсічення поверхні зернини	
2.6. Висновки до розділу	
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ..	
3.1. Методика проведення досліджень	
3.2. Результати досліджень	
3.3. Висновки до розділу	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТКИ	

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на тему: “Обґрунтування конструктивно - технологічних параметрів зернової сушарки” складається із вступу, 3 розділів розрахунково-пояснювальної записки, загальних висновків, списку використаних джерел із 35 назв і 9 аркушів графічної частини. Основний зміст роботи викладений на сторінках машинописного тексту, містить рисунки і таблиці.

Магістерська робота присвячена пошуку шляхів зниження енергетичних витрат та розробці енергозберігаючих методів і засобів при сушінні матеріалу в зернової сушарці, за рахунок інтенсифікації вологовидалення підготовленого матеріалу.

В першому розділі розглянуто біологічні особливості сої, проведено аналіз існуючих технологій збирання та післязбиральної обробки сої, способів, режимів і засобів для сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів.

У другому розділі наведено результати теоретичних досліджень процесу сушіння сої, обґрунтовано доцільність застосування механічного розсічення поверхні зерен сої для інтенсифікації подальшого їх сушіння.

В третьому розділі наведено методику проведення та результати досліджень.

Запропоновано метод інтенсифікації процесу сушіння зерен сої шляхом їх підготовки до сушіння. Створено пристрій підготовки до сушіння, що може встановлюватись у механізм за-вантаження сушарки та обґрунтовано його раціональні параметри.

Ключові слова: зерно, соя, сушіння, сушарка, пристрій, розсічення, інтенсифікація.

SUMMARY

Master's work on the theme: "Justification of the design and technological parameters of the grain dryer" consists of an introduction, 3 sections of the explanatory note, general conclusions, a list of sources used 35 titles and 9 sheets of the graphic part. The main content of the work is laid out on the pages of typewritten text, contains figures and tables.

The master's thesis was devoted to finding ways to reduce energy costs and to develop methods and means of energy conservation during drying of the material in the grain dryer, intensification of removal of humidity of the material prepared at the expense.

In the first section, the soybean features were considered to be biological, the analysis of existing technologies for harvesting and after harvesting soybean processing, methods, modes and means for drying bulk agricultural materials.

In the second section, the results of the theoretical studies of soybean drying were presented, and the feasibility of using mechanical dissection of the soybean grain surface to intensify their subsequent drying was substantiated.

The third section describes the methodology and results of the research.

A method of intensifying the process of drying soybeans by preparing them for drying was proposed. A drying preparation device was created, which can be installed in the mechanism of loading the dryer and its rational parameters were substantiated.

Keywords: grain, soybean, drying, dryer, device, dissection, intensification.

ВСТУП

Нині надзвичайно актуальним в Україні є розвиток сільського господарства, як вирішальної передумови функціонування основних галузей економіки. Основна частина фонду споживання формується за рахунок продукції сільського господарства, тому аграрне виробництво – життєво необхідна галузь і головна умова існування суспільства.

На сьогоднішній день в розвитку сільськогосподарського виробництва однією з найголовніших проблем залишається істотне збільшення виробництва зернобобових культур та, зокрема, сої, яка слугує основним джерелом збалансованого за амінокислотним складом і вмістом екологічно чистого білка.

Соя - це унікальна рослина, провідна культура світового землеробства та важлива технічна культура сьогодення. Вона займає перше місце у світовому виобництві рослинної олії, яку використовують на харчові цілі і для виробництва промислової продукції. Завдяки багатому й різноманітному хімічному складу, вона не знає рівних собі за темпами росту виробництва, її широко використовують як універсальну продовольчу, кормову й олійну культуру. Вона не має аналогів у арсеналі рослинних ресурсів за продуктивністю і якісним складом. Культура посідає четверте місце у світі за площею посіву та обсягами виробництва після пшениці, кукурудзи та рису [1].

Бурхливий розвиток виробництва зумовлений величезним попитом на сою і соєві продукти на світовому і внутрішньому ринках.

Одним з основних завдань післязбирального обробітку сої є доведення вологості її зерен до кондиційного значення.

Теплове сушіння зерен сої ускладнюється тим, що вони порівняно із іншими культурами містять велику кількість білка, більші за розміром, щільні та мають структурно відокремлені оболонки, а тому й меншу поверхню випаровування, що значно знижує їх вологовіддачу. Все тепло, яке підводиться до матеріалу, витрачається переважно на нагрівання поверхні, а не на випаровування вологи, що, в свою чергу, призводить до повільнішого висихання ядра і сім'ядолей у порівнянні з оболонкою. Тому вибір ефективного методу сушіння зерен сої є важливим аспектом у технології переробки даної культури. Вченими приділено багато уваги пошуку шляхів зниження затрат та розробці енергозберігаючих методів і засобів сушіння [2]. Існує велика кількість досліджень, де інтенсифікувати процес пропонується шляхом попередньої підготовки матеріалу до сушіння [3-6]. Особливо це стосується методу збільшення площі контакту сушильного агенту і матеріалу за рахунок подрібнення, перемішування, запобігання злипанню частинок, створення «киплячого» шару матеріалу, вібрації, ударних та акустичних дій.

Одним із способів досягнення бажаного результату під час підготовки сільськогосподарських матеріалів до сушіння є розсічення поверхні зерна. Таке незначне руйнування призведе не лише до збільшення площі контакту, а й дасть змогу інтенсивніше виводити вологу з внутрішніх шарів зерен внаслідок втрати їх цілісності. Це дозволить довести матеріал до кондиційної вологості лише за один прохід через сушарку, що не завжди можна досягти за звичайних умов. Підготовлені таким чином зерна сої надалі можуть використовуватися для отримання олії та на інші технічні і кормові потреби.

Отже, залишається актуальним проведення досліджень із сушіння сої з метою знаходження методу, який забезпечував би швидке та якісне виконання технологічного процесу при найменших питомих витратах.

Мета роботи – зниження енергетичних витрат при сушінні матеріалу в зерновій сушарці за рахунок інтенсифікації вологовидалення підготовленого матеріалу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати ефективність процесу сушіння зерен сої та обґрунтувати метод інтенсифікації вологовидалення підготовленого матеріалу;

- удосконалити математичні моделі переміщення зерен сої, їх удару об ножову пластину пристрою сушарки з врахуванням їх фізико-механічних властивостей;

- теоретично дослідити та встановити параметри пристрою сушарки із врахуванням утворених у ньому повітряних потоків, визначити зусилля, які необхідні для розсічення зерен сої, та вплив режимних параметрів пристрою на величину розсічення;

- визначити раціональні режими роботи зернової сушарки

Об'єкт досліджень. Процеси механічної обробки зерен сої шляхом їх розсічення та сушіння.

Предмет дослідження. Закономірності впливу параметрів пристрою сушарки на енерговитрати процесу сушіння.

Під час виконання теоретичних досліджень використано методи теорії сушіння, математичного моделювання та класичної механіки, математичний метод планування багатфакторного експерименту, із застосуванням статистичних методів оцінки отриманих даних.

Під час виконання роботи було підтверджено доцільність застосування механічного розсічення поверхні зерен сої для інтенсифікації подальшого їх сушіння, запропоновано критерій оцінки ефективності інтенсифікації сушіння за величиною коефіцієнта розсічення.

На основі вдосконаленої моделі ударної взаємодії зерен сої з ножовою пластинною деки пристрою підготовки до сушіння, яка враховує коефіцієнт відновлення і зусилля руйнування, теоретично обґрунтовано швидкість удару зерен.

Запропоновано метод інтенсифікації процесу сушіння зерен сої шляхом їх підготовки до сушіння. Створено пристрій підготовки до сушіння, що може встановлюватись у механізм завантаження сушарки та обґрунтовано його раціональні параметри.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ, МЕТА І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Біологічні особливості сої

Сою за вимогами до факторів життя можна віднести до тепло-, волого- і світлолюбних рослин, які крім того потребують високої культури землеробства. Кожна рослина сої з її листовою поверхнею і кореневою системою представляє унікальну маленьку біологічну фабрику, яка ефективно працює на сонячній енергії, азоті повітря, мінеральних речовинах орного і більш глибоких шарів ґрунту, встигає синтезувати за 100 днів вегетації найцінніші органічні сполуки -

білок, жир, вуглеводи, вітаміни, ферменти, а також підвищує родючість ґрунту, поліпшує, в першу чергу, його азотний баланс, дає можливість одержувати чисту продовольчу продукцію, поліпшує екологію [1, 7].

Вимоги до ґрунту. Сою можна культивувати в широкому діапазоні на добре дренованих землях і збирати високі врожаї на різних ґрунтах - чорноземних, каштанових, дерново-підзолистих та ін. Добрими для неї є суглинкові ґрунти. Важкі глинисті ґрунти можуть призводити до труднощів при сівбі та появі сходів, однак, якщо сходи з'явилися, в подальшому рослини можуть добре адаптуватися. Для одержання високого врожаю для неї найбільш придатні, окультурені, багаті гумусом та вапном, удобрені, пухкі, ґрунти, що легко прогріваються з доброю водо- і повітря-проникністю. Вона переносить високий рівень ґрунтових вод і рН ґрунтового розчину від 5,5 до 8,5, однак оптимальним для неї - рН 6,5-7. Коренева система потребує доброї аерації, структурного ґрунту. Вона добре росте на розпушених ґрунтах з об'ємною масою 0,9-1,2 г/см³. При підвищенні щільності до 1,27 г/см³ і більше, послаблюється ріст рослин, коренева система розміщується близько до поверхні ґрунту, на її коріннях мало формується бульбочок, у рослинах слабше відбувається фотосинтез і як результат, зменшується продуктивність рослин і знижується врожай на 5,1-7,5 ц/га і більше [8].

Вимоги до тепла. Соя - теплолюбна культура і одночасно пластична до умов вирощування, ареал її поширення - від екватора до 52-54° північної широти. Потреба її до тепла зростає від проростання насіння до сходів, потім - до цвітіння, зав'язі та формування насіння, а пізніше під час досягання вона зменшується. Мінімальна температура ґрунту для проростання сої - на глибині загортання насіння 6-7°C, достатня - 12-14°C, оптимальна - 15-18°C. Для росту проростків температура має бути на 2-3°C вищою, ніж для проростання насіння, а мінімальна для цієї фази - 8-10°C, достатня - 15-18°C, оптимальна - 20-22°C. Якщо після сходів встановилася тепла погода і є волога, рослини будуть більшими, а цвітіння настане раніше.

Ріст вегетативних і генеративних органів значною мірою залежить від теплового режиму. На період від цвітіння до повної стиглості сої припадає 2/3 всього тепла, необхідного для росту і розвитку її рослин, з деякими відхиленнями залежно від сортів і умов вирощування. Зниження температури на 0,5°C може затримувати цвітіння на 2-3 дні. Для формування репродуктивних органів сої сприятлива температура 18-19°C, оптимальна - 21-23°C; для цвітіння - мінімальна 16-18°C, сприятлива - 19-21°C, оптимальна - 22-25°C, максимальна близько 28°C; для формування бобів і насіння відповідно 13-14, 17-18 і 20-23°C, а для досягання - 7-8, 13-16, 18-20°C. У посівах при температурі 15-19°C насіння досягає за 10-15, а при більш високій - за 6-8 днів. При зниженні температури до 10-13°C листки поступово жовтіють і досягання затримується до 18-20 днів, а ще більше - при 8-9°C [9].

Вимоги до світла. Соя - культура короткого дня, її рослини досить чутливі до світла, сильно реагують на тривалість дня. Зменшення світлового дня прискорює цвітіння, скорочує вегетаційний період, змінює продуктивність рослин і врожайність посіву. Збільшення світлового дня уповільнює розвиток

сої, затримує початок цвітіння, розтягує період цвітіння, призводить до поганого запліднення квіток, їх абортивності, подовжує вегетаційний період. Тому добром сортів і строків сівби регулюють формування посіву так, щоб період утворення перших трійчастих листків припадав на короткий день. Не можна запізнюватися з сівбою, бо тоді у сої перший період росту і розвитку відбувається під час найбільш тривалого дня, який настає 22 червня, що розділяє період вегетації.

Слід враховувати, що зміна широти на 1° вже впливає на сорти, які сильно реагують на тривалість дня. Для більшості сортів оптимальна тривалість дня 13-16 год., причому сорти з сильно вираженою фотоперіодичною реакцією утворюють більше квіток і плодів при тривалості дня 10-12 годин, слабо реагуючі - при 14-16 год. Із просуванням на північ їх вегетаційний період збільшується. Скоростиглі сорти менше чутливі на тривалість дня, ніж середньостиглі й особливо пізньостиглі.

Сорти сої мають специфічні вимоги, фотоперіодизму на початку цвітіння, у неї вегетативний розвиток стимулюється довгим днем, а генеративний - коротким. Для різних груп сортів існують визначені границі тривалості світлового дня, за межами яких їх рослини зовсім не дають урожаю. Тому для кожного градуса географічної широти (100-120 км) повинні бути свої сорти, добре пристосовані до місцевих умов природного освітлення і тривалості дня, ґрунтів, теплового і водного режимів.

Вимоги до вологи. Соя - вимоглива до умов вологозабезпеченості. Найбільше вологи вона споживає у період цвітіння, формування і наливання бобів. Щоб одержати високий урожай, необхідно підтримувати вологість у ґрунті у період сходів - початок цвітіння на рівні 70% НВ, у період формування і наливання насіння - 80% і досягання - 60-70% НВ, при поєднанні з теплою погодою. Для формування врожаю зерна 30 ц/га вона витрачає 5-5,5 тис. м³/га води. При цьому для неї характерне нерівномірне використання вологи за фазами росту і розвитку рослин. Транспіраційний коефіцієнт у сої становить 500-650, що менше, ніж у гороху, бобів, ріпаку і соняшника [7-9].

Для набубнявіння і нормального проростання насіння потребує 130-160% води від своєї маси. Насіння сої набубнявіє швидше, ніж інших культур, однак проросток при нестачі вологи сильно пригнічується. У перший період вегетації - від сходів до початку цвітіння - вона споживає 15-30 м³/га води на добу і відзначається достатньо високою посухостійкістю. Для сої характерне нерівномірне використання води за фазами росту і розвитку рослин: водоспоживання за період сходів - гілкування становить 7-8%, гілкування - цвітіння - 20-22, цвітіння - формування бобів - 29-31, наливання бобів - досягання - 35-40%. Для сої критичним за волого споживанням є період цвітіння - наливання насіння, коли дефіцит води може призвести до різкого зниження врожаю.

Вимоги до умов мінерального живлення. Соя дуже вимоглива до культури землеробства і поживного режиму ґрунту. Засвоєння азоту рослинами сої у період вегетації швидко збільшується і досягає максимуму (5 кг/га за добу) за період цвітіння і формування бобів, після чого поступова знижується. Під час

формування врожаю азот розподіляється між окремими органами рослин. Фосфор соя з ґрунту починає засвоювати через 3-5 днів після з'явлення корінців, коли зменшується переміщення фосфатів із сім'ядолей. При високому рівні вмісту фосфору у ґрунті темпи споживання його збільшуються і досягають максимуму (0,45 кг/га за добу) у фазі формування бобів. Калій переміщується в рослинах сої швидше, ніж інші елементи живлення. Вже через 15 днів після сходів із сім'ядолей у проростки його надходить до 50%, через 38 днів - 80%. Найбільше калію (1,9 кг/га за добу) рослини засвоюють через 85 днів після сходів. Хоч калійні добрива самі не мають вирішального значення для росту і розвитку сої, все ж тільки при поєднанні азотних, фосфорних і калійних добрив спостерігається інтенсивний ріст і розвиток рослин, формується високий урожай [8].

Кальцій у початковій фазі росту і розвитку соя засвоює слабо, а потім більше і досягає максимуму (3 кг/га за добу) на 70-80-й день після сходів. Рослини її постійно відчують потребу в цьому елементі. При недостатчі в ґрунті магнію рослини проявляють ознаки магнієвого голодування вже через 10 днів після сходів. Засвоєння цього елемента з часом збільшується і досягає максимуму (1,5 кг/га за добу) на 70-й день після появи сходів. На бідних цим елементом ґрунтах внесення магнію підвищує урожай сої на 1,8-4,5 ц/га. Засвоєння соєю сірки корелює з кривою нагромадження сухої речовини і досягає максимуму (1,7 кг/га за добу) у фазі формування бобів. Молібден на дерново-підзолистих ґрунтах стимулює процес фіксації азоту бульбочковими бактеріями; сприяє синтезу хлорофілу, бере участь у фосфорному обміні. На удобрених вапном ґрунтах з рН 5,8-6,2 його рекомендується застосовувати шляхом обробки насіння до сівби.

Симптоми марганцевого голодування сої найбільш часто спостерігаються при вирощуванні її на ґрунтах, нейтралізованих вапном. Низький рівень доступного рослинам марганцю буває також на ґрунтах з високим рівнем підґрунтових вод і з рН вище 6,3, коли він переходить у розчинну форму і вимивається. Ефективний при локальному внесенні та позакореновому підживленні, менш ефективний при внесенні розкидним способом. Бор необхідний для нормального поділу і росту клітин, обміну речовин у рослині. Недостатнє живлення рослин бором спостерігається рідко, і легко усувається при внесенні його в рядки при сівбі, але це треба робити обережно, бо високі його норми токсичні для сої. При збільшенні концентрації у ґрунті кальцію зменшується токсичність бору.

Дефіцит цинку проявляється у з'явленні на листках коричнево-жовтого забарвлення. Симптоми недостатку його порівняно сильніше проявляються при низьких температурах і надмірному зволоженні, потім зникають при встановленні теплої і сонячної погоди. Локальне внесення його в ґрунт або обприскування посівів розчином поновлює необхідну рівновагу. Помітно ріст затримує нестача міді. Цей елемент вступає в окислювально-відновні реакції, підвищує активність ферментів [1, 9,10].

Біологічна фіксація азоту. Соя, як і інші бобові культури, здатна за допомогою бульбочкових бактерій фіксувати азот із повітря, причому, вона

фіксує його більше, ніж інші однорічні бобові культури, але менше, ніж багаторічні бобові трави. Соеві бульбочкові бактерії, що живуть на коріннях її рослин, відсутні в більшості типів ґрунтів. При інокуляції насіння на коренях сої формуються бульбочкові бактерії, які після збирання врожаю залишаються у ґрунті життєздатними протягом 3-5 років. Якщо сою вирощують на даному полі вперше, для одержання високого врожаю необхідно провести інокуляцію насіння бульбочковими бактеріями *Rhizobium*. Тому на нових полях сої рекомендується застосовувати гранульовані інокулянти у нормі 5 кг/га на широкорядних посівах і до 10 кг/га у звужених. В останні роки широко розповсюджені порошкові та рідкі інокулянти, які застосовують під час обробки насіння сої перед сівбою. При багаторічному вирощуванні сої у коротких ланках сівозміни наступне застосування інокулянтів не завжди обов'язкове, бо не сприяє підвищенню врожайності. Якщо сою вирощували на даному полі не більше 1-2 років або не вирощували протягом ряду років, виникає необхідність інокуляції насіння порошкоподібними торф'яними інокулянтами (ризоторфіном, ризобофітом, ризогуміном) - для забезпечення утворення бульбочок. Коли ж вони на коренях не утворюються, тоді на початку цвітіння можна внести у ґрунт 45 кг/га азоту [11].

Бульбочкові бактерії *Rhizobium jarıncum* проникають через клітини коркової паренхіми в коріння молодих рослин сої, де вони живуть і розмножуються. В перециклі кореня починається поділ і проростання паренхімної тканини, яка виступає з покривною тканиною у вигляді виростів, що називаються бульбочками. В середині них знаходиться велика кількість бульбочкових бактерій, які мають властивість фіксувати атмосферний азот, у форми, легкозасвоювані соєю, в наступному дифундуючи його у бульбочки і ґрунт. Перші бульбочки на її коренях з'являються протягом одного тижня після проростання, а через 10-14 днів вони вже можуть задовольняти більшу частину потреби рослин в азоті. Активність бульбочок продовжується 6-7 тижнів, а нові утворюються протягом більшої частини життя рослин. Соя засвоює мінеральні сполуки азоту, які надходять у результаті азотфіксуючої діяльності бульбочкових бактерій і живляться готовими вуглеводами в клітинах вторинної кори кореня. За нормальних умов на одній рослині утворюється в середньому від 21 до 80 бульбочок і більше. На коренях сої вони формуються в основному в орному шарі, на головному корені та бокових коріннях, основна їх кількість розміщується у шарі ґрунту 0-15 см.

У сої фіксація азоту бульбочковими бактеріями і надходження його в рослину найбільш інтенсивно відбуваються в фазі цвітіння, формування і росту бобів при температурі повітря 24-28°C і відносній вологості 40-60%. Існує суворий температурний режим для життєдіяльності бульбочок - близько 24-25°C. На структурних ґрунтах з хорошою аерацією бульбочки утворюються інтенсивніше, ніж: на ущільнених і безструктурних.

Ефективність засвоєння азоту повітря бульбочковими бактеріями залежить від активності бульбочок. Розрізняють активні й не активні бульбочки. Активні - звичайно, круглі, рожевого кольору, щільні, в них бактерії добре засвоюють азот повітря. Краще розвиваються бульбочки на коренях на структурних ґрунтах з

хорошою аерацією, причому при низькому вмісті в ґрунті засвоюваного азоту, бульбочки можуть фіксувати його в кількості, достатній для одержання врожаю 40,8 ц/га з рівнем фіксованого азоту 180 кг/га; на ґрунтах з високим вмістом азоту засвоєння його бульбочковими бактеріями невелике [10, 11].

Плоди – боби, за формою – прямі, мечеподібні, злегка зігнуті, шабле-або серпоподібні, плоскі чи опуклі, з гладенькими або чоткоподібними стулками, мають світле, коричневе чи буре забарвлення, з рудуватим опушенням. Довжина зерен коливається в межах 2,5... 6 см, ширина – 0,5... 1,4 см, вміст насінин – 1... 4 шт, рідше 1 або 4. Висота прикріплення нижніх зерен над поверхнею ґрунту – від 2... 3 до 20... 25 см. Вся рослина сої (стебло, листя, плоди) опушена.

Рисунок 1.6 – Плоди сої

Насіння сої чорне, коричневе, зелене і жовте з різними їх відтінками. Форма – округла, овальна, округло-овальна, овально-видовжена, плоска або опукла. Маса 1000 насінин від 40 до 500 г. Сім'ядолі жовті або зелені. Вони становлять близько 90% маси зернини. При проростанні зерен сім'ядолі виносяться на поверхню ґрунту.

Рисунок 1.7 – Насіння сої

Насінева оболонка у одних сортів гладка і блискуча, у інших – матова. На насіневій оболонці у деяких сортів бувають тріщини (дефекти), зв'язані з нерівномірним ростом сім'ядолей і оболонки. Рубчик крупний: довжина 2... 5 мм, ширина 0,5... 1,2 мм, світлого, сірого або темно-коричневого кольору [29,32].

1.2. Аналіз технологій і засобів післязбиральної обробки сої

Завершальний і надзвичайно важливим етапом у вирощуванні сої є своєчасне ретельне збирання врожаю, яке у загальному комплексі робіт по вирощуванню сої є найбільш складним і трудомістким технологічним процесом. Пояснюється це специфікою біологічних особливостей рослин у період дозрівання. Соя, як і інші зернобобові культури, дозріває нерівномірно, її боби на стеблах розміщені низько, а досягаючи мають високу вологість, що призводить до висипання і травмування зерен під час збирання врожаю [35].

Збір врожаю розпочинають у фазі повного дозрівання зерен, коли в рослин обпадуть листки, боби побуріють та легко відокремлюється від ступок. Під час струшування боби "гримлять", їх вологість знижується до 14...15%. За низької температури й вологого повітря плоди загнивають, а в спекотні дні розтріскуються, тому збирання потрібно проводити в стислі терміни.

Як правило посіви сої дозрівають без використання десикантів. Проте з метою прискорення досягання пізньостиглих сортів можливе їх використання. Інститут олійних культур рекомендує проводити десикацію за побуріння зерен на гілках нижнього й середнього ярусів рослини, коли вологість зерна знижується до 40...45%. Для цього можна використати препарати реглон у дозі 1,5...2,0 л/га, харвейт – 1,5...2,0 л/га, баста – 1,5...2,5 л/га. Цей прийом прискорює збирання за рахунок скидання листя та підсихання стебел та стручків. Продуктивність комбайнів після десикації підвищується на 30...50 % [36,37].

Сою найчастіше збирають прямим комбайнуванням. Дослідження двофазного способу збирання сої показали, що дозрівання та підсихання зерен у валках проходить значно повільніше, ніж на корені, а при великих кількостях опадів можливе підвищення вологості зерен.

Збирають сою звичайними зернозбиральними комбайнами (рис. 1.8), але із встановлення спеціальної різальної частини (рис. 1.9) [37].

Рисунок 1.8 – Процес збирання сої із використанням комбайнів:

Рисунок 1.9 – Приставки для збирання сої

В умовах господарств післязбиральний обробіток зерен сої доцільно проводити на зерноочисних агрегатах, зерносушильно-очисних комплексах, механізованих лініях і окремих машинах. Зібрані зерна сої транспортують на тік, де його очищують від необмолочених зерен, сміття і травмованих зерен, з метою уникнення самозігрівання.

Для очищення великих партій зерен сої використовують зерноочисні комплекси: ЗАВ-20, ЗАВ-40, КЗС-25, КЗС-50 (рис. 1.10). Вони призначені для доведення матеріалу до базисних норм за один хід і забезпечують приймання, очищення, відвантаження та зберігання зерен вологістю не вище 16 % [37,38].

Рисунок 1.10 – Зерноочисні комплекси

Зерносушильні комплекси, як і агрегати ЗАВ для обробки насінного зерна, комплектуються насіннеочисними приставками відповідної продуктивності. Для очистки малих партій зерен сої доцільно використати насіннеочисні машини ОВП-20А, ОЗП-20, ОС-4,5, САД-10, ОВС-25, ЗВС-20А, "Вібрант-ДО-521" та інші (рис. 1.11) [337,38].

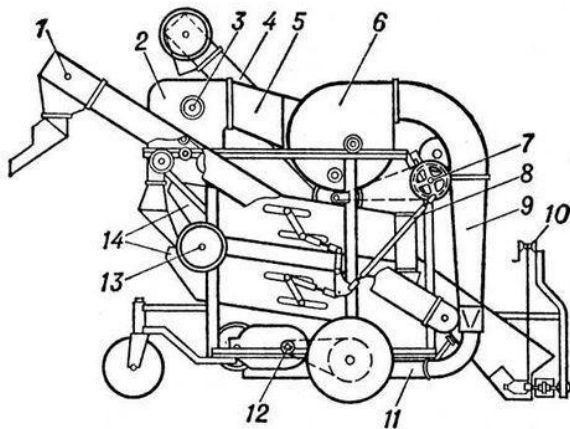


Рисунок 1.11 – Зерноочисна машина ОВП-20А: принципова схема:

1 – відвантажувальний транспортер; 2 – приймальна камера; 3 – шнек; 4 – завантажувальний транспортер; 5 – повітропровід; 6 – вентилятор; 7 – привідний вал; 8 – шатун; 9 – інерційний пиловіддільник; 10 – лебідка підйому живильника; 11 – пневмотранспортер відходів; 12 – механізм самопересування;

13 – ексцентриковий вал; 14 – решітний стан

Також очищення зерен сої можна проводити на складних насіннеочисних машинах після їх переобладнання: САД-10, „Алмаз”, СВУ-5, СМ-4 (рис. 1.12) [37].

Після усіх стадій очищення, при умові високої вологості зерен, його піддають штучному сушінню.

Рисунок 1.12 – Машини для очищення і сортування:

Проте у сільському господарстві найбільшого поширення набули шахтні сушарки, які є установками безперервної дії.

Сушильна камера таких сушарок являє собою, вежу значної висоти (рис. 1.14, а). При сталому режимі роботи зерно під дією сили тяжіння рухається зверху вниз і пронизується сушильним агентом (гарячим повітрям). Матеріал рухається по шахті суцільною масою, швидкість його просування регулюється випускним пристроєм внизу шахти. Випускний пристрій в залежності від конструкції може випускати зерно періодично або безперервно [43,44].

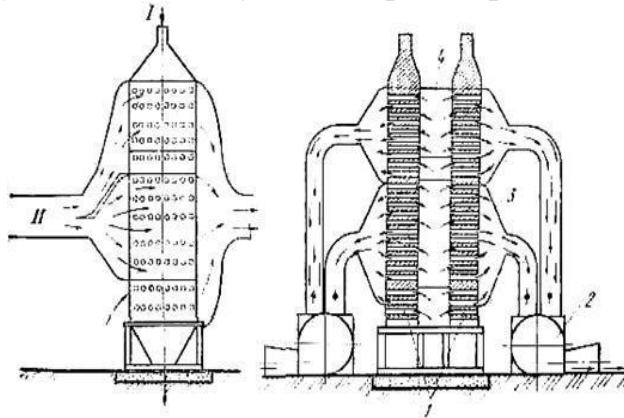


Рисунок 1.13 – Шахтна сушарка: 1 – шахти; 2 – вентилятор; 3 – дифузор; 4 – напірна камера агента сушіння; – зерно; II – агент сушіння

Рисунок 1.14 – Повітророзподільні робочі органи шахтної сушарки:

Повітророзподільний пристрій працює таким чином: шахта сушарки заповнюється матеріалом, через відкриті отвори в підвідні короба 1 з топкового блоку по каналу подається сушильний агент, який проходить по всій його довжині, а потім – через потік матеріалу, нагріваючи його, і видаляється через відвідні короби 2. При цьому взаємодія зернового потоку і повітря відбувається в різних напрямках (в прямому , зворотному і поперечному) (рис. 1.15) [44].

Рисунок 1.15 – Схема руху зерна і повітря в шахтних сушарках:

Робочий процес зерносушарки СЗШ-16А протікає наступним чином (рис. 1.16) [42]. Попередньо очищений вологий матеріал норіями 7 і 9 подається в надсушильний бункер 6 кожної шахти і заповнює простір між коробами. Коли рівень зерна в бункері 6 досягне верхнього датчика, автоматика включає привід кареток розвантажувального пристрою і зерно під дією сили тяжіння рухається вниз. Теплоносій входить через вікна в стінці в підвідні короба 4, виходить з-під їх бічних граней, просочується крізь шар зерна, надходить знизу у відвідні короба 2 і виводиться з сушильної камери вентилятором 1.

Рисунок 1.16 – Зерносушарка СЗШ-16А

Проте і шахтні сушарки мають серйозні технологічні недоліки. Головний з них полягає в обмеженому видаленні вологи за один пропуск зерна через шахту – не більше 4...6%. Тому для повного висушування зерна іноді доводиться проводити обробку в кілька прийомів. Перетримка частково просушеного зерна через повторні пропуски сушарки є причиною зниження його якості. У шахтних сушарках складно сушити зерно вологістю вище 25 % і особливо вище 30 %. Дана зернова маса має погану сипкість і схильна до зависання між

коробами, що збільшує тривалість обробки, перегрів і навіть псування матеріалу, а іноді загоряння легких органічних домішок.

Рисунок 1.17 – Бункер активного вентиляювання БВ-25:

Бункери активного вентиляювання характеризуються повною механізацією завантаження і вивантаження, що дозволяє забезпечити високу економічну ефективність.

Сьогодні широкого розповсюдження набули сушарки модульного типу закордонного виробництва, або - колонкові (рис. 1.18., 1.19) [42,43].

Рисунок 1.18 – Зерносушарки: *a* – Farm Fans; *б* – Delux

Модульні (колонкові) сушарки – це установки, робота яких ґрунтується на принципі поперечної подачі сушильного агенту (гарячого і холодного) через шар зерна, що протікає між стінками з перфорованих листів. Даний процес сушіння відбувається у так званих модулях (секціях), кількість яких залежить від продуктивності сушильної машини.

Рисунок 1.19 – Сушарка «Sukur»: – загальний вигляд; *б* – функціональна схема:

Принцип роботи таких сушарок наступний:

- зерно заповнює верхню частину сушарки, де розташований шнек, що розподіляє зерно по всій довжині сушарки й завантажує його у колони;
- вентилятор нагнітає повітря з навколишнього середовища, що ділиться на два потоки: 1-й потік - надходить у камеру змішування, а 2-й - гріється палиником. У камері змішування за допомогою відбивачів обидва потоки змішуються, забезпечуючи цим однакову температури сушіння в будь-якій точці робочої камери;
- внутрішня і зовнішня стінки колони перфоровані, що забезпечує контакт сушильного агенту з шаром зерна;
- дозуючі вальці, що розташовані у нижній частині робочої камери сушарки, регулюють час знаходження зерна в колонах, забезпечуючи потрібний режим сушіння.

Процес сушіння зерен сої в зерносушарках Sukur відбувається таким чином: зерно подається в завантажувальний бункер 1 із сховища за допомогою пристрою подачі зерна (норії, шнекового або стрічкового транспортера). У верхній частині бункера для вологого матеріалу розташований датчик заповнення зерносушарки 3 який контролює рівень заповнення зерносушарки матеріалом.

В процесі заповнення зерносушарки, завантажувальний шнек 2, розташований в бункері для вологого зерна, рівномірно розподіляє зерно за всією довжиною зерносушарки. Після того, як насіневі колони 7 (простір між внутрішніми і зовнішніми металевими перфорованими листами обшивки камери сушки, розділеними перегородками) повністю заповняться зерном, спрацьовує датчик заповнення зерносушарки 3 і подається команда на відключення завантажувального шнека зерносушарки і допоміжного пристрою подачі матеріалу, а також команда запуску вентиляторів 4 і паливного блоку. Протягом 100 секунд температура в камері сушіння стабілізується, після чого оператор формує бажаний режим сушіння. Після закінчення сушіння, матеріал вивантажується із

зерносушарки за допомогою дозуючих вальців 6 і вивантажувального шнека зерносушарки 5.

Основною перевагою сушарок фірми «Sukup» є те, що дана компанія розробила і запатентувала "хрестовидну схему руху зерна через зерносушарку", яка недопускає перегріву зерна і збалансовує рівень вологості зерна при сушінні в модульних зерносушарках. Дана іноваційна система руху зерна забезпечує переміщення його з одного боку зерносушарки на протилежний при переході зерна з верхнього модуля в нижній.

Основними недоліками модульних сушарок є:

- під час руху вертикального стовпа зерна відбувається його тертя по внутрішній і зовнішній стінці робочої колони, що призводить до травм ування зовнішньої оболонки насінин;

- можливе закупорювання каналів зерна у напрямку його руху, особливо в місцях розміщення внутрішніх конструкцій, що призводить до значних локальних місцевих перегрівів;

- дрібні частини оболонки зернини, які відокремлюються у процесі сушіння забивають зовнішні перфоровані листи та припинюють рух крізь шар зерна і засмічену перфорацію, різко знижуючи ефективність сушіння.

1.3. Методи і засоби підготовки зернового матеріалу до сушіння шляхом руйнування його поверхневих шарів

Існує дуже багато досліджень, де інтенсифікувати процес сушіння сільськогосподарських матеріалів пропонується шляхом попередньої підготовки матеріалу до сушіння. Особливо цікаві та до кінця не розкриті дослідження даного напрямку, що стосуються методу збільшення площі контакту сушильного агента і матеріалу, що досягаються різними способами: подрібненням, диспергуванням, розпиллом, перемішуванням, запобіганням злипанню частинок, створенням зваженого або киплячого шару матеріалу, вібрацією, ударними та акустичними діями. [2-7].

Проаналізувавши усі вищеописані напрямки, встановлено, що найбільш оптимальним методом інтенсифікації подальшого сушіння зерен сої є руйнування їх поверхневих шарів. В результаті цього було розглянуто усі способи, які б забезпечили таку попередню підготовку матеріалу (рис. 1.20) [45-51].

Руйнування матеріалу стисненням і зсувом полягає у впливі на плід двох робочих поверхонь, відстань між якими менше розміру зерна (рис. 1.20, а). Обов'язковою умовою є рух однієї поверхні відносно іншої. Це можливо у випадку, коли одна з поверхонь рухома, а інша ні, або коли швидкість поверхонь різна. Діючі сили при стисненні і терті зводяться до стиснення і тертя кочення з ковзанням.

Рисунок 1.20 – Способи руйнування оболонки зернини:

Нелодіком даного методу можна назвати те, що з підвищеним вмістом вологості сої може відбутися повне сплюснення насінин і втрата їх форми.

Для здійснення руйнування оболонки зерен сої більш раціональним і контрольованим є спосіб одноразового удару. Проте і він має свої недоліки: поверхня контакту деки з матеріалом має хвилясту форму і кут зустрічі зернини

з нею має випадковий характер. Це потрібно врахувати при проектуванні пристрою підготовки зерен сої до сушіння.

Руйнування оболонки зерен сої тертям об абразивну та інші тверді поверхні проходить в робочій зоні обрушувальної машини, завдяки впливу рухо-мої абразивної поверхні, яка поступово зчищає оболонку із плоду (рис.1.20,в). Основним недоліком даного методу руйнування оболонки зернини сої є те, що обробка поверхні абразивними елементами забезпечує повне шліфування оболонки плоду, що призводить до значних втрат у вигляді лузги і утворення пилу. Також технологічна ефективність такого методу досягається в результаті інтенсивного тертя в значному робочому об'ємі, в результаті чого даний процес лушення є енергоємним.

Для руйнування оболонки зерен сої з метою попередньої підготовки матеріалу до сушіння, можна застосовувати обрушувальні машини, що широко застосовуються у круп'яному виробництві. Лушення як спосіб очищення застосовується для плівчастих зернових і зернобобових культур з метою видалення квіткових, плодових і частково насінневих оболонок [46].

Для реалізації усіх вищеописаних методів руйнування оболонки сипких сільськогосподарських матеріалів застосовують багато типів машин. Принцип дії більшості машин можна звести до чотирьох основних способів впливу робочих органів на плід: стисненням і зсувом (або тертям), багаторазовим і одноразовим ударом, тертям об абразивну та інші тверді поверхні, комплексним впливом (рис. 1.21) [45,46,48].

На основі розглянутої класифікації методів руйнування оболонки сільськогосподарських матеріалів можна провести групування машин за видом впливу робочих органів на матеріал:

1. *Стиснення і зсув (або тертя)*. До цієї групи відносяться машини, в яких матеріал піддають механічній дії зусиллями стиснення і тертя між торцевими поверхнями двох абразивних дисків (постава) або в зазорі між обертовим валком і нерухомою декою (вальцедекові верстати) (рис. 1.21, а).

Відмінність цих машин полягає в траєкторії руху матеріалу в роботі і ча-су впливу зусиль на них. Також до цієї групи відносяться машини, в яких зерно піддається механічній дії тільки в результаті сил стиснення та зсуву.

Для цього використовують пару прогумованих (еластичних) вальців, встановлених з певним зазором, які обертаються назустріч один одному з різною коловою швидкістю – вальцеві станки (рис. 1.21, б). Руйнування оболонок відбувається внаслідок комбінованого способу їх навантажування – стиснення та зсуву, що забезпечує також вибіркове подрібнення.

Рисунок 1.21 – Принципові схеми робочих органів деформуючих машин з різними видами впливу на матеріал:

Отже, принцип руйнування оболонки застосовується у наступних машинах: стиснення і тертя - вальцедекові станки, луцильні постави; стиснення і зсув- різні конструкції машин з прогумованими вальцями (вальцеві станки).

2. *Багаторазовий та одоразовий удар*. Багаторазовий удар досягається обертовими бичами (лопатами), які відкидають матеріал на тверду поверхню,

завдяки чому відбувається руйнування його оболонок (рис. 1.21, в). При одноразовому ударі матеріал розганяється за допомогою обертового диска і вдаряється в нерухому кільцеву обичайку (рис. 1.21, г).

Принцип багаторазового удару здійснюється в оббивальних та інших лопатевих машинах, а одноразовим – у відцентрових лушильниках.

Також для простого (грубого) подрібнення застосовують машини ударної дії, в яких подрібнюються частинки руйнуються під дією чистого удару (дисківі подрібнювачі, дезінтегратори) або під дією удару, супроводжуваного стиранням (молоткові дробарки).

3. *Тертя об абразивну поверхню.* Процес руйнування у таких машинах відбувається в результаті тривалої дуї сил тертя між сам матеріалом і безпосередньо із взаємодією з абразивною поверхнею (рис. 1.21, д). Найбільшого розповсюдження отримали машини з горизонтальним розміщенням осі робочого валу: голлендри, горизонтально - шліфувальні машини. Також за таким принципом працює обрушувально-шліфувальна машина А1-ЗШН-3.

4. *Комплексний вплив.* Дана група машин характеризується тим, що оболонка матеріалів руйнується за допомогою струменя повітряного потоку і в результаті дії комплексу різних факторів (перепад тисків, різниці швидкостей, дотичних сил, та ін), що виникають при обтіканні продукту високошвидкісним (звуковим і надзвуковим) повітряним струменем (рис. 1.21, е). До цієї групи відносяться різні типи аеросушильних установок, що характеризуються вони відсутністю рухомих робочих органів.

Основною задачею аналізу вищеописаних методів руйнування було знаходження такого контакту робочого органу розробленого пристрою з зерниною, який би забезпечив часткове руйнування оболонки, а не повну втрату її цілісності.

Аналізуючи усі способи руйнування оболонки і машини, за допомогою яких можна здійснити дану операцію, можна зробити висновок, що не всі вищеописані методи доцільно застосувати для зерен сої з метою збільшення площі контакту сушильного агента і матеріалу під час сушіння. Враховуючи фізико-механічні властивості матеріалу, початкову вологість та щільність зростання оболонки з ядром, необхідно знайти оптимальний варіант даного способу підготовки матеріалу до сушіння.

1.4. Огляд теоретичний дослідження сушіння зернових сільськогосподарських матеріалів

Процес сушіння зернових сільськогосподарських матеріалів являється не тільки теплофізичним, а й технологічним процесом, характер протікання якого залежить від зв'язку вологи з матеріалом. В основі теорії сушіння будь-яких сільськогосподарських матеріалів лежить закономірність переносу тепла і вологи (масо та теплообмін) вологого матеріалу при взаємодії його з сушильним агентом.

Теорія сушіння являється важливим розділом науки про тепло та масообмін. Однак процес сушіння вологих матеріалів являється одночасно і технологічним процесом, при якому змінюються структурно-механічні, біохімічні та технологічні властивості матеріалу. Зміна таких властивостей обумовлена тим,

щов процесі сушіння відбувається зміна форми зв'язку вологи з матеріалом і її часткове видалення шляхом випаровування.

Зерна сої, як і більшість сипких сільськогосподарських матеріалів відносяться до капілярно-пористих колоїдних тіл.

Величезний внесок у розробку теорії сушіння внесли фундаментальні праці радянського теплофізика, професора, академіка та винахідник А.В. Ликова. Даний науковець відкрив явище термічної дифузії вологи в капілярно-пористих тілах (ефект Ликова), яке допомогло розкрити механізм розтріскування вологих матеріалів і перенесення водорозчинних речовин в процесі сушіння, а також запропонована система диференціальних рівнянь для опису цих процесів (рівняння Ликова), методика визначення раціонального та оптимального режимів сушіння.

Дослідженнями процесів сушіння рослинних сільськогосподарських матеріалів займались С.Д. Птіцин, М.Ю. Лур'є, А.С. Гінзбург, Г.С. Окунь, О.С. Крішер, П.Д. Лебедев, А.В. Голубкович, Б.І. Котов, В.Б. Ковальов, В.І. Зеленко, В.І. Петрушявічюс, В.П. Горячкін та багатьох інших дослідників.[2,52–61] Ними встановлені закономірності протікання процесів сушіння, впливу температури, швидкості сушильного агента та інших визначальних факторів, їх допустимі значення на тривалість процесу сушіння, схожість та якість висушеного матеріалу. За допомогою їх досліджень, була вирішена система рівнянь тепло та вологопереносу для різних умов взаємодії капілярно-пористих тіл з навколишнім середовищем, яка представляє собою аналітичну теорію взаємозв'язаного тепло та масо переносу.

В області технології сушіння найбільш вагоме значення має наука про форми зв'язку вологи з матеріалом, створена академіком П.А. Ребіндером. Також велике значення в технології сушіння має місце фізико-хімічна механіка, яка також була широко розкрита даним науковцем.

Аналіз фізико-технологічних процесів теплообміну при сушінні різних сільськогосподарських матеріалів присвячені роботи П.Д. Лебедева, Г.К. Філоненка, Б.І. Котова, І.П. Копьева та інших дослідників.

Для проведення конвективного сушіння сільськогосподарських матеріалів можна застосовувати відому методику, в основу якого покладено спрощений механізм тепло- і масообміну, опис якого можна представити системою наступних диференціальних рівнянь[54,55]:

(1.1)

(1.2)

(1.3)

(1.4)

де t – температура сушильного агента $^{\circ}\text{C}$; d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря; W – вологість матеріалу, %; θ – температура матеріалу $^{\circ}\text{C}$;

V – швидкість сушильного агента, м/с; c_m , c_n – теплоємність матеріалу і повітря, кДж/кг $^{\circ}\text{C}$; e – пористість шару матеріалу; r' – прихована теплота паро-

утворення води, кДж/кг; α_q – коефіцієнт тепловіддачі, ккал/кг·год, °С; γ_m – об'ємна маса матеріалу, кг/м³; γ_n – питома вага повітря, кг/м³; K – коефіцієнт сушіння, год⁻¹; W_p – рівноважна вологість матеріалу %; x – просторова координата, м; τ – час, год.

Рівняння (1.1) представляє собою закон збереження енергії, (1.2) – закон збереження речовини, (1.3 і 1.4) – закони тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Дана система диференціальних рівнянь найбільш точно описує процес сушіння потокової маси насінневого матеріалу, в інших випадках отримані математичні вирази дозволяють характеризувати лише фізичний зміст процесу сушіння.

Також одним із напрямків аналітичного опису процесу конвективного сушіння товстого шару матеріалу можна вважати дослідження закономірності руху зони сушіння. З метою визначення температури і вологості в будь-якій точці у певний момент часу можна застосувати наступні диференціальні рівняння:

$$\frac{dU}{d\tau} = a_{11} \cdot \nabla^2 \cdot U + a_{12} \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (1.5)$$

$$\frac{dU}{d\tau} = a_{12} \cdot \nabla^2 \cdot U + a_{22} \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (1.6)$$

де U – вологовміст матеріалу, кг/кг; a_i – теплофізичні коефіцієнти перенесення; ∇^2 – оператор Лапласа; T – температура, °С.

Дослідженням механізмів, які використовують для сушіння сільськогосподарських матеріалів, підготовки їх перед сушінням і пристроїв для зниження енерговитрат під час сушіння займались Рогатинський Р.М., Мелегов В.І., Зеленко В.І., Ковальов М.М., Боярчук Ю.І., Шаршунов В.А., Ді-дуч В.Ф., Панасюк С.Г., Дударев І.М., Забродоцька Л. Ю. та інші. Дані вчені досліджували процес підготовки певного сільськогосподарського матеріалу до сушіння, механізми реалізації процесу видалення вологості та розроблювали нові методи сушіння, які б забезпечували інтенсивність видалення надлишкової вологості з мінімальними енерговитратами.

Раціональні методи сушіння зернових продуктів та їх технічна реалізація в загальному випадку визначаються сукупністю теплових, гідродинамічних і механічних впливів, забезпечуючи найкращі (раціональні) для вихідного матеріалу режими проведення процесу. Існуючі положення загальної теорії тепло- і масо переносу А.В. Лыкова, А.С. Гинзбурга, Н.Н. Гринчика та Г.С. Шу-бина [57-61] в дисперсних середовищах дозволяють виявити і оцінити ефективність нових методів і напрямків інтенсифікації процесу сушіння і теплофізичні ефекти використання різних видів механічних впливів (плющення, подрібнення, руйнування поверхні, тощо) на матеріал і гідродинамічних дій сушильного агента. Аналізуючи літературні джерела даних науковців можна стверджувати, що інтенсифікація сушіння може бути досягнута шляхом збільшення коефіцієнтів переносу та зміною потенціалів рушійних сил:

Вивчаючи сушіння одиничного зернини сої можна спираючись на дослідження Лыкова А.В. та Исаченко В.П., застосувавши їх відому методику теплопровідності при охолодженні кулі [60,63,64].

Диференціальне рівняння теплопровідності для шару в даному випадку може бути записане так:

$$\frac{\partial [rT(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rT(r, \tau)]}{\partial r^2};$$

$$(\tau > 0; 0 < r < R).$$

Початкові і граничні умови наступні:

$$T(r, 0) = f(r);$$

$$-\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} + H [T_c - T(R, \tau)] = 0;$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, T(0, \tau) \neq \infty.$$

(1.7)
(1.8)
(1.9)
(1.10)

Вирішення поставленої задачі можливе за допомогою використання різних методів: операційним або ж методом розділення змінних.

Кіцеве рішення поставленої задачі матиме вигляд:

$$\frac{\sin \mu \frac{r}{R}}{\mu} \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (1.11)$$

Аналіз літературних джерел підтверджує, що процес підготовки зерен сої до сушіння мало вивчений. Тому доцільно обґрунтувати параметри розробленого пристрою та дослідити його вплив на перебіг процесу конвективного сушіння. Це свідчить, що актуальним завданням є розробка нового методу інтенсифікації сушіння зерен сої шляхом підготовки їх до сушіння.

1.5. Висновки до розділу

Після проведення детального аналізу літературних джерел, що стосуються біологічних особливостей сої, а також технологій і засобів післязбиральної обробки даної сільськогосподарської культури, можна підсумувати наступне:

1. Соя - найбільш цінна стратегічна олійна культура, яка є прекрасним джерелом рослинного білка, а за кількістю, багатством і розманітністю життєво

необхідних речовин у зерні не має собі рівних. Останні десятиріччя характеризуються винятковим розвитком її виробництва, а відведені площі для її вирощування щороку збільшуються.

2. Завершальним і надзвичайно важливим етапом у вирощуванні сої є проведення її своєчасного збирання. Оптимальна вологість для збору даної культури повинна бути меншою 15-16%, що не завжди можливо досягти при різних погодніх умовах. Тому, з метою уникнення самозігрівання, зібрану комбайнами сою потрібно негайно довести до значення кондиційної вологості 12-13% за допомогою штучного сушіння.

3. Сушіння зерен сої ускладнюється тим, що плоди порівняно містять велику кількість білка, більші за розміром, щільні та мають структурно відособлені оболонки, а тому й меншу поверхню випаровування, що значно знижує їх вологовіддачу. Окрім того, процес сушіння є надто енерговитратним. Тому вибір раціонального і енергозберігаючого методу сушіння є дуже важливим моментом у технології обробки даної культури.

4. Встановлено, що реалізація традиційних способів конвективного сушіння (зерна сої, інших олійних культур) в існуючих високотемпературних зерносушарках практично досягла межі вдосконалення і подальше підвищення їх продуктивності можливе шляхом попередньої обробки самого об'єкта сушіння – зерноматеріалу. Перспективним напрямком інтенсифікації процесу конвективного сушіння зерна сої є штучне збільшення поверхні випаровування шляхом розсічення поверхневого шару зерен.

5. Для збільшення контактної площі сушильного агенту та зерен сої, з метою більш інтенсивного вологовидалення, доцільно проводити попередню підготовку матеріалу.

6. Для руйнування оболонки матеріалу можна застосовувати обрушувальні машини. Принцип дії більшості машин можна звести до чотирьох основних способів впливу робочих органів на плід: стисненням і зсувом (або тертям), багаторазовим і одноразовим ударом, тертям об абразивну та інші тверді поверхні, комплексним впливом.

7. Неможливість контролювання ступеня розсічення спонукають до пошуку нових методів попередньої підготовки зерен сої до сушіння та розробки нових конструкцій пристроїв для їх реалізації з метою інтенсифікації подальшого сушіння.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРЕН СОЇ

2.1. Аналіз методів інтенсифікації сушіння зерен сої та розробка конструкції пристрою підготовки їх до сушіння

У зв'язку із зростанням виробництва різних сільськогосподарських матеріалів, підвищенням вимог до їх якості та удосконаленням технологій переробки виникає необхідність у розробці нових методів сушіння, які б забезпечували високу якість, максимальну механізацію та інтенсифікацію процесу.

Інтенсифікація та механізація процесу сушіння може бути досягнута різними методами (рис. 2.1): підготовкою матеріалу, удосконаленням відомих режимів сушіння, наявних конструкцій сушарок та розробкою нових [2-6].

Теорія і практика сушіння свідчать про те, що будь-яке удосконалення сушарки, що сприяє підвищенню її продуктивності, як результат і інтенсифікації процесу сушіння, в тій чи іншій мірі веде до зниження витрат енергії на проведення даного процесу. Така модернізація може бути досягнута шляхом уникнення нерівномірності нагрівання і сушіння матеріалу, використання нових перемішуючих робочих органів в процесі сушіння, використання теплових насосів і ін.

Удосконалення режимів сушіння може бути здійснене різними методами: використанням більш високих температур та швидкостей сушильного агента, застосування електричних та магнітних полів, застосування перегрітої пари як теплоносія, одержаної при сушінні, використання відпрацьованого сушильного агента, впровадження комбінованих способів сушіння та ін.

В області зовнішнього вологообміну інтенсифікувати процес видалення вологи можна шляхом підвищення температури і швидкості агента сушіння, а також збільшення активної поверхні зернини, що бере участь в процесі вологообміну з агентом сушіння.

Рисунок 2.1 – Методи інтенсифікації сушіння сільськогосподарських матеріалів

Вплив температури сушильного агента на інтенсивність сушіння пояснюється тим, що при однаковому відносному ступені насичення сушильного агента вологою її абсолютна кількість, що міститься в 1 кг сушильного агента, різко збільшується з підвищенням температури.

Зі збільшенням швидкості проходження сушильного агента через матеріал зменшуються внутрішньодифузне гальмування процесу сушіння і підвищується середня рушійна сила процесу, оскільки ступінь насичення сушильного агента на виході з сушарки зменшується. Все це призводить до зменшення часу сушіння.

Особливої уваги потребують дослідження інтенсифікації сушіння шляхом попередньої підготовки матеріалу. Така підготовка може бути здійснена за допомогою різноманітних методів: запобіганням злипанню частинок, створенням «киплячого» шару, вібрацією, ударними та акустичними діями, виведенням із процесу домішок, перемішуванням, подрібненням та розсіченням поверхні.

В системах "газ-тверде тіло" збільшення поверхні контакту фаз найчастіше забезпечується такими методами: зменшенням розміру частинок твердої фази (подрібненням) та рівномірним їх розподілом в робочому об'ємі, інтенсивним механічним перемішуванням та розпушуванням, створенням "киплячого" шару подрібненої твердої фази шляхом продування через нього сушильного агента [2-6,65].

Перемішування та розпушування матеріалу, що сушиться сприяє оновленню поверхні контакту сушильного агента з частинками матеріалу і зняттю дифузійних гальмувань, більш ефективному використанню потенціалу сушильного агента, рівномірному сушінню та запобігання злипанню потоку матеріалу та утворенню застійних зон [66].

Сушарки з «киплячим» шаром у сільському господарстві застосовуються обмежено. Цей процес може бути використаний для порівняно дрібнозернистої сировини рівномірної крупності. Недоліком такого методу є значні витрати електроенергії, необхідні для створення високих тисків сушильного агенту.

Всі вищеописані засоби збільшення або оновлення поверхні контакту фаз широко використовуються в конструкціях багатьох технологічних машин для сушіння. Проте, оскільки дослідним матеріалом являється тверде кулясте тіло зернини, то використання усіх методів є недоцільним та неможливим в даному випадку, так як можливість застосування деяких із них прийнятна лише для рідин, або ж для дрібнозернистих матеріалів. Тому, провівши комплексний аналіз усіх наявних методів підготовки до сушіння зернових сільськогосподарських матеріалів та врахувавши розміри та фізико-механічні властивості зерен сої, був запропонований новий метод інтенсифікації сушіння шляхом розсічення поверхні зернини.

Підготовка зерен сої шляхом розсічення поверхні може здійснюватися методом механічної дії робочих органів лушильних машин на матеріал з різними принципами дії, проте найбільшого поширення набули машини з ударним впливом на матеріал, аналіз яких і був проведений у п. 1.3.

Вивчивши усі відомі способи впливу робочих органів на зернину та ступінь пошкодження обробленого матеріалу, а також врахувавши виявлені недоліки, було запропоновано нову конструкцію пристрою підготовки зерен сої до сушіння (рис. 2.2). Такий пристрій є складовою частиною комплексу завантаження сушарки [12,13].

Пристрій підготовки зерен сої до сушіння складається з секції 1 (рис. 2.1., а). Для регулювання ступеня розсічення кількість секцій можна збільшувати ($n=1...5$), послідовно встановлюючи їх по висоті одна над одною та кріпити за допомогою болтових з'єднань.

На валу, що обертається, встановлений конусний диск 2 з чотирма прямолінійними лопатками, які виступають над його поверхнею. Радіальні лопатки забезпечують подальший рівномірно-направлений рух потоку маси, що подається через завантажувальний бункер 3. Конусна форма диска сприяє рух цієї маси без зустрічних зіткнень після контакту матеріалу з робочими органами в напрямку до відповідного отвору 4.

Рисунок 2.2 – Пристрій підготовки зерен сої до сушіння:

Рисунок 2.3 – Схематичне зображення робочої камери пристрою попередньої підготовки зерен сої:

Процес розсічення здійснюється за допомогою циліндричної деки 1. Дека складається з вертикальних ножових пластин 2, приварених до боковини 3 за усією її висотою (рис. 2.3). Відстань між сусідніми ножовими пластинами

меншою середнього діаметра зернини, що унеможливує потрапляння його у зазор і подальший рух без розсічення. Подача матеріалу здійснюється через завантажувальний бункер 3, встановлений над верхньою секцією пристрою.

Підготовлений матеріал через вивантажувальний патрубок 4 направляється до

завантажувального комплексу сушарки і норією подається в її робочу камеру. Застосування запропонованої конструкції пристрою дозволить збільшити контактну площу матеріалу з сушильним агентом за рахунок розсічення

поверхні зернини, що забезпечить подальшу інтенсифікацію процесу видалення вологи загалом.

2.2. Обґрунтування швидкості руху зерен сої в пристрої підготовки їх до сушіння

Схематично, ударна взаємодія зернини сої та одиначної ножової пластини деки пристрою підготовки до сушіння відбувається у точці О (рис. 2.4).

Рисунок 2.4 – Схема сил, що виникають при контакті зернини сої з ножовою пластиною

даному випадку швидкість центра ваги зернини не співпадає із лінією удару, тому такий удар є «косим». Вектори швидкостей зернини до і після удару розклали на нормальну та тангенціальну складові. В подальшому, при аналізі процесу, враховуються лише нормальні складові швидкостей.

Експериментально було встановлено значення коефіцієнта лежності від вологості зерен сої на основі залежності:

де H та h – відповідно висоти падіння та відбиття зернини сої, м. де k – коефіцієнт відновлення.

Динамічні зусилля та деформації, які ними викликані, в системі, що розглядається, підпадають під закон Гука так, як і при статичному навантаженні системи [67,68]. Співставити динамічні та статичні деформації та зусилля можна

через динамічний коефіцієнт: де R_D , R_c – відповідно динамічне та статичне

зусилля, Н; δ_D , δ_c – динамічна та статична деформація, м.

Робота ударних сил рівна зміні кінетичної енергії системи після удару. Ця робота накопичується в системі «зернина-дека» у вигляді потенціальної енергії деформації поверхні зернини [69,70].

Можна припустити, що потенціальна енергія U , яка накопичилась в системі на момент виникнення найбільших деформацій δ_D , рівна різниці кінетичних енергій зернини E_k масою m до і після удару:

$$\Delta T = U = \frac{R_D \cdot \delta_D}{2} \quad (2.4)$$

З врахуванням (2.3) можна записати:

$$U = k \frac{\delta_D^2}{2} = \frac{R_c \cdot \delta_c}{2} \quad (2.5)$$

Рисунок 2.5 – Сили, що діють на одиначну зернину сої в кільцевому зазорі між диском та декою під час польоту

Проте, деякими з вищеперечислених сил можна знехтувати, враховуючи наступні твердження:

- для діапазону діаметрів зернини підйомна сила і сила Магнуса на декілька порядків менші ніж сила аеродинамічного опору повітря F_{on} , в результаті чого даними силами також можна знехтувати;

- електростатичну силу, силу молекулярного переносу та силу молекулярної взаємодії також доцільно враховувати при значно більших розмірах частинок матеріалу, що рухається в повітряному потоці.

Загальний вигляд рівняння руху одиничної зернини сої в кільцевому зазорі пристрою може бути представлений в наступному вигляді:

$$m \frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau_p} = \sum_{i=1}^q \vec{F}_i, \quad (2.6)$$

де v – вектор швидкості руху зернини в кільцевому зазорі, м/с; τ_p – час руху зернини сої в кільцевому зазорі від сходження його з диску і до контакту з ножовою пластиною деки, с; q – кількість внутрішніх сил, що діють на зернина сої. На основі загального вигляду рівняння руху (2.6) та враховуючи всі вищеописані сили, було отримано систему диференціальних рівнянь руху одиничної частини матеріалу в кільцевому зазорі пристрою підготовки до сушіння.

Таким чином, після сходження з диска подальший рух зернини відбувається під дією відцентрової сили $F_{відц} = m \omega^2 r$ і сили опору середовища [72], яку в даному випадку можна виключити з розрахунку, так як віддаль між краєм диска і декою пристрою є незначною.

Тому із (2.5) отримаємо:

Таким чином, прирівнюючи вирази (2.7) та (2.9) отримаємо:

Нормальну складову швидкості відбиття зернини сої можна виразити через експериментально визначений коефіцієнт відновлення, k методика визначення якого описана в п.3.7., а одержані результати наведені у п. 4.5.:

$$u_n = kv_n. \quad (2.11)$$

Тоді вираз для визначення динамічного коефіцієнта мати вигляд:

$$k = v_n \sqrt{\frac{1-k}{1+k} \cdot \frac{(k-1)^2}{g \cdot \delta_c}}. \quad (2.12)$$

Ступінь розсічення та зусилля, що призводить до її появи експериментально досліджували за допомогою установки, принцип роботи якої описаний в п. 3.6., а одержані результати у п. 4.4. Пов'язуючи динамічні та статичні зусилля руйнування поверхні (2.3) та враховуючи отримані експериментальні дані і теоретичну залежність (2.12) можна записати вираз для обґрунтування граничної швидкості удару $v_{y\partial}$ зернини сої об ножову пластину:

$$v_{y\partial} = \frac{F}{\dots} \quad (2.13)$$

$$m\omega^2 \cdot r \sqrt{\frac{1-k}{1+k} \cdot (k-1)^2} \frac{2}{g \cdot \delta}$$

де F – зусилля руйнування поверхні; m – маса зернини; δ – величини розсічення.

Або ж, враховуючи нахил диска:

$$v \cdot \delta = \frac{F \cos(\alpha)}{m\omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{1-k}{1+k} \cdot (k-1)^2}} \cdot \frac{2}{g \cdot \delta} \quad (2.14)$$

Відомі дослідження [71,72] підтверджують, що зі збільшенням поточно-го радіусу кільцевого зазору з 0,28 до 0,3 м у луцильних машинах швидкість руху зерен сої змінюється несуттєво. Це пояснюється тим, що невеликий кільцевий зазор та велика швидкість руху частинки матеріалу перешкоджає силі опору повітряного середовища поглинути частину енергії сили інерції. Тому можна вважати, що швидкість удару зернини сої об ножову пластину деки буде рівною швидкості вильоту (сходження) її з диска v .

Швидкість вильоту (сходження) одиничної частини матеріалу з диску визначається за наступною формулою:

2.3. Моделювання переміщення зерен сої конічним диском з прямолінійними направляючими лопатками

Згідно запропонованої технології підготовки зерен сої до сушіння застосовується механізм, що являє собою конусоподібний диск із чотирма прямолінійними лопатками, які виступають над поверхнею диска. Диск обертається навколо вертикальної осі. При обертанні диска зернина ковзає диском вздовж лопаток, вилітає та вдаряється об ножові пластини деки. Отримавши математичну модель переміщення матеріалу у пристрої підготовки до сушіння можна розрахувати кінематичні та геометричні параметри механізму та обчислити продуктивність машини.

Розглянемо конусоподібний диск із чотирма лопатками, що обертається навколо осі z зі сталою кутовою швидкістю ω (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Розрахункова схема руху зернини сої поверхнею диска

На поверхні диска розміщений зернина сої масою m . При обертанні диска він ковзає по диску і вздовж лопатки.

Введемо нерухому $Oxyz$ та рухому систему координат $Ox_1 y_1 z_1$ з центром в т. O , що розміщена на основі уявного конуса.

Система координат $Ox_1 y_1 z_1$ обертається разом з диском навколо осі Oz і є інерційною системою, тому рух точки M відносно диска буде описуватись диференціальними рівняннями відносного руху [68-70].

Таким чином, на зернина сої при його відносному русі діють такі сили: сила ваги зернини. Виходячи з умови постійного контакту зернини сої із

поверхнею диска ($N_{\delta} > 0$) та того, що рух відбувається вздовж лопатки, можна записати $z_{1r} = (r - y_{1r})s \sin \alpha$. (2.29)

Підставляючи (2.29) у рівняння (2.28) можна визначити невідому реакцію N_{δ} .

Для отримання рівняння руху зернини сої вздовж радіуса диска слід підставити значення реакції N_{δ} з рівняння (2.31) в (2.27). Після перетворень та спрощень отримаємо.

На основі розробленої математичної моделі (2.32) можна виконувати числовий експеримент в системі MathCad, що дає змогу взаємопов'язувати вхідні параметри пристрою підготовки зерен сої до сушіння, а саме: кутову швидкість обертання диска ω , кута його нахилу α із вихідними параметрами: радіусом диска r , часом перебування зернини на диску τ , швидкістю вильоту в зону розсічення v_{δ} . Аналізуючи одержані графіки можна стверджувати, що такі параметри як кутова швидкість та кут нахилу диска мають істотний вплив на переміщення матеріалу та його швидкість: зі збільшенням кута нахилу та кутової швидкості диска шлях, який пройшов зернина та його швидкість вильоту збільшуються.

Рисунок 2.7 – Графік переміщення зернини сої з часом: а) кут нахилу диску $\alpha=30^{\circ}$ б) $\alpha=40^{\circ}$

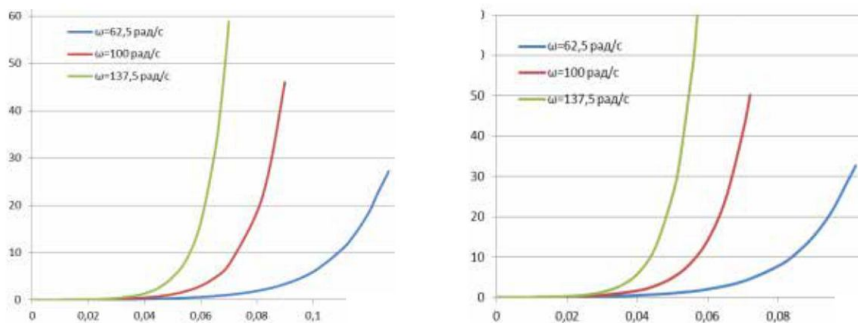


Рисунок 2.8 – Графік зміни швидкості зернини сої з часом:

а – кут нахилу диску $\alpha=30^{\circ}$; б – $\alpha=40^{\circ}$

Мінімальний час, за який зернина здійснила переміщення по диску радіусом $r = 0,4$ м склав $\tau = 0,055$ сек при кутовій швидкості диска $\omega = 137,5$ рад/с та куту нахилу диска $\alpha = 40^{\circ}$, максимальний – $\tau = 0,12$ с, при $\omega = 62,5$ рад/с та $\alpha = 30^{\circ}$.

Максимальне значення швидкості вильоту зернини в зону надрізання по диску радіусом $r = 0,4$ м ($\tau = 0,055$ с, $\omega = 137,5$ рад/с) складає $v_{вил} = 65$ м/с, мінімальне – $v_{вил} = 20$ м/с, при $\tau = 0,12$ с. і $\omega = 62,5$ рад/с.

2.4. Теоретичний аналіз процесу переміщення вологи в зернині сої в процесі сушіння

Розглянемо типові аспекти моделювання процесів тепло- масо переносу в окремо взятому тілі.

У загальному вигляді інтенсивність сушіння окремо взятого тіла визначається фізико-механічними властивостями, термодинамікою поверхневих явищ і рушійними силами процесу. Такі залежності у відповідності до законів термодинаміки описують феноменологічними рівняннями у вигляді:

$$j = \sum K_i \cdot \nabla \Pi_i,$$

де K_i – кінетичні коефіцієнти, Π_i – рушійні сили процесу.

Таким чином, інтенсифікація сушіння може бути досягнута, шляхом збільшення коефіцієнтів переносу та зміною потенціалів рушійних сил.

Стосовно процесу теплового сушіння окремо взятого тіла, інтенсивність переносу вологи (у вигляді рідини, так як перенос пари дуже утруднений [57,58] описується рівнянням:

$$j_m = -a_m \rho_0 (\text{gradu} - \delta_T \cdot \text{grad}\theta), \quad (2.33)$$

де a_m – коефіцієнт масопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ_0 – густина абсолютно сухої речовини, $\text{кг}/\text{м}^3$; δ_T – коефіцієнт термодифузії (виникає від перепадів температури).

Тобто, рушійними силами процесу масопереносу є градієнт вологовмісту u (масова концентрація вологи в матеріалі) і градієнт температури θ . При чому, при конвективному підведенні теплоти до матеріалу градієнт температури спрямований протилежно до градієнта вологовмісту, що гальмує перенесення вологи до поверхні.

Якщо коефіцієнт масопровідності не залежить від вологості, то рівняння (2.34) записується у вигляді:

$$\underline{\partial u} = -a \nabla^2 u \equiv a \cdot \text{div}(\text{gradu}). \quad (2.35)$$

Для одномірного симетричного поля масової концентрації вологи величина $\nabla^2 u$ є функцією однієї координати і для зернини сої, який можна представити сферичним тілом (куля), рівняння масопровідності набуває класичного вигляду:

$$\frac{\partial u(r, \tau)}{\partial \tau} = a_m \left(\frac{\partial^2 u(r, \tau)}{\partial \tau^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial u(r, \tau)}{\partial r} \right), \quad (2.36)$$

де r – координата, поточний радіус кулі, м.

При виборі граничних умов вважали, що до об'єму зернини сої, до його поверхні S за час $d\tau$ шляхом масопровідності підводиться волога масою G_w , при цьому середня за поверхнею S щільність потоку вологи визначається рівнянням балансу маси:

$$\frac{\partial G_w}{S \partial \tau} = -a \rho_m^0 \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (2.37)$$

де $\frac{\partial u}{\partial r}$ – градієнт вологовмісту, $\frac{\text{кг}/\text{кг}}{\text{м}}$.

Від поверхні S в навколишнє середовище за той самий час $d\tau$ конвективною дифузиею передається кількість вологи dG_w .

Волога, що підводиться до поверхні випаровується з неї відповідно до закону Дальтона:

$$\frac{dG_w}{d\tau} = S \beta_{pnc} (P_n - P_c), \quad (2.38)$$

де β_p – коефіцієнт масообміну, віднесений до різниці парціальних тисків, $\text{кг/с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па}$; P_n, P_c – парціальні тиски водяної пари на вологій поверхні та водяної пари в повітрі відповідно, Па.

Парціальний тиск на вологій поверхні дорівнює тиску насиченої водяної пари при температурі поверхні $P_n = P(\theta_n)$.

Відповідно до рівняння стану ідеального газу (водяна пара) парціальний тиск визначається співвідношенням:

$$P = R_n \cdot T \cdot C_n, \quad (2.39)$$

де R_n – універсальна газова стала (для водяної пари), Дж/(моль·К); T – температура, К; C_n – концентрація вологи в повітрі, кг/м^3 .

Підставляючи значення (2.39) в (2.38) матимемо:

$$\frac{dG_w}{S d\tau} = \beta (C_n - C_c), \quad (2.40)$$

де $\beta = \beta_p R_n \cdot T$ – коефіцієнт масообміну, 1/с.

Величина об'ємної концентрації вологи C пов'язана з вологовмістом зернини: $C = \rho_0 \cdot u$ (ρ_0 – густина абсолютно сухої речовини, кг/м^3). Із урахуванням останнього рівняння (2.40) і (2.38), будемо мати граничну умову у вигляді:

$$\left(\frac{du}{dr} \right)_S + (u_n - u_p) \beta_p \cdot r_0 = 0. \quad (2.41)$$

де u_p – рівноважна вологість зерна, кг/кг . с.р, значення якого визначає вологість поверхні матеріалу у стані рівноваги з масовою концентрацією вологи в навколишньому середовищі функцією відносної вологості і температури повітря: $u = f(\varphi, t)$.

При цьому, в центрі кулі $\left(\frac{du}{dr} \right)_{r=0} = 0$ (умова симетрії).

$$\frac{du(r, \tau)}{dr} = 0, \quad (2.42)$$

Рівняння (2.41) є аналогом граничної умови III-го роду для конвективно-го теплообміну і визначає рівність потоку вологи із об'єма тіла до його поверхні і потоку вологи з поверхні в оточуюче середовище, так як волога на поверхні не накопичується.

Початкові умови при сушінні кулі:

$$u(r, 0) = u_0 = u_n. \quad (2.43)$$

Тобто, на початку процесу вологовміст на поверхні дорівнює початковому вологовмісту і волога за радіусом розділена рівномірно.

Таким чином, рівняння (2.36) з граничними і початковими умовами (2.41-2.43) описує процес зміни вологовмісту зернини сої, при сталих параметрах

середовища (сушильного агенту): $u_p = u_p(t_c, \varphi_c) = const$; незмінних коефіцієнтах масо провідності і волого обміну. За своєю структурою система рівнянь (2.36) – (2.41-2.43) аналогічна рівнянням теплопровідності при охолодженні кулі [52,53], розв'язок якого відомий:

$$\frac{u(r, \tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \left(\frac{\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n}{\mu_n} \right) \cdot \sin \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)}{\left(\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n \right) \cdot \mu_n \cdot R} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m},$$

де μ_n – корені характеристичного рівняння:

На рис. 2.9. наведено зміну вологовмісту зернини сої на поверхні, в центрі і середині кулі. При температурі сушильного агенту $t_c = a = 50$ °С (коефіцієнт масопровідності $a_m = 0,1 \cdot 10^{-8}$) поверхня висихає втричі швидше ніж середина зернини.

З теорії тепло- і масообміну [54] відомо, що градієнт температури або вологовмісту в значному ступені залежить від критеріїв Bi і Bi_m , збільшення яких визиває зростання градієнтів (∇u і $\nabla \theta$) температури і вологовмісту.

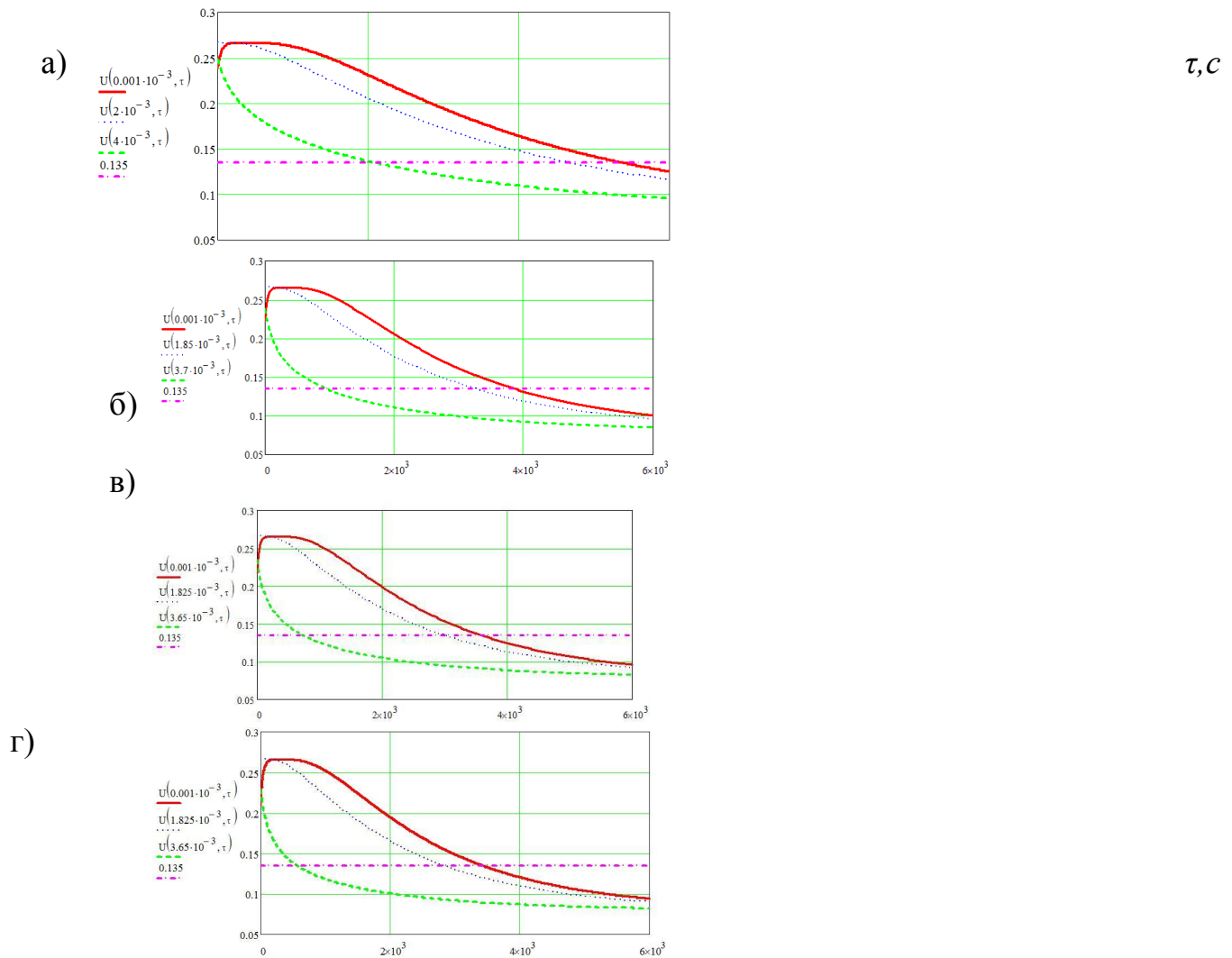


Рисунок 2.9 – Зміна вологовмісту зернини сої на поверхні, в центрі і на віддалі від поверхні $R/2$:

$$a - Bi_m = 2,8; \quad b - Bi_m = 4,44; \quad c - Bi_m = 5,201; \quad z - Bi_m = 6,205$$

Оскільки експериментально визначити розподіл вологовмісту в одиничних зернинних сої неможливо, то для аналізу впливу коефіцієнтів переносу на інтенсивність сушіння використаємо середньооб'ємний вологовміст зернини, зміну якого можна визначити експериментально.

Середнє значення вологовмісту кулястого зернини визначається інтегруванням рівняння розподілу (2.44) з ваговим множником r :

На рис. 2.10 наведено графічну інтерпретацію рівняння (2.46): криву сушіння зернини сої (зміну вологості в часі), для $Bi_m = 2,8$, $a_m = 0,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$. Значення коефіцієнта a_m і критерія Bi_m отримані при порівнянні теоретичної і експериментальної кривих сушіння.

Рисунок 2.10 – Крива сушіння зернини сої τ – зміна вологовмісту в часі

Відомо [56, 79], що в процесах сушіння і нагрівання, які описуються рівняннями виду (2.34, 2.35) розглядаються дві стадії процесу: стадія нерегулярного і регулярного режиму. У першому випадку, за рахунок нестационарного розподілу параметрів u або θ , шукана функція повинна описуватися сумою ряду (2.44), а стадія регулярного режиму може бути описана (так як ряд швидко сходиться і при $For_m > 0,35$ можна обмежитися першим членом ряду) одним членом ряду і залежність $u(\tau)$ набуває вигляду експоненти

В інтервалі зміни величини масо обмінного критерія $0 \leq Bi_m \leq 8$ залежність (2.49) за даними таблиці [56] можна апроксимувати простою залежністю:

$$B_1 = 1 - 0,025Bi_m \quad (2.50)$$

Швидкість сушіння отримаємо диференціюванням за часом рівнянь (2.46) та (2.48). Для регулярної стадії режиму сушіння матимемо:

$$-\frac{du}{d\tau} = \frac{a}{R^2} \mu^2 \cdot B(u - u_p) e^{-\mu_1 \frac{a_m}{R^2} \tau} \quad (2.51)$$

$$d\tau = \frac{R^2}{\mu^2} \frac{1}{B(u - u_p)} e^{\mu_1 \frac{a_m}{R^2} \tau} du$$

Визначивши з рівняння (2.48) величину B_1 і підставивши її значення в рівняння (2.51) після спрощень отримаємо:

$$-\frac{d\theta(r)}{d\tau} = \frac{a_m \mu^2}{R^2} (u(\tau) - u_p) \quad (2.52)$$

Таким чином, отримали відоме рівняння кінетики сушіння О.Ликова, де величина коефіцієнта сушіння:

$$K = \frac{a_m \mu^2}{R^2} \quad (2.53)$$

Характеристичне число μ_1 виразу (2.44, а) для стадії регулярного режиму апроксимується досить точно [62] наступним виразом:

З урахуванням останнього значення кореня μ_1^2 , коефіцієнт сушіння можна визначити за формулою:

$$K = \frac{\pi \cdot a_m \cdot Bi_m^{1,07}}{(2,7 + Bi_m) \cdot R} \quad (2.55)$$

або, розкриваючи критерій Біо:

$$K = \frac{\pi \cdot \beta}{(2,7 + \frac{\beta^{1,07}}{a_m} \cdot R^{1,07}) \cdot R^{0,93}} \quad (2.56)$$

Таким чином, швидкість сушіння окремого зернини сої прямо пропорційна коефіцієнту сушіння K :

$$-\frac{du(\tau)}{d\tau} = K (u(\tau) - u_p(t, \varphi)), \quad (2.57)$$

який залежить від коефіцієнта масопровідності a_m , масообміну β і визначального (ефективного розміру) зернини.

Коефіцієнт масопровідності, як відомо [57,61,80], в значній мірі залежить від температури матеріалу, а коефіцієнт масообміну від гідродинамічного режиму сушіння.

За експериментальними даними роботи [57] в межах зміни параметрів повітря $\theta = 30 \dots 60$ °С, при $u_0 = 0,2$ кг/кг с.р., залежність коефіцієнта масопровідності від температури апроксимована лінійною залежністю:

$$a_m(\theta) = 2,33 \cdot 10^{-11} \cdot \theta, \text{ м}^2/\text{с}. \quad (2.58)$$

2.5. Фізико-механічні і теплофізичні аспекти інтенсифікації процесу сушіння шляхом розсічення поверхні зернини

Механічне руйнування зернини сої шляхом розсічення поверхні, призводить до приросту поверхні на величину ΔS .

Наявність «нової» додаткової поверхні збільшує повну поверхню зернини:

$$S_H = S + \Delta S$$

і відповідно приводить до зменшення визначального розміру тіла - гідравлічного радіусу:

$$S_H = \frac{V}{S} = \frac{V}{S + \Delta S} \quad (2.59)$$

Згідно прийнятих допущень, матимемо:

- бічна поверхня зернини:
- об'єм зернини:

- гідравлічний радіус зернини:
- Таким чином, еквівалентний радіус зернини буде визначатися співвідношенням:

$$R_e = 3 \cdot R_v = \frac{3 \cdot V}{S + \Delta S} \quad (2.60)$$

Таким чином, еквівалентний радіус кулі, як характерний розмір, буде зменшений при розщепленні зернини сої.

Як відомо з теорії сушіння [54,55,57], швидкість сушіння матеріалу збільшується при зменшенні визначального радіусу (так як зменшується шлях транспортування вологи від центра до поверхні).

Оцінимо кількісно можливість інтенсифікації сушіння зернини сої шляхом розсічення її поверхні. Ступінь пошкодження і відповідно величину зміни розміру поверхні зернини запропоновано оцінювати коефіцієнтом розсічення k_p , який визначається співвідношенням:

Як було показано вище, кінетика сушіння рівняння (2.48) в значній мірі залежить від критеріїв Bi_m і Fo_m . Наближене значення першого кореня μ_1 в рівнянні (2.51) можна визначити з характеристичного рівняння [56]

$$ctg \mu_1 = - \frac{Bi_m - 1}{\mu_1} = \frac{1}{\mu_1} - \frac{\mu_1}{3} - \frac{\mu_1^2}{3^2 \cdot 5} - \dots$$

розкладанням $ctg \mu_1$ в ряд і обмежуючись першими двома членами:
 $\mu_1^2 = 3Bi_m$.

Підставляючи отримане значення в рівняння (2.51) з урахуванням (2.50), матимемо:

$$-\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{3\beta}{R_e} \left(1 - 0,025 \frac{\beta \cdot R}{a} \right) (u_0 - u_p) e^{-\frac{3\beta}{R_e} \tau} \quad (2.63)$$

З аналізу рівняння (2.63) випливає, що зменшення ефективного розміру зернини сої призводить до збільшення швидкості сушіння, тобто розсічення поверхні (рис. 2.12) інтенсифікує процес сушіння.

Аналогічним чином можна показати інтенсифікацію процесу нагріву зернини сої, так як окрім зменшення критерію F_0 зменшуються критерії Pd і Po .
 Рисунок 2.12 – Графічна залежність сушіння зерен сої за різного коефіцієнта розсічення і цілого зернини:

1 – $k_p=1$; 2 – $k_p=1,015$; 3 – $k_p=1,041$; 4 – $k_p=1,073$

На рис. 2.12 показано кінетичні криві (криві сушіння) зерен сої для різного ступеня розсічення і цілої зернини. Точками показано експериментально отримані значення. Теоретичні розрахунки - за рівнянням (2.46). Як можна бачити, схожимість експериментальних і теоретичних даних для цілого і максимумально пошкодженого зернини задовільна.

На рис. 2.13 наведено теоретичні криві нагрівання зерен сої в процесі сушіння при різному ступені розсічення. З графіків можна визначити, що у

ра-зі збільшенні ступеня розсічення зерен, процес нагріву і стабілізації температура значно прискорюється.

Таким чином, теоретичним аналізом і експериментами доведена можливість інтенсифікації процесу сушіння зерен сої шляхом розсічення поверхні.

Проте отримані дані характеризують процеси нагріву і сушіння при постійних значеннях параметрів сушильного агента (при яких проводився дослід).

Для виявлення впливу параметрів сушильного агента на нестационарний процес видалення вологи необхідно проведення додаткового аналізу.

Рисунок 2.13 – Графічна залежність розподілу температури за радіус зернини сої процесі сушіння при різному ступені розсічення:

$$a - \alpha = 15, b - \alpha = 20$$

2.5.1. Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння

Розглянемо вплив масообмінних факторів у разі розсічення зернини на кінетику процесу сушіння. Під час розсіченні зернини сої, як було відмічено вище, з'являється новоутворена відкрита поверхня, з якої інтенсивно (швидше, ніж з усієї поверхні) випаровується волога. Інтенсивність випаровування настільки висока, що теплота відбирається не тільки з повітря, а також із самого тіла зернини, що призводить до зменшення його температури. З точки зору зміни закономірності сушіння, появу «нової» поверхні можна розглядати як наявність в сушимому тілі додаткового стоку маси (вологи), або ж джерела видалення вологи з інтенсивністю, яка визначається законом масовіддачі. При прийнятті рушійною силою процесу різниці парціального тиску пари на поверхні і в оточуючому середовищі інтенсивність джерела випаровування описується рівнянням Дальтона (2.38), а величину якої можна позначити:

$$\frac{dG_w}{ds \cdot d\tau} = m(\tau) \cdot \frac{kg}{m^2 \cdot c}, \quad (2.64)$$

де ds – поверхня випаровування, m^2 .

Наявність додаткового джерела вологовидалення призводить до зростання нерівномірності розподілу вологовмісту в об'ємі зернини, що спричиняє об'ємно-напружений стан поверхневого шару (зони). Результатом цього є деформація тіла за рахунок усадки колоїдної речовини, а саме «розгортання» зони розсічення і відповідно зміна ефективного розміру зернини і збільшення ефективної площі масообміну.

Оскільки, відповідно до існуючої теорії сушіння [55], величина усушки пропорційна вологовмісту матеріалу, то значення «розгорнутої» зони розсічення можна визначити так:

$$l = l_0 \cdot \beta_e \cdot u,$$

де l_0 – початковий розмір розсічення; β_e – коефіцієнт лінійної усадки (для зерно-продуктів $\beta_e = 1,1 \dots 1,4$ [55]); u – вологовміст зернини, кг/кг. с.р.

Оскільки вологовміст зменшується, то буде зменшуватись і поверхнева зона. Зменшення поверхні зернини призводить до розгортання зони надрізу.

Таким чином, для швидкого «розгортання» зони надрізу і збільшення інтенсивності додаткового джерела вологовидалення доцільно прискорити процес сушіння на початковому етапі.

Інтенсивність вологовидалення з відкритої поверхні призводить до висихання поверхні і заглиблення зони випаровування. Таким чином, інтенсивність додаткового джерела вологовидалення буде з часом знижуватися $m = m(\tau)$.

Врахувати вплив додаткового поверхневого джерела вологовидалення можна наступним чином.

В граничну умову (2.41) додамо додаткову складову, яка враховує додаткове джерело волого видалення:

$$-a \rho_0 \left(\frac{du}{dr} \right)_S + \frac{\rho_0 \cdot \beta_e}{a} \left[u - u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta_e} \right] = 0, \quad (2.65)$$

де m_0 – максимальна інтенсивність вологовидалення.

Рівняння кінетики сушіння (2.68), на відміну від відомого (2.57), враховує інтенсивність випаровування з відкритої поверхні (інтенсивність випаровування постійна в часі).

При зміні інтенсивності випаровування з відкритої (новоутвореної) поверхні в часі можна, за аналогією із зміною загальної швидкості сушіння в часі прийняти також експоненціальний закон зміни інтенсивності випаровування вологи Розв'язок диференціального рівняння масопровідності (2.36), з початковою умовою (2.42) і граничною умовою (2.70), аналогічний розв'язку рівняння теплопровідності кулі при наявності негативного джерела теплоти (теплота на випаровування поверхні) [56] і має в нашій задачі такий вигляд:

Зміну середнього вологовмісту в часі можна визначити інтегруванням функції $u(R, \tau)$ аналогічно (2.45):

На рис. 2.14. наведені графічні залежності зміни вологовмісту за радіусом зернини і в часі.

Порівнюючи отримані графіки з рис. 2.9., можна бачити, що за наявності додаткової поверхні випаровування поверхневі шари зернини сої висихають швидше, а експозиція сушіння (зміна середнього по об'єму вологовмісту) зменшується з 3600 до 3000 сек.

Рисунок 2.14 – Графічна залежність зміни вологовмісту за радіусом зернини і в часі

2.5.2. Вплив параметрів сушильного агента на кінетику сушіння

Розглянемо вплив параметрів, що характеризують зовнішню масопередачу: від матеріалу до сушильного агента.

Наявність відкритої поверхні збільшує інтенсивність вологовидалення з поверхневої зони зернини, що приводить до збільшення усадки поверхні і

«ро-згортання» об'єму зернини. Тому доцільно інтенсифікувати саме найперший період зневоднення.

Оскільки температура сушильного агенту обмежена, то розглянемо можливість інтенсифікації швидкістю сушильного агенту.

В роботі [78] наведена експериментальна формула, отримана при випарюванні води із кульок різного діаметра у вимушений потік повітря:

$$Nu = 0,9 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (2.73)$$

валентний діаметр, м; v – швидкість потоку повітря, що бігає кулю, м/с; β – коефіцієнт масообміну, м/с; ν – кінематична в'язкість повітря, м²/с; D – коефіцієнт дифузії водяної пари в повітрі, м²/с; α_v – коефіцієнт масопровідності повітря, м²/с.

Маючи критеріальну залежність (2.55), можна визначити коефіцієнт масообміну з рівняння:

де $T_v = t_v + 273$ – температура повітря, °С, а в'язкість – функція вологовмісту повітря:

$$v = v_0 + k \cdot X. \quad (2.76)$$

Аналогічно, з критеріального рівняння [81] для теплообміну сферичних частинок можна визначити коефіцієнт теплообміну:

$$\alpha = \left(\lambda_0 + 4,1 \cdot 10^{-3} \varphi \right)^{0,19} \cdot d_e^{0,5} \cdot v^{0,52} \cdot \rho_v^{0,85} \cdot (v(X))^{-0,19} \cdot A \cdot C_p^{0,33}, \quad (2.77)$$

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності сушильного агенту; ρ_v , X , φ , v – густина, вологовміст, відносна вологість і швидкість сушильного агенту;

C_p – теплоємність сушильного агенту; d_e – еквівалентний діаметр зернини; A – емпіричний коефіцієнт.

Аналіз отриманих залежностей показав, що у разі збільшення вологовмісту сушильного агенту коефіцієнт теплообміну збільшується і зменшується масовіддача, що приводить до швидкого нагрівання зернини і вирівнювання її температурного поля. Наявність відкритої поверхні призводить до інтенсифікації переміщення вологи всередині зернини і висихання поверхневого шару, що інтенсифікує деформацію тіла поверхні.

У разі збільшення швидкості сушильного агенту відносно поверхні зерна (фільтрація теплоносія крізь шар зерна) збільшується одночасно і коефіцієнт масообміну і теплообміну і, відповідно, збільшується швидкість сушіння.

Збільшення швидкості видалення вологи з поверхні зерна потребує збільшення поглинальної здатності сушильного агенту, що у разі фіксованого вологовидалення (швидкості сушіння) може бути досягнуто збільшенням питомої витрати сушильного агенту (витрати повітря на одиницю маси зерна).

2.5.3. Рациональний режим сушіння і його реалізація

Значні можливості підвищення продуктивності обладнання і зниження енергоємності процесів дає інтенсифікація процесів тепло- і масообміну між продуктом і теплоносієм.

Інтенсифікувати підведення теплоти і видалення вологи можна двома шляхами: збільшенням температури теплоносія і, відповідно, температурного напору або збільшенням швидкості переміщення теплоносія відносно поверхні зерна. Внутрішні вологопереміщення інтенсифікують підвищенням температури зерна і зменшенням гальмуючої дії температурного градієнта. Проте, можливість збільшення температури теплоносія - сушильного агента обмежена термолабільними властивостями матеріалу, а інерційність вологопровідності призводить до перегріву поверхні зернини. Збільшення швидкості сушильного агента обмежене виносом матеріалу із сушильної камери. Але враховуючи значну швидкість витання зерен сої (10–15,5 м/с) швидкість сушильного агента можна збільшувати, але не на протязі всього сушильного тракту. Кількість вологи, що видаляється безперервно, зменшується відповідно до кінетики сушіння [53,55].

Кількість вологи, що видаляється:

Таким чином, оскільки кількість вологи в зерні сої зменшується вздовж сушильного тракту (висоти сушильної зони зерносушарки), є доцільним зменшувати і кількість підведеної до матеріалу теплоти, шляхом зменшення подачі сушильного агента за висотою сушарки. Оскільки кількість сушильного агента визначена (для певної сушарки) за кількістю вологи, що видаляється за весь процес сушіння, то ця кількість є середнім значенням витрат $G_{c.a.}$. Задавши кількість сушильного агента в кінцевій зоні (відповідно до кількості вологи, що видаляється) G_2 , можна визначити кількість сушильного агента в початковій зоні сушіння G_1 . Кількість сушильного агента в сушарках продуктивністю $G = 5...12$ т/год складає за літературними даними [41] $G_v = 4,45$ кг/с на одну планову тону матеріалу. Виходячи з кінетики сушіння зерен сої, в першому наближенні прийнято лінійний характер розподілу витрат сушильного агента за висотою сушарки:

$$G_v(X) = 6,7 - 0,9H, \quad (2.80)$$

де H – висота сушильної камери, м.

При використанні сушарок з газорозподільчими коробами реалізувати змінну за висотою подачу повітря можна шляхом утворення диференційованого підводу сушильного агента в камеру сушіння.

Для визначення параметрів процесу подальшого сушіння зерен сої в прямочній зерносушарці отримано (Додаток А) аналітичні залежності:

- температура зерна:

$$\theta(x) = \theta_1 + \frac{K}{b} \Delta T (1 - e^{-bx}); \quad (2.81)$$

- температура сушильного агента:

$$t(x) = \theta_0 + \frac{K_2}{b} \Delta T (1 - e^{-bx}) + \Delta T e^{-bx}; \quad (2.82)$$

- вологовміст зерна (абсолютна вологість):

$$u(x) = u_p + \Delta u_0 \cdot \exp \left[-Ax + B(1 - e^{-bx}) \right]; \quad (2.83)$$

- вологовміст сушильного агента:

$$d(x) = d + B \cdot \ln \frac{G_1 - ax + \frac{b \cdot A_2}{a} \cdot x}{G_1} \quad (2.84)$$

де t, θ – температура сушильного агента і зерна, °С; b – коефіцієнт ап-

роксимації; u – вологовміст зерна, кг/кг; $K = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot c_p}$; $K = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot G_m \cdot c_3}$;

s – площа поперечного перетину шару зерна; ρ – насипна щільність шару зерна; d_e – еквівалентний діаметр зернини; c_3 – теплоємність зерна і сушильного агента; α – коефіцієнт теплообміну; u_p – рівноважний вологовміст кг/кг; x – координата, м; G_1 – витрата сушильного агента на вході в сушарку, кг/с;

$$A = G \Delta u; A = G \Delta u \cdot b \cdot B; B = \frac{1}{a} \left[\frac{b \cdot A_2 \cdot G_1}{a} - A + A \right]$$

2.6. Висновки до розділу

1. Проведено аналіз методів сушіння ненасінневих зерен сої та встановлено, що для інтенсифікації процесу необхідно застосовувати підготовку матеріалу до сушіння, яка полягає у виконанні розсічення поверхні зернини.

2. Теоретично обґрунтовано ударну взаємодію зерен із ножовою пластинною деки пристрою підготовки до сушіння з урахуванням коефіцієнта відновлення та зусилля руйнування і визначено швидкість удару зернини сої об ножову пластину $v_{y\partial} = 20 \dots 65$ м/с.

3. Вдосконалено математичну модель переміщення зерен сої вздовж обертального конічного диску пристрою підготовки їх до сушіння (2.32), яка враховує зміну сили повітряного потоку вздовж радіусу та дозволяє визначити швидкість удару в залежності від конструктивних і режимних параметрів пристрою. Експериментально визначено його раціональні параметри: радіус диска $r = 0,4$ м; кутова швидкість диска $\omega = 137,5$ рад/с; кут нахилу поверхні диска $\alpha = 40^\circ$. За таких умов оптимальна швидкість подачі зерен сої в зону розсічення складає $v_{\text{opt}} = 20 \dots 65$ м/с.

4. Утворення «нових поверхонь» випаровування шляхом ударної взаємодії зерен сої із ножовими елементами пристрою підготовки до сушіння дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на 20...55 % залежно від ступеня розсічення. Для кількісної оцінки ступеня інтенсифікації процесу сушіння запропоновано ввести коефіцієнт розсічення (2.61), який характеризує приріст площі випаровування і кількісний показник інтенсивності теплообміну – еквівалентний (ефективний) радіус зернини, який можливо змі-

новати в межах $1,0 \dots 1,1$. Встановлено залежність ефективного розміру зернини R_e від глибини розсічення h (2.62), аналізуючи яку можна стверджувати,

що зменшення ефективного розміру зернини сої призводить до збільшення швидкості сушіння.

5. Розроблено математичні моделі процесу сушіння зерен сої нагрітим повітрям (2.65, 2.66, 2.70, 2.71), які враховують стан матеріалу, що характеризується еквівалентним розміром, залежним від коефіцієнта розсічення та інтенсивність випаровування з новоутвореної поверхні. Адекватність моделей оцінена відхиленням теоретичних і експериментально отриманих даних в межах $3 \dots 7 \%$.

6. Аналітично визначено і кількісно оцінено вплив ступеня розсічення (коефіцієнта розсічення) на інтенсивність вологовидалення зерен сої. Збільшення коефіцієнта з $1,0$ до $1,073$ (глибина розсічення $1,5$ мм) дозволило зменшити експозицію сушіння з 60 хв до 25 хв, що дає можливість збільшити продуктивність існуючих сушарок.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для вирішення задачі інтенсифікації процесу сушіння зерен сої шляхом розсічення поверхні потрібно встановити вплив параметрів пристрою підготовки до сушіння на ступінь розсічення, оскільки його робочі органи безпосередньо взаємодіють із матеріалом. Особливість сушіння зерен сої та вплив вологості на ступінь розсічення поверхні потребує дослідження фізико-механічних параметрів матеріалу.

Для вирішення поставлених завдань була розроблена програма досліджень, яка передбачала:

1. Визначення наступних фізико-механічних властивостей зерен сої:
2. Визначення зусилля, необхідного для розсічення поверхні зерен сої.
3. Визначення впливу ступеня розсічення поверхні зерен на процес сушіння.
4. Встановлення значення коефіцієнта відновлення.
5. Встановлення закономірності зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння в процесі його роботи.
7. Визначення впливу параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння та властивостей оброблювального матеріалу на коефіцієнт розсічення із застосуванням математичного методу планування експерименту.
8. Визначення впливу режимів сушіння та коефіцієнта розсічення на інтенсивність сушіння зерен сої із застосуванням математичного методу планування експерименту.

Число n об'єктів вимірювань, спостережень чи досліджень вибиралось на основі виконаних у трьох повторностях попередніх дослідів, під час яких встановлювався коефіцієнт варіації V .

Обробка результатів досліджень здійснювалась методами математичної статистики і теорії ймовірностей [91-94]. За результатами дослідів підраховувалися: середнє арифметичне значення отриманих даних; середня

квадратична похибка: середня квадратична похибка середнього ариф-метичного значення; коефіцієнт варіації; похибка досліду.

Для визначення фрикційних властивостей зерен сої застосовували прилад ПСГ-3М (рис 3.1) та три зразки поверхонь тертя (рис. 3.2) [95].

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд приладу ПСГ-3М:

а – загальний вигляд; б – робоча коробка:

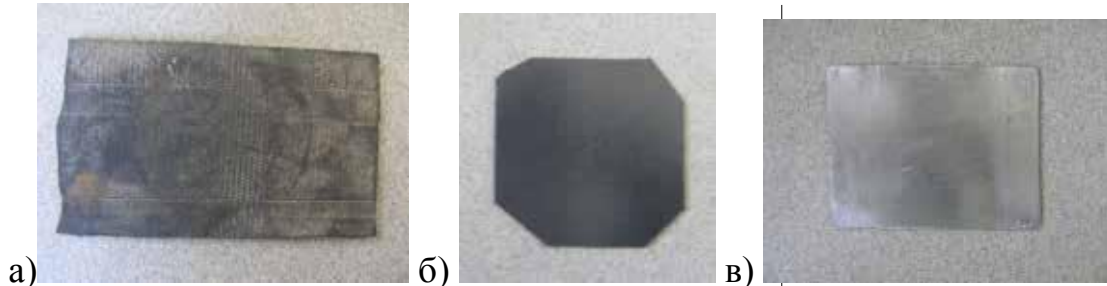


Рисунок 3.2 – Зразки поверхонь тертя:

а – прогумована стрічка; б – пластмаса; в – сталевий лист

Визначення величини зусилля руйнування поверхні поверхні проводилося за допомогою установки (рис. 3.5)[96-108].

3.1 Методика проведення досліджень

Для визначення кута внутрішнього тертя застосовувався прилад ПСГ-3М (рис. 3.1), описаний в п. 3.2.

Перед початком проведення досліджень прилад встановлювали строго в горизонтальне положення за допомогою регулювальних гвинтів. Досліджуваний матеріал із задалегідь визначеною вологістю завантажували у робочу коробку приладу. Для знімання надлишків матеріалу та вирівнювання його вільної поверхні застосовували планувальник. Після цього зверху зразок накривали аркушем фільтрувального паперу і встановлювали штамп [95].

Нормальне навантаження прикладали шляхом вкладання тягарів на платформу нижньої завантажувальної підвіски. Регулювальними гвинтами встановлювали зазор між верхньою (рухомою) та нижньою (нерухомою) частинами робочої коробки 0,5...1 мм. Для фіксації переміщення верхньої частини робочої коробки відносно нижньої використовували індикатор годинникового типу. З цією метою індикатор встановлювали у затискачі приладу так, щоб його ніжка впиралась у шток верхньої частини робочої коробки, а пружина зворотного ходу була максимально стиснутою. Після цього приклали зусилля зсуву, яке створювалось вагою вантажів, що розміщувались на платформі бокової завантажувальної підвіски.

Нормальне напруження визначали за формулою [95, 99]:

$$\sigma = \frac{G \cdot n}{l \text{ в.н.}}, \quad (3.1)$$

де σ – нормальне напруження, Н/м²; G_1 – сумарна вага вантажу на платформі нижньої завантажувальної підвіски, Н; $n_{в.н.}$ – передатне число важільного механізму нижньої навантажувальної підвіски; F – площа зрізу, м².

Граничне дотичне напруження визначали із залежності:

$$\tau = \frac{G \cdot n}{2 \text{ в.б.}}, \quad (3.2)$$

де τ – граничне дотичне напруження, Н/м²; G_2 – сумарна вага вантажу на платформі бокової завантажувальної підвіски у момент завершення дослідження, Н; $n_{в.б.}$ – передатне число важільного механізму бокової навантажувальної підвіски.

За дослідними значеннями σ і τ значення коефіцієнта внутрішнього тертя f визначали за формулою:

$$f = \frac{\tau_3 - \tau_1}{\sigma_3 - \sigma_1}, \quad (3.3)$$

де τ_1, τ_3 – граничні дотичні напруження відповідно при першому та третьому нормальному навантаженні, Н/м²; σ_1, σ_3 – нормальні напруження відповідно при першому і третьому нормальному навантаженні, Н/м².

Початковий опір зсуву визначали за формулою:

$$\tau_0 = \tau_1 - \sigma_1 \cdot \text{tg} \varphi, \quad (3.4)$$

де τ_0 – початковий опір зсуву, Н/м²; τ_1, σ_1 – відповідно граничне дотичне напруження та нормальне напруження в при першому нормальному навантаженні, Н/м².

Числове значення кута внутрішнього тертя визначали за формулою:

$$\varphi = \text{arctg} f \quad (3.5)$$

Дослідження проводили при трьох нормальних навантаженнях 100, 200 і 300 Н, кожне з яких прикладали на новому зразку досліджуваного матеріалу. Для кожного нормального навантаження дослід проводивсь із трикратною повторністю при вологості зерен сої 9,6%, 12,7%, 16,8% і 20,9%.

Для визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на процес сушіння застосовувалася установка (рис. 3.7–3.9).

Процес сушіння проходив у такій послідовності: атмосферне повітря нагніталось вентилятором до калорифера, де нагрівалось до необхідної температури, а далі гнучким з'єднанням надходило до сушильної камери. У сушильну камеру поміщалися касета, яка перегородкою була розділена на чотири частини (рис.3.9, б). У кожен з частин поміщалися попередньо зважені зернини сої з різним ступенем розсічення поверхні. Через касету проходив сушильний агент, знижуючи вологість матеріалу [99].

Температура сушильного агента, при якій проводився даний процес складала 45 ± 5 °С. Інтервал часу, через який проводилося зважування касети - 10 хв.

Експеримент проводився у трикратній повторюваності при різному ступені розсічення зерен сої: $k_p=1$; $k_p=1,015$; $k_p=1,041$; $k_p=1,073$.

З метою кількісної оцінки вологовіддачі окремих шарів зернини, було проведено роздільне сушіння: оболонки і їх ядра.

З відібраної кількості зерен сої відокремлювалася їх зовнішня оболонка, після чого проводилося зважування окремо відібраних зразків (рис. 3.11).

Для реалізації даного експерименту використовувалася експериментальна установка, описана у п. 3.2. (рис. 3.7–3.9). Сам процес сушіння здійснювали аналогічно описаному в п.3.4. Температура сушильного агента, при якій проводився даний процес складала 60 ± 5 °С. Інтервал часу, через який проводилося зважування касети – 5 хв.

Експеримент проводили у трикратній повторюваності.

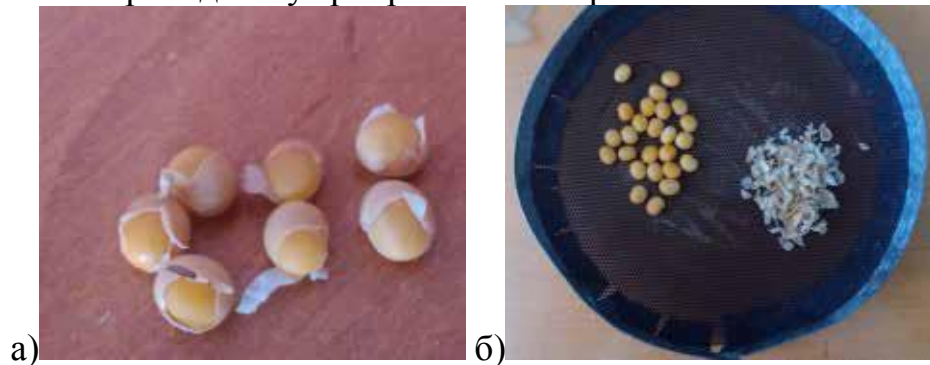


Рисунок 3.11 – Підготовка зерен сої до роздільного сушіння:

а – процес відокремлення; б – касета із відокремленими оболонками та ядрами

Для встановлення значення коефіцієнта відновлення k застосовувалась відома методика, що полягає у відеофіксації з високою частотою кадрів процесу падіння на металеву поверхню та відбиття зернини сої (рис. 3.14) [95,97]. При цьому висота падіння є фіксованою.

З метою зменшення кількості дослідів було використано симетричний композиційний план Бокса-Бенкіна другого порядку [105]. Для реалізації чотирифакторного експерименту за цим планом необхідно провести 27 дослідів.

Реалізація експериментального дослідження включала наступні етапи: кодування факторів, складання плану – матриці експерименту, рандомізація дослідів, реалізація плану експерименту, перевірка відтворюваності дослідів,

оцінка значущості коефіцієнтів регресії, перевірка адекватності отриманої математичної моделі.

План Бокса-Бенкіна розрахований на використання трьох рівнів для кожного фактора – верхнього (+1), основного (0) і нижнього (-1). Фактори та рівні варіювання для розглядуваного випадку представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Фактори та рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори			
	Вологість W , %	Подача Q , кг/год	Колова швидкість V , м/с	Кількість лопаток n , шт
	x_1	x_2	x_3	x_4
Верхній (+1)	23	500	55	6
Основний (0)	19	350	40	4
Нижній (-1)	15	200	25	2
Інтервал варіювання ε	4	150	15	2

Оскільки всі фактори, які входять у функцію (3.23) мають різну розмірність, а значення цих величин – різні порядки, то для отримання поверхні відгуку цих функцій проводиться кодування факторів з метою переведення натуральних факторів у безрозмірні величини.

Зв'язок між кодованими і натуральними значеннями факторів встановлювався залежностями: де W_0, Q_0, V_0, n_0 – значення факторів на основному рівні, відповідно, вологості зерен сої, подачі матеріалу в робочу камеру, колової швидкості диска, кількості лопаток; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ – інтервал варіювання фактора.

Дослідження проводили, використовуючи матрицю планування експерименту. Порядок проведення дослідів встановлювали, використовуючи таблицю випадкових чисел.

Функція відгуку (коефіцієнт розсічення зерен сої) в області факторного простору є нелінійною, тому подана у вигляді рівняння регресії

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{14} x_1 x_4 + b_{23} x_2 x_3 + b_{24} x_2 x_4 + b_{34} x_3 x_4 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{44} x_4^2 \quad (3.23)$$

Коефіцієнти регресії визначали за методикою [89].

Довірчі інтервали оцінок коефіцієнтів регресії розраховуємо за форму-

лою:
$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha, f_1} S_{b_i} \quad (3.24)$$

де $t_{\alpha; f_1}$ – критерій Стюдента при вибраній довірчій ймовірності α та числі ступенів вільності f_1 ; S_{bi} – середньоквадратичні помилки оцінок коефіцієнтів регресії.

Оскільки один дослід у центрі плану тричі дублюється, сума квадратів

$SS_{неод}$ визначається за формулою:

Запропонована методика проведення експерименту за планом Бокса-

Бенкіна дозволяє отримати математичну модель процесу підготовки до сушіння зерен сої у вигляді рівняння регресії, функцією відгуку якого є коефіцієнт розсічення.

Аналіз рівняння регресії дає можливість оцінити вплив на коефіцієнт розсічення зерен сої таких факторів, як вологість матеріалу, подача в робочу камеру, колова швидкість диска та кількість лопаток на диску.

Під час роботи сушарки необхідно забезпечити доведення зерен сої до кондиційної вологості з мінімальними енергозатратами. Тому за критерій оптимізації у ході проведення багатофакторного експерименту було вибрано час сушіння матеріалу до кондиційної вологості. Фактори та рівні варіювання представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 Фактори та рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори		
	Вологість	Температура СА	Швидкість СА
	$W, \%$	$t_{ca}, ^\circ\text{C}$	$V_{ca}, \text{м/с}$
	x_1	x_2	x_3
Верхній (+1)	23	45	2,2
Основний (0)	19	40	1,9
Нижній (-1)	15	35	1,6
Інтервал варіювання ε	4	5	0,3

Для кількісної оцінки впливу зазначених факторів та отримання матема-

тичної моделі процесу сушіння у вигляді рівняння регресії, було проведено дослідження із застосуванням математичного методу планування експерименту за методикою, аналогічною п. 3.12.

Зв'язок між кодованими і натуральними значеннями факторів встановлювався залежностями:

$$x_1 = \frac{W - W_o}{\varepsilon}; x_2 = \frac{t_{ca} - t_{ca0}}{\varepsilon}; x_3 = \frac{V_{ca} - V_{ca0}}{\varepsilon},$$

Запропонована методика проведення експерименту за планом Бокса-Бенкіна дозволяє отримати математичну модель процесу сушіння у вигляді рівняння регресії, функцією відгуку якого є час сушіння. Аналіз рівняння регресії дає можливість оцінити вплив на час сушіння зерен сої таких факторів, як вологість матеріалу, швидкість та температура сушильного агенту.

3.2. Результати досліджень

Сипкість зерен сої характеризується граничними дотичними напруженнями τ , кутом внутрішнього тертя φ та початковим зусиллям зсуву τ_0 [100,102].

На основі проведених експериментальних досліджень по визначенню граничних дотичних та нормальних напружень та користуючись формулами (3.3) та (3.4), розраховували коефіцієнт внутрішнього тертя f і початковий опір зсуву τ_0 . Числові значення кута внутрішнього тертя визначали за формулою (3.5).

Результати досліджень у вигляді середніх значень кута внутрішнього тертя та початкового зусилля зсуву зерен сої наведено у табл. 3.1. На основі табличних даних побудовано графічні залежності (рис. 3.1, 3.2).

Таблиця 3.3 – Результати дослідження початкового зусилля зсуву τ_0 і кута внутрішнього тертя φ зерен сої

Параметр	Вологість зерен сої $W, \%$			
	9,6	12,7	16,8	20,9
Початкове зусилля зсуву τ_0 , кПа	1,14	0,78	0,54	0,51
Кут внутрішнього тертя $\varphi, ^\circ$	11,2	5,7	4,4	3,9

Рисунок 3.1 – Залежність зміни початкового зусилля зсуву τ_0 зерен сої від їх вологості W

Рисунок 3.2 – Залежність зміни кута внутрішнього тертя φ зерен сої від їх вологості W

Із одержаних кривих видно, що вологість зерен сої має істотний вплив на значення початкового зусилля зсуву та кута внутрішнього тертя. Спадні криві отриманих значень свідчать, що зі збільшенням вологості матеріалу дані показники зменшуються. Такий характер кривих пояснюється тим, що при збільшенні вологості форма поверхні наближається до кулястої, що в свою чергу призводить до збільшення кривини поверхні і зменшення точок контакту між зернинами. Як наслідок відбувається зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя.

Фрикційні властивості матеріалів характеризуються динамічним коефіцієнтом тертя ковзання або динамічним кутом тертя ковзання та статичним коефіцієнтом тертя ковзання або статичним кутом тертя ковзання [100,102].

Під час проведення експериментів використовували прилад ПСГ-3М (рис. 3.1). У якості площин тертя використовувались матеріали, що можуть застосовуватися для виготовлення робочих органів пристрою підготовки зерен сої до сушіння: сталь, пластмаса, прогумована стрічка.

Середні значення отриманих у результаті досліджень статичного та динамічного коефіцієнтів тертя ковзання наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Середні значення коефіцієнтів тертя ковзання зерен сої

Досліджуваний матеріал		Матеріал площини тертя					
		Пластмаса		Сталь		прогумована анастрічка	
		f_c	f_d	f_c	f_d	f_c	f_d
С	9,6	0,3	0,18	0,4	0,22	0,42	0,24
	12,7	0,28	0,17	0,37	0,2	0,41	0,21
	16,8	0,275	0,15	0,345	0,19	0,405	0,2
	20,9	0,26	0,14	0,315	0,17	0,395	0,17

Для аналізу впливу вологості на зміну коефіцієнта тертя побудовано графічну залежність (рис. 3.3).

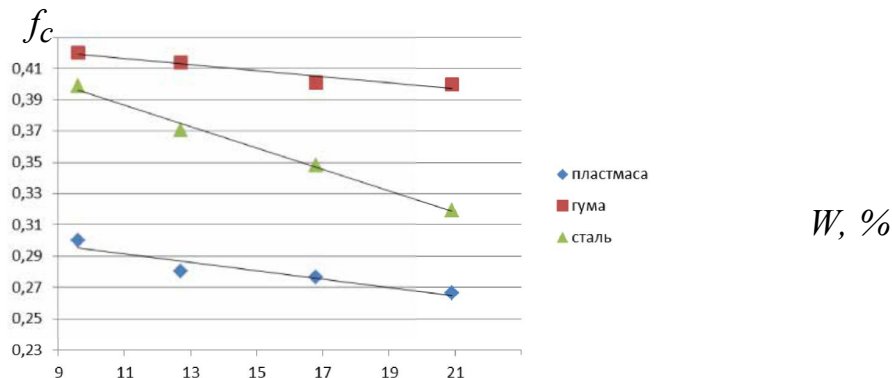


Рисунок 3.3 – Залежність зміни статичного коефіцієнта тертя ковзання f_c зерен сої від його вологості W

Аналіз результатів експериментально отриманих значень вказує на те, що коефіцієнт тертя зерен сої спадає в незначних межах внаслідок підвищення вологості матеріалу і значно залежить від шорсткості поверхні тертя. Спадний характер залежностей можна пояснити тим, що при збільшенні вологості зменшуються сили молекулярного притягання оболонки зернини до поверхні матеріалу, у результаті чого коефіцієнт тертя ковзання спадає. Це підтверджує графік зміни початкового зусилля зсуву τ_0 та коефіцієнта внутрішнього тертя ϕ зерен сої від його вологості W , що теж має спадний характер.

Характер кривих залежності коефіцієнта тертя від зміни вологості близький до прямолінійного. Це підтверджують результати апроксимації (рис. 4.3). Отримані залежності для дослідних матеріалів мають вигляд: для пластмаси:

$f_c = -0,0027W + 0,3208$, для прогумованої стрічки:
 $f_c = -0,0019W + 0,4377$, для сталеві пластини: $f_c = -0,0068W + 0,4617$.

З одержаних графічних залежностей видно, що числові значення даного коефіцієнта для гуми знаходяться в таких межах: $f_c = 0,395 \dots 0,42$, коли для пластмаси вони значно менші: $f_c = 0,26 \dots 0,3$.

Значення пористості та щільності зерен сої використовуються для розрахунку ємкостей і вантажопідйомності тари, кузовів автомобілів, бункерів комбайнів, місткості завантажувальних пристроїв машин для підготовки матеріалу до сушіння, потужності вентиляторів сушарок і ін.

За показником щільності зерен сої можна оцінити фізико-хімічні властивості матеріалу, такі як маса 1000 зерен, структура, хімічний склад і т.д. У зв'язку з цим щільність матеріалу перебуває у тісному взаємозв'язку з основними показниками технологічних властивостей сої [98, 100-102].

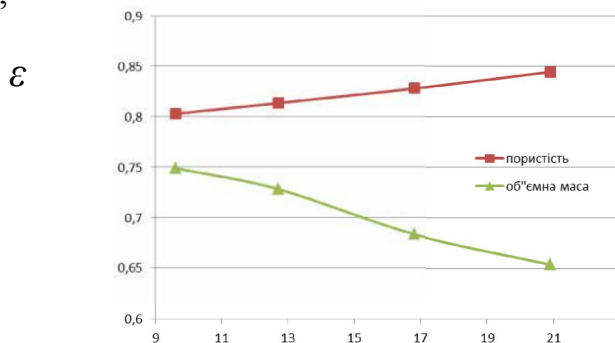
Середні значення щільності, пористості та об'ємної маси зерен сої, отримані в результаті експериментальних досліджень, наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Середні значення щільності, пористості та об'ємної маси зерен сої

Показник	Вологість, %			
	9,6	12,7	16,8	20,9
Щільність ρ , г/см ³	1,201	1,194	1,183	1,17
Пористість ε	0,803	0,814	0,828	0,845
Об'ємна маса γ_0 , г/см ³	0,749	0,728	0,684	0,654

Аналіз результатів обробки експериментально отриманих значень вказує на те, що збільшення вологості матеріалу призводить до зменшення об'ємної маси та зростання пористості зерен сої. Це пояснюється тим, що за рахунок зростання вологості відбувається набухання зерен і зростання їх характерних розмірів, а отже і зменшується компактність їх вкладення у обмеженому об'ємі.

γ_0 , г/см³,



W, %

Рисунок 3.4 – Залежність зміни пористості та об'ємної маси зерен сої від його вологості

Рисунок 3.5 – Залежність зміни щільності зерен сої від їх вологості

Зростання щільності зерен сої під час зростання їх вологості ймовірно пояснюється заповненням внутрішніх пор зерен вологою.

Аналізуючи одержані результати, можна стверджувати, що підвищення вологості зерен сої – об'єктивний визначальний фактор зміни їх пористості, об'ємної маси та щільності

Кут природного відкосу дає загальне уявлення про рухомість сипкого матеріалу. При переробці зерен сої величину кута природного відкосу, утвореного насипанням, враховують при проектуванні бункерів, транспортних комунікацій і розрахунку місткості складів. За величиною кута природного відкосу аналізують технологічність продукту. Наприклад, знаючи величину кута природного відкосу, можна заздалегідь прогнозувати ризик завалу, зависання матеріалу чи ризик розсипання. За допомогою кута природного відкосу, утвореного обваленням, можна визначити кут нахилу бічних стінок завантажувального бункера [98, 100-102].

Середні значення отриманих у результаті досліджень кутів природного відкосу наведені у табл.3.4.

Таблиця 3.4 – Середні значення кутів природного відкосу

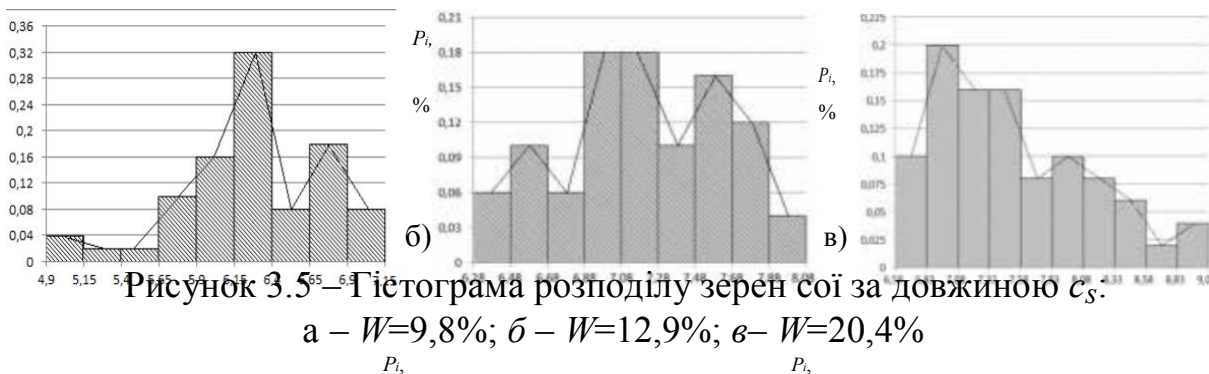
Вологість зерен сої, %	$\alpha_{нас}^{\circ}$	$\alpha_{обв}^{\circ}$
12,7	30,2	33,3
16,4	31,2	38,8
20,9	32,4	42,6

Для аналізу впливу вологості зерен сої на зміну кута природного відкосу побудовано графічну залежність (рис. 3.6).

Аналіз результатів експериментально отриманих значень вказує на те, що кут природного відкосу зерен сої зростає внаслідок підвищення вологості матеріалу. Це пояснюється тим, що зі збільшенням вологості рухомість будь-якого сільськогосподарського матеріалу зменшується, а це в результаті і призводить до збільшення кута природного відкосу. Таке явище очевидно пояснюється значним зростанням визначальних розмірів зерен сої із зростанням їх вологості.

Рисунок 3.6 – Графічна залежність впливу відносної вологості W зерен сої на зміну кутів природного відкосу, утвореного насипанням, $\alpha_{нас}$ та обваленням $\alpha_{обв}$

З метою обґрунтування віддалі між ножовими пластинами деяки досліджуваного пристрою, а також забезпечення практичного використання математичних моделей, отриманих у розділі 2, було проведено дослідження розмірно – масових характеристик зерен сої [100,102].



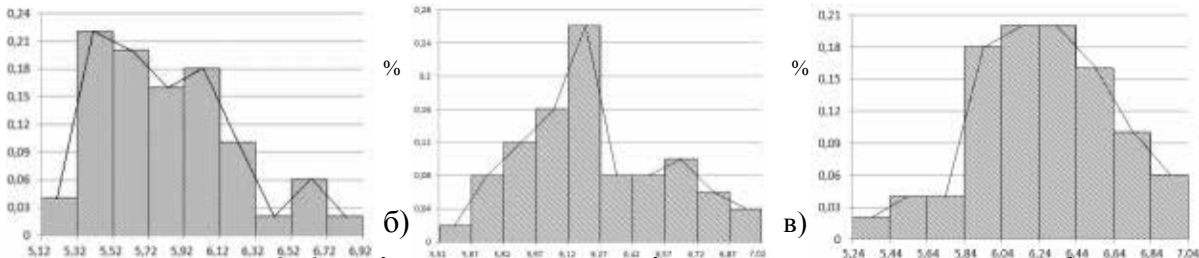


Рисунок 3.6 – Гістограма розподілу зерен сої за шириною b_s :

а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

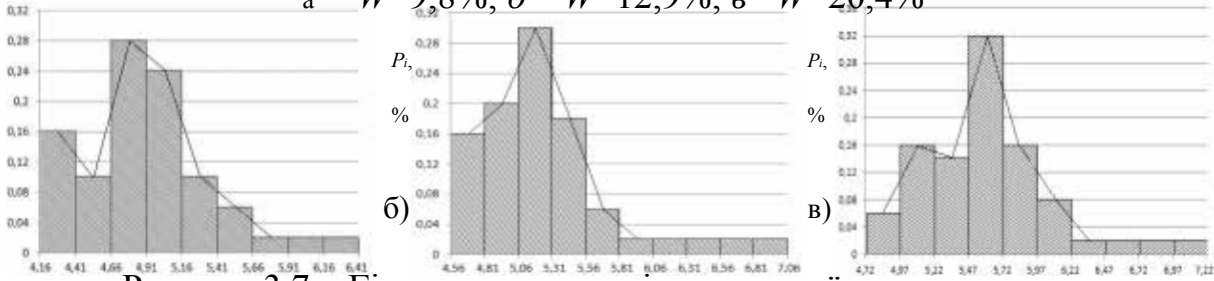


Рисунок 3.7 – Гістограма розподілу зерен сої за товщиною a_s :

а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

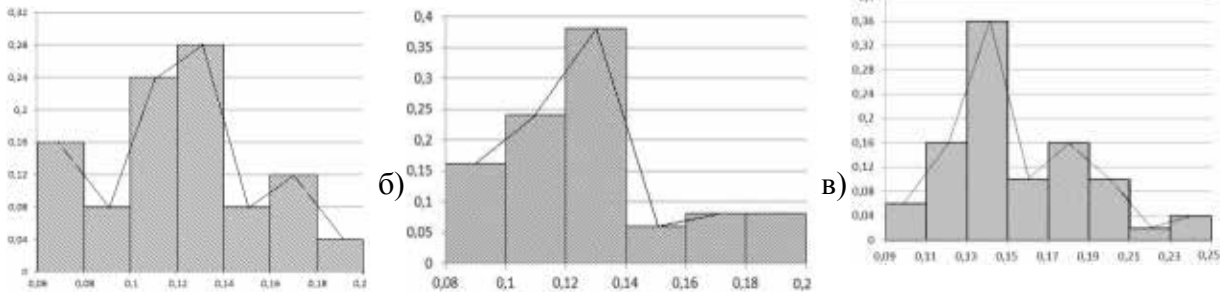


Рисунок 3.8 – Гістограма розподілу зерен сої за масою m_s :

а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

На основі проведених досліджень, можна стверджувати, що при проектуванні та розрахунку пристрою підготовки зерен сої до сушіння в якості вихідних розмірних показників матеріалу можуть бути прийняті їх середні значення.

Сушінню піддавався матеріал з початковою вологістю $W = 20,9\%$. Дослідження проводилися за температури сушильного агенту $t_{c.a.} = 45 \pm 5^\circ\text{C}$, маса проб у касеті фіксувалася кожні 10 хв.

За одержаними експериментальними даними побудовані графіки (рис. 4.10), які відображають зміну вологості матеріалу з часом.

Рисунок 4.10 – Зміна відносної вологості зерен сої з часом:

1 – $k_p=1$; 2 – $k_p=1,015$; 3 – $k_p=1,041$; 4 – $k_p=1,073$

З одержаних кривих сушіння видно, що час, протягом якого відбувається досягнення кондиційної вологості $W=12\%$ є різним у 1 і 2 випадках: 1 крива – 17 хв, 4 крива – лише 13 хв. Тому можна стверджувати, що ступінь розсічення поверхні зернини має істотний вплив на швидкість сушіння, так за максимального досліджуваного значення коефіцієнта розсічення $k_p = 1,073$ час сушіння порівняно із недеформованими зернинами ($k_p = 1,0$) змінюється з до 60 хв до 25 хв.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження по визначенню величини зусилля, необхідного для розсічення поверхні зернини, дають мож-

ливість розрахувати необхідну швидкість удару зернини сої об ножову пластину деки пристрою підготовки до сушіння. А це, як наслідок, дасть можливість обґрунтувати частоту обертання та діаметр диска механізму.

Величину зусилля, необхідну для розсічення зерен сої визначалися за методикою, описаною в п. 3.5. Для проведених досліджень використовувались зерна сої різної вологості W : 9,6 %, 12,7 %, 16,4 % та 20,9 %.

Зернину сої вважали розсіченою у випадку входження ножової пластини на глибину $\delta = 1 \dots 1,5$ мм у тіло зернини.

Середні значення величини зусилля розсічення поверхні зернини наведені у табл. 3.10.

Таблиця.3.10 – Середні значення зусилля розсічення поверхні зернини

Для аналізу впливу вологості зерен сої на зусилля розсічення поверхні зернини F побудовано графічну залежність (рис.3.12).

Рисунок 3.12 – Графічна залежність впливу вологості зерен сої W на величину зусилля розсічення поверхні зернини F

За отриманими графіками видно, що початкова вологість зерен сої суттєво впливає на зусилля розсічення, тобто чим зерно сухіше, тим потрібне більше зусилля для його розсічення. Таке явище очевидно пояснюється усадкою (висиханням) зернини та щільним вкладенням твердих її складових.

Аналізуючи вплив досліджуваних параметрів на розподіл швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$ у робочій камері, можна зробити наступні висновки:

З віддаленням від осі робочої камери, за усією її висотою, спостерігається зниження швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$, але інтенсивність зниження зростає на віддалі від осі камери $r > 150$ мм.

Рисунок 3.14 – Графічна залежність зміни швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$

за об'ємом робочої камери пристрою підготовки зерен сої до сушіння

Аналізуючи утворені поверхні віддуку, можна помітити незначний вплив швидкості подачі сушильного агента V_{ca} на процес сушіння зерен сої: зі збільшенням V_{ca} час, необхідний для досягнення кондиційної вологості зменшується. Дане спадання характерне лише для значень $V_{ca} < 1,9$ м/с, а при $V_{ca} > 1,9$ м/с вплив даного фактору на час сушіння τ відсутній, тому доцільно під час сушіння зерен сої використовувати швидкість подачі сушильного агента, яка знаходиться в межах $V_{ca} = 1,9 \dots 2,0$ м/с.

Технологія виробництва соєвої олії включає процеси збирання, сушіння та пресування олії. Однією з найбільш енергоємних процесів у технології переробки сої є її сушіння. Адже не завжди вологість зерен сої, що поступає на подальшу переробку, є відповідною до норм та стандартів.

Зменшення енергозатрат у виробництві сільськогосподарської продукції є пріоритетним завданням для вивчення і вдосконалення. Тому актуальними є дослідження, спрямовані на огляд та вдосконалення існуючих методів та встановлення шляхів зниження енерговитрат на процес сушіння не насінневих зерен сої.

Пошук нових енергозберігаючих методів вологовидалення зерен сої вказав на необхідність підготовки матеріалу до сушіння шляхом розсічення поверхні. З урахуванням особливостей зерен сої та з метою інтенсифікації його процесу сушіння було запропоновано вдосконалити технологію сушіння та розмістити у механізмі завантаження пристрій підготовки матеріалу до сушіння (рис. 5.1), 3-D модель якого представлено на рис. 3.12.

Рисунок 3.12 – Функціональна схема сушарки підготовлених зерен сої

Для реалізації запропонованої технології запропоновано пристрій підготовки зерен сої до сушіння. Модель пристрою показана на рис.3.13.

Принцип роботи такого пристрою полягає у тому, що зерна сої із завантажувального бункера потрапляють на відцентровий диск, де, переміщуючись робочими радіальними каналами, набувають необхідної кінетичної енергії.

Рисунок 3.13 – 3-D модель пристрою підготовки сої до сушіння

При вильоті зерен сої з відцентрового диска пристрою та їх контакті з ножовою поверхнею деки відбувається удар, що призводить до розсічення поверхні. Після цього матеріал виводиться через бункер для транспортування в сушарку.

За необхідності регулювання ступеня розсічення зерен сої кількість секцій можна змінювати.

Рисунок 3.14 – Сушарка зерен сої із підготовкою матеріалу до сушіння

В результаті перевірки роботи сушарки встановлено, що обґрунтовані теоретично і експериментально параметри пристрою підготовки зерен сої до сушіння, а також прийняті режимні параметри сушіння забезпечують ефективне виконання технологічного процесу. Сушіння забезпечує рівномірне просушування матеріалу. За результатами випробувань встановлено, що максимально допустиме значення коефіцієнта розсічення зернини сої $k_p = 1,053$ було досягнуто при початковій вологості сої $W = 17...19\%$, коловій швидкості диска $V = 35...45$ м/с, подачі $Q = 200...300$ кг/год та кількості лопаток $n = 4$.

Результати господарсько-лабораторних досліджень сушіння не зерен сої підтверджують ефективність і доцільність використання пристрою підготовки зерен сої до сушіння.

3.3 Висновки до розділу

1. Максимальне значення кута внутрішнього тертя зерен сої становить $11,2^\circ$ за вологості $W = 9,6\%$, найменше $-3,9^\circ$ за $W = 20,9\%$. Максимальне значення коефіцієнта тертя ковзання складає $f_c = 0,42$ і відповідає умовам взаємодії зерен сої вологістю $W = 9,6\%$ із прогумованою стрічкою, а мінімальне – $f_c = 0,26$ характерне для контакту матеріалу вологістю $W = 20,9\%$ із пластмасою.

2. Середні значення вагових характеристик зерен сої склали: щільність $\rho = 1,17...1,201$ г/см³; пористість $\varepsilon = 0,803...0,845$ г/см³; об'ємна маса $\gamma_0 = 0,654...0,749$ г/см³. Максимальні значення кута природнього відкосу відповідають вологості зерен сої $W = 20,9\%$ – $\alpha_{нас} = 32,4^\circ$, $\alpha_{обв} = 42,6^\circ$. Залежно від вологості матеріалу значення товщини зерен знаходиться в межах $as =$

4,91...5,6 мм, ширини $bs = 5,82...6,26$ мм, довжини $cs = 6,27...7,52$ мм та маси $ms = 0,12...0,15$ г.

3. Найбільше зусилля, яке необхідне для розсічення поверхні зерен, становить $19,01 H$ і відповідає вологості матеріалу $W = 9,6 \%$, найменше – $3,41 H$ для $W = 20,9 \%$. Максимальне значення коефіцієнта відновлення k для вологості зерен сої $W = 20,9 \%$ становить $k = 0,39$, мінімальне – $k = 0,55$ за $W = 9,6\%$.

4. Швидкість повітряного потоку $V_{нов}$ за всією робочою камерою змінюється в діапазоні від 1,0 до 8,2 м/с. Максимальне значення $V_{нов} = 8,2$ м/с досягається за наступних параметрів: колова швидкість диска $V = 55$ м/с; висота від поверхні диска $h = 35$ см; віддаль від осі камери $r = 0$ см. Мінімум значення $V_{нов} = 1,0$ м/с досягається при: $V = 25$ м/с; $h = 55$ м; $r = 30$ см.

5. Отримано регресійні математичні моделі зміни коефіцієнта розсічення і експозиції сушіння від параметрів пристрою підготовки та режимів сушіння зернового матеріалу. Максимально допустиме значення коефіцієнта розсічення k_p досягається за початкової вологості зерен сої $W = 17...19 \%$, коловій швидкості диска $V = 35...45$ м/с, подачі $Q = 200...300$ кг/год та кількості лопаток $n = 4$. Розроблений пристрій підготовки зерен сої як складова частина завантажувального бункера сушарки може ефективно використовуватись у господарствах задля інтенсифікації сушіння. Внаслідок використання даного пристрою в запропонованій технологічній схемі сушіння зерен сої збільшується площа контакту матеріалу з сушильним агентом та інтенсифікується процес вологовіддачі, що призводить, в сою чергу, до економії енерговитрат.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що реалізація традиційних способів конвективного сушіння (зерна сої, інших олійних культур) в існуючих високотемпературних зерносушарках практично досягла межі вдосконалення і подальше підвищення їх продуктивності можливе шляхом попередньої обробки самого об'єкта сушіння – зерноматеріалу. Перспективним напрямком інтенсифікації процесу конвективного сушіння зерна сої є штучне збільшення поверхні випаровування шляхом розсічення поверхневого шару зерен.

2. Утворення «нових поверхонь» випаровування шляхом ударної взаємодії зерен сої із ножовими елементами пристрою підготовки до сушіння дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на 20...55 % залежно від ступеня розсічення. Для кількісної оцінки ступеня інтенсифікації процесу сушіння запропоновано ввести коефіцієнт розсічення, який характеризує приріст площі випаровування і кількісний показник інтенсивності теплообміну – еквівалентний (ефективний) радіус зернини, який можливо змінювати в межах 1,0...1,1.

3. Розроблено математичні моделі процесу сушіння зерен сої нагрітим повітрям, які враховують стан матеріалу, що характеризується еквівалентним розміром, залежним від коефіцієнта розсічення та інтенсивність випаровування з новоутвореної поверхні. Адекватність моделей оцінена відхиленням теоретичних і експериментально отриманих даних в межах 3...7 %.

4. Аналітично визначено і кількісно оцінено вплив ступеня розсічення (коефіцієнта розсічення) на інтенсивність вологовидалення зерен сої. Збільшення

коефіцієнта з 1,0 до 1,073 (глибина розсічення 1,5 мм) дозволило зменшити експозицію сушіння з 60 хв до 25 хв, що дає можливість збільшити продуктивність існуючих сушарок.

5. Теоретично обґрунтовано ударну взаємодію зерен із ножовою пластиною пристрою підготовки до сушіння з урахуванням коефіцієнта відновлення та зусилля руйнування і визначено швидкість удару зернини сої об но-жову пластину $v_{y\partial} = 20 \dots 65$ м/с.

6. Вдосконалено математичну модель переміщення зерен сої вздовж обертального конічного диску пристрою підготовки їх до сушіння, яка враховує зміну сили повітряного потоку вздовж радіусу та дозволяє визначити швидкість удару в залежності від конструктивних і режимних параметрів пристрою. Експериментально визначено його раціональні параметри: радіус диска $r = 0,4$ м; кутова швидкість диска $\omega = 137,5$ рад/с; кут нахилу поверхні диска $\alpha = 40^\circ$. За таких умов оптимальна швидкість подачі зерен сої в зону розсічення складає $v_{вил} = 20 \dots 65$ м/с.

7. Максимальне значення кута внутрішнього тертя зерен сої становить $\varphi = 11,2^\circ$ за вологості $W = 9,6$ %, найменше – $\varphi = 3,9^\circ$ за $W = 20,9$ %. Максимальне значення коефіцієнта тертя ковзання складає $f_c = 0,42$ і відповідає умовам взаємодії зерен сої вологістю $W = 9,6$ % із прогумованою стрічкою, а мінімальне – $f_c = 0,26$ характерне для контакту матеріалу вологістю $W = 20,9$ % із пластмасою.

8. Середні значення вагових характеристик зерен сої склали: щільність $\rho = 1,17 \dots 1,201$ г/см³; пористість $\varepsilon = 0,803 \dots 0,845$ г/см³; об'ємна маса $\gamma_0 = 0,654 \dots 0,749$ г/см³. Максимальні значення кута природнього відкосу відповідають вологості зерен сої $W = 20,9$ % – $\alpha_{нас} = 32,4^\circ$, $\alpha_{обв} = 42,6^\circ$. Залежно від вологості матеріалу значення товщини зерен знаходиться в межах $a_s = 4,91 \dots 5,6$ мм, ширини $b_s = 5,82 \dots 6,26$ мм, довжини $c_s = 6,27 \dots 7,52$ мм та маси $m_s = 0,12 \dots 0,15$ г.

9. Найбільше зусилля, яке необхідне для розсічення поверхні зерен, становить $19,01$ Н і відповідає вологості матеріалу $W = 9,6$ %, найменше – $3,41$ Н для $W = 20,9$ %. Максимальне значення коефіцієнта відновлення k для вологості зерен сої $W = 20,9$ % становить $k = 0,39$, мінімальне – $k = 0,55$ за $W = 9,6$ %.

10. Швидкість повітряного потоку $V_{нов}$ за всією робочою камерою змінюється в діапазоні від 1,0 до 8,2 м/с. Максимальне значення $V_{нов} = 8,2$ м/с досягається за наступних параметрів: колова швидкість диска $V = 55$ м/с; висота від поверхні диска $h = 35$ см; віддаль від осі камери $r = 0$ см. Мінімальне значення $V_{нов} = 1,0$ м/с досягається при: $V = 25$ м/с; $h = 55$ м; $r = 30$ см.

11. Отримано математичні моделі зміни коефіцієнта розсічення і експозиції сушіння від параметрів пристрою підготовки та режимів сушіння зернового матеріалу. Максимально допустиме значення коефіцієнта розсічення k_p досягається за початкової вологості зерен сої $W = 17...19\%$, коловій швидкості диска $V = 35...45$ м/с, подачі $Q = 200...300$ кг/год та кількості лопаток $n = 4$. Значення факторів, під час яких буде досягнуто мінімальне значення часу сушіння τ , склали (з коефіцієнтом розсічення $k_p = 1,053$): температура і швидкість подачі сушильного агенту $t_{ca} = 42...45^\circ\text{C}$; $V_{ca} = 1,9...2,0$ м/с; початкова вологість зерен сої $W = 17...19\%$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бабич А.О. Сучасне виробництво і використання сої. – Монографія.– К.: Урожай, 1993. – 432 с. ISBN 5-337-01416-1.
2. Котов Б.И. Технологические и теплоэнергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: дис. ... доктора техн. наук: 05.20.01 / Борис Иванович Котов. – Глеваха, 1994. – 440 с.
3. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія / В.Ф. Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с. 11.
4. Дударев І.М. Обґрунтування технологічного процесу та параметрів сушарки льоносировини в рулонах: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Ігор Миколайович Дударев. – Луцьк, 2007. – 208 с.
5. Булгаков В.М. Пріоритетні напрями наукових досліджень з механізації сільського господарства / Булгаков В.М., Лінник М.К., Гуков Я.С. – Збірник наукових праць НАУ “Механізація сільськогосподарського виробництва”, т. X, 2001. – С. 8–14.
6. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. - К.: Держстандарт України, 1994. - 73 с.
7. Лихочвор В.В., Петриченко В.Ф. Рослинництво. Сучасні інтенсивні технології вирощування основних польових культур. – Львів: НВФ «Українські технології», 2006. – 730 с.
8. Нагорний В.І. Вплив строків і способів сівби на урожайність сортів сої // Корми і кормовиробництво. – Вінниця. Міжвідомчий темат. наук. зб. Вип. 66. 2010. С. 96-103.
9. Пат. 84111 Україна, МПК В07В 9/00. Машина для деформації насінневих оболончок./ Р.В. Кірчук, К.Є. Цизь//Бюл. №19, 2013 р. – 5 с.
10. Калетнік Г.М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність та жорсткість. Ч.І, II: Підручник / Г.М. Калетнік, М.Г. Чаусов, В.М. Швайко, В.М. Пришляк та ін.; за ред. Г.М. Калетніка, М.Г. Чаусова. – К.: Хай Тек-Прес, 2011. – 616 с.
11. Калетнік Г.М. Технічна механіка [Текст] : підручник для студентів вищих навчальних закладів / Калетнік Г.М., Булгаков В.М.; Черниш, О.М. та ін.. - К. : Хай-Тек Прес, 2011. - 340 с.
12. Калетнік Г.М. Теоретична механіка в прикладах та завданнях: Навч. посібник / В. М. Булгаков, Г. М. Калетнік, І. В. Гриник та ін.; За ред. : В. М. Булгакова. - К.: Аграрна наука, 2014. - 348 с.

13. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов (справочное пособие под ред. проф. А.С. Гинзбурга).- М.: Пищевая промышленность, 1975.- 223 с.
14. Ящук А.А. Обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Ящук Андрій Анатолійович. – Кіровоград, 2014. – 171 с.
15. Жуковський Н.Е. Теоретическая механика. Издание второе / Жуковский Н.Е. – М. – Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 812с.
16. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник / Павловський М.А. – К. – «Техніка», 2002. – 512с.
17. Агамиров Л.В. «Сопротивление материалов» [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://mysopromat.ru/uchebnye_kursy/sopromat/.
18. Ловейкін В.С. Визначення швидкості руху частинки твердих мінеральних добрив після сходження з лопатки диска при врахуванні дії вітру/ В. С. Ловейкін, Ю. В. Човнюк, А. І. Дитюк // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету. – 2009. – №2 : Сучасні проблеми землеробської механіки. – С. 180 –188.
19. Василенко П.М. Теория движения частиц по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин [Текст] / П.М. Василенко; под ред. акад. М.И. Медведева. – Киев Изд-во Укр. Акад. с.-х. наук, 1960. – 283 с.
20. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел / Учебное пособие – М. : Пищевая промышленность, 1974.– 439 с.
21. Ковбаса В.П. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ // Навч. посібник / В.П.Ковбаса, В.М.Швайко, О.П.Гуцол. – Ніжин: Видавець ПП Лисен-ко М.М., 2015. –536 с.
22. Бондаренко А.А., Дубінін О.О., Переяславцев О.М. Теоретична механіка: Підручник: У 2 ч.-Ч.2:Динаміка. – К.:Знання, 2004. – 590с.
23. Котов Б.И. Технологические и энергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Глеваха, 1994. – 438 с.
24. Труханська О.О. Динаміка охолодження зерна в аерогравітаційному шарі. / Котов Б.І., Труханська О.О., Курганський О.Д. // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК». - Вінниця, 2017. -№3(98) - С.94-98.
25. Котов Б.І. Аналітичне визначення динамічних тепловологісних режимів зерносушарок безперервної дії / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко, М.І. Липунов // Конструювання, виробництво та експлуатація с.-г. машин.- Кіровоград, 2012. – №42. – с. 340 – 346.
26. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов – 5-е изд., доп. и перераб. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.
27. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – 2-е изд., перераб. и доп. / В. А. Вознесенский – М.: Финансы и статистика, 1981. – 263 с.

28. Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений (Методы испытаний, приборы, характеристики). – М.: Колос, 1970. –424 с.
29. Пат. 27977 Україна, МКВ А01F26В 17/04. Сушарка для сипких матеріалів / Дударев І.М., Кірчук Р.В., Кокалюк Л.Ю. ; заявл. 01.06.07 ; опубл. 26.11.07
30. Хайлис Г.А. Механика растительных материалов / Г.А. Хайлис.- К.:УААН, 2002. - 374 с.
31. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник / [О.М. Царенко, Д.Г. Войтюк, В.М. Швайко та ін.]; За ред. С.С.Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448 с.
32. Адлер Ю.И. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.И. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976.-279 с.
33. Про затвердження галузевої програми «Соя України 2008-2015» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.uazakon.com/documents/date_e3/pg_gtcrox/index.htm
34. Palmer R. G. List of the genus *Glycine* Willd. – New York, 1996. –P. 10-13.
35. W. Diepenbrock, G. Fischbeck, K.-U. Heyland, N. Knauer. Spezieller Pflanzenbau. 3. Auflage, Ulmer, Stuttgart 1999, S. 240–250. ISBN 3-8252-0111-2.

ДОДАТКИ

Таблиця А.2. Планування експерименту

Номер до сліду	Фактори			
	$W, \%$	$Q, \text{кг/год}$	$V, \text{м/с.}$	$n, \text{шт}$
1	23	500	40	4
2	15	500	40	4
3	23	200	40	4
4	15	200	40	4
5	19	350	55	6
6	19	350	25	6
7	19	350	55	2
8	19	350	25	2
9	23	350	40	6
10	15	350	40	6
11	23	350	40	2
12	15	350	40	2
13	19	500	55	4
14	19	200	55	4
15	19	500	25	4
16	19	200	25	4
17	23	350	55	4
18	15	350	55	4
19	23	350	25	4
20	15	350	25	4
21	19	500	40	6
22	19	200	40	6
23	19	500	40	2
24	19	200	40	2
25	19	350	40	4
26	19	350	40	4
27	19	350	40	4

Таблиця А.4. Планування експерименту

Номер дослід	Фактори		
	W , %	t_{ca} , °C	V_{ca} , м/с
1	23	45	1,9
2	15	45	1,9
3	23	35	1,9
4	15	35	1,9
5	23	40	2,2
6	15	40	2,2
7	23	40	1,6
8	15	40	1,6
9	19	45	2,2
10	19	35	2,2
11	19	45	1,6
12	19	35	1,6
13	19	40	1,9
14	19	40	1,9
15	19	40	1,9