

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Р.В. Кірчук, І.Є. Цизь, К.Є. Коpecь

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ БОБІВ СОЇ**

МОНОГРАФІЯ

Луцьк 2020

УДК 631.365:633.34

К 38

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Луцького національного технічного університету
(протокол № __ від __ _____ 2020 року)*

Рецененти:

Налобіна О.О. доктор технічних наук, професор (Національний університет водного господарства та природокористування);

Федосов С.А. доктор фізико-математичних наук, професор (Східноєвропейський національний університет ім. Лесі Українки);

Дударєв І.М. доктор технічних наук, професор (Луцький національний технічний університет).

Кірчук Р.В. Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва органо-мінеральних добрив: Монографія / Р.В. Кірчук, І.Є. Цизь, К.Є. Копець – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2020. – 138 с.

В монографії представлені відомості про технологію післязбирального обробітку сої. Проаналізовано конструкції сушарок сипких сільськогосподарських матеріалів. Представлено теоретичне узагальнення і нове технічне вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у формуванні енергозберігаючої технології сушіння бобів сої. Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним працівникам, які займаються питаннями післязбирального обробітку та сушінням сільськогосподарських матеріалів.

ISBN

© Р.В. Кірчук, І.Є. Цизь, К.Є. Копець, 2020

ВСТУП

В економіці України сільське господарство має особливо велике значення, так як є однією з найбільших галузей. Про це свідчить ряд важливих макроекономічних параметрів. Найважливішим серед них є частка сільського господарства у валовому внутрішньому продукті держави. Агросектор України став одним з головних джерел експорту. Цьому сприяють і великі масштаби сільськогосподарського землекористування і родючі землі. У поєднанні з можливістю застосування новітніх технологій це може вивести Україну на одне з провідних місць за аграрним потенціалом у світі.

У 2019 році в нашій державі було зібрано рекордні пронад 75 мільйони тонн зернових і зернобобових культур з площі 15 мільйонів гектарів. Аграрії перевищили результат врожаю зернових за 2018 рік, коли валовий збір становив 70,1 млн. т.

Згідно з даними Держкомстату України, бобові культури увійшли в перелік найбільш прибуткової сільгосппродукції, забезпечивши виробникам понад 76% рентабельності. Останнім часом, галузь вирощує урожай бобових, що є рекордним за останні 20 років. Тож не дивно, що попередні роки в Україні відзначається стрімке зростання площ під бобовими культурами, зокрема сої. В цілому на світовому ринку попит на бобові перевищує пропозицію.

Соя - це унікальна рослина, провідна культура світового землеробства. 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.

У собівартості виробництва продукції рослинництва значна частка витрат припадає на післязбиральний обробіток, зокрема сушіння врожаю. 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. Тому залишається актуальним проведення досліджень із сушіння сої з метою знаходження методу, який забезпечував би швидке та якісне виконання технологічного процесу при найменших питомих витратах.

На даний час, залишається актуальним питання дослідження технологій сушіння сільськогосподарських матеріалів з метою знаходження методу, який забезпечував би швидке та якісне виконання технологічного процесу при найменших питомих витратах.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ СОЇ

1.1 Біологічні особливості сої

Соя культурна (*Glycine max* Moench.; синоніми: *Soja hispida* Moench., *Soja japonica* Savi., сімейство бобових – Leguminosae, підродина метеликових – Papilionatae, рід гліцин – *Glycine* L., вид – соя культурна – *Glycine hispida* - однорічна трав'яниста культурна, рослина родини бобових (рис. 1.1). Зовнішнім виглядом нагадує квасоллю. Походить з Південно-східної Азії, де вирощується більше 5 тисячі років, поширена у Японії, США, Кореї, Австралії та Індонезії, в Україні – в Степу та Лісостепу [1,25].

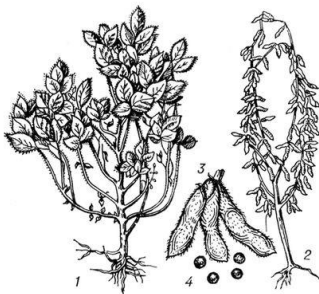


Рисунок 1.1 – Соя: 1 – вегетуюча рослина; 2 – рослина з дозрілими бобами; 3 – боби; 4 – зерна

Соя має унікальний хімічний склад. Її зерно збалансоване за протеїном і перетравними амінокислотами. В її зерні міститься 35-45% білків, 16-25% жирів, 20-32% вуглеводів, 1-2% лецитину, 5-6% зольних речовин, вітамінів, а також клітковина, зола, вода, ферменти, вітаміни, мінеральні речовини. Будь-яка рослина в світі не може за 5 місяців виробити стільки білка і жиру. За вмістом білка соя вдвічі перевищує горох, в трое пшеницю і овес, в чотири рази кукурудзу, ячмінь [26-28].

Коренева система - стрижнева. Головний корінь грубий, відносно короткий, від нього у верхній частині відходить велика кількість бічних корінців, які становлять близько 60% маси кореневої системи. Бічні корінці у більшості тонкі, довгі, проникають у ґрунт на глибину до 2 м. Коренева система розвивається в основному в орному шарі ґрунту на глибині до 30 см, але окремі корінці досягають глибини до 2 м, що визначається щільністю і вологістю ґрунту.

Через 7-10 днів після появи сходів на головному і бокових корінцях появляются бульбочки різної форми і розмірів, які викликані утворенням бульбочкових бактерій роду *Rhizobium*. Бактерії проникають в корінь через кореневі волоски. У місці проникнення утворюються бульбочки із розростаючої тканини кореня (рис. 1.2). Бульбочки утворюються в основному на корінцях, які розміщені в орному шарі ґрунту.

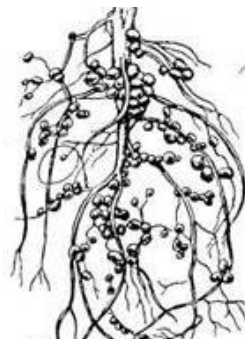


Рисунок 1.2 – Коренева система сої

Рослини і бактерії знаходяться в симбіозі. Бактерії фіксують вільний азот атмосфери і забезпечують ним рослину, сприяючи її живлення, в свою чергу отримуючи необхідні для свого існування вуглеводи.

Висота стебла коливається від 25 до 200 см. У сортів, поширених в Україні, від 40 см до 1 м. Воно або грубе і товсте (діаметром завбільшки 11...13 мм) або ніжне і тонке (3...4 мм), прямостояче чи сланке, іноді витке, злегка колінчасто-зігнуте, добре гілкується. Число гілок на рослині – 2...5, рідше більше. Залежно від того, під яким кутом відхиляються гілки від стебла, кущ буває стиснутий, напіврозлогий, розлогий (рис.1.3) [27].

Стебло і гілки вкриті білими, бурими, жовтими волосками. При досяганні стебло жовтіє, стає буро-жовтим чи рудим. Листки сої складні: вони мають прилистки і складаються з трьох листочків, розміщені по одному на кожному вузлі послідовно. Лише перші два листк одиночні і розміщені супротивно. Довжина їх коливається в межах 15...16 см, ширина 3...10 см. Форма їх різноманітна – ланцетна, клиноподібна з загостреними або округлими верхівками, овальна (рис. 1.4). Форма і розмір листків різні на одній і тій же рослині.

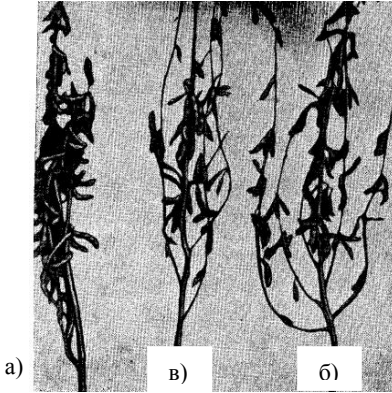


Рисунок 1.3 – Форма куша :

а – стиснутий; *б* – напіврозлогий; *в* – розлогий

Забарвлення листків темно-зелене, світло-зелене, зелене і сіро-зелене. Поверхня – зазвичай гладенька, проте у деяких листків зморшкувата. Листки опушені, включаючи прилистки, волосками білого, сірого або бурого кольору. Густина опушення різноманітна, іноді зустрічаються і неопушені форми.

Квітки сої дрібні, майже без запаху, мають п'ятизубчасту зелену чашечку та п'ятипелюстковий віночок білого або фіолетового кольору, маточку з верхньою зав'яззю та 10 тичинок 9 зрослих і одну вільна. Розміщуються квітки у пазухах листків на квітконіжках, утворюючи суцвіття-китиці (грона).

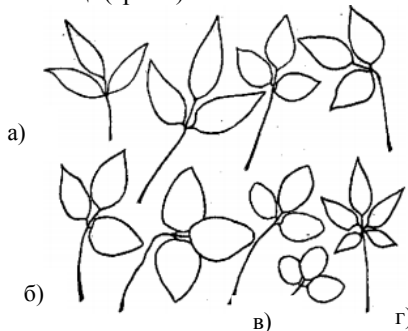


Рисунок 1.4 – Форма листків:

а – ланцетна; *б* – клиноподібна з загостреними верхівками; *в* – клиноподібна із заокругленими верхівками; *г* – листок з п'ятьма листочками

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

Короткі малоквіткові суцвіття мають 2...4 квітки, довгі (10...15 см) багатоквіткові – 10... 25 і більше квіток. Чашечка складається із п'яти чашолистків, довжина її 5... 6 мм. (рис. 1.5). Віночок – білого або фіолетового забарвлення [28-30].

Соя – самозапильна рослина, квітки розкриваються після запліднення.



Рисунок 1.5 – Квітки сої:
1 – квітка; 2 – гілка сої з суцвіттям

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.

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

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].

Переобладнання комбайна на збирання сої полягає у встановленні спеціального різального апарата (хедера), а також у розташуванні його на мінімальну висоту стерні і зменшення частоти обертання барабана молотарки до 500...700 об/хв. За низької вологості зерен сої (8...12%) частота обертання барабана має бути мінімальною.



Рисунок 1.8 – Процес збирання сої із використанням комбайнів:
а – CLAAS Dominator; б – John Deere



Рисунок 1.9 – Пристрої для збирання сої

Основні втрати врожаю, які складають до 75%, це втрати непереобладнаного комбайна. Тому при підготовці комбайна до збирання сої необхідно звести до мінімуму усі втрати. Адже одна зернина залишена у полі на кожній рослині – це мінус 1...1,5 ц/га урожаю.

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].



а)



б)

Рисунок 1.10 – Зерноочисні комплекси:

а – ЗАВ; б – КЗС

Зерноочисний агрегат складається з будівельної частини, металевої арматури, машин і обладнання. До будівельної частини входять: приймальне відділення матеріалу, прямок норії, фундамент

під опору блоків бункерів, майданчик для авторозвантажувача, пандус для заїзду автомобіля на авторозвантажувач. Металева арматура - це майданчик, де змонтовано всі машини й обладнання. Під ними розміщений блок бункерів так, щоб під кожен бункер міг під'їжджати автомобіль для вивантаження з нього зерен з бункера.

Машини й обладнання складаються з авторозвантажувача, завальної норії (ковшовий конвеєр для вертикального переміщення зерен), повітряно-решітних машин, трієрних блоків, централізованої повітряної системи, передавальних конвеєрів, зернопроводів, пульта керування.

Технологічна схема зерноочисних агрегатів має вертикальну конструкцію. Зерно сої із завальної ями подається норією на другий поверх і з головки норії самопливом надходить у розміщені на цьому поверсі зерноочисні машини, а з них системою конвеєрів – в трієри, з трієрів – у бункери. В зерноочисній машині відокремлюються легкі домішки.

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].

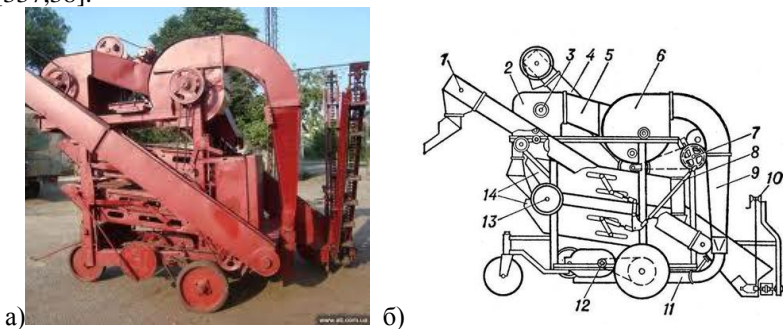


Рисунок 1.11 – Зерноочисна машина ОВП-20А:

а – загальний вигляд; *б* – 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

Розміри решіт і трієрних циліндрів добирають в залежності від засміченості самих зерен бур'янами і видами зерен інших рослин. При підготовці зерноочисних машин до роботи підбирають і встановлюють необхідні решета, регулюють їх механізм очищення. Також обов'язково встановлюється потрібна швидкість повітря в сепаруючих каналах.

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.

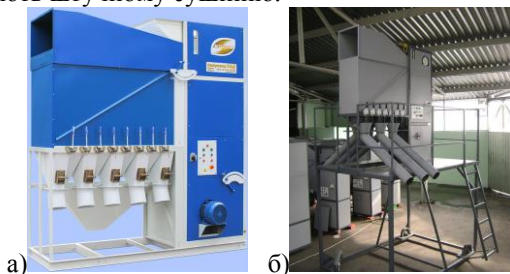


Рисунок 1.12 – Машини для очищення і сортування:
а – САД-10; б – «Алмаз»

За потреби зерно сої доводять до кондиційної вологості 14%. Для зниження вологості від 20 до 14% застосовують сонячно-повітряне сушіння. Матеріал розстиляють на току тонким шаром – 10...15 см у вигляді паралельних смуг завширшки 1,0...1,5 м із відстанню між смугами 40...50 см.

При несприятливих погодніх умовах для сушки сої використовують універсальні зерносушарки шахтного типу СЗШ-8, СЗШ-16А, СЗШ-50А, ДСП-10,20,25,35, ЖСП-30 (рис. 1.13, 1.16), рідше - пересувні сушарки СЗПБ-2,4, СЗСБ-8. Також для сушіння використовують і установки активного вентилявання, зокрема вентилявані бункери: БВ-12, 5, БО-25, а також відділення цих бункерів ОБВ-100 [39-42].

Щороку все ширшого використання набувають сушарки закордонного виробництва: Sukup, Farm Fans, Mathews Company, Delux і ін.

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].

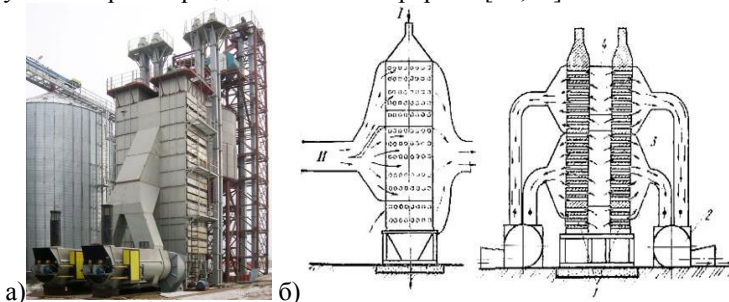


Рисунок 1.13 – Шахтна сушарка:

a – загальний вигляд; *б* – функціональна схема:

1 – шахти; 2 – вентилятор; 3 – дифузор; 4 – напірна камера агента сушіння; I – зерно; II – агент сушіння

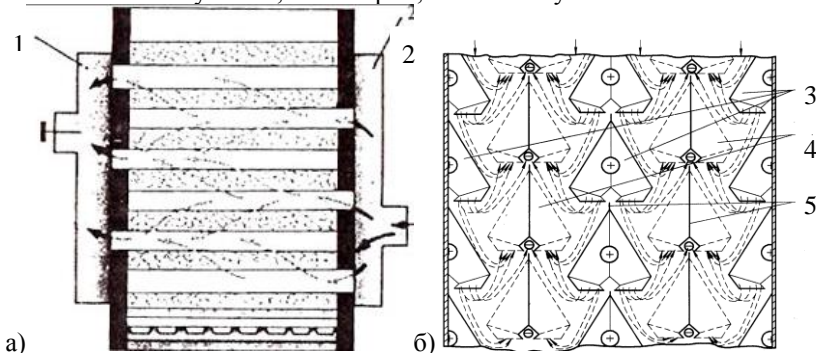


Рисунок 1.14 – Повітророзподільні робочі органи шахтної сушарки:

a – вид збоку; *б* – поперечний переріз:

1, 2 – відповідний і привідний трубопроводи; 3, 4 – підвідний і відвідний короби; 5 – вертикальна перегородка

Для підведення свіжого та відведення відпрацьованого сушильного агента в сушильній камері встановлені коробка шатрового типу з відкритими днищами (рис. 1.14, б). Повітророзподільний пристрій шахтної зерносушарки містить розташовані в шаховому порядку підвідні короби 1 і відвідні короби 2щ. Кожен короб закріплений при вершині вертикальною перегородкою 3.

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].

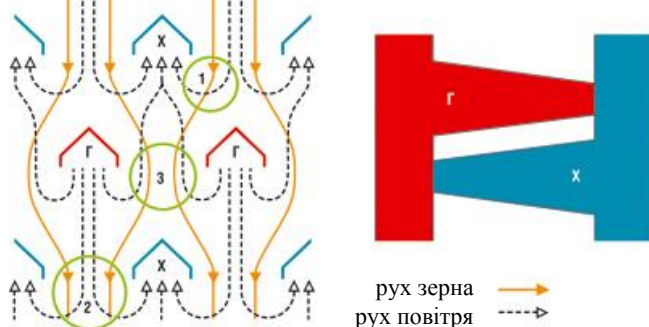


Рисунок 1.15 – Схема руху зерна і повітря в шахтних сушарках:
 Г – короб підведення гарячого повітря; Х – короб відводу насиченого вологою повітря; 1 – зона поперечного переміщення зерна та повітря;
 2 – зона прямиоточного переміщення зерна та повітря; 3 – зона протivotочного переміщення зерна і повітря

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.

Теплоносій, рухаючись крізь шар зерна, нагріває його, випаровує вологу і забирає її з сушарки. Висушені зерно вивантажується в бункер 18, надходить в норію 8, яка завантажує його в охолоджувальні колони. Після охолодження атмосферним повітрям зерно вивантажується з колон шлюзовим затвором 15 в бункер 16 і подається норією 10 на подальшу обробку.

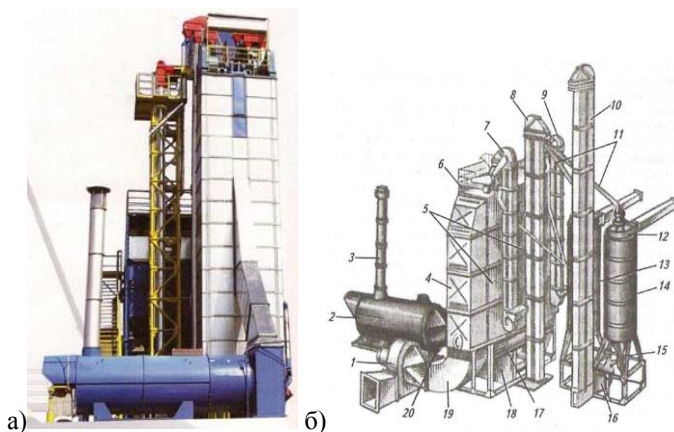


Рисунок 1.16 – Зерносушарка СЗШ-16А:

а – загальний вигляд; *б* – схематичне зображення:

- 1, 12 – вентилятори; 2 – топка; 3 – випускна труба; 4 – дифузор; 5 – сушильні камери; 6, 16, 18 – бункера; 7 – 10 – норії; 11 – зернові труби; 13, 14 – охолоджувальні колонки; 15 – шлюзовий затвор; 17 – розвантажувальний пристрій; 19 – патрубок; 20 – трубопровід

На сьогоднішній день шахтні сушарки мають ряд переваг, що дозволяють забезпечити їх широке використання у сільському господарстві. Завдяки тому, що шар зерна в шахті злегка розпушений, і зерно при русі змінює свою траєкторію просування, поліпшується його взаємодія з сушильним агентом, в результаті чого прискорюється видалення вологи з матеріалу. Підвідні і відвідні короби дозволяють рівномірно розподілити загальний обсяг теплоносія в середині сушарки при мінімальному опорі проходженню теплоносія, що забезпечує найбільш ефективно використовувати його енергію.

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.

Хороші кінцеві результати отримують, коли сою сушать у вентиляльованих бункерах (рис. 1.17). Для сушіння зерен

використовують установки активного вентилявання, зокрема бункери, що вентиляються БВ-12,5 і БВ-25, а також відділення цих бункерів ОБВ-100 [39-42].

Вентилюваний бункер (рис. 1.17) складається з корпусу 2 та його опори 10, розподільника зерна 6, повітророзподільної труби 7, вентилятора 8 та електрокалорифера 9. Концентрично розташовані перфоровані циліндри утворюють кільцеву камеру, яку заповнюють матеріалом. При завантаженні бункера з норії повинні потрапляти на розподільник зернового потоку, розташований над центральним циліндром. Це знижує самосортування, сприяє рівномірному заповненню бункера, знижує нерівномірне ущільнення і вентилявання шару. Повітря, нагнітаючись вентилятором, пронизує масу в радіальному напрямку. Вологість окремих зерен в процесі зберігання вирівнюється в результаті міжнасінневого вологообміну. Після доведення зернової маси до середньої кондиційної вологості 14 % бункер спорожняється. Відкривається заслінка розвантажувального пристрою 11 і зерно самопливом вивантажується з бункера.

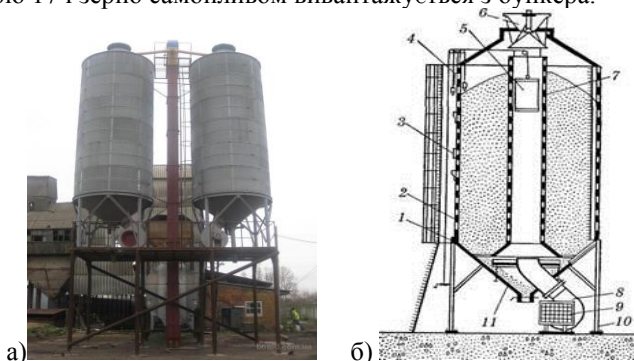


Рисунок 1.17 – Бункер активного вентилявання БВ-25:

a – загальний вигляд; *б* – принципова схема:

1 – кільцева рама; 2 – корпус; 3 – регулятор вологості; 4 – вантажини; 5 – клапан; 6 – розподільник зерна; 7 – труба повітророзподільвальна; 8 – вентилятор з електродвигуном; 9 – електрокалорифер; 10 – опори корпусу; 11 – регулювальне кільце

Бункери активного вентилявання 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:
а – «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.

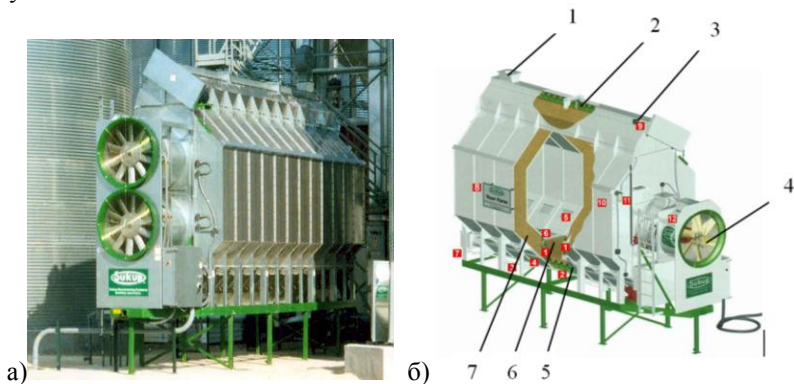


Рисунок 1.19 – Сушарка «Sukur»:

а – загальний вигляд; б – функціональна схема:

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – завантажувальний шнек; 3 – датчик заповнення зерносушарки; 4 – вентилятор; 5 – вивантажувальний шнек; 6 – дозуючі вальці; 7 – насінні колони

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 пальником. 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, спрацює 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 «Sukur» 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

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 агенту і матеріалу, що досягаються різними способами: подрібненням, диспергуванням, розпилом, 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, *a*). 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.

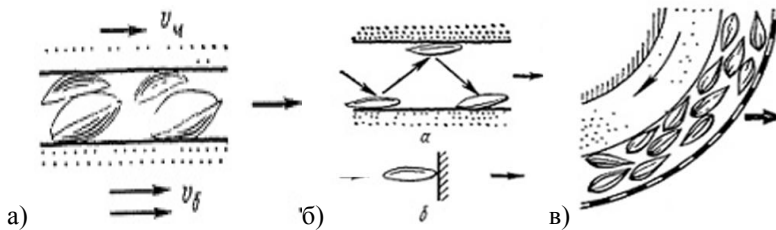


Рисунок 1.20 – Способи руйнування оболонки зернини:

a – стиснення і зсув; *б* – багаторазовий і одноразовий удар; *в* – тертя об абразивну поверхню

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

Руйнування багаторазовим і одноразовим ударом здійснюється за допомогою багаторазових повторюючих ударів і інерційних сил (рис. 1.20, б). Нелодіком руйнування багаторазовим ударом є те, що швидкість зернини сої при застосуванні даного методу буде зростати після кожного послідовного удару і з часом перевищить необхідне значення лише для деформації оболонки сої, а й руйнування цілісності плоду. Тобто даний процес є важко контрольований. Як наслідок, руйнування оболонки за цим способом супроводжується утворенням значної кількості дробленого ядра і отримання січки.

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 рухомої 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 лущення 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. Луцнення як спосіб очищення застосовується для плівчастих зернових і зернобобових культур з метою видалення квіткових, плодкових 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 (постави) 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 часу 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.

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).

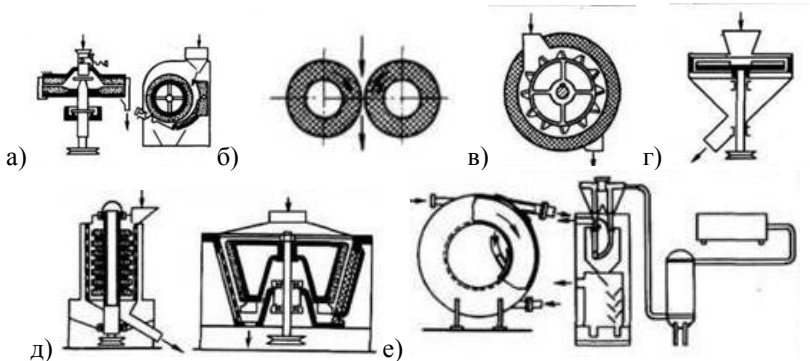


Рисунок 1.21 – Принципові схеми робочих органів деформуючих машин з різними видами впливу на матеріал:
a – стиснення і зсув; *б* – стиснення і тертя; *в* – багаторазовий удар; *г* – одноразовий удар; *д* –тертя; *е* –комплексний вплив

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

Також для простого (грубого) подрібнення застосовують машини ударної дії, в яких подрібнюються частинки руйнуються під дією чистого удару (дискові 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-З.

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 агенту 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 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]:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau} = -\frac{\gamma_m \cdot c_m}{\gamma_n \cdot c_n} \cdot \frac{\partial \theta}{\varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_m \cdot r'}{\gamma_e \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}, \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\gamma_m \cdot \varepsilon}{\gamma_e \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right), \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_q \cdot \gamma_m}{\gamma_e \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta), \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K \cdot (W - W_p), \quad (1.4)$$

де t – температура сушильного агента °С; d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря; W – вологість матеріалу, %; θ – температура матеріалу °С; V – швидкість сушильного агента, м/с; c_m , c_n – теплоємність матеріалу і повітря, кДж/кг °С; ε – пористість шару матеріалу; r' – прихована теплота пароутворення 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 вологі 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, $^{\circ}\text{C}$.

Дослідженням механізмів, які використовують для сушіння сільськогосподарських матеріалів, підготовки їх перед сушінням і пристроїв для зниження енерговитрат під час сушіння займалися Рогатинський Р.М., Мелегов В.І., Зеленко В.І., Ковальов М.М., Боярчук Ю.І., Шаршунов В.А., Дідух 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 вологі та розроблювали нові методи сушіння, які б забезпечували інтенсивність видалення надлишкової вологі 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. Шубина [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:

$$\frac{\partial [rT(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rT(r, \tau)]}{\partial r^2}; \quad (1.7)$$

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

Початкові і граничні умови наступні:

$$T(r, 0) = f(r); \quad (1.8)$$

$$-\frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} + H [T_c - T(R, \tau)] = 0; \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0, T(0, \tau) \neq \infty. \quad (1.10)$$

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

Кінцеве рішення поставленої задачі матиме вигляд:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp(-\mu_n^2 F_0), \quad (1.11)$$

$$\text{де } A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n}.$$

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:

- 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;
- завершальним і надзвичайно важливим етапом у вирощуванні сої є проведення її своєчасного збирання. Оптимальна вологість для збору даної культури повинан 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;
- сушіння зерен сої ускладнюється тим, що плоди порівняно містить 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;
- 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;
- для збільшення контактної площі сушильного агенту та зерен сої, з метою більш інтенсивного вологовидалення, доцільно проводити попередню підготовку матеріалу;
- 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.

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 агенту, застосування електричних та магнітних полів, застосування перегрітої пари як теплоносія, одержаної при сушінні, використання відпрацьованого сушильного агенту, 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.

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

Зі збільшенням швидкості проходження сушильного агенту через матеріал зменшуються внутрішньодифузне гальмування процесу сушіння і підвищується середня рушійна сила процесу, оскільки ступінь

насичення сушильного агенту на виході з сушарки зменшується. Все це призводить до зменшення часу сушіння.



Рисунок 2.1 – Методи інтенсифікації сушіння сільськогосподарських матеріалів

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 агенту [2-6,65].

Перемішування та розпушування матеріалу, що сушиться сприяє оновленню поверхні контакту сушильного агенту з частинками матеріалу і зняттю дифузійних гальмувань, більш ефективному використанню потенціалу сушильного агенту, рівномірному сушінню та запобіганню 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 луцильних машин на матеріал з різними принципами дії, проте найбільшого поширення набули машини з ударним впливом на метрїал, 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 1 показано на 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.

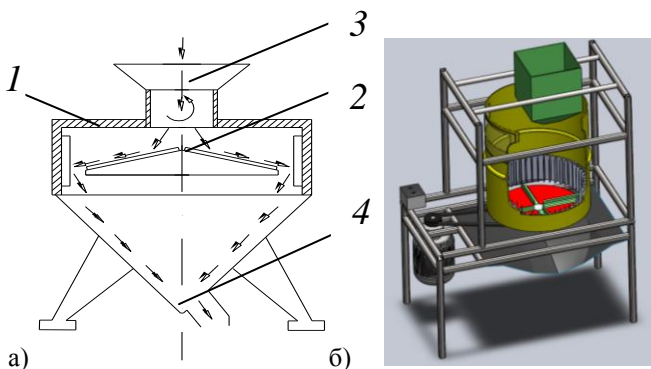


Рисунок 2.2 – Пристрій підготовки зерен сої до сушіння:

а – принципова схема,

б – 3D-модель (1 – корпус; 2 – конусний диск з лопатками; 3 – завантажувальний бункер)

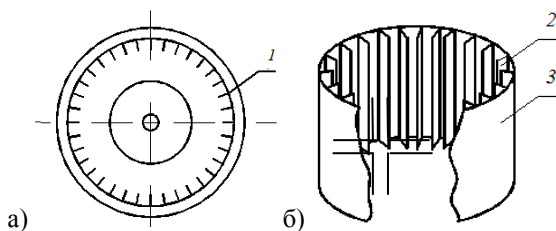


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення робочої камери пристрою попередньої підготовки зерен сої:

а – переріз робочої камери; б) циліндрична дека:

1 – циліндрична дека; 2 – ножові пластини; 3 – боковина

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 є меншою середнього діаметра зернини, що унеможливило 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 однієї ножевої пластини деки пристрою підготовки до сушіння відбувається у точці O (рис. 2.4).

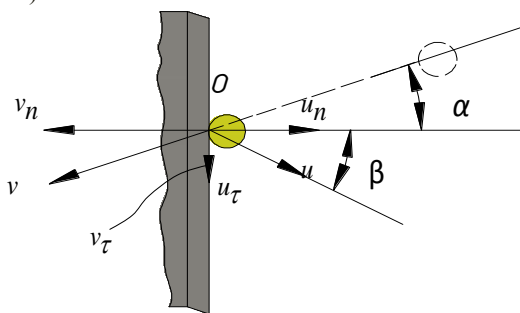


Рисунок 2.4 – Схема сил, що виникають при контакті зернини сої з ножевою пластиною

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

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

Як видно з рис. 2.4. кути падіння α і відбиття β пов'язані співвідношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta = k = \frac{u_n}{v_n}, \quad (2.1)$$

де k – коефіцієнт відновлення.

Експериментально було встановлено значення коефіцієнта $k = f(w)$ залежно від вологості зерен сої на основі залежності:

$$k = \sqrt{\frac{h}{H}}, \quad (2.2)$$

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

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:

$$k_{\partial} = \frac{R_{\partial}}{R_c} = \frac{\delta_{\partial}}{\delta_c}, \quad (2.3)$$

де R_{∂} , R_c – відповідно динамічне та статичне зусилля, Н; δ_{∂} , 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_{∂} , рівна різниці кінетичних енергій зернини E_k масою m до і після удару:

$$\Delta T = U = \frac{R_{\partial} \cdot \delta_{\partial}}{2}. \quad (2.4)$$

З врахуванням (2.3) можна записати:

$$U = k_{\partial}^2 \frac{R_c \cdot \delta_c}{2}. \quad (2.5)$$

Можна рахувати, що рушійною силою, за допомогою якої частинка сходить з диска є максимальна відцентрова сила $F_{\text{відц,max}}$, що в свою чергу буде дорівнювати силі, з якою частинка вдаряється в деку (R_c).

Для спрощення дослідження руху матеріалу у кільцевому зазорі між диском та декою для розгляду береться одинична частина потоку матеріалу - зернина, оскільки при сходженні з деки вона здійснює самостійний та незалежний рух відносно інших зерен.

На одиничну зернину сої, що сходить з диска і здійснює подальший рух в напрямку деки, діють наступні сили: рушійна сила інерції F_{iH} , сила аеродинамічного опору повітря F_{on} , сила турбулентного масопереносу, підйомна сила, сила Архімеда та сила Магнуса. Також в даній системі мають місце сила тяжіння G , сили молекулярної взаємодії та електростатичні сили [71-73].

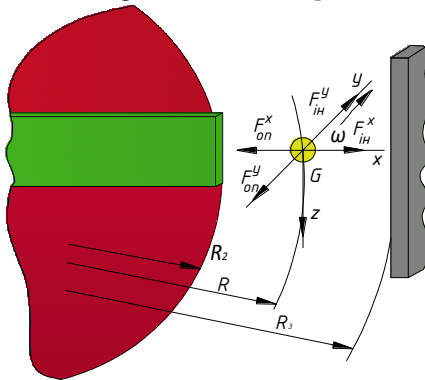


Рисунок 2.5 – Сили, що діють на одиничну зернину сої в кільцевому зазорі між диском та декою під час польоту

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

- діаметр зернини сої є достатньо малим, а $\rho_n \ll \rho_m$, що дозволяє не враховувати силу Архімеда та силу тяжіння;
- 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 одиничнонь зернини сої в кільцевому зазорі пристрою може бути представлений в наступному вигляді:

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

де \bar{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 ножевою пластиною деки, с; q – кількість внутрішніх сил, що діють на зернина сої.

На основі загального вигляду рівняння руху (2.6) та враховуючи всі вищеписані сили, було отримано систему диференціальних рівнянь руху одиначної частини матеріалу в кільцевому зазорі пристрою підготовки до сушіння.

Таким чином, після сходження з диска подальший рух зернини відбувається під дією відцентрової сили $F_{\text{відц.}} = m\omega^2 r$ 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:

$$U = k \frac{2 m \omega^2 \cdot r \cdot \delta c}{2}. \quad (2.7)$$

На основі теореми Остроградського-Карно [68] можна зазначити, що кінетична енергія, яку втрачає система під час пружного удару, дорівнює $\frac{1-k}{1+k}$ -й частці кінетичної енергії системи, що відповідає втраченим швидкостям:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{1-k}{1+k} \left(\frac{m(u-v)^2}{2} \right), \quad (2.8)$$

де T_1 та T_2 – кінетична енергія зернини відповідно до та після удару об деку пристрою підготовки до сушіння.

Або ж у випадку «косого» удару:

$$\Delta T = \frac{1-k}{1+k} \left(\frac{m(u_n - v_n)^2}{2} \right) \quad (2.9)$$

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

$$k \frac{2 m \omega^2 \cdot r \cdot \delta_c}{2} = \frac{1-k}{1+k} \left(\frac{m(u_n - v_n)^2}{2} \right) \quad (2.10)$$

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.:

$$u_n = k v_n. \quad (2.11)$$

Тоді вираз для визначення динамічного коефіцієнта мати вигляд:

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

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 $v_{y\delta}$ зернини сої об ножову пластину:

$$v_{y\delta} = \frac{F}{m \omega^2 \cdot r \cdot \sqrt{\frac{\frac{1-k}{1+k} \cdot (k-1)^2}{g \cdot \delta}}} \quad (2.13)$$

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

Або ж, враховуючи нахил диска:

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

Відомі дослідження [71,72] підтверджують, що зі збільшенням поточного 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 $v_{уд}$ буде рівною швидкості вильоту (сходження) її з диска $v_{вил}$.

Тому, враховуючи вище написане, можна записати рівність:

$$v_{вил} = v_{уд} \quad (2.15)$$

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

$$v_{вил} = \omega \cdot r, \quad (2.16)$$

де r – радіус диска, м.

Враховуючи (2.15, 2.16) вираз (2.14) набуде вигляду:

$$\omega \cdot r = \frac{F \cos(\alpha)}{m\omega^2 r \cdot \sqrt{\frac{1-k}{1+k} \cdot (k-1)^2}} \cdot \frac{1}{g \cdot \delta} \quad (2.17)$$

Звідси одержимо формулу необхідної кутової швидкості диска з врахуванням зусилля руйнування поверхні поверхні зернини:

$$\omega = \sqrt[3]{\frac{F \cos(\alpha)}{mr^2 \cdot \sqrt{\frac{1-k}{1+k} \cdot (k-1)^2}} \cdot \frac{1}{g \cdot \delta}} \quad (2.18)$$

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).

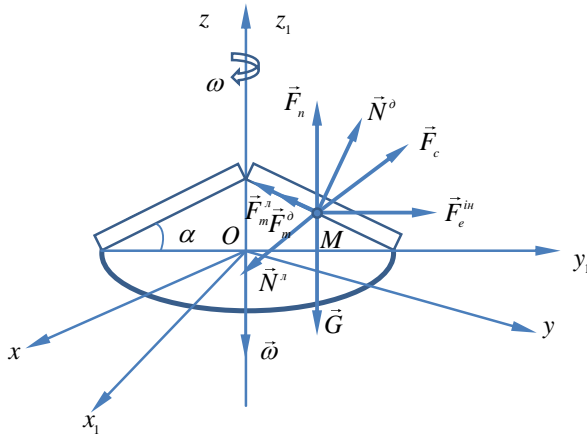


Рисунок 2.6 – Розрахункова схема руху зернини сої поверхнею диска

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 $Ox_1y_1z_1$ з центром в т. O , що розміщена на основі уявного конуса.

Система координат $Ox_1y_1z_1$ 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].

При рівномірному обертанні диска переносне прискорення \vec{W}_e точки M складається лише з доосьової складової, величина якої $W_e = \omega^2 y_{1r}$. Тоді переносна сила інерції $F_e^{in} = m\omega^2 y_{1r}$ і направлена вздовж осі Oy_1 .

Вектор коріолісового прискорення \vec{W}_c направлений паралельно осі Ox_1 у бік зростання координати x_1 . Отже, коріолісова сила інерції $F_c^{in} = 2m\omega\dot{y}_{1r}$ і направлена вздовж осі Ox_1 у протилежний бік до додатного напрямку.

Під дією сили ваги \vec{G} зернина тисне на поверхню диска, і при його русі у бік зростання координати y_{1r} виникає сила тертя \vec{F}_m^o . Ця сила має напрям протилежний до напрямку вектора відносної

швидкості зернини сої, тобто вздовж осі Oy_1 . За модулем, сили тертя визначається як $F_m^o = fN^o$. Внаслідок дії коріолісової сили \vec{F}_c^{in} зернина тисне на поверхню лопатки. Виникає сила тертя \vec{F}_m^a , що становить $F_m^a = fN^a$. Ця сила тертя має напрям також протилежний до напрямку вектора відносної швидкості зернини сої. Отже, обидві сили тертя мають один і той же напрям (рис. 2.6).

Під час обертання лопаток диска спостерігається утворення повітряного потоку, що може впливати на характер руху зернини сої. Сила повітряного потоку визначається за формулою Ньютона [74]:

$$F^n = k_{on} \cdot \gamma_n \cdot S (V_n - V_r)^2, \quad (2.19)$$

де k_{on} – коефіцієнт опору повітря; γ_n – об’ємна маса повітря, кг/м^3 ; S – міделевий переріз, тобто проекція зернини на площину, перпендикулярну до напрямку повітряного потоку, м^2 ; V_n, V_r – швидкості відповідно повітряного потоку та матеріалу у відносному русі, м/с .

При відносній швидкості $V_r = 0$ матимемо: $F^n = G$. Тобто зернина перебуватиме у завислому стані, що відповідає критичній швидкості повітряного потоку $V_n = V_{кр}$. З літературних даних відомо, що для зернини сої $V_{кр} = 9,5 \dots 12,5 \text{ м/с}$ [75].

$$k \cdot \gamma_n \cdot S = \frac{G}{V_{кр}^2}. \quad (2.20)$$

І формула (2.19) набере виду:

$$F^n = \frac{G}{V_{кр}^2} (V_n - V_r)^2, \quad (2.21)$$

або

$$F^n = \frac{G}{V_{кр}^2} (V_n - \dot{z}_{1r})^2. \quad (2.22)$$

За експериментальними даними (п. 4.6. – визначення зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння в процесі його роботи) може бути отримана емпірична залежність зміни швидкості повітряного потоку з радіусом диска. Лінеаризуючи отриманий масив експериментальних даних встановлено:

$$V_n(y_{1r}) = a - b \cdot y_{1r}, \quad (2.23)$$

де a, b – константи емпіричної залежності. Розмірність $[a]=\text{м/с}$, $[b]=\text{с}^{-1}$.

Для прикладу, при коловій швидкості диска $V=55$ м/с емпірична залежність матиме вигляд: $V_n = 6,3 - 0,1 \cdot y_{1r}$.

Рівняння (2.22) можна записати так:

$$F^n = \frac{G}{V_{sp}^2} \left((a - b \cdot y_{1r}) - \dot{z}_{1r} \right)^2. \quad (2.24)$$

Таким чином, на зернина сої при його відносному русі діють такі сили: сила ваги зернини \vec{G} , сили тертя \vec{F}_m^o, \vec{F}_m^a , реакції поверхонь N^o, N^a , переносна F_e^{ih} і коріолісова сили F_c^{ih} інерції, сила дії повітряного потоку F^n , що спричинена збуреним лопатками диска потоком повітря. Рівняння динаміки відносного руху зернини сої матиме вигляд:

$$m\vec{W}_r = \vec{G} + \vec{F}_m^o + \vec{F}_m^a + \vec{N}^o + \vec{N}^a + \vec{F}_e^{ih} + \vec{F}_c^{ih} + \vec{F}^n. \quad (2.25)$$

Проектуючи це рівняння на осі Ox_1, Oy_1 та Oz_1 матимемо:

$$m\ddot{x}_{1r} = N^a - F_c^{ih}, \quad (2.26)$$

$$m\ddot{y}_{1r} = F_e^{ih} - F_m^o \cos \alpha - F_m^a \cos \alpha + N^o \sin \alpha, \quad (2.27)$$

$$m\ddot{z}_{1r} = N^o \cos \alpha - G + F^n. \quad (2.28)$$

Формуючі початкові умови поставленої задачі, можна записати $x_{1r} = 0$ і $\ddot{x}_{1r} = 0$. Тоді з рівняння (2.7) випливає, що $N^a = F_c^{ih}$.

Тобто $N^a = 2m\omega \dot{y}_{1r}$.

Виходячи з умови постійного контакту зернини сої із поверхнею диска ($N^o > 0$) та того, що рух відбувається вздовж лопатки, можна записати:

$$z_{1r} = (r - y_{1r}) \sin \alpha. \quad (2.29)$$

Підставляючи (2.29) у рівняння (2.28) можна визначити невідому реакцію N^o .

$$N^o = \frac{m \cdot d^2 [(r - y_{1r}) \sin \alpha] + mg - \frac{mg}{V_{sp}^2} \left[(a - by_{1r}) - \frac{d[(r - y_{1r}) \sin \alpha]}{dt} \right]^2}{\cos \alpha}, \quad (2.30)$$

або

$$N^{\circ} = \frac{m \cdot \ddot{y}_{1r} \sin \alpha + mg - \frac{mg}{V_{sp}^2} [(a - by_{1r}) + \dot{y}_{1r} \sin \alpha]^2}{\cos \alpha}. \quad (2.31)$$

Для отримання рівняння руху зернини сої вздовж радіуса диска слід підставити значення реакції N° з рівняння (2.31) в (2.27). Після перетворень та спрощень отримаємо:

$$N^{\circ} = \frac{m \cdot \ddot{y}_{1r} \sin \alpha + mg - \frac{mg}{V_{sp}^2} [(a - by_{1r}) + \dot{y}_{1r} \sin \alpha]^2}{\cos \alpha}$$

$$\ddot{y}_{1r} = \frac{\omega^2 y_{1r} - 2\omega f \cdot y_{1r} \sin \alpha_n + (\operatorname{tg} \alpha_n - f) \left[g - \frac{g}{V_{sp}^2} [(a - by_{1r}) + \dot{y}_{1r} \sin \alpha]^2 \right]}{1 - \sin \alpha_n (\operatorname{tg} \alpha_n - f)}. \quad (2.32)$$

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 $v_{вил}$.

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.

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.

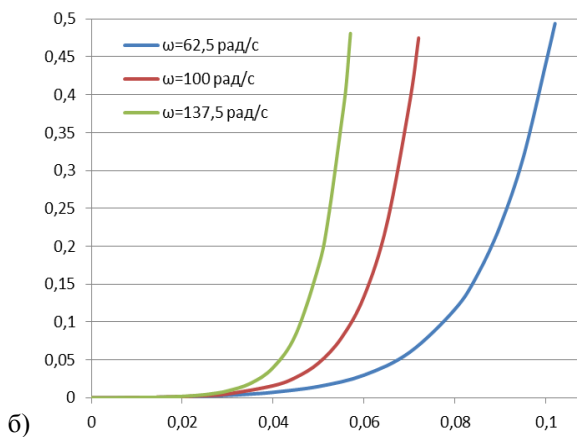
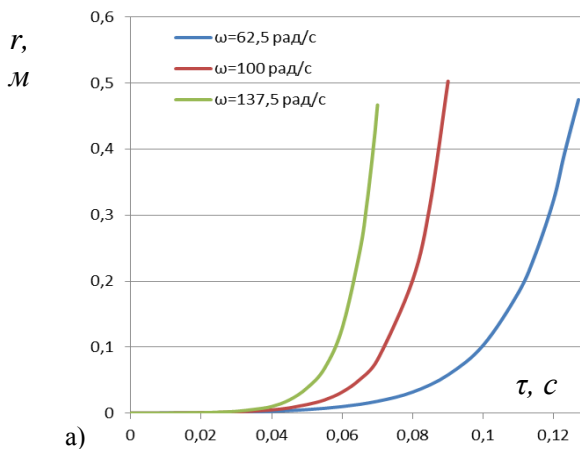


Рисунок 2.7 – Графік переміщення зернини сої з часом:
 а) кут нахилу диску $\alpha=30^\circ$ б) $\alpha=40^\circ$

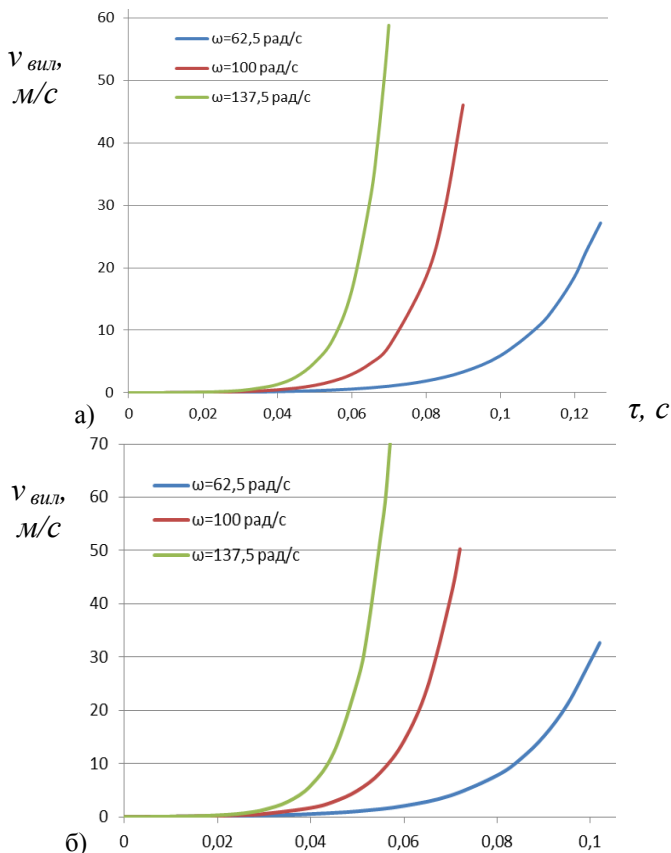


Рисунок 2.8 – Графік зміни швидкості зернини сої з часом:
 а – кут нахилу диску $\alpha=30^\circ$; б – $\alpha=40^\circ$

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:

$$j = \sum_i^n K_i \cdot \nabla \Pi_i,$$

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:

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

де a_m – коефіцієнт масопровідності, м²/с; ρ_0 – густина абсолютно сухої речовини, кг/м³; δ_τ – 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.

Рівняння масопереносу при неізотермічній масопровідності у диференціальній формі, як відомо [54,78], має вигляд:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \text{div}(a_m \cdot \text{gradu}), \quad (2.34)$$

де $a_m = a_m(u) \cdot [1 + \delta_\tau \psi(u)]$, $\psi(u) = \frac{\text{grad}\theta}{\text{gradu}}$ – коефіцієнт масопровідності, який враховує власне масопровідність і термодифузю.

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

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

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:

$$\frac{\partial G_w}{S \partial \tau} = -a_m \rho_0 \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (2.37)$$

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 дифузією передається кількість вологи dG_w .

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

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

де β_p – коефіцієнт масообміну, віднесений до різності парціальних тисків, $\text{кг} / \text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па}$; 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, $\text{кг} / \text{м}^3$.

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, $\text{кг} / \text{м}^3$). Із урахуванням останнього рівняння (2.40) і (2.38), будемо мати граничну умову у вигляді:

$$-a_m \rho_0 \left(\frac{du}{dr} \right)_s + (u_n - u_p) \beta_p \cdot r_0 = 0. \quad (2.41)$$

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: $u_p = f(\varphi, t)$. 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 конвективного 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 агента): $u_p = u_p(t_c, \varphi_c) = const$; 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:

$$\frac{u(r, \tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \cdot \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{(\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n) \cdot \mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (2.44)$$

де μ_n – корені характеристичного рівняння:

$$tg \mu = -\frac{\mu}{Bi_m - 1}; \quad (2.44,a)$$

$$Fo_m = \frac{a_m}{R^2} \cdot \tau \quad - \text{ критерій Фур'є (масообмінний);} \quad Bi_m = \frac{\beta \cdot R}{a_m} \quad -$$

масообмінний критерій Біо.

На рис. 2.9. наведено зміну вологовмісту зернини сої на поверхні, в центрі і середині кулі. При температурі сушильного агента

$t_{c.a} = 50^\circ\text{C}$ (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.

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^2 :

$$\bar{u}(\tau) = \frac{3}{R^3} \int_0^R r^2 u(r, \tau) dr, \quad (2.45)$$

що приводить до наступного рівняння:

$$\frac{\bar{u}(\tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n)} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (2.46)$$

або в іншій формі запису:

$$\frac{\bar{u}(\tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot \frac{a_m}{R^2} \cdot \tau} \quad (2.47)$$

$$\text{де } B_n = \frac{6Bi_m^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}.$$

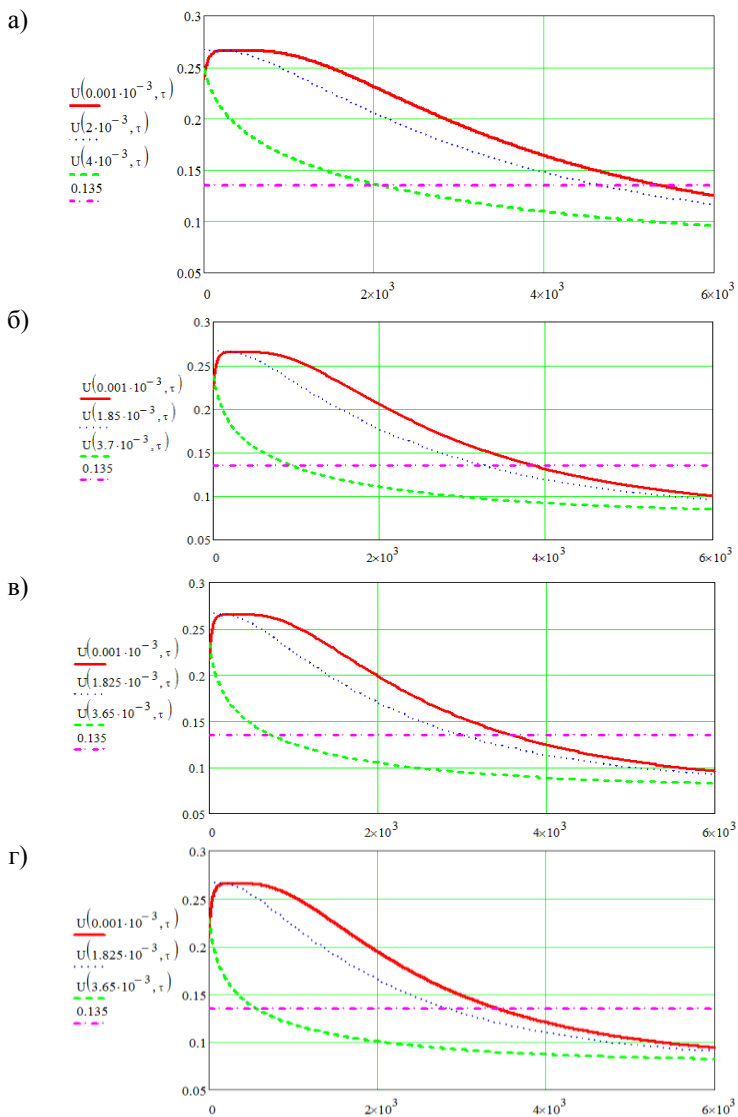


Рисунок 2.9 – Зміна вологовмісту зернини сої на поверхні, в центрі і на віддалі від поверхні $R/2$: а – $Bi_m = 2,8$;

б – $Bi_m = 4,44$; в – $Bi_m = 5,201$; г – $Bi_m = 6,205$

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.

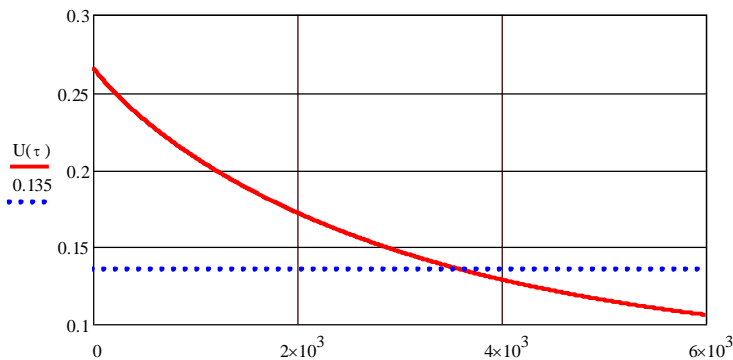


Рисунок 2.10 – Крива сушіння зернини сої – зміна вологовмісту в часі

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 $Fo_m > 0,35$ можна обмежитися першим членом ряду) одним членом ряду і залежність $\bar{u}(\tau)$ набуває вигляду експоненти:

$$\bar{u}(\tau) = u_p + B_1(u_0 - u_p)e^{-\mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}, \quad (2.48)$$

де

$$B_1 = \frac{6Bi_m^2}{\mu_1^2 \cdot (\mu_1^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}. \quad (2.49)$$

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:

$$-\frac{du}{d\tau} = \frac{a_m}{R^2} \mu_1^2 \cdot B_1(u_0 - u_p) e^{-\mu_1^2 \frac{a_m}{R^2} \tau}. \quad (2.51)$$

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

$$-\frac{d\bar{u}(r)}{d\tau} = \frac{a_m}{R^2} \mu_1^2 (u(\tau) - u_p). \quad (2.52)$$

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

$$K = \frac{a_m}{R^2} \mu_1^2. \quad (2.53)$$

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

$$\mu_1^2 = \frac{\pi}{2,7 + \frac{B_i^{1,07}}{a_m}}. \quad (2.54)$$

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

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

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 $\theta=30\dots60$ °C, 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:

$$S_n = S + \Delta S$$

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

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

Згідно прийнятих допущень, матимемо:

- бічна поверхня зернини: $S = \pi \cdot D^2$;
- об'єм зернини: $V = \frac{\pi D^3}{6}$;
- гідравлічний радіус зернини: $R_v = \frac{R_K}{3}$.

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:

$$k_p = \frac{S_0 + \Delta S}{S_0}, \quad (2.61)$$

де S_0 – початкова площа, м²; ΔS – площа поверхні надрізу (приріст площі), м².

Еквівалентний (ефективний) радіус зернини буде визначатися співвідношенням:

$$R_e = 3 \frac{V}{k_p S_0}. \quad (2.62)$$

На рис. 2.11 наведено графічну залежність ефективного розміру зернини R_e від глибини розсічення h .

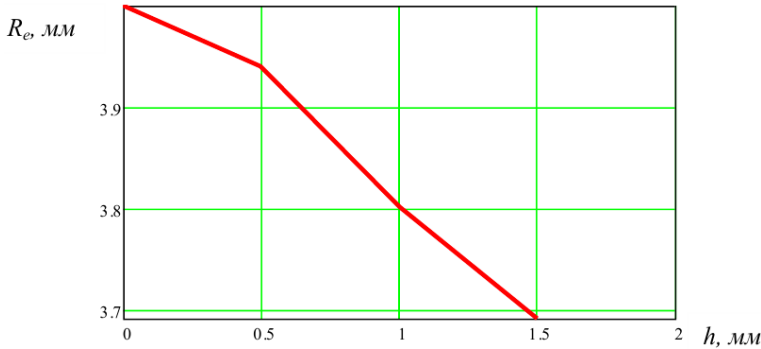


Рисунок 2.11 – Графічна залежність ефективного розміру зернини R_e від глибини розсічення h

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]

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

розкладанням $\operatorname{ctg} \mu_1$ в ряд і обмежуючись першими двома членами:

$$\mu_1^2 = 3Bi_m.$$

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

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

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 .

Po .

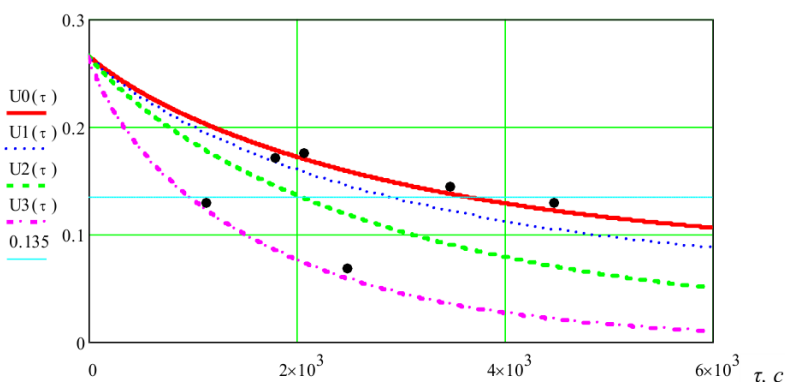


Рисунок 2.12 – Графічна залежність сушіння зерен сої за різного коефіцієнта розсічення і цілого зернини:

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

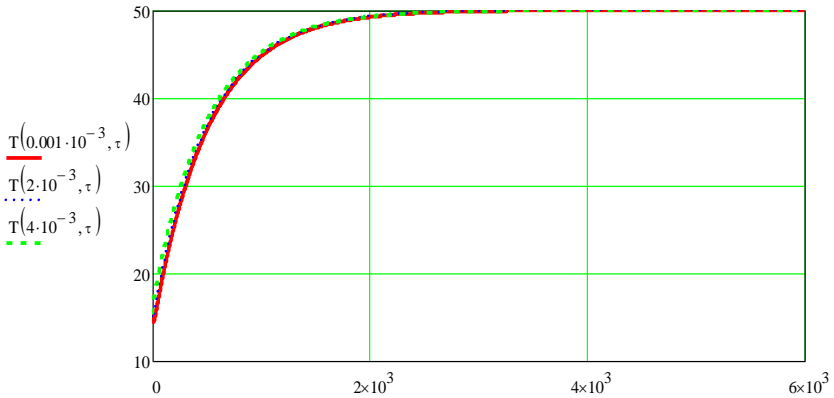
На рис. 2.12 показано кінетичні криві (криві сушіння) зерен сої для різного ступеня розсічення і цілої зернини. Точками показано експериментально отримані значення. Теоретичні розрахунки - за рівнянням (2.46). Як можна бачити, схожимість експериментальних і теоретичних даних для цілого і максимально 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 разі збільшенні ступеня розсічення зерен, процес нагріву і стабілізації температури значно прискорюється.

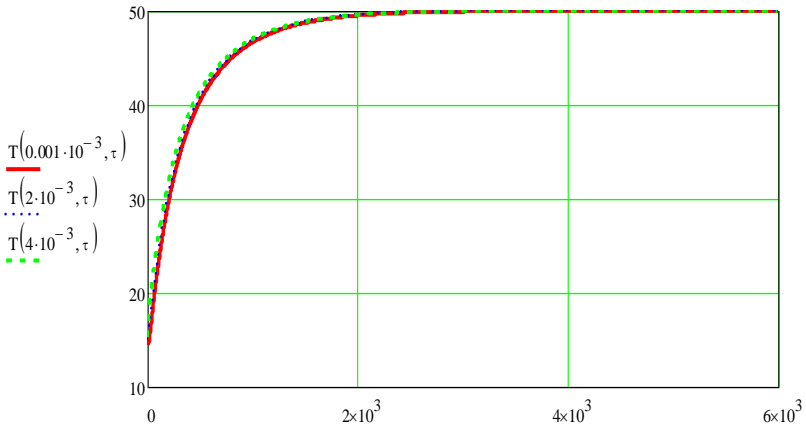
Таким чином, теоретичним аналізом і експериментами доведена можливість інтенсифікації процесу сушіння зерен сої шляхом розсічення поверхні.

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

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



а)



б)

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

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

2.5.1 Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння

Розглянемо вплив масообмінних факторів у разі розсічення зернини на кінетику процесу сушіння. Під час розсічення 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:

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

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 ефективною площі масообміну.

Оскільки, відповідно до існуючої теорії сушіння [55], величина усушки пропорційна вологовмісту матеріалу, то значення «розгортаної» 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:

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

де m_0 – максимальна інтенсивність вологовидалення.

Величину $u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} = u_m$ назовем вологовмістом «мокрої» поверхні, за аналогією з температурою «мокрого» термометра: $t_m = t_c - \frac{r \cdot m}{\alpha}$ [52].

Таким чином, змінюючи в рівнянні (2.41) величину u_p на $u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta} = u_m$, можна використати вже відомі розв'язки (2.44), (2.46), (2.57):

$$u(r, \tau) = u_m + (u_0 - u_m) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \cdot \sin(\mu_n \frac{r}{R})}{(\mu_n - \sin \mu_n \cdot \cos \mu_n) \cdot \mu_n \cdot \frac{r}{R}} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}, \quad (2.66)$$

де

$$u_m = u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}. \quad (2.67)$$

Рівняння (2.46) при $u_p \rightarrow u_p - \frac{m_0}{\rho_0 \cdot \beta}$:

$$-\frac{du(\tau)}{d\tau} = K(\theta)u(\tau) - u_m(\tau). \quad (2.68)$$

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, а саме:

$$m(\tau) = m_0 \cdot e^{-k\tau}, \quad (2.69)$$

де m_0 – інтенсивність випаровування на початку процесу, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (максимальна) інтенсивність.

Тоді граничну умову (2.65) запишемо у такому вигляді:

$$-a_m \rho_0 \frac{du(R, \tau)}{dr} + \beta \cdot \rho_0 [u - u_p] + m_0 e^{-k\tau} = 0. \quad (2.70)$$

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:

$$\frac{u(r, \tau) - u_p}{u_0 - u_p} = \frac{R \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m \cdot \sin \sqrt{Pd_m} \cdot \frac{r}{R}}{r \cdot \left[(Bi_m - 1) \cdot \sin \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \cos \sqrt{Pd_m} \right]} \cdot e^{-Pd_m \cdot Fo_m} +, \quad (2.71)$$

$$+ \sum_{n=1}^6 \left[1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right] \cdot A_n \frac{R \cdot \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}$$

де $A_n = \frac{2(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n)}{\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n}$; $Pd_m = \frac{k}{a_m} R^2$ – масообмінний аналог критерія Предводітелева; $\bar{\theta}_m = \frac{m_0}{\beta(u_0 - u_p)}$ – безрозмірний комплекс

(критерій) масообміну.

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

$$u(\tau) = u_p + (u_0 - u_p) \cdot \left[\frac{3 \cdot \bar{\theta}_m \cdot Bi_m (tg \sqrt{Pd_m} - \sqrt{Pd_m})}{Pd_m \left[(Bi_m - 1) \cdot tg \sqrt{Pd_m} + \sqrt{Pd_m} \right]} \right] \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m} +, \quad (2.72)$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} B_n \left(1 - \frac{\bar{\theta}_m}{\left(1 - \frac{Pd_m}{\mu_n^2}\right)} \right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_m}$$

де $B_n = \frac{6Bi_m^2}{\mu_n^2 \cdot (\mu_n^2 + Bi_m^2 - Bi_m)}$.

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.

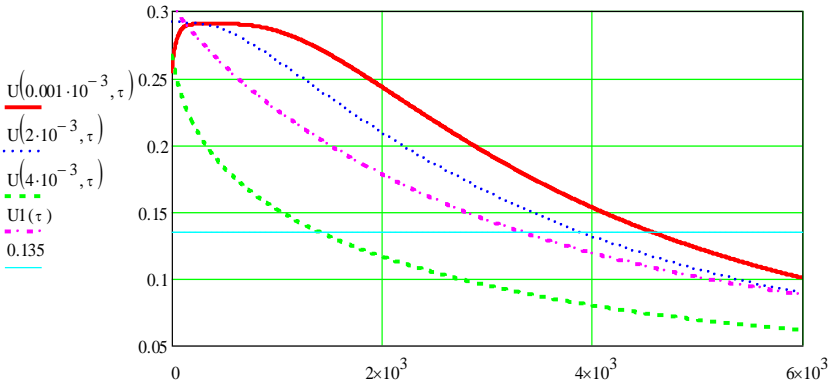


Рисунок 2.14 – Графічна залежність зміни вологовмісту за радіусом зернини і в часі

2.5.2. Вплив параметрів сушильного агенту на кінетику сушіння

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

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

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

де $Re = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$ – критерій Рейнольдса; $Pr_m = \frac{\nu}{\alpha_v}$ – критерій Прандтля

масообмінний; $Nu_m = \frac{\beta}{D} \cdot d_e$ – критерій Нусельта масообмінний;

d_e – еквівалентний 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:

$$\beta = 0,9 \cdot v^{0,5} \cdot d_e^{-0,5} \cdot D_v^{0,67} \cdot \nu^{0,17}. \quad (2.74)$$

Коефіцієнт дифузії є функцією температури повітря:

$$[D(t)] = 0,00078 \left(\frac{T_v}{273} \right)^{1,21}, \quad (2.75)$$

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

$$\nu = \nu_0 + k \cdot X. \quad (2.76)$$

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

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

де λ_0 – коефіцієнт теплопровідності сушильного агенту; ρ_v , X , φ , ν – 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. Раціональний 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 агенту 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:

$$W = G_0(u_0 - u(X)) \quad (2.78)$$

$$W = G_0 u_0 - G_0 \left[u_p + (u_0 - u_p) \cdot e^{-kx} \right]. \quad (2.79)$$

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 агенту визначена (для певної сушарки) за кількістю вологи, що видаляється за весь процес сушіння, то ця кількість є середнім значенням витрат $\bar{G}_{c.a.}$. Задавши кількість сушильного агенту в кінцевій зоні (відповідно до кількості вологи, що видаляється) G_2 , можна визначити кількість

сушильного агенту в початковій зоні сушіння G_1 . Кількість сушильного агенту в сушарках продуктивністю $G = 5 \dots 12$ т/год складає за літературними даними [41] $G_v = 4,45$ кг/с на одну планову тонну 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 агенту в камеру сушіння.

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

- температура зерна:

$$\theta(x) = \theta_1 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}); \quad (2.81)$$

- температура сушильного агента:

$$t(x) = \theta_0 + \frac{K_2}{b} \Delta T_0 (1 - e^{-bx}) + \Delta T_0 e^{-bx}; \quad (2.82)$$

- вологовміст зерна (абсолютна вологість):

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

- вологовміст сушильного агенту:

$$d(x) = d_1 + B_1 \cdot \ln \frac{G_1 - ax}{G_1} + \frac{b \cdot A_2}{a} \cdot x. \quad (2.84)$$

де t, θ – температура сушильного агента і зерна, $^{\circ}\text{C}$; b – коефіцієнт апроксимації; u – вологовміст зерна, кг/кг; $K_1 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot c_p}$; $K_2 = \frac{6\alpha \cdot s(1 - \varepsilon)}{d_e \cdot G_m \cdot c_s}$; s – площа поперечного перетину

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

$$A_1 = G_0 \Delta u_0 A; \quad A_2 = G_0 \Delta u_0 \cdot b \cdot B; \quad B_1 = \frac{1}{a} \left[\frac{b \cdot A_2 \cdot G_1}{a} - A_1 + A_2 \right].$$

2.6 Висновки до розділу

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

Вдосконалено математичну модель переміщення зерен сої вздовж обертального конічного диску пристрою підготовки їх до сушіння (2.32). 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.

Утворення «нових поверхонь» випаровування шляхом ударної взаємодії зерен сої із ножовими елементами пристрою підготовки до сушіння дозволяє підвищити інтенсивність подальшого теплового сушіння на $20 \dots 55$ % 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 змінювати 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.

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 $3 \dots 7$ %.

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. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Програма експериментальних досліджень

Проведені теоретичні дослідження інтенсифікації процесу сушіння зерен сої потребують і експериментального підтвердження та перевірки одержаних результатів. Також актуальним є проведення пошукових експериментів з метою отримання вихідних даних для розрахунків, перевірки залежностей і моделей, а також їх уточнення й доповнення.

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.

Здійснювались експерименти з використанням розроблених та існуючих пристроїв, приладів й обладнання, розроблених робочих органів і засобів підготовки зерен сої до сушіння.

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

1. Визначення наступних фізико-механічних властивостей зерен сої:
 - початкового зусилля зсуву, кута та коефіцієнта внутрішнього тертя;
 - кутів природнього відкосу;
 - пористості, об'ємної маси та насипної щільності зерен;
 - розмірно - масових характеристик 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 . На підставі цього визначалось число n з виразу [90,91]:

$$n = \frac{V^2}{p^2},$$

де V – коефіцієнт варіації, %; p – точність дослідів, що не повинна перевищувати 3 %.

Обробка результатів експериментальних 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 арифметичного значення; коефіцієнт варіації; похибка дослідів.

3.2 Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень

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

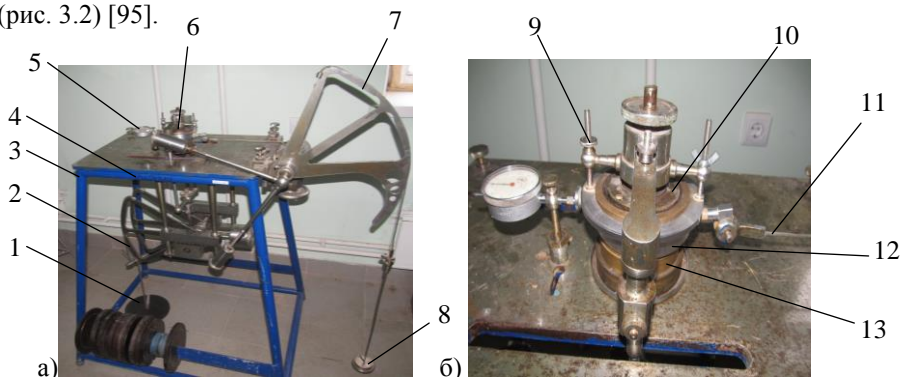


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд приладу ПСГ-3М:

а – загальний вигляд; *б* – робоча коробка:

- 1 – нижня завантажувальна підвіска; 2, 7 – двоступінчастий шків; 3 – станина; 4 – кронштейн; 5 – індикатор; 6 – робоча коробка; 8 – бокова завантажувальна підвіска; 9 – регулююча гайка; 10 – штамп; 11 – тяга; 12 – верхня частина робочої коробки; 13 – нижня частина робочої коробки

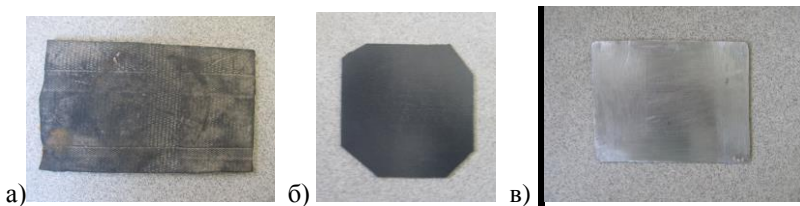


Рисунок 3.2 – Зразки поверхонь тертя:
a – прогумована стрічка; *б* – пластмаса; *в* – стальний лист

На станині 3 даного приладу за допомогою кронштейна 4 закріплений двоступінчастий шків 2 для прикладання нормального навантаження, а також шків 7 для створення навантаження зсуву, індикатор 5 та робоча коробка 6. Основою робочого пристрою є робоча коробка 6, яка складається із верхньої 12 та нижньої 13 частин (рис. 3.1, *б*). Для отримання зазору у межах 0,5...1 мм між верхньою та нижньою частинами робочої коробки на першій є різьбова поверхня, якою вона з'єднується із регулювальною гайкою 9. Зусилля зсуву до верхньої частини коробки передається через тягу 11. Нормальне зусилля на зразок передавалось через штамп 10.

Визначення кутів природного відкосу проводили на приладі, який являє собою прямий паралелепіпед 1 (рис. 3.3) з розмірами: довжина 370 мм, ширина 200 мм, висота 200 мм [96]. У днищі верхнього відділення приладу передбачений отвір з розмірами 125×200 мм, що перекривається заслінкою 2. Передня стінка приладу виготовлена зі скла. Для визначення кутів природного відкосу на скло була наклеєна міліметрова шкала 3, за допомогою якої визначалися лінійні розміри катетів отриманих прямокутних трикутників після відкриття заслінки.



Рисунок 3.3 – Прилад для визначення кута природного відкосу:
1 – прямокутний паралелепіпед, 2 – заслінка, 3 – міліметрова шкала

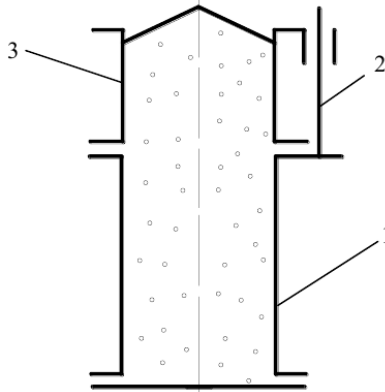


Рисунок 3.4 – Мірна посудина для визначення щільності зерен сої

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

За допомогою повзуна 1, переміщається ножева пластина 6, яка безпосередньо здійснює надріз поверхні зернини сої. Зміна кута нахилу ножа проводиться за допомогою пристрою 2, а гвинт 5 призначений для фіксації зернини на рамі 7. За допомогою кільця, що розміщене на повзуні 1, ножева пластина з'єднується з динамометром з метою фіксації зусилля різання. Гвинтовий механізм 4 призначений для плавного прикладання зусилля різання.

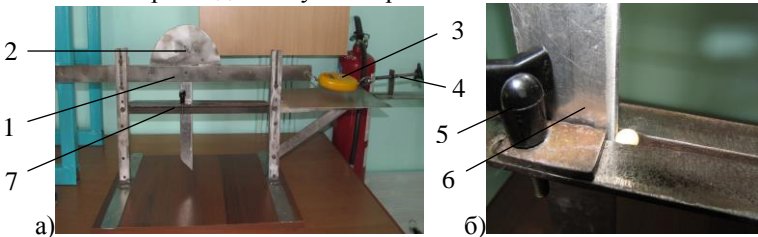


Рисунок 3.5 – Експериментальна установка для визначення зусилля руйнування поверхні зернини:

a – загальний вигляд; *б* – ножева частина:

1 – повзун; 2 – регулятор зміни кута нахилу ножа; 3 – динамометр;
4 – гвинтовий механізм; 5 – гвинт для фіксації зерен сої, 6 – ножева пластина, 7 – рама

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

Проведення запланованих програмою експериментів також вимагало значної кількості стандартного лабораторного обладнання, приладів та апаратури. Так для проведення дослідів з визначення фізико-механічних властивостей та вологості зерен сої використовувалося наступне лабораторне обладнання: сушильна шафа типу ШОЛ з термометром зі шкалою від 0 до 400°C та ціною поділки 5°C; набір бюксів; штангенциркуль; анемометр цифровий “SMART SENSOR AR826”, діапазон вимірювань 0÷45м/с, ціна поділки 0,1 м/с, похибка ± 3%; термометр цифровий TFA зі щупом 125 мм, діапазон вимірювань: від -40 до 200 °С, похибка вимірювань: ±0,8 °С; електронні ваги ТВЛ-0,5 з максимальною вагою вимірювання 500 г, ціна поділки вимірювання: 0,01 г.(НГЗ-500 г, НмГЗ – 0,5 г, d=0,01), клас точності 4; секундомір; циліндрична ємкість; посудина зі шкалою.

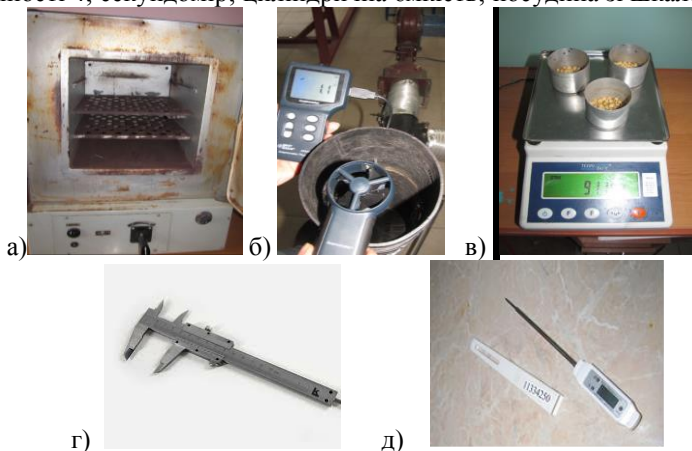


Рисунок 3.6 – Лабораторне обладнання:

a – сушильна шафа типу ШОЛ; *б* – цифровий анемометр AR826;
в – електронна вага ТВЛ-0,5 з бюксами; *г* – штангенциркуль; *д* – термометр

Під час проведення досліджень по визначенню впливу ступеня розсічення зерен сої на швидкість вологовидалення використовувалась експериментальна установка для сушіння матеріалу, яка представлена на рис. 3.7., а світлини – на рис. 3.8 та рис. 3.9.

Основною частиною експериментальної установки для сушіння зерен сої є сушильне відділення 1, термоізольоване від навколишнього середовища і розділене на вісім секцій, в які можна встановлюються в певній послідовності касети 2 з шаром матеріалу відомої маси і початкової вологості (рис. 3.7) [99].

Касета являє собою ємкість циліндричної форми з решітчастим дном, крізь яке проходить повітря, але не просипається матеріал (рис. 3.9, б). Послідовно через всі касети проходить сушильний агент, знижуючи вологість матеріалу в кожній касеті.

Установка складається з сушильного відділення 1, калорифера 3, вентилятора 5, електродвигуна 6 та гнучкого з'єднання 8, де встановлюються касети з перфорованим днищем 2.

Для регулювання температури сушильного агента, який подається в сушильне відділення встановлений регулятор температури 7. Для регулювання витрати і швидкості подачі повітря встановлена заслінка 4. При необхідності подачі атмосферного повітря калорифер вимикають.

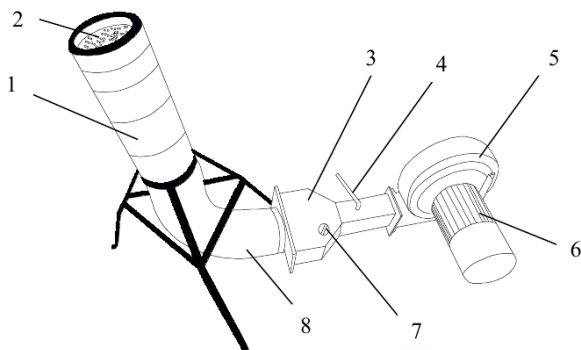


Рисунок 3.7 – Схема установки для дослідження впливу ступеня розсічення зерен сої на швидкість сушіння:

1 – сушильне відділення; 2 – касета з матеріалом; 3 – калорифер; 4 – заслінка для регулювання подачі повітря; 5 – вентилятор; 6 – електродвигун; 7 – регулятор температури; 8 – гнучкий трубопровід



Рисунок 3.8 – Світлина лабораторної установки для дослідження процесу сушіння зерен сої



Рисунок 3.9 – Світлина внутрішньої будови установки:
а – розміщення касет; б – касета з матеріалом

Для дослідження впливу конструктивних параметрів пристрою та фізико- механічних властивостей зерен сої на ступінь розсічення був розроблений та виготовлений пристрій підготовки матеріалу до сушіння (рис. 3.10) [12,13].

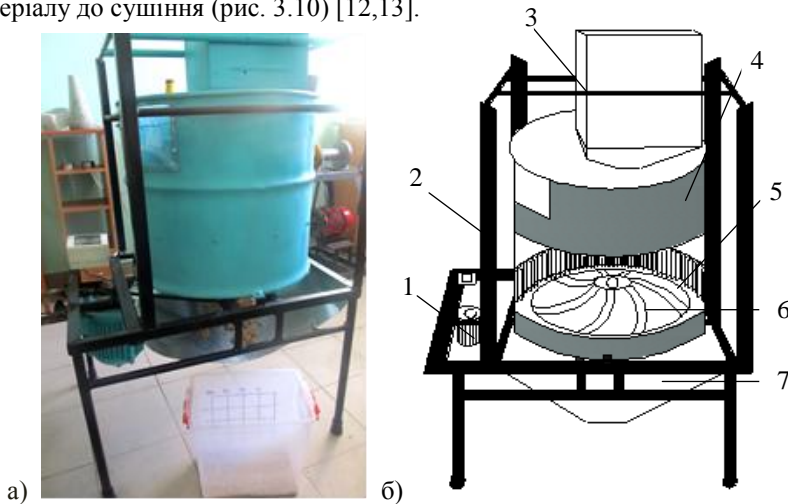


Рисунок 3.10 – Пристрій підготовки зерен сої до сушіння:
а – світлина; б – схематичне зображення:

- 1 – електродвигун; 2 – каркас; 3 – завантажувальний бункер; 4 – корпус;
- 5 – циліндрична дека з ножовими пластинами ; 6 – диск з лопатками;
- 7 – вивантажувальний лоток

Розсічення поверхні зерен проходить при його безпосередньому контакті з ножовими пластинами циліндричної деки 5, яка розміщена за діаметром диску по його висоті в корпусі пристрою. Також передбачена можливість регулювання кількості подачі матеріалу в робочу камеру за допомогою заслінки завантажувального бункеру 3. Відвід обробленого матеріалу забезпечує вивантажувальний лоток 7.

Розроблений пристрій дає можливість дослідити вплив на коефіцієнт розсічення зерен сої k_p наступних факторів: подачі матеріалу Q ; колової швидкості диска V ; кількості лопаток на диску n ; фізико-механічних властивостей зерен сої, які визначаються їх вологістю.

3.3 Методика визначення фізико-механічних властивостей зерен сої як об'єкта обробки пристроєм підготовки до сушіння

3.3.1 Методика визначення показників, що характеризують сипкість зерен сої

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 заздалегідь 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 гир 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 прикладали зусилля зсуву, яке створювалось вагою вантажів, що розміщувались на платформі бокової завантажувальної підвіски.

Експеримент для визначення коефіцієнта тертя спокою f_c (статичного коефіцієнта) рахували закінченим, коли спостерігавсь безперервний приріст деформацій зсуву при сталому прикладеному

напруженні протягом 60 с.

При визначенні коефіцієнта тертя руху f_{∂} (динамічного коефіцієнта) фіксувалася вага вантажів, розміщених на платформі бокової завантажувальної підвіски, при яких деформації зсуву уже припинялися.

Нормальне напруження визначали за формулою [95, 99]:

$$\sigma = \frac{G_1 \cdot n_{в.н.}}{F}, \quad (3.1)$$

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:

$$\tau = \frac{G_2 \cdot n_{в.б.}}{F}, \quad (3.2)$$

де τ – граничне дотичне напруження, Н/м²; G_2 – сумарна вага вантажу на платформі бокової завантажувальної підвіски у момент завершення досліду, 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:

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

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:

$$\varphi = \arctg f \quad (3.5)$$

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 проводився із трикратною повторністю при вологості зерен сої 9,6%, 12,7%, 16,8% і 20,9%.

3.3.2 Методика визначення фрикційних властивостей зерен сої

Досліди проводились на приладі ПСГ-3М (рис. 3.1). У нижній рухомій частині коробки розміщували зразки поверхні тертя (рис. 3.2), а верхню заповнювали зернами сої із заздалегідь визначеною вологістю.

Значення коефіцієнтів тертя спокою f_c та руху f_d визначали за формулою[95,99]:

$$f = \frac{F_{mp}}{G_1 \cdot n_{в.н.}} \quad (3.6)$$

де f – коефіцієнт зовнішнього тертя; F_{mp} – сила тертя, Н; G_1 – сумарна вага вантажу на платформі нижньої завантажувальної підвіски, Н; $n_{в.н.}$ – передатне число важільного механізму нижньої навантажувальної підвіски.

Оскільки, в даному випадку $F_{mp} = G_2 \cdot n_{в.б.}$, а $n_{в.б.} = n_{в.н.}$, то вираз (3.6.) після перетворень набуде вигляду:

$$f = \frac{G_2}{G_1} \quad (3.7)$$

Числові значення кутів тертя спокою φ_c та руху φ_d визначали за формулою:

$$\varphi = \arctg f \quad (3.8)$$

Досліди проводили з трикратною повторюваністю для вологості зерен сої 9,6%, 12,7%, 16,8% і 20,9% , при використанні площин тертя, виготовлених із сталі, пластмаси та прогумованої стрічки (рис. 3.2).

3.3.3 Методика визначення кутів природного відкосу

Кут природного відкосу – це кут між дотичною і основою конуса, утворений при повільному висипанні продукту на плоску горизонтальну поверхню. Кути природного відкосу визначались за допомогою приладу, описаного в п. 3.2. (рис. 3.3).

Прилад встановлювали в горизонтальне положення і заповнювали його верхнє відділення на 80 % зернами сої. Після цього висували заслінку і матеріал просипався у нижнє відділення ящика [97,100,101]. Після закінчення просипання матеріалу в нижньому відділенні на склі передньої стінки приладу спостерігали кут природного відкосу, утворений насипанням $\alpha_{нас}$, а у верхньому відповідно – обваленням $\alpha_{обв}$. Числові значення шуканих кутів у градусах визначали як \arctg відношення відповідних катетів отриманих прямокутних трикутників.

Досліди проводились в трикратній повторюваності при різних значеннях початкової вологості зерен сої: 9,6%, 12,7%, 16,8% і 20,9%.

3.3.4 Методика визначення пористості, об'ємної маси та насипної щільності зерен сої

Пористість (шпаруватість) сипучого матеріалу представляє собою відношення обсягу порожнин сипкого матеріалу і обсягу самого насипаного матеріалу [100,101].

Для скорочення трудомісткості при визначенні пористості зерен сої був застосований пікнометричний метод. Пікнометричний метод базується на визначенні об'єму рідини, яка витісняється із спеціальної посудини (пикнометра) при зануренні в нього зразка досліджуваного матеріалу. Ємкість, що виступала в якості пікнометра, об'ємом 200 мл заповнювали зернами сої і закривали кришкою. Потім через невеликий отвір в кришці до верху заповнювали бензином. Об'єм рідини, необхідний для заповнення ємкості вимірювали мірною посудиною.

Зважаючи на те, що об'єм бензину, який залили до мірної посудини, рівний об'єму порожнин у шарі матеріалу, значення пористості зерен сої визначали за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V_{pid.}}{V_{\varepsilon M.}}, \quad (3.9)$$

де ε – пористість зерен; $V_{pid.}$ – об'єм рідини, яку заливали до циліндричної ємкості, м³; $V_{\varepsilon M.}$ – об'єм циліндричної ємкості, м³.

Об'ємна маса сипкого матеріалу являє собою масу одиниці об'єму (здебільшого 1 л) матеріалу в грамах. Тобто, дана характеристика показує скільки важить матеріал, коли займає певний об'єм. Визначення об'ємної маси зерен сої було проведено за допомогою мірної посудини (рис. 3.4).

Поворотна рамка встановлювалася так, щоб її стінки були продовження стінок посудини. В посудину насипалися зерна сої до верху рамки, останню обертали довкола осі і вона зрізувала надлишок зерен. Матеріал, що залишився в посудині, зважувався.

За отриманими експериментальними даними, значення об'ємної маси зерен сої визначали за формулою:

$$\gamma_o = \frac{m_i}{V_i}, \quad (3.10)$$

де γ_o – об'ємна маса зерен сої, кг/м³; m_i – маса насінин в посудині, кг; V_i – об'єм посудини, м³.

Щільністю насипаного матеріалу називають середню щільність (питому масу) його твердих частинок.

Для вимірювання щільності зерен сої була відібрана наважка зерен і зважена з точністю до 0,1 м. Потім в мірний циліндр об'ємом 200 мл наливали близько 100 мл бензину. Засипавши наважку зерен в мірний циліндр, визначали, наскільки зміниться рівень рідини. Отриманий об'єм буде відповідати об'єму матеріалу.

Значення щільності зерен сої визначали за формулою:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.11)$$

де ρ – щільність зерен сої, г/см³; m – маса зерен навішення, г; V – об'єм зерен, см³.

Дослідження проводили з метою встановлення впливу вологості зерен сої на дані показники, тому усі досліди проводилися з трикратною повторюваністю при різній вологості матеріалу: 9,6%, 12,7%, 16,8% і 20,9%.

3.3.5. Методика визначення розмірно-масових характеристик зерен сої

Для визначення розмірно-масових характеристик зерен сої від досліджуваного матеріалу у випадковій черговості було відібрано 50 зерен даної культури і визначено масу кожної зернини m_s та три її основні розміри: товщина – a_s , ширина – b_s та довжина – c_s .

Після усіх замірів встановлювалося максимальне x_{\max} і мінімальне x_{\min} значення та вибиралася величина класового проміжку h для кожної досліджуваної ознаки [100,102].

Число класів визначалося за формулою:

$$k = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{h} \quad (3.12)$$

Після цього встановлювалися границі класів: x_{\min} , $x_{\min} + h$ – перший клас, $x_{\min} + h$, $x_{\min} + 2h$ – другий клас і т.д.

Дослідна ймовірність (частота) визначалася за формулою:

$$P_i = \frac{n_i}{N}, \quad (3.13)$$

де n_i – частота значень статистичного ряду в кожному інтервалі.

Середнє значення досліджуваної ознаки:

$$\bar{x} = \frac{n_1 \cdot x_{1cp} + n_2 \cdot x_{2cp} + \dots + n_k \cdot x_{kcp}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot x_{icp}}{N} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i \cdot x_{icp}}{50}, \quad (3.14)$$

x_{icp} – значення середини i -го інтервалу; P_i – дослідна ймовірність.

Середнє квадратичне відхилення визначалося за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left[\left(x_{icp} - \bar{x} \right)^2 \cdot P_i \right]}, \quad (3.15)$$

де \bar{x} – середнє значення досліджуваної ознаки.

Дані варіаційного ряду представлені у вигляді графіків: гістограми, полігону і інтегральної кривої.

Після побудови графіків встановлювалося відповідність статистичних даних певному закону розподілу. Для цього визначався коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (3.16)$$

де σ – середнє квадратичне відхилення; \bar{x} – середнє значення досліджуваної ознаки.

Дослідження проводили з метою встановлення впливу вологості зерен сої на дані величини, тому усі досліди проводились при різних значеннях початкової вологості W : 9,8%, 12,9% і 20,4% .

3.4 Методика визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на процес сушіння

Для визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на процес сушіння застосовувалася експериментальна 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 поміщалася касета, яка перегородкою була розділена на чотири частини (рис.3.9, б). У кожную з частин поміщалися попередньо зважені зернини сої з різним ступенем розсічення поверхні. Через касету проходив сушильний агент, знижуючи вологість матеріалу [99].

Температура сушильного агенту, 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: $k_p=1$; $k_p=1,015$; $k_p=1,041$; $k_p=1,073$.

3.5 Методика роздільного сушіння зерен сої

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

З відібраної кількості зерен сої відокремлювалася їх зовнішня оболонка, після чого проводилося зважування окремо відібраних разків (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 агенту, при якій проводився даний процес складала 60 ± 5 °С. Інтервал часу, через який проводилося зважування касети – 5 хв.

Експеримент проводили у трикратній повторюваності.

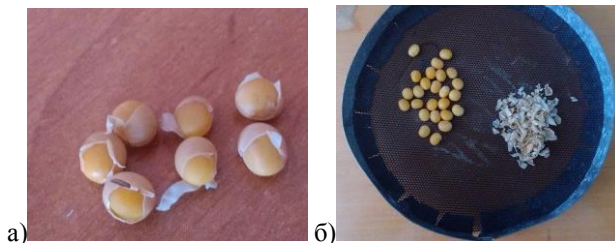


Рисунок 3.11 – Підготовка зерен сої до роздільного сушіння:
a – процес відокремлення; *б* – касета із відокремленими оболонками та ядрами

3.6 Методика визначення зусилля, необхідного для розсічення поверхні зерен

Для визначення зусилля, необхідного для розсічення зерен сої застосовувалася експериментальна установка, описана у п. 3.2. (рис. 3.5) [97,101].

Зернину затискали перед ножовою пластиною. За допомогою гвинтового механізму прикладали зусилля різання. Збільшення величини прикладеного зусилля різання зернини припиняли при появі ознак руйнування оболонки. За допомогою динамометра фіксувалося значення відповідного зусилля.

Досліди проводили з трикратною повторюваністю для вологості зерен сої 9,6%, 12,7% ,16,4% та 20,9%.

3.7 Методика визначення коефіцієнта відновлення

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.

Досліди повторювали з трикратною повторюваністю для вологості зерен сої 9,6%, 12,7% ,16,4% та 20,9%.

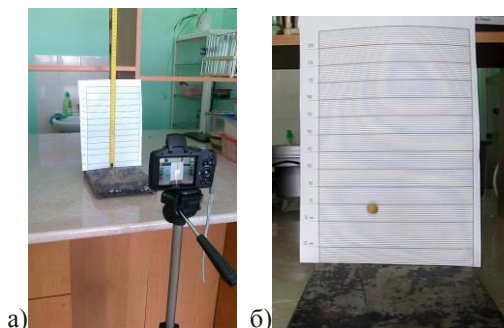


Рисунок 3.12 – Світлини установки для визначення коефіцієнта відновлення (а) та фіксації експерименту (б)

3.8 Методика визначення зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння

Даний дослід проводився з метою визначення зміни швидкості повітряного потоку по висоті від поверхні диска та осі робочої камери пристрою підготовки зерен сої до сушіння в процесі його роботи.

Перед отриманням показів швидкості повітряного потоку було розбито об'єм робочої камери на фіксовані характерні точки за висотою від поверхні диска та віддалю від осі робочої камери пристрою, в яких і знімалися числові значення (рис. 3.13, а).

Покази фіксувалися за допомогою цифрового анемометра AR826 (рис. 3.13, б) при різних значеннях колової швидкості диска: $V = 55, 40$ та 25 м/с. в трикратній повторюваності у кожній точці.

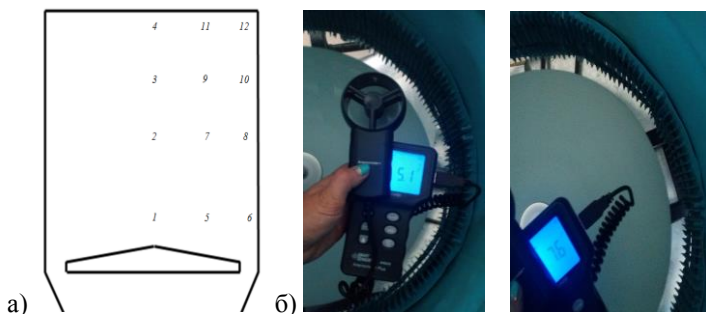


Рисунок 3.13 – Дослідження зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою:

а – схема розташування характерних точок; б – світлина реалізації експерименту

3.9 Методика визначення впливу режимних параметрів пристрою підготовки зерен до сушіння та властивостей сої на коефіцієнт розсічення

Під час проведення теоретичних та експериментальних досліджень, було окреслено коло режимних та конструктивних параметрів, як пристрою підготовки до сушіння, так і початкових параметрів самого оброблювального матеріалу, які безпосередньо впливають на ступінь розсічення зерен сої. Одні фактори мають істотний вплив на ступінь розсічення поверхні, інші - менш впливові.

Аналіз результатів попередніх досліджень показав, що на ступінь розсічення зерен сої, який в подальшому безпосередньо впливає на інтенсивність сушіння, впливають кількість лопаток на диску, колова швидкість диска та подача матеріалу в завантажувальний бункер. Крім того, важливо дослідити вплив на інтенсивність сушіння початкової вологості зерен, як фактору, від якого залежать більшість фізико-механічних властивостей досліджуваного матеріалу.

Для кількісної оцінки впливу зазначених факторів та отримання математичної моделі цього процесу у вигляді рівняння регресії, було проведено дослідження із застосуванням математичного методу планування експерименту за чотирма найбільш значущими факторами.

У результаті роботи пристрою підготовки до сушіння необхідно забезпечити максимальний ступінь розсічення зерен сої (але не допустити їх руйнування), який, в свою чергу, призводить до збільшення контактної площі матеріалу і сушильного агенту. Тому за критерій оптимізації у ході проведення даного багатofакторного експерименту було прийнято коефіцієнт розсічення зерен сої.

Коефіцієнт розсічення зерен сої – це показник, який характеризує приріст площі зернини до і після розсічення:

$$k_p = \frac{S_{noc} + \Delta S}{S_{noc}}, \quad (3.18)$$

де S_{noc} – початкова площа поверхні зернини до розсічення; ΔS – приріст площі, що утворився після розсічення.

У загальному вигляді математичну модель на основі чотирьох факторів можна подати таким виразом [103-105]:

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (3.19)$$

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (3.20)$$

де y – коефіцієнт розсічення зерен сої; x_1, x_2, x_3, x_4 – відповідно початкова вологість матеріалу (%), подача в завантажувальний бункер (кг/год), швидкість диска (м/с), кількість лопаток на диску (шт).

Проведення багатофакторного експерименту вимагає виконання N -ї кількості дослідів [105].

$$N = m^k, \quad (3.21)$$

де m - кількість рівнів дослідження; k - кількість факторів у серії досліджень.

Проведення повнофакторного експерименту за чотирма факторами на трьох рівнях вимагає проведення 81 дослідів. 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

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

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:

$$x_1 = \frac{W - W_o}{\varepsilon_1}; x_2 = \frac{Q - Q_o}{\varepsilon_2}; x_3 = \frac{V - V_o}{\varepsilon_3}; x_4 = \frac{n - n_o}{\varepsilon_4}, \quad (3.22)$$

де W_o, Q_o, V_o, n_o - 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.

Порядок проведення дослідів встановлювали, використовуючи таблицю випадкових чисел.

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

$$y = b_o + b_{11}x_1 + b_{22}x_2 + b_{33}x_3 + b_{44}x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 \quad (3.23)$$

Коефіцієнти регресії визначали за методикою [89]. Довірчі інтервали оцінок коефіцієнтів регресії розраховуємо за формулою:

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} S_{b_i}, \quad (3.24)$$

де $t_{\alpha; f_1}$ - критерій Стьюдента при вибраній довірчій ймовірності α та числі ступенів вільності f_1 ;

S_{b_i} - середньоквадратичні помилки оцінок коефіцієнтів регресії.

Коефіцієнти регресії вважаються значущими за наступної умови:

$$|b_i| \geq \Delta b_i. \quad (3.25)$$

Оскільки експерименти проводились із однаковим числом повторностей, то однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм

Кохрена. Для цього визначали розрахункову величину даного критерію:

$$G^{\text{розр.}} = \frac{S_{y_i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{y_i}^2}, \quad (3.26)$$

де $S_{y_i \max}^2$ – найбільша із дисперсій; $S_{y_i}^2$ – дисперсія, що характеризує розсіювання результатів в i -му досліді.

Ряд дисперсій рахували однорідним, якщо:

$$G^{\text{розр.}} < G^{\text{табл.}}(0.05; n; f), \quad (3.27)$$

де $G^{\text{табл.}}(0.05; n; f)$ – табличне значення критерію Кохрена за 5%-го рівня значущості, n – кількість дослідів та $f = m - 1$ – числа ступенів вільності.

Перевірка адекватності моделі проводиться за F -критерієм Фішера. Його розрахункове значення визначається за формулою:

$$F^{\text{розр.}} = \frac{S_{\text{неад.}}^2}{S_y^2} \cdot f_2 \cdot f_1 \quad (3.28)$$

де $S_{\text{неад.}}^2$ – дисперсія неадекватності; S_y^2 – дисперсія дослідів.

Число ступенів вільності:

$$f_2 = N - k' - 1, \quad (3.29)$$

де k' – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Величина $S_{\text{неад.}}^2$ дорівнює:

$$S_{\text{неад.}}^2 = \frac{SS_{\text{неад.}}}{f_2}. \quad (3.30)$$

Оскільки один дослід у центрі плану тричі дублюється, сума квадратів $SS_{\text{неад.}}$ визначається за формулою:

$$SS_{\text{неад.}} = n_o (y_{\text{орозр.}} - \bar{y}_o)^2 + \sum_{u=1}^{24} (y_{\text{уорозр.}} - \bar{y}_{\text{уексп.}})^2, \quad (3.31)$$

де $y_{\text{орозр.}}$ – розрахункове значення відгуку дослідів у центрі плану;

$y_{\text{орозр.}}$ – розрахункове значення відгуку в u -му досліді; $\bar{y}_{\text{іексп.}}$ –

середнє експериментальне значення відгуку в u -му досліді

Модель вважається адекватною, якщо винонується нерівність:

$$F^{\text{розр.}} \leq F^{\text{табл.}}, \quad (3.32)$$

де $F^{\text{табл.}}$ – табличне значення F -критерію для вибраного рівня значущості.

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.

3.10 Методика визначення впливу режимних параметрів сушіння та коефіцієнта розсічення на інтенсивність сушіння

Аналіз результатів попередніх досліджень по визначенні впливу режимних параметрів на швидкість перебігу процесу сушіння показав, що на інтенсивність вологовидалення впливають: початкова вологість матеріалу, температура та швидкість сушильного агенту. Крім того, важливо дослідити вплив коефіцієнта розсічення зерен сої у поєднанні з режимними параметрами сушіння. Тому для проведення даного експерименту було зібрано матеріал, який було отримано під час проведення багатофакторного експерименту на пристрої підготовки зерен сої до сушіння. Після цього відбиралися зразки з кожної досліджуваної вологості (15%, 19%, 23%), для яких коефіцієнт розсічення був максимально допустимим.

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 $W, \%$	Температура СА $t_{ca}, ^\circ\text{C}$	Швидкість СА $V_{ca}, \text{м/с}$
	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 \mathcal{E}	4	5	0,3

Для кількісної оцінки впливу зазначених факторів та отримання математичної 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:

$$x_1 = \frac{W - W_o}{\varepsilon_1}; x_2 = \frac{t_{ca} - t_{ca0}}{\varepsilon_2}; x_3 = \frac{V_{ca} - V_{cao}}{\varepsilon_3},$$

де W_o, t_{ca0}, V_{cao} – значення факторів на основному рівні, відповідно, вологості зерен сої, температури сушильного агента, швидкості сушильного агента; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – інтервал варіювання фактора.

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 агента.

3.11 Висновки до розділу

- Визначення фізико-механічних властивостей зерен сої проводилось за загальноприйнятими й запропонованими методиками в обсязі, що дозволяє обґрунтувати параметри пристрою підготовки зерен сої до сушіння.
- Запропонована методика досліджень коефіцієнта розсічення k_p , яка забезпечує оцінку вказаного параметра від вологості W оброблюваного

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

матеріалу, його подачі Q та конструктивних параметрів розробленого пристрою підготовки: колової швидкості V , кількості лопаток n .

- Запропонована методика досліджень тривалості сушіння підготовлених зерен сої τ у розробленому пристрої підготовки забезпечує оцінку вказаного параметра від вологості W матеріалу, температури та швидкості сушильного агенту t_{ca} , V_{ca} .

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Визначення фізико-механічних властивостей зерен сої як об'єкта сушіння

4.1.1 Показники, що характеризують сипкість зерен сої

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 . Числове 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. 4.1. На основі табличних даних побудовано графічні залежності (рис. 4.1, 4.2).

Таблиця 4.1 – 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 $\tau_0, \text{кПа}$	1,14	0,78	0,54	0,51
Кут внутрішнього тертя $\varphi, ^\circ$	11,2	5,7	4,4	3,9

Із одержаних експериментальних 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.

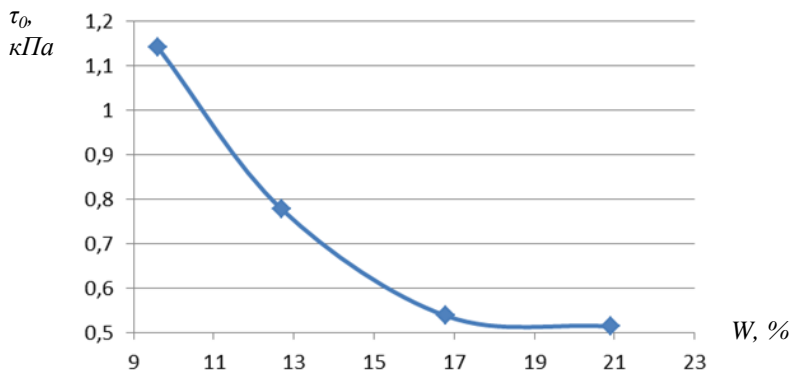


Рисунок 4.1 – Залежність зміни початкового зусилля зсуву τ_0 зерен сої від їх вологості W

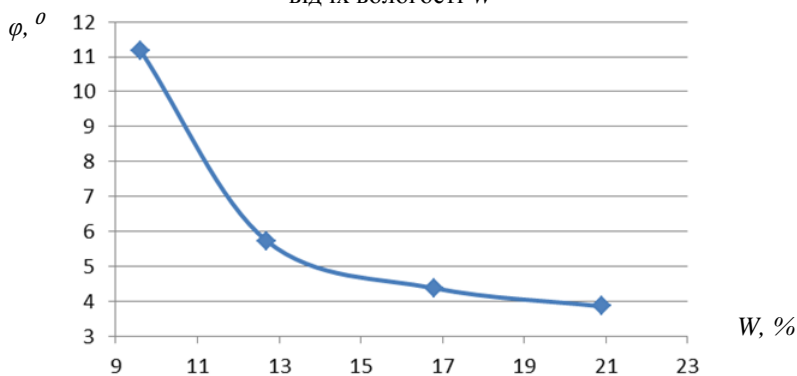


Рисунок 4.2 – Залежність зміни кута внутрішнього тертя φ зерен сої від їх вологості W

4.1.2 Фрикційні властивості зерен сої

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]. Оскільки відомості про дані характеристики зерен сої сортів, які вирощуються в Україні, відсутні, то було проведено дослідження для визначення динамічного та статичного коефіцієнтів тертя ковзання згідно з методикою, описаною у п. 3.3.2.

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.4.2.

Таблиця 4.2 – Середні значення коефіцієнтів тертя ковзання зерен сої

Досліджуваний матеріал		Матеріал площини тертя					
		Пластмаса		Сталь		прогумована стрічка	
		f_c	f_d	f_c	f_d	f_c	f_d
Зерна сої вологістю, %	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. 4.3).

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.

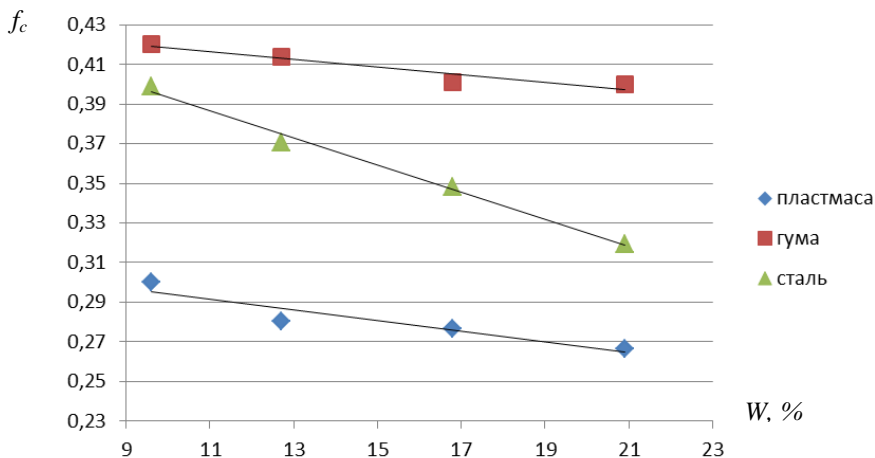


Рисунок 4.3 – Залежність зміни статичного коефіцієнта тертя ковзання f_c зерен сої від його вологості W

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 сталевий 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: $f_c = 0,26 \dots 0,3$.

4.1.3. Визначення пористості (шпаруватості) та щільності зерен сої

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. 4.3.

Таблиця 4.3 –Значення щільності, пористості та об'ємної маси

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.

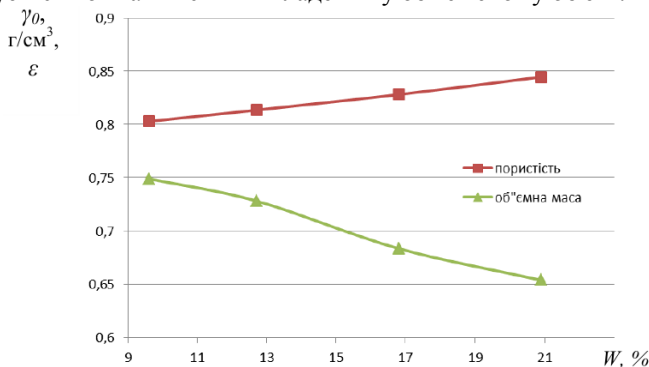


Рисунок 4.4 – Залежність зміни пористості та об'ємної маси зерен сої від вологості

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

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

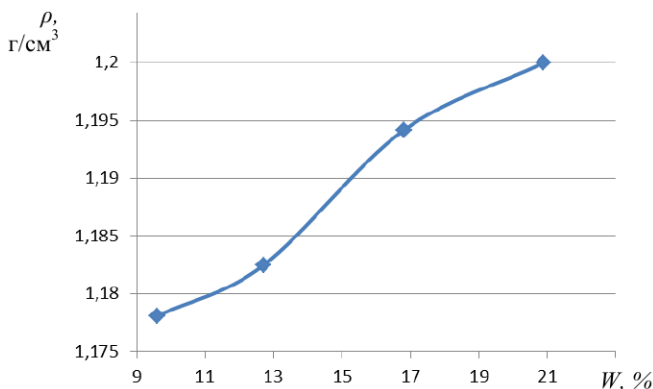


Рисунок 4.5 – Залежність зміни щільності зерен сої від їх вологості

4.1.4 Визначення кутів природного відкосу

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]. .

Експериментальні значення кутів природного відкосу визначалися за методикою, описаною в п.3.3.3. Для проведених досліджень використовувалося зерно сої вологістю: 12,7%, 16,8% і 20,9% .

Середні значення отриманих у результаті досліджень кутів природного відкосу наведені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Середні значення кутів природного відкосу

Вологість зерен сої, %	$\alpha_{нас}^0$	$\alpha_{обв}^0$
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 природнього відкосу побудовано графічну залежність (рис. 4.6).

Аналіз результатів експериментально отриманих значень вказує на те, що кут природнього 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 природнього відкосу. Таке явище очевидно пояснюється значним зростанням визначальних розмірів зерен сої із зростанням їх вологості.

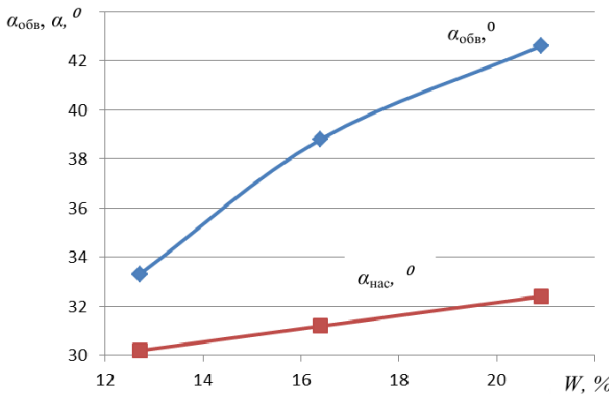


Рисунок 4.6 – Графічна залежність впливу відносної вологості W зерен сої на зміну кутів природнього відкосу, утвореного насипанням, $\alpha_{нас}$ та обваленням $\alpha_{обв}$

4.1.5 Визначення розмірно-масових характеристик зерен сої

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

Використовуючи методику, описану в п. 3.3.5., а також формули (3.9) та (3.10) було одержано інтервальний статистичний ряд розмірних характеристик у вигляді табл. 4.4-4.6. для досліджуваних вологостей зерен сої.

Результати досліджень розмірно-масових характеристик зерен сої (товщини – a_s , ширини – b_s , довжини – c_s та маси m_s) наведені на

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

гістограмах, полігонах та кривих накопичених дослідних ймовірностей (рис.4.5-4.9).

Таблиця 4.5 – Інтервальний статистичний ряд для $W=9,8\%$

Дослід. ознака	Границі інтервалів	n_i	$P_i = \frac{n_i}{N}$	ΣP_i
c_s	4,9-5,15	2	0,04	0,04
	5,15-5,4	1	0,02	0,06
	5,4-5,65	1	0,02	0,08
	5,65-5,9	5	0,1	0,18
	5,9-6,15	8	0,16	0,34
	6,15-6,4	16	0,32	0,66
	6,4-6,65	4	0,08	0,74
	6,65-6,9	9	0,18	0,92
	6,9-7,15	4	0,08	1
b_s	5,12-5,32	1	0,04	0,04
	5,32-5,52	2	0,22	0,26
	5,52-5,72	11	0,2	0,46
	5,72-5,92	10	0,16	0,62
	5,92-6,12	8	0,18	0,8
	6,12-6,32	9	0,1	0,9
	6,32-6,52	5	0,02	0,92
	6,52-6,72	1	0,06	0,98
	6,72-6,92	3	0,02	1
a_s	4,16-4,41	8	0,16	0,16
	4,41-4,66	5	0,1	0,26
	4,66-4,91	14	0,28	0,54
	4,91-5,16	12	0,24	0,78
	5,16-5,41	5	0,1	0,88
	5,41-5,66	3	0,06	0,94
	5,66-5,91	1	0,02	0,96
	5,91-6,16	1	0,02	0,98
	6,16-6,41	1	0,02	1
m_s	0,06-0,08	8	0,16	0,16
	0,08-0,1	4	0,08	0,24
	0,1-0,12	12	0,24	0,48
	0,12-0,14	14	0,28	0,76
	0,14-0,16	4	0,08	0,84
	0,16-0,18	6	0,12	0,96
	0,18-0,2	2	0,04	1

Таблиця 4.6 – Інтервальний статистичний ряд для $W=12,9\%$

Дослід. ознака	Границі інтервалів	n_i	$P_i = \frac{n_i}{N}$	ΣP_i
c_s	6,28-6,48	3	0,06	0,06
	6,48-6,68	5	0,1	0,16
	6,68-6,88	3	0,06	0,22
	6,88-7,08	9	0,18	0,4
	7,08-7,28	9	0,18	0,58
	7,28-7,48	5	0,1	0,68
	7,48-7,68	8	0,16	0,84
	7,68-7,88	6	0,12	0,96
	7,88-8,08	2	0,04	1
b_s	6,28-6,48	3	0,06	0,06
	5,52-5,67	1	0,02	0,02
	5,67-5,82	4	0,08	0,1
	5,82-5,97	6	0,12	0,22
	5,97-6,12	8	0,16	0,38
	6,12-6,27	13	0,26	0,64
	6,27-6,42	4	0,08	0,72
	6,42-6,57	4	0,08	0,8
	6,57-6,72	5	0,1	0,9
a_s	6,72-6,87	3	0,06	0,96
	6,87-7,02	2	0,04	1
	4,56-4,81	8	0,16	0,16
	4,81-5,06	10	0,2	0,36
	5,06-5,31	15	0,3	0,66
	5,31-5,56	9	0,18	0,84
	5,56-5,81	3	0,06	0,9
	5,81-6,06	1	0,02	0,92
	6,06-6,31	1	0,02	0,94
m_s	6,31-6,56	1	0,02	0,96
	6,56-6,81	1	0,02	0,98
	6,81-7,06	1	0,02	1
	0,08-0,1	8	0,16	0,16
	0,1-0,12	12	0,24	0,4
	0,12-0,14	19	0,38	0,78
	0,14-0,16	3	0,06	0,84
	0,16-0,18	4	0,08	0,92
	0,18-0,2	4	0,08	1

Таблиця 4.7 – Інтервальний статистичний ряд для $W=20,4\%$

Досліджуван а ознака	Границі інтервалів	n_i	$P_i = \frac{n_i}{N}$	ΣP_i
c_s	6,58-6,83	5	0,1	0,1
	6,83-7,08	10	0,2	0,3
	7,08-7,33	8	0,16	0,46
	7,33-7,58	8	0,16	0,62
	7,58-7,83	4	0,08	0,7
	7,83-8,08	5	0,1	0,8
	8,08-8,33	4	0,08	0,88
	8,33-8,58	3	0,06	0,94
b_s	8,58-8,83	1	0,02	0,96
	5,24-5,44	1	0,02	0,02
	5,44-5,64	2	0,04	0,06
	5,64-5,84	2	0,04	0,1
	5,84-6,04	9	0,18	0,28
	6,04-6,24	10	0,2	0,48
	6,24-6,44	10	0,2	0,68
	6,44-6,64	8	0,16	0,84
a_s	6,64-6,84	5	0,1	0,94
	6,84-7,04	3	0,06	1
	4,72-4,97	3	0,06	0,06
	4,97-5,22	8	0,16	0,22
	5,22-5,47	7	0,14	0,36
	5,47-5,72	16	0,32	0,68
	5,72-5,97	8	0,16	0,84
	5,97-6,22	4	0,08	0,92
m_s	6,22-6,47	1	0,02	0,94
	6,47-6,72	1	0,02	0,96
	6,72-6,97	1	0,02	0,98
	6,97-7,22	1	0,02	1
	0,09-0,11	3	0,06	0,06
	0,11-0,13	8	0,16	0,22
	0,13-0,15	18	0,36	0,58
	0,15-0,17	5	0,1	0,68
0,17-0,19	8	0,16	0,84	
0,19-0,21	5	0,1	0,94	
0,21-0,23	1	0,02	0,96	
0,23-0,25	2	0,04	1	

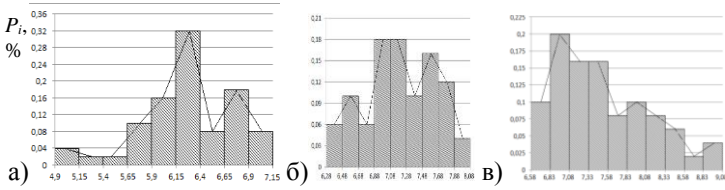


Рисунок 4.5 – Гістограма розподілу зерен сої по довжині c_s :
 а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

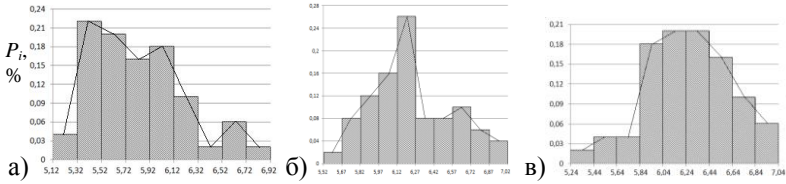


Рисунок 4.6 – Гістограма розподілу зерен сої по ширині b_s :
 а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

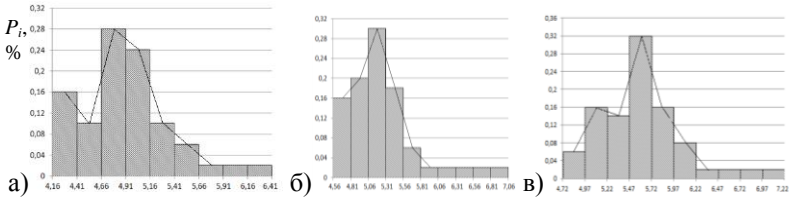


Рисунок 4.7 – Гістограма розподілу зерен сої по товщині a_s :
 а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

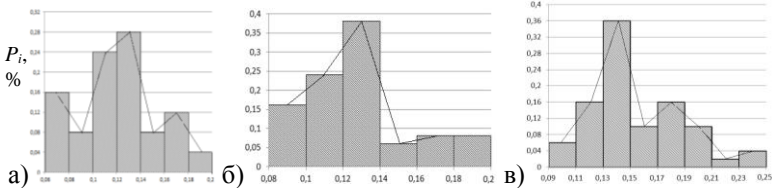


Рисунок 4.8 – Гістограма розподілу зерен сої по масі m_s :
 а – $W=9,8\%$; б – $W=12,9\%$; в – $W=20,4\%$

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

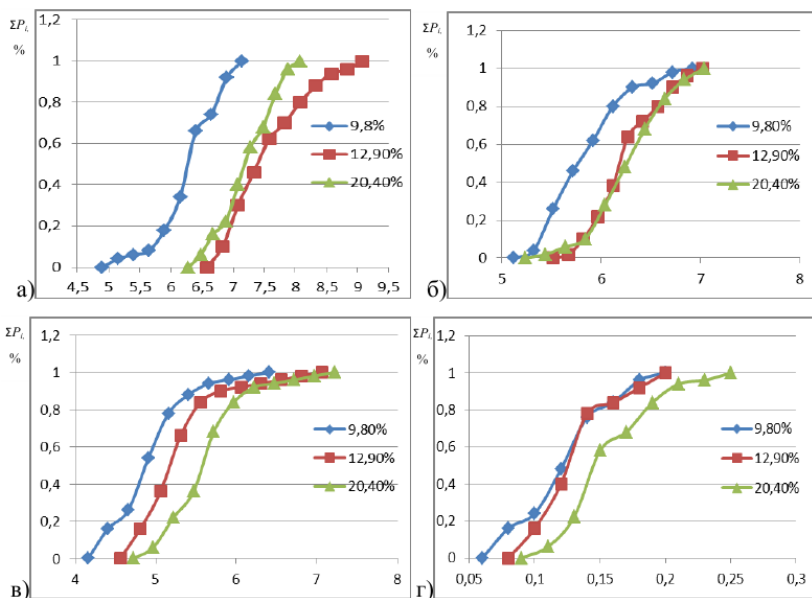


Рисунок 4.9 – Інтегральна крива розподілу зерен сої:
 а – по довжині c_s ; б – ширині b_s ; в – товщині a_s ; г – масі m_s

Таблиця 4.8 – Оціночні показники визначення розмірів та мас зерен сої

	$W=9,8\%$				$W=12,9\%$				$W=20,4\%$			
	Серед. значен., \bar{x}	Серед. квад. відхил., σ^2	Коефіц. вар-ції, V	Серед. значен., \bar{x}	Серед. квад. відхил., σ^2	Коефіц. вар-ції, V	Серед. значен., \bar{x}	Серед. квад. відхил., σ^2	Коефіц. вар-ції, V	Серед. значен., \bar{x}	Серед. квад. відхил., σ^2	Коефіц. вар-ції, V
Серед. значен., \bar{x}	6,27	5,82	4,91	0,12	7,52	6,23	5,26	0,13	7,2	6,26	5,6	0,15
Серед. квад. відхил., σ^2	0,47	0,33	0,45	0,03	0,61	0,38	0,49	0,03	0,43	0,37	0,47	0,03
Коефіц. вар-ції, V	0,08	0,05	0,08	0,27	0,08	0,07	0,09	0,22	0,06	0,06	0,09	0,22

Після всіх розрахунків проводилася перевірка на випадуючі точки за правилом: $\bar{x} \pm 3\sigma$. Було встановлено, що всі статистичні дані

відповідають поставленій вимозі. Оскільки, $0 \leq V \leq 0,3$, то дані, отримані у результаті експерименту відповідають нормальному закону розподілу випадкових величин [90,94].

Аналіз результатів дослідження показує, що розміри основної маси зерен сої не суттєво відхиляється від середніх розмірів, проте вплив вологості на досліджувані параметри прослідковується.

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.

4.2 Визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на процес сушіння

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.

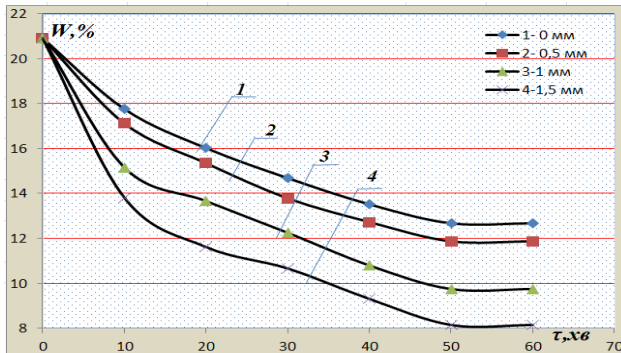


Рисунок 4.10 – Зміна відносної вологості зерен сої з часом:

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

З експериментально 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.

4.3. Роздільне сушіння зерен сої

Процес роздільного сушіння проводився при таких параметрах: температура сушильного агента: $t_{c.a.} = 55 \pm 5$ °C, швидкість повітряного потоку сушильного агента: $V_{нов} = 1,1 \dots 1,2$ м/с. Початкова вологість зерен $W = 21\%$.

Результати досліджень зміни вологості при роздільному сушінні ядер та їх оболонки представлено у табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Роздільне сушіння зерен сої

	Вага до сушіння, г	Вага після 5 хв сушіння, г	5 хв суш., г	10 хв суш., г	10 хв суш., г	10 хв суш., г	10 хв суш., г
I - 25 зерен	3,503	3,3055	3,2715	3,2285	3,1965	3,178	3,162
Їх обол.	0,298	0,2709	0,2669	0,2629	0,2619	0,2609	0,2601
II - 25 зерен	3,9335	3,7505	3,718	3,6745	3,6405	3,615	3,6
Їх обол.	0,317	0,2909	0,2859	0,2819	0,2803	0,2789	0,2779
II - 25 цілих зерен (W=21%)	3,6285	3,413	3,3835	3,3445	3,3155	3,2965	3,29

За одержаними експериментальними даними побудовано графічну залежність зміни вологості ядер зерен сої та їх оболонки (рис. 4.11).

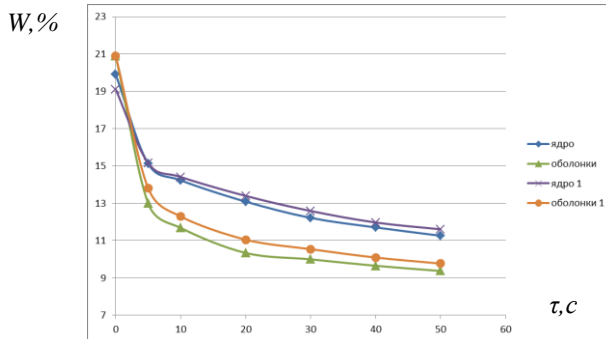


Рисунок 4.11 – Графічна залежність зміни вологості оболонок та ядер зерен сої з часом

Аналіз отриманих графічних залежностей вказує на те, що оболонка зернини сої висихає швидше порівняно із ядром. Час, за який було досягнуто значення відносної вологості оболонки $W = 12\%$ склав $\tau = 11$ хв, а для ядра – $\tau = 14$ хв.

4.4 Визначення величини зусилля, необхідного для розсічення поверхні зернини

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження по визначенню величини зусилля, необхідного для розсічення поверхні зернини, дають можливість 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. 4.10.

Таблиця.4.10 – Середні значення зусилля розсічення поверхні зернини

Вологість зерен W , %	Середні значення зусилля розсічення, H
9,6	19,01
12,7	6,85
16,4	4,86
20,9	3,41

Для аналізу впливу вологості зерен сої на величину зусилля розсічення поверхні зернини F побудовано графічну залежність (рис. 4.12).

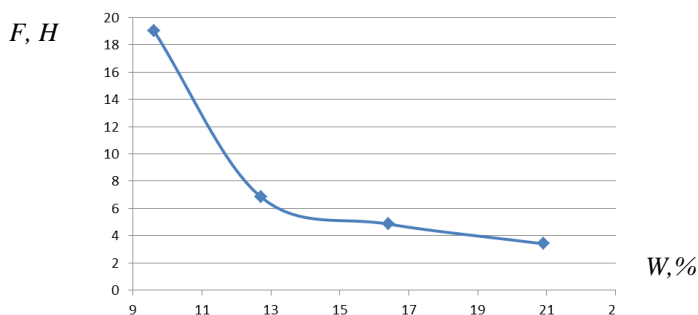


Рисунок 4.12 – Графічна залежність впливу вологості зерен сої W на величину зусилля розсічення поверхні зернини F

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.

4.5 Визначення коефіцієнта відновлення

Експериментальні значення коефіцієнта відновлення визначалися за методикою, описаною в п. 3.7. Для проведених

досліджень використовувалося зерно такої вологості W : 9,6 %, 12,7%, 16,4 % та 20,9 %.

Середні значення, отриманого у результаті досліджень, коефіцієнта відновлення наведені у табл. 4.11.

Таблиця.4.11 – Середні значення коефіцієнта відновлення зерен сої

Вологість зерен сої, %	Середнє значення коефіцієнта відновлення, k
9,6	0,55
12,7	0,5
16,4	0,42
20,9	0,39

Для аналізу впливу вологості зерен сої на значення коефіцієнта відновлення k побудовано графічну залежність (рис. 4.13).

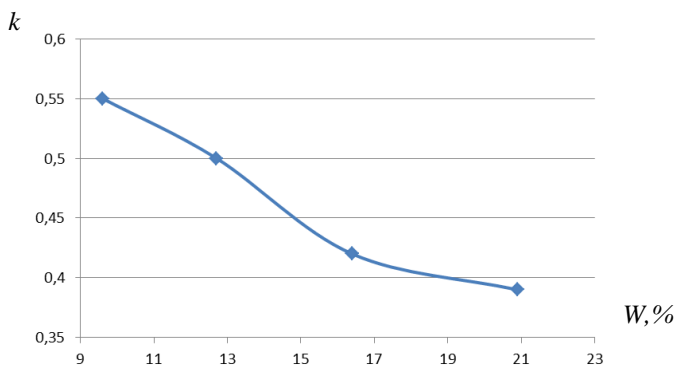


Рисунок 4.13 – Графічна залежність впливу вологості зерен сої W на значення коефіцієнта відновлення k

З одержаної графічної залежності видно, що збільшення вологості зернини сої призводить до зменшення коефіцієнта відновлення з $k = 0,55$ до $k = 0,39$. Таке явище очевидно пояснюється зростанням пружних деформацій під час удару у зернині із зниженою вологістю.

4.6 Визначення зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння

Експериментально одержані значення швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$ в робочій камері пристрою попередньої підготовки до сушіння, відповідно до схеми рис. 3.14., наведені в табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Числові значення швидкості повітряного потоку в умовних точках робочої камери

Висота від поверхні диска (h), мм	Колова швидкість диска								
	$V=55$ м/с			$V=40$ м/с			$V=25$ м/с		
	Відстань від осі диска (r), мм								
	0	150	300	0	150	300	0	150	300
50	6,2 (1)	5,3 (5)	3,8 (6)	4,9	3,8	2,6	2	1,8	1,5
350	8,2 (2)	6,9 (7)	2,8 (8)	6,9	5,6	2	3	2,4	1,2
450	4,9 (3)	3,7 (9)	2,2 (10)	3,7	3,1	1,9	2	1,8	1,1
550	4,3 (4)	3,6 (11)	1,7 (12)	3,2	2,6	1,4	1,7	1,5	1

Для аналізу розподілу величини швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$ за об'ємом робочої камери пристрою підготовки було побудовано графічну залежність (рис. 4.14).

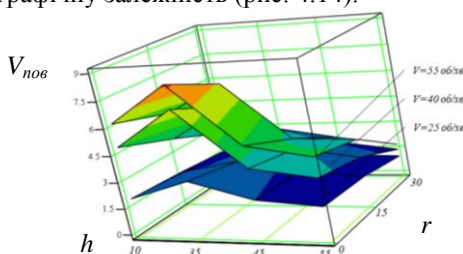


Рисунок 4.14 – Графічна залежність зміни швидкості повітряного потоку $V_{нов.}$ за об'ємом робочої камери пристрою підготовки зерен сої до сушіння

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

1. 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.

2. Зі збільшенням відстані від поверхні диска в межах $h = 100 \dots 350$ мм швидкість повітряного потоку $V_{нов.}$ зростає, а при значеннях $h = 450 \dots 500$ мм – $V_{нов.}$ інтенсивність зниження спадає.

3. Максимальна швидкість повітряного потоку спостерігається у зоні обмеженій віддалю від осі камери $r = 0 \dots 50$ мм та від поверхні диска $h = 300 \dots 400$ мм

4.7 Визначення впливу режимних параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння та властивостей оброблювального матеріалу на коефіцієнт розсічення

Для отримання математичної моделі розсічення зерен сої було проведено чотирифакторний експеримент згідно методики, що описана у п. 3.12.

Мета експерименту полягала у визначенні зміни ступеня розсічення зернини сої в процесі проходження матеріалу через пристрій підготовки до сушіння при варіюванні таких факторів: початкова вологість, кількість лопаток на диску, колова швидкість диска та подача зерен в завантажувальний бункер.

Обробка даних результатів чотирифакторного експерименту, реалізованого за трирівневим планом другого порядку, проведена у середовищі Mathcad (додаток В), дозволила отримати наступне рівняння регресії зміни величини коефіцієнта розсічення зернини k_p :

$$y = 1,005 + 1,251 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 9,086 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 + 2,228 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 + 2,224 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 - 3,65 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_2 + 6,292 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_3 - 5,833 \cdot 10^{-6} \cdot x_1 \cdot x_4 - 5,267 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 + 1 \cdot 10^{-4} \cdot x_3 \cdot x_4 + 5,917 \cdot 10^{-5} \cdot x_2 \cdot x_4 - 1,026 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 - 1,757 \cdot 10^{-4} \cdot x_2^2 - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot x_3^2 - 5,178 \cdot 10^{-4} \cdot x_4^2, \quad (4.1)$$

де x_1 – кодоване значення початкової вологості зерен сої; x_2 – кодоване значення подачі матеріалу; x_3 – кодоване значення колової швидкості диска; x_4 – кодоване значення кількості лопаток.

Оцінку однорідності ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена (3.27). Оскільки, $G^{пор} = 0,097 < G^{табл.}(0,05; 27; 2) = 0,198$ [103-105] то процес відтворюється.

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії проводилася за допомогою критерія Стьюдента згідно п. 3.12 (3.24,3.25).

Критерій Стьюдента при 5%-му рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності $f_1 = 2$ склав $t_{0,05;2} = 4,3$ [103]. В результаті врахування значущості коефіцієнтів, рівняння (4.1) набуло вигляду:

$$\begin{aligned} y = & 1,005 + 1,251 \cdot 10^{-3} \cdot x_1 - 9,086 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 + 2,228 \cdot 10^{-3} \cdot x_3 + \\ & + 6,292 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 \cdot x_3 - 5,267 \cdot 10^{-4} \cdot x_2 \cdot x_3 - 1,026 \cdot 10^{-3} \cdot x_1^2 - \\ & - 1,19 \cdot 10^{-4} \cdot x_3^2 - 5,178 \cdot 10^{-4} \cdot x_4^2. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Перевірку адекватності отриманого рівняння регресії (4.2) проводили за допомогою F -критерія Фішера згідно п. 3.12 (3.28-3.32) [103]. Розрахункове значення критерію Фішера становило $F^{розр.} = 9,189$ при дисперсії неадекватності $S_{неад.}^2 = 4,211 \cdot 10^{-7}$ і дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 4,869 \cdot 10^{-4}$. Табличне значення критерію Фішера при прийнятому 5%-му рівні значущості та ступенях вільності $f_1 = 2$, $f_2 = 17$ згідно [103] склало $F^{табл.} = 19,43$. Оскільки $F^{розр.} = 9,189 < F^{табл.} = 19,5$, то отримана модель адекватна.

Остаточне рівняння з факторами у натуральному вигляді набуде вигляду:

$$\begin{aligned} k_p = & 0,0000033 \cdot Q + 0,000074 \cdot V + 0,0023 \cdot W + 0,00104 \cdot n - 5,29 \cdot V^2 - \\ & - 0,000064 \cdot W^2 - 0,00013 \cdot n^2 - 2,341 \cdot Q \cdot V + 0,0000105 \cdot V \cdot W + 0,974 \end{aligned} \quad (4.3)$$

За рівнянням регресії (4.3) було побудовано поверхні відгуку (рис. 4.15-4.20).

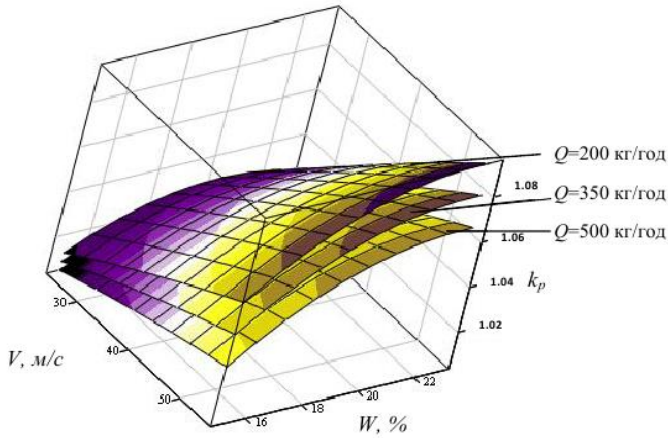


Рисунок 4.15. – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зерен сої k_p в залежності від початкової вологості W , колової швидкості диска V при подачі матеріалу $Q = 200; 350$ і 500 кг/год і кількості лопаток $n = 4$

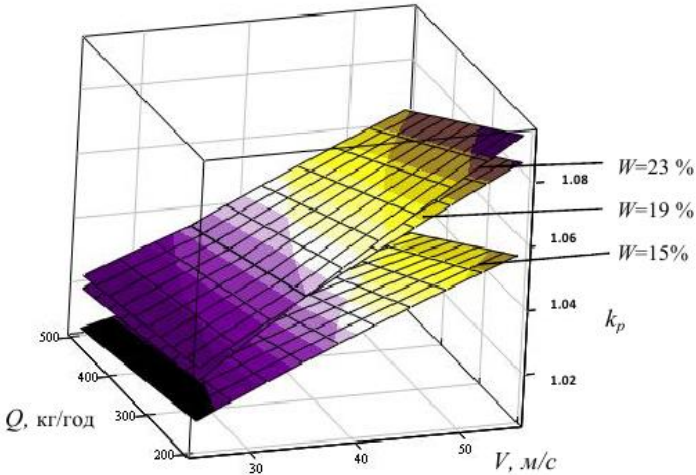


Рисунок 4.16 – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зерен сої k_p в залежності від колової швидкості диска V , подачі зерен Q при початковій вологості $W = 15; 19$ і 23% і кількості лопаток $n = 4$

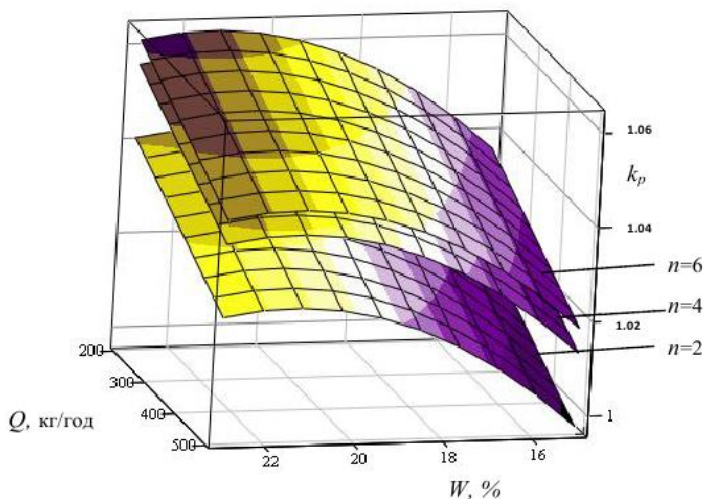


Рисунок 4.17 – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зернини k_p в залежності від вологості зерен W і подачі Q при кількості лопаток $n = 2; 4$ і 6 і колової швидкості диска $V = 40$ м/с

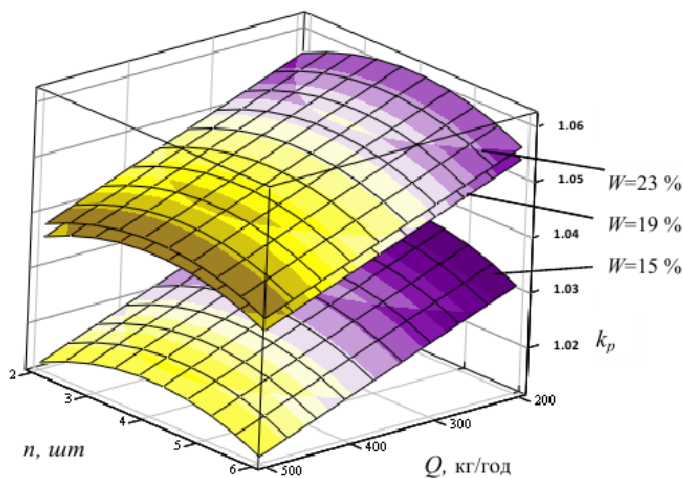


Рисунок 4.18 – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зернини k_p в залежності від подачі зерен Q , кількості лопаток n при вологості $W = 15; 19$ і 23% і колової швидкості диска $V = 40$ м/с

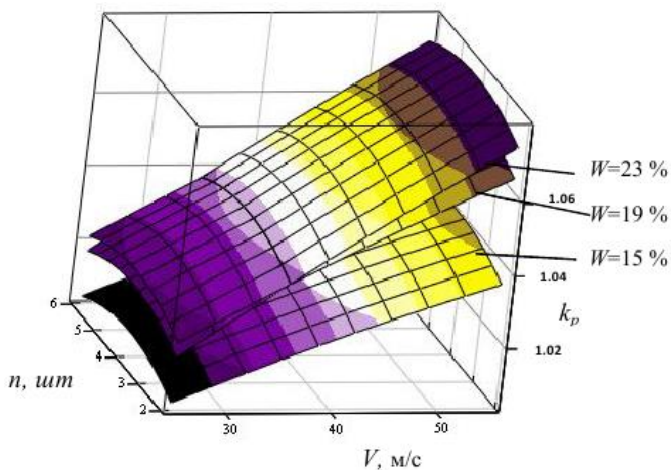


Рисунок 4.19 – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зернини k_p в залежності від коллової швидкості диска V , кількості лопаток n при вологості зерен $W = 15; 19$ і 23% і подачі зерен $Q = 350$ кг/год

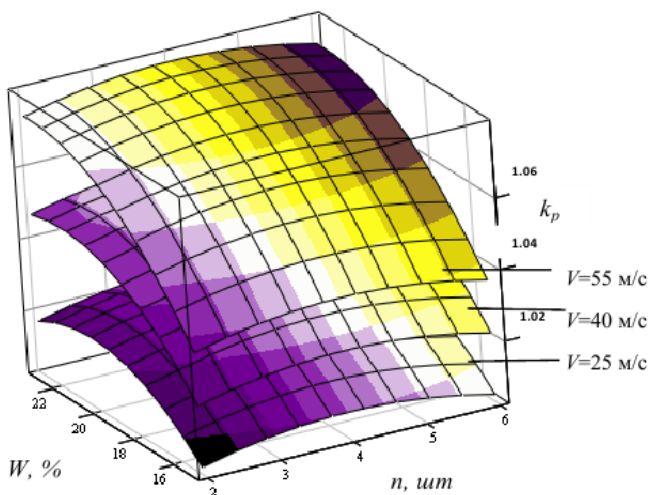


Рисунок 4.20 – Поверхня відгуку величини коефіцієнта розсічення зернини k_p в залежності від кількості лопаток n , вологості зерен W при коллової швидкості диска $V = 25; 40$ і 55 об/хв і кількості подачі зерен $Q = 350$ кг/год

Проведений чотирьохфакторний експеримент дозволив одержати рівняння регресії, що характеризує вплив таких факторів: початкової вологості W і подачі зерен сої Q , а також кількості лопаток n на диску та його колової швидкості V .

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що всі фактори є значущими відносно величини коефіцієнта розсічення зерен сої k_p .

Збільшення початкової вологості зерен сої W призводить до зростання величини коефіцієнта розсічення k_p , проте при вологості $W > 19\%$, її вплив на досліджуваний показник був мінімальним і значення k_p при умові $W > 19\%$ практично було однаковим. Також під час проведення експериментів при вологості $W = 23\%$ спостерігалось розсічення за величиною більшою за радіус зернини, а у окремих випадках і розкол на дві сім'ядолі, що є недопустимо. Тому доцільно за вологості W зерен сої нижчих за 23% використовувати мінімальну швидкість обертання диска.

Аналогічний вплив на коефіцієнт розсічення зернини k_p має колова швидкість диска V . Зі збільшенням колової швидкості диску досліджуваний коефіцієнт розсічення k_p постійно зростає. Також було виявлено, що при $V = 55$ м/с і вологості зерен $W = 15\%$ спостерігається розколювання зерен на дві і більше частин. А при $W = 23\%$ зернина зминається без розсічення. Звідси слідує, що у досліджуваному пристрої не доцільно використовувати колову швидкість диска $V = 55$ м/с.

Зростання коефіцієнта розсічення зернини k_p при збільшенні кількості лопаток на диску n прослідковується, однак при $n = 6$ цей ріст є малопомітним. Тому за оптимальне значення приймаємо $n = 4$.

Залежність коефіцієнта розсічення зернини k_p від подачі зерен Q є обернено-пропорційною, що яскраво виражено на побудованій поверхні відгуку. Збільшення подачі Q призводить до зменшення значення k_p , а також до зростання кількості нерозсічених зерен, для яких $k_p = 1$, що є небажаним явищем. Тому при використанні одноступінчастого пристрою для підготовки зерен сої, значення подачі Q не повинно перевищувати 500 кг/год.

4.8 Визначення впливу режимних параметрів сушіння та коефіцієнта розсічення k_p на інтенсивність сушіння

Для отримання математичної моделі процесу сушіння підготовлених зерен сої було проведено трифакторний експеримент згідно методики, що описана у п. 3.12-3.13.

Мета експерименту полягала у визначенні часу, необхідного для досягнення кондиційної вологості $W = 12\%$, в процесі сушіння зерен сої у сушильній установці при варіюванні таких факторів: початкова вологість матеріалу, швидкість та температура сушильного агенту.

Після проведення чотирифакторного експерименту були відібрані зразки з фіксованим значенням W , максимальні значення коефіцієнта k_p для яких склали: $W = 23\% - k_p = 1,055$; $W = 19\% - k_p = 1,053$; $W = 15\% - k_p = 1,03$.

Обробка даних трифакторного експерименту, реалізованого за симетричним некомпозитивним планом Бокса-Бенкіна другого порядку, проведена у середовищі Mathcad (додаток Г), дозволила отримати наступне рівняння регресії, де функцією відгуку є час сушіння зерен сої до кондиційної вологості [103-105]:

$$y = 12,222 + 3,292 \cdot x_1 - 4,25 \cdot x_2 - 0,375 \cdot x_3 + 0,917 \cdot x_1 \cdot x_2 + \quad (4.4)$$

$$+ 0,167 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,583 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,278 \cdot x_1^2 + 1,306 \cdot x_2^2 + 1,899 \cdot x_3^2$$

де x_1 – кодоване значення початкової вологості зерен сої; x_2 – кодоване значення температури сушильного агенту; x_3 – кодоване значення швидкості сушильного агенту.

Оцінку однорідності ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена (3.27). Оскільки, $G^{\text{розр.}} = 0,176 < G^{\text{табл.}}(0,05; 15; 2) = 0,335$ то процес відтворюється.

При визначенні довірчих інтервалів коефіцієнтів регресії використовували критерій Ст'юдента, табличне значення якого при 5-% рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності досліду $f_1 = 2$ склав $t_{0,05; 2} = 4,3$ [103].

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії проводили за встановленими їх довірчими інтервалами та коваріаціями. У результаті рівняння регресії (4.4), набуло вигляду:

$$y = 12,222 + 3,292 \cdot x_1 - 4,25 \cdot x_2 - 0,278 \cdot x_1^2 + 1,306 \cdot x_2^2 + 1,889 \cdot x_3^2 \quad (4.5)$$

При перевірці адекватності отриманого рівняння регресії за допомогою F -критерія Фішера встановили розрахункове його значення $F^{розр.} = 7,645$ при дисперсії неадекватності $S_{неад.}^2 = 1,982$ і дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 0,259$. Табличне значення критерію Фішера при прийнятому 5%-му рівні значущості та ступенях вільності $f_1 = 2$, $f_2 = 17$ згідно склало $F^{табл.} = 19,38$. Оскільки $F^{розр.} = 7,645 < F^{табл.} = 19,38$, то отримана модель адекватна [103].

Остаточно рівняння з факторами у натуральному вигляді набуло вигляду:

$$\tau = 1,48 \cdot W - 0,017 \cdot W^2 + 0,052 \cdot t_{ca}^2 - 5,029 \cdot t_{ca} + 20,99 \cdot V_{ca}^2 - 79,76 \cdot V_{ca} + 183,67. \quad (4.6)$$

За отриманим рівнянням регресії (4.6) були побудовані поверхні відгуку (рис. 4.21-4.23) для відслідковування динаміки зміни часу сушіння зерен сої до кондиційної вологості.

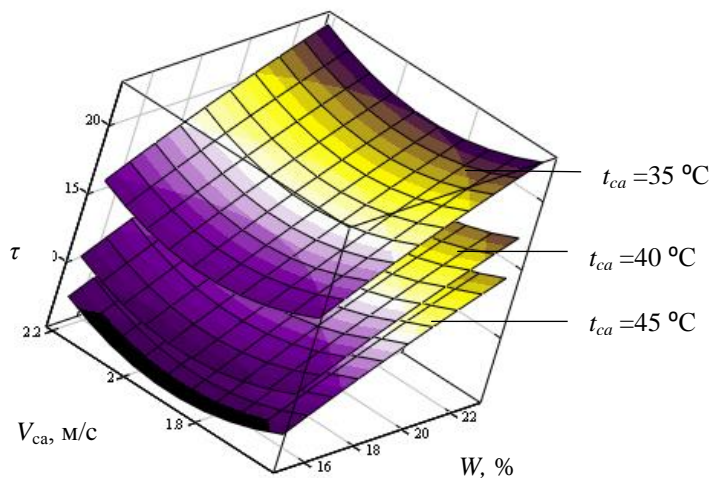


Рисунок 4.21 – Поверхня відгуку часу сушіння τ в залежності від швидкості сушильного агента V_{ca} та початкової вологості зерен сої W при температурі сушильного агента $t_{ca} = 35; 40$ і 45°C

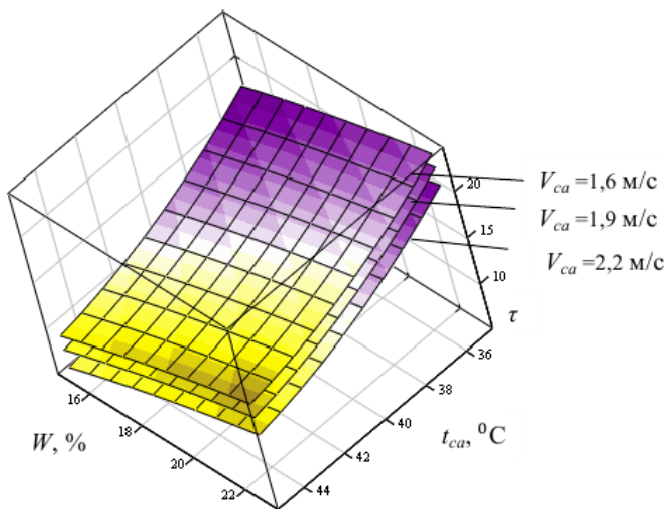


Рисунок 4.22 – Поверхня відгуку часу сушіння τ в залежності від початкової вологості зерен сої W та температури сушильного агенту t_{ca} при швидкості сушильного агенту $V_{ca} = 1,6; 1,9$ і $2,2$ м/с

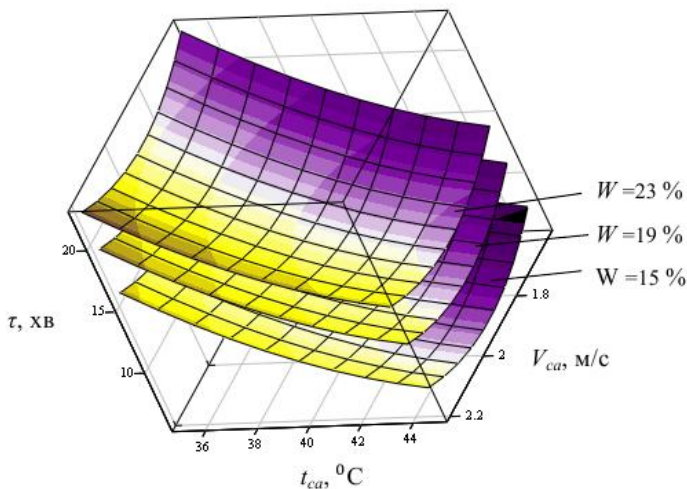


Рисунок 4.23 – Поверхня відгуку часу сушіння τ в залежності від температури сушильного агенту t_{ca} та швидкості сушильного агенту V_{ca} при початковій вологості зерен сої $W = 15; 19$ і 23 %

Проведений трифакторний експеримент дозволив одержати рівняння регресії, що характеризує вплив на час сушіння таких факторів: початкової вологості зерен сої W , температури t_{ca} та швидкості подачі сушильного агенту V_{ca} .

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що всі фактори є значущими відносно часу сушіння зерен сої, а час сушіння при різних V_{ca} , t_{ca} і W знаходиться в межах $\tau = 5,7 \dots 22,7$ хв.

При постійних значеннях $t_{ca} = 45^{\circ}\text{C}$ та $V_{ca} = 1,9$ м/с час сушіння τ склав: для $W = 23\%$ – $\tau = 12,3$ хв; для $W = 19\%$ – $\tau = 9,3$ хв; для $W = 15\%$ – $\tau = 5,7$ хв. Різниця в часі сушіння для досліджуваного діапазону зміни вологості складає 3...4 хв, що є набагато меншою від різниці в часі сушіння (8...12 хв) для такого ж діапазону вологості зерен сої, що не підлягали розсіченню поверхні ($k_p = 1$). Це пояснюється тим, що коефіцієнт розсічення k_p є різним для досліджуваних значень вологостей W (з підвищенням вологості його числове значення зростає), за рахунок чого зменшується різниця в часі сушіння τ для різних W , що ще раз підтверджує значний вплив коефіцієнта k_p на швидкість видалення вологи з зернини.

Аналізуючи утворені поверхні відгуку, можна помітити незначний вплив швидкості подачі сушильного агенту 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 агенту, яка знаходиться в межах $V_{ca} = 9 \dots 2,0$ м/с.

Більш яскраво виражений вплив температури сушильного агенту t_{ca} на час сушіння зерен сої τ за фіксованих значеннях досліджуваних факторів ($W = 19\%$, $V_{ca} = 1,9$ м/с) та різних значеннях t_{ca} склав: $t_{ca} = 35^{\circ}\text{C}$ – $\tau = 17,8$ хв; $t_{ca} = 40^{\circ}\text{C}$ – $\tau = 12,2$ хв; $t_{ca} = 45^{\circ}\text{C}$ – $\tau = 9,3$ хв. З одержаних результатів слідує, що збільшення t_{ca} на 5°C дозволяє зменшити час сушіння на 3...5 хв.

4.9 Висновки до розділу

- 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.

- Середні значення вагових характеристик зерен сої склали: щільність $\rho = 1,17 \dots 1,201 \text{ г/см}^3$; пористість $\varepsilon = 0,803 \dots 0,845 \text{ г/см}^3$; об'ємна маса $\gamma_0 = 0,654 \dots 0,749 \text{ г/см}^3$. Максимальні значення кута природнього відкосу відповідають вологості зерен сої $W = 20,9\% - \alpha_{\text{нас}} = 32,4^\circ$, $\alpha_{\text{обв}} = 42,6^\circ$. Залежно від вологості матеріалу значення товщини зерен знаходиться в межах $a_s = 4,91 \dots 5,6 \text{ мм}$, ширини $b_s = 5,82 \dots 6,26 \text{ мм}$, довжини $c_s = 6,27 \dots 7,52 \text{ мм}$ та маси $m_s = 0,12 \dots 0,15 \text{ г}$.

- Найбільше зусилля, яке необхідне для розсічення поверхні зерен, становить $19,01 \text{ Н}$ і відповідає вологості матеріалу $W = 9,6\%$, найменше – $3,41 \text{ Н}$ 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 $W = 9,6\%$.

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

- Проведенням багатофакторних експериментів 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 $W = 17 \dots 19\%$, коловій швидкості диска $V = 35 \dots 45 \text{ м/с}$, подачі $Q = 200 \dots 300 \text{ кг/год}$ 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 $t_{ca} = 42 \dots 45^\circ\text{C}$; $V_{ca} = 1,9 \dots 2,0 \text{ м/с}$; початкова вологість зерен сої $W = 17 \dots 19\%$.

РОЗДІЛ 5. ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ І ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУШІННЯ ПІДГОТОВЛЕНИХ ЗЕРЕН СОЇ

5.1 Технологічний процес підготовки зерен сої до сушіння у розробленому пристрої

Для динамічного розвитку виробництва сої в Україні розроблена Галузева програма „Сою України 2008-2015”, в основі якої лежить збільшення посівних площ під сою за період 2008-2015 років [106]. За попередніми оцінками ІА «АПК-Інформ» у 2015 році посівні площі під олійні культури складуть близько 8,2 мільйона гектар, з яких на сою - 24%. Закупівельні ціни на сою зросли в середньому на 400 грн/т – до 9700...10000 грн/т. На експортному ринку сої попередні ціни попиту на урожай 2015, як правило, на рівні 350 USD/т.

Тому беззаперечно можна стверджувати, що соя – культура майбутнього, яка завжди буде користуватись попитом, і дослідження в цьому напрямку є важливим та необхідним в наш час.

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.

Результати цих досліджень могли б бути цікавими та використовуватись підприємствами та господарствами для зниження енерговитрат на процес сушіння загалом.

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), схематичне зображення якого представлено на рис. 5.2.

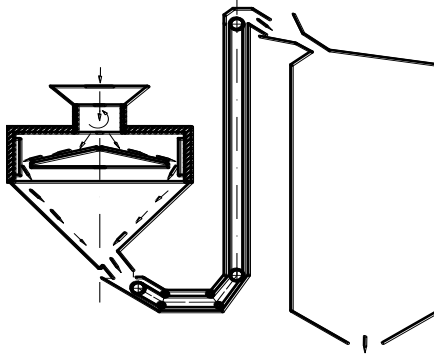


Рисунок 5.1 – Функціональна схема сушарки підготовлених зерен сої

Для реалізації запропонованої технології запропоновано пристрій підготовки зерен сої до сушіння. Модель пристрою показана на рис.5.2.

Принцип роботи такого пристрою полягає у тому, що боби сої вдаряються в ножові пластини деки, що призводить до розсічення поверхні. А саме: матеріал через завантажувальний бункер потрапляє на відцентровий диск, де, переміщуючись робочими радіальними каналами, набирає необхідну кінетичну енергію.



Рисунок 5.2 – 3-D модель пристрою підготовки сої до сушіння

При викиданні зерен сої з відцентрового диска пристрою та їх контакт з металевою 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.

5.2 Результати господарсько-виробничої перевірки сушарки зерен сої

Для перевірки якості роботи запропонованої сушарки із пристроєм підготовки зерен сої до сушіння проведено її випробування.

Дослідження проводилися на зернах сої сорту «Алмаз», одержаного при збиранні з початковою вологістю 25%...30%, щільність матеріалу – 350 кг/м³. Сушіння проводилось при температурі сушильного агента – 45°C, атмосферного повітря – 18...20°C. Швидкість сушильного агента на виході через зовнішню стінку сушильної камери становила 0,6 м/с. Тривалість сушіння – 35 хв.



Рисунок 5.3 – 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 насінневих зерен сої підтверджують ефективність і доцільність використання пристрою підготовки зерен сої до сушіння.

5.3 Розрахунок економічної ефективності пристрою підготовки зерен сої до сушіння

Економічна ефективність використання розробленого пристрою підготовки зерен сої визначалось шляхом порівняння експлуатаційних і економічних показників двох технологій переробки зерен сої – запропонованої (з попередньою підготовкою) та базової (без підготовки), що характерна для малих переробних цехів сільськогосподарських підприємств. Запропонована технологія передбачає використання пристрою підготовки зерен сої у комплексі із сушаркою Sukup TE1652E. Згідно запропонованої технології здійснюється розсічення поверхні перед подачею в сушарку, а за умови базової – сушіння проходить без підготовки.

Розрахунок економічної ефективності проводився згідно із методикою [107] за допомогою програми, розробленої у середовищі Mathcad (додаток Д).

Згідно з прийнятою методикою, економічна ефективність застосування пристрою підготовки повинна бути відображена такими основними показниками:

- повна собівартість виконуваних базовою та новою сушарками робіт;
- експлуатаційні витрати на утримання базової і нової сушарок;
- питомі капіталовкладення в сфері експлуатації базової та нової сушарок;
- питома матеріаломісткість базової і нової конструкції сушарок;
- річна економія коштів на експлуатаційних витратах при використанні нової сушарки.

Виходячи з експлуатаційних показників роботи базового і нового варіанту сушарки, нормативно-довідкових даних, цін на сільськогосподарську техніку, паливно-мастильні матеріали та інше, сформовано таблицю вихідних даних (табл. 5.1) [107-109].

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	Один. виміру	Машина	
		Базова	Нова
1	2	3	4
Продуктивність машини	кг/год.	1200	1900
Тривалість роботи машини протягом року	днів	30	30
Чисельність обслуговуючого персоналу	людей	4	4
Маса машини в зборі	кг	14800	17100
Чиста маса машини без покупних частин	кг	10886	11886
Відпускна ціна машини	грн.	2990000	-
Собівартість сушарки	грн.	2020000	-
Вартість матеріалів у собівартості машини	грн.	1530000	-
Загальна потужність, необхідна на привод машини	кВт	31	33,5
Вартість електроенергії	грн./ (кВт- год.)	1,5	1,5
Коефіцієнт відрахувань на додаткову заробітну плату	%	20	20
Коефіцієнт відрахувань на соціальні потреби	%	37,84	37,84
Вартість покупних виробів нової машини	грн.	-	3200
Коефіцієнт конструктивної складності	-	-	1,2
Коефіцієнт зміни, залежно від обсягу випуску	-	-	1,1
Коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат	-	-	1,1
Норматив витрат праці на підготовку машини до зберігання	люд.- год.	5	5
Годинна тарифна ставка слюсаря	грн.- год.	40	40
Годинна тарифна ставка працівника	грн.- год.	40	40

Продовження табл. 5.1

1	2	3	4
Витрати на матеріали, що використовуються при експлуатації сушарки	грн.	1250	1360
Норматив галузевої рентабельності	%	25	25
Податок на додану вартість	%	20	20
Торгівельна націнка посередницької організації	%	20	20
Нормативний коефіцієнт відрахувань на реновацію	%	14,2	14,2
Норматив відрахувань на капітальний, поточний ремонт та техогляд сушарки	%	14	14

Таблиця 5.2 – Показники економічної ефективності

Показник	Одиниця виміру	Машина		Різниця (±)
		Базова	Нова	
1	2	3	4	5
Продуктивність машини	кг/год.	1200	1900	+700
Річний обсяг робіт	т/рік	864000	1368000	+504000
Чисельність обслуговуючого персоналу	чол.	2	2	-
Затрати праці на процес сушіння	люд.-год./кг	$3,333 \times 10^{-3}$	$2,105 \times 10^{-3}$	$-1,228 \times 10^{-3}$
Річна економія затрат праці при застосуванні нової сушарки	люд.-год.	-	618,947	-
Собівартість процесу	грн./кг	1,244	1,005	-0,239
Експлуатаційні витрати на машину	грн./кг	0,752	0,611	-0,141

Продовження табл. 5.2

1	2	3	4	5
Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах при застосуванні нової сушарки	грн.	-	71380	-
Питомі капіталовкладення в сфері експлуатації сушарки	грн./кг	3,461	3,126	0,335
Питома металомісткість технологічного процесу сушіння	кг/кг	0,017	0,013	0,014
Термін окупності	роки	-	1,8	-

Отримані результати розрахунку (табл.5.2) вказують на доцільність використання нової сушарки, яка дає річну економію грошових засобів.

5.4 Висновки до розділу

- Розроблений пристрій підготовки зерен сої як складова частина завантажувального бункеру 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 свою чергу, до економії енерговитрат.
- Розрахунок економічної ефективності використання пристрою підготовки свідчить про доцільність його використання для сушіння зерен сої для доведення її до кондиційної вологості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У роботі представлено теоретичне узагальнення і запропоновано вирішення науково-прикладної задачі вдосконалення технологічного процесу сушіння зерен сої за рахунок інтенсифікації вологовидалення, що досягається розсіченням їх поверхні. Застосування запропонованої технології сушіння, а також методів розрахунку конструктивних і режимних параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння дозволить зменшити енергозатрати на процес загалом.

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 деки пристрою підготовки до сушіння з урахуванням

коефіцієнта відновлення та зусилля руйнування і визначено швидкість удару зернини сої об ножову пластину $v_{yo} = 20 \dots 65$ 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 відкоосу 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. Проведенням багатофакторних експериментів 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 початковою вологістю зерен сої $W = 17 \dots 19$ %, колівій

швидкості диска $V = 35 \dots 45$ м/с, подачі $Q = 200 \dots 300$ 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 $t_{ca} = 42 \dots 45^\circ\text{C}$; $V_{ca} = 1,9 \dots 2,0$ м/с; початкова вологість зерен сої $W = 17 \dots 19$ %.

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. – Глевах, 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. Панасюк С.Г. Обґрунтування параметрів технологічного процесу сушіння качанів кукурудзи : Дис... канд. наук: 05.05.11/ Світлана Григорівна Панасюк. Вінниця. - 2008. – 178с.
6. Забродоцька Л.Ю. Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав: Монографія / Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. – 164 с.
7. Кірчук Р.В. Дослідження процесу та пошук шляхів інтенсифікації сушіння насіння сої / Цизь К.Є., Кірчук Р.В // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник «Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин». – Вип. 42. Ч. II – Кіровоград: КНТУ, 2012. – С. 75 – 78. Цизь К.Є. Інтенсифікація сушіння сої / Кірчук Р. В., Цизь І.Є., Цизь К.Є. // «Farmer». – Київ, 2014.–№7(55). – С.76.
8. Цизь К.Є. Аналіз засобів і методів післязбирального обробітку сої Цизь К.Є. // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. - Вип. 23. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2012. – С.155-160.
9. Цизь І. Є Інтенсифікація сушіння насіння сої – передумова ошадного отримання олії/ І. Є. Цизь, Р.В. Кірчук, К.Є. Цизь, Є.К. Сербій // Науково-виробничий журнал «Техніка і технології АПК». – Київ, 2015. – №3(66). – С.27 – 29.
10. Цизь К.Є Шляхи інтенсифікації сушіння насіння сої для отримання олії / Цизь К.Є. // Матеріали ІХ-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки, вип. 1.- Кіровоград: КНТУ, 2013. – С.112-114.
11. Кірчук Р.В. Інтенсифікація сушіння сої / Р.В. Кірчук, І.Є. Цизь, К.Є. Цизь // The Ukrainian Farmer. – Київ, 2014. – №7(55). – С.76.
12. Пат. 84111 Україна, МПК В07В 9/00. Машина для деформації насінневих оболонкок. / Р.В. Кірчук, К.Є. Цизь; заявник та

- патентовласник Луцьк. нац. тех. ун-т. – № u201304600; заявл. 12.04.2013; опубл. 10.10.2013; Бюл. №19, 2013 р. – 5 с.
13. Пат. 87184 Україна, МПК В07В 9/00. Машина для деформації насіннєвих оболонкок / Р.В.Кірчук, К.Є. Цизь; заявник та патентовласник Луцьк. нац. тех. ун-т. – № u201310015; заявл. 12.08.2013; опубл. 27.01.2014; Бюл. №2, 2014 р. – 5 с. (здобувач обгрунтував доцільність удосконалення схеми пристрою підготовки зерен сої до сушіння встановленням секцій).
14. Цизь К.Є. Дослідження фізико-механічних властивостей насіння сої / К.Є. Цизь, Р.В. Кірчук, А.В. Рижко // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. - Вип. 27. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2014. – С.130 – 138.
15. Кірчук Р.В. Обгрунтування швидкості руху насіння сої в обрешувальному пристрої для підготовки процесу сушіння / Р.В. Кірчук, К.Є. Цизь // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. – Вип. 24 – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. – С. 152 – 159.
16. Цизь К.Є. Визначення впливу деформації оболонки насіння сої на інтенсивність сушіння / Цизь К.Є., Кірчук Р. В., Забродоцька Л.Ю. // Сільськогосподарські машини: Зб. наук. ст. - Вип. 25. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2013. – С.160-165.
17. Кірчук Р.В. Моделювання переміщення насіння сої у пристрої підготовки до сушіння / Р.В. Кірчук, К.Є. Цизь // Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. – Кіровоград, 2015. – С. 16 – 18.
18. Kirchuk R. Experimental research of soybean drying process intensification/ Експериментальне дослідження інтенсифікації процесу сушіння сої / R. Kirchuk, I. Tsiz, K. Tsiz / ISB-INMA TEN Agricultural and mechanical engineering, Bucharest. – 2015. October, 29 – 21. – P. 521 – 529.
19. Kirchuk R. Experimental research o fsoybean drying process intensification/ Експериментальне дослідження інтенсифікації процесу сушіння сої / R. Kirchuk, I. Tsiz, K. Tsiz / International symposium ISB-INMA TEN Agricultural and mechanical engineering, Bucharest.- 2015. P. 521 – 529.
20. Didukh V. Modeling of energysaving methods of soybean drying for oil production // V.Didukh, R. Kirchuk, K. Tsiz. / Commission of motorization and energetics in agriculture. – Lublinie, 2015. –Volume 15, number 4. – P. 9 – 14.
21. Kirchuk R. Research Of Soybean Drying Process Intensification // R. Kirchuk, K. Tsiz / Perspective trends in scientific research – 2015: Materials of International scientific and practical conference. – Bratislava, 2015. – Volume 2, October, 17 – 22. – P. 164 – 165.

22. Цизь К.С. Дослідження властивостей насіння сої як об'єкта сушіння / К.С. Цизь // Матеріали ХХІІ-ї Міжнародної науково - технічної конференції «Технічний прогрес у сільськогосподарському виробництві» та ІХ Всеукраїнської конференції 21 – 23 травня 2014 року. – Глеваха, 2014. – С. 121 – 123.
23. Копець К.Є. (Цизь К. Є.) Удосконалення процесу сушіння насіння сої / К.Є. Копець // Тези V-ї всеукраїнської науково-практичної конференції «Інноваційні технології в АПК». – Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015. – С. 54–58.
24. Кірчук Р.В. Дослідження процесу сушіння насіння сої для отримання олії / Цизь К.Є., Кірчук Р.В // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11 – 22 грудня. 2013.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль: ТНТУ, 2013. – С. 253 – 254.
25. Мякушко Ю.П. Соя / Под ред. д-ра с.-х. наук Ю.П. Мякушко, канд. с.х. наук В.Ф. Баранова; Всесоюз. акад. с.-х. наук им. В.И. Ленина. М.: Колос, 1984. – 332 с.
26. Арабаджиев С.Д., Ваташки А., Горанова К. и др. Соя /С.Д.Арабаджиев, А. Ваташки, К. Горанова. М.: Колос, 1981. – 197с.
27. Лещенко А.К. Культура соя. – К.: Наукова думка, 1978. – 236 с.
28. Енкен В. Б. Соя. – М. Гос. изд-во с.-х. лит.-ры. 1959. – 653 с.
29. Балакай Г.Т., Безуглова О. С. Соя: екологія, агротехніка, переробка / Д: Феникс, 2003. – 160 с.
30. Теплякова Т. Е. Соя // В сб.: Теоретические основы селекции. Том. III. Генофонд и селекция зерновых бобовых культур (люпин, вика, соя, фасоль) / Под ред.: Б.С. Курловича и С.И. Репьева – С-Пб., ВИР, 1995. – С. 196 – 217.
31. Зеленцов С. В. Современное состояние систематики культурной сои *Glucine max (L.) Merrill.* //С.В. Зеленцов, А.В. Кочегура Масличные Культуры. Науч.-техн. бюллетень ВНИИМК. – вып. 1 (134). – Краснодар. – 2006.–С. 34-48.
32. Корсаков Н. И. Соя. – Л.: ВНИИ растениеводства, 1975. – 160 с.
33. Петибская В. С. Соя: качество, использование, производство.— М.: Аграрная наука. 2001. – 64 с.
34. Баранов В.Ф., Лебедевский А.І. Селекція, насінництво й технологія обробітку технічних культур. – М., 1980. – 186 с.
35. Заверюхин В.І., Левандовський І.Л., Виробництво сої. – К.:Врожай, 1988. – 112 с.
36. Поздняков В. Г. Економічні і технологічні аспекти виробництва сої.– М.: 1990. – 554с.

37. Тур Н.С., Загоруйко А.А. Агроекологічні основи обробітку сої: Навчальний посібник. Краснодар, МГАУ, 1994. – 444с.
38. Зінченко О.І., Салатенко В.Н., Білоножко М.А. Рослинництво.- К.: Аграрна освіта, 2001. – 591 с.
39. Подпратов Г. І. Зберігання і переробка продукції рослинництва / Г. І. Подпратов, Л. Ф. Скалецька, А. М. Сеньков, В. С. Хилевич. – К.: Мета, 2002. – 495 с.
40. Карпенко А. Н. Сельскохозяйственные машины [Текст]: учеб. для вузов / А.Н.Карпенко, В. М. Халанский. –М.Агропромиздат, 1989. – 527 с.
41. Гержой А.П., Самочетов В.Ф. Зерносушение и зерносушилки. – М.: Колос, 1967. – с.338.
42. Птицын С.Д. Зерносушилки. – М.: Машиностроение, 1966. – 180 с.
43. Цугленок, Н.В. Функциональное описание процесса сушки зерна / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.Н. Конусов//Вестн. КрасГАУ. – 2005. – № 8. – С. 217 – 221.
44. Манасян, С.К. Синтез сушильной камеры шахтной зерносушилки как объекта управления // Вестн. КрасГАУ. - 2004. -№ 4. – С. 151 – 156.
45. Филин В.М. Шелушение зерна крупяных культур. Совершенствование технологического оборудования / В.М. Филин, Д.В. Филин. - М.: ДеЛи принт, 2002. – 135 с.
46. Мельников, Е.М. Технология крупяного производства / Е.М.Мельников. - М.: Агропромиздат, 1991. – 206 с.
47. Гринберг Е. Н. Шелушильно-шлифовальные машины крупяного производства. - М.: Пищевая промышленность, 1969. – 59 с.
48. Жислин Я. М. Технология и оборудование крупяного производства. - М.: Колос, 1966. - 263 с.
49. Голдовский, А. М. Теоретические основы производства растительных масел. – М.: Пищепромиздат, 1958. – 228 с.
50. Масликов В.А. Примеры расчетов оборудования производства растительных масел. М.: Пищепромиздат, 1959. – 228 с.
51. Белобородов В.В. Основные процессы производства растительных масел. М.: Пищевая промышленность. – 1966. – 478 с.
52. Птицин С.Д. Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур / С.Д. Птицин // Труды ВИМ. – 1978. – Вып. 35. – С. 12–14.
53. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.
54. Лыков А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.- 464 с.
55. Лыков А. В. Теория сушки.- М.: Энергия, 1968.- 471 с.

56. Лыков А. В. Теория теплопроводности.- М.: «Высшая школа», 1967.- 599 с.
57. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов.- М.: Пищевая промышленность, 1973.- 528 с.
58. Гринчик Н. Н. Процессы переноса в пористых средах, электролитах и мембранах.- Минск. АНК «ИТМО» им. Лыкова А. В., 1991.- 251 с.
59. Лыков А. В. Теория теплопроводности.- М.: «Высшая школа», 1967.- 599 с.
60. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомьял.- М.: Энергия, 1975.- 488 с.
61. Гинзбург А.С. Массовлагодобменные характеристики пищевых продуктов.- М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982.- 280 с.
62. Теплофизические характеристики пищевых продуктов и материалов (справочное пособие под ред. проф. А.С. Гинзбурга).- М.: Пищевая промышленность, 1975.- 223 с.
63. Лыков А.В. Теория сушки.- М.-Л.: Госэнергоиздат, 1950.- 416 с.
64. Лыков А.В. Теория сушки капиллярно пористых коллоидных материалов пищевой промышленности.- М.: Госэнергоиздат, 1950.- 416 с.
65. Подоляк В.М. Вдосконалення процесу сушіння вороху льону в нерухомому товстому шарі: дисертація ... канд. техн. наук: (05.20.01) / В.М. Подоляк; ЛДТУ. – Луцьк: РВВ ЛДТУ, 1999. – 204 с
66. Ящук А.А. Обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / Ящук Андрій Анатолійович.– Кіровоград, 2014. – 171 с.
67. Жуковский Н.Е. Теоретическая механика. Издание второе / Жуковский Н.Е. – М. – Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1952. – 812с.
68. Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник / Павловський М.А. – К. – «Техніка», 2002. – 512с.
69. Агамиров Л.В. «Сопrotивление материалов» [Електронний ресурс].– Режим доступу: http://mysopromat.ru/uchebnye_kursy/sopromat/.
70. Методика решения задач механики: Метод. пособие/ [Белянкин А.Г., Матвеев А.Н., Сараева И.М., Устинова А.В., Шушурин С.Ф.]; под.ред. Матвеев А.Н. – М.: Изд-во МГУ, 1980. –160с.
71. 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.
72. 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.
73. Масликов В.А. Технологическое оборудование производства растительных масел / Учебное пособие – М. : Пищевая промышленность, 1974.– 439 с.
74. Механіка сільськогосподарських матеріалів та середовищ // Навч. посібник / В.П.Ковбаса, В.М.Швайко, О.П.Гуцол. – Ніжин: Видавець ПП Лисенко М.М., 2015. –536 с.
75. Л.В.Пешук. Біохімія та технологія оліє-жирової сировини// http://b-ko.com/book_407.html.
76. Бондаренко А.А., Дубінін О.О., Переяславцев О.М. Теоретична механіка: Підручник: У 2 ч.-Ч.2:Динаміка. – К.:Знання, 2004. – 590с.
77. Заика П.М. Избирательные задачи земледельческой механики: Практическое пособие. – Л: Изд-во УСХА, 1992. – 512с.
78. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
79. Кондратьев Г.М. Регулярный тепловой режим. – М.: Издательство технико-теоретической литературы, 1954. – 408 с.
80. Шубин Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 248 с.
81. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
82. Котов Б.И. Совмещение операций сушки и измельчения при обезвоживании высоковлажного растительного сырья. В кн. Разработка и внедрение высокоэффективных сушильных установок. – К.: ИТТФ, 1978. – с. 44 – 45.
83. Котов Б.И. Технологические и энергетические основы повышения эффективности сушки растительного сырья: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Глеваха, 1994. – 438 с.
84. Коновалов В. И. Описание кинетических кривых сушки и нагрева тонких материалов / В.И. Коновалов, П.Г. Романков, В.Н. Соколов // Теоретические основы химической технологии, 1975. – т. IX №2. – с. 203 - 209.
85. Поперечний А. М. Аналітичні дослідження ІЧ- нагрівання соєвих бобів у віброкиплячому шарі // Обладнання та технології харчових виробництв, 2004. – вип.10. – с. 294 – 230.
86. Котов Б.І. Аналітичне дослідження тепломасопереносу в товстому шарі матеріалу при двостадійному процесі сушіння зерна / Б.І. Котов, Р.А. Калініченко // Науковий вісник НУБіП України, 2011. – №166 ч.4. – с. 138–147.

87. 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.
88. Рабинович Г.Д. Теория теплового расчета рекуперативных теплообменных аппаратов. Минск: Из-во АНБССР, 1963. – 214 с.
89. Краусп В.Р, Автоматизация послеуборочной обработки зерна. М.: Машиностроения, 1975. – 277 с.
90. Фёрстэр Э. Ф. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ф. Фёрстэр, Б. Рёнц; пер. с нем. В. М. Ивановой. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 203 с.
91. 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.
92. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя. – М., 1985.
93. Влажность зерна и продуктов его переработки. Методика выполнения измерений диэлектрическими резистивными влагомерами. ГОСТ 8.434-81. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 5 с.
94. 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.
95. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород. - Л.: Недра, 1975, - 286 с.
96. Физико-механические свойства растений, грунтов и удобрений (Методы испытаний, приборы, характеристики). – М.: Колос, 1970. – 424 с.
97. Ковалев Н.Г. Сельскохозяйственные материалы (виды, состав, свойства) / Н.Г. Ковалев, Г.А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М.: ИК «Родник», 1998. – 208с.
98. Хайлис Г.А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка данных / Г. А. Хайлис, М.М. Ковалев. – М. : Колос, 1974. – 169 с.
99. 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
100. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Практикум / [М.В. Бакум, О.М. Горбатовський, Ю.О. Манчинський та ін.]; За ред. Ю.О. Манчинського. – Харків: ХНТУСГ, 2005. – 196 с.

101. Хайлис Г.А. Механика растительных материалов / Г.А. Хайлис. – К.: УААН, 2002. – 374 с.
102. 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.
103. Адлер Ю.И. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.И. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
104. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. 304 с.
105. Мельников С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П. М. Рошин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.
106. Про затвердження галузевої програми "Сою України 2008-2015" [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.uazakon.com/documents/date_e3/pg_gtcrox/index.htm
107. Шведик М. С., Методика розрахунку економічного ефекту конструкторської розробки дипломного проекту. Методичні вказівки до обґрунтування економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 7.090215 – Машина і обладнання сільськогосподарського виробництва машинобудівного факультету денної і заочної форм навчання. / М. С. Шведик, В. І. Ткачик – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2006. – 40с.
108. Власов Н.С. Методика экономической оценки сельскохозяйственной техники / Н.С. Власов. – М.: Колос, 1982. – 255 с.
109. Екологічний менеджмент: навч. посіб. / [В. Ф.Семенов, О. Л. Михайлюк, Т. П. Галушкіна та ін.] – К.: Центр навчальної літератури, 2004. – 516 с.
110. Економічна оцінка спеціалізованої сільськогосподарської техніки// методичні рекомендації для дипломного проектування студентів спеціальності 3113 “Механізація сільськогосподарського виробництва”. – Львів: Львівський державний сільськогосподарський інститут, 1994. –27 с.
111. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул Текст. / Е. И. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988. - 239 с.
112. Карташевич С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и

- испытаний технологических комплексов) / С. М. Карташевич. – Минск, 2001. – 288 с.
113. Скриннік І.О. Гідродинамічна модель процесу сушіння насіння сільськогосподарських культур для виробничих потреб / І.О. Скриннік, М.О. Федотова, М.М. Петренко, Д.В. Богатирьов // *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Випуск 41, ч. 11. – Кіровоград: КНТУ, 2011. – С. 55 - 61.
114. Скриннік І.О. Визначення впливу основних параметрів при експериментальних дослідженнях сушіння зернового матеріалу в киплячому стані / І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов, С.О. Карпушин, М.О. Федотова // *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*, вип.42, ч.І. – Кіровоград : КНТУ, 2012. – С.188–194.
115. Palmer R. G. List of the genus *Glycine* Willd. – New York, 1996. – P. 10-13.
116. W. Diepenbrock, G. Fischbeck, K.-U. Heyland, N. Knauer. *Spezieller Pflanzenbau*. 3. Auflage, Ulmer, Stuttgart 1999, S. 240–250. ISBN 3-8252-0111-2.
117. Hicsasmaz Z, Rizvi SSH. Effect of size and shape on modulus of deformability. *Food Science and Technology*. 2005;38(4): 431–435.
118. Kiani M, Maghsoudi H, Minaei S. Determination of Poisson's ratio and Young's modulus of red bean grains. *Journal of Food Process Engineering*. 2009;10: 1745 – 1756.
119. Otten L. Determination of the specific heat of agricultural materials / L. Otten, G. Samaan. – *Canadian Agricultural Engineering*, 1980.
120. Hymowitz T. On the domestication of the soybean. // T. Hymowitz. *Economic Botany*.— 1970.— Vol. 24.— №. 4.— P. 408–421.
121. Doymaz I. The thin-layer drying characteristics of corn / I. Doymaz, M. Pala // *Journal of Food Engineering*. – 60. – 2003. – P. 125-130.
122. Cihan A. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice/Ahmet Cihan, Kamil Kahveci // *Journal of Food Engineering*. – 79. – 2007. – P. 293-298.
123. Rafiee Sh. Thin Layer Drying Properties of Soybean / Sh. Rafiee, A. Keyhani, M. Sharifi, A. Jafari, H. Mobli, and A. Tabatabaefar // *J. Agric. Sci. Technol*. – Vol. 11. – 2009. – P. 289-300.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
СУЧАСНИЙ СТАН ПИТАННЯ ТА АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ТА ПЕРЕРОБКИ СОЇ	5
1.1 Біологічні особливості сої	5
1.2 Аналіз технологій і засобів післязбиральної обробки сої	9
1.3 Методи і засоби підготовки зернового матеріалу до сушіння	20
1.4 Огляд теоретичний дослідження сушіння сільськогосподарських матеріалів	24
1.5 Висновки до розділу	27
ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРЕН СОЇ	29
2.1 Аналіз методів інтенсифікації сушіння зерен сої та розробка конструкції пристрою підготовки їх до сушіння	29
2.2 Обґрунтування швидкості руху зерен сої в пристрої підготовки їх до сушіння	33
2.3 Моделювання переміщення зерен сої конічним диском з прямолінійними направляючими лопатками	38
2.4 Теоретичний аналіз процесу переміщення вологи в зернині сої в процесі сушіння	44
2.5 Фізико-механічні і теплофізичні аспекти інтенсифікації процесу сушіння шляхом розсічення поверхні зернини	52
2.5.1 Вплив масообмінних факторів на кінетику сушіння	56
2.5.2. Вплив параметрів сушильного агента на кінетику сушіння	59
2.5.3. Раціональний режим сушіння і його реалізація	61
2.6 Висновки до розділу	63
ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	64
3.1 Програма експериментальних досліджень	64
3.2 Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень	65
3.3 Методика визначення фізико-механічних властивостей зерен сої як об'єкта обробки пристроєм підготовки до сушіння	71
3.3.1 Методика визначення показників, що характеризують сипкість зерен сої	71
3.3.2 Методика визначення фрикційних властивостей зерен сої	73
3.3.3 Методика визначення кутів природнього відкосу	74
3.3.4 Методика визначення пористості, об'ємної маси та насипної щільності зерен сої	74
3.4 Методика визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на	77

процес сушіння	
3.5 Методика роздільного сушіння зерен сої	77
3.6 Методика визначення зусилля, необхідного для розсічення поверхні зерен	78
3.7 Методика визначення коефіцієнта відновлення	78
3.8 Методика визначення зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння	79
3.9 Методика визначення впливу режимних параметрів пристрою підготовки зерен до сушіння та властивостей сої на коефіцієнт розсічення	80
3.10 Методика визначення впливу режимних параметрів сушіння та коефіцієнта розсічення на інтенсивність сушіння	84
3.11 Висновки до розділу	85
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	87
4.1 Визначення фізико-механічних властивостей зерен сої як об'єкта сушіння	87
4.1.1 Показники, що характеризують сипкість зерен сої	87
4.1.2 Фрикційні властивості зерен сої	88
4.1.3. Визначення пористості (шпаруватості) та щільності зерен сої	90
4.1.4 Визначення кутів природнього відкосу	92
4.1.5 Визначення розмірно-масових характеристик зерен сої	93
4.2 Визначення впливу ступеня розсічення зерен сої на процес сушіння	99
4.3. Роздільне сушіння зерен сої	100
4.4 Визначення величини зусилля, необхідного для розсічення поверхні зернини	101
4.5 Визначення коефіцієнта відновлення	102
4.6 Визначення зміни швидкості повітряного потоку в робочій камері пристрою підготовки зерен сої до сушіння	104
4.7 Визначення впливу режимних параметрів пристрою підготовки зерен сої до сушіння та властивостей оброблювального матеріалу на коефіцієнт розсічення	105
4.8 Визначення впливу режимних параметрів сушіння та коефіцієнта розсічення k_p на інтенсивність сушіння	111
4.9 Висновки до розділу	114
ВИРОБНИЧІ ВИПРОБУВАННЯ І ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУШІННЯ ПІДГОТОВЛЕНИХ ЗЕРЕН СОЇ	116
5.1 Технологічний процес підготовки зерен сої до сушіння у розробленому пристрої	116
5.2 Результати господарсько-виробничої перевірки сушарки зерен сої	118

5.3 Розрахунок економічної ефективності пристрою підготовки зерен сої до сушіння	119
5.4 Висновки до розділу	122
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	123
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	126

Монографія

Р.В. Кірчук, І.Є. Цизь, К.Є. Коpecь

Дослідження та вдосконалення технології сушіння бобів сої

Редактор: Р.В. Кірчук

Комп'ютерний набір та верстка: Р.В. Кірчук

Підписано до друку __.04.2020 р., Формат 60×84/16.

Ум. друк. арк. 8,63. Обл.-вид. арк. 10,5.

Наклад 300 прим. Зам. № __ .

Редакційно-видавничий відділ Луцького НТУ

43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Реєстраційне свідоцтво

Міністерства юстиції України КВ № 15902-4374 ПР