

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Луцький національний технічний університет

Р.В.Кірчук, А.А.Ящук

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ
ВОРОХУ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО**

МОНОГРАФІЯ

ЛУЦЬК РВВ ЛНТУ– 2015

УДК 631.365.2:633.521

ББК: 41.47

З 12

Кірчук Р.В.

Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння льону олійного: Монографія / Р.В. Кірчук, А.А.Ящук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2015. – 150 с.

Рецензенти:

Сало В.М.

Дідух В.Ф.

В монографії представлені відомості про фізико-механічні властивості вороху насіння льону олійного як об'єкта сушіння. Проаналізовано способи та засоби механізації сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів. Представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у забезпеченні інтенсифікації технологічного процесу сушіння вороху насіння льону олійного шляхом розпушування і перемішування шару матеріалу з врахуванням його структурних характеристик у запропонованій новій сушарці.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним працівникам, які займаються питаннями механізації сушіння сипких матеріалів.

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Луцького національного технічного університету
(протокол №)*

ISBN

© Р.В. Кірчук, А.А.Ящук 2015

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	7
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО ЯК ОБ’ЄКТА ЗБИРАННЯ І ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ.....	8
1.1. Класифікація, біологічні і морфологічні особливості льону олійного.....	8
1.2. Сучасні технології збирання і післязбиральної обробки льону олійного.....	11
1.3. Властивості насіння льону олійного як об’єкта післязбиральної обробки.....	19
1.4. Аналіз досліджень конвективного сушіння насіння олійних культур.....	23
1.5. Висновки і задачі досліджень.....	28
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУШАРКИ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО.....	30
2.1. Порівняльний аналіз технологій збирання та первинної переробки насіння льону-довгунця і льону олійного з розробкою нової конструкції сушарки.....	30
2.2. Дослідження процесу переміщення матеріалу поверхнею спіралеподібного активатора.....	34
2.3. Математична модель процесу сушіння шару насіння льону олійного.....	46
2.4. Дослідження процесу перемішування і розпушування шару матеріалу в процесі сушіння.....	58
2.5. Дослідження процесу вентилявання шару матеріалу в циліндричній сушильній камері.....	65
2.6. Висновки до розділу 2.....	72
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	74
3.1. Програма експериментальних досліджень.....	74
3.2. Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень.....	75
3.3. Методика дослідження вентилявання вороху насіння льону олійного.....	81
3.4. Методика визначення втрати якості насіння льону олійного.....	82
3.5. Методика визначення раціональних режимів сушіння насіння льону олійного.....	83
3.6. Методика визначення параметрів активаторів для перемішування сипких матеріалів.....	85
3.7. Методика визначення ступеня пошкодження насіння льону олійного в процесі перемішування і розпушування активаторами сушарки.....	87
3.8. Методика дослідження кінетики сушіння вороху льону олійного.....	87
3.9. Методика визначення рівномірності сушіння вороху насіння льону олійного з перемішуванням шару матеріалу із застосуванням математичного методу планування експерименту.....	89
3.10. Методика визначення впливу режимних параметрів сушарки і матеріалу на швидкість сушіння з застосуванням методу математичного планування експерименту.....	94

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	101
4.1. Вплив режимних параметрів на ефективність і якість сушіння насіння льону олійного.....	101
4.2. Дослідження кінетики сушіння насіння льону олійного	103
4.3. Визначення раціональних конструктивних і режимних параметрів активаторів для перемішування і розпушування матеріалу	106
4.4. Дослідження ступеня пошкодження насіння льону олійного в результаті перемішування спіралеподібними активаторами	112
4.5. Результати дослідження вентилявання повітряним потоком шару насіння льону олійного.....	115
4.6. Вплив процесу перемішування шару насіння льону олійного на рівномірність сушіння	117
4.7. Дослідження процесу сушіння вороху насіння льону олійного у сушарці зі спіралеподібними активаторами	122
4.8. Висновки до розділу 4	124
РОЗДІЛ 5. ВИРОБНИЧА ПЕРЕВІРКА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СУШАРКИ	127
5.1. Технологічний процес сушіння насіння льону олійного у сушарці зі спіралеподібними активаторами	127
5.2. Методика розрахунку енерговитрат	129
5.3. Розрахунок економічної ефективності сушарки.....	136
5.4. Результати господарсько-виробничої перевірки сушарки для сушіння насіння льону олійного	138
5.5. Висновки до розділу 5	140
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	141
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	143

ПЕРЕДМОВА

Льон олійний є сільськогосподарською культурою, яка має важливе господарське значення. Олія льону олійного має унікальні властивості та використовується в багатьох галузях промисловості. В насінні льону олійного міститься до 47 % олії.

З льону олійного також отримують волокно, а отже – зростаюча популярність льону олійного може стати поштовхом для відродження традиційної галузі льонарства.

Технологія вирощування льону олійного передбачає збирання врожаю одно- або двофазним способом. При цьому ворох насіння льону, що надходить на тік, необхідно відразу піддавати попередньому очищенню і сушінню, щоб уникнути самонагрівання і псування насіння.

В природно-кліматичній зоні Західного Полісся у зв'язку з несприятливими погодними умовами вологість врожаю льону олійного може перевищувати кондиційну. В результаті цього виникає необхідність штучного сушіння насіння льону олійного.

До процесу сушіння цього матеріалу ставляться особливі вимоги. Насіння льону олійного чутливе до перегрівання. Наявність солом'яних домішок в насінневому матеріалі негативно впливає на процес сушіння. Малі розміри і висока щільність насіння зумовлює ускладнене переміщення агента сушіння крізь щільний шар матеріалу. Важливе значення мають питання ефективності використання енергії, підвищення продуктивності процесу і збереження високої якості кінцевого матеріалу.

У зв'язку з відсутністю спеціальних засобів для сушіння насіння льону олійного, забезпечення раціональних режимів сушіння, з урахуванням всіх особливостей цього матеріалу, є проблемним.

Зважаючи на вищезазначене, а також на недоліки існуючих сушарок сільськогосподарських матеріалів актуальним є питання обґрунтування параметрів нової конструкції сушарки, призначеної для сушіння насіння льону олійного, яка забезпечила б ефективний процес зниження вологості з мінімальними втратами.

Метою дослідження, результати якого представлені в монографії є вибір раціональних режимів та обґрунтування параметрів сушарки для зниження енергетичних витрат на процес сушіння вороху насіння льону олійного.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО ЯК ОБ'ЄКТА ЗБИРАННЯ І ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ

1.1. Класифікація, біологічні і морфологічні особливості льону олійного

Льон належить до сімейства лянних – Linaceae (D. C.) Dumort, куди входять 22 роди, з яких для практичних цілей використовується виключно один (рід — льон *Linum* (Tourn.) L.) (рис. 1.1). Цей рід включає понад 200 видів однорічних або багаторічних трав'янистих рослин і навіть напівкущів [6, 25].

Інтерес для господарства становить культурний льон (*Linum usitatissimum*), який поділяється на льон, що розтріскується (*Linum dehiscens*), і той, що не розтріскується (*Linum indehiscens*). Льон, що не розтріскується має найбільше господарське значення [6].

Стиглий коробочка льону, що не розтріскується, залишаються закритими. Він поділяється на п'ять підвидів [25]: індо-абисинський, євразійський, середземноморський, індоостанський і проміжний.

Перші два підвиди характеризуються дрібним насінням (абсолютна вага 1000 насінин – 2,1...6,2 г), середземноморський – крупним насінням (10...13 г), індоостанський – (6,3...10,8 г) і проміжний – (6,3...9,3 г), [5].

В Україні поширений євразійський підвид (subsp. *eurasiaticum* Yar. et Ell.), який охоплює кілька груп і різновидів, зокрема чотири групи, які використовуються у виробництві: льон-довгунець, льон-кучерявець, льон-межеумок (проміжний) та льон сланкий [5]. Саме цей підвид становить найбільший інтерес.

Льон-довгунець (рис.1.2, а) має довге (80 – 120 см) стебло, що розгалужується тільки біля самої верхівки (табл.1.1). Його використовують для отримання високоякісного волокна, а насіння – для відтворення, як посівний матеріал, а також для отримання олії. Він має стрижневий корінь із слабкорозвиненими бічними відгалуженнями, росте переважно в помірному вологому кліматі.

Льон-кучерявець (рис.1.2 б) – однорічна трав'яниста рослина 20 – 45 см заввишки (табл.1.1). Має до 20 разів більше насінневих коробочок, ніж льон-довгунець. Волокно в стеблах льону-кучерявця грубе, одерев'яніле, малоприслатне для переробки в текстильній промисловості. Розгалуженість стебла і кількість коробочок залежно від умов вирощування дуже змінюються [9].

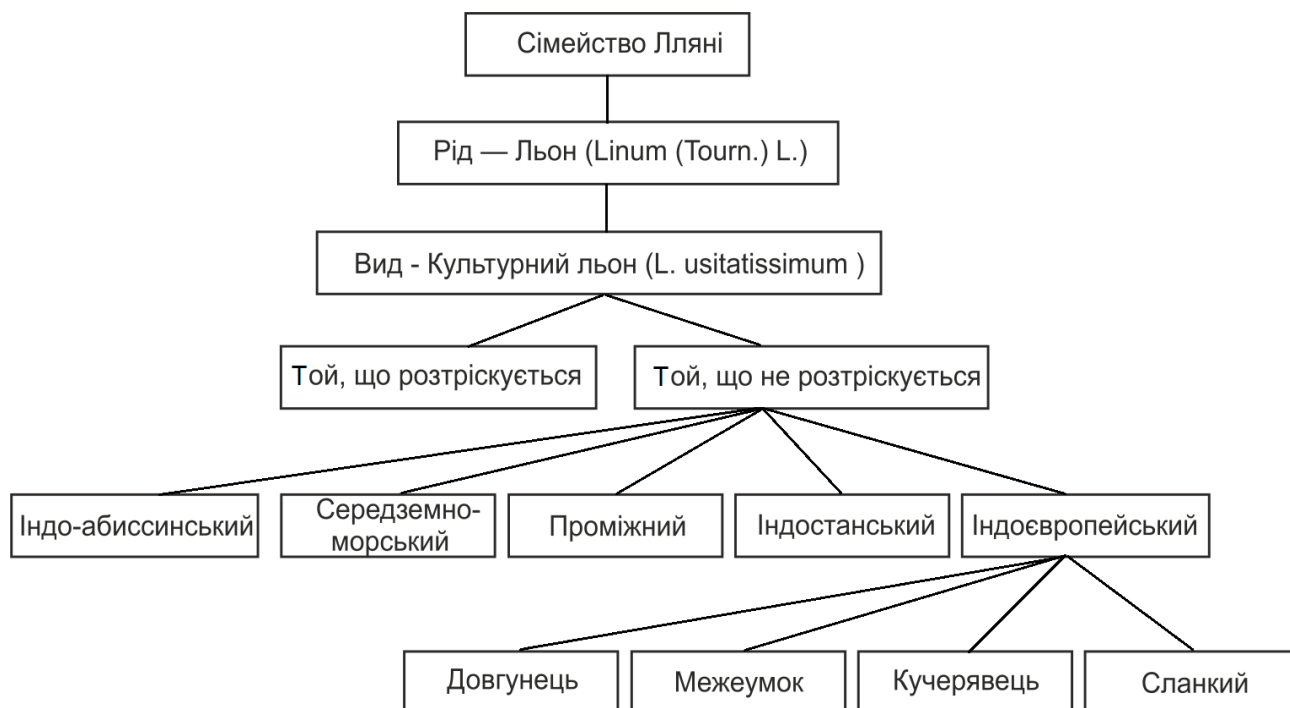


Рисунок 1.1 – Ботанічна класифікація груп льону

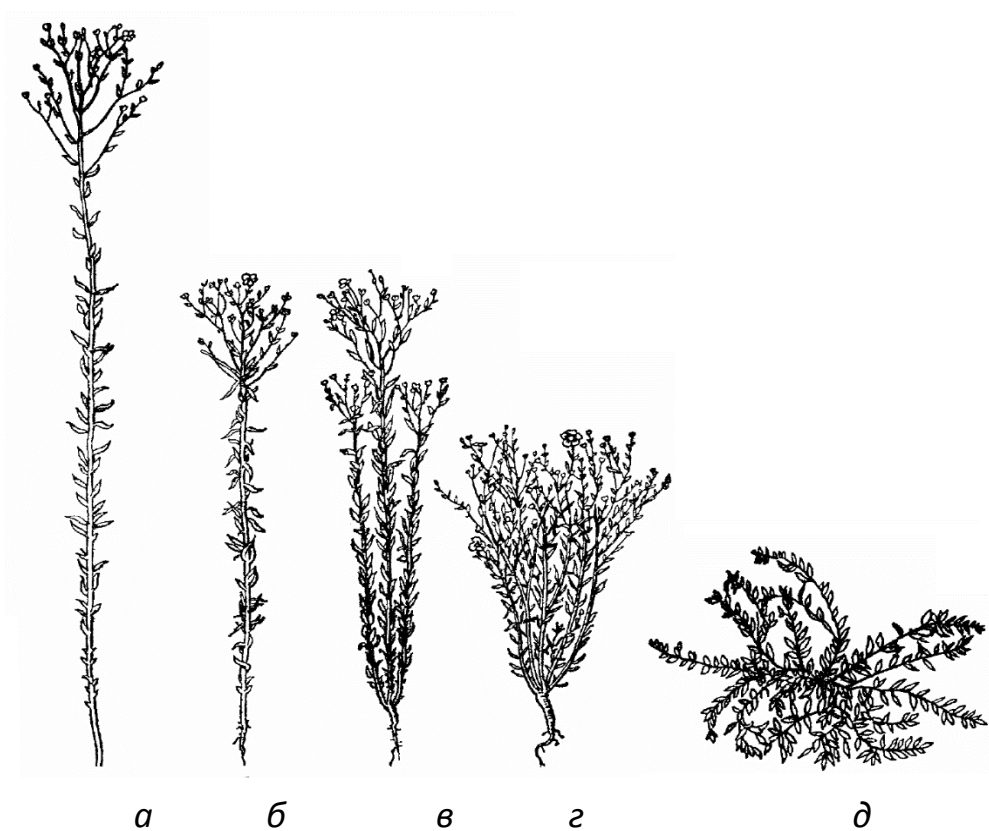


Рисунок 1.2 – Групи льону: а – льон-довгунець; б і в – межеумок; г – кучерявець; д – сланкий

Льон-межеумок (рис.1.2, б, в) займає проміжне становище між льоном-довгунцем і кучерявцем. Він має довше і менш розгалужене стебло (50 – 70 см), ніж кучерявець, багато насіння (табл.1.1), і його волокно часто використовують для виробництва грубих тканин, паклі і кручених виробів.

Кучерявець і межеумок об'єднують загальною назвою – олійний льон. З цих двох груп льону отримують найбільший урожай насіння і вихід олії (табл.1.1).

Виключно на олію вирощують льон-кучерявець, який є культурою країн Середньої Азії та Кавказу. В Україні для одержання олії в основному вирощується льон-межеумок.

Льон сланкий (рис.1.2, д) володіє найкоротшим стеблом, що стелиться по землі, використовується рідко [6].

Таблиця 1.1 – Основні ознаки груп олійного льону в порівнянні з льоном-довгунцем [5]

Ознаки	Межеумок	Кучерявець	Довгунець
Маса 1000 насінин, г	до 6	до 8	до 5,5
Вміст олії в насінні, %	до 42	до 45	до 39
Гілкування стебла	незначне	сильне	не розгалужується
Стебел на рослині, шт	1-2	4-5	1
Плодів на рослині, шт	15-20	30-60	5-10
Висота рослин, см	50-75	30-50	70-125

Плід льону олійного (рис 1.3), що становить кулеподібну, загострену догори коробочку, має висоту 6,1-11,0 мм, ширину 5,7-8,5 мм, з перегородками на 5 гнізд. Кожне гніздо має напівперегородку, утворюючи 10 відділень. Таким чином, в коробочці міститься 10 насінин [6].

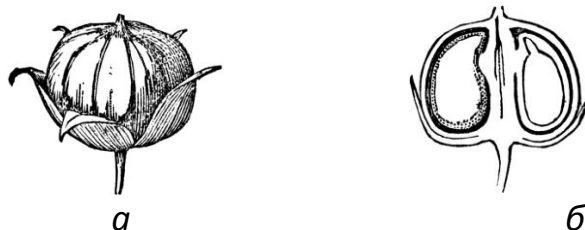


Рисунок 1.3 – Плід льону олійного: а – загальний вигляд; б – поперечний розріз

Насіння льону олійного (рис.1.4) має яйцеподібну форму зі звуженим і злегка загнутим носиком, зазвичай коричневого забарвлення різних відтінків – від світло-коричневого до темно-коричневого. Поверхня – гладка, слизька, в результаті чого насіння володіє високою сипкістю [6].

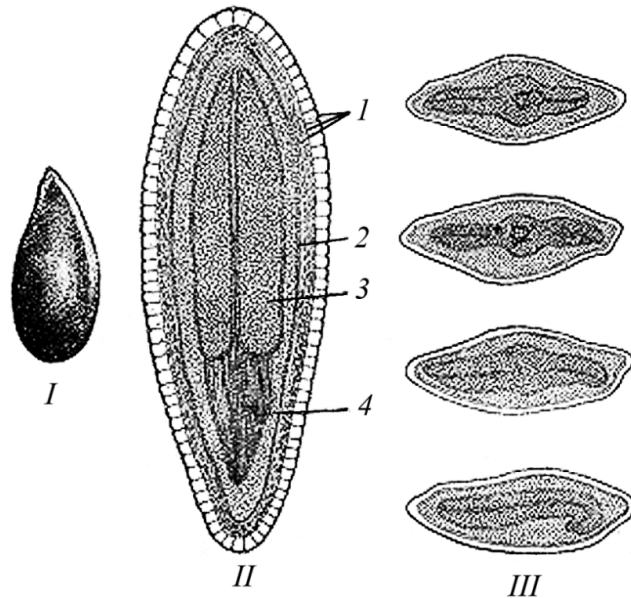


Рисунок 1.4 – Насінина льону олійного: I – загальний вигляд; II – поздовжній переріз: 1 – оболонка, 2 – ендосперм, 3 – сім'ядоля, 4 – корінець; III – поперечні зрізи насінин через зародок

Забарвлення і величина насіння – спадкові ознаки, що характерні для того чи іншого сорту льону. На величину насіння також впливають умови вирощування. В розріджених посівах величина насіння дещо більша, ніж у звичайних загущених посівах [5].

Сім'ядолі і зародок разом складають 56,6-69,7 %, оболонка – 30,3-43,7 % від маси сухого насіння. Ендосперм в насіння зі світлими оболонками розвинений слабше, ніж в насіння з коричневими оболонками [29].

Із сортів льону олійного районовано в Україні «Дебют», «Південна ніч», які вирощують у зонах Степу і Лісостепу України. Крім того, в господарствах висівають також сорти «Авангард», «Воронезький 1308», «Кіровоградський 2», «Крупнонасінний 3».

1.2. Сучасні технології збирання і післязбиральної обробки льону олійного

Для збирання льону олійного можна використовувати рядкові валкові жатки і зернозбиральні комбайни, тобто льон олійний можна збирати як прямим комбайнуванням, так і роздільним способом [6, 9, 28].

Збір врожаю прямим комбайнуванням проводять у фазі повної стиглості, роздільне збирання – у фазі біологічної стиглості рослин.

Льон олійний зазвичай збирають двофазним способом. При однофазному збиранні можливі втрати врожаю внаслідок поганого вимолочування недостиглих коробочок та можливого самозігрівання вороху на токах [6, 28].

Низькорослий і зрідений льон олійний укладають у здвоєні валки, використовуючи для цього жатки, наприклад, ЖНС-6-12. Як тільки підсохнуть валки і вологість насіння зменшиться до 12 %, їх обмолочують.

При використанні комбайнів з двобарабанним апаратом (СКД-5, СК-6) потрібного вимолоту насіння досягають регулюванням другого барабана, а перший налагоджують на більш м'який режим роботи [9].

Крім розглянутих традиційних технологій збирання льону олійного прямим комбайнуванням і роздільним способом, варто звернути увагу на нові комбайнову і роздільну технології збирання олійного льону (рис.1.5). Нова комбайнова технологія передбачає, що комбайн здійснює зрізування або брання стебел, формування стрічки паралельних стебел та її обмолочування. Обмолочена стрічка льону після плющення розстиляється на полі для вилежування, а насіння проходить первинне очищення [3, 4, 31].

Нова роздільна технологія передбачає, що льонобралка вибирає олійний льон, формує стрічку стебел та вкладає її на полі. Після підсушування та досягання насіння, стрічка підбирається льонопідбирачем-молотаркою, яка здійснює відрізання суцвіть з насіннєвими коробочками від стеблової частини з наступним розстиланням насіннєвої частини. Крім того, машина здійснює первинне очищення насіння [3, 4, 31].

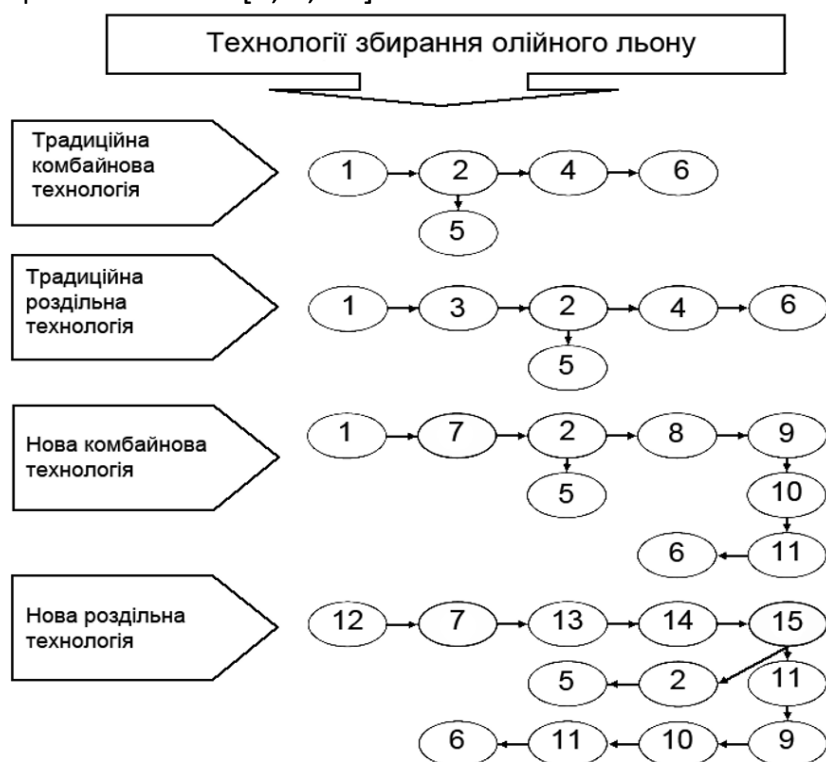


Рисунок 1.5 – Технології збирання льону олійного: 1 – скошування; 2 – обмолочування; 3 – формування валка з необмолочених стебел; 4 – формування валка з обмолочених стебел; 5 – первинне очищення насіння; 6 – формування пакунку; 7 – формування стрічки необмолочених стебел; 8 – плющення льоносолами; 9 – розстилання льоносолами; 10 – вилежування; 11 – обертання, ворущіння стрічки льонотрести; 12 – брання льону; 13 – розстилання необмолоченої стрічки льону; 14 – піднімання необмолоченої стрічки льону; 15 – відрізання суцвіття

Проведені дослідження технологій збирання льону олійного у зоні Західного Полісся показали, що зменшення втрат продукції при збиранні льону олійного можна досягти шляхом роздільного збирання при застосуванні технології з бранням стеблостою льонобралкою ТЛН-1,5А [27].

Насіння льону, що одержують при збиранні врожаю в дощові роки, може мати вологість 20 % і вище. При зберіганні воно втрачає схожість внаслідок самозігрівання. Для зберігання насіння необхідно його сушити до кондиційної вологості.

Сухим є насіння льону, відносна вологість якого не перевищує 10 %. Насіння з вологістю 13,5% і більше вважається сирим. В насінні льону олійного з відносною вологістю 14 %, закладеному в бункер на зберігання, присутність плісняви може простежуватися вже через 10 днів від початку зберігання [35].

Ворох льону олійного, що надходить на тік, щоб уникнути самозігрівання і псування відразу піддають попередньому очищенню, для чого використовують очисник вороху ОВП-20А [9, 28]. До недоліків машини ОВП-20А відносять високе ресурсоспоживання, складність конструкції, запиленість, незручність відбору фуражних відходів і сміття [10,11].

Для кінцевого очищення насіння застосовують насіннеочисні машини СМ-4 [10].

За невисокої вологості та за відсутності спеціальних засобів вдаються до природного сушіння насіння на відкритому повітрі або на віялках-сортувалках.

На відкритому повітрі (сонячне сушіння) або під навісом (сушіння провітрюванням) насіння розсипають шаром 3-4 см на брезенті або асфальтованому майданчику і протягом дня кілька разів перелопачують. При цьому способі сушіння за один сонячний день можна знизити вологість на 3-4 %. Недоліками природного сушіння є залежність від погодних умов і великі затрати праці [25].

Сушіння продуванням на віялках-сортувалках може бути механізоване, але вологість насіння при цьому знижується несуттєво [25].

Найбільш ефективним, надійним і швидким способом зниження вологості матеріалу, незалежним від погодних умов, є штучне сушіння, яке може бути механізоване повністю.

При штучному сушінні насіння льону олійного залежно від його призначення ставляться такі вимоги: температура нагрівання насіння льону при сушінні не повинна перевищувати 45°C для посівних цілей, 80°C для переробки і 80-100°C для кормових цілей [35].

Застосовуються шахтні зерносушарки [25, 28] (ЗС-ВИСХОМ, СЗС-2, СЗМ-1,5 «Десна», Perry (рис.1.6) та ін.). У перерахованих сушарках насіння сушать сумішшю топкових газів із зовнішнім повітрям, що проходить через рухомих їх масу. Кожна сушарка має топку, сушильну шахту, вентилятор для нагнітання в

сушильну камеру теплоносія [10]. Нижче сушильної, в одному корпусі з нею, встановлюється охолоджувальна шахта, в якій потік холодного повітря, що створюється вентилятором, охолоджує висушене насіння.

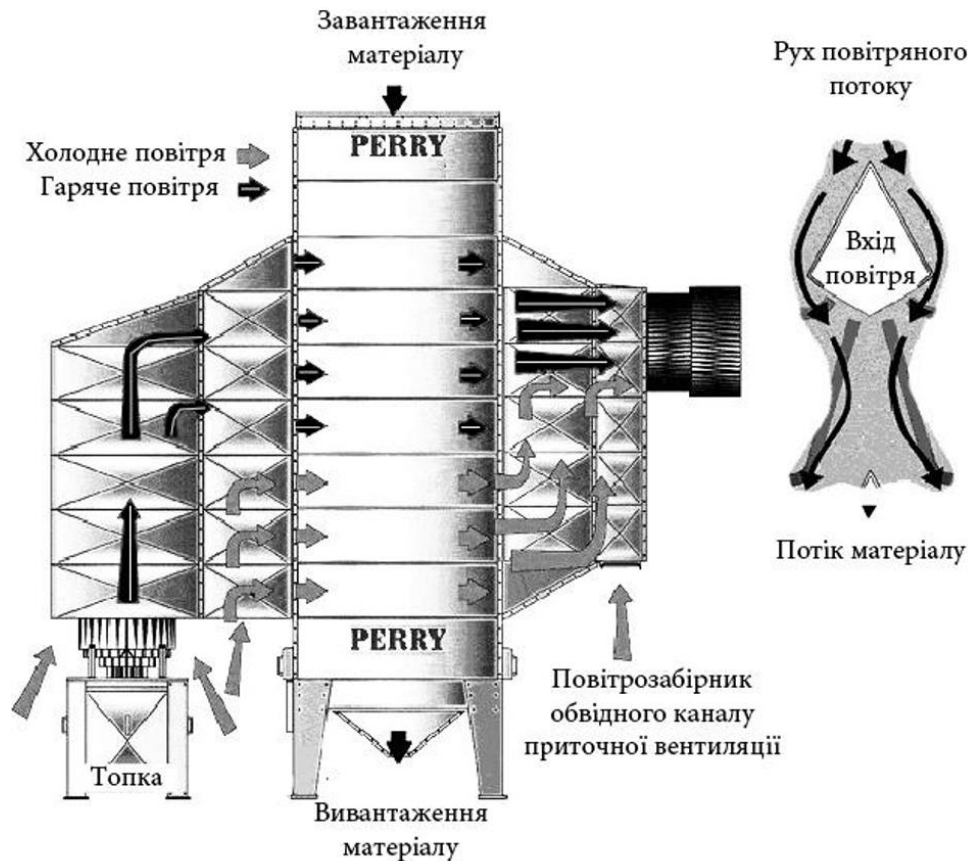


Рисунок 1.6 – Функціональна схема роботи шахтної сушарки Perry

Для насіння льону олійного, залежно від його початкової вологості, рекомендують (загальні для всіх сушарок шахтного типу) температури теплоносія зведені до таблиці. 1.2.

Таблиця 1.2 – Температурний режим сушіння насіння льону олійного залежно від його початкової вологості [6, 25]

Початкова вологість насіння, %	Температура, °C	
	теплоносія	насіння
13-15	65-70	42-45
15-17	60-65	38-40
17-19	55-60	35-38
19 і більше	50-55	32-35

Під час зберігання в мішках, складених у штабелі, або насипом шаром до 1 м вологість насіння має бути не вищою 10 – 12 %. [9, 25].

Перед початком сушіння підбирають партії насіння (одного сорту і репродукції), близькі за вологістю (розбіжність не повинна перевищувати 1-2 %). Засмічене насіння льону олійного перед завантаженням в шахтну сушарку обов'язково треба очищати. Видалення насіння бур'янів (більш вологого, ніж насіння основної культури) прискорює сушіння. Наявність крупних солом'яних домішок неприпустиме. Потрапляючи в сушарку, вони утворюють застійні зони, що призводить до пересушування насіння в цих місцях і до загоряння. При цьому максимальна температура нагрівання насіння не повинна перевищувати 45 °C [25].

Насіння вологістю вище 15 % варто сушити в 2-3 прийоми. Зниження вологості за кожен пропуск повинно бути не більше 4 %. Після кожного пропуску насіння залишають для відлежування на 12 год. Для контролю за температурою насіння в період його сушіння через кожні 1-1,5 год. відбирають пробовідбирачами проби з кожного ряду коробок сушильних камер при вимкненому вентиляторі [30].

У сушарок цього типу можна виділити такі основні недоліки, як висока матеріалоемкість і енергетичні затрати, нерівномірність сушіння і охолодження матеріалу, підвищена пожежонебезпека.

Для сушіння насіння застосовують також барабанні зерносушарки СЗСБ-2,0; СЗПБ-2,5; СЗПБ-4,0; СЗСБ-8,0 (рис.1.7), "Stela" [23, 30].

Насіння льону транспортером подається в завантажувальну камеру 2 і далі в сушильний барабан 3, що обертається.

При обертанні барабана насіння безперервно пересипається, а під впливом повітряного потоку і постійного завантаження переміщається уздовж барабана. Теплоносій, проходячи через сушильний барабан, омиває і висушує його. Висушена маса насіння транспортером відводиться в камеру охолодження 4, де охолоджується зовнішнім повітрям. З камери охолодження насіння надходить в розвантажувальний бункер. Продуктивність барабанної сушарки 1200-1300 кг/год, температура теплоносія на вході в сушильний барабан не повинна перевищувати 100° [25].

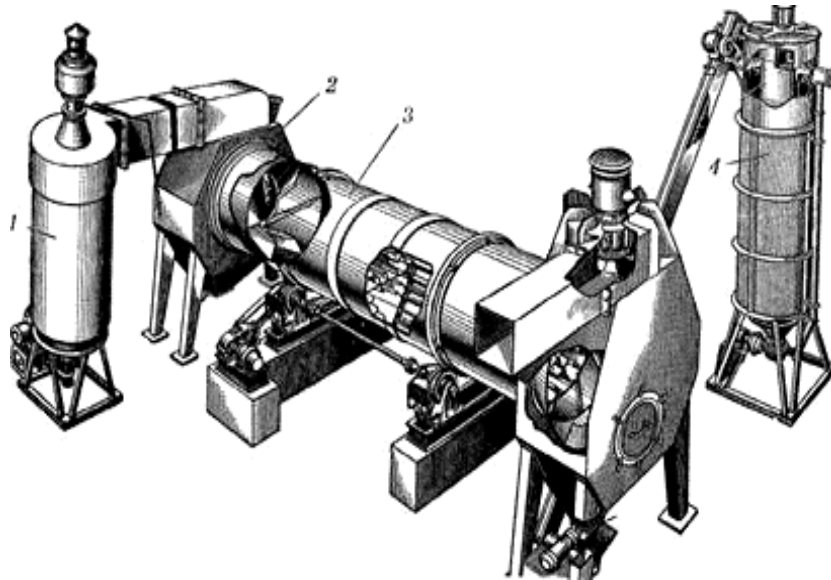


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд сушарки СЗСБ-8,0: 1 – топка; 2 – камера завантаження; 3 – сушильний барабан; 4 – колонка охолодження

Для сушіння насіння льону олійного також застосовують бункерні зерносушарки. На рис. 1.8 показана мобільна бункерна сушарка. Сушарка приводиться в дію електродвигуном або валом відбору потужності трактора.

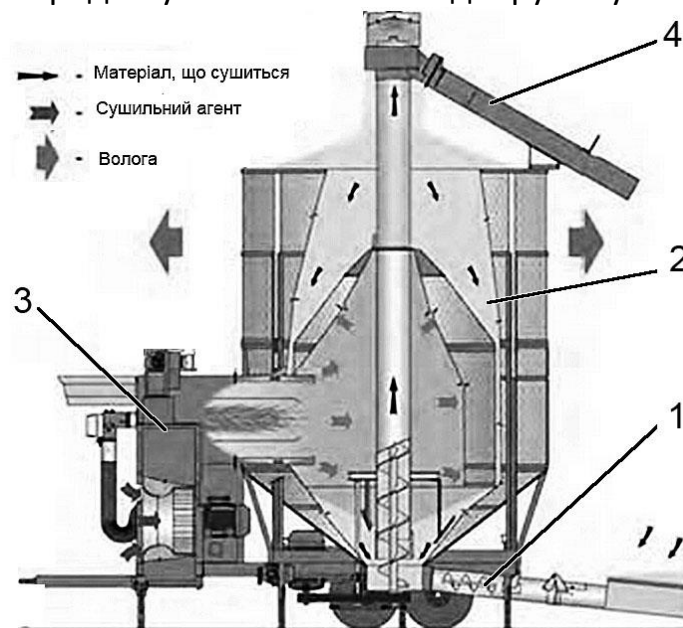


Рисунок 1.8 – Схема мобільної сушарки: 1 – завантажувальний шнек; 2 – бункер; 3 – теплогенераторний блок; 4 – вивантажувальний пристрій

Тепло виробляється теплогенератором, який працює на дизельному (або газовому) паливі, забезпечуючи прямий нагрів або, за наявності радіатора (теплообмінника), непрямий нагрів, що дуже важливо для сушіння насіннєвого матеріалу.

Кінцеве очищення насіння проводять на насіннеочисних машинах ОС-4,5А,

СМ-4, «Петкус-Гігант» К-531/1, «Петкус-Селектра» К-218, К-546А, К-548А та ін.), оснащених набором відповідних решіт та трієрними циліндрами [9, 28].

Насіння льону олійного від насіння бур'янів з шорсткою поверхнею (повитиці, подорожника, гірчаку, плевелу та ін.) відділяють на електромагнітних машинах [23]. Для очищення насіння льону олійного та інших дрібнонасінних культур різної засміченості і доведення його до вимог 1-го та 2-го класів використовують насіннеочисну лінію КОС-0,5 [23].

Аналіз технологій збирання і післязбиральної обробки льону олійного свідчить про відсутність спеціалізованих засобів збирання і післязбиральної обробки насіння льону олійного. Наявні засоби, розроблені для збирання і обробки інших сільськогосподарських культур, зокрема зернових, які адаптовані для льону олійного, характеризуються низьким коефіцієнтом заповнення сушильної камери, не гарантують високої ефективності і продуктивності процесу. Такі недоліки засобів сушіння, як нерівномірність сушіння, неможливість забезпечення раціональних режимів, зумовлюють кількісні і якісні втрати цієї продукції, а також неефективне використання енергетичного потенціалу теплоносія. Розробка нових засобів сушіння насіння льону олійного з метою усунення цих та інших недоліків є актуальним завданням.

Одним зі шляхів усунення вищезгаданих недоліків існуючих сушарок могло б бути нове технічне рішення, що полягає в застосуванні спеціальних пристроїв – активаторів для перемішування і розпушування шару матеріалу, який заповнює сушильну камеру в процесі сушіння, механічним шляхом, цим самим збільшуючи рівномірність сушіння і ефективність використання енергетичного потенціалу сушильного агента.

Патентний пошук показав, що відома конструкція сушарки для сипких матеріалів (рис.1.9, а), котра містить сушильну камеру, яка складається із циліндричних сушильних секцій. Під час сушіння сипкий матеріал в секціях сушильної камери перемішується за рахунок обертання приводного вала з лопатями, що збільшує площу контакту сипкого матеріалу з сушильним агентом та інтенсифікує процес сушіння [20].

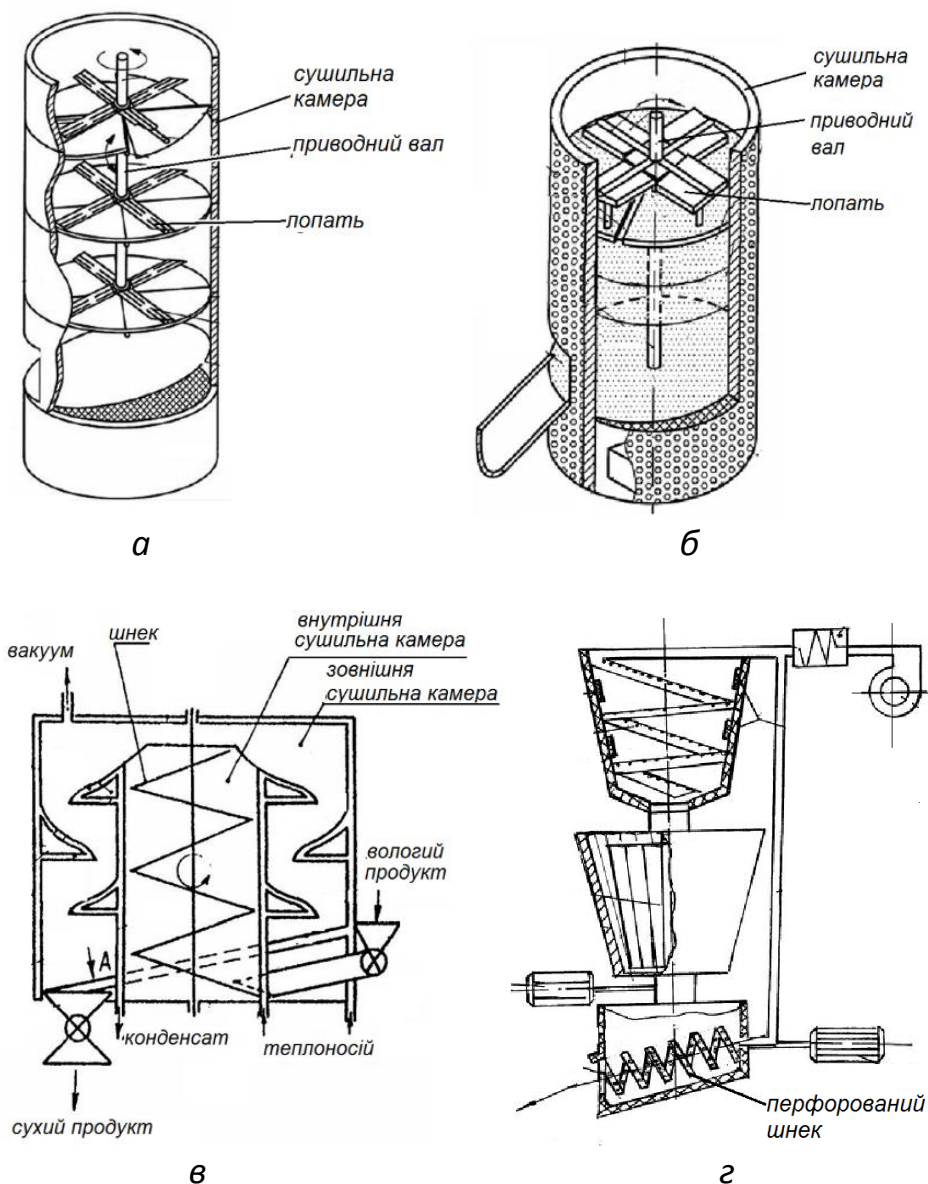


Рисунок 1.9 – Конструкції сушарок з активними робочими органами

Також відома сушарка схожої конструкції (рис.1.9, б), принципова відмінність якої від попередньої полягає у способі пересипання матеріалу з секції в секцію і його вивантаження з сушарки. Перемішування матеріалу аналогічно до попередньої конструкції сушарки відбувається за рахунок обертання приводного вала з лопатями [21].

Ще одним технічним рішенням є сушарка (рис.1.9, в), що складається з двох вертикальних камер: внутрішньої і зовнішньої, розташованих одна в одній. Серед особливостей цієї конструкції можна виділити наявність обертового шнека, яким матеріал у внутрішній сушильній камері в процесі сушіння піднімається догори, після чого зсипається в зовнішню сушильну камеру, де досушується [19].

У сушарці коробочок льону (рис.1.9, з) для вивантаження матеріалу пропонується використовувати пустотілий перфорований шнек, через отвори якого подається підігріте повітря [22].

Недоліками зазначених конструкцій є їх складність і можливе механічне пошкодження матеріалу елементами робочих органів, що робить їх малопридатними для сушіння насіння льону олійного.

1.3. Властивості насіння льону олійного як об'єкта післязбиральної обробки

Насіння льону олійного, як і будь-який інший матеріал, характеризується фізико-механічними властивостями, які визначають особливості технології його післязбиральної обробки. В результаті аналізу наявних досліджень фізико-механічні властивості насіння льону олійного зведено до таблиці. 1.3 [11, 36].

Насіння льону олійного під час і після збирання врожаю може мати різну вологість, яка визначається погодними умовами і технологією збирання. В процесі післязбиральної обробки ворох проходить очищення, насіння піддається сушінню. В результаті цього насіння змінює свою вологість і, відповідно, властивості.

Таблиця 1.3 – Властивості насіння льону олійного

Показник	Величина	Одиниці вимірювання
Розміри		мм
- довжина	3,2 – 4,8	
- ширина	1,5 – 2,8	
- товщина	0,5 – 1,2	
Площа проекції насінини	6,4	мм ²
Периметр	10,1	мм
Площа поверхні	11,34	мм ²
Еквівалентний діаметр насінини	1,9	мм
Об'єм насінини	3,59	мм ³
Кути природного відкосу (при відн. вологості 7 %)		градусів
- насипу	26	
- спорожнення	30	
Коефіцієнт тертя поверхнями (при відн. вологості 7 %)		
- гальванізована сталь	0,27	
- бетон	0,42-0,44	
- фанера	0,33	
Аеродинамічні властивості:		
- швидкість витання насіння	4,7	м/с
- пористість шару насіння	35...45	%
- об'ємна вага шару насіння	580...680	кг/м ³

На рис. 1.10. показано результати експериментальних досліджень з визначення коефіцієнтів тертя спокою для насіння льону олійного за різної вологості на різних поверхнях тертя у вигляді графіків [1].

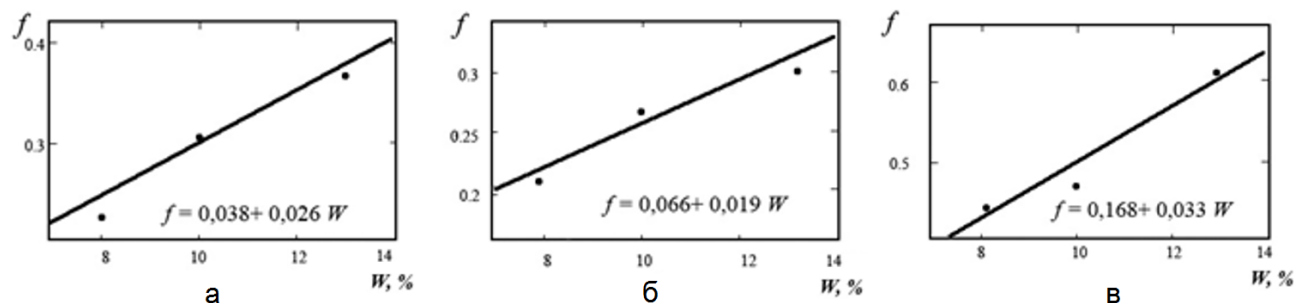


Рисунок 1.10 – Залежність коефіцієнта тертя спокою f насіння льону олійного від відносної вологості W ; поверхні тертя: а – дерево; б – сталь; в – пластмаса

Залежність статичного коефіцієнта тертя насіння льону олійного на різних поверхнях від вологості зведено до таблиці 1.4 [32, 38].

Таблиця 1.4 – Коефіцієнт тертя насіння льону олійного різними поверхнями від абсолютної вологості u

Поверхня	Рівняння
Фанера	$0,167 + 0,053 \cdot u$
Нержавіюча сталь	$0,171 + 0,047 \cdot u$
Алюмінієвий лист	$0,276 + 0,042 \cdot u$
Гальванізований залізний лист	$0,303 + 0,035 \cdot u$
Обгортковий папір	$0,245 + 0,035 \cdot u$
Поліпропіленова тканина	$0,375 + 0,029 \cdot u$
Внутрішнє тертя	$0,598 + 0,059 \cdot u$

За кордоном також проводились подібні дослідження, в результаті яких одержано залежності таких показників, як геометричні параметри насіння, фізико-механічні властивості, аеродинамічні властивості від вологості [32, 38]. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 1.11 -1.16.

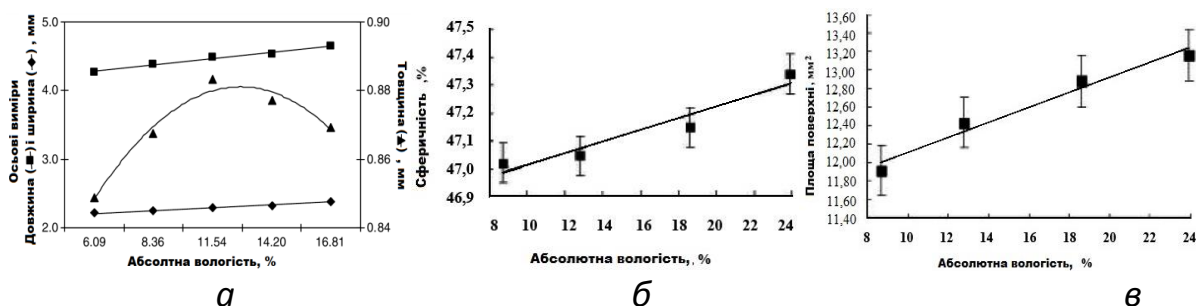


Рисунок 1.11 – Залежність розмірів і форми насіння льону олійного від його вологості за температури повітря 25 °С: а – геометричні розміри; б – сферичність; в – площа поверхні насінини

Площа поверхні насінини, залежно від вологості (рис.1.10, в), виражена залежністю:

$$S = 5,951 + 0,021 \cdot u,$$

де u – абсолютна вологість, %.

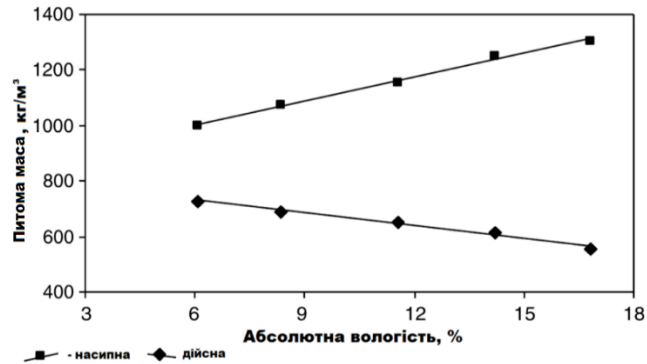


Рисунок 1.12 – Залежність питомої маси насіння льону олійного від його вологості

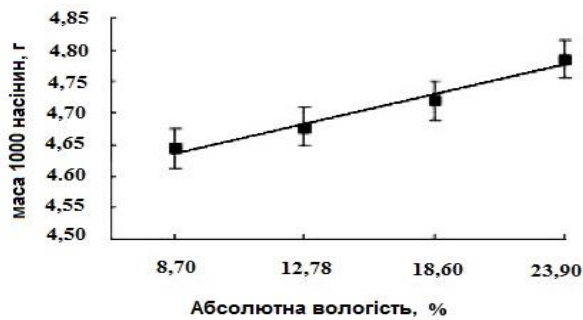


Рисунок 1.13 – Маса 1000 насінин льону олійного залежно від вологості

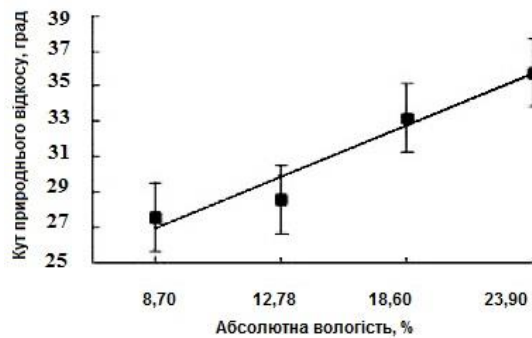


Рисунок 1.14 – Кут природного відкосу за різної вологості насіння льону олійного

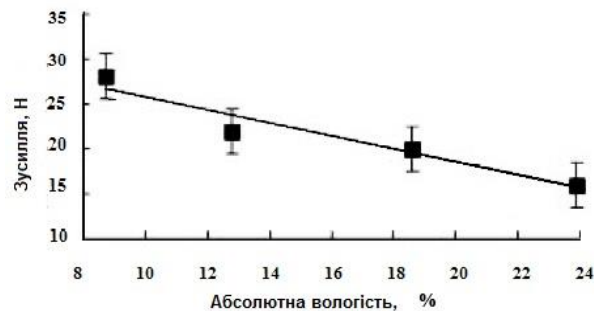


Рисунок 1.15 – Співвідношення між вологістю і зусиллям, яке необхідно прикласти для руйнування насінини льону олійного

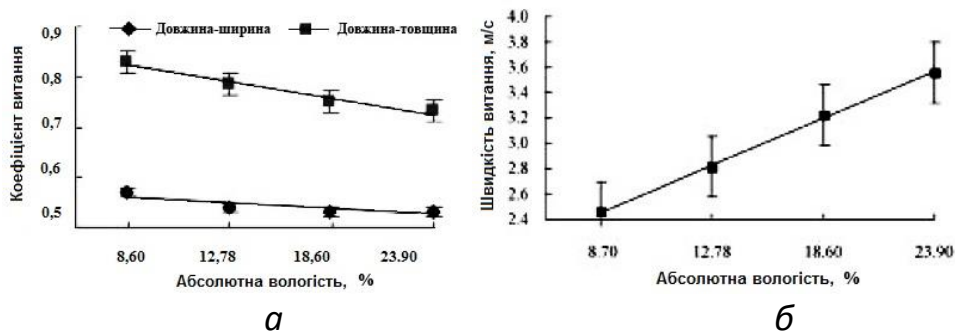


Рисунок 1.16 – Аеродинамічні властивості насіння льону олійного: *а* – коефіцієнт витання; *б* – швидкість витання

Рівняння регресії відображає лінійну залежність пористості P насіння льону олійного від абсолютної вологості u [32, 38]:

$$P = 47.33 - 0.623 \cdot u.$$

При застосуванні технології збирання льону-довгунця, максимально спрямованої на збереження якості волокна, одержується ворох, який є несипким, важкороздільним матеріалом навіть за мінімального вмісту плутанини. Для розділення маси вороху льону-довгунця при його обробці необхідно затрачати значні зусилля, особливо у випадках високої вологості вороху і значного вмісту плутанини [2]. Ворох насіння льону олійного, одержаного в результаті обмолочування комбайнами, містить велику кількість домішок і потребує попереднього очищення, але, на відміну від льону-довгунця, є сипким матеріалом. Це робить можливим застосування універсальних засобів і прийомів очищення сипких матеріалів, які застосовуються для різних насінневих матеріалів, зокрема зернових.

Значний вплив на показники, що характеризують властивості, має вологість матеріалу. Такі показники, як розміри насінини і маса 1000 насінин, площа поверхні та ін. можуть варіюватися залежно від сорту, умов вирощування, що потрібно враховувати у кожному конкретному випадку. При збиранні врожаю льону олійного отримується ворох з високим ступенем забруднення домішками різних розмірів з різними властивостями. Тоді як значна увага приділена дослідженням вороху льону-довгунця, дослідженням вороху насіння льону олійного приділено недостатньо уваги.

Структурний склад вороху (масова частка насіння у воросі, кількість крупних домішок) може варіюватися залежно від багатьох факторів. Тоді ж виникає необхідність в дослідженнях саме властивостей вороху насіння льону олійного з врахуванням різних факторів, що дозволило б розробити ефективну технологію і засоби післязбиральної обробки і, зокрема, сушіння насіння льону олійного, як складову цього процесу.

1.4. Аналіз досліджень конвективного сушіння насіння олійних культур

Насіння льону олійного, як і більшість сільськогосподарських рослинних матеріалів, відносяться до капілярно-пористих колоїдних тіл. Тіла цього типу характеризуються тим, що стінки їх капілярів еластичні і при поглинанні вологи набухають [15].

Процес видалення вологи супроводжується порушенням її зв'язків з матеріалом, а, отже, пов'язаний з певними затратами енергії. Волога в матеріалі характеризується формами її зв'язку з матеріалом. Згідно з класифікацією, розробленою П. А. Ребіндером, всі форми зв'язку вологи з матеріалом діляться на три групи: хімічні, фізико-хімічні і фізико-механічні зв'язки [15].

Принцип дії більшості сучасних сушарок сільськогосподарських матеріалів заснований на конвекції, тобто сушіння відбувається за рахунок нагрівання матеріалу теплим повітрям. За цим принципом працюють сушарки, що використовуються для сушіння насіння льону олійного. При конвективному сушінні має місце в першу чергу виділення фізико-механічно зв'язаної вологи і лише частково розрив фізико-хімічних зв'язків.

Значний внесок у розробку теорії сушіння сільськогосподарських матеріалів внесли А.В. Ликов, С.Д. Птіцин, М.Ю. Лур'є, А.С. Гінзбург, Г.С. Окунь, О. Крішер, П.Д. Лебедев, А.В. Голубкович, В.Б. Ковальов, В.І. Зеленко, В.І. Петрушавічюс та багатьох інших дослідників.

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

Вирішенню проблем, пов'язаних з льонарством, присвячені роботи Г.А. Хайліса, О.О. Налобіної, В.О. Шейченка.

Дослідження технології сушіння включають визначення оптимальних режимів сушіння, при яких досягається максимальна інтенсивність процесу при мінімальних експлуатаційних затратах та забезпечується висока якість продукту [15].

Як показують результати експериментальних досліджень, процеси зміни вологості $u = f(u_0, \tau, t)$ відбуваються за складними законами. Для розв'язку низки практичних задач, як правило, достатньо отримати загальну характеристику процесу шляхом побудови кривих сушіння, швидкості і температури. Аналіз даних кривих дозволяє отримати рівняння кінетики сушіння [15].

Аналіз закордонних літературних джерел [33, 34, 37] показує, що криві кінетики сушіння шару матеріалу з досить високою точністю можна виразити емпіричними залежностями, які були зведені до таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Моделі, що описують кінетику сушіння тонкого шару матеріалів

	Назва моделі	Рівняння моделі
1	Ньютона (Newton)	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	Хендерсона-Пабіса (Henderson-Pabis)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
3	Пейджа (Page)	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
4	Видозмінене Пейджа (Modified Page)	$MR = \exp[-(k \cdot t)^n]$
5	Логарифмічна	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
6	Вонга і Сінга (Wang and Singh)	$MR = 1 + a \cdot t + b \cdot t^2$
7	Міділі (Midilli)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$

У рівняннях в табл.1.5 MR – коефіцієнт, що характеризує зниження вологості матеріалу під час сушіння; a, b, c, k, n – невідомі коефіцієнти, що визначають властивості і стан конкретного матеріалу, а також режими сушіння; t – тривалість сушіння, хв.

$$MR = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}, \quad (1.1)$$

де u_0 – початкова абсолютна вологість матеріалу, %; u – абсолютна вологість матеріалу через час t_j від початку сушіння, %; u_p – рівноважна вологість матеріалу, %.

Рівноважна вологість для кожного матеріалу змінюється залежно від температури матеріалу і вологості навколишнього середовища за складними законами. Для аналітичного вираження цих залежностей застосовують видозмінені рівняння Гендерсона, Чанг-Фоста, Хелсі, Освіна [36].

Для насіння льону олійного найбільш точно відображає залежність його рівноважної вологості від температури і вологості повітря видозмінене рівняння Гендерсона, що має такий вигляд:

$$\varphi = 1 - \exp(-A + (\theta + C) \cdot u_p^B), \quad (1.2)$$

де φ – вологість навколишнього середовища; θ – температура, °C; u_p – рівноважна вологість, %; A, B, C – коефіцієнти, що характеризують властивості конкретного матеріалу (для насіння льону $A=0,000176$; $B=1,9054$; $C=56,228$).

Важливим показником при сушінні насіння є його термостійкість. Відомо, що перевищення допустимих температур нагрівання негативно впливає на якість насіння, зумовлює зниження схожості, енергії проростання.

Для насіння зернових і бобових культур гранично допустиму температуру нагрівання $\theta_{\text{с.д.}}$ визначають за формулою С. Д. Птіцина [1, 25]:

$$\theta_{\text{з.д.}} = \frac{2350}{0,37 \cdot (100 - u_{\text{ин.}}) - u_{\text{ин.}}} + 20 - 10 \cdot \lg \tau, ^\circ\text{C}, \quad (1.3)$$

де $u_{\text{ин.}}$ – інтегральна вологість насіння, %; τ – тривалість сушіння, хв.

Особливістю олійних культур є великий вміст жирів у насінні, які є гідрофобними речовинами, а вода в насінні зв'язана лише білково-вуглеводним (гідрофільним) комплексом. Внаслідок цього вологість гідрофільного комплексу значно вище інтегральної вологості. Цією особливістю пояснюється низька кондиційна вологість (8-10 %) насіння олійних культур. Взаємозв'язок між інтегральною і гідрофільною вологістю виражається залежністю [1]:

$$u_{\text{з.}} = \frac{u_{\text{ин.}}}{1 - 10^{-4} \cdot A_{\text{абс.}} \cdot (100 - u_{\text{ин.}})}, \%, \quad (1.4)$$

де $A_{\text{абс.}}$ – вміст олії в абсолютно сухому насінні, %.

В результаті експериментальних досліджень Ворошиловим А.І. була запропонована номограма, яка за вмістом олії в насінні, вологістю і тривалістю сушіння дозволяє встановити максимально допустиму температуру нагрівання насіння (рис. 1.17), [1].

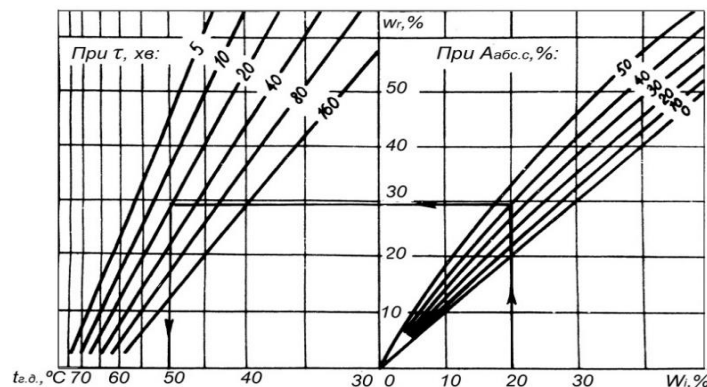


Рисунок 1.17 – Номограма для визначення допустимих температур нагрівання насіння олійних культур

Оробинський Д.Ф. встановив залежності між такими параметрами, як коефіцієнт швидкості сушіння, температура теплоносія і початкова вологість насіння льону [18]. Результати його досліджень представлені на рис. 1.18.

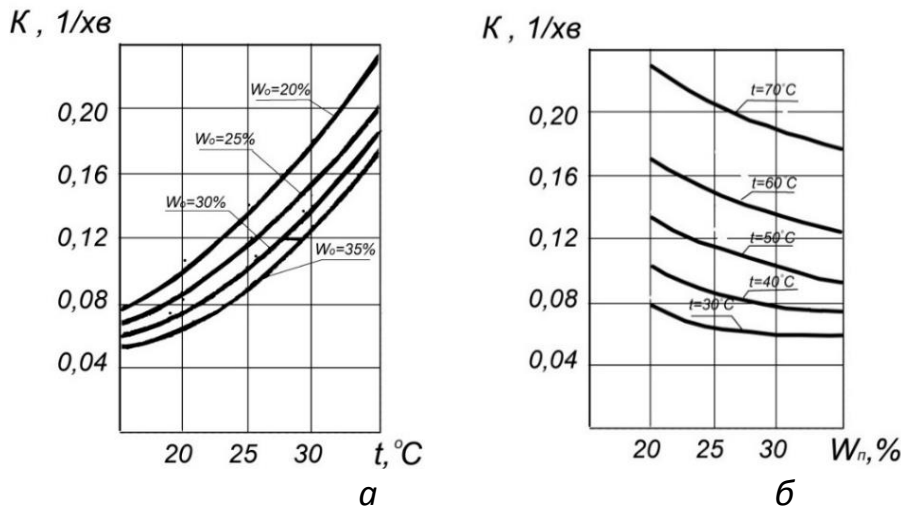


Рисунок 1.18 – Залежність коефіцієнта швидкості сушіння насіння льону олійного:
 а – від температури сушильного агента; б – від початкової вологості насіння.

У роботі Порєва І.А. досліджено процес сушіння насіння льону в коробочках. Порівняння кривих сушіння коробочок льону і їх компонентів представлено на рис. 1.19, [24].

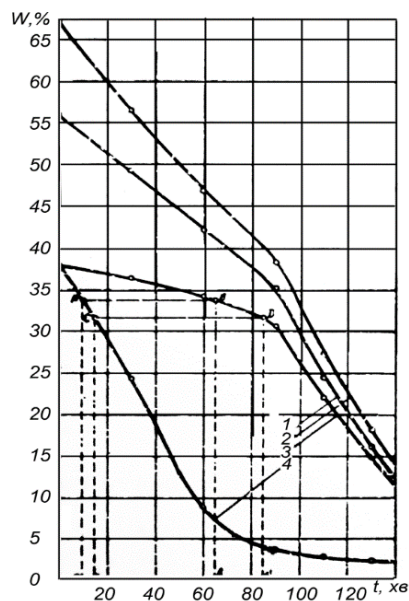


Рисунок 1.19 – Криві сушіння коробочок льону і їх компонентів: 1 – коробочка в цілому;
 2 – оболонка коробочки; 3 – насіння в коробочках; 4 – вільне насіння

В основі теоретичних досліджень процесу конвективного сушіння товстого шару матеріалу лежить опис цього процесу диференціальними рівняннями першого та другого порядків. Точність розв'язку таких рівнянь залежить від прийнятих припущень і умов, що в низці випадків можуть бути компенсовані введенням в математичні вирази встановлених експериментальним шляхом коефіцієнтів з використанням основних положень теорії тепло-масопереносу і теплопровідності [7, 8, 13, 14, 15, 17, 36].

Процес конвективного сушіння нерухомого шару матеріалу можна описати системою наступних диференціальних рівнянь[16]:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial x}{\partial \tau} = -\frac{\gamma_m \cdot c_m}{\gamma_n \cdot c_n} \cdot \frac{\partial \theta}{\varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_m \cdot r'}{\gamma_n \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}, \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\gamma_m \cdot \varepsilon}{\gamma_n \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial d}{\partial x} \right), \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \cdot \frac{\partial u}{\partial \tau} = -\frac{\alpha_q \cdot \gamma_m}{\gamma_n \cdot c_n \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta), \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = -K \cdot (u - u_p), \quad (1.8)$$

де t – температура сушильного агента °С; d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря; u – 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; u_p – рівноважна вологість матеріалу %; x – просторова координата, м; τ – час, год.

Рівняння (1.5) описує закон збереження енергії, (1.6) – закон збереження речовини, (1.7 і 1.8) – закони тепло- і масообміну між матеріалом і сушильним агентом.

Написання і розв'язок такого типу диференціальних рівнянь найбільш підходить для опису процесів сушіння суцільної маси ізотропних однорідних матеріалів. В інших випадках отримані математичні вирази дозволяють характеризувати лише фізичну суть процесу сушіння.

Іншим напрямком аналітичного опису процесу конвективного сушіння товстого шару матеріалу є дослідження закономірності руху зони сушіння [15]. Для визначення вологи і температури у будь-якій точці у певний момент часу інтегруються такі диференціальні рівняння:

$$\frac{dU}{d\tau} = a_{11} \cdot \nabla^2 \cdot U + a_{12} \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (1.9)$$

$$\frac{dU}{d\tau} = a_{12} \cdot \nabla^2 \cdot U + a_{22} \cdot \nabla^2 \cdot T, \quad (1.10)$$

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

Розв'язок наведеної задачі знайдено лише для окремих випадків, оскільки інтегрування рівнянь (1.9) і (1.10) є складною математичною задачею

[15] і не дає можливості отримати конкретні технологічні параметри для оптимізації процесу сушіння неоднорідних матеріалів.

Часто використовується у теоретичних дослідженнях сушіння сільськогосподарських матеріалів запропонований Г.С. Окунем [17] ступінчатий метод, при якому товстий шар матеріалу розглядається як сукупність елементарних шарів. Даний метод дає можливість отримати залежності для визначення тривалості сушіння, питомої подачі сушильного агента на одиницю матеріалу, що піддається сушінню, оцінити вплив цих параметрів на процес сушіння та встановити деякі інші теплоенергетичні показники.

1.5. Висновки і задачі досліджень

Підсумовуючи вищезазначене на основі проведеного огляду досліджень, що стосуються технології збирання і післязбиральної обробки льону олійного, можна відзначити наступне:

- для льону-довгунця і льону олійного застосовуються відмінні технології вирощування, збирання і післязбиральної обробки. Відмінність в технологіях збирання і післязбиральної обробки зумовлена їх біологічними та морфологічними відмінностями, і, як наслідок, основним призначенням цієї сільськогосподарської культури: отримання насіння із льону олійного, тоді як при вирощуванні льону-довгунця пріоритетним є одержання високоякісного волокна;

- ворох насіння льону олійного, що отримується після збирання, має досить високий ступінь забруднення. Щоб уникнути самозігрівання і псування, він потребує попереднього очищення. Ворох насіння льону олійного є матеріалом, що відрізняється за властивостями від вороху льону довгунця, а отже, дослідження, присвячені вивченню льону-довгунця, не можуть розглядатись як такі, що розкривають питання, пов'язані з льоном олійним;

- домішки у воросі мають більшу вологість, ніж саме насіння, попереднє очищення вороху дозволяє знизити вологість матеріалу за рахунок відокремлення більш вологих решток рослин від насінневої маси. Для зберігання насіння льону олійного його відносна вологість після очищення не повинна перевищувати 10 %;

- вологість вороху насіння льону олійного в значній мірі визначає його фізико-механічні властивості. Очищення вороху з високою вологістю ускладнене в порівнянні з ворохом низької вологості. Попереднє очищення є важливою операцією, оскільки зумовлює видалення надлишкової вологи разом з домішками, вологість яких значно перевищує вологість насіння, а також видалення крупних соломистих домішок, які негативно впливають на технологічний процес сушіння;

— малі розміри насіння льону олійного, висока щільність і злипання ускладнюють переміщення повітря крізь нерухомий шар, зумовлюють необхідність його перемішування в процесі сушіння. Наявні типи сушарок, які використовуються для сушіння насіння льону олійного, мають недоліки, пов'язані з низькою енергоефективністю, великими габаритними розмірами, мобільністю, забезпеченням раціональних режимних параметрів, рівномірністю сушіння без пересушування чи недосушування окремих частин матеріалу, залежністю якості технологічного процесу сушіння від ступеня забруднення матеріалу;

— усунення наявних недоліків можливе шляхом створення спеціальних засобів сушіння льону олійного з врахуванням його особливостей.

У зв'язку з цим та відповідно до поставленої мети у цій роботі необхідно вирішити такі завдання:

— теоретично обґрунтувати інтенсифікацію процесу сушіння вороху насіння льону олійного шляхом перемішування і розпушування шару матеріалу;

— вдосконалити математичну модель конвективного сушіння шару матеріалу в циліндричній камері сушарки, при переміщенні фронту сушіння від центру до периферії сушарки;

— теоретично дослідити процес перемішування і розпушування насінневого матеріалу активаторами сушарки та встановити їх конструктивні параметри;

— експериментально дослідити кінетику сушіння насіння льону олійного та визначити раціональні режими роботи сушарки;

— дослідити вплив режимів сушіння на енергію проростання і схожість насіння льону олійного, а також на його технологічні властивості

— обґрунтувати параметри сушарки, провести виробничу перевірку та визначити економічну ефективність запропонованого сушильного обладнання.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СУШАРКИ НАСІННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО

2.1. Порівняльний аналіз технологій збирання та первинної переробки насіння льону-довгунця і льону олійного з розробкою нової конструкції сушарки

Ворох льону-довгунця, що отримується в результаті збирання врожаю льонокомбайном, – це багатокомпонентна волокниста суміш, яка є несипким, важкороздільним матеріалом [12]. Для розділення маси вороху льону-довгунця під час його обробки необхідно затратити значні зусилля, особливо у випадках високої вологості і при значному вмісті плутанини (стеблової волокнистої зв'язаної рослинної маси). Найбільшого поширення у післязбиральній обробці вороху льону-довгунця знайшли карусельні, конвеєрні, напільні та подові сушарки [5].

Ворох насіння льону олійного, одержаний в результаті обмолочування, є сипкою багатокомпонентною сумішшю, що містить вільне насіння, цілі і пошкоджені коробочки з насінням, частинки стебел льону і бур'янів та інші домішки, співвідношення яких залежить від різних факторів. Цей ворох може мати різну вологість і підлягає попередньому (грубому) очищенню. Очищений ворох насіння, що є сипким матеріалом, піддають сушінню і кінцевому тонкому очищенню.

На рис 2.1 представлена порівняльна схема технологій одержання насіння з льону-довгунця і льону олійного.

На відміну від зв'язаного важкороздільного вороху насіння льону довгунця, фізико-механічні властивості вороху насіння льону олійного, що піддається сушінню, дозволяють розглядати його як сипкий матеріал.

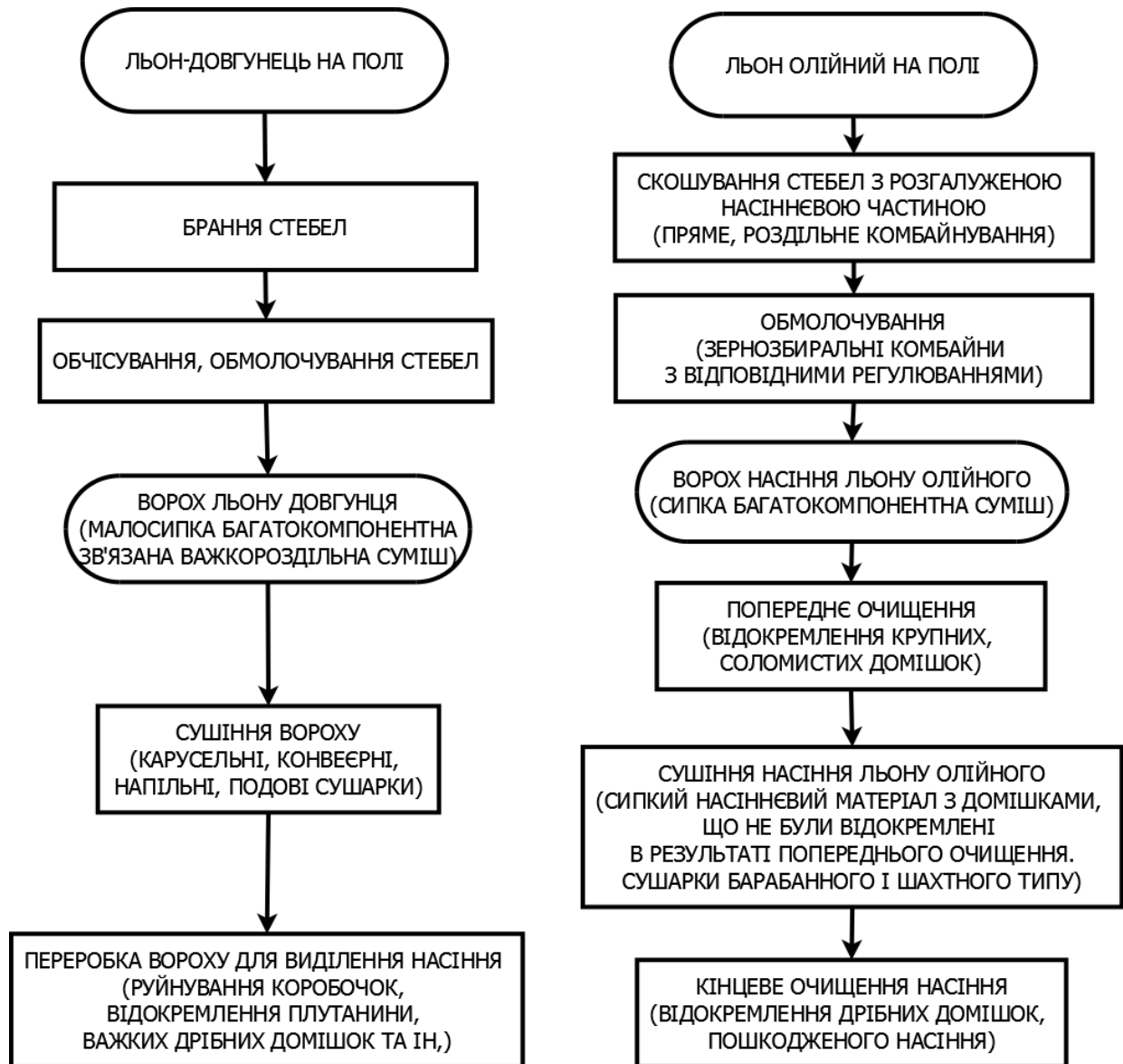


Рисунок 2.1 – Технологічні схеми одержання насіння з льону-довгунця і льону олійного

Сушіння сипкого матеріалу може відбуватися при різних станах шару матеріалу (рис. 2.2), які визначаються конструктивними особливостями сушарок [6].

Щільний малорухомий шар характеризується тим, що при зміщенні окремих частинок одна відносно одної контакт між ними зберігається, активна поверхня змінюється, але її величина не перевищує поверхню в щільному нерухомому шарі. Цей шар характерний для шахтних прямоточних сушарок.

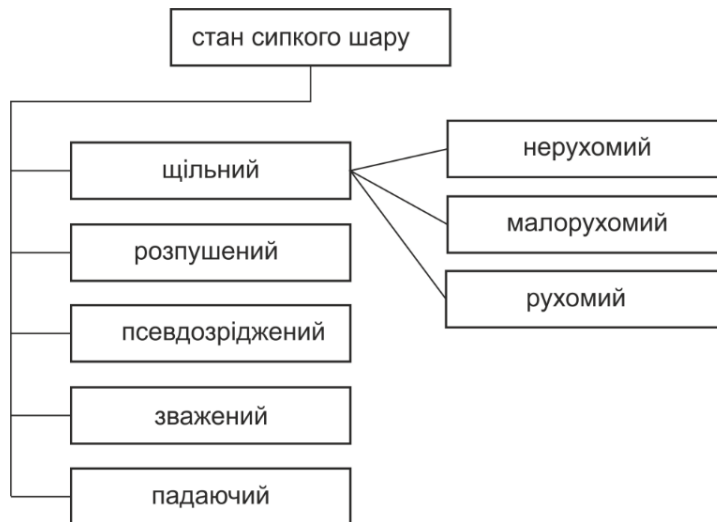


Рисунок 2.2 – Стани шару сипкого матеріалу, що піддається сушінню

Щільний рухомий шар характеризується тим, що швидкість гравітаційного переміщення шару матеріалу в декілька разів перевищує швидкість в щільному малорухомому шарі. Нерівномірність сушіння значно знижується порівняно з нерухомим і малорухомим шаром. Сушіння в рухомому щільному шарі відбувається в рециркуляційних сушарках.

Крім відомих недоліків сушіння в щільному шарі матеріалу, а саме: нерівномірність сушіння, низька площа контакту матеріалу з сушильним агентом, також може мати місце ускладнене проходження сушильного агента крізь шар насіння льону. Форма і дрібні розміри насіння льону зумовлюють високу щільність його нерухомого шару.

Сушіння в псевдозрідженому стані забезпечується підвищеною швидкістю повітряного потоку, що проходить крізь шар матеріалу. В псевдозрідженому стані час перебування частинок матеріалу в зоні сушіння неоднаковий, що може призвести до нерівномірного сушіння. Така проблема може постати особливо гостро для дрібного, чутливого до перегрівання, насіння льону. Для усунення цього недоліку застосовують примусове переміщення псевдозрідженого шару, що зумовлює додаткові енергозатрати.

Сушіння у зваженому шарі забезпечується повітряним потоком, швидкість якого перевищує швидкість витання частинок матеріалу в 2...2,5 рази. Такий спосіб забезпечує максимальну площу контакту матеріалу з сушильним агентом, проте передбачає додаткові енергозатрати на створення повітряного потоку високої швидкості. До того ж, для багатокомпонентної суміші вороху насіння льону олійного, з різною швидкістю витання компонентів постає проблема сегрегації матеріалу. Цей спосіб знаходить застосування для швидкого нагрівання матеріалу з подальшим сушінням в щільному шарі.

Сушіння в падаючому шарі застосовується в спеціальних пристроях для швидкого нагрівання перед подальшим сушінням в щільному шарі. Тривалість перебування насіння в робочій зоні цих пристроїв не перевищує 2...3 с.

Сушіння в розпушеному шарі характеризується тими ж особливостями, що і сушіння в щільному рухомому шарі. Відмінність полягає в тому, що переміщення шару матеріалу здійснюється механічним шляхом. Прикладом сушарок, що забезпечують сушіння зазначеним способом, є барабанні сушарки.

Розпушування шару вороху льону олійного забезпечить зростання рівномірності і ефективності сушіння. Тоді ж механічна дія на насіння зумовлює його пошкодження. Травмування насіння негативно впливає на його технологічні властивості, знижує його схожість і життєздатність.

Для механічного перемішування і розпушування сипкого матеріалу найбільш широкого застосування набули конструкції барабанного типу [3, 11]. Перемішування і розпушування матеріалу відбувається в результаті обертання барабану навколо осі під деяким кутом до горизонту (рис. 2.3, а). Реалізацією такої конструкції є барабанні сушарки.

Іншим способом перемішування і розпушування сипкого матеріалу механічним методом є застосування різних рухомих (активних) робочих органів (активаторів) [10], а саме: лопатеві мішалки, шнеки (рис. 2.3, б, в). Дані конструкції дозволяють більш ефективно використовувати об'єм камери сушіння, але суттєвим недоліком є пошкодження матеріалу в результаті їх дії.

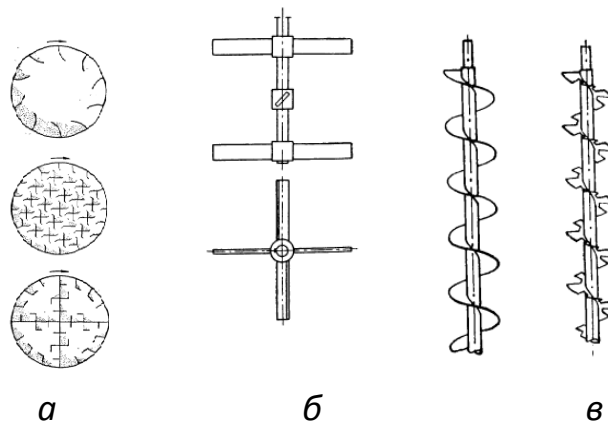


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення механізмів для перемішування і розпушування сипких матеріалів: а – переріз барабана сушарки барабанного типу; б – лопаті; в – шнеки

Доцільність застосування активаторів для перемішування і розпушування вразливих матеріалів, таких як насіння льону олійного, повинна бути обґрунтована низьким ступенем пошкодження матеріалу. Очевидним є те, що конструкції робочих органів, що містять гострі краї, створюють надмірні напруження стиску в окремих ділянках матеріалу, неминуче зумовлюють його пошкодження і додаткові невинуваті затрати енергії на подолання опору матеріалу. Лопатеві та інші схожі за конструкцією робочі органи не можуть бути

застосовані для розпушування насіння льону олійного в процесі сушіння. Низького ступеня пошкодження шнековими робочими органами можливо досягнути у випадку правильно підібраних їх конструктивних і режимних параметрів.

З метою інтенсифікації процесу сушіння насіння льону олійного шляхом його розпушування і перемішування запропоновано використовувати спіралеподібні активатори, що являють собою профіль з круглим перерізом, закручений у формі циліндричної спіралі з постійним кроком. Перевага робочого органу такої конструкції порівняно зі шнековими активаторами полягає в можливості більш ефективного використання простору сушильної камери. Можливість більш щільного, ніж для шнеків, взаємного розташування запропонованих активаторів дозволяє забезпечити ефективне розпушування матеріалу за усім об'ємом сушильної камери (рис. 2.4).

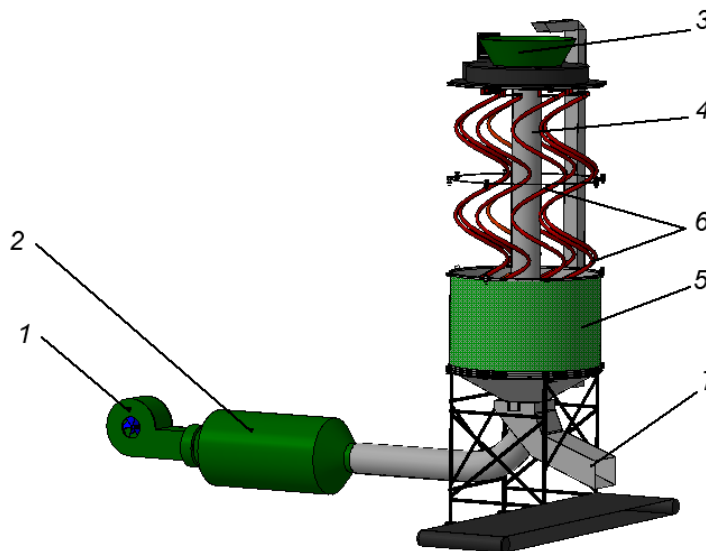


Рисунок 2.4 – Схема сушарки насіння льону олійного: 1 – вентилятор; 2 – камера для приготування сушильного агента; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – внутрішня перфорована колона; 5 – зовнішня перфорована стінка; 6 – спіральні активатори; 7 – вивантажувальний пристрій

Відсутність гострих країв, невисока частота обертання, а також обертання активаторів у напрямку, що забезпечує підйом витка спіралі, виключає створення критичних напружень в окремих ділянках матеріалу і забезпечує мінімальний ступінь пошкодження матеріалу.

2.2. Дослідження процесу переміщення матеріалу поверхнею спіралеподібного активатора

Активну поверхню (поверхня взаємодії з матеріалом) активатора запропонованої конструкції можна розглядати як об'ємну геометричну фігуру, поверхня якої описана колом. Точка центру кола $o' - o'' - o'''$ переміщується в

просторі у напрямку циліндричної спіралі з постійним кроком. При цьому дотична до об'ємної кривої у формі циліндричної спіралі проходить перпендикулярно до площини кола $p' - p'' - p'''$ (рис. 2.5).

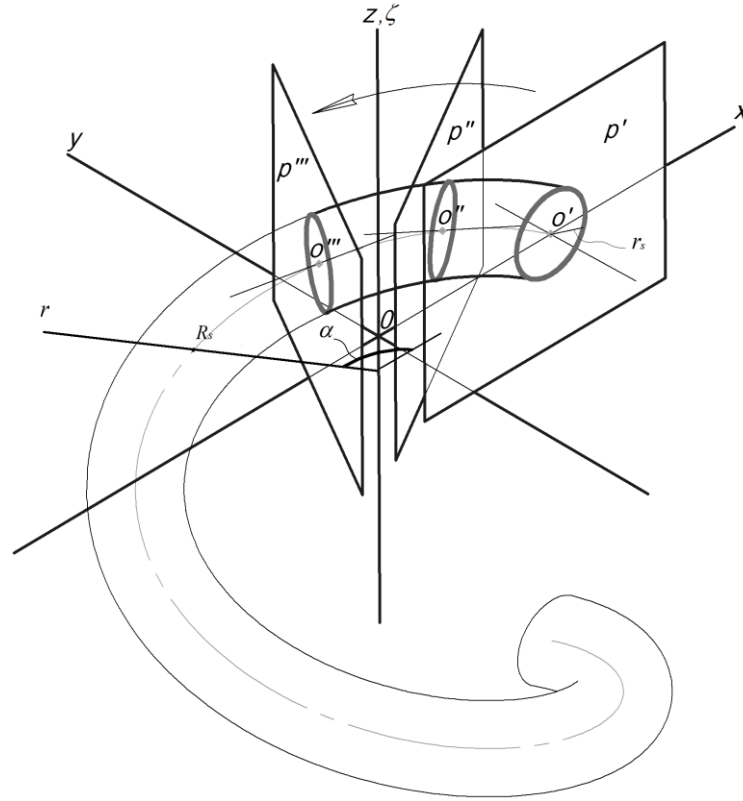


Рисунок 2.5 – Утворення поверхні активатора переміщенням кола з центром O вздовж кривої у формі циліндричної спіралі

Рівняння, що описує форму цієї поверхні, доцільніше представити в циліндричній системі координат, яка задається через радіус r , кут α і координату ζ . Рівняння гвинтової поверхні активатора у формі $f = f(r, \alpha, \zeta) = 0$ матиме такий вигляд:

$$\zeta - \sqrt{r_s^2 - (R_s - r)^2} + \frac{\alpha \cdot k_s}{2 \cdot \pi} = 0, \quad (2.1)$$

де R_s – радіус витка твірної спіралеподібної поверхні, м; r_s – радіус кола, що описує спіралеподібну поверхню (товщина витка), м; k_s – крок спіралі, м.

Відносний рух частинки шорсткою поверхнею в проекціях на циліндричну систему координат можна описати системою диференціальних рівнянь [1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\alpha}^2) = F_r + N \cdot \cos(\bar{e}_r, \bar{n}) - \\ - K \cdot |N| \cdot \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{er}) + (-m \cdot w_{kr}), \\ m \cdot (2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\alpha} + r \cdot \ddot{\alpha}) = F_\alpha + N \cdot \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) - \\ - K \cdot |N| \cdot \frac{r \cdot \dot{\alpha}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{e\alpha}) + (-m \cdot w_{k\alpha}), \\ m \cdot \ddot{\zeta} = F_\zeta + N \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) - \\ - K \cdot |N| \cdot \frac{\dot{\zeta}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} + (-m \cdot w_{e\zeta}) + (-m \cdot w_{k\zeta}), \end{array} \right. \quad (2.2)$$

де m – маса частинки, кг; r, α і ζ – координати відносного руху частинки; K – коефіцієнт тертя шорсткою поверхнею; F_r, F_α і F_ζ – проекції активних сил на осі рухомої системи координати; $\bar{e}_r, \bar{e}_\alpha$ і $\bar{e}_\zeta$ – одиничні вектори місцевого координатного базису, направлені по дотичних до координатних ліній r, α і ζ ; $\bar{n}$ – орт нормалі до поверхні; $w_{er}, w_{e\alpha}$ і $w_{e\zeta}$ – проекції прискорень переносного руху, м/с²; $w_{kr}, w_{k\alpha}$ і $w_{k\zeta}$ – проекції Коріолісових прискорень, м/с².

Значення направляючих косинусів нормальної реакції $\cos(\bar{e}_r, \bar{n})$, $\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n})$ і $\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n})$, що входять до системи рівнянь (2.2), може бути встановлено на основі теореми векторного числення про значення косинуса кута між двома відрізками прямих, що перетинаються [1]:

$$\begin{aligned} \cos(\bar{e}_r, \bar{n}) &= \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\xi) \cdot \cos(\bar{e}_\xi, n) + \\ &+ \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\eta) \cdot \cos(\bar{e}_\eta, n) + \cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\zeta) \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, n), \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) &= \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\xi) \cdot \cos(\bar{e}_\xi, n) + \\ &+ \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\eta) \cdot \cos(\bar{e}_\eta, n) + \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\zeta) \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, n), \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) = \cos(\bar{n}, \bar{\zeta}), \quad (2.5)$$

де

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos(\bar{e}_\xi, \bar{n}) = \cos(\bar{\xi}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \xi}}{\Delta f}, \\ \cos(\bar{e}_\eta, \bar{n}) = \cos(\bar{\eta}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \eta}}{\Delta f}, \\ \cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) = \cos(\bar{\zeta}, \bar{n}) = \frac{\frac{\partial f}{\partial \zeta}}{\Delta f}. \end{array} \right. \quad (2.6)$$

а також

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\xi) = \frac{\xi}{r} = \cos(\alpha), \quad (2.7)$$

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\eta) = \frac{\eta}{r} = \sin(\alpha), \quad (2.8)$$

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_\zeta) = 0, \quad (2.9)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\xi) = -\sin \alpha, \quad (2.10)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\eta) = \cos \alpha, \quad (2.11)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_\zeta) = 0. \quad (2.12)$$

$$\text{В (2.6) } \Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2} - \text{модуль градієнта.}$$

Після підстановки (2.6-2.12) в (2.3-2.5) з урахуванням залежностей, що описують взаємозв'язок між Декартовими і циліндричними координатами

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = r \cdot \cos(\alpha), \\ \eta = r \cdot \sin(\alpha), \\ \zeta = \zeta, \end{array} \right. \quad (2.13)$$

отримується:

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{n}) = - \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot (R_s - r)}{\sqrt{r_s^2 - (R_s - r)^2} \cdot \sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}}, \quad (2.14)$$

$$\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) = \frac{2 \cdot k}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}}, \quad (2.15)$$

$$\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n}) = \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\sqrt{k^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}}, \quad (2.16)$$

Прискорення переносного руху w_e за умови, що початки відліку нерухомої і рухомої систем координат лежать в одній точці ($z = \zeta$) і обертання рухомої системи координат навколо осі z відбувається з постійною кутовою швидкістю:

$$w_e = r \cdot \omega_e^2, \quad (2.17)$$

де ω_e – кутова швидкість обертання робочого органа, рад/с.

В проекціях на дотичні до координатних ліній:

$$\begin{cases} w_{er} = r \cdot \omega_e^2, \\ w_{e\alpha} = 0, \\ w_{e\zeta} = 0. \end{cases} \quad (2.18)$$

Прискорення Коріоліса:

$$\begin{cases} w_{kr} = -2 \cdot \omega_e \cdot r \cdot \dot{\alpha}, \\ w_{k\alpha} = 2 \cdot \omega_e \cdot \dot{r}, \\ w_{k\zeta} = 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

На елементарну частинку масою m діє сила тяжіння $m \cdot g$ вздовж координатної осі ζ , направлена в протилежному до неї напрямку.

Частинка, перебуваючи в середовищі сипкого матеріалу, постійно взаємодіє з іншими частинками матеріалу, що визначає характер її переміщення. Зважаючи на це, розглядати переміщення цієї частинки без урахування її взаємодії з іншими частинками не можна.

Перемішування сипкого матеріалу є складним процесом. Характер переміщення частинок матеріалу в сипкому середовищі залежить від багатьох факторів, зокрема властивостей матеріалу, конструктивних і режимних параметрів робочих органів машин і є складним для опису. Теорія, пов'язана з перемішуванням сипкого середовища, розвинена досить слабо і в основному базується на емпіричних залежностях і експериментальних коефіцієнтах,

встановлених для окремих матеріалів при їх взаємодії з робочими органами машин.

Ставлячи за мету дослідити вплив конструктивних і режимних параметрів робочих органів на інтенсивність розпушування і перемішування вороху льону олійного шляхом визначення впливу цих параметрів на траєкторію руху частинки спіралеподібною поверхнею, процес взаємодії цієї частинки з сипким середовищем розглянуто з певним наближенням, керуючись такими припущеннями:

— в будь-який момент часу частинка, що перебуває в об'ємі матеріалу, контактує одночасно з n іншими частинками матеріалу (рис. 2.6). Кількість частинок n є непостійною в часі і змінюється в певному інтервалі. Їх мінімальна і максимальна кількість залежить від форми орієнтації в просторі, насипної щільності матеріалу та інших факторів.

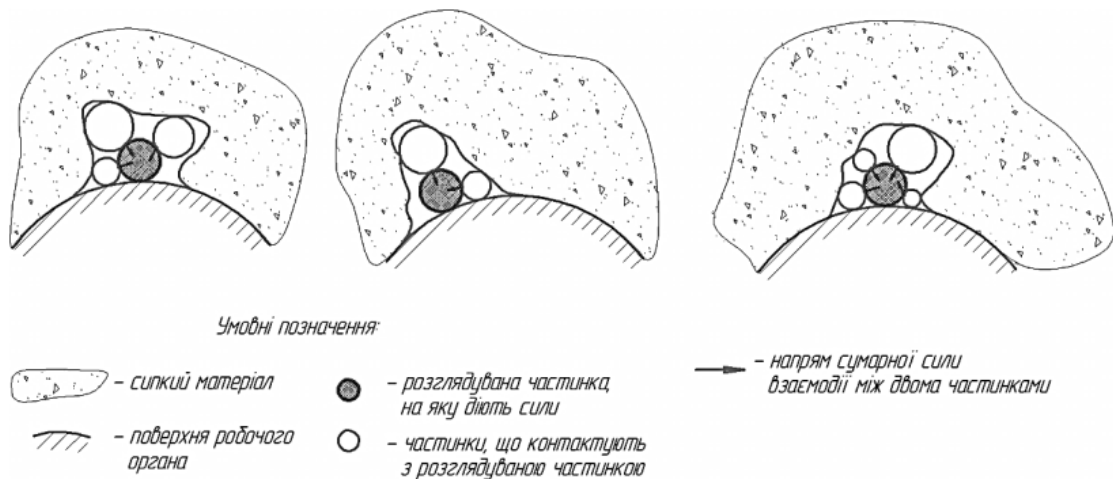


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення можливих варіантів взаємодії частинок матеріалу на поверхні активатора

— сили, які діють на частинку в результаті її взаємодії з іншими частинками середовища, розглядаються як результуюча сила, рівна векторній сумі цих сил. Величина і напрям цієї сили приймаються випадковими величинами, що варіюються з часом в певних інтервалах;

— напрям прикладення результуючої сили взаємодії сусідніх частинок з частинкою, що розглядається, вважається обмеженим в просторі площиною, що дотична до спіралеподібної поверхні активатора в точці його контакту з розглядуваною частинкою. Оскільки за умовами нашої задачі траєкторія руху частинки лежить на спіралеподібній поверхні, то враховується лише складова проекції цієї сили на дотичну до поверхні площину в точці контакту з частинкою. Перпендикулярна до цієї площини складова сили врівноважується нормальною реакцією N ;

– величина результуючої сили змінюється від нуля до максимального значення, що залежить від властивостей матеріалу, умов і режимів роботи сушарки.

Точність моделі визначатиметься тим, на скільки правильно підібрані значення максимальної результуючої сили, а також характеру зміни її величини і напрямку.

Результуюча сила взаємодії частинки з сусідніми частинками матеріалу:

$$\bar{F}_{63.} = \bar{F}_{63.}^{\tau} + \bar{F}_{63.}^n. \quad (2.20)$$

Приймаючи, що нормальна складова результуючої сили $\bar{F}_{63.}^n$ врівноважується нормальною реакцією поверхні N , для даної моделі достатньо буде задати проекцію тангенціальної складової сили $\bar{F}_{63.}^{\tau}$ на дотичні до координатних ліній r , α і ζ .

$\bar{F}_{63.}^{\tau}$ лежить в площині T , дотичній до криволінійної поверхні в точці контакту з частинкою (рис.2.7).

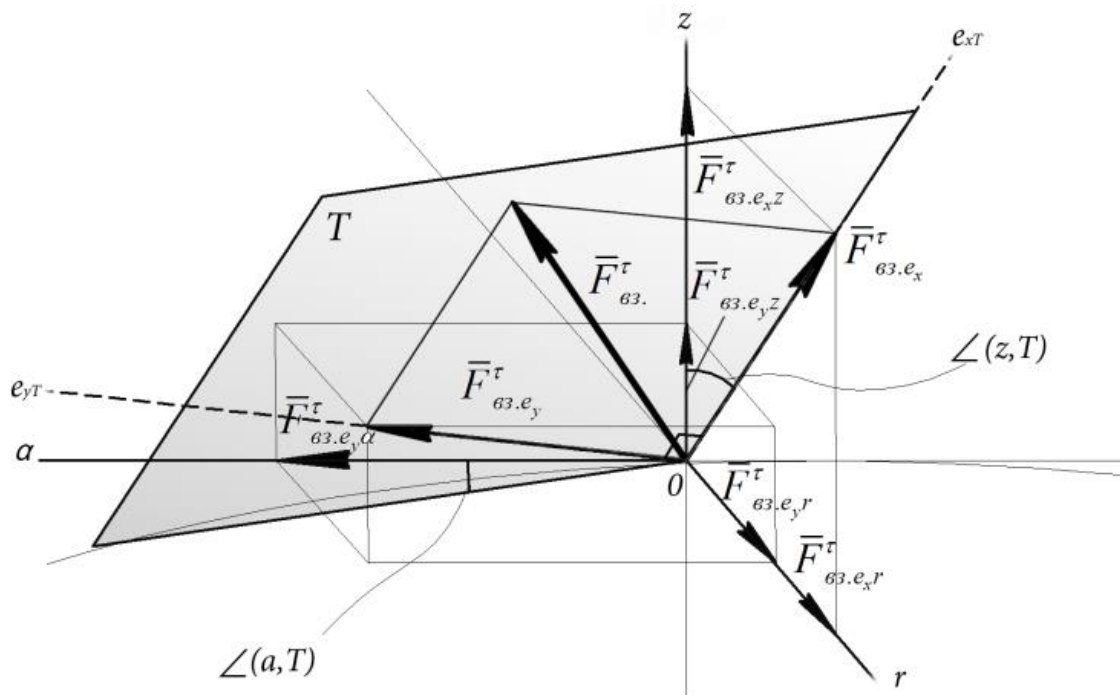


Рисунок 2.7 – Схема для визначення тангенціальної складової сили взаємодії частинки вороху насіння льону олійного з матеріалом на поверхні активатора

Щоб задати напрямок дії $\bar{F}_{63.}^{\tau}$, введено місцевий координатний базис прямокутної системи координат на площині T з ортами осей $\bar{e}_{x'\tau}$ і $\bar{e}_{y'\tau}$ і початком відріку в точці O контакту частинки з поверхнею. При цьому один з

одиничних векторів $\bar{e}_{x'\tau}$ розміщено в площині, дотичній до координатних ліній r, z .

Тоді

$$\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau} + \bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau}, \quad (2.21)$$

$$|\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}| = \sqrt{|\bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau}|^2 + |\bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau}|^2}. \quad (2.22)$$

Тангенціальна складова сили взаємодії $\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}$ і її проекції на координати з ортами осей $\bar{e}_{x'\tau}$ і $\bar{e}_{y'\tau}$ визначалася в такій послідовності:

$$|\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}| = rand\left[0, |\bar{F}_{\theta 3.max}^{\tau}|\right], \quad (2.23)$$

$$\pm \bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau} = rand\left[0, |\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}|\right] \cdot \bar{e}_{x'\tau}, \quad (2.24)$$

$$\pm \bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau} = \sqrt{|\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}|^2 - |\bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau}|^2} \cdot \bar{e}_{y'\tau}, \quad (2.25)$$

де $rand[a, b]$ – випадкова величина, що імітує значення результуючої сили взаємодії частинки з матеріалом, генерується в інтервалі чисел від мінімального a до максимального b .

Знак « $\pm$ » означає, що сили можуть бути прикладені як в прямому, так і в протилежному напрямку відносно орт $\bar{e}_{x'\tau}$ і $\bar{e}_{y'\tau}$ координатних осей місцевого координатного базису на дотичній площині.

Проекції $\bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau}$ і $\bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau}$ тангенціальної складової сили $\bar{F}_{\theta 3.}^{\tau}$ на дотичні до координатних ліній r, α і ζ циліндричної системи координат можна виразити:

$$\begin{cases} \bar{F}_{\theta 3.r}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'r}^{\tau} + \bar{F}_{\theta 3.y'r}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_r) + \bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{y'\tau}, \bar{e}_r), \\ \bar{F}_{\theta 3.\alpha}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'\alpha}^{\tau} + \bar{F}_{\theta 3.y'\alpha}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_{\alpha}) + \bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{y'\tau}, \bar{e}_{\alpha}), \\ \bar{F}_{\theta 3.\zeta}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'\zeta}^{\tau} + \bar{F}_{\theta 3.y'\zeta}^{\tau} = \bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_{\zeta}) + \bar{F}_{\theta 3.y'}^{\tau} \cdot \cos(\bar{e}_{y'\tau}, \bar{e}_{\zeta}). \end{cases} \quad (2.26)$$

Щоб спроектувати складові сили $\bar{F}_{\theta 3.e_{\chi\tau}}^{\tau}$ і $\bar{F}_{\theta 3.e_{y\tau}}^{\tau}$ на дотичні до координатних ліній r, α і ζ , необхідно встановити значення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$, $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{x'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_{\zeta}, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_{\zeta}, \bar{e}_{y'\tau})$.

Складова результуючої сили $\bar{F}_{\theta 3.x'}^{\tau}$ лежить в площині $r\zeta$, $\angle(\bar{e}_{\alpha}, \bar{e}_{x'\tau}) = 0$.

Для визначення кутів $\angle(r, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_{\zeta}, \bar{e}_{x'\tau})$ розглянуто рівняння (2.1) з фіксованим значенням α (рис.2.8). Тоді функція набуває вигляду $\zeta = f(r)$ і

описує коло на площині $r\zeta$, утворене перетином об'ємної поверхні циліндричної спіралі і цією площиною.

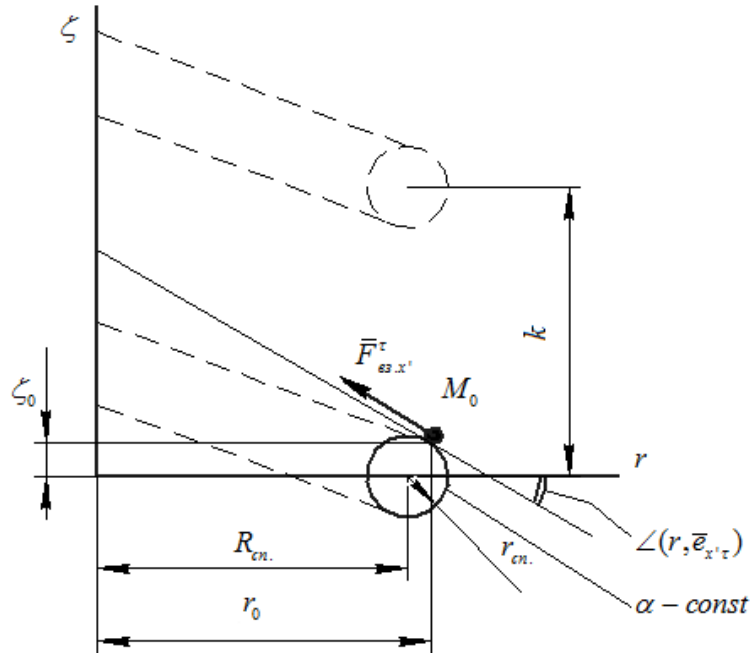


Рисунок – 2.8. Схема до визначення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau})$

Значення кута $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau})$ для функції $\zeta = f(r)$ можна знайти за формулою [1]:

$$\operatorname{tg}(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau}) = \frac{df}{dr}. \quad (2.27)$$

Тоді

$$\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{x'\tau}) = 90^\circ - \angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau}) = \arctg\left(\frac{R_s - r}{\sqrt{r_s^2 - (R_s - r)^2}}\right). \quad (2.28)$$

Значення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{y'\tau})$ може бути встановлено за відомими косинусами кутів $\cos(\bar{e}_r, \bar{n})$, $\cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n})$ і $\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{n})$, (2.14-2.16), між нормаллю до поверхні і дотичними до координатних ліній r , α і ζ (рис.2.9).

$$\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y'\tau}) = 90^\circ - \angle(\bar{e}_\alpha, \bar{n}), \quad (2.29)$$

$$\cos(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{y'\tau}) = \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) \cdot \cos(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{x'\tau}), \quad (2.30)$$

$$\cos(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau}) = \cos(\bar{e}_\alpha, \bar{n}) \cdot \cos(\bar{e}_{x'\tau}, \bar{e}_\zeta). \quad (2.31)$$

Сумарні проекції сил на дотичні до координатних ліній

$$\begin{cases} F_r = \bar{F}_{r.\beta 3.}^\tau \\ F_\alpha = \bar{F}_{\alpha.\beta 3.}^\tau \\ F_\zeta = -m \cdot g + \bar{F}_{\zeta.\beta 3.}^\tau \end{cases} \quad (2.32)$$

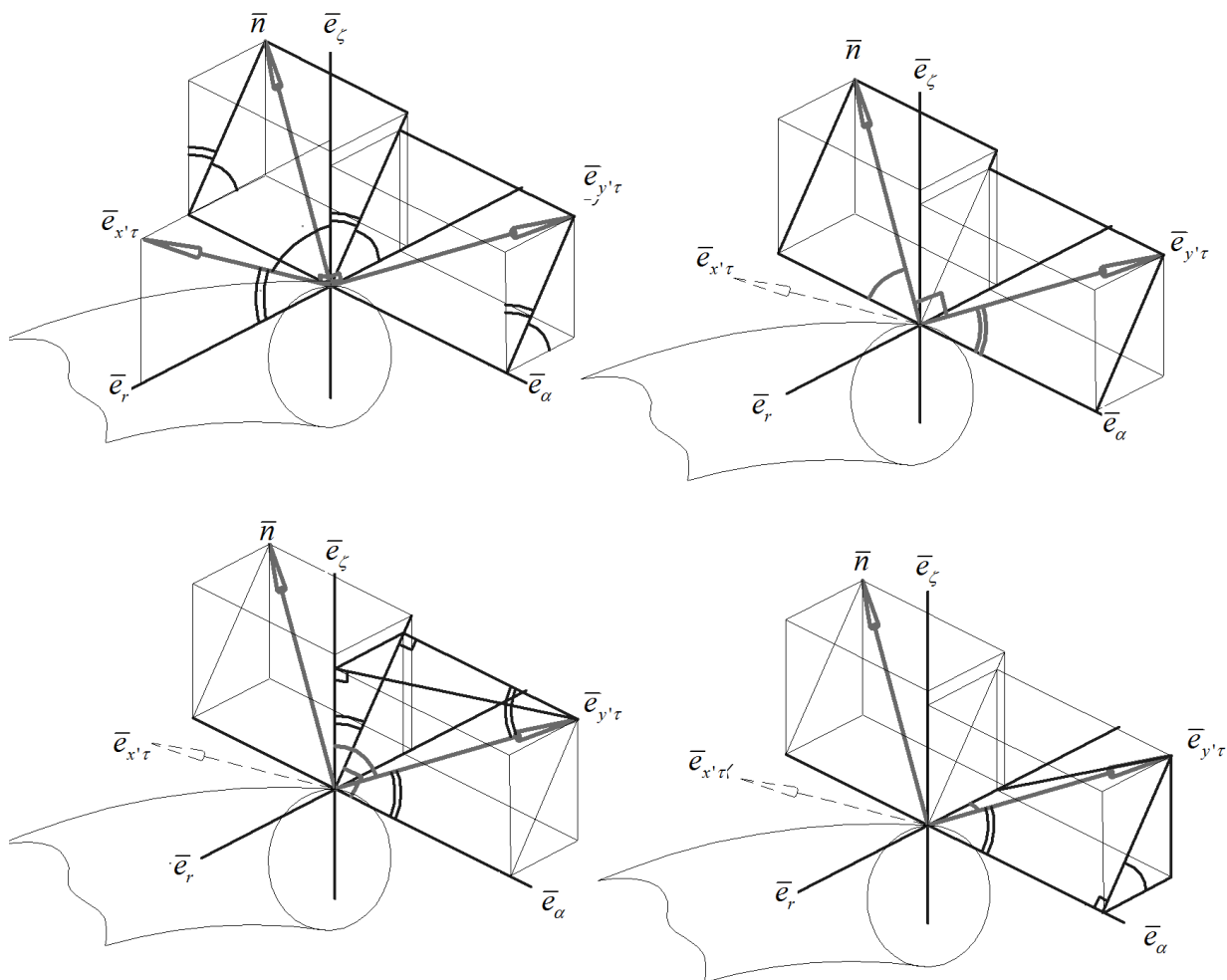


Рисунок 2.9 – Схема до визначення кутів $\angle(\bar{e}_r, \bar{e}_{y'\tau})$, $\angle(\bar{e}_\alpha, \bar{e}_{y'\tau})$ і $\angle(\bar{e}_\zeta, \bar{e}_{y'\tau})$

Підставивши (2.18-2.32) в (2.2) і приєднавши рівняння (2.1) після спрощення отримається система:

$$\left\{ \begin{aligned}
 m \cdot (\ddot{r} - r \cdot \dot{\alpha}^2) &= \bar{F}_{r, \text{вз.}}^r - N \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot (R_s - r)}{\sqrt{r_s^2 - (R_s - r)^2} \cdot \sqrt{k_s^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}} - \\
 &\quad - \kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} - m \cdot (r \cdot \omega_e^2 - 2 \cdot \omega_e \cdot r \cdot \dot{\alpha}), \\
 m \cdot (2 \cdot \dot{r} \cdot \dot{\alpha} + r \cdot \ddot{\alpha}) &= \bar{F}_{\alpha, \text{вз.}}^r + N \cdot \frac{2 \cdot k_s}{\sqrt{k_s^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}} - \\
 &\quad - \kappa \cdot |N| \cdot \frac{r \cdot \dot{\alpha}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}} - m \cdot 2 \cdot \omega_e \cdot \dot{r}, \\
 m \cdot \ddot{\zeta} &= -m \cdot g + \bar{F}_{\zeta, \text{вз.}}^r + N \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot r}{\sqrt{k_s^2 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot r^2 \cdot r_s^2}{r_s^2 - (R_s - r)^2}}} - \\
 &\quad - \kappa \cdot |N| \cdot \frac{\dot{\zeta}}{\sqrt{\dot{r}^2 + r^2 \cdot \dot{\alpha}^2 + \dot{\zeta}^2}}, \\
 \zeta - \sqrt{r_s^2 - (R_s - r)^2} + \frac{\alpha \cdot k_s}{2 \cdot \pi} &= 0.
 \end{aligned} \right. \quad (2.33)$$

Система складається з чотирьох рівнянь, які містять три невідомі координати, перші і другі похідні від них за часом, а також невідому нормальну реакцію N і з урахуванням (2.23-2.32) підлягає розв'язку з використанням числових методів.

Розв'язок одержано за допомогою системи динамічного моделювання ModelVision Studium 3.2 Free методом Рунге-Кутти 4-го порядку (рис. 2.10).

На рис. 2.10, б схематично показаний характер переміщення частинки у просторі. Для кожного нового розрахунку реалізація траєкторії буде іншою, оскільки величина і напрям сил взаємодії матеріалу з частинкою в запропонованій моделі описується законами теорії ймовірності.

За критерій оцінки ефективності перемішування було прийнято добуток середньої тривалості контакту частинки матеріалу з активатором на частоту його обертання. Найбільша усереднена абсолютна траєкторія частинки, яка контактує з поверхнею активатора, розглядалася як така, за якої перемішування матеріалу найбільш ефективне.

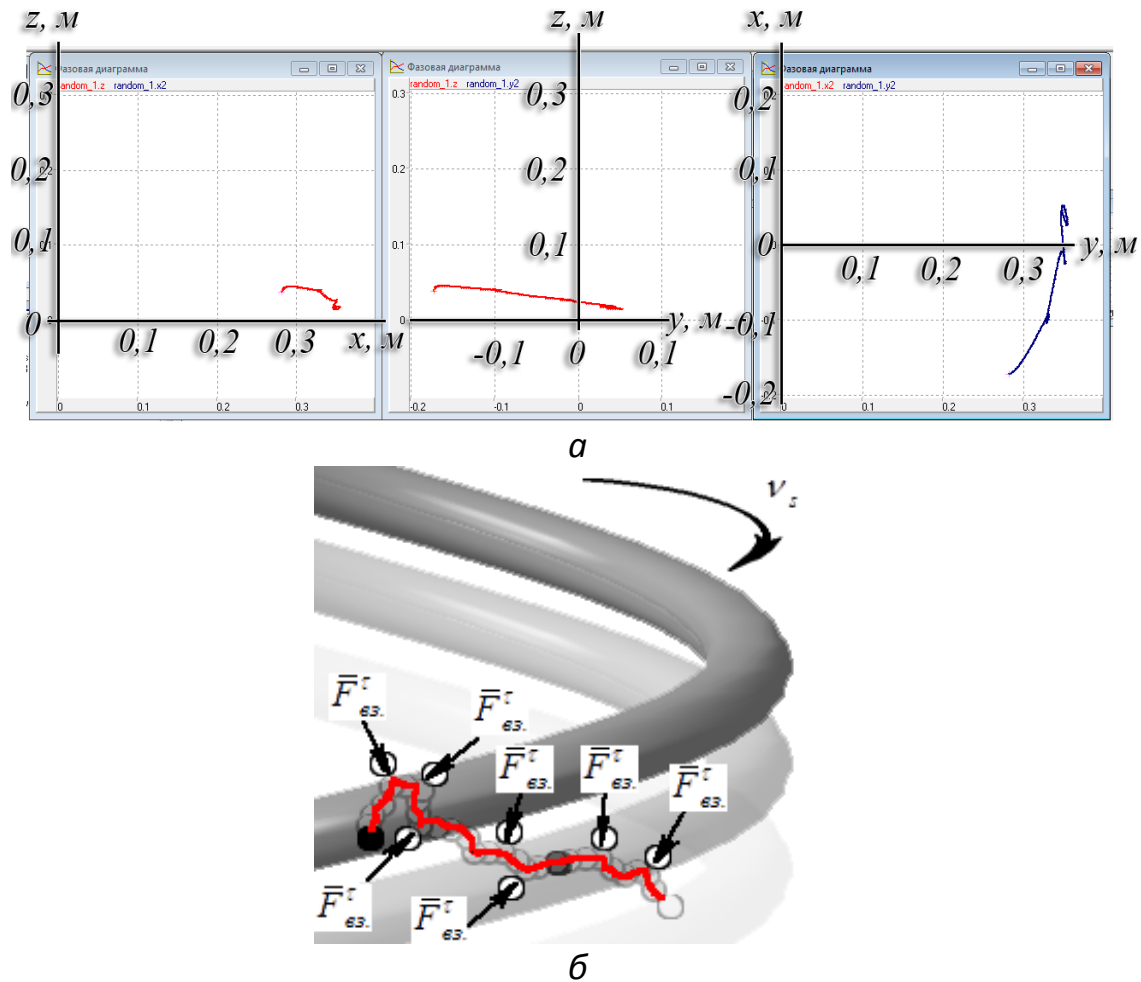


Рисунок 2.10 – Траєкторії руху частинки на шорсткій спіральній поверхні:
 а – проєкції на взаємно перпендикулярні площини x-y, y-z і x-z отримані для наступних параметрів: $r_{cn.} = 0,02$ м, $2 \cdot R_s = 0,3$ м, $k_s = 0,3$ м, $\omega = 1$ рад/с, $\kappa = 0,2$, $m = 0,05$ кг, $|\bar{F}_{63}^{\tau \max}| = 3,5$ Н; б – графічна інтерпретація моделі

Для створеної моделі був проведений числовий експеримент, що полягав у багаторазових розрахунках для різних параметрів робочих органів. За результатами розрахунків встановлені усереднені значення тривалості контакту насінини з матеріалом (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Усереднені значення тривалості контакту частинки з шорсткою поверхнею активатора

k = 0,2 м				k = 0,4 м			
d/2 = 0,0025 м		d/2 = 0,005 м		d/2 = 0,0025		d/2 = 0,005 м	
$v_r = 0,1$ рад/с	$v_r = 1$ рад/с	$v_r = 0,1$ рад/с	$v_r = 1$ рад/с	$v_r = 0,1$ рад/с	$v_r = 1$ рад/с	$v_r = 0,1$ рад/с	$v_r = 1$ рад/с
$t_{\text{cep}}, \text{XB}$							
0,101	0,1616	0,1426	0,1614	0,1256	0,1342	0,1818	0,2136
$t_{\text{cep}} \cdot v_r, \text{рад}$							
0,0101	0,1616	0,01426	0,1614	0,01256	0,1342	0,01818	0,2136

Встановлено, що найбільша середня тривалість контакту частинки зі спіралеподібною поверхнею в досліджуваному діапазоні варіювання параметрів склала 0,21 с при $v_r=1$ рад/с і наступних конструктивних параметрах активатора $k=0,4$ м, $d=0,01$ м, $v_r=1$ рад/с, $D=0,3$ м. Діапазон варіювання конструктивних параметрів активаторів приймався виходячи з конструктивних міркувань і перебував в таких межах:

- крок спіралі $k=0,2...0,4$ м;
- діаметр витка спіралі $d=0,005-0,01$ м;
- частота обертання спіралі $v_r=0,1-1$ рад/с.

2.3. Математична модель процесу сушіння шару насіння льону олійного

У процесі конвективного сушіння відбувається тепло- і масообмін між матеріалом і агентом сушіння, в результаті спостерігається зміна параметрів сушильного агента і матеріалу в просторі і часі.

Основними параметрами, що характеризують матеріал в процесі сушіння, є його вологість u , температура ϑ , а параметрами сушильного агента – вологовміст d і температура t . На процес сушіння також впливають властивості матеріалу, зокрема питома теплоємність c_m , пористість ξ та ін.

На рис. 2.11 показано шар матеріалу товщиною H , розбитий умовно на n тонких шарів h . Загальний час сушіння τ вважається сумою однакових коротких проміжків часу $\Delta\tau$. В довільному i -му шарі товщиною h вологість u_i і температура ϑ_i вважаються постійними в межах цього шару. Параметри сушильного агента вологовміст d_0 і температура t_0 на вході в шар матеріалу H є початковими на вході у перший тонкий шар h_1 . Вологовміст d_{s1} і температура t_{s1} на виході з цього шару є початковими для наступного тонкого шару h_2 , відповідно параметри d_i і t_i на виході з кожного n -го тонкого шару h_i є початковими для кожного наступного тонкого шару h_{i+1} .

Вологість $u_{i,j}$ і температура $\vartheta_{i,j}$ матеріалу в кожному i -му тонкому шарі в кінці довільного короткого проміжку часу $\Delta\tau_j$ є початковими для кожного наступного короткого проміжку часу $\Delta\tau_{j+1}$. Вологість u_0 і температура ϑ_0 на початку сушіння τ_0 є початковими для кожного тонкого шару h_i і однаковими за всім об'ємом шару матеріалу H .

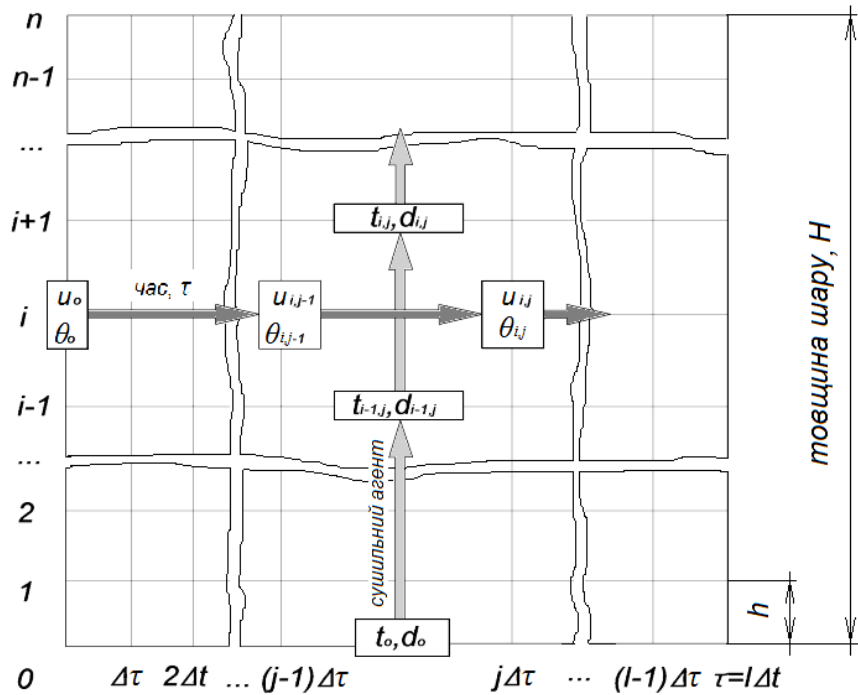


Рисунок 2.11 – Схема взаємозв'язку параметрів сушіння в просторі і часі

Зміну вологості i -го тонкого шару матеріалу з часом доцільно виразити через залежність Гендерсона-Пабіса (Henderson-Pabis), що дозволяє розрахувати потрібну величину з достатньо високою точністю [15, 17, 18]:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j), \quad (2.34)$$

де MR – коефіцієнт, що характеризує зниження вологості матеріалу відносно початкової під час сушіння:

$$MR = \frac{u - u_p}{u_0 - u_p}, \quad (2.35)$$

де a, k – невідомі коефіцієнти, що визначаються властивостями конкретного матеріалу і режимами сушіння;

τ_j – тривалість сушіння, хв.

Прирівнявши праву частину виразів (2.34) і (2.35), можна визначити вологість i -го тонкого шару насіння льону олійного. В цьому шарі матеріалу через час сушіння $\tau_j = \Delta\tau \cdot j$ вологість матеріалу становитиме:

$$u_{i,j} = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j) \cdot (u_0 - u_p) + u_p. \quad (2.36)$$

Значення коефіцієнтів a і k для насіння льону олійного були визначені за результатами експериментальних досліджень кінетики сушіння (табл. 4.3). З застосуванням методів математичної статистики встановлено закономірності між значеннями коефіцієнтів a і k та швидкістю v і температурою t сушильного агента:

$$a = 1,34771 - 0,168 \cdot v - 0,00639 \cdot t_{i,j} + 0,061 \cdot v^2, \quad (2.37)$$

$$k = 0,1791 - 0,10775 \cdot v - 0,004767 \cdot t_{i,j} + 0,0435 \cdot v^2 + 0,000063 \cdot t_{i,j}^2. \quad (2.38)$$

Рівноважна вологість льону олійного з достатньо високою точністю визначається з рівняння Гендерсона [16]:

$$\varphi = 1 - \exp\left(-A \cdot (\theta_{i,j-1} + C) \cdot u_p^B\right), \quad (2.39)$$

де φ – усталена відносна вологість повітря, якій відповідає рівноважна вологість матеріалу; A , B , C – коефіцієнти, що характеризують властивості конкретного матеріалу. Відомо, що для насіння льону олійного $A=0,000176$; $B=1,9054$ $C=56,228$ [16].

Тоді рівноважна вологість матеріалу:

$$u_p = \left(-\frac{\ln(1-\varphi)}{1,76^{-4} \cdot (\theta_{i,j-1} + 56,228)} \right)^{0,525}. \quad (2.40)$$

Вологість сушильного агента [8]:

$$\varphi = \frac{745 \cdot d_{i,j}}{(622 + d_{i,j}) \cdot 10^{\left(\frac{0,622+7,5 \cdot t_{i,j}}{238+t_{i,j}} \right)}}. \quad (2.41)$$

Вихідними параметрами для визначення температури матеріалу в процесі сушіння є:

- початкова температура матеріалу θ_0 в період завантаження в сушильну камеру, яка рівна температурі атмосферного повітря $\theta_0 = t_{нов.}$,
- початкова температура сушильного агента на вході в сушильну камеру $t_{с.а.0}$.

У процесі сушіння матеріал за короткий проміжок часу нагрівається від початкової температури θ_0 до температури мокрого термометра $\theta_{м.т.}$, що відповідає початку періоду постійної швидкості сушіння. Період постійної швидкості сушіння триває до досягнення матеріалом критичної вологості. Для насіння олійних культур цю вологість, залежно від вмісту олій $M_{ол.}$, можна визначити за формулою [4]:

$$u_{кр} = 14,5 \cdot \frac{100 - M_{ол.}}{100}. \quad (2.42)$$

Після досягнення критичної вологості настає період, при якому температура матеріалу починає зростати, а швидкість сушіння падати (період

падаючої швидкості сушіння). При цьому температура матеріалу поступово наближається до температури сушильного агента на вході в сушильну камеру t_0 .

Температуру i -го тонкого шару $\theta_{i,j}$ після часу сушіння $\tau_j = \Delta\tau_j \cdot j$ при температурі сушильного агента на вході в цей шар $t_{i-1,j}$, відносній вологості $u_{i,j}$ в період падаючої швидкості сушіння визначається з залежності [6]:

$$\theta_{i,j} = t_{i-1,j} - b \cdot (u_{i,j} - u_p), \quad (2.43)$$

де b – коефіцієнт, встановлений з температурних кривих кінетики сушіння на основі експериментальних досліджень, $b=1,9...2,2$.

Вологовміст повітря (сушильного агента) виражає масу води в грамах в кілограмі сухого повітря d (г/кг с.п.). Сушильний агент, проходячи крізь шар матеріалу, змінює свій вологовміст d в результаті видалення води з матеріалу.

Позначимо вологовміст сушильного агента на вході в i -ий тонкий шар матеріалу d_{i-1} .

$$d_{i-1} = \frac{m_{\text{пари}}}{m_{\text{с.п.}}}, \quad (2.44)$$

де $m_{\text{пари}}$ – маса пари, г; $m_{\text{с.п.}}$ – маса сухого сушильного агента, кг.

При зміні вологості цього шару матеріалу на $\Delta u = u_{i,j-1} - u_{i,j}$ він втратить вологу масою $m_{\text{вип.}}$, а вологовміст сушильного агента на виході з цього шару матеріалу становитиме:

$$d_i = \frac{m_{\text{пари}} + m_{\text{вип.}}}{m_{\text{с.п.}}}. \quad (2.45)$$

Пористість матеріалу визначиться як відношення об'єму пор до об'єму матеріалу:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{мат.}}}, \quad (2.46)$$

Об'єм пор матеріалу рівний об'єму сушильного агента, що заповнює ці пори. Маса сухого повітря в обмеженій ділянці тонкого шару матеріалу товщиною s і площею p становитиме:

$$m_{\text{с.п.}} = \rho_{\text{с.п.}} \cdot \varepsilon \cdot s \cdot p, \quad (2.47)$$

тоді

$$d_i = d_{i-1} + \frac{m_{\text{вип.}}}{\rho_{\text{с.н.}} \cdot \varepsilon \cdot s \cdot h}. \quad (2.48)$$

Початкова і кінцева абсолютна вологість матеріалу визначається за відомим співвідношенням:

$$u_{i,j;j-1} = \frac{m_{\text{вол.и.},j;j-1}}{m_{\text{сух.част.}}} \cdot 100\%, \quad (2.49)$$

де $m_{\text{вол.и.},j;j-1}$ – маса води в i -му тонкому шарі матеріалу на початку і в кінці короткого періоду часу $\Delta \tau_j$, г; $m_{\text{сух.част.}}$ – загальна маса матеріалу без води, г.

Тоді при зниженні абсолютної вологості від $u_{i,j-1}$ до $u_{i,j}$ маса випарованої води становитиме:

$$m_{\text{вип.}} = m_{\text{вол.и.},j-1} - m_{\text{вол.и.},j} = \frac{u_{i,j-1} - u_{i,j}}{100} \cdot m_{\text{сух.част.}}. \quad (2.50)$$

Маса сухої частини матеріалу в обмеженій ділянці становить:

$$m_{\text{сух.част.}} = \rho_{\text{мат}} \cdot V - \frac{u_{i,j-1}}{100} \cdot m_{\text{сух.част.}},$$

$$m_{\text{сух.част.}} = \frac{\rho_{\text{мат}} \cdot V}{1 + 0,01 \cdot u_{i,j-1}}, \quad (2.51)$$

де $\rho_{\text{мат}}$ – питома маса матеріалу, кг/м³; V – об'єм ділянки матеріалу, м³; s – товщина шару матеріалу, м; p – площа поперечного перерізу матеріалу, перпендикулярно до напрямку руху сушильного агента, м².

В процесі сушіння від вологості $u_{i,j-1}$ до $u_{i,j}$ маса випарованої води становитиме:

$$m_{\text{вип.}} = \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат}} \cdot V}{100 + u_{i,j-1}}, \text{ кг.} \quad (2.52)$$

Вологовміст сушильного агента, що омиває шар матеріалу:

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат.}} \cdot V}{100 + u_{i,j-1} \cdot 1000 \cdot \rho_{\text{с.н.}} \cdot \varepsilon \cdot V}$$

або

$$d_{i,j} = d_{i-1,j} + 0,001 \cdot \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат.}}}{(100 + u_{i,j-1}) \cdot \rho_{\text{с.н.}} \cdot \varepsilon}. \quad (2.53)$$

Залежність (2.53) дозволяє встановити значення вологовмісту сушильного агента на виході з i -го тонкого шару матеріалу, якщо відомий вологовміст на вході в цей шар $d_{i-1,j}$ і вологість цього шару матеріалу на початку $u_{i,j-1}$ і в кінці $u_{i,j}$ короткого проміжку часу сушіння $\Delta \tau_j$.

Нагрівання матеріалу має місце в період зростаючої швидкості сушіння і в період падаючої швидкості сушіння, тому в період постійної швидкості вся енергія сушильного агента йде на видалення вологи з шару матеріалу.

Температура сушильного агента на вході в сушильну камеру t_0 буде максимальною.

Затрати теплоти на нагрівання матеріалу можна визначити за формулою (кДж/кг) [4]:

$$Q_{\text{нагр.}} = G \cdot c_{\text{мат.}} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}), \quad (2.54)$$

де G – продуктивність, кг/год;

В перерахунку на шар матеріалу, що розглядається в зазначений проміжок часу:

$$G = p \cdot h \cdot \rho_{\text{мат.}} / \Delta \tau, \quad (2.55)$$

$c_{\text{мат.}}$ – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К);

Затрати теплоти на випаровування рідини з матеріалу:

$$Q_{\text{випар.}} = W \cdot (H_{\text{II}} - H_{\text{P}}), \quad (2.56)$$

де W – втрата вологи, що виділяється з матеріалу в процесі сушіння, кг; H_{II} і H_{P} – відповідно ентальпія пари і рідини, кДж/кг.

$$H_{\text{II}} = 2500 + 1,842 \cdot t_{i-1,j}, \quad (2.57)$$

$$H_{\text{P}} = 4,19 \cdot \theta_{i,j}. \quad (2.58)$$

Витрата води:

$$W = G \cdot \frac{u_{i,j-1} - u_{i,j}}{100 - u_{i,j}}. \quad (2.59)$$

Сумарна втрата теплоти сушильним агентом на нагрівання і випаровування води:

$$Q = G \cdot c_{\text{мат.}} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + W \cdot (H_{\text{II}} - H_P). \quad (2.60)$$

Температуру сушильного агента на виході з i -го тонкого шару матеріалу можна встановити з формули:

$$Q = L \cdot (1 + d_{i,j}) \cdot c_{\text{пов.}} \cdot (t_{i,j-1} - t_{i,j}), \quad (2.61)$$

де L – витрата сухого повітря, кг;

$$L = \frac{W}{d_{i,j} - d_{i,j-1}}, \quad (2.62)$$

$c_{\text{пов.}}$ – питома теплоємність повітря, кДж/(кг·К).

З рівняння (2.61) температура сушильного агента на виході з тонкого шару матеріалу визначатиметься з залежності:

$$t_{i,j} = t_{i,j-1} - \frac{c_{\text{мат.}} \cdot (\theta_{i-1,j} - \theta_{i,j}) + (u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot (H_{\text{II}} - H_P) \cdot (d_{i,j} - d_{i,j-1})}{c_{\text{пов.}} \cdot (1 + d_{i,j}) \cdot (u_{i,j-1} - u_{i,j})}. \quad (2.63)$$

Залежність (2.63) дозволяє встановити значення температури сушильного агента на виході з i -го тонкого шару матеріалу, якщо відомий вологовміст на вході в цей шар $d_{i-1,j}$ і на виході з нього $d_{i,j}$, температура сушильного агента на вході в цей шар матеріалу $t_{i-1,j}$, а також вологість цього шару матеріалу на початку $u_{i,j-1}$ і в кінці $u_{i,j}$ короткого проміжку часу сушіння $\Delta \tau_j$, за який сушильний агент проходить крізь цей шар.

Представлена модель процесу сушіння передбачає, що площа поперечного перерізу матеріалу перпендикулярна до напрямку руху сушильного агента, а також швидкість сушильного агента v за усією товщиною

товстого шару H є незмінними для кожного тонкого шару h . Сушильна камера запропонованої сушарки для насіння льону олійного представляє собою простір, обмежений зовнішньою циліндричною перфорованою стінкою радіусом r_{max} і концентрично встановленою внутрішньою перфорованою циліндричною стінкою радіусом r_{min} , крізь яку в сушильну камеру підводиться сушильний агент (рис. 2.12).

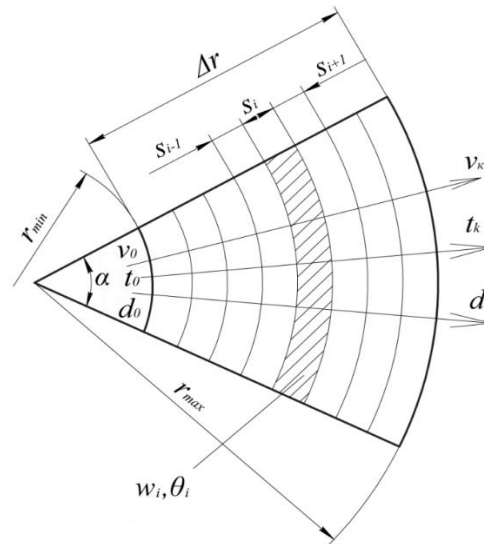


Рисунок 2.12 – Параметри сушильної камери сушарки

Товстий шар матеріалу в циліндричній сушильній камері товщиною $H = \Delta r = r_{max} - r_{min}$ розглядається як сукупність тонких шарів s_i однакової товщини. Тоді товщина тонкого шару визначатиметься за формулою:

$$s_i = \frac{\Delta r}{n} = \frac{r_{max} - r_{min}}{n}, \quad (2.64)$$

де n – кількість тонких шарів матеріалу.

Об'єм V тонкого шару матеріалу висотою h' в циліндричній сушильній камері, який обмежений площинами, що проходять через вісь циліндра сушильної камери і перетинаються під кутом $\alpha_{c.k.}$ (рис.2.13).

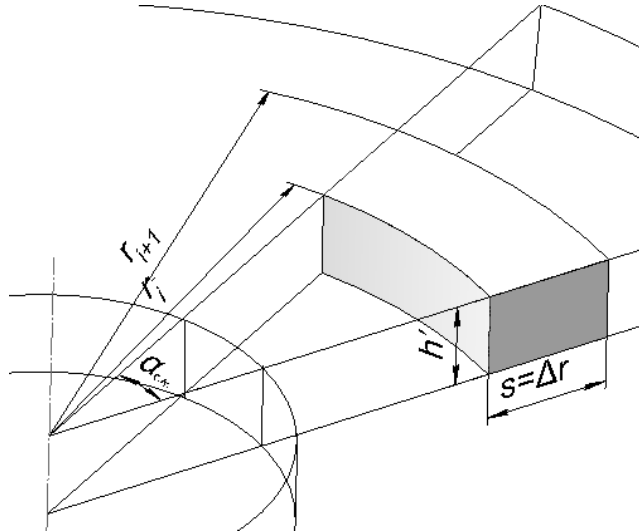


Рисунок 2.13 – Тонкий шар матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки

Для i -го тонкого шару матеріалу це різниця об'ємів секторів циліндрів радіусами r_i і r_{i+1} висотою h' :

$$V = h' \cdot \frac{\alpha_{c.к.}}{2} \cdot (r_{i+1}^2 - r_i^2).$$

Оскільки $r_i = r_{min} + s_i \cdot i$, $r_{i+1} = r_{min} + s_i \cdot (i+1)$, то

$$V_i = h' \cdot \frac{\alpha_{c.к.}}{2} \cdot \left((r_{min} + s_i \cdot (i+1))^2 - (r_{min} + s_i \cdot i)^2 \right).$$

Після спрощення:

$$V_i = \alpha_{c.к.} \cdot h' \cdot s_i \cdot (r_{min} + s_i \cdot (i+0,5)). \quad (2.65)$$

Необхідно встановити швидкість сушильного агента на вході в i -й тонкий шар матеріалу товщиною s , якщо початкова швидкість сушильного агента на вході в перший тонкий шар матеріалу становить v_0 .

Площі поверхонь стінок циліндрів з радіусами r_i та r_{i+1} (див. рис. 2.13) визначаються за формулами:

$$\Pi_{цил.i} = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h' \cdot m_h,$$

$$\Pi_{цил.i+1} = 2 \cdot \pi \cdot r_{i+1} \cdot h' \cdot m_h,$$

де m_h – величина, що характеризує відношення загальної висоти сушильної камери $h_{c.к.}$ до висоти частини камери h' , (див. рис. 2.13), $h_{c.к.} = h' \cdot m_h$.

Якщо витрату сушильного агента виразити через $q_{c.a.}$, м³/хв., то початкова швидкість сушильного агента на вході в сушильну камеру

$$v_0 = \frac{q_{c.a.}}{2 \cdot \pi \cdot r_{min} \cdot h' \cdot m_h} . \quad (2.66)$$

Приймаючи, що величина $q_{c.a.}$ постійна на вході в кожен i -й тонкий шар, його швидкість в середині i -го тонкого шару:

$$v_i = \frac{q_{c.a.}}{2 \cdot \pi \cdot \left(r_i + \frac{r_{i+1} - r_i}{2} \right) \cdot h' \cdot m_h} . \quad (2.67)$$

Радіуси $r_i = r_{min} + s \cdot i$ і $r_{i+1} = r_{min} + s \cdot (i + 1)$, тоді

$$v_i = \frac{v_0 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_{min} \cdot h' \cdot m_h}{2 \cdot \pi \cdot \left((r_{min} + s \cdot i) + \left((r_{min} + s \cdot (i + 1)) - (r_{min} + s \cdot i) \right) / 2 \right) \cdot h' \cdot m_h} .$$

Після спрощення

$$v_i = \frac{v_0 \cdot r_{min}}{r_{min} + s \cdot (i + 0,5)} . \quad (2.68)$$

Вологість $u_{i,j}$ матеріалу в i -му циліндричному тонкому шарі вкінці j -го короткого проміжку часу визначатиметься за залежностями (2.36-2.40) з врахуванням того, що швидкість сушильного агента v в залежностях (2.37) і (2.38) в кожному i -му тонкому шарі визначається за залежністю (2.68).

Температура $\theta_{i,j}$ циліндричного тонкого шару визначається з залежності (2.43) як функція вологості матеріалу $u_{i,j}$ і температури сушильного агента на вході в i -й тонкий шар матеріалу $t_{i-1,j}$.

Вологовміст i -го циліндричного тонкого шару вкінці j -го короткого проміжку часу в циліндричній сушильній камері визначається як відношення маси води в сушильному агенті, до маси сухого сушильного агента, що заповнює цей i -й шар матеріалу. Маса води вкінці j -го короткого проміжку часу в i -му циліндричному тонкому шарі матеріалу знайдеться як сумарна маса:

- вологи, що міститься в сушильному агенті з вологовмістом $d_{(i-1)екв.,j-1}$ (рис. 2.14) на вході в i -й тонкий шар матеріалу;
- додаткової вологи, випаруваної в i -му тонкому шарі в результаті зниження вологості матеріалу від $u_{i,j-1}$ до $u_{i,j}$.

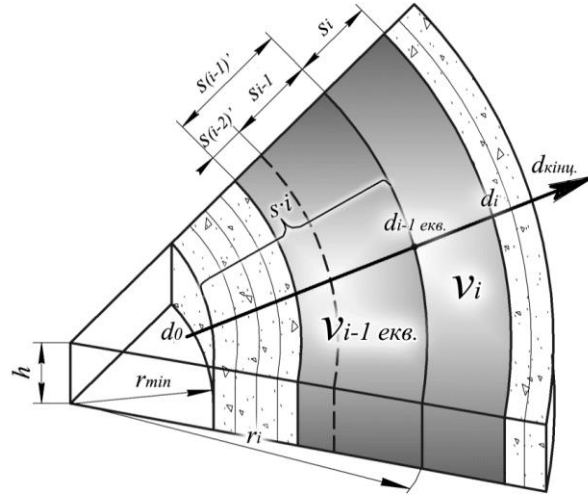


Рисунок 2.14 – Вологовміст сушильного агента в i -му тонкому шарі матеріалу

Отже, вологовміст на виході з i -го тонкого шару матеріалу вкінці j -го короткого проміжку часу

$$d_i = \frac{m_{напу.i,j} + m_{вип.i,j}}{m_{с.н.i}}, \quad (2.69)$$

де $m_{напу.i,j}$ – початкова маса вологи в сушильному агенті, що заповнює i -й тонкий шар матеріалу на початку j -го короткого проміжку часу, г; $m_{вип.i,j}$ – маса вологи, випаруваної в результаті зниження вологості i -го тонкого шару від $u_{i,j-1}$ до $u_{i,j}$; $m_{с.н.i}$ – маса сухого повітря, що заповнює i -й тонкий шар матеріалу.

Маса сухого повітря, що заповнює i -й шар матеріалу після підстановки виразу (2.65) в (2.47) визначиться за формулою:

$$m_{с.н.i} = \rho_{с.н.} \cdot \varepsilon \cdot \alpha_{с.к.} \cdot h' \cdot s_i \cdot (r_{min} + s_i \cdot (i + 0,5)). \quad (2.70)$$

Після підстановки (2.65) у (2.52) маса випаруваної вологи $m_{вип.}$ визначиться за формулою:

$$m_{\text{вип.}} = \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат.}} \cdot \alpha_{\text{с.к.}} \cdot h' \cdot s_i \cdot (r_{\text{мін}} + s_i \cdot (i + 0,5))}{100 + u_{i,j-1}}. \quad (2.71)$$

Маса пари $m_{\text{паруи},j}$, а також початковий вологовміст сушильного агента, що подається в i -й тонкий шар матеріалу на початку j -го короткого проміжку часу $d_{(i-1)',j} = d_{i,j}$:

$$d_{(i-1)',j} = \frac{m_{\text{паруи},j}}{m_{\text{с.н.и}}}. \quad (2.72)$$

Оскільки об'єм повітря на виході з i -го тонкого шару рівний об'єму повітря з вологовмістом $d_{(i-1)'}$ на вході в цей шар, то $V_i = V_{(i-1)'}$.

$m_{\text{паруи},j}$ визначиться за формулою:

$$m_{\text{паруи},j} = m_{\text{паруи}(i-1)',j} = m_{\text{паруи}(i-1)',j} + m_{\text{паруи}(i-2)',j} \quad (2.73)$$

$$m_{\text{паруи}(i-1)',j} = d_{i-1,j} \cdot m_{\text{с.н.и-1}}, \quad (2.74)$$

$$m_{\text{паруи}(i-2)',j} = d_{i-2,j} \cdot m_{\text{с.н.и}(i-2)'}. \quad (2.75)$$

Згідно з (2.65)

$$m_{\text{с.п.и-1}} = \rho_{\text{с.п.}} \cdot \varepsilon \cdot \alpha \cdot h' \cdot s_i \cdot (r_{\text{мін}} + s_i \cdot (i - 0,5)). \quad (2.76)$$

$$m_{\text{с.н.и}(i-2)'} = m_{\text{с.н.и}} - m_{\text{с.п.и-1}}, \quad (2.77)$$

Після підстановки (2.70-2.76) в (2.69) і спрощення:

$$d_{i,j} = \frac{d_{i-1,j} \cdot (r_{\text{мін}} + s \cdot (i + 0,5)) + d_{i-2,j} \cdot s_i}{r_{\text{мін}} + s \cdot (i + 0,5)} + \frac{(u_{i,j-1} - u_{i,j}) \cdot \rho_{\text{мат.}}}{(100 + u_{i,j-1}) \cdot \rho_{\text{с.н.}} \cdot \varepsilon \cdot 1000}. \quad (2.78)$$

Температура сушильного агента визначатиметься за формулою (2.63) з врахуванням вологовмісту повітря, встановленого згідно з залежністю (2.78).

Результат реалізації моделі представлений у вигляді графіків на рис. 2.15. Кожній кривій на графіку відповідає вологість тонкого елементарного шару матеріалу (насіння льону олійного) товщиною 0,003 м.

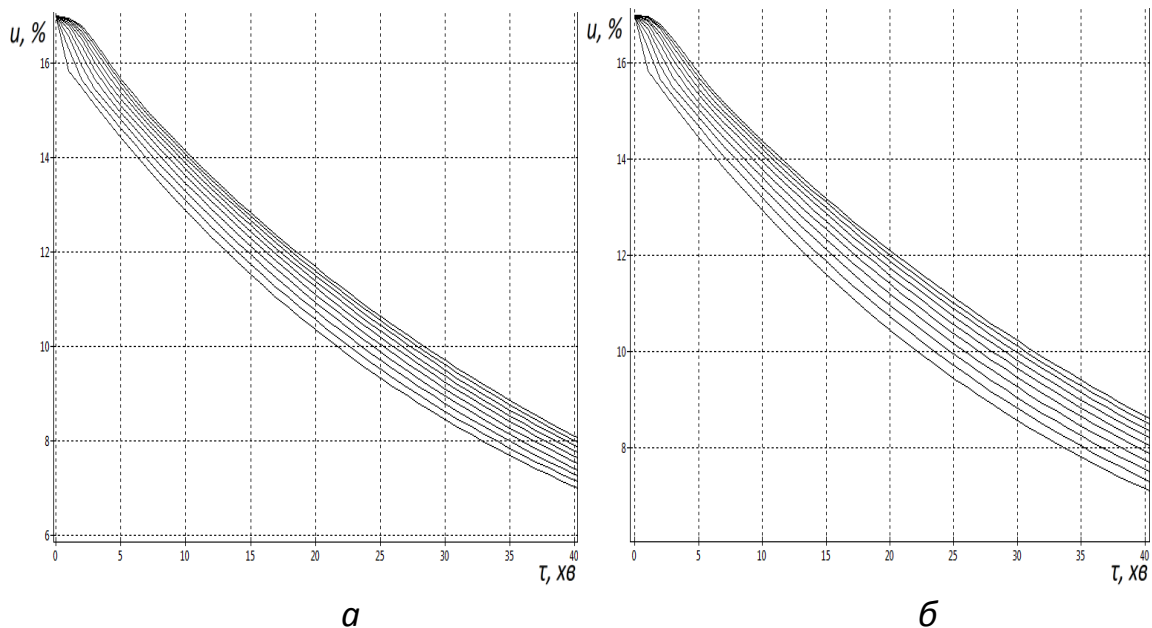


Рисунок 2.15 – Графіки, що характеризують зміну вологості матеріалу в процесі сушіння: початкова абсолютна вологість матеріалу 17 %, початкова температура матеріалу 20°C, товщина розрахункового шару матеріалу 0,02 м; вологовміст сушильного агента 6 г/кг с.п., температура сушильного агента на вході 45 °C; *а* – плоский шар матеріалу; *б* – циліндричний шар матеріалу

2.4. Дослідження процесу перемішування і розпушування шару матеріалу в процесі сушіння

В результаті сушіння нерухомого шару сипкого матеріалу виникає градієнт вологостей і температур за його об'ємом, що в результаті призводить до нерівномірності сушіння матеріалу, перегрівання і пересушування окремих його частин. Складність сушіння сипких матеріалів в нерухомому шарі також полягає у великому його опорі сушильному агенту, що особливо актуально для насіння льону олійного, яке характеризується дрібними розмірами і великою щільністю.

Перемішування та розпушування матеріалу в процесі сушіння має низку переваг порівняно з сушінням в нерухомому шарі:

- перемішування дозволяє підвищити рівномірність нагрівання і сушіння матеріалу, виключаючи перегрівання і пересушування його окремих зон;
- інтенсифікується процес виділення вологи з матеріалу за рахунок збільшення площі контакту матеріалу з сушильним агентом, підвищується ступінь використання енергетичного потенціалу сушильного агента;
- забезпечується вільне проходження сушильного агента крізь об'єм матеріалу і, як наслідок, зменшуються затрати енергії, що споживається вентилятором;
- відбувається більш рівномірний розподіл сушильного агента за всім об'ємом матеріалу, вирішується проблема утворення повітряних каналів, крізь

які проходить велика кількість сушильного агента, оминаючи значні ділянки матеріалу.

Проблеми, пов'язані з реалізацією процесу механічного перемішування і розпушування, пов'язані з таким:

- можливе пошкодження матеріалу робочими органами, що особливо актуально для насіння льону олійного, зважаючи на його дрібні розміри і, відповідно, тонку зовнішню оболонку;
- додаткові енергозатрати на приведення в дію робочих органів для перемішування і розпушування матеріалу.

Додаткові енергозатрати на приведення в дію активаторів для перемішування компенсуються за рахунок збільшення продуктивності процесу сушіння, його інтенсифікації, більш ефективного використання енергетичного потенціалу сушильного агента, зменшення затрат енергії на створення напору вентилятором, вищою якістю висушеного насіння. А мінімізувати затрати енергії на приведення в дію активаторів можна шляхом забезпечення їх раціональних конструктивних і кінематичних параметрів.

Процес перемішування становить перерозподіл у просторі частинок матеріалу. Під розпушуванням розуміється зменшення щільності сипкого матеріалу за рахунок переорієнтації частинок матеріалу в просторі.

Отже, розглядаючи процес сушіння насіння льону олійного з перемішуванням і розпушуванням, слід враховувати зміну фізико-механічних властивостей матеріалу, таких як щільність і пористість, а також обмін тонких шарів матеріалу вологою і температурою.

За основу моделі, що описує процес сушіння сипкого матеріалу з одночасним його перемішуванням і розпушуванням, прийнято модель, запропоновану в п.2.3. для нерухомого шару матеріалу.

За умови перемішування матеріалу відбувається заміщення частинок i -го тонкого шару з відомим значеннями $\theta_{i,j}$ та $u_{i,j}$ частинками з інших тонких шарів $1, 2, \dots, i-2, i-1, i+1, i+2, \dots, n-1$ і n з відмінними від $\theta_{i,j}$ і $u_{i,j}$ параметрами.

Якщо прийняти масу частинок, що в результаті перемішування покинули i -й тонкий шар матеріалу, рівною масі частинок, що потрапили з сусідніх тонких шарів в будь-який період часу (рис.2.16), то загальну масу i -го тонкого шару матеріалу в будь-який момент часу τ можна виразити через коефіцієнт $K_i = 1$. В результаті перемішування протягом короткого проміжку часу $\Delta\tau$ в кожному i -му тонкому шарі матеріалу температуру і вологість суміші, утвореної з частинок матеріалу різних температур і вологості, знайдемо за формулами:

$$\theta_{i,j}^{суміші} = \theta_{1,j} \cdot K_{i(1)} + \dots + \theta_{i-1,j} \cdot K_{i(i-1)} + \theta_{i,j} \cdot K_{i(i)} + \theta_{i+1,j} \cdot K_{i(i+1)} + \dots + \theta_{n,j} \cdot K_{i(n)} = \sum_{(i)=1}^n \theta_{(i),j} \cdot K_{i(i)} \quad , \quad (2.79)$$

$$u_{i,j}^{суміші} = u_{1,j} \cdot K_{i(1)} + \dots + u_{i-1,j} \cdot K_{i(i-1)} + u_{i,j} \cdot K_{i(i)} + u_{i+1,j} \cdot K_{i(i+1)} + \dots + u_{n,j} \cdot K_{i(n)} = \sum_{(i)=1}^n u_{(i),j} \cdot K_{i(i)} \quad , \quad (2.80)$$

де $K_{i(1) \dots (n)}$ – коефіцієнт масової частки матеріалу в i -му тонкому шарі, заміщеної матеріалом з $(1) \dots (n)$ -го тонкого шару в результаті перемішування. Перший індекс без дужок позначає номер поточного шару матеріалу, індекси в дужках позначають номери сусідніх шарів матеріалу, за рахунок яких відбувається заміщення частинок в поточному шарі матеріалу.

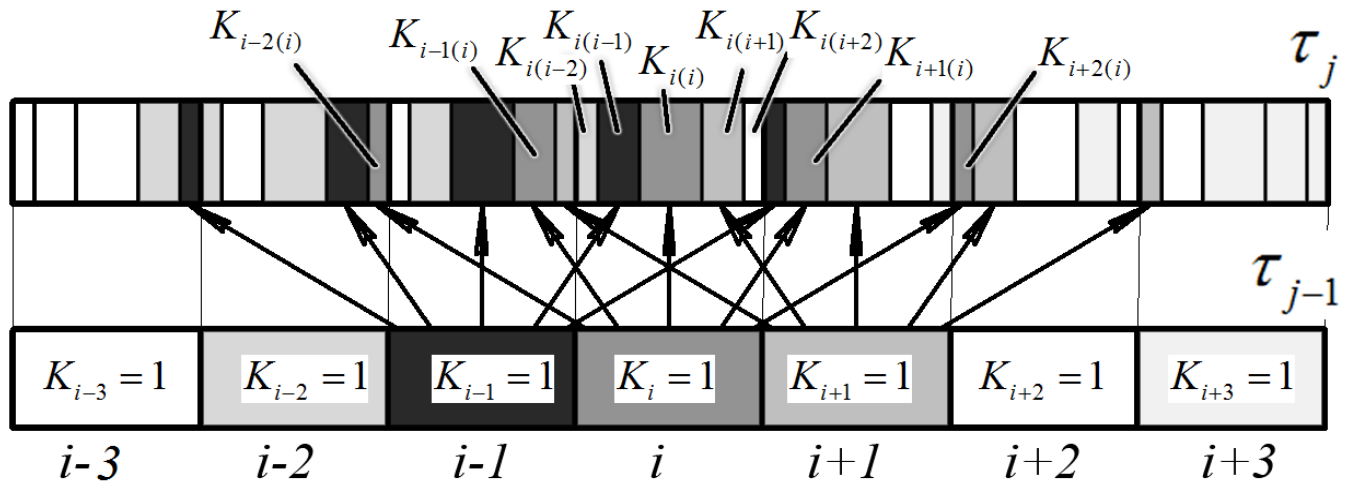


Рисунок 2.16 – Діаграма заміщення частинок i -го тонкого шару матеріалу частинками з сусідніх тонких шарів

$$K_i = \sum_{(i)=1}^n K_{i(i)} = 1 \quad . \quad (2.81)$$

Значення коефіцієнта $K_{i(1) \dots (n)}$ для кожного i -го тонкого шару матеріалу можна визначити, керуючись припущенням, що розсіювання частинок матеріалу між сусідніми шарами відбувається за законом нормального розподілу [2].

Тоді для плоского шару матеріалу постійної товщини (рис. 2.17, а) згідно з законом нормального розподілу, беручи до уваги (2.81), коефіцієнт $K_{i(i)} \leq 1$ визначиться за формулою:

$$K_{i(i)} = \frac{k_{i(i)}}{\sum_{(i)=1}^n k_{i(i)}}, \quad (2.82)$$

де $K_{i(i)} = 1$ – за умови, що переміщення не відбувається; $k_{i(i)}$ – коефіцієнт, що характеризує числове значення функції нормального розподілу в заданій точці.

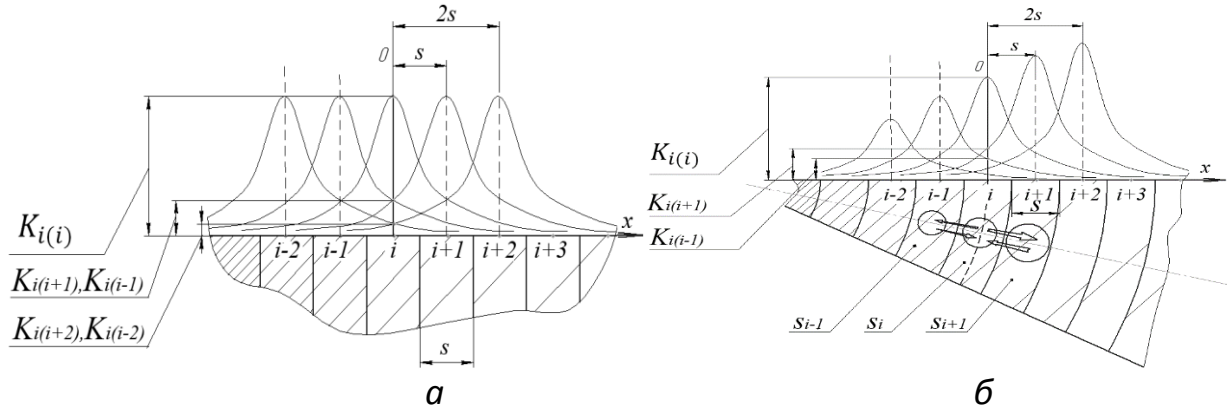


Рисунок 2.17 – Графічна інтерпретація коефіцієнта $K_{i(i±x)}$: а – для плоского тонкого шару матеріалу; б – для циліндричного тонкого шару матеріалу

$$k_{i(i)} = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp \left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right), \quad (2.83)$$

де x – координата (відстань між i -м і (i) -м тонкими шарами, для яких розраховується коефіцієнт $k_{i(i)}$), м; μ – математичне сподівання ($\mu = 0$, оскільки початок відліку координатної осі x збігається з точкою середини тонкого шару матеріалу), м; s – товщина i -го тонкого шару матеріалу, м; σ^2 – дисперсія випадкової величини.

Величина σ визначає форму функції кривої розсіювання і характеризує інтенсивність перемішування. При $\sigma = 0$ перемішування не відбувається, при $\sigma \rightarrow \infty$ перемішування наближається до ідеального. Величина σ залежить від тривалості перемішування (заданої величини проміжку часу $\Delta \tau$), конструктивних (крок витка спіралі, міжосьова відстань) і режимних (частота обертання) параметрів активаторів для перемішування і встановлюється експериментально.

Перемішування матеріалу в цій сушильній камері можна представити як процес обміну частинками з певною температурою і вологістю між сусідніми тонкими шарами матеріалу. Результуюча вологість і температура тонкого шару після перемішування визначатиметься як температура і вологість суміші частинок з різних тонких шарів, якими заміщені частинки розглядуваного тонкого шару в деякий момент часу.

Вважаючи, що параметри матеріалу в будь-який момент часу є постійними за висотою, процес перемішування можна описати за допомогою функції двомірного розподілу. В цьому випадку враховується розсіювання частинок з однаковою вологістю і температурою в довільній точці матеріалу у площині, перпендикулярній до осі сушильної камери, а вертикальне зміщення частинок нехтується.

Але, зважаючи на симетричність сушильної камери і тонких циліндричних шарів матеріалу, процес перемішування доцільніше описати функцією одномірного розподілу в напрямку радіуса сушильної камери, з урахуванням зміни об'єму тонких шарів.

Відмінність циліндричного шару від плоского (див. рис. 2.17, б) полягає в тому, що об'єм кожного елементарного тонкого шару товщиною s буде змінюватись прямопропорційно до радіуса. Відповідно, маса частинок, переміщених між будь-якими сусідніми тонкими шарами за одиницю часу, також буде не постійною для кожного тонкого шару, тому для циліндричного тонкого шару матеріалу залежність (2.83) матиме вигляд:

$$k_{i(i)} = k_{r(i)} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2}\right), \quad (2.84)$$

де $k_{r(i)}$ – коефіцієнт, що враховує зміну маси тонких шарів матеріалу як функцію від радіуса.

Для i -го тонкого шару масою v_i коефіцієнт $k_{r(i)} = 1$. Тоді для довільного $i + n$ -го тонкого шару об'ємом v_{i+n} коефіцієнт $k_{r(i)} = \frac{v_{i+n}}{v_i}$.

Оскільки $v_{i+n} = h \cdot \pi \cdot (r_i^2 - r_{i+n}^2)$, $r_{i+n} = r_0 + s \cdot (i + n)$,

де r_0 – початковий радіус; s – товщина i -го ($i + n$ -го) тонкого шару, то

$$k_{r(i)} = 1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5}. \quad (2.85)$$

Підставивши (2.85) в (2.84), отримуємо

$$k_{i(i)} = \left(1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5}\right) \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(s \cdot (i))^2}{2 \cdot \sigma^2}\right). \quad (2.86)$$

Рівняння (2.86) дозволяє визначити коефіцієнти, необхідні для розрахунку параметрів суміші за формулами (2.79-2.80) для циліндричної сушильної камери.

У випадку безперервної подачі матеріалу у верхню частину сушильної камери, його постійного переміщення донизу в процесі сушіння і вивантаження в нижній частині сушарки (сушарка потокового типу) температура і вологість тонкого циліндричного шару матеріалу змінюються за висотою сушильної камери, а процес перемішування доцільно описувати функцією двовимірного нормального розподілу в перпендикулярній площині, що проходить через вісь сушильної камери

У цьому випадку координати i_x та i_y двох перпендикулярних осей можна розглядати як незалежні, некорельовані величини. Тоді функція двохвимірного розподілу з урахуванням (2.86) набуде вигляду:

$$k_{i(i_x, i_y)} = \left(1 + \frac{n}{\frac{r_0}{s} + i - 0,5} \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot \exp \left(-\frac{(s \cdot i_x)^2}{2 \cdot \sigma_x^2} - \frac{\mu_y^2}{2 \cdot \sigma_y^2} \right). \quad (2.87)$$

Результати розрахунку зниження вологості шару матеріалу з часом за висотою шару матеріалу представлено у вигляді графіків (рис.2.19). Для розрахунку без перемішування і з перемішуванням приймалися однакові початкові параметри матеріалу: абсолютна вологість 17 %, температура 20 °С, товщина розрахункового шару 0,02 м; параметри сушильного агента: вологовміст 6 г/кг с.п., температура 45 °С. Кожній кривій на графіку відповідає вологість тонкого елементарного шару матеріалу товщиною 0,003 м.

Вихідні дані для розрахунку:

Початкова вологість матеріалу W_0 , %

Кінцева вологість матеріалу, %

Початкова температура матеріалу t_{m0} , °C

Температура сушильного агента $t_{c.a.}$, °C

Вологовміст сушильного агента d , г/кг с.п.

Товщина шару матеріалу H , м

Початковий радіус r_0 , м

Початкова швидкість сушильного агента V , м/с

☐ Охолодження після сушіння (тільки нерухомий шар)

Температура повітря для охолодження, $t_{c.a.}$, °C

Розрахункові короткі проміжки часу, хв

☒ Зупиняти розрахунок при кількості інтервалів $j = 300$

Результати розрахунку:

Тривалість сушіння матеріалу для досягнення необхідної вологості хв

Вологість, $W_{i,j}$	Температура агента, $t_{i,j}$	Вологовміст, $d_{i,j}$	Температура матеріалу, $T_{i,j}$				
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	$n=6$	$n=7$
$l=1$	16,1202109	16,4571758	16,6533220	16,7750651	16,8526663	16,9031986	16,9366561
$l=2$	16,0273240	16,0650183	16,2229175	16,3897460	16,5343238	16,6505151	16,7408014
$l=3$	15,9350786	15,9757391	16,0140532	16,1017409	16,2191967	16,3439578	16,4618094
$l=4$	15,8434703	15,8861521	15,9266892	15,9661330	16,0257057	16,1082260	16,2059073
$l=5$	15,7524946	15,7970828	15,8394611	15,8807115	15,9208496	15,9689533	16,0308833
$l=6$	15,6621472	15,7085862	15,7527444	15,7956099	15,8372667	15,8777742	15,9210854
$l=7$	15,5724237	15,6207101	15,6665887	15,7110145	15,7540818	15,7958838	15,8364060

Рисунк 2.18 – Реалізація моделі процесу сушіння насіння льону олійного без перемішування і з перемішуванням в процесі сушіння

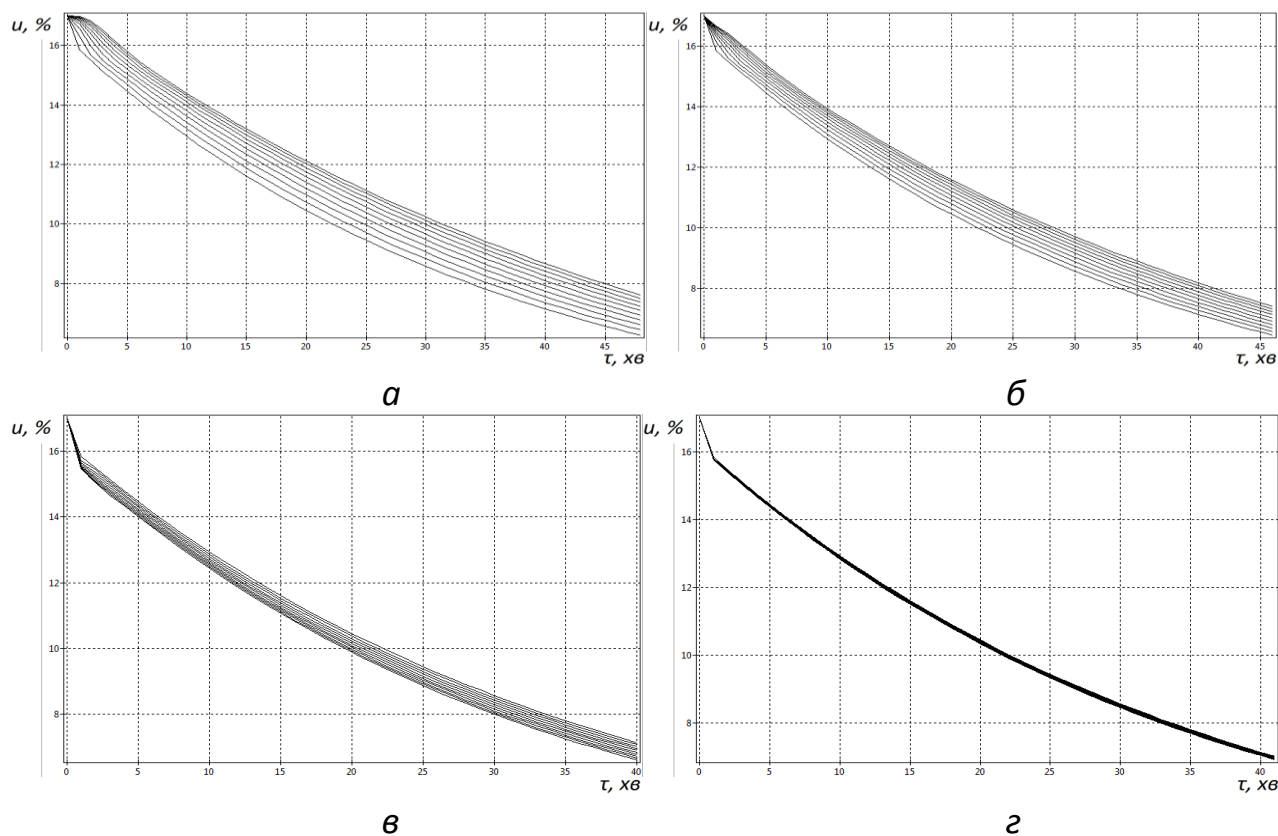


Рисунок 2.19 – Зміна вологості тонких шарів матеріалу (насіння льону олійного) при його сушінні в циліндричній сушильній камері: а – без перемішування, коефіцієнт інтенсивності

перемішування $\sigma = 0$; б – з перемішуванням, $\sigma = 0,1$; в – з перемішуванням, $\sigma = 1,5$;
 з – з перемішуванням, $\sigma = 5$

З отриманих на основі теоретичної моделі графіків видно, що зі збільшенням коефіцієнта σ зменшується різниця вологості між сусідніми тонкими шарами матеріалу, що свідчить про зростання рівномірності сушіння за усім об'ємом матеріалу.

2.5. Дослідження процесу вентиляювання шару матеріалу в циліндричній сушильній камері

У процесі конвективного сушіння сушильний агент контактує з вологим матеріалом, відбираючи в нього вологу. Шар сипкого матеріалу, крізь який проходить сушильний агент, чинить опір його проходженню. Дослідження процесу вентиляювання шару сипкого матеріалу в запропонованій сушарці дозволить обґрунтувати раціональні режимні параметри сушарки.

Для дослідження даного процесу вентиляювання шару сипкого матеріалу в сушарці було прийнято такі допущення:

- в процесі вентиляювання і сушіння матеріал перебуває в розпушеному стані [6];
- в результаті розпушування матеріалу спіралеподібними активаторами збільшується його пористість

$$\varepsilon_{cn.} < \varepsilon = f(v_s, k_s, D_s, a_s, d_s, \varepsilon_{cn.}),$$

де v_s – частота обертання активатора, хв^{-1} ; k_s – крок спіралі, м; D_s – діаметр спіралі, м; a_s – міжосьова відстань між сусідніми активаторами, м; d_s – діаметр твірної витка спіралі, м; $\varepsilon_{cn.}$ – пористість матеріалу у стані спокою.

- сушильний агент після проходження крізь внутрішню перфоровану стінку рухається до периферії сушильної камери перпендикулярно до осі циліндричної сушильної камери;
- питома маса сушильного агента, що проходить крізь шар матеріалу, приймається постійною у будь-якій точці матеріалу, кількість повітря, що подається в сушильну камеру за одиницю часу, рівна кількості сушильного агента, що виходить з сушильної камери, при цьому швидкість сушильного агента зменшується;
- пористість матеріалу ε неоднакова за висотою сушильної камери внаслідок ущільнення під власною вагою. Зв'язок між тиском на матеріал і його пористістю описується лінійним законом.

Розглянемо шар матеріалу з постійним перерізом, умовно обмежений двома паралельними площинами (плоский шар), крізь який проходить повітряний потік. Втрату тиску в цьому шарі матеріалу можна визначити за формулою Козені-Кармана [8]:

$$\Delta p = K \cdot l \cdot \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \cdot S_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0, \quad (2.88)$$

де Δp – втрата тиску в шарі матеріалу, Па; K – стала Козені-Кармана, $K=4,5\dots 5$; l – товщина шару матеріалу в напрямку подачі газу, м; ε – відносна пористість шару матеріалу; S_y – питома поверхня матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості; ω_0 – приведена швидкість потоку, м/с.

На рис. 2.20 схематично показано шар сипкого матеріалу, який обмежений зовнішньою і внутрішньою циліндричними стінками сушарки запропонованої.

Крізь шар матеріалу (циліндричний шар) в процесі сушіння проходить сушильний агент у напрямку від внутрішньої перфорованої стінки сушильної камери до периферії. За умови, що кількість сушильного агента на вході в шар матеріалу рівна кількості сушильного агента на виході з шару матеріалу, а питома маса сушильного агента є постійною за всім об'ємом матеріалу, швидкість сушильного агента ω_x в будь-якій точці x матеріалу можна записати у вигляді:

$$\omega_x = \frac{\omega_0 \cdot r_0}{r_0 + l_x}, \quad (2.89)$$

де r_0 – внутрішній радіус сушильної камери, м; l_x – різниця між координатою точки x і внутрішнім радіусом сушильної камери, м; ω_0 – приведена швидкість потоку на вході в матеріал, м/с.

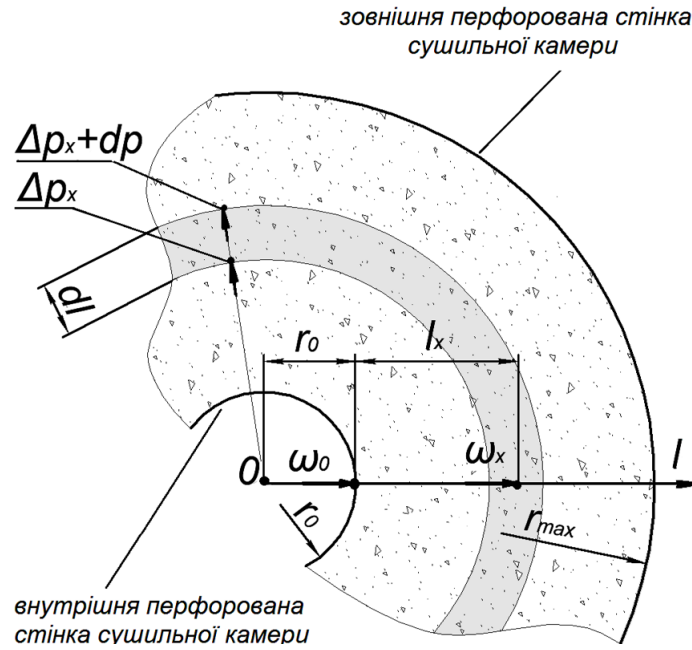


Рисунок 2.20 – Визначення швидкості і втрати тиску сушильного агента

Втрата тиску в елементарному тонкому шарі матеріалу:

$$dp = \left(K \cdot l_x \cdot \left(\frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \right) \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \frac{\omega_0 \cdot r_0}{r_0 + l_x} \right) dl. \quad (2.90)$$

Проінтегрувавши, можна встановити втрату тиску Δp_y циліндричного шару довільної товщини $l = r_{max} - r_0$.

$$\Delta p_y = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot (l - r_0 \cdot \ln(|l + r_0|)) + C, \quad (2.91)$$

де C – стала інтегрування.

Якщо при $l = 0$ втрата тиску $\Delta p_y = 0$, то

$$C = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0^2 \cdot \ln(|r_0|). \quad (2.92)$$

Підставивши (2.92) в (2.91), після спрощення отримаємо:

$$\Delta p_y = K \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot \left(l - r_0 \cdot \left(\ln(|l+r_0|) + \ln(|r_0|) \right) \right). \quad (2.93)$$

Вираз (2.93) дозволяє встановити втрату тиску сушильного агента в результаті проходження його крізь шар матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки.

Визначимо зміну пористості матеріалу за глибиною шару.

Закон ущільнення в диференційній формі має вигляд [13]:

$$d\varepsilon = -a_0 \cdot dp, \quad (2.94)$$

де a_0 – коефіцієнт стискуваності; $d\varepsilon$ – зміна коефіцієнту пористості при нескінченно малій зміні тиску dp .

Приймаючи, що сила тиску верхніх шарів на нижні незначна, пористість матеріалу в довільній його точці y можна визначити за законом ущільнення для прямолінійної ділянки компресійної кривої [13]:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot p_{y.m.}, \quad (2.95)$$

де ε_0 – початкова пористість матеріалу без прикладеного тиску (рис. 2.21); $p_{y.m.}$ – тиск, що здійснюють верхні шари матеріалу на шар матеріалу в точці y .

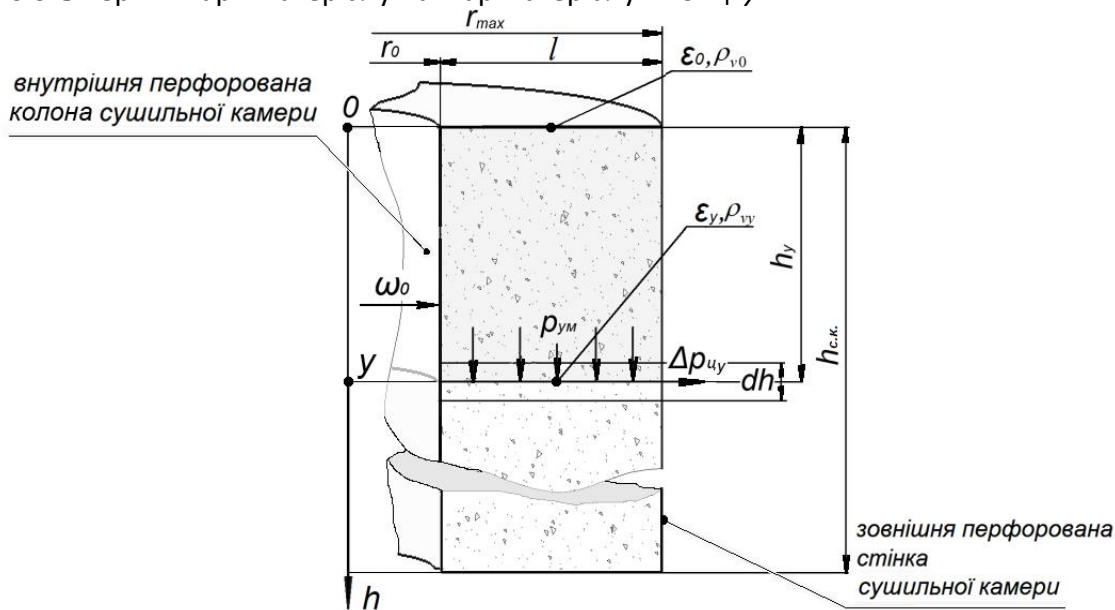


Рисунок 2.21 – Визначення пористості матеріалу за його глибиною

Тиск верхніх шарів матеріалу знайдемо за формулою [13]:

$$p_{y.m.} = \frac{m_y}{V_y} \cdot g \cdot h_y, \quad (2.96)$$

де m_y – маса матеріалу вище точки y , кг; V_y – об'єм матеріалу вище точки y , м³.

Відношення маси до об'єму визначимо як середню щільність матеріалу

$$\frac{m_y}{V_y} = \frac{\rho_{vy} + \rho_{v0}}{2}, \quad (2.97)$$

де ρ_{vy} – об'ємна маса насипу, кг/м³.

Після підстановки (2.96) і (2.97) в рівняння (2.98) воно набуде вигляду

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot \frac{\rho_{vy} + \rho_{v0}}{2} \cdot g \cdot h_y. \quad (2.98)$$

Пористість визначається як

$$\varepsilon_y = \left(1 - \frac{\rho_{vy}}{\rho_\tau}\right), \quad (2.99) \quad \varepsilon_0 = \left(1 - \frac{\rho_{v0}}{\rho_\tau}\right), \quad (2.100)$$

де ρ_τ – щільність без врахування пор, кг/м³.

Підставивши ρ_{vy} з (2.99) і ρ_τ з (2.100) в (2.98), тоді

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_y) \cdot \left(\frac{\rho_{v0}}{1 - \varepsilon_0}\right) + \rho_{v0}}{2} \cdot g \cdot h_y$$

або

$$\varepsilon_y = \varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2}. \quad (2.101)$$

Підставивши значення ε_y залежності (2.101) в залежність (2.93), можна визначити втрату тиску сушильного агента при його проходженні крізь шар матеріалу в циліндричній сушильній камері на глибині h_y .

Результати розрахунків у вигляді графіків представлені на рис. 2.22–2.25.

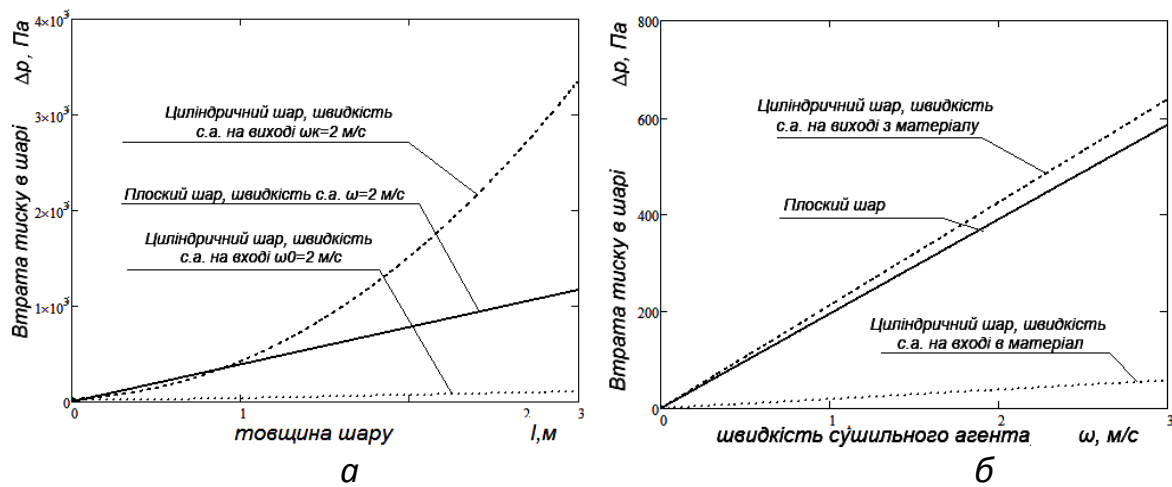


Рисунок 2.22 – Втрата тиску сушильного агента при проходженні крізь шар сипкого матеріалу, $\varepsilon_0 = 0,5$, $\mu = 1,95 \cdot 10^{-5}$, $s = 1000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $r_0 = 0,2 \text{ м}$: а – залежно від товщини шару l при швидкості $\omega = 2 \text{ м/с}$; б – залежно від швидкості сушильного агента ω при $l=1 \text{ м}$

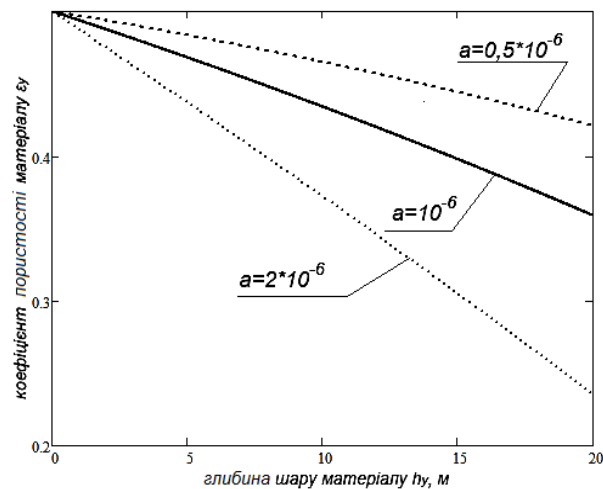


Рисунок 2.23 – Залежність коефіцієнта пористості від глибини шару матеріалу

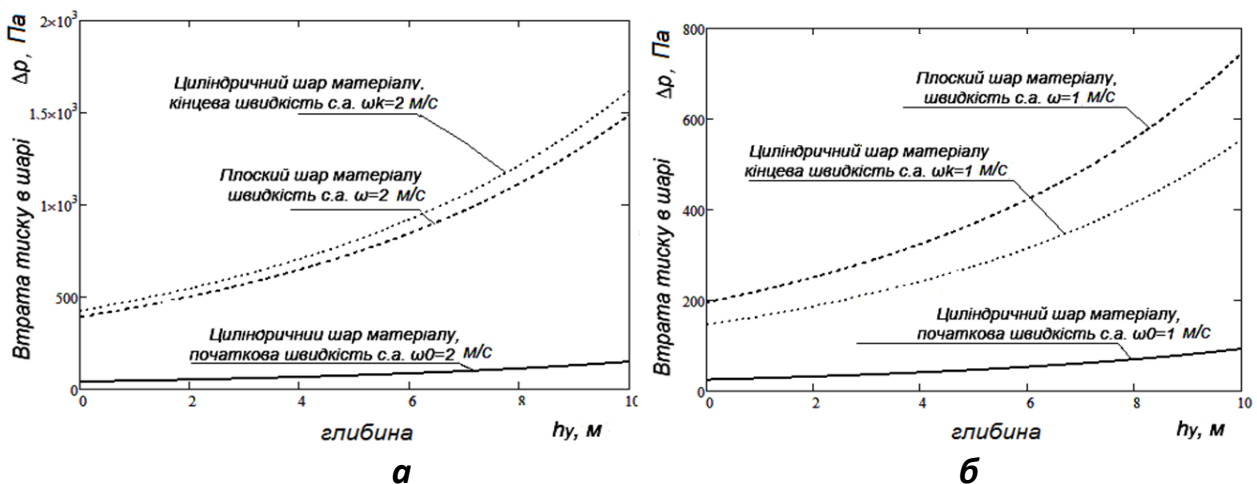


Рисунок 2.24 – Зміна опору шару матеріалу повітряному потоку за глибиною:
 $\varepsilon_0 = 0,3$; а) $\omega = 2$ м/с; $l = 1$ м, б) $\omega = 1$ м/с; $l = 0,5$ м

Опір матеріалу, що заповнює циліндричну сушильну камеру висотою $h_{c.к.}$

$$\Delta p_{c.к.} = \frac{1}{h_{c.к.}} \cdot \int_0^{h_{c.к.}} \Delta p_y dh_y = \frac{1}{h_{c.к.}} \cdot \int_0^{h_{c.к.}} K \cdot \frac{\left(1 - \left(\varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2}\right)\right)^2}{\left(\varepsilon_0 - a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} + \frac{a_0^2 \cdot g^2 \cdot h_y^2 \cdot \rho_{v0}^2}{2 \cdot \varepsilon_0 + a_0 \cdot g \cdot h_y \cdot \rho_{v0} - 2}\right)^3} \times \quad (2.102)$$

$$\times s_y^2 \cdot \mu \cdot \omega_0 \cdot r_0 \cdot \left(l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) + \ln(|r_0|))\right) dh_y.$$

Після інтегрування і спрощення отримується:

$$\Delta p_{c.к.} = \frac{A \cdot D^3}{h_{c.к.} \cdot B \cdot E^4} \cdot \left(\left(\frac{16 \cdot D \cdot (B \cdot h_{c.к.} \cdot E \cdot (2 \cdot \varepsilon_0 - 1) - 4 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot E - 6 \cdot \varepsilon_0 + 2)}{(2 \cdot D \cdot \varepsilon_0 - B \cdot h_{c.к.} \cdot E)^2} \right) - \right. \quad (2.103)$$

$$\left. - 4 \cdot \ln \left(1 - \frac{B \cdot E \cdot h_{c.к.}}{2 \cdot D \cdot \varepsilon_0} \right) \right) \cdot (\varepsilon_0 + 1) - B \cdot h_{c.к.} \cdot \frac{E}{D} + \frac{8 \cdot (2 \cdot \varepsilon_0 \cdot D + 1)}{\varepsilon_0^2}$$

$$A = K \cdot \mu \cdot r_0 \cdot s_y^2 \cdot \omega_0 \cdot \left(l - r_0 \cdot (\ln(|l + r_0|) - \ln(|r_0|)) \right),$$

$$B = a_0 \cdot g \cdot \rho_{v0},$$

$$D = (\varepsilon_0 - 1),$$

$$E = (\varepsilon_0 - 2),$$

де A, B, D, E – розрахункові коефіцієнти.

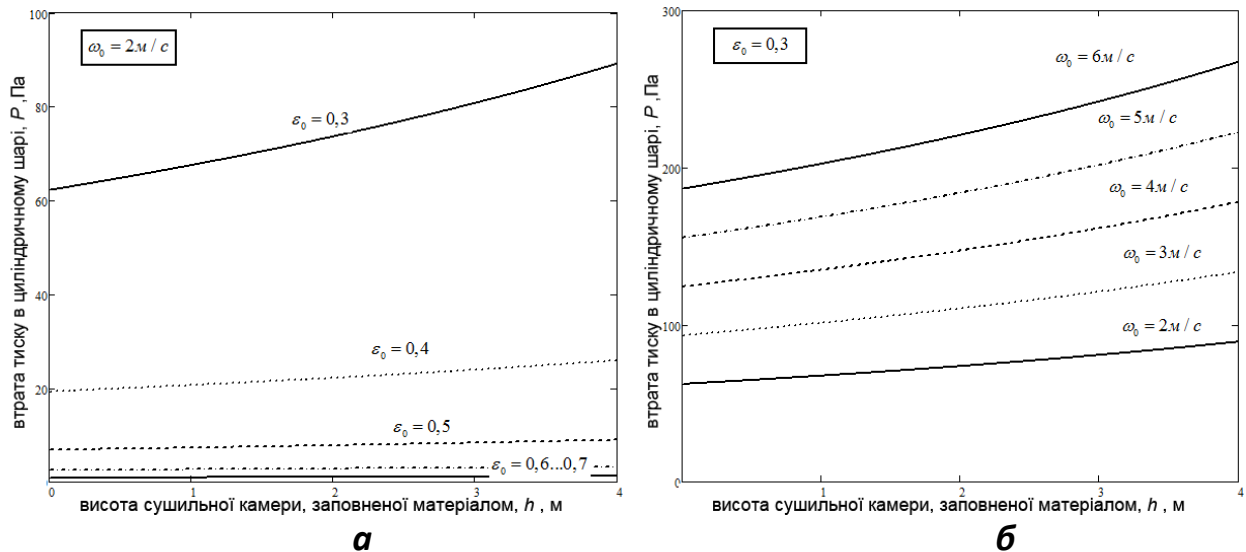


Рисунок 2.25 – Втрати тиску сушильним агентом на подолання опору матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки за умови $r_0 = 0,2$ м, $l = 0,4$ м,

$$\rho_{v0} = 630 \text{ кг/м}^3, \mu = 0,95 \cdot 10^{-5}, s_y = 1000 \text{ м}^2/\text{м}^3, a_0 = 2 \cdot 10^{-6}: \mathbf{a}) \varepsilon_0 = 0,3...0,7;$$

$$\mathbf{б) } \omega_0 = 2...6 \text{ м/с}$$

Система (2.103) характеризує втрату тиску сушильним агентом при його проходженні крізь шар матеріалу висотою $h_{c.k.}$, що заповнює циліндричну сушильну камеру з радіусом зовнішньої перфорованої стінки r_{max} і радіусом внутрішньої перфорованої стінки r_{min} .

2.6. Висновки до розділу 2

1. Проведено порівняльний аналіз технологій сушіння льону-довгунця та льону олійного. Встановлено, що для інтенсифікації процесу сушіння насіння льону олійного необхідно застосовувати перемішування і розпушування шару матеріалу спіралеподібними активаторами.
2. Розроблено модель (2.23-2.32), яка описує переміщення насіннєвого матеріалу поверхнею спіралеподібного активатора шару матеріалу у сушильній камері, що дає можливість встановити його конструктивні та кінематичні параметри.
3. Запропоновано вдосконалену модель (2.36-2.40, 2.41, 2.42, 2.43, 2.63, 2.68, 2.78), що описує процес сушіння нерухомого шару матеріалу в циліндричній сушарці при переміщенні фронту сушіння від центру до периферії вздовж радіуса сушарки. Розрахунки на ЕОМ дозволили отримати результати кінетики сушіння товстого шару матеріалу за його глибиною, а різниця із результатами експерименту склала не більше 4,5 %.
4. Аналіз одержаних на основі розробленої моделі (2.79-2.80, 2.81, 2.82, 2.86) результатів показує, що в процесі сушіння з перемішуванням матеріалу (рис. 2.19) нерівномірність сушіння за товщиною шару знижується порівняно з нерухомим шаром. Експозиція сушіння нерухомого шару склала 43,7 хв, тоді як при сушінні з перемішуванням шару матеріалу з різною інтенсивністю – в межах 38,6...41,0хв.
5. Порівняльна оцінка одержаних результатів режимів сушіння дозволяє зробити висновок про доцільність перемішування матеріалу в процесі сушіння, оскільки це призводить до зменшення тривалості сушіння на 12-16 % при сушінні насіння від 16,5 до 9 % абсолютної вологості. Також значно підвищується рівномірність сушіння усього об'єму матеріалу.
6. Для аналізу кінетики сушіння з перемішуванням запропоновано коефіцієнт масової частки матеріалу в тонкому шарі $K_{i(i)}$ (2.81), а для кількісного аналізу процесу перемішування – коефіцієнт інтенсивності перемішування σ (2.83).

7. Проведено аналіз та отримані залежності (2.103), що дозволяють отримати характеристики вентилявання шару насіння в циліндричній сушильній камері сушарки з урахуванням зміни пористості матеріалу за глибиною шару. Для сушильної камери з діаметром внутрішньої стінки 0,2 м, товщиною циліндричного шару матеріалу 0,4 м, його питомою масою 630 кг/м^3 і пористістю 0,3, висотою сушильної камери 2 м при швидкості сушильного агента на вході в матеріал 2 м/с втрата тиску становить 71 Па. Можна зробити висновок про суттєвий вплив пористості матеріалу на опір шару повітряному потоку, а отже, і про доцільність розпушування матеріалу в процесі сушіння. При зменшенні пористості матеріалу від 0,4 до 0,3 втрата тиску зростає більше ніж в 3 рази.

РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма експериментальних досліджень

У результаті збирання врожаю льону олійного, залежно від технології збирання, якості обладнання і його регулювань, а також погодно-кліматичних умов, одержаний насіннєвий матеріал (ворох насіння льону олійного) може відрізнятися за ступенем забруднення, фізико-механічними властивостями і вологістю. Все це зумовлює зниження якості насіннєвого матеріалу. Тому доцільним є вдосконалення технологічного процесу сушіння насіння льону олійного шляхом визначення раціональних режимних параметрів сушіння, а також розробки засобів для реалізації цього процесу. Для досягнення поставленої мети запропонована програма експериментальних досліджень, яка передбачає:

- 1) дослідження кінетики сушіння насіння льону олійного і визначення раціональних режимів сушіння;
- 2) визначення впливу температури і режимів сушіння насіння льону олійного на його якісні показники;
- 3) обґрунтування раціональних геометричних параметрів і режимів роботи активаторів для перемішування насіння льону олійного з застосуванням математичного методу планування експерименту;
- 4) дослідження впливу геометричних параметрів і режимів роботи активаторів на інтенсивність перемішування і ступінь пошкодження насіння льону олійного;
- 5) дослідження процесу сушіння насіння льону олійного на дослідному зразку запропонованої сушарки;

Обробка експериментальних даних проводилась згідно зі стандартними методиками [5, 6]. За результатами дослідів підраховувалися:

- середнє арифметичне значення отриманих даних:

$$x_{\text{сеп.}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.1)$$

- середня квадратична похибка:

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{сеп.}})^2}{n-1}}, \quad (3.2)$$

– середня квадратична похибка середнього арифметичного значення:

$$\sigma = \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (3.3)$$

– коефіцієнт варіації:

$$V = \frac{S_c}{x_{сep.}} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

– похибка досліду:

$$\nu = \pm \left(\frac{S_c}{x_{сep.} \cdot \sqrt{n}} \right) \cdot 100\%. \quad (3.5)$$

3.2. Лабораторне обладнання, прилади і апаратура для проведення експериментальних досліджень

Програма, розроблена для проведення експериментальних досліджень, передбачала розробку експериментальних установок для вирішення поставлених завдань.

Для проведення експериментальних досліджень визначення впливу температури і режимів сушіння насіння льону олійного на його якісні показники розроблена установка, зображена на рис. 3.1, яка працює таким чином: атмосферне повітря нагнітається вентилятором 1, проходить через електрокалорифер 2 з регулятором 3, що дозволяє забезпечити як подачу ненагрітого повітря, так і підігрівати його до встановленої температури. Після цього атмосферне повітря або сформований сушильний агент подається у гнучкий патрубок 4, звідки потрапляє до сушильної камери 5. За допомогою заслінки 7 передбачена можливість регулювання швидкості подачі повітря (сушильного агента). В сушильній камері встановлена секція 8 з перфорованим днищем, яка заповнена дослідним матеріалом. При сушінні з попереминою подачею холодного і гарячого повітря підведення сушильного агента високої температури здійснюється через заслінку 6.

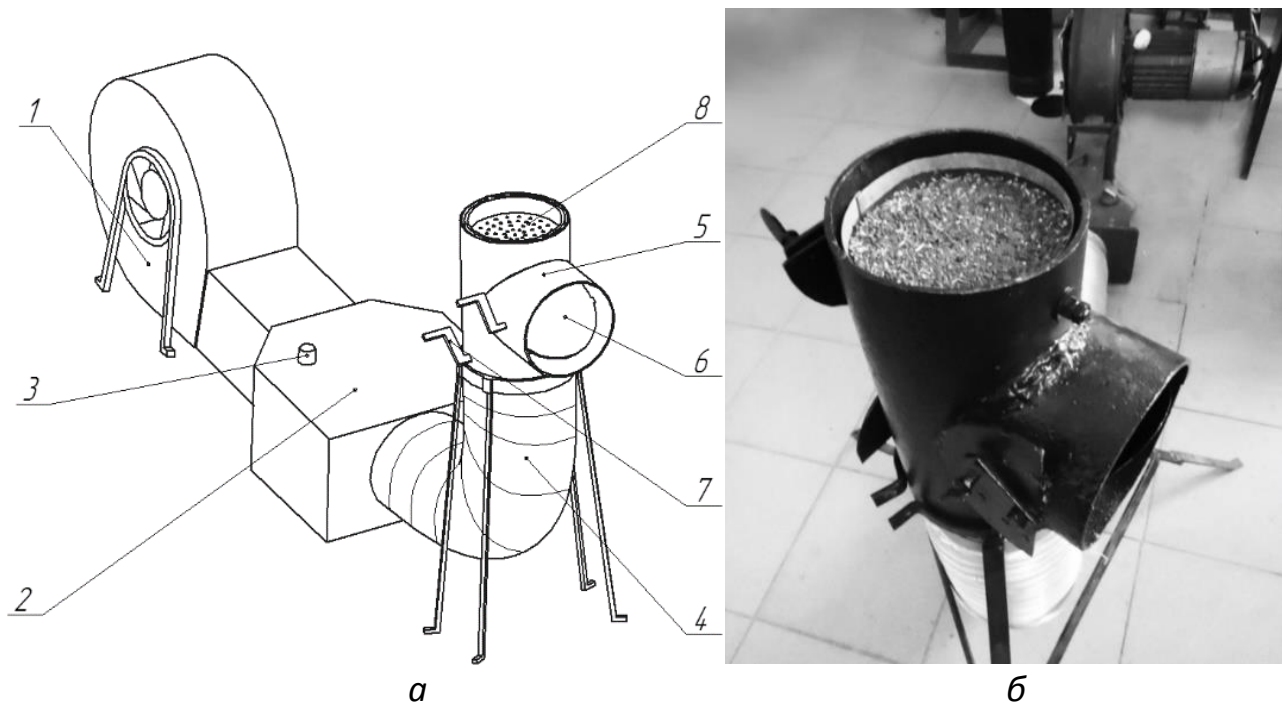


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення (а) і загальний вигляд (б) установки для дослідження режимів сушіння: 1 – вентилятор, 2 – електрокалорифер, 3 – регулятор нагрівання повітря, 4 – гнучкий патрубок, 5 – сушильна камера, 6 – заслінка з рукояткою для регулювання подачі гарячого повітря, 7 – заслінка з рукояткою для регулювання подачі холодного повітря, 8 – секція для матеріалу з перфорованим днищем

На рис. 3.2 показані функціональні схеми двох режимів роботи установки, при яких проводилось дослідження.

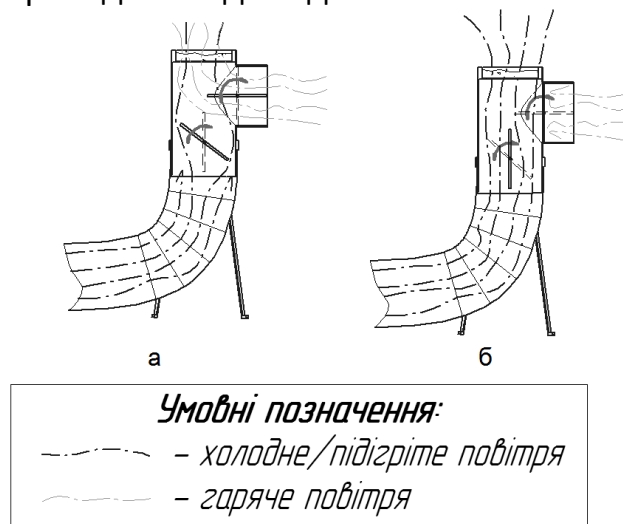


Рисунок 3.2 – Функціональна схема роботи установки для дослідження режимів сушіння: а – поперемінна подача сушильного агента з різними температурами; б – подача сушильного агента з постійними параметрами

Дослідження вентилявання вороху насіння льону олійного повітряним потоком проводилось на установці, зображеній на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 – Установка для проведення дослідження вентилявання матеріалу повітряним потоком: 1 – вентилятор; 2 – гнучкий повітропровід; 3 – циліндрична камера; 4 – вал; 5 – лопаті; 6 – рукоятка; 7 – перфороване дно з механізмом вивантаження; 8 – перфорована похила поверхня; 9 – вивантажувальне вікно

Установка працює таким чином: вентилятором 1 нагнітається повітря і гнучким трубопроводом 2 подається у вертикально встановлену циліндричну камеру 3 з дослідним матеріалом. Вздовж осі циліндричної камери 3 встановлено вал 4 з закріпленими на ньому лопатями 5 для перемішування матеріалу. Обертання вала 4 разом з лопатями 5 здійснюється рукояткою 6, закріпленою на його верхньому кінці. В нижній частині матеріал обмежений перфорованим дном 7, виконаним у вигляді чотирьох поворотних сегментів [8], при повороті яких на 90° здійснюється просипання матеріалу в нижню частину камери на перфоровану похилу поверхню 8 і вивантаження через вивантажувальне вікно 9.

Для дослідження впливу геометричних параметрів і режимів роботи активаторів на інтенсивність перемішування і ступінь пошкодження насіння льону олійного, а також обґрунтування найбільш раціональних геометричних параметрів і режимів роботи активаторів для перемішування насіння льону олійного була розроблена спеціальна установка, зображена на рис. 3.4.

Конструкція установки для дослідження перемішування матеріалу (рис. 3.4, б) передбачає можливість встановлення змінних активаторів 8 з різним кроком і діаметром спіралі. Також передбачена можливість регулювання міжосьової відстані між активаторами, що закріплюються на нижній і верхній направляючих 7. Необхідна частота обертання активаторів забезпечується обертанням рукояток 9. Передбачена можливість подачі нагрітого повітря на матеріал через решітку 5 з фланцем для приєднання вентилятора з калорифером. Знімні кришки 10 дозволяють завантажувати матеріал у верхній частині установки. Вивантажування здійснюється через вивантажувальний пристрій 3 у нижній частині установки.

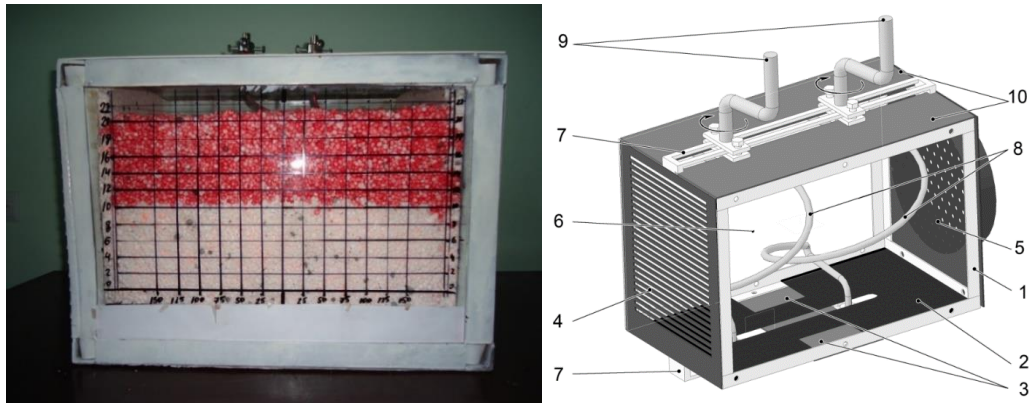


Рисунок 3.4 – Установка для дослідження перемішування матеріалу: 1 – рама; 2 – днище; 3 – вивантажувальний пристрій; 4 – решітка для відведення повітря; 5 – решітка для підведення нагрітого повітря з фланцем; 6 – прозора стінка; 7 – направляючі; 8 – змінні активатори; 9 – рукоятки; 10 – кришка

Розроблена установка дає можливість дослідити перемішування матеріалу залежно від таких факторів:

- крок циліндричної спіралі активаторів;
- діаметр витка спіралі активаторів;
- частота обертання активаторів;
- міжосьова відстань між сусідніми активаторами;
- температура і швидкість подачі сушильного агента на вологий матеріал (забезпечується додатково приєднаним вентилятором з калорифером);
- структура сипкого матеріалу і його фізико-механічні властивості.

Для дослідження процесу сушіння насіння льону олійного з перемішуванням було виготовлено дослідний зразок сушарки, зображеної на рис. 3.5 і 3.6.

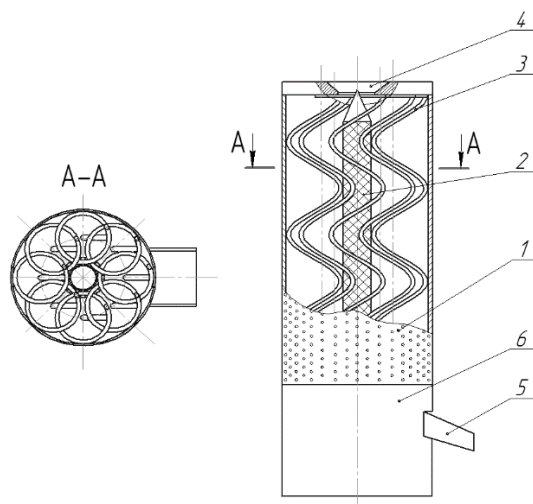


Рисунок 3.5 – Схема сушарки для насіння льону олійного: 1 – перфорована стінка сушильної камери; 2 – перфорована колона сушильної камери; 3 – спіралеподібні активатори для

перемішування матеріалу; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – вивантажувальний пристрій;
6 – теплогенератор з вентилятором

В установці використано спіралеподібні активатори для перемішування матеріалу в процесі сушіння.

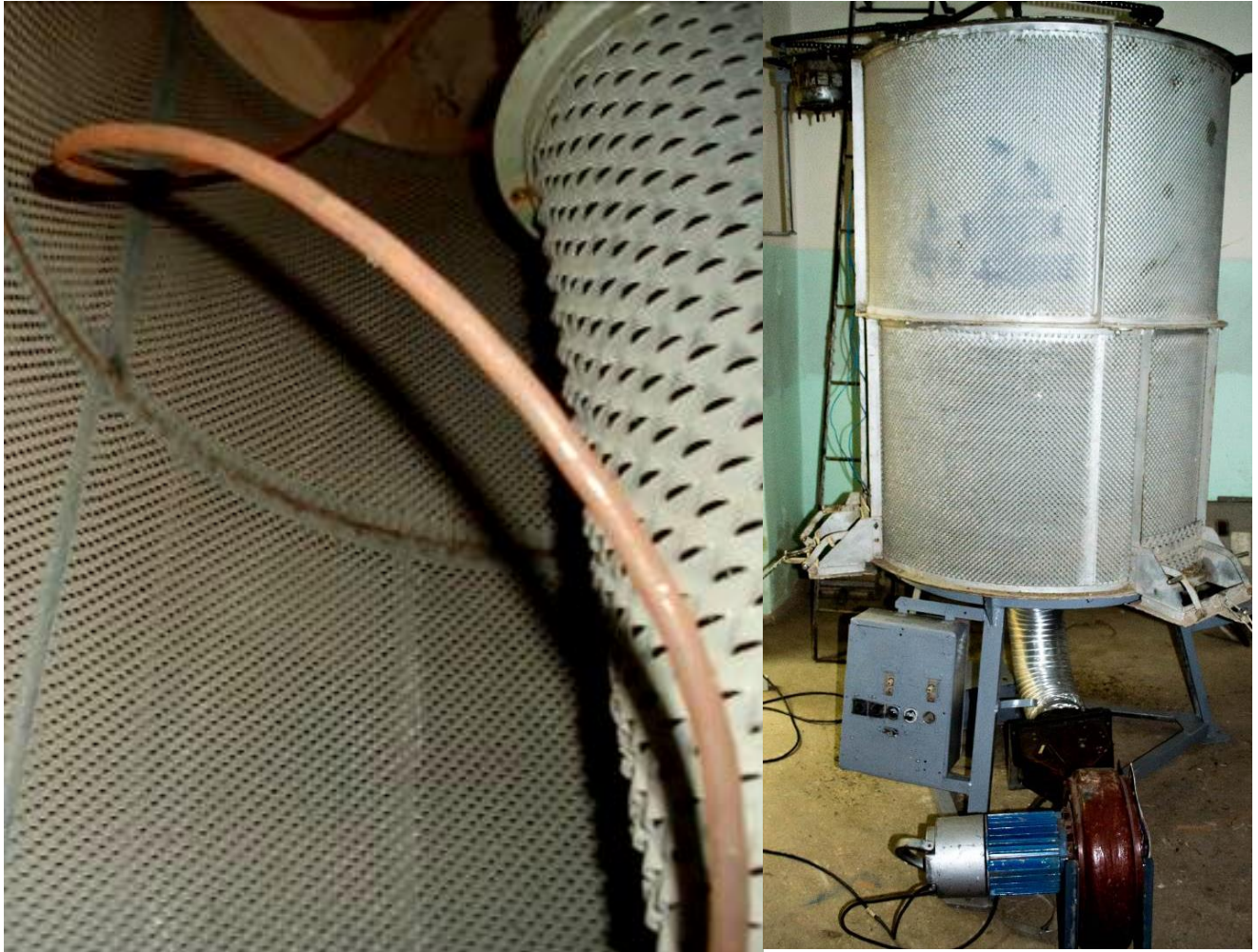


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд сушарки

Сушарка працює таким чином. Матеріал подається в сушильну камеру через завантажувальний пристрій 4. Вентилятором нагнітається атмосферне повітря і за допомогою теплогенератора 6 нагрівається до потрібної температури. Після цього сформований сушильний агент подається у перфоровану колону 2, розміщену в центрі циліндричної сушильної камери, звідки потрапляє в сушильну камеру і проходить крізь матеріал, що перебуває в сушильній камері, за всією її висотою, забирає в нього надлишкову вологу і відводиться з сушильної камери через перфоровану стінку 1. В сушильній камері встановлені активатори 3, виконані у формі профіля, закрученого за циліндричною гвинтовою лінією. В результаті обертання активаторів 3 в

напрямку, що забезпечує пеміщення їх витків догори, і матеріал, що перебуває в сушильній камері, перемішується.

Під дією гравітації і в результаті постійного перемішування матеріал поступово переміщується донизу, одночасно досягаючи кондиційної вологості. Після цього вивантажується за допомогою вивантажувального пристрою 5. Конструкція активаторів для перемішування матеріалу забезпечить низький рівень пошкодження насіння, а їх розміщення в сушильній камері – рівномірне перемішування матеріалу. Необхідна тривалість перебування матеріалу в сушильній камері контролюється вивантажувальним пристроєм.

Для проведення дослідів також використовувалося лабораторне обладнання:

- сушильна шафа типу СНОЛ – з термометром зі шкалою від 0 до 400°C та ціною поділки 5°C;
- набір бюксів;
- термометр цифровий TFA зі щупом 125 мм, діапазон вимірювань: від -40 до 200°C, похибка вимірювань: $\pm 0,8^\circ\text{C}$;
- 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.
- психрометр;
- секундомір;
- штангенциркуль/мікрометр;
- анемометр цифровий “SMART SENSOR AR826”, діапазон вимірювань 0÷45 м/с, ціна поділки 0,1 м/с, похибка $\pm 3\%$;
- циліндрична ємкість;
- мікроскоп «ЮННАТ-2П МПО2ОСВ» з кратністю збільшення: 80-400 разів і USB-камерою;
- посудина зі шкалою для визначення об'єму;
- набір решіт ТУ-36.6-2210200135-001-2003 з отворами круглого перерізу діаметром від 1 до 10 мм (рис. 3.7);
- чаші Петрі;
- екстензометр з притискними рамками.

Визначення вологості компонентів вороху насіння льону олійного проводилось методом зважування маси матеріалу до і після сушіння згідно з ГОСТ 12041-82.

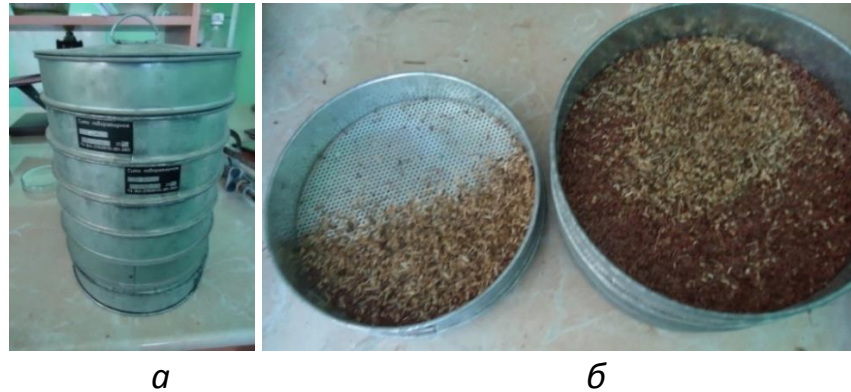


Рисунок 3.7 – Набір решіт для дослідження структури матеріалу за розмірами частинок: а – загальний вигляд решіт, б – фракції за розмірами вороху насіння льону олійного після просіювання

3.3. Методика дослідження вентилявання вороху насіння льону олійного

У процесі конвективного сушіння відбувається взаємодія сушильного агента з шаром матеріалу. У випадку багатокомпонентності матеріалу різні компоненти відрізняються за своїми властивостями, що зумовлює необхідність дослідження взаємодії вороху насіння льону олійного з різним ступенем забруднення і вологістю з повітряним потоком.

Дослідження проводилось на установці, зображеній на рис. 3.3 для вороху насіння льону олійного з масовою часткою насіння 45-50 % (матеріал одержаний в результаті збирання однофазним способом, без попереднього очищення), 80-85 % (після просіювання крізь набір решіт з різними діаметрами отворів) і 97-98 % (після попереднього очищення) і відносною вологістю вороху 14-21 %. Дослідження здійснювалося з варіюванням таких факторів: висота шару матеріалу $h=0,05; 0,20; 0,35$ м в нерухомому стані і при його перемішуванні лопатями з частотою обертання вала $\nu_s = 5$ і 10 об/хв., початкова швидкість повітряного потоку, створеного вентилятором при відсутності матеріалу в камері установки $\nu_0=1,0; 2,0$ і 3,0 м/с. Фіксувалася швидкість повітряного потоку на виході з матеріалу при зазначених факторах. Для встановлення швидкості повітряного потоку використовувався анемометр цифровий з ціною поділки 0,1 м/с.

У зв'язку з наявністю у воросі насіння льону олійного дуже дрібних і легких частинок також були проведені дослідження з вентилявання вороху насіння льону олійного. Дослідження проводилось шляхом завантаження в установку тонкого шару (висотою не більше 1 см) зразка вороху льону олійного відомої маси і продуванні його повітряним потоком, після чого проводилось повторне зважування зразка без частинок, видалених повітряним потоком відомої швидкості. Використовувався ворох з відносною вологістю 14-21 %.

Початкова масова частка насіння льону олійного у воросі становила 51 ± 2 % від загальної маси.

3.4. Методика визначення втрати якості насіння льону олійного

Як показники якості насіння льону олійного оцінювалися: енергія проростання, схожість, кількість пошкодженого насіння в загальній масі, а також наявність потемніння ядер насіння в результаті дії високих температур, що впливає на технологічні якості насіння як сировини для подальшої переробки.

Для визначення енергії проростання і схожості насіння льону олійного з кожного дослідного зразка насіння формувалося по 4 проби зі 100 насінин в кожній. Після цього насіння викладалося на 3 шари зволоженого фільтрувального паперу в спеціальних посудинах (чаша Коха, Петрі), які поміщалися в темне місце. Енергія проростання визначалася за кількістю схожого насіння через 3 дні від початку пророщування, схожість – через 7 днів. Оцінка схожості і енергії проростання проводилася згідно з ГОСТ 12038-84.

Дослідження схожості і енергії проростання також проводилося для стиглого насіння льону олійного після попереднього очищення, яке піддавалося сушінню різними температурами, при різних режимах і з різною тривалістю.

Для дослідження впливу температур і тривалості сушіння на енергію проростання і схожість насіння льону олійного використовувалося очищене зволожене насіння з схожістю 95 % і початковою відносною вологістю 17 %. Сушіння проводились при температурах 45, 55 і 65°C. Також досліджувався вплив тривалості сушіння на енергію проростання і схожість.

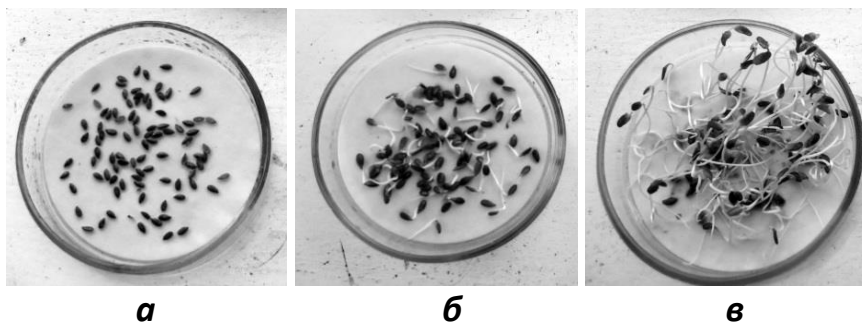


Рисунок 3.8 – Дослідження енергії проростання і схожості насіння льону олійного: **а)** 1-ий день; **б)** 3-ій день; **в)** 7-ий день

Наявність ознак пошкодження ядер насіння в результаті сушіння за наявністю тріщин і зміни кольору ядер насінин визначалася таким чином: з дослідного зразка насіння формувалося по 4 проби зі 100 насінин в кожній, з яких встановлювалася наявність тріщин на оболонці, а також зміни кольору і відсоток пошкоджених ядер від загальної кількості насінин в зразку. Оцінка зміни кольору робилася на основі порівняння кольору дослідного зразка

насінини після сушіння з базовим зразком (що не піддавався термічній обробці).

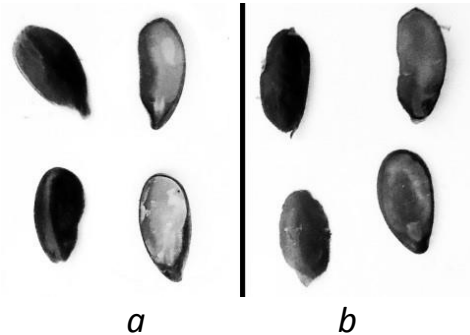


Рисунок 3.9 – Поздовжній розріз насінин льону олійного: *а* – без впливу високих температур; *б* – потемніння ядра в результаті впливу високих температур

Ступінь механічного пошкодження насіння в результаті дії на нього активаторів установки для дослідження ефективності перемішування (рис.3.4) визначався на основі порівняння кількості пошкодженого насіння до і після дослідження. До пошкоджених відносяться биті і роздавлені насінини, насінини, які мають тріщини, подряпини і вибоїни на поверхні і по краях, а також з розплющеними і відбитими носиками. Кількість пошкоджених насінин визначали за формулою [4]:

$$c_{\partial} = \left(\frac{\sum a_{\partial}}{\sum a_c + \sum a_{\partial}} - \frac{\sum a_{\partial.н.}}{\sum a_{с.н.} + \sum a_{\partial.н.}} \right) \cdot 100, \quad (3.6)$$

де $\sum a_{\partial}$ – кількість пошкоджених насінин, г; $\sum a_c$ – кількість нормальних насінин, г; $\sum a_{\partial.н.}$ – кількість пошкоджених насінин у вихідному матеріалі, г; $\sum a_{с.н.}$ – загальна кількість нормальних насінин у вихідному матеріалі, г.

3.5. Методика визначення раціональних режимів сушіння насіння льону олійного

Дослідження раціональних режимів сушіння насіння льону олійного проводилось на спеціально розробленій установці, показаній на рис. 3.1.

Дослідження проводилось для насіння льону олійного, що пройшло попереднє очищення від домішок з початковою відносною вологістю 14,2 %. Сушіння проводилось за таких режимів:

- вентильовання атмосферним повітрям з температурою 20 °С;
- сушіння сушильним агентом з постійною протягом усього періоду сушіння температурою 40...65 °С;
- сушіння з попеременною подачею атмосферного повітря з температурою 20 °С і сушильного агента з температурою 60 °С інтервалами 30 сек.

– сушіння з попеременною подачею атмосферного повітря з температурою 20 °С і короткочасною подачею сушильного агента (100°С). Тривалість повного циклу чергування подачі атмосферного повітря і сушильного агента становила 1 хв. Досліджувалося сушіння для інтервалів подачі гарячого повітря тривалістю 10, 20 і 30 сек.

Швидкість сушильного агента в камері становила 2,1...2,2 м/с. Товщина шару матеріалу становила 1 см.

Порівняння ефективності сушіння різними методами здійснювалося, виходячи з швидкості сушіння при різних режимах, а також враховуючи питому кількість тепла сушильного агента, що подається в сушильну камеру установки залежно від режиму сушіння.

При постійній температурі сушильного агента протягом усього часу сушіння питому кількість тепла на нагрівання повітря визначимо за формулою [4]:

$$Q = L \cdot (I - I_0), \text{ ккал/год}, \quad (3.7)$$

де L – питома витрата повітря, що подається в сушильну камеру, за одиницю часу, кг/год; I – тепловміст нагрітого повітря, ккал/кг с.п; I_0 – тепловміст атмосферного повітря, ккал/кг с.п.

Питому витрату повітря для циліндричної сушильної камери установки визначимо за формулою:

$$L = v \cdot S = v \cdot \frac{\pi \cdot d_{ск}^2}{4} \cdot \gamma, \quad (3.8)$$

де v – швидкість повітряного потоку в сушильній камері, м/с². S – площа поперечного перерізу сушильної камери, м²; $d_{ск}$ – діаметр сушильної камери, м; γ – питома маса повітря, кг/м³.

При сушінні з попеременною подачею сушильного агента з температурами t_1 і t_2 питому кількість тепла визначатимемо за формулою:

$$Q = L_1 \cdot (I_1 - I_0) + L_2 \cdot (I_2 - I_0), \text{ ккал/год}, \quad (3.9)$$

де I_1 та I_2 – тепловміст сушильного агента при його температурах t_1 і t_2 відповідно; L_1 та L_2 – питомі витрати сушильного агента з його температурами t_1 і t_2 відповідно.

$$L_{1,2} = L \cdot T'_{1,2}, \quad (3.10)$$

де T'_1 та T'_2 – часові коефіцієнти, що виражають відношення тривалості подачі сушильного агента з температурами t_1 та t_2 до загальної тривалості сушіння, $T'_1 + T'_2 = 1$.

Тепловміст через температуру і вологовміст можна визначити за формулою [4]:

$$I = 0,24 \cdot t + \frac{d}{1000} \cdot (595 + 0,47 \cdot t), \text{ ккал/кг с.п.}, \quad (3.11)$$

де t – температура, °С; d – вологовміст, г/кг с.п.

При вентиляванні атмосферним повітрям $I_1=I_0$, а енергія буде затрачатися лише на привод вентилятора (при порівнянні не враховується).

Оцінка якості насіння льону олійного здійснювалася згідно з методикою, описаною в п. 3.4.

3.6. Методика визначення параметрів активаторів для перемішування сипких матеріалів

Основними конструктивними і режимними параметрами запропонованих активаторів є крок спіралі k_s , діаметр спіралі D_s , міжосьова відстань між сусідніми активаторами a_s і частота обертання ν_s .

Встановлення найбільш раціональних значень цих параметрів здійснювалось на виготовленій спеціальній дослідній установці (рис.3.4).

Для нашого дослідження як матеріал використовувались кульки пінополістиролу, розділені на дві групи за забарвленням. Матеріал завантажувався в ємність експериментальної установки за схемами, показаними на рис.3.10. Після цього здійснювалось перемішування матеріалу шляхом обертання активаторів.

Дослідження проводилось з варіюванням таких факторів:

- крок витка спіралі активаторів: 200, 250 і 300 мм;
- міжосьова відстань між сусідніми витками спіралі: 100, 125 і 150 мм;
- частота обертання активаторів: 6, 9, 15, 30, 60 і 120 об/хв.;

Оцінка якості роботи спіралеподібних активаторів здійснювалася на основі аналізу двох величин: однорідність суміші і ступінь розпушування.

Однорідність суміші прийнято визначати за показником коефіцієнта неоднорідності на основі методів математичної статистики [11]:

$$V_c = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (3.12)$$

де x_i – поточне значення величини; $\bar{x}$ – середньоарифметичне значення цієї величини;
 n – кількість проб.

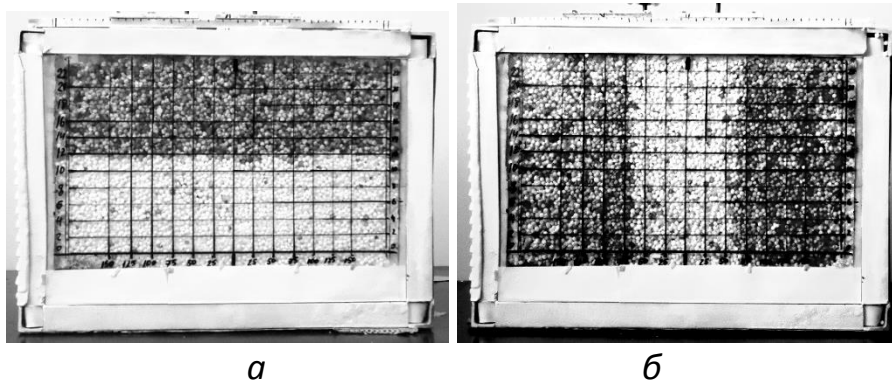


Рисунок 3.10 – Способи завантаження матеріалу в дослідну установку за групами:
 a – горизонтально ; b – вертикально

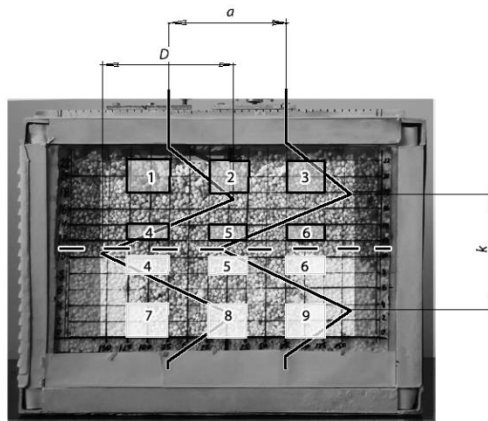


Рисунок 3.11 – Схема розміщення контрольних ділянок для оцінки ефективності перемішування

Однорідність суміші визначалася в контрольних ділянках матеріалу, показаних схематично на рис. 3.11.

Важливим показником в технологічному процесі роботи пропонованої сушарки є величина розпушування, оскільки вона впливає на опір шару матеріалу проходженню крізь нього сушильного агента і, як результат, ефективності його використання в сушарці. Ступінь розпушування оцінювався як відносне збільшення об'єму матеріалу від початкового об'єму у стані спокою

$$P_{\text{розп.}} = \frac{V_{\text{кін.}}}{V_{\text{поч.}}} \cdot 100\%, \quad (3.13)$$

де $V_{\text{поч.}}$ – початковий об'єм досліджуваного матеріалу у стані спокою, м^3 ;
 $V_{\text{кін.}}$ – об'єм досліджуваного матеріалу в процесі розпушування, м^3 .

3.7. Методика визначення ступеня пошкодження насіння льону олійного в процесі перемішування і розпушування активаторами сушарки

Необхідність перемішування матеріалу в процесі сушіння зумовлена низькою ефективністю сушіння нерухомого шару матеріалу. Водночас, разом з позитивним ефектом від застосування перемішування матеріалу цей процес може здійснювати негативний вплив на якість насіння, що проявляється в його механічному пошкодженні активаторами. Зважаючи на це, була запропонована конструкція активаторів для перемішування і розпушування матеріалу у вигляді витків циліндричної спіралі, позбавлених гострих країв. Для перевірки впливу запропонованих активаторів на насіння льону олійного було проведено експериментальні дослідження.

Дослідження проводилось на дослідній установці, зображеній на рис. 3.4. Для дослідження використовувався ворох насіння льону олійного з масовою часткою домішок у насінні 45-50 %, 15-10 % і 3-2 %.

Для кожного зразка матеріалу відбиралися проби і визначався початковий відсоток пошкодженого насіння. Приналежність компонентів вороху до насіння льону, сміттєвих і олійних домішок визначалась згідно з ГОСТ 10582-76.

Дослідний матеріал завантажувався в дослідну установку, після чого приводились в дію активатори для перемішування і розпушування зі встановленою частотою обертання. Через кожні 10 обертів активаторів відбиралися проби матеріалу і визначався ступінь механічного пошкодження насіння за формулою (3.6) згідно з методикою, описаною в п.3.4.

3.8. Методика дослідження кінетики сушіння вороху льону олійного

Дослідження проводилось на дослідній установці, зображеній на рис. 3.1. Шар вороху насіння завантажувався в секцію 8 (рис 3.1), після чого піддавався сушінню сушильним агентом з установленими різними швидкостями і температурами. Періодично відбиралися проби матеріалу і визначалася його вологість за стандартною методикою зважуванням зразка до і після повного видалення з нього вологи в сушильній шафі. Одержані дані характеризують кінетику сушіння матеріалу і можуть бути описані однією з емпіричних залежностей, представлених у табл. 1.5. розділу 1.

Для одержаних експериментальних даних кінетики сушіння (табл. 1.5) в результаті нелінійного регресійного аналізу, здійсненого за допомогою комп'ютерної програми SPSS 17.0, було встановлено значення невідомих коефіцієнтів для кожного з представлених в табл.1.5. рівнянь моделей сушіння, що забезпечують мінімальне відхилення між експериментальними і розрахунковими даними.

Графічне представлення цих моделей для насіння льону олійного з встановленими значеннями невідомих коефіцієнтів подано на рис.3.12.

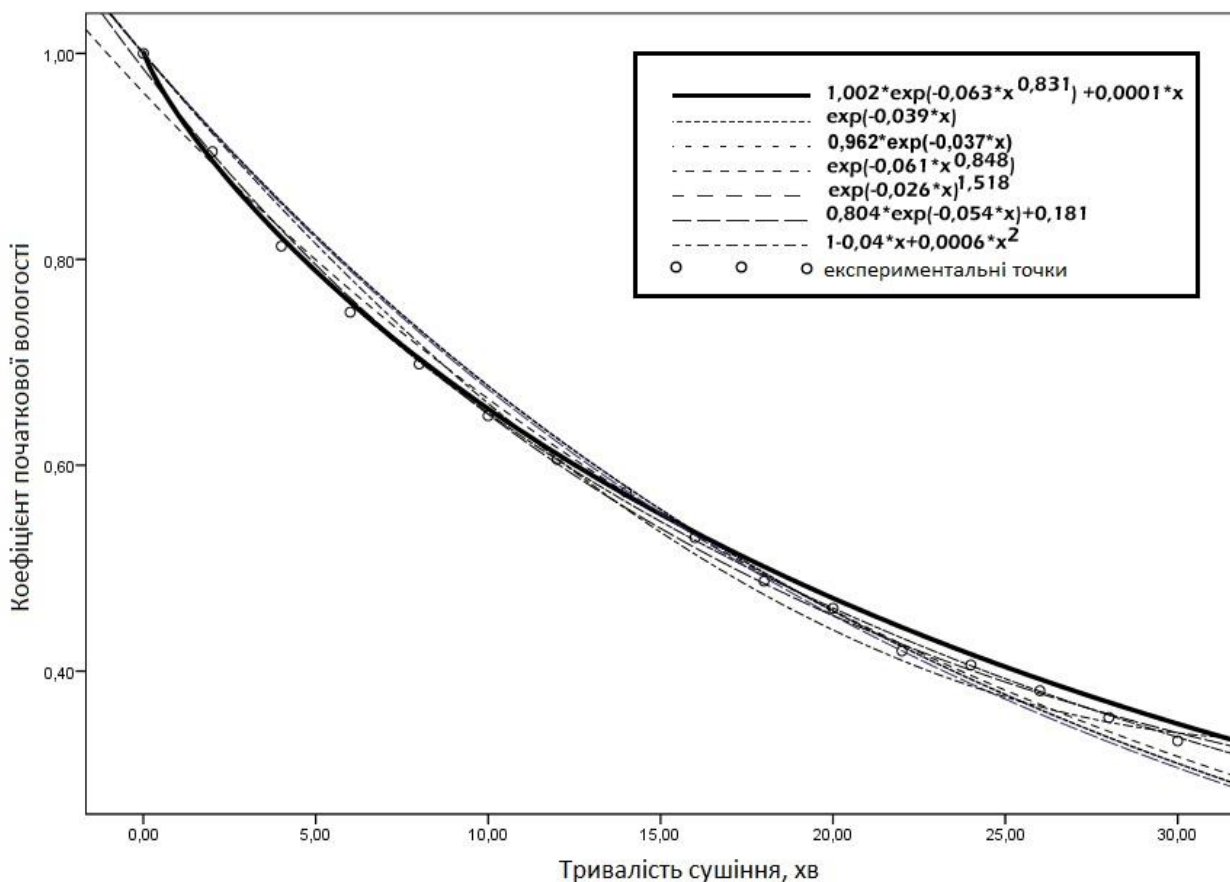


Рисунок 3.12 – Криві, що відображають різні моделі кінетики сушіння насіння льону олійного за температури сушильного агента 45°C.

Оцінка точності кожної моделі здійснювалася за такими показниками: коефіцієнт детермінації, сума квадратів похибок, стандартна середньоквадратична похибка.

Коефіцієнт детермінації:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{експ,i})^2}{\sum_{i=1}^N (MR_p - MR_{експ.ср,i})^2}, \quad (3.14)$$

де $MR_{p,i}$ – розрахункове значення величини; $MR_{експ, i}$ – експериментальне значення величини; $MR_{експ, i}$ – середнє експериментальне значення; N – кількість спостережень.

Сума квадратів похибок:

$$SSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{експ,i})^2}{N} \right]. \quad (3.15)$$

Стандартна середньоквадратична похибка:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{p,i} - MR_{експ,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (3.16)$$

3.9. Методика визначення рівномірності сушіння вороху насіння льону олійного з перемішуванням шару матеріалу із застосуванням математичного методу планування експерименту

Дослідження проводилось на установці, зображеній на рис. 3.4. Досліджувався ворох насіння льону олійного зі ступенем забруднення насіння 20 % і початковою відносною вологістю 15 %. Оцінка рівномірності сушіння проводилась за значенням неоднорідності вологості проб матеріалу, відібраних після сушіння протягом 15 хв. з контрольних ділянок (рис. 3.11), і розрахованим за формулою (3.12).

Досліджувався вплив на рівномірність сушіння наступних факторів:

- швидкість сушильного агента на вході в сушильну камеру v , м/с;
- температура сушильного агента на вході в сушильну камеру t , °С;
- частота обертання активаторів v_s , хв.⁻¹;
- крок витка спіралі спіралеподібних активаторів k_s , м.

Для встановлення впливу швидкості і температури сушильного агента, а також кроку витка і частоти обертання спіралеподібних активаторів на рівномірність сушіння було використано симетричний некомпозиційний план Бокса-Бенкіна другого порядку [6]. Для реалізації чотирифакторного експерименту за цим планом необхідно провести 27 дослідів.

Планування експерименту передбачало кодування факторів; складання таблиці факторів і рівнів варіювання; складання матриці планування;

проведення дослідів згідно з матрицею планування; визначення коефіцієнтів рівняння регресії; складання рівняння регресії; перевірку адекватності отриманої у вигляді рівняння регресії математичної моделі; розкодування факторів і представлення рівняння регресії в натуральному вигляді.

При складанні таблиці факторів і рівнів варіювання (табл.3.1) враховували результати попередніх досліджень і інформацію, отриману з літературних джерел. План Бокса-Бенкена розрахований на використання трьох рівнів для кожного фактора: верхнього (+1), основного (0) і нижнього (-1).

Таблиця 3.1 – Фактори та рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори			
	Температура сушильного агента t , °C	Швидкість сушильного агента v , м/с	Частота обертання активаторів v_s , хв ⁻¹	Крок спіралі k_s , м
	x_1	x_2	x_3	x_4
Верхній (+1)	55	1,9	12	0,30
Основний (0)	45	1,2	8	0,25
Нижній (-1)	35	0,5	4	0,20
Інтервал варіювання ε	10	0,7	4	0,05

Для переведення натуральних факторів у безрозмірні величини кодування здійснювалось з використанням залежностей:

$$x_1 = \frac{v - v_o}{\varepsilon_1}, \quad x_2 = \frac{t - t_o}{\varepsilon_2}, \quad x_3 = \frac{v_s - v_{so}}{\varepsilon_3}, \quad x_4 = \frac{k_s - k_{so}}{\varepsilon_4}, \quad (3.17)$$

де v_o, t_o, v_{so}, k_{so} – значення факторів на основному рівні, відповідно, швидкості сушильного агента, температури сушильного агента, частоти обертання спіралеподібних активаторів, кроку витка спіралі спіралеподібних активаторів; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ – інтервал варіювання фактора.

Дослідження проводили згідно з матрицею планування експерименту (табл.3.2). У розкодованому вигляді матриця планування експерименту представлена у табл.3.3.

Порядок проведення дослідів встановлювали, використовуючи таблицю випадкових чисел.

Функція відгуку y (рівномірність сушіння) в області факторного простору подана у вигляді нелінійного рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2. \quad (3.18)$$

Коефіцієнти регресії визначаються згідно з методикою [12].

Довірчі інтервали оцінок коефіцієнтів регресії розраховуємо за формулою:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i}, \quad (3.19)$$

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

Коефіцієнти регресії вважаються значущими за такої умови:

$$|b_i| \geq \Delta_{b_i}. \quad (3.20)$$

Зважаючи на те, що експерименти проводились із однаковим числом повторюваностей, то однорідність ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена [6]. Для цього визначали розрахункову величину даного критерію:

$$G^{розр.} = \frac{S_{y_i \max}^2}{\sum_{i=1}^n S_{y_i}^2}, \quad (3.21)$$

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

$$S_{y_i}^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{g=1}^m (y_{ig} - \bar{y}_i)^2, \quad (3.22)$$

де m – число повторюваностей в досліді; g – номер повторюваності; y_{ig} – результат g -ї повторюваності i -го досліді; $\bar{y}_i$ – середнє арифметичне значення усіх повторюваностей i -го досліді.

Ряд дисперсій вважали однорідним, якщо

$$G^{розр.} < G^{табл.}(0.05; n; f), \quad (3.23)$$

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

Перевірку адекватності моделі проводили за F – критерієм Фішера. Його розрахункове значення:

$$F_{f_2, f_1}^{розр.} = \frac{S_{неад.}^2}{S_y^2}, \quad (3.24)$$

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

Число ступенів вільності:

$$f_2 = N - k' - 1, \quad (3.25)$$

де k' – число значущих коефіцієнтів рівняння регресії.

Таблиця 3.2 – Матриця планування чотирифакторного експерименту

№	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1X_2	X_1X_3	X_1X_4	X_2X_3	X_2X_4	X_3X_4	X_1^2	X_2^2	X_3^2	X_4^2
1	+1	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0
2	-1	+1	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0
3	+1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0
4	-1	-1	0	0	+1	0	0	0	0	0	+1	+1	0	0
5	0	0	+1	+1	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1	+1
6	0	0	-1	+1	0	0	0	0	0	-1	0	0	+1	+1
7	0	0	+1	-1	0	0	0	0	0	-1	0	0	+1	+1
8	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1	+1
9	+1	0	0	+1	0	0	+1	0	0	0	+1	0	0	+1
10	-1	0	0	+1	0	0	-1	0	0	0	+1	0	0	+1
11	+1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	+1	0	0	+1
12	-1	0	0	-1	0	0	+1	0	0	0	+1	0	0	+1
13	0	+1	+1	0	0	0	0	+1	0	0	0	+1	+1	0
14	0	-1	+1	0	0	0	0	-1	0	0	0	+1	+1	0
15	0	+1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	+1	+1	0
16	0	-1	-1	0	0	0	0	+1	0	0	0	+1	+1	0
17	+1	0	+1	0	0	+1	0	0	0	0	+1	0	+1	0
18	-1	0	+1	0	0	-1	0	0	0	0	+1	0	+1	0
19	+1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	+1	0	+1	0
20	-1	0	-1	0	0	+1	0	0	0	0	+1	0	+1	0
21	0	+1	0	+1	0	0	0	0	+1	0	0	+1	0	+1
22	0	-1	0	+1	0	0	0	0	-1	0	0	+1	0	+1
23	0	+1	0	-1	0	0	0	0	-1	0	0	+1	0	+1

24	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	+1	0	0	+1	0	+1
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Величина $S_{неад.}^2$ дорівнює:

$$S_{неад.}^2 = \frac{SS_{неад.}}{f_2}. \quad (3.26)$$

Сума квадратів $SS_{неад.}$, зважаючи на трикратну повторюваність дослідів в центрі плану, визначається за формулою:

$$SS_{неад.} = n_o \cdot (y_{орозр.} - \bar{y}_o)^2 + \sum_{u=1}^{24} (y_{уорозр.} - \bar{y}_{уексп.})^2, \quad (3.27)$$

де $y_{орозр.}$ – розрахункове значення відгуку дослідів в центрі плану; $\bar{y}_o$ – середнє експериментальне значення відгуку дослідів в центрі плану; $y_{уорозр.}$ – розрахункове значення відгуку в u -му досліді; $\bar{y}_{уексп.}$ – середнє експериментальне значення відгуку в u -му досліді.

Таблиця 3.3 – Планування експерименту

Номер дослідів	Фактори			
	v , м/с	t , °C	ν_s , хв ⁻¹	k_s , м
1	1,9	55	8	0,25
2	0,5	55	8	0,25
3	1,9	35	8	0,25
4	0,5	35	8	0,25
5	1,2	45	12	0,30
6	1,2	45	4	0,30
7	1,2	45	12	0,20
8	1,2	45	4	0,20
9	1,9	45	8	0,25
10	0,5	45	8	0,25
11	1,9	45	8	0,20
12	0,5	45	8	0,20
13	1,2	55	12	0,25
14	1,2	35	12	0,25
15	1,2	55	4	0,25
16	1,2	35	4	0,25
17	1,9	45	12	0,25
18	0,5	45	12	0,25
19	1,9	45	4	0,25
20	0,5	45	4	0,25

21	1,2	55	8	0,30
22	1,2	35	8	0,30
23	1,2	55	8	0,20
24	1,2	35	8	0,20
25	1,2	45	8	0,25
26	1,2	45	8	0,25
27	1,2	45	8	0,25

Модель вважається адекватною за умови:

$$F^{\text{розн.}} \leq F^{\text{табл.}}, \quad (3.28)$$

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

Запропонована методика проведення експерименту за планом Бокса-Бенкіна дозволяє отримати математичну модель рівномірності сушіння вороху насіння льону олійного у вигляді рівняння регресії.

Аналіз рівняння регресії дає можливість оцінити вплив на рівномірність сушіння вороху насіння льону олійного таких факторів, як початкова швидкість сушильного агента, температура сушильного агента, частота обертання і крок витка спіралі спіралеподібних активаторів.

3.10. Методика визначення впливу режимних параметрів сушарки і матеріалу на швидкість сушіння з застосуванням методу математичного планування експерименту

Дослідження проводилось на дослідному зразку сушарки, зображеної на рис. 3.5 і 3.6.

Досліджувався вплив на швидкість сушіння таких факторів:

- температура сушильного агента на вході в сушильну камеру t , °С;
- частота обертання спіралеподібних активаторів сушарки n , об/хв;
- абсолютна вологість насіння льону олійного, u , %.

Зниження вологості насіння від u_1 до u_2 за час τ (швидкість сушіння), приймалося як експериментальне значення функції відгуку y . Швидкість сушіння y визначалася за формулою:

$$y = \frac{u_1 - u_2}{\tau}, \quad (3.29)$$

де τ – час сушіння, для якого визначалося середнє значення швидкості сушіння, хв;
 U_1 – вологість насіння льону олійного на початку проміжку часу τ , %; U_2 – вологість насіння
 льону олійного вкінці часу τ , %.

Величина часу τ приймалася рівною 4 хв.

Дослідження проводилось наступним чином. Ворох насіння льону олійного з відомою абсолютною вологістю насіння u завантажувався в сушильну камеру сушарки. Після цього через внутрішню перфоровану стінку сушильної камери подавався сушильний агент з температурою на вході в сушильну камеру t . В процесі сушіння здійснювалось розпушування і перемішування матеріалу спіралеподібними активаторами, що обертались з постійною частотою n . При цьому відбиралися проби матеріалу, за якими визначалася абсолютна вологість насіння в матеріалі u без урахування вологості домішок і розраховувалась швидкість його сушіння за формулою (3.23). Проби матеріалу відбиралися в шести фіксованих ділянках об'єму сушильної камери за схемою, показаною на рис.3.13. Після цього визначалося середнє значення показників.

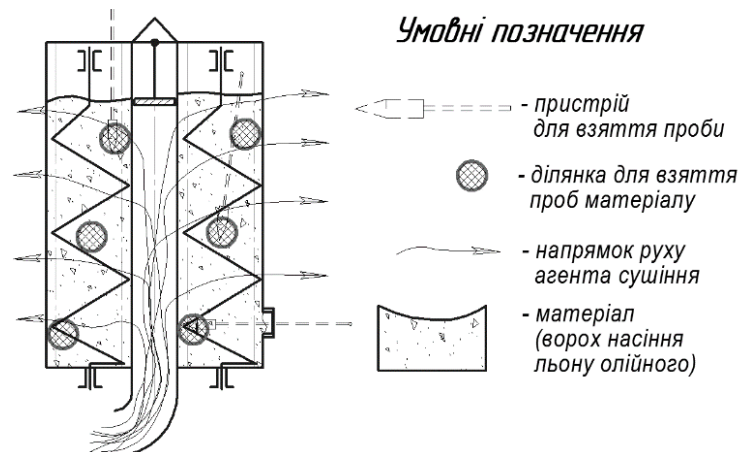


Рисунок 3.13 – Схема брання проб матеріалу в сушильній камері сушарки

Швидкість сушильного агента на вході в матеріал становила 1,3-1,5 м/с. Для дослідження використовувався ворох насіння льону олійного з масовою часткою насіння 55-68 % від загальної маси вороху.



а



б

Рисунок 3.14 – Визначення режимів сушіння: а – вимірювання температури сушильного агента, б – вимірювання швидкості сушильного агента

Проведення дослідів і обробка експериментальних даних здійснювалась згідно з симетричним некомпозиційним планом Бокса-Бенкіна другого порядку [1, 6, 7].

Фактори і рівні варіювання для нашого дослідження зведені до табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Фактори та рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори		
	Температура сушильного агента на вході в сушильну камеру t , °C;	Частота обертання спіралеподібних активаторів сушарки ν_s , об/хв.	Абсолютна вологість насіння льону олійного, u , %.
	X_1	X_2	X_3
Верхній (+1)	55	11	14
Основний (0)	45	6	11,5
Нижній (-1)	35	1	9
Інтервал варіювання ε	10	5	2,5

Перевірка відтворюваності дослідів за однакового числа повторюваностей для кожної точки плану проводилася за критерієм Кохрена, табличне значення якого [7] $G_{табл.}(0,05;n; f_u)$, де 0,05 – 5 %-й рівень значущості (дорівнює $1-\alpha$, де α – довірна ймовірність); n – число незалежних оцінок дисперсії (число дослідів); $f_u = m_0 - 1$ – число ступенів вільності кожної оцінки, тут m_0 – число повторюваностей.

Процес відтворюваний за умови:

$$G \leq G_{табл.}(0,05;n; f_u), \quad (3.30)$$

$$\text{де } G = \frac{S_{u \max}^2}{\sum_{u=1}^n S_u^2}.$$

Нелінійний характер функцій відгуку в області факторного простору поданий у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2. \quad (3.31)$$

Таблиця 3.5 – Планування експерименту

№ дослідів	Фактори в натуральних величинах			Значення кодованих факторів			Вихідний параметр %/год.			Середнє арифметичне значення вихідного параметра
	$t, ^\circ\text{C}$ (X_1)	$V_s,$ об/хв (X_2)	$u, \%$ (X_3)	x_1	x_2	x_3	y_{u1}	y_{u2}	y_{u3}	
1	55	11	11,5	1	1	0	0,302	0,294	0,298	0,298
2	55	6	14	1	0	1	0,384	0,375	0,361	0,373
3	55	6	9	1	0	-1	0,228	0,216	0,242	0,229
4	55	1	11,5	1	-1	0	0,241	0,244	0,252	0,246
5	45	11	14	0	1	1	0,372	0,358	0,35	0,36
6	45	11	9	0	1	0	0,124	0,139	0,119	0,127
7	45	6	11,5	0	1	-1	0,299	0,287	0,288	0,291
8	45	6	11,5	0	0	0	0,277	0,273	0,267	0,272
9	45	6	11,5	0	0	0	0,276	0,276	0,291	0,281
10	45	1	14	0	0	0	0,289	0,322	0,296	0,302
11	45	1	9	0	-1	1	0,055	0,036	0,06	0,05
12	35	11	11,5	0	-1	-1	0,142	0,166	0,159	0,156
13	35	6	14	-1	0	1	0,262	0,275	0,269	0,269
14	35	6	9	-1	0	-1	0,029	0,021	0,022	0,024
15	35	1	11,5	-1	-1	0	0,069	0,075	0,087	0,077

Коефіцієнти регресії після реалізації плану експерименту визначено за такими формулами [3]:

$$b_0 = 0,33333 \cdot \sum_{j=1}^{n_0} y_j - 0,16667 \cdot \sum_{i=1}^{k_\phi} \sum_{j=1}^{n_0} x_{ij}^2 \cdot y_j, \quad (3.32)$$

$$b_i = 0,08333 \cdot \sum_{j=1}^{n_0} x_{ij} \cdot y_j, \quad (3.33)$$

$$b_{ii} = 0,125 \cdot \sum_{j=1}^{n_0} x_{ij}^2 \cdot y_j + 0,0625 \cdot \sum_{i=1}^{k_\phi} \sum_{j=1}^{n_0} x_{ij}^2 \cdot y_j - 0,16667 \cdot \sum_{j=1}^{n_0} y_j, \quad (3.34)$$

$$b_{ir} = 0,25 \cdot \sum_{j=1}^{n_0} x_{ij} \cdot x_{ri} \cdot y_j, \quad (3.35)$$

де j – номер дослідів в матриці планування; n_0 – кількість дослідів в матриці планування; y_j – значення функції відгуку в j -му досліді; k_ϕ – кількість факторів; x_{ij} , x_{ri} – кодовані значення i -го чи r -го фактору в j -му досліді; i, r – номери факторів.

Дисперсії коефіцієнтів регресії та їх коваріації визначено за формулами [3]:

$$S_{b_0}^2 = 0,33333 S_y^2, \quad (3.36) \quad S_{b_i}^2 = 0,08333 S_y^2, \quad (3.37)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = 0,1875 S_y^2, \quad (3.38) \quad S_{b_{ir}}^2 = 0,25 S_y^2, \quad (3.39)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{ii}} = -0,16667 S_y^2, \quad (3.40) \quad \text{cov}_{b_{ii} b_{ir}} = 0,0625 S_y^2. \quad (3.41)$$

Значущість коефіцієнтів регресії перевіряли порівнюючи абсолютну величину цих коефіцієнтів з їх довірчими інтервалами. Довірчі інтервали розраховували згідно з формулами:

$$\Delta b_0 = t_{0,05; f_1} S_{b_0}, \quad (3.42) \quad \Delta b_i = t_{0,05; f_1} S_{b_i}, \quad (3.43)$$

$$\Delta b_{ir} = t_{0,05; f_1} S_{b_{ir}}, \quad (3.44) \quad \Delta b_{ii} = t_{0,05; f_1} S_{b_{ii}}, \quad (3.45)$$

де $t_{0,05; f_1}$ – табличне значення критерію Стюдента при 5 %-му рівні значущості та $f_1 = n_0 - 1$ – числа ступенів вільності дисперсії відтворюваності, (n_0 – кількість дослідів у центрі плану).

Коефіцієнт регресії вважали статистично значущим, коли його абсолютна величина більша довірчого інтервалу або рівна йому. Незначущі коефіцієнти видаляли із моделі.

Перевірку адекватності рівняння проводили за допомогою F_f – критерію Фішера. Адекватність отриманої моделі матиме місце, якщо розрахункове значення критерію $F_{f_2;f_1}^{розр.}$ менше від табличного для прийнятого рівня значущості:

$$F_{f_2;f_1}^{розр.} \leq F_{0,05;f_2;f_1}^{табл.}, \quad (3.46)$$

де $F_{0,05;f_2;f_1}^{табл.}$ – табличне значення критерію Фішера при 5 %-му рівні значущості і ступенях вільності дисперсії неадекватності f_2 та дисперсії відтворюваності f_1 .

$f_2 = n_0 - k'$ – число ступенів вільності дисперсії неадекватності з урахуванням числа k' залишених коефіцієнтів регресії (у тому числі і b_0).

Розрахункове значення критерію Фішера становить:

$$F_{f_2;f_1}^{розр.} = \frac{S_{неад.}^2}{S_y^2}, \quad (3.47)$$

де $S_{неад.}^2$ – дисперсія неадекватності, яка визначена з f_2 - числом ступенів вільності; S_y^2 – дисперсія відтворюваності експерименту, яка визначена з f_1 - числом ступенів вільності.

Згідно з матрицею планування експерименту, кількість дослідів на нульовому рівні рівна трьом. Це дозволило використати для визначення дисперсії відтворюваності експерименту таку формулу [1, 6]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (3.48)$$

де u – номер дослідів в центрі плану; y_{0u} – значення функції відгуку в u -му досліді в центрі плану; $\bar{y}_0$ – середнє арифметичне значення функції відгуку отримане за результатами n_0 дослідів у центрі плану.

Дисперсію неадекватності визначали, користуючись такою формулою:

$$S_{неад.}^2 = \frac{SS_{неад.}}{f_2}. \quad (3.49)$$

При розрахунку дисперсії $S_{неад.}^2$ враховували ту обставину, що при проведенні експериментів з усіх дослідів плану повторювався тільки один дослід (в центрі плану). Тому сума квадратів $SS_{неад.}$ дорівнює [6]:

$$SS_{неад.} = n_0 \cdot (y_0' - \bar{y}_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-n_0} (y_j' - y_j)^2, \quad (3.50)$$

де y_0' – значення функції відгуку в досліді із центру плану, що розраховане за рівнянням регресії; y_j' – значення функції відгуку в j -му досліді, що розраховане за рівнянням регресії; y_j – значення функції відгуку в j -му досліді, що визначене експериментально.

В результаті обробки даних одержано рівняння регресії (4.7), що описує швидкість сушіння $v_{суш.}$ залежно від температури сушильного агента на вході в сушильну камеру t , частоти обертання спіралеподібних активаторів v_s і вологості матеріалу u .

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Вплив режимних параметрів на ефективність і якість сушіння насіння льону олійного

Дослідження проводилось згідно з методикою, описаною в п.3.5.

У результаті сушіння насіння льону олійного при різних режимах одержано криві, що характеризують зниження вологості з часом, які представлені на рис. 4.1.

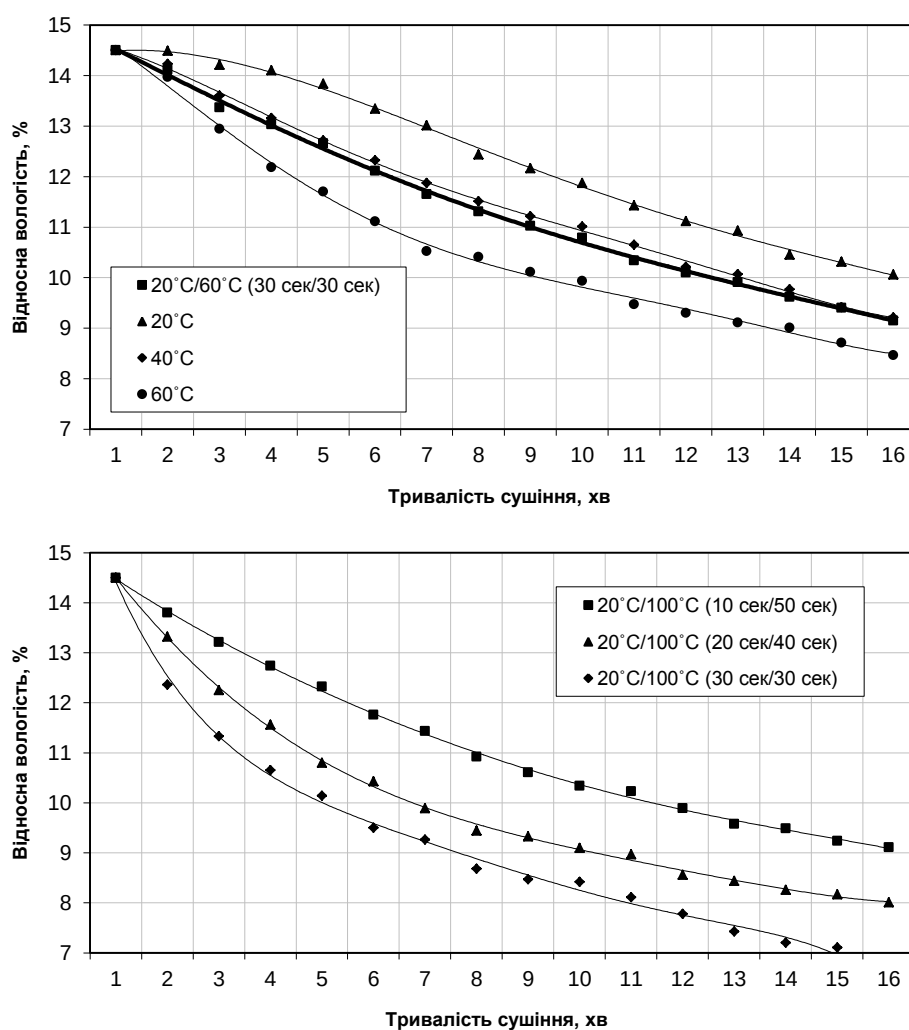


Рисунок 4.1 – Графіки зміни вологості насіння льону олійного з часом при різних режимах сушіння

Результати дослідження підтверджують, що найбільш швидке зниження вологості відбувається за максимальних температур сушильного агента. Тоді ж, як видно в таблиці 4.1., температури сушильного агента, які перевищують рекомендовані для сушіння насіння льону [3, 4], здійснюють негативний вплив на схожість насіння льону олійного.

Таблиця 4.1 – Вплив режимів сушіння на схожість насіння льону олійного

Режим сушіння: температура повітря/агента сушіння (тривалість циклу для коливних режимів)	Питома к-ть тепла агента сушіння Q , ккал/год	Затрачено часу t_c на сушіння до досягнення відносної вологості 9 %, хв.	Затрачено енергії сушильного агента на сушіння до вологості 9 %, $Q/(t_c \cdot 60)$, ккал	Тривалість сушіння, хв			
				7		15	
				Енергія пророст.	Схожість	Енергія пророст.	Схожість
Атмосферне повітря 20°C	-	>17	-	96	97	96	97
Сушильний агент температуро ю 40°C 60°C	 672 1371	 17 13,5	 190,5 308,5	 96 21	 96 84	 96 17	 96 68
Поперемінна подача атмосферного повітря/агент а сушіння 20°C/60°C (30/30 сек.)	685	17	194	67	93	59	89
20°C/100°C (30/30 сек.)	1330	7,5	166	11	53	6	32
20°C/100°C (40/20 сек.)	887	10,5	155	16	67	12	45
20°C/100°C (50/10 сек.)	443	16,5	122	54	86	43	74

При температурі нагрівання льону олійного до 60°C вже відбувається суттєве зниження енергії проростання і схожості. Тому для сушіння насіння для посівних цілей температура нагрівання насіння льону олійного не повинна перевищувати 40°C. Водночас сушіння за низьких температур сушильного агента є низькопродуктивним і не завжди дає можливість знизити вологість до бажаного рівня. Дослідження показали, що при коливних режимах сушіння виділення вологи відбувається більш інтенсивно, ніж при незмінних параметрах сушильного агента з рівноцінними затратами тепла на його формування.

Перевищення гранично допустимої температури сушильного агента на короткі періоди часу (10 сек.) не зумовили появи зовнішніх ознак пошкодження насіння і потемніння ядра, при цьому дещо знизили енергію проростання і схожість.

Вищезазначене дозволяє зробити висновок про можливість застосування коливних режимів сушіння з попеременною подачею атмосферного повітря і агента сушіння з високими температурами для інтенсифікації сушіння насіння льону олійного технологічного призначення. Однак це призведе до ускладнення конструкції сушарки.

Оцінка енергоефективності сушіння і якості матеріалу здійснювалася згідно з методикою, описаною в п.3.4.

4.2. Дослідження кінетики сушіння насіння льону олійного

Дослідження проводились згідно з методикою, описаною в п.3.7. Одержані значення експериментальних даних, що характеризують кінетику сушіння, зведені до табл. 4.2. а також у вигляді графіків на рис. 4.2.

Таблиця 4.2 – Відносна вологість насіння льону олійного при його сушінні сушильним агентом різними температурами і швидкістю повітряного потоку 1,9-2 м/с

Швидкість сушильного агента v , м/с	Температура t , °C	Тривалість сушіння, хв.															
		0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30
1,9-2,0	35	14,53	13,92	12,98	12,45	11,7	11,1	10,3	9,87	9,36	8,66	8,23	7,72	7,43	7,05	6,63	6,34
	45	14,53	13,14	11,97	11,13	10,46	9,78	9,2	8,76	8,14	7,54	7,16	6,56	6,36	5,99	5,60	5,26
	55	14,53	11,98	10,43	9,63	8,53	8,18	7,43	7,01	6,47	5,9	5,54	5,14	4,92	4,52	4,24	4,01
	65	14,53	10,23	8,19	7,23	6,35	5,59	5,24	4,76	4,37	4,01	3,58	3,35	3,13	2,99	2,78	2,54
1,4-1,5	35	14,53	14,38	13,67	13,39	12,65	12,5	11,85	11,72	11,16	10,6	10,42	10,03	9,91	9,66	9,342	9,29
	45	14,53	13,55	12,6	11,97	11,49	10,98	10,47	10,08	9,5	9,31	8,91	8,42	8,38	8,1	7,69	7,53
	55	14,53	12,35	10,97	10,35	9,48	9,12	8,54	8,22	7,70	7,28	7,11	6,67	6,56	6,20	6,02	5,91
	65	14,53	10,54	8,62	7,77	7,08	6,28	6,02	5,6	5,17	4,95	4,53	4,45	4,18	4,1	3,91	3,81
0,9-1,0	35	14,53	14,43	13,9 2	13,4 4	12,7 1	12,4 6	11,9 4	11,6 9	11,1 5	10,6 8	10,5 1	10,1 2	10,0 1	9,77	9,46	9,41
	45	14,53	13,41	12,9 8	12,3 3	11,7 8	11,2 1	10,6 3	10,1 8	9,52	9,40	9,0	8,5	8,46	8,19	7,77	7,61
	55	14,53	12,23	11,3 1	10,6 7	9,72	9,3	8,67	8,31	7,71	7,36	7,18	6,75	6,63	6,26	6,08	5,97
	65	14,53	10,44	8,88	8,01	7,29	6,52	6,11	5,66	5,17	5,0	4,57	4,49	4,23	4,14	3,95	3,85

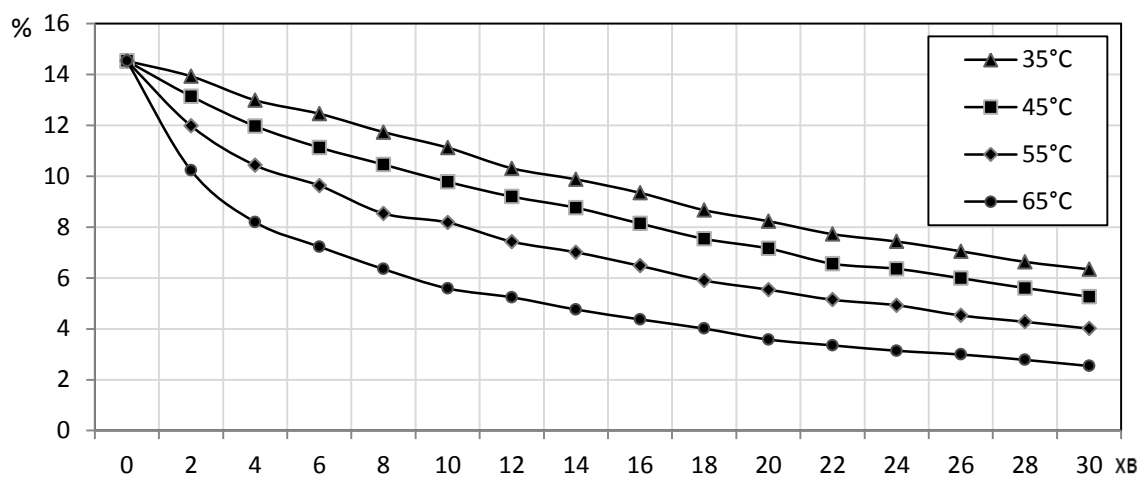
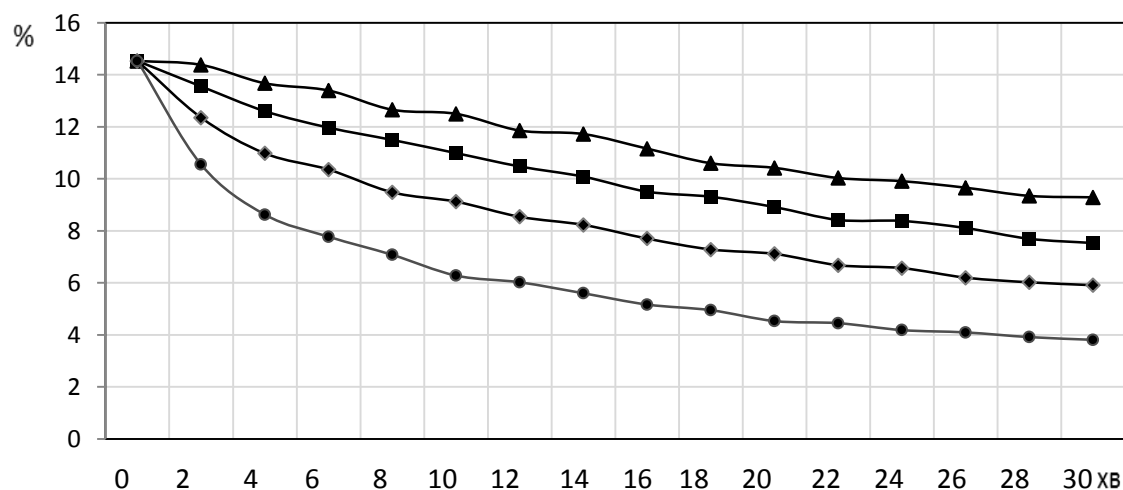
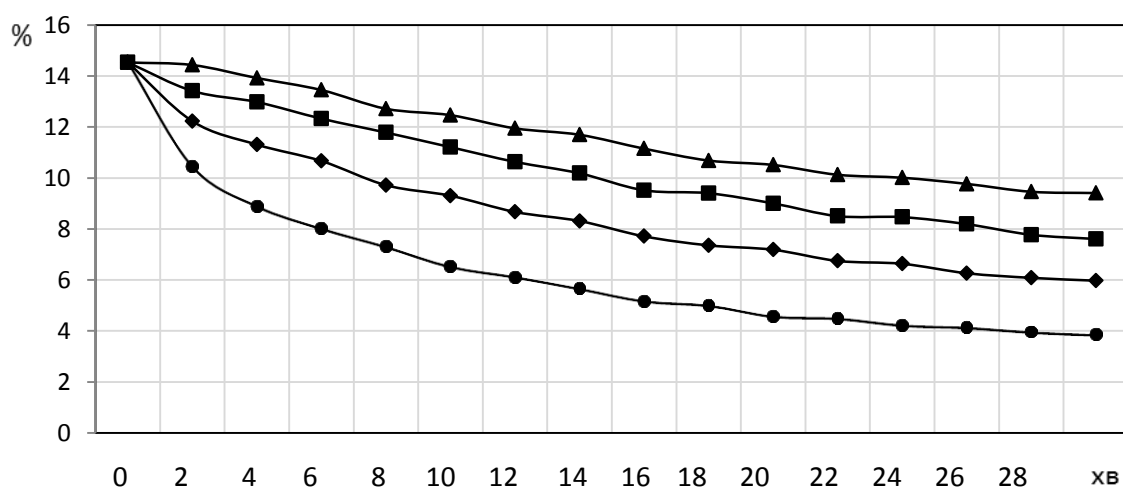
**а****б****в**

Рисунок 4.2 – Графік зниження вологості тонкого шару насіння льону олійного при його сушінні сушильним агентом температурою 35-65°C: **а)** швидкість сушильного агента 1,9-2,0 м/с; **б)** 1,4-1,5 м/с; **в)** 0,9-1,0 м/с

У результаті регресійного аналізу було визначено значення невідомих коефіцієнтів, що встановлюють відповідність між експериментальними і емпіричними кривими з найменшими відхиленнями [5].

Аналіз результатів показує, що найбільш точно відтворює експериментальні криві залежність Міділі [6]. Для подальших досліджень більш прийнятною є модель Гендерсона-Пабіса [6], яка описується більш простою залежністю і в той же час відтворює експериментальні криві з достатньо високою точністю:

$$MR = a \cdot \exp(-k \cdot \tau_j), \quad (4.1)$$

де MR – коефіцієнт, що характеризує зниження вологості матеріалу відносно початкової під час сушіння; a , k – невідомі коефіцієнти, що визначаються властивостями конкретного матеріалу і режимами сушіння; τ_j – тривалість сушіння, хв.

Значення коефіцієнтів a і k зазначеної моделі, встановлених в результаті регресійного аналізу за допомогою SPSS17, зведено до табл. 4.3.

Таблиця. 4.3 – Коефіцієнти сушіння тонкого шару насіння льону олійного згідно моделі Гендерсона-Пабіса

$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$		
Температура сушильного агента, °C	коефіцієнти	
	a	k
Швидкість руху сушильного агента крізь шар матеріалу $v_{c.a.} = 1,9-2,0$ м/с		
35	1,004	0,032
45	0,962	0,037
55	0,891	0,049
65	0,828	0,073
Швидкість руху сушильного агента крізь шар матеріалу $v_{c.a.} = 1,4-1,5$ м/с		
35	1,004	0,018
45	0,962	0,025
55	0,88	0,034
65	0,803	0,055
Швидкість руху сушильного агента крізь шар матеріалу $v_{c.a.} = 0,9-1,0$ м/с		
35	1,008	0,018
45	0,964	0,025
55	0,890	0,034
65	0,809	0,054

У результаті статистичної обробки даних, представлених в таблиці 4.3 встановлено закономірності, між коефіцієнтами a , k та параметрами сушильного агента: температурою t і швидкістю v :

$$a = 1,347708 - 0,168 \cdot v - 0,006387 \cdot t_{i,j} + 0,061 \cdot v^2, \quad (4.2)$$

$$k = 0,179083 - 0,10775 \cdot v - 0,004767 \cdot t_{i,j} + 0,0435 \cdot v^2 + 0,000063 \cdot t_{i,j}^2. \quad (4.3)$$

4.3. Визначення раціональних конструктивних і режимних параметрів активаторів для перемішування і розпушування матеріалу

Дослідження проводилися згідно з методикою, викладеною в п.3.6. Результати досліджень у вигляді графіків, що відображують коефіцієнт неоднорідності суміші від міжосьової відстані активаторів, кроку витка спіралі і кількості обертів, представлені на рис. 4.3.

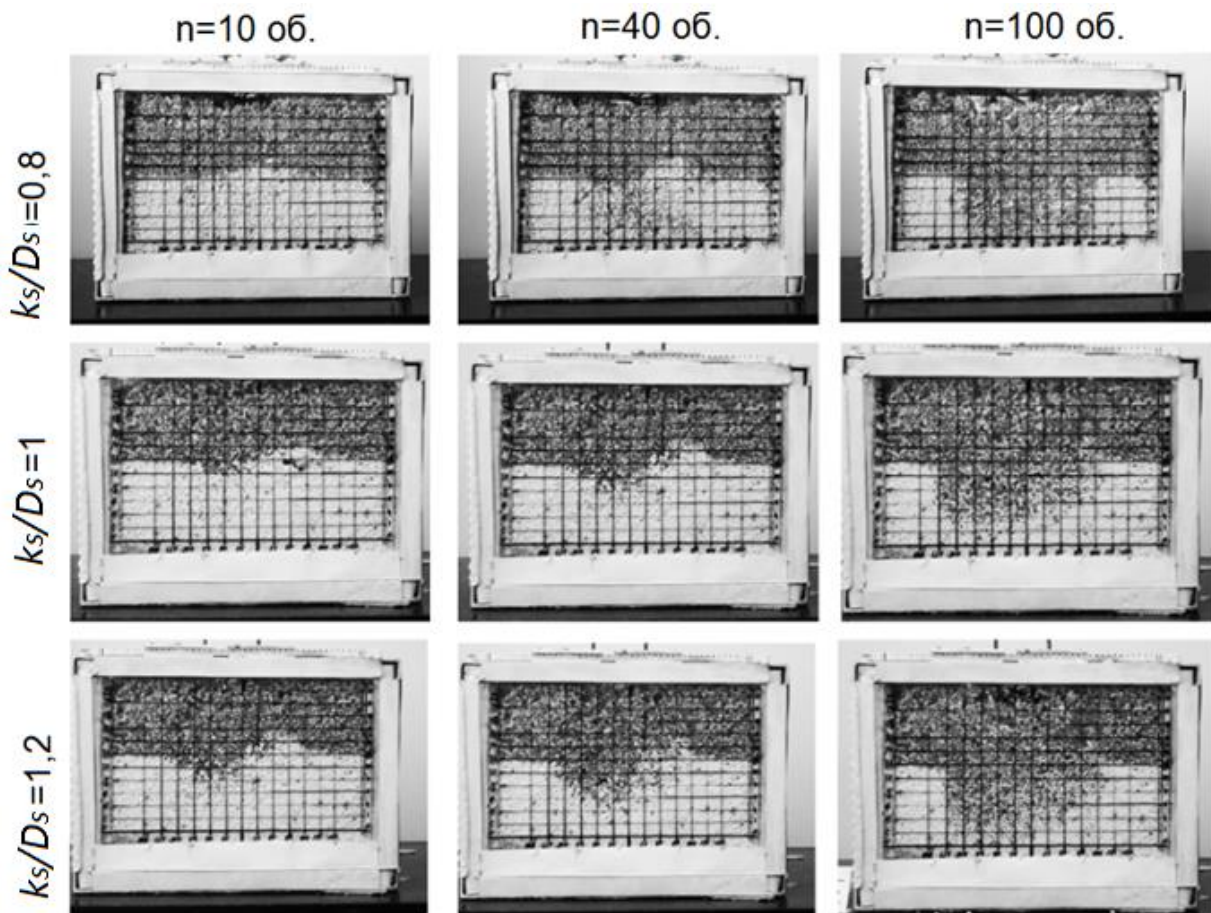


Рисунок 4.3 – Дослідження процесу перемішування матеріалу спіралеподібними активаторами з діаметром спіралі $D_s = 250$ мм, міжосьовою відстанню $a_s = 125$ мм і кроком спіралі $k_s = 200, 250$ і 300 мм

Таблиця. 4.4 – Результати досліджень перемішування сипкого матеріалу* спіралеподібними активаторами

Відношення кроку до діаметра спіралі**, k_s/D_s	Відношення міжосьової відстані до радіуса витка спіралі, $a_s/\left(\frac{D_s}{2}\right)$	-	100/125				125/125				150/125			
	Кількість повних обертів спіралеподібних активаторів, n	0	10	30	50	100	10	30	50	100	10	30	50	100
200/250	Однорідність суміші, V_c , %	100	89,5	74,4	53,5	26,7	79,5	56,3	42,5	21,3	79,3	57,8	42	17,7
	Відносне збільшення об'єму матеріалу, $P_{відн.}$, %	100	102				101				101			
250/250	Однорідність суміші, V_c , %	100	87,6	63,4	39,6	14,3	72,4	48,5	36,4	12,5	71,9	48	33,9	11
	Відносне збільшення об'єму матеріалу, $P_{відн.}$, %	100	104				104				103			
300/250	Однорідність суміші, V_c , %	100	84,1	56,7	30,6	7,2	65,3	38,5	23,6	6,8	63,8	34,5	20,1	6,2
	Відносне збільшення об'єму матеріалу, $P_{відн.}$, %	100	107				106				105			

*сипкий матеріал: пінополістирол

**діаметр спіралі: $D_s = 250$ мм

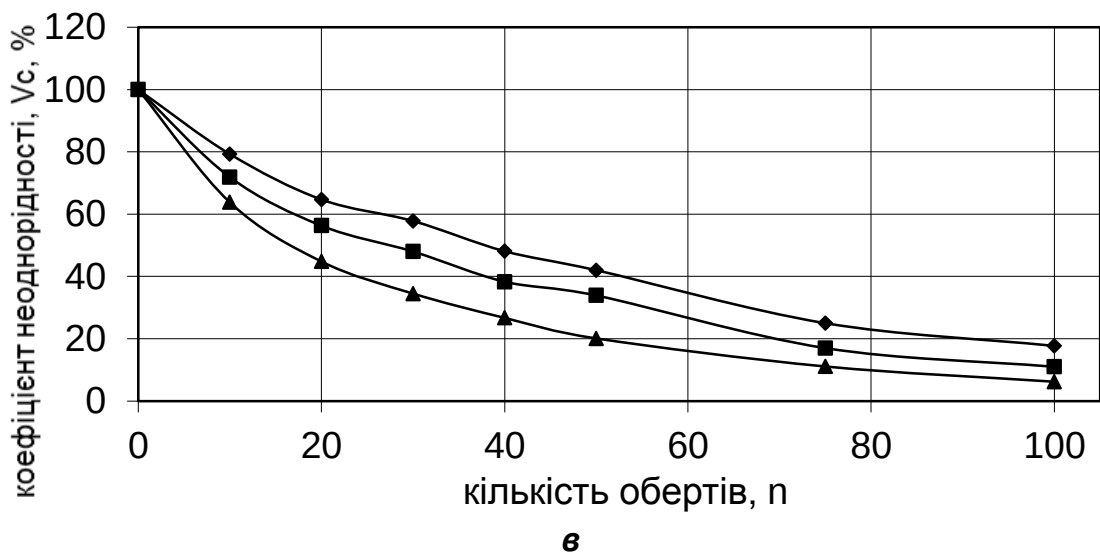
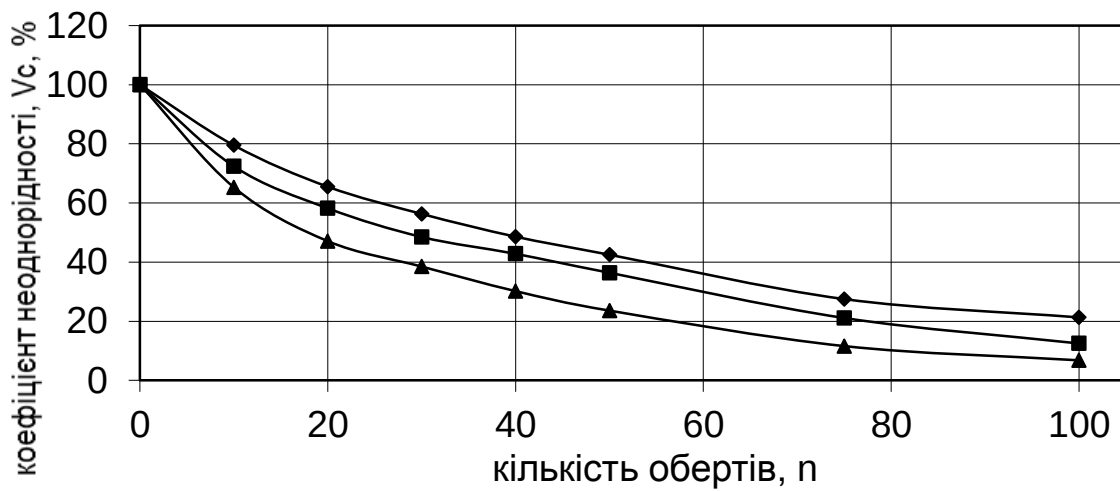
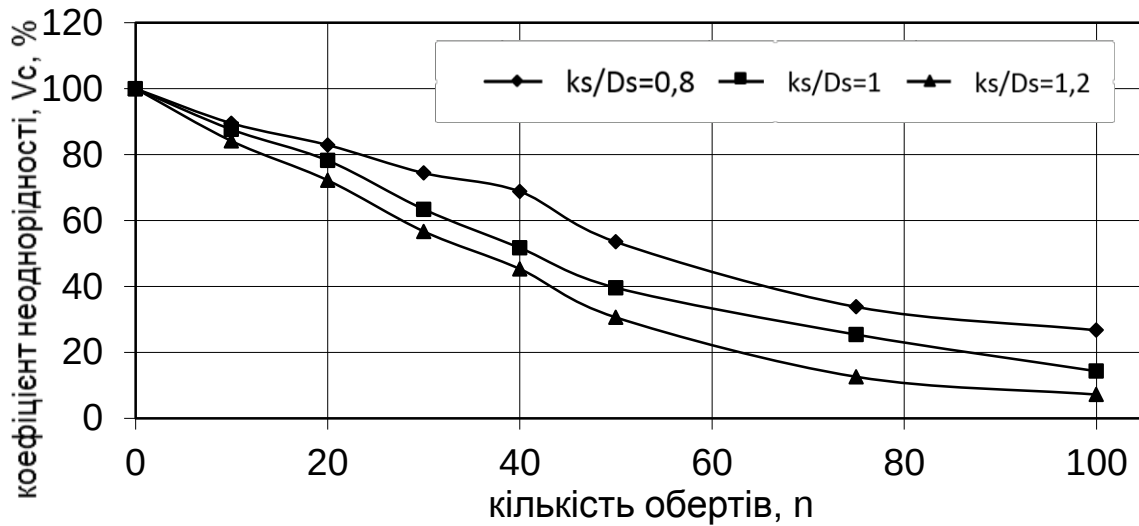
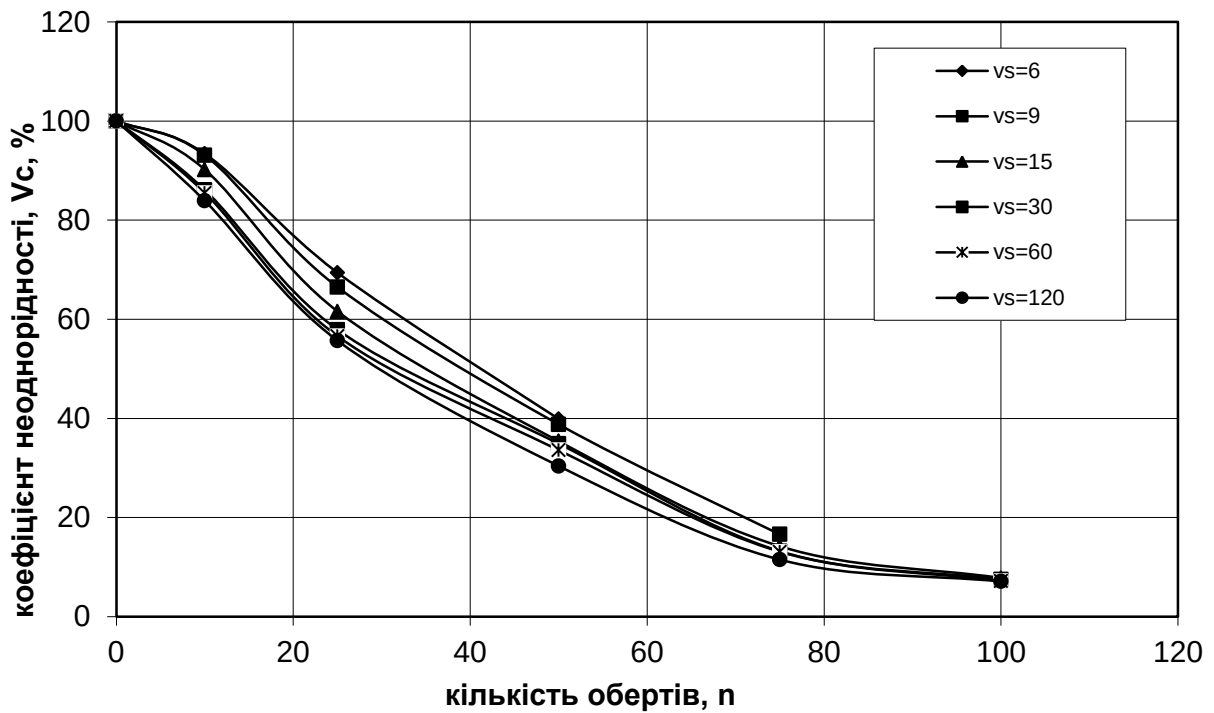


Рисунок 4.4 – Ефективність перемішування сипкого матеріалу залежно від кроку спіралі k_s , міжосьової відстані a_s і кількості обертів при частоті обертання активаторів $\nu_s = 60$ об/хв : **а** – $a_s / (D_s / 2) = 1$; **б** – $a_s / (D_s / 2) = 1,25$; **в** – $a_s / (D_s / 2) = 1,5$

Також було проведено дослідження впливу частоти обертання активаторів запропонованої конструкції на ефективність перемішування і розпушування матеріалу. Результати дослідження представлені на рис. 4.5 і в табл.4.5.



Ефективність перемішування залежно від частоти обертання спіралі, ω , об/хв

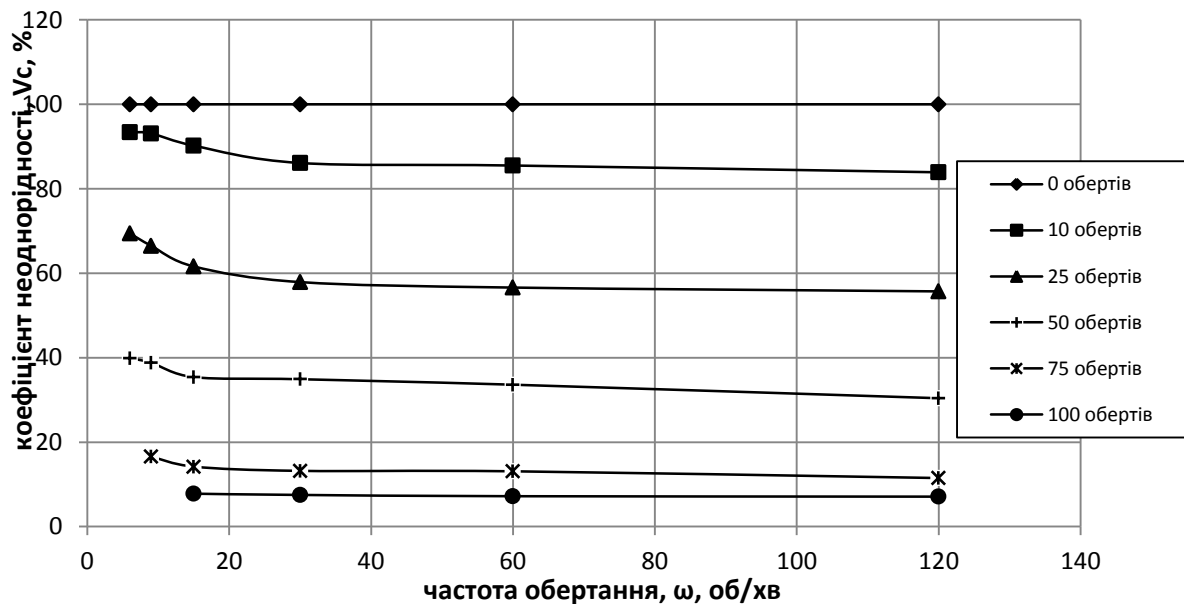
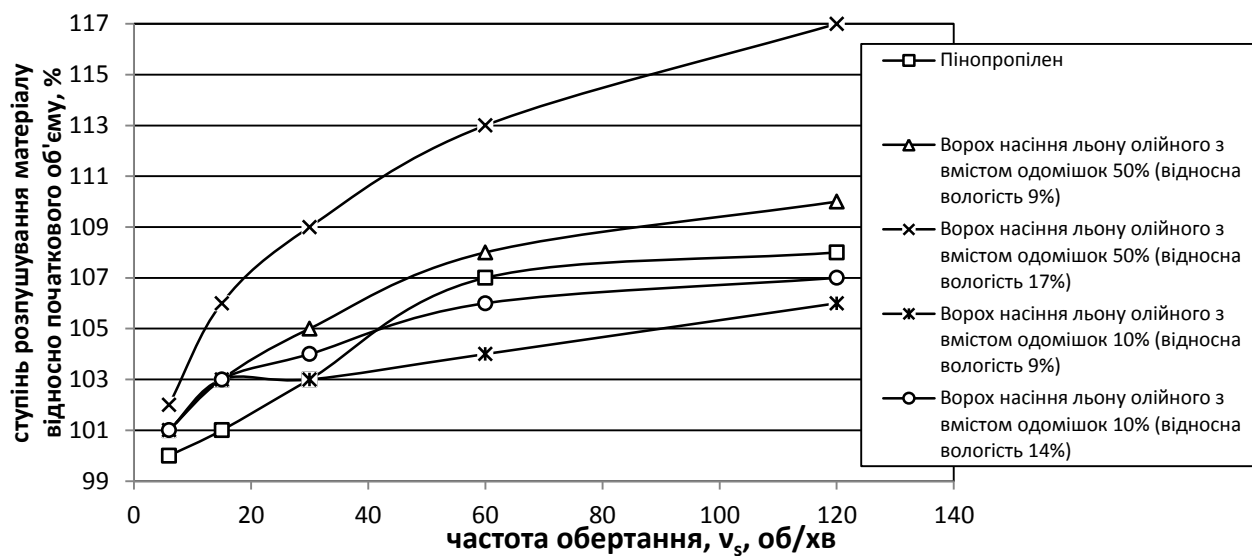
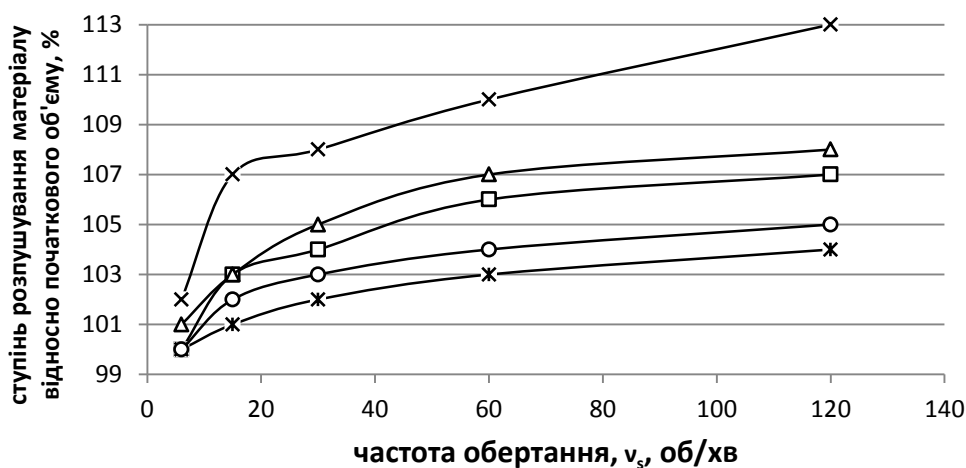


Рисунок 4.5 – Ефективність перемішування сипкого матеріалу залежно від частоти обертання

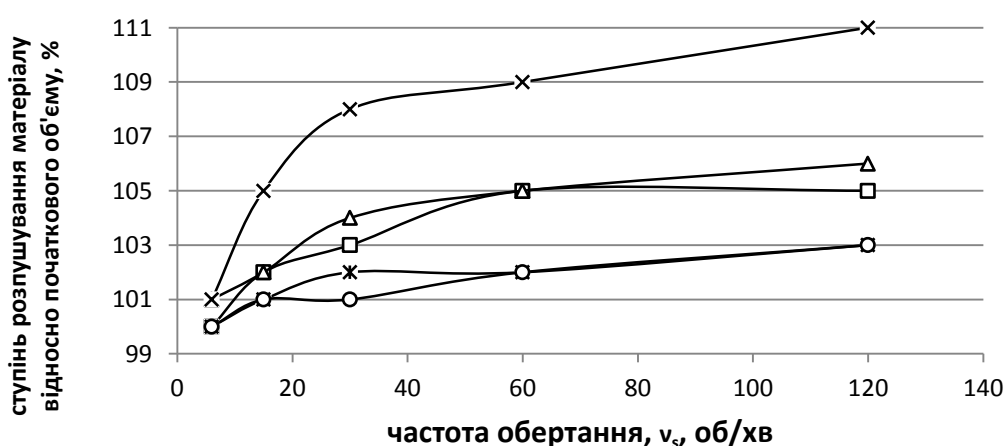
$$\text{активаторів } a_s / \left(\frac{D_s}{2} \right) = 150/125$$



а



б



в

Рисунок 4.6 – Вплив частоти обертання спіралеподібних активаторів на відносне збільшення об'єму матеріалу в процесі їх роботи: **а)** $a_s / (D_s / 2) = 100/125$; **б)** $a_s / (D_s / 2) = 125/125$; **в)** $a_s / (D_s / 2) = 150/125$

Таблиця 4.5 – Вплив частоти обертання і міжосьової відстані на ступінь розпушування матеріалу

Частота обертання спіралеподібних активаторів	Матеріал				
	Кульки пінополістеролу	Ворох насіння льону олійного з вмістом насіння 45-50 %		Ворох насіння льону олійного з вмістом насіння 90-95 %	
		Відносна вологість 9 %	Відносна вологість 17 %	Відносна вологість 9 %	Відносна вологість 14 %
Відношення міжосьової відстані до радіуса витка спіралі, $a_s / (D_s / 2) = 100/125$					
6	100	101	102	101	101
15	101	103	106	103	103
30	103	105	109	103	104
60	107	108	113	104	106
120	108	110	117	106	107
Відношення міжосьової відстані до радіуса витка спіралі, $a_s / (D_s / 2) = 125/125$					
6	100	101	102	100	100
15	103	103	107	101	102
30	104	105	108	102	103
60	106	107	110	103	104
120	107	108	113	104	105
Відношення міжосьової відстані до радіуса витка спіралі, $a_s / (D_s / 2) = 150/125$					
6	100	101	101	100	100
15	102	102	105	101	101
30	103	104	108	102	101
60	105	105	109	102	102
120	105	106	111	103	103

У результаті дослідження можна зробити такі висновки:

- найбільшої ефективності перемішування спіралеподібними активаторами з постійним діаметром 250 мм вдалось досягти при найбільшому кроці спіралі 300 мм;
- зі збільшенням частоти обертання активаторів від 6 до 120 об/хв. зростає ефективність перемішування в часовому вимірі, водночас приріст ефективності від збільшення частоти обертання активаторів, приведений до кількості обертів для досліджуваних матеріалів – незначний;
- зі збільшенням частоти обертання активаторів від 6 до 120 об/хв. зростає ступінь розпушування матеріалу, виражений як відносне збільшення його об'єму до об'єму у стані спокою. При цьому ступінь розпушування залежить від фізико-механічних властивостей і вологості матеріалу;
- максимально допустима частота обертання спіралеподібних активаторів обмежується зростаючими енергозатратами процесу і можливим механічним пошкодженням насіння льону олійного.

4.4. Дослідження ступеня пошкодження насіння льону олійного в результаті перемішування спіралеподібними активаторами

У п.4.3. встановлено, що зі зростанням частоти обертання спіралеподібних активаторів зростає ступінь розпушування матеріалу, а збільшення кількості обертів за одиницю часу дозволяє досягти більш швидкого, інтенсивнішого перемішування матеріалу. Однак збільшення частоти обертання спіралеподібних активаторів з метою підвищення ефективності процесу обмежене зростаючими енергозатратами, а також можливим механічним пошкодженням насіння льону олійного, а тому обґрунтування раціональних режимів роботи спіралеподібних активаторів вимагає додаткових досліджень.

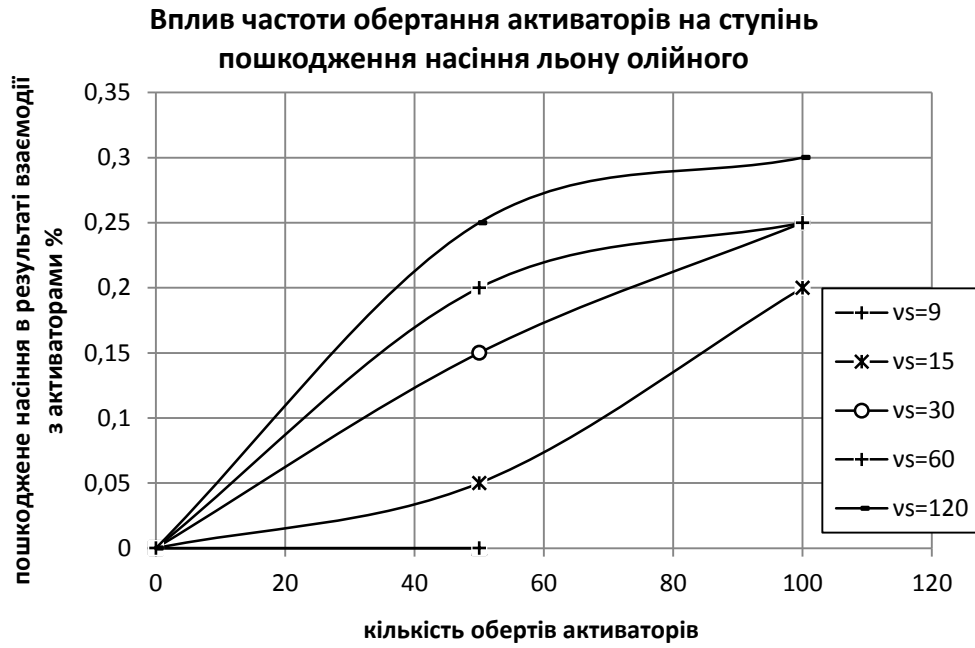
Дослідження ступеня пошкодження насіння льону олійного в результаті перемішування спіралеподібними активаторами проводилось згідно з методикою, описаною в п.3.7.

Дослідження проводилося для насіння льону олійного зі ступенем забруднення сміттєвими і олійними домішками 2-3 %, 15-10 % і 50-45 % від загальної маси матеріалу, початковим вмістом механічно пошкодженого насіння не більше 1 % і схожістю насіння без явних ознак механічного пошкодження: 97-98 %. Відносна вологість дослідного матеріалу складала 9, 14 і 17 %. Оцінка якості насіння і ступеня пошкодження проводилась згідно з методикою, описаною в п. 3.4.

Дослідження проводилось для активаторів з діаметром витка 250 мм і відношенням кроку витка спіралі до діаметру $k_s / D_s = 1,2$. Частота обертання варіювалась в межах 1÷120 об/хв.

Результати досліджень представлені на рис.4.7-4.9.

У результаті досліджень можна зробити висновки, що збільшення частоти обертання спіралеподібних активаторів зумовлює зростання ступеня механічного пошкодження насіння льону олійного. Насіння з відносною вологістю 14 % пошкоджується активаторами запропонованої конструкції дещо більше, ніж насіння з нижчою вологістю 9 %. Насіння, що міститься у неочищеному воросі з вмістом домішок 45-50 % менш чутливе до пошкоджень запропонованими активаторами, ніж очищене насіння. При частоті обертання активаторів до 6 об/хв не було виявлено механічного пошкодження насіння льону олійного. Ступінь пошкодження насіння у всіх випадках, для яких проводилось дослідження, не перевищував 0,55 %.

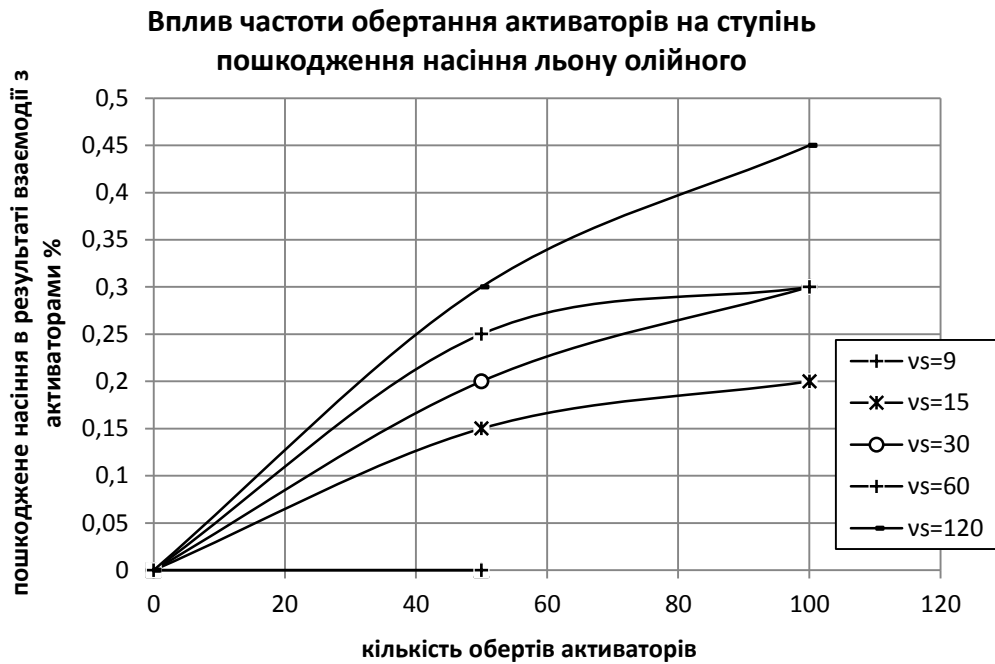


а

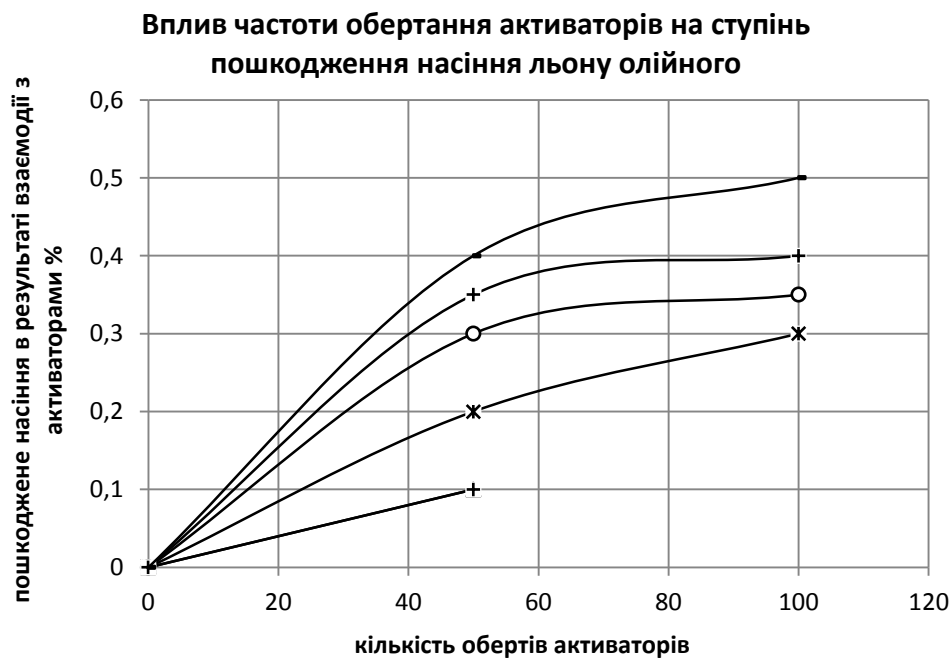


б

Рисунок 4.7 – Вплив частоти обертання спіралеподібних активаторів при $k_s/D_s = 1,25$ на ступінь механічного пошкодження насіння льону олійного при його забрудненні 45-50 %: а – відносна вологість матеріалу 9 %; б – відносна вологість матеріалу 17 %



а



б

Рисунок 4.8 – Вплив частоти обертання спіралеподібних активаторів при $k_s/D_s = 1,25$ на ступінь механічного пошкодження насіння льону олійного при його забрудненні 10-15 %: а – відносна вологість матеріалу 9 %; б – відносна вологість матеріалу 14 %

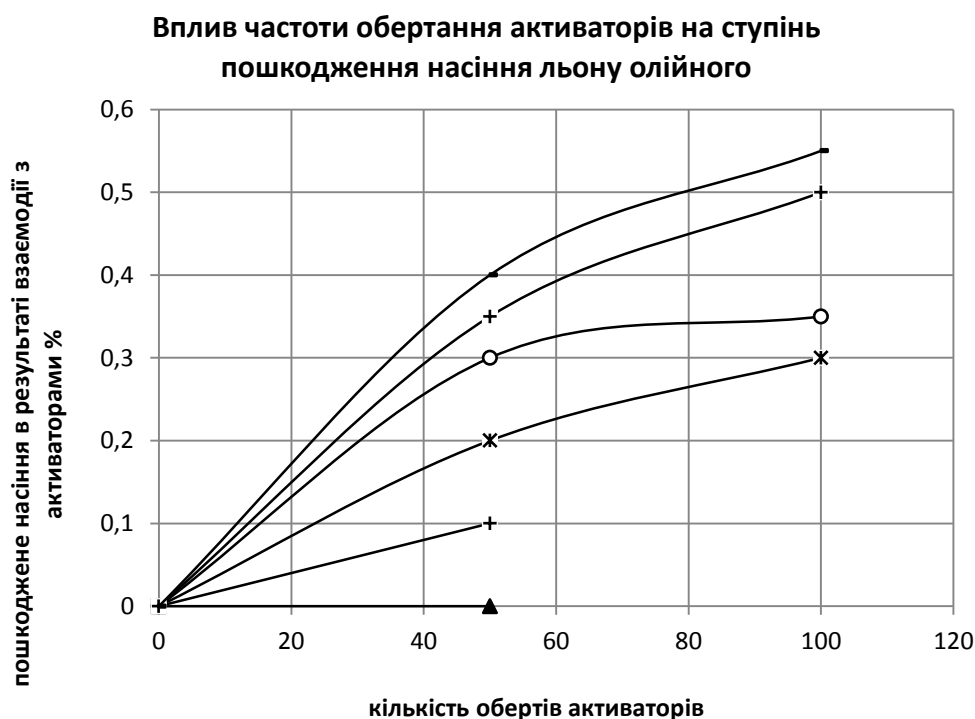
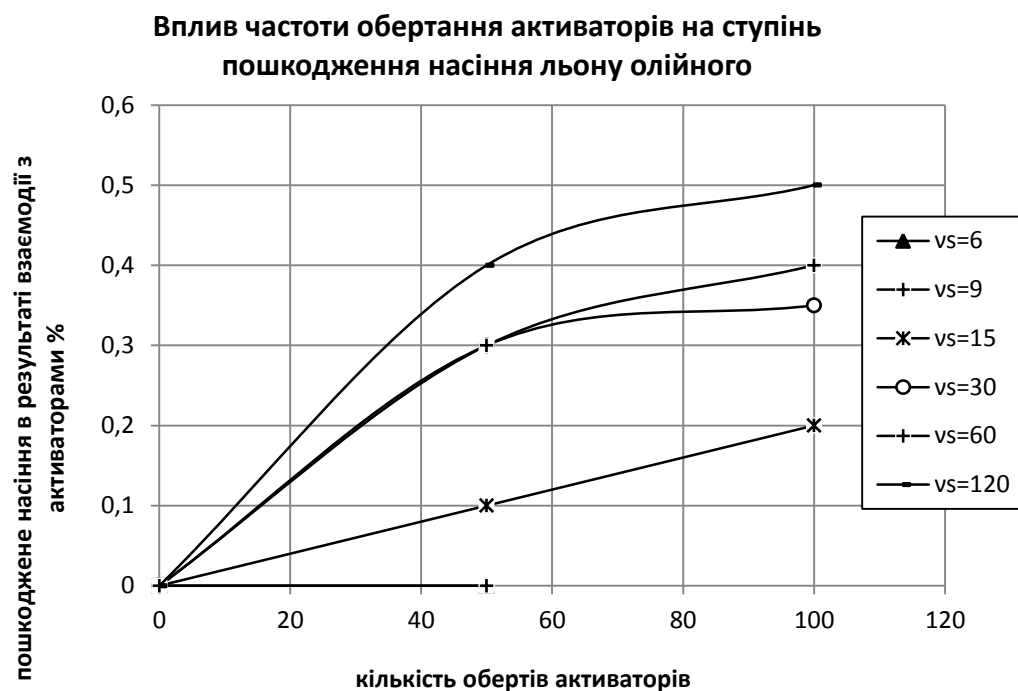


Рисунок 4.9 – Вплив частоти обертання спіралеподібних активаторів при $k_s/D_s = 1,25$ на ступінь механічного пошкодження насіння льону олійного при його забрудненні 2-3 %: *a* – відносна вологість матеріалу 9 %; *б* – відносна вологість матеріалу 14 %

4.5. Результати дослідження вентилявання повітряним потоком шару насіння льону олійного

Проведені дослідження з вентелювання вороху насіння згідно з методикою, описаною в п.3.3.

Результати досліджень представлені в табл. 4.6. За результатами досліджень встановлено, що в нерухомому шарі вороху з вмістом насіння льону 50-55 % і відносною вологістю 19-21 %, одержаного прямим комбайнуванням, який складається з фракцій різного розміру, форми і маси, розподіл повітряного потоку за площею поперечного січення відбувається нерівномірно, спостерігається утворення каналів, через які проходить значна частина повітря, що впливає на якість вентилування. При перемішуванні матеріалу забезпечується рівномірний розподіл повітряного потоку матеріалом і зменшується загальний опір повітряному потоку, що підтверджує доцільність перемішування цього матеріалу в процесі сушіння.

Таблиця 4.6 – Швидкість повітря на виході з шару матеріалу v , м/с

Початкова швидкість повітря v_0 , м/с, при відсутності опору створеного шаром матеріалу ($h=0$ м)	Висота шару матеріалу h , м		
	0,05	0,20	0,35
Нерухомий шар матеріалу			
1,0	0,6	0,3	0,1
2,0	1,3	0,5	0,3
3,0	1,4	0,9	0,7
Перемішування лопатями при $v=5$ об/хв			
1,0	0,9	0,7	0,5
2,0	1,4	1,2	1,1
3,0	2,6	2,4	2,2
Перемішування лопатями при $v=10$ об/хв			
1,0	1,0	0,8	0,7
2,0	1,9	1,4	1,4
3,0	2,9	2,8	2,7

У зв'язку з наявністю у воросі насіння льону олійного дуже дрібних і легких частинок також були проведені дослідження з вентилування вороху насіння льону олійного. Результати представлені у вигляді графіка на рис. 4.10. Дослідження проводилось шляхом завантаження в установку тонкого шару (висотою не більше 1 см) зразка вороху льону олійного відомої маси і продуванні його повітряним потоком, після чого проводилось повторне зважування зразка без частинок, видалених повітряним потоком встановленої швидкості. Дослідження проводилось для вороху з відносною вологістю 21, 16 і 11 %.

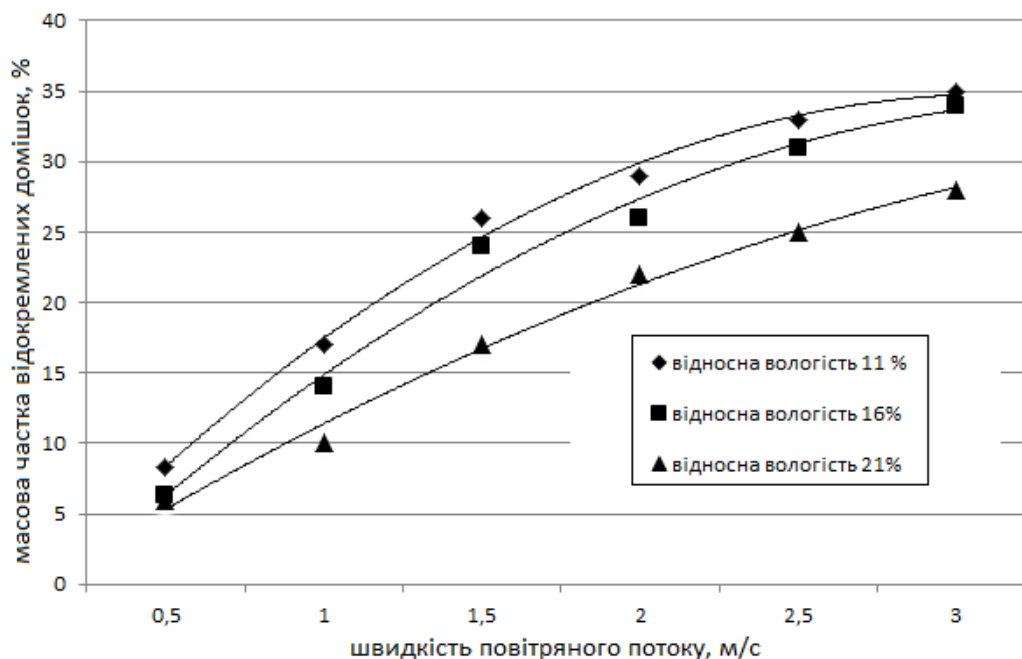


Рисунок 4.10 – Аналіз вентилявання шару вороху насіння льону олійного з початковим вмістом насіння льону 50-55 % від загальної маси

4.6. Вплив процесу перемішування шару насіння льону олійного на рівномірність сушіння

Для отримання математичної моделі рівномірності сушіння насіння льону олійного при його перемішуванні спіралеподібними активаторами було проведено чотирьохфакторний експеримент згідно з методикою, що описана у п.3.7.

Мета експерименту полягала у визначенні зміни вологості матеріалу за об'ємом в процесі сушіння внаслідок його розпушування і перемішування в процесі при варіюванні таких факторів: швидкість сушильного агента, температура сушильного агента на вході в матеріал, частота обертання активаторів і крок спіралі активаторів.

Обробка даних результатів чотирьохфакторного експерименту за трирівневим планом другого порядку дозволила отримати таке рівняння регресії рівномірності сушіння вороху насіння льону олійного:

$$\begin{aligned}
 y = & 0,056 + 0,021 \cdot x_1 - 0,012 \cdot x_2 - 0,019x_3 - 0,013 \cdot x_4 - \\
 & - 0,011 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,002 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,0027 \cdot x_1 \cdot x_4 + \\
 & + 0,0025 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0027 \cdot x_3 \cdot x_4 + 0,0025 \cdot x_2 \cdot x_3 + \\
 & + 0,012 \cdot x_1^2 - 1,227 \cdot x_2^2 - 0,014 \cdot x_2^3 - 0,0053 \cdot x_2^3,
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

де X_1 – кодоване значення швидкості сушильного агента; X_2 – кодоване значення температури сушильного агента; X_3 – кодоване значення частоти обертання активаторів; X_4 – кодоване значення кроку спіралі.

Оцінку однорідності ряду дисперсій перевіряли за критерієм Кохрена (3.24). Оскільки $G^{розр.} = 0,097 < G^{табл.}(0,05; 15; 2) = 0,335$ [1], то процес відтворюється.

Оцінка значущості коефіцієнтів регресії проводилася за допомогою критерію Стюдента згідно з п.3.8 (3.17, 3.18).

Критерій Стюдента при 5 %-му рівні значущості та числі ступенів вільності дисперсії відтворюваності $f_1 = 2$ склав $t_{0,05;2} = 4,3$ [1, 2]. В результаті цього рівняння (4.4) набуло вигляду:

$$y = 0,056 + 0,021 \cdot x_1 - 0,012 \cdot x_2 - 0,019x_3 - 0,013 \cdot x_4 + 0,012 \cdot x_1^2 - 0,014 \cdot x_3^2 \quad (4.5)$$

Перевірку адекватності отриманого рівняння регресії (4.4) проводили за допомогою F -критерію Фішера згідно п.3.9 (3.25). Розрахункове значення критерію Фішера становило $F^{розр.} = 2,195$ при дисперсії неадекватності $S_{неад.}^2 = 0,00006611$ і дисперсії відтворюваності $S_y^2 = 0,0000311$. Табличне значення критерію Фішера при прийнятому 5 %-му рівні значущості та ступенях вільності $f_1 = 2$, $f_2 = 16$ згідно з [2] склало $F^{табл.} = 19,43$. Оскільки $F^{розр.} = 2,195 < F^{табл.} = 19,43$, то отримана модель адекватна.

Остаточне рівняння з факторами у натуральному вигляді набуде вигляду:

$$V_c = 0,153 + 0,0273 \cdot v - 0,0012 \cdot t + 0,0096 \cdot v_c - 0,253 \cdot k_c + 0,0239 \cdot v^2 - 0,0009 \cdot v_c^2 \quad (4.6)$$

За рівнянням регресії (4.6) побудовано поверхні відгуку (рис.4.11-4.16).

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що всі фактори мають суттєвий вплив на рівномірність сушіння матеріалу.

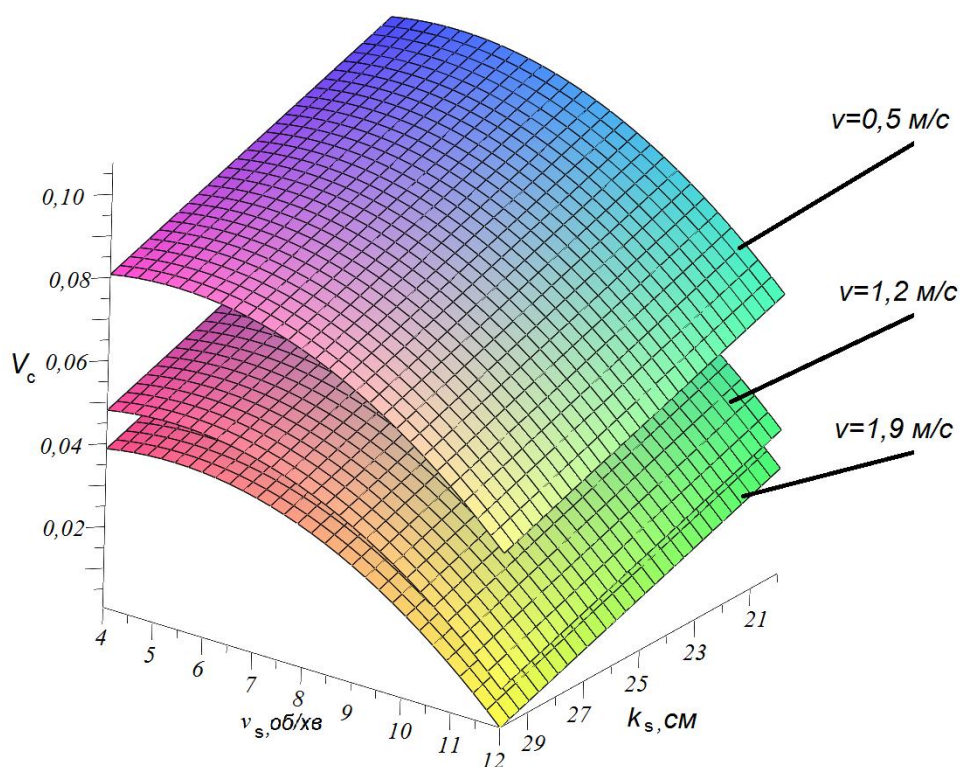


Рисунок 4.11 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежно від частоти обертання v_s , об/хв. і кроку спіралі k_s , м, активаторів при швидкості сушильного агента $v=0,5$; 1,2 і 1,9 м/с і температурі $t=45^\circ\text{C}$

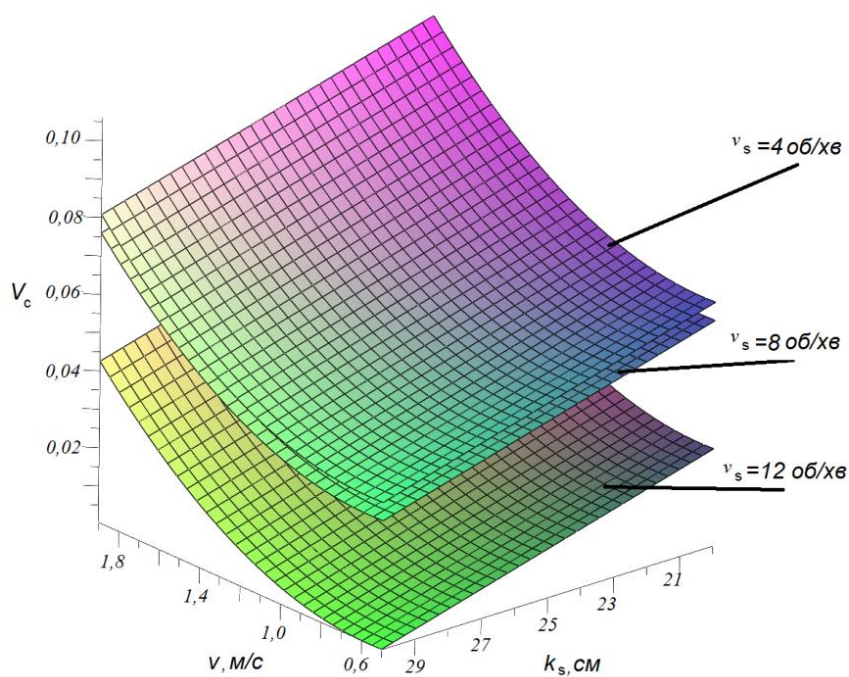


Рисунок 4.12 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежності від кроку спіралі активаторів k_s , м і швидкості сушильного агента v , м/с при частоті обертання активаторів $v_s=4$; 8 і 12, об/хв. і температурі сушильного агента $t=45^\circ\text{C}$

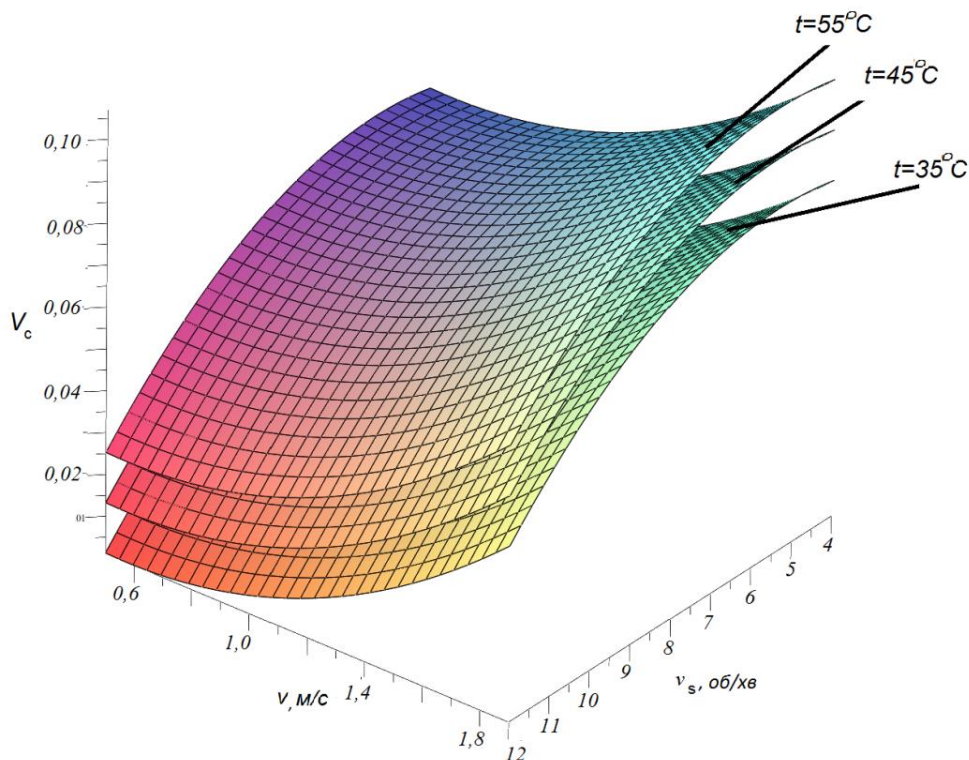


Рисунок 4.13 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежно від частоти обертання активаторів v_s , об/хв. і швидкості сушильного агента v , м/с при температурі сушильного агента $t=35; 45; 55^\circ\text{C}$ і кроці спіралі активаторів $k_s=30$ см

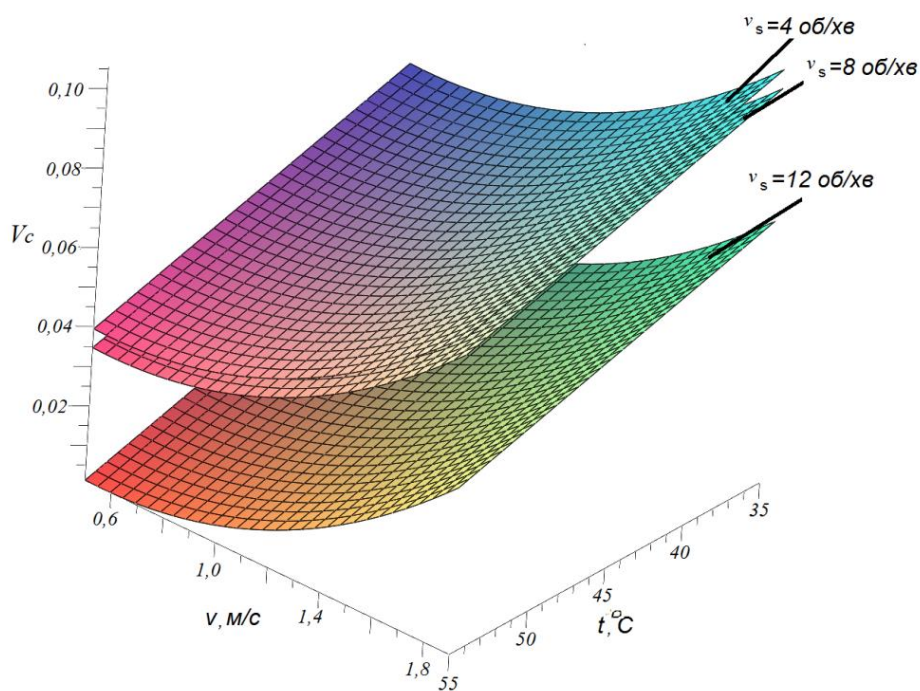


Рисунок 4.14 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежно від швидкості сушильного агента v , м/с, температури сушильного агента t , $^\circ\text{C}$ при частоті обертання активаторів $v_s=4; 8$ і 12 об/хв. і кроці спіралі активаторів $k_s=30$ см

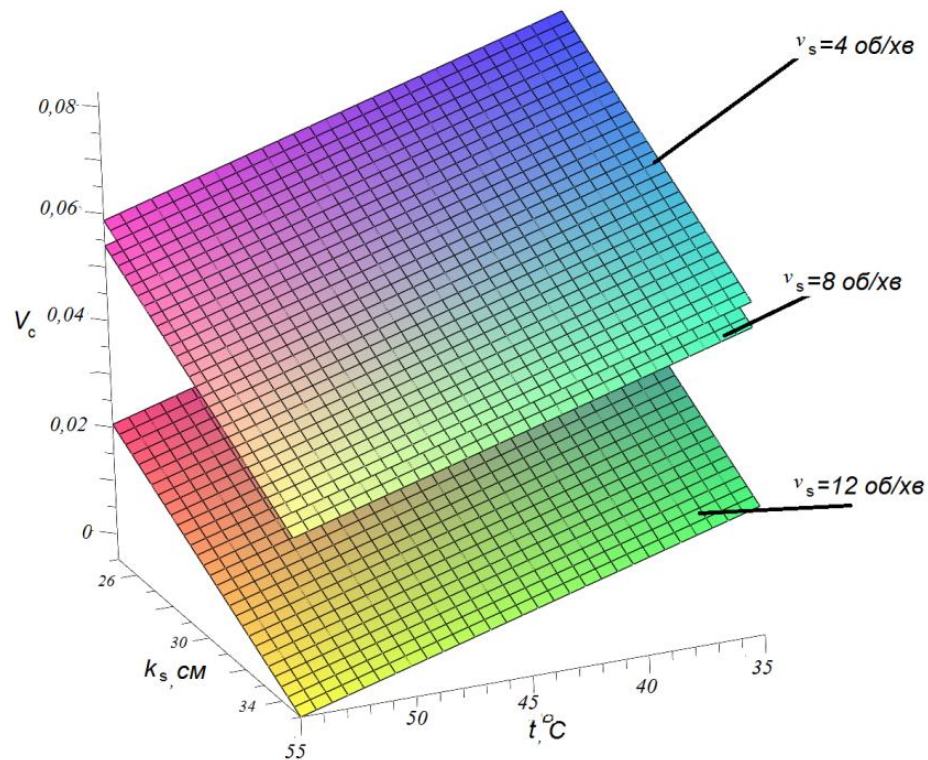


Рисунок 4.15 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежно від кроку спіралі активаторів k_s , м і температури сушильного агента t , °C при частоті обертання активаторів $v_s = 4; 8$ і 12 об/хв. і швидкості сушильного агента $v = 1,2$ м/с

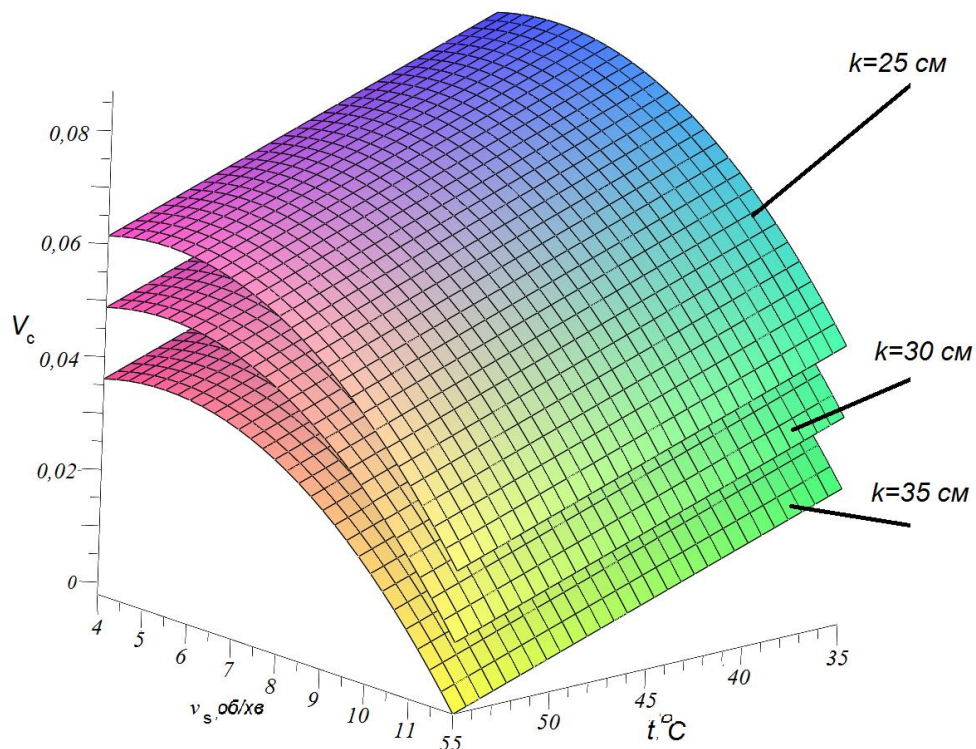
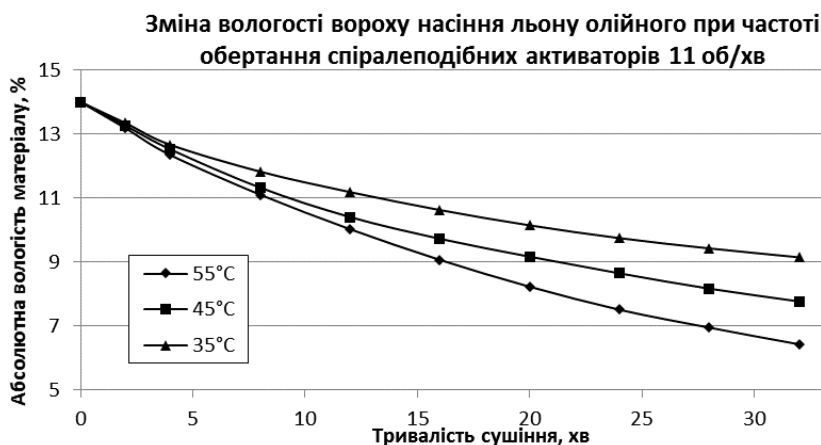


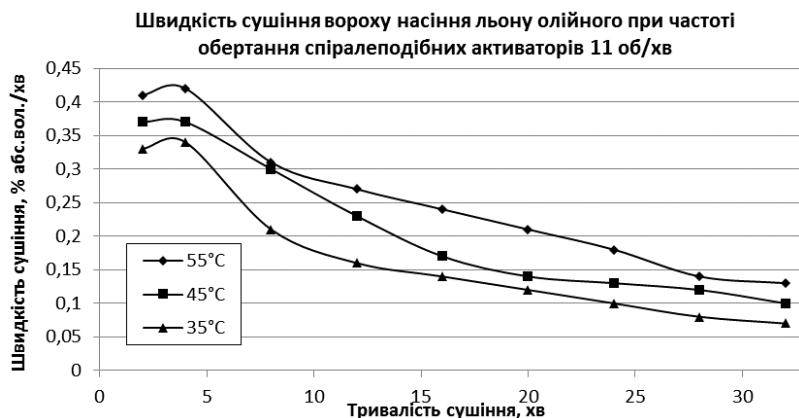
Рисунок 4.16 – Поверхні відгуку нерівномірності сушіння вороху насіння льону олійного за об'ємом V_c залежно від частоти обертання активаторів v_s , об/хв і температури сушильного агента t , °C при кроці спіралі активаторів $k_s = 25; 30$ і 35 см і швидкості сушильного агента $v = 1,2$ м/с

4.7. Дослідження процесу сушіння вороху насіння льону олійного у сушарці зі спіралеподібними активаторами

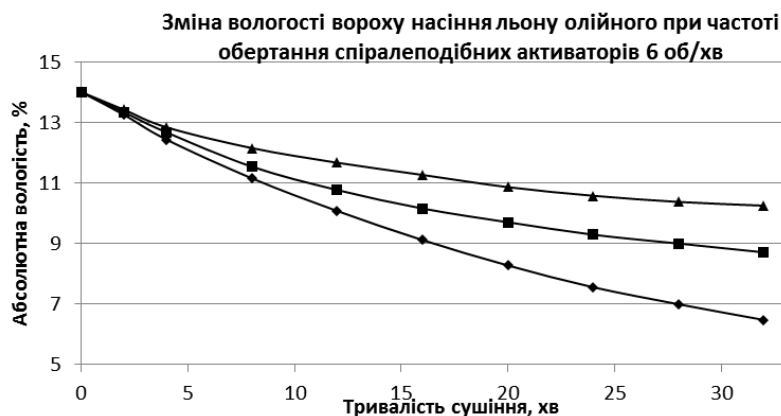
У результаті експериментального дослідження сушіння вороху насіння льону олійного, виконаного на дослідному зразку сушарки зі спіралеподібними активаторами (рис.3.8), що проводилося згідно з методикою, описаною в п.3.10, було одержано графіки зміни вологості матеріалу і швидкості сушіння для параметрів сушильного агента і частоти обертання спіралеподібних активаторів, представлені на рис. 4.17.



а



б



в

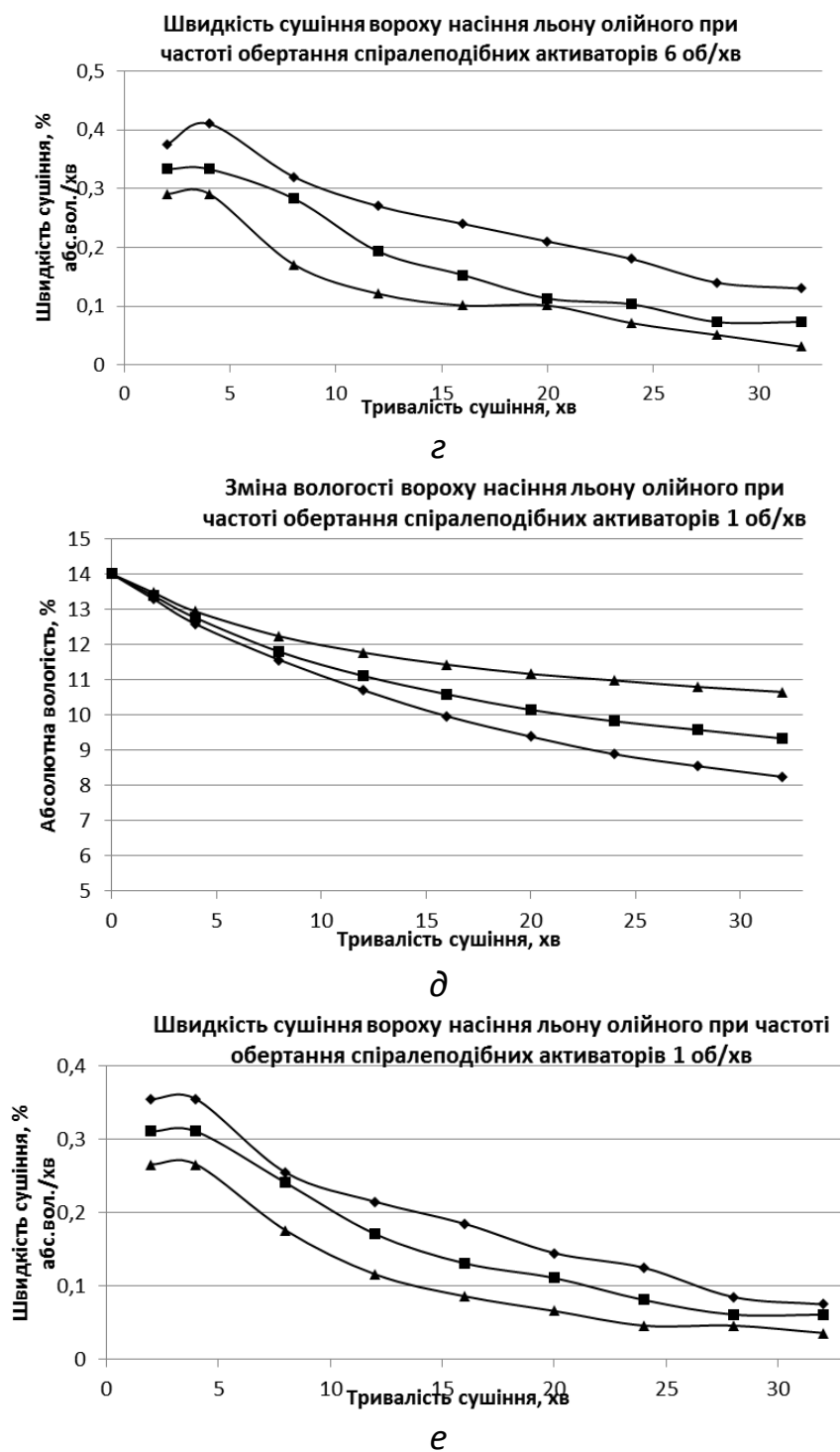


Рисунок 4.17 – Криві кінетики сушіння (*а, в, д*) і швидкості сушіння (*б, г, е*) насіння льону олійного при частоті обертання активаторів 1, 6 і 11 об/хв. і температурах сушильного агента 35, 45 і 55 °С

У результаті обробки експериментальних даних було отримано наступне рівняння регресії:

$$v_{суш.} = -1,95 + 0,05 \cdot t + 0,03 \cdot v_s + 0,09 \cdot u - 3,69 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2,02 \cdot 10^{-3} \cdot v_s^2 - 10^{-3} \cdot t \cdot u \quad (4.7)$$

За даним рівнянням (2) побудовано поверхні відгуку (рис.4.18).

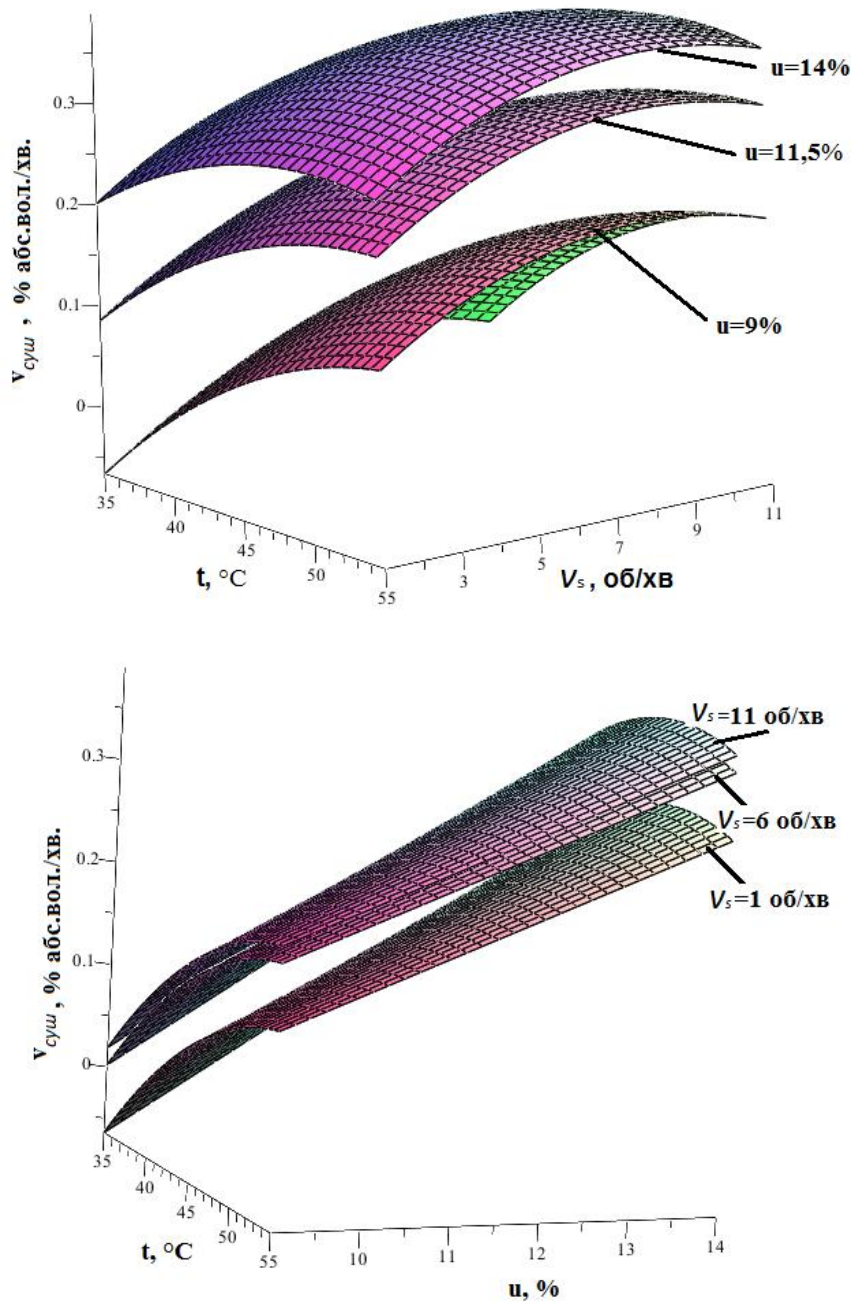


Рисунок 4.18 – Поверхні відгуку, що характеризують вплив температури t сушильного агента, частоти v_s активаторів і вологості u матеріалу, на швидкість сушіння $v_{суш.}$

4.8. Висновки до розділу 4

1. Дослідження впливу режимів сушіння на ефективність і якість сушіння насіння льону олійного показало, що коливні режими сушіння (з попеременною подачею сушильного агента 100°C та холодного атмосферного повітря) дозволяють без втрати швидкості сушіння знизити енерговитрати на приготування сушильного агента до 35 %. Проте застосування цих режимів негативно впливає на схожість насіння і є технічно складним для великих об'ємів матеріалу. Доцільно встановлювати температуру сушильного агента для насіння льону олійного для посівних цілей 40°C , для технологічних цілей – з постійною температурою сушильного агента 60°C і з попеременною подачею сушильного агента $20/60^{\circ}\text{C}$;

2. За експериментальними даними (табл.4.2) і (рис.4.2) встановлено числові значення (табл.4.3) та залежності (4.2), (4.3) коефіцієнтів емпіричного рівняння (4.1), яке характеризує зниження вологості тонкого шару насіння льону олійного з часом t . Залежності (4.2) і (4.3) враховують швидкість v і температуру сушильного агента t . Вони справедливі для температури сушильного агента $35\ldots65^{\circ}\text{C}$, швидкості сушильного агента $0,9\ldots1,9$ м/с.

3. Найбільш ефективними для перемішування і розпушування матеріалу є спіралеподібні активатори з кроком $k_s=300$ мм та діаметром $D_s=250$ мм. Ступінь перемішування матеріалу прямо пропорційний кількості обертів активаторів і меншою мірою залежить від частоти обертання.

4. Найбільш ефективного перемішування матеріалу вдалось досягти при відношенні кроку спіралі до діаметра спіралі активатора $k_s/D_s=1,2$ і відношенні міжосьової відстані до радіуса витка спіралі $a_s/(D_s/2)=1,5$. Дослідження проводилось для діаметра спіралі 250 мм. Встановлено, що коефіцієнт неоднорідності V_c значною мірою залежить від кількості здійснених обертів активатора. Через 50 повних обертів активаторів V_c становив $30\ldots40\%$, через 100 обертів $V_c=7\ldots8\%$ в діапазоні досліджуваних частот $6\ldots120$ об/хв. Частота обертання активаторів суттєво впливає на відносне збільшення об'єму матеріалу під час обертання порівняно з об'ємом у стані спокою. Максимального розпушування матеріалу 117% вдалось досягти для вороху насіння льону олійного з вмістом домішок близько 50% від маси і відотною вологістю 17% при частоті обертання активаторів 120 об/хв і відношенням міжосьової відстані до радіуса активаторів $0,8$. Для насіння льону олійного зі ступенем забруднення 10% і вологістю 9% при аналогічних режимах перемішування ступінь розпушування відносно початкового об'єму становив 106% .

5. При частоті обертання спіралеподібних активаторів до 6 об/хв. не було виявлено пошкодження насіння льону олійного. Максимальний ступінь пошкодження насіння льону олійного $0,6\%$ в результаті перемішування мав місце для очищеного льону олійного з відотною вологістю 14% після 100

обертів при частоті обертання 120 об/хв, тоді як для вороху насіння льону олійного з вмістом рослинних домішок близько 50 % і відносною вологістю 9 % він становив 0,3 % при аналогічних режимах перемішування.

6. Аналіз процесу вентилявання шару вороху льону олійного показав, що при перемішуванні шару вороху насіння льону олійного висотою 0,35 м лопатями з частотою 10 об/хв. швидкість повітряного потоку на виході з шару матеріалу була на 10 % меншою від швидкості 3 м/с в незаповненій матеріалом камері установки. Для нерухомого шару матеріалу зменшення швидкості при проходженні крізь шар матеріалу сягало 76 %. Внаслідок вентилявання вороху насіння льону олійного з вмістом насіння 50-55 % при відносній вологості матеріалу 11 % маса частинок вороху, відокремлених повітряним потоком, досягала 35 % від початкової маси.

7. В результаті аналізу рівняння регресії рівномірності сушіння встановлено, що на рівномірність сушіння впливає швидкість сушильного агента і частота обертання активаторів і, меншою мірою, температура сушильного агента і крок спіралі. Всі чотири фактори є значущими. Частота обертання активаторів, достатня для ефективного розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння, без його пошкодження: 5-7 об/хв, крок спіралі 300 мм при діаметрі витка спіралі 250 мм.

8. Аналіз рівняння регресії процесу сушіння вороху льону олійного на сушарці зі спіралеподібними активаторами показав, що на швидкість сушіння впливає вологість матеріалу і температура сушильного агента, і меншою мірою, частота обертання активаторів. При цьому всі три фактори є значущими.

РОЗДІЛ 5. ВИРОБНИЧА ПЕРЕВІРКА ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СУШАРКИ

5.1. Технологічний процес сушіння насіння льону олійного у сушарці зі спіралеподібними активаторами

З урахуванням особливостей насіння льону олійного як об'єкта сушіння, а також зважаючи на недоліки наявних типів сушарок, що застосовуються, була запропонована нова сушарка [2], схематичне зображення конструкції якої представлено на рисунку 5.1.

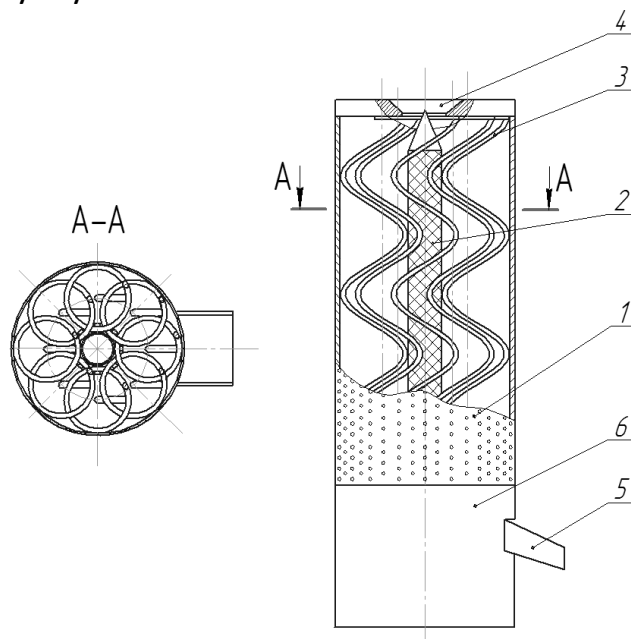


Рисунок 5.1 – Сушарка для насіння льону олійного: 1 – перфорована стінка сушильної камери; 2 – перфорована колона сушильної камери; 3 – активатори для перемішування матеріалу; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – вивантажувальний пристрій; 6 – теплогенератор з вентилятором

Сушарка працює наступним чином. Матеріал подається в сушильну камеру через завантажувальний пристрій 4 у верхній частині сушарки. Вентилятором нагнітається атмосферне повітря і за допомогою теплогенератора 6 нагрівається до потрібної температури. Після цього сформований сушильний агент подається у перфоровану колону 2, розміщену в центрі циліндричної сушильної камери, звідки потрапляє в сушильну камеру і проходить крізь матеріал і відводиться з сушильної камери через перфоровану стінку 1. В сушильній камері встановлені розрихлювачі 3, виконані у формі профіля, закрученого за циліндричною гвинтовою лінією. В результаті обертання розрихлювачів 3 в напрямку, що забезпечує переміщення їх витків догори, матеріал, що перебуває в сушильній камері, перемішується.

Вивантажується матеріал за допомогою вивантажувального пристрою 5. Конструкція активаторів для перемішування матеріалу забезпечує низький рівень пошкодження насіння, а їх розміщення в сушильній камері – рівномірне перемішування матеріалу. При цьому інтенсифікується процес виділення вологи, забезпечується висока енергоефективність і продуктивність сушіння. Необхідна тривалість перебування матеріалу в сушильній камері контролюється вивантажувальним пристроєм.

Конструкція запропонованої сушарки передбачає можливість її роботи в двох режимах (рис.5.2):

- 1) порційний – один цикл роботи сушарки передбачає завантаження об'єму сушильної камери вологим матеріалом, його доведення до кондиційної вологості і вивантаження сухого матеріалу. Такий режим ефективний при невеликій кількості матеріалу, вологість якого необхідно знизити;
- 2) поточний – матеріал подається в сушильну камеру і вивантажується з неї безперервно, переміщуючись від зони завантаження до зони вивантаження. Матеріал піддається сушінню і досягає кондиційної вологості. Такий режим доцільно застосовувати при великих об'ємах матеріалу, що піддається сушінню.

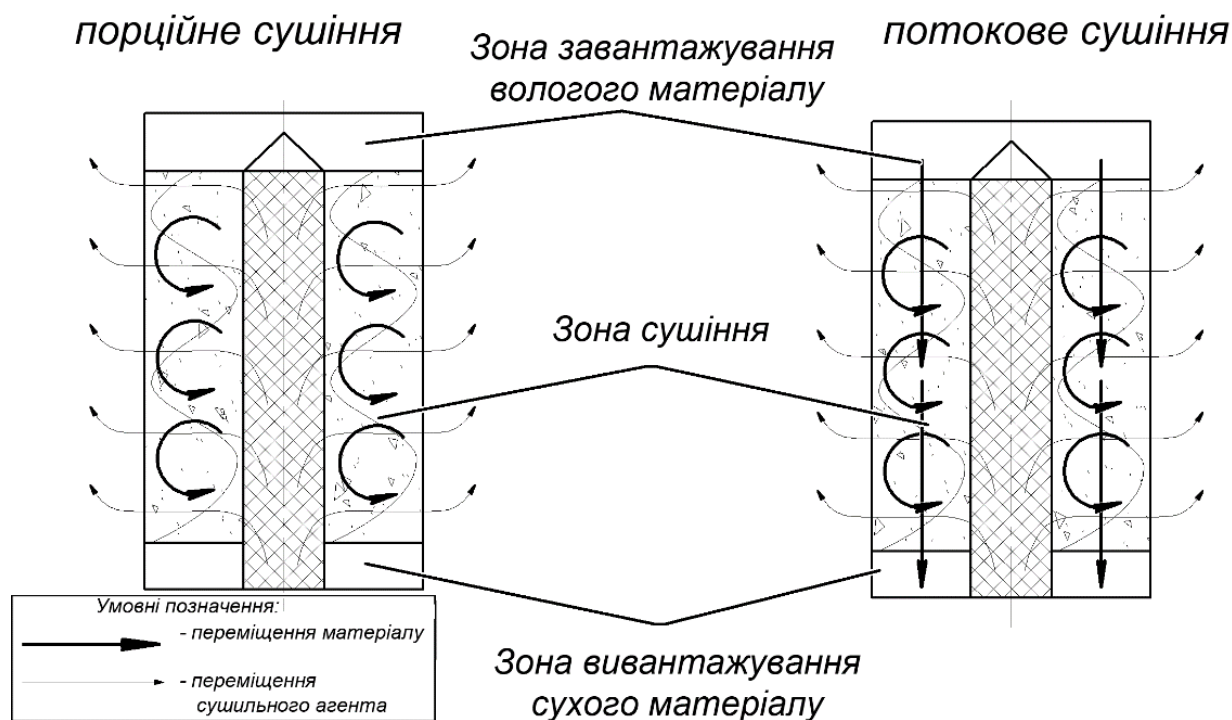


Рисунок 5.2 – Режими роботи сушарки насіння льону олійного

Конструкція сушарки дозволяє збільшити коефіцієнт заповнення сушильної камери порівняно з наявними сушарками. Застосування активних спіралеподібних активаторів дозволяє забезпечити ефективне розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння у всьому об'ємі сушильної камери, що сприяє ефективній вологовіддачі матеріалу сушильному агенту,

рівномірності нагрівання матеріалу від центру до периферії сушильної камери і високій рівномірності сушіння. Форма активаторів мінімізує можливість механічного пошкодження у процесі перемішування насіння.

5.2. Методика розрахунку енерговитрат

Для забезпечення технологічного процесу роботи сушарки затрачається енергія:

- на приготування сушильного агента шляхом нагрівання атмосферного повітря електрокалорифером або в результаті згоряння пального;
- на подачу сушильного агента в сушильну камеру за допомогою вентилятора;
- на перемішування і розпушування матеріалу, що піддається сушінню, спіралеподібними активаторами;
- на роботу завантажувальних і вивантажувальних пристроїв.

Розрахунок витрат енергії дозволяє робити оцінку енергоефективності даної сушарки.

5.2.1. Визначення продуктивності сушарки і витрат пального

Для визначення продуктивності сушарки використовуються вихідні дані:

- тривалість сушіння матеріалу до досягнення кондиційної вологості встановлена за результатами експериментальних досліджень (п.4.1) та в результаті господарсько-лабораторних досліджень сушіння вороху насіння льону олійного на дослідному зразку сушарки (п.5.4);
- геометричні параметри сушильної камери: D_1 – внутрішній діаметр зовнішньої стінки сушильної камери, м; D_2 – зовнішній діаметр внутрішньої стінки сушильної камери, м; n_s – кількість спіралеподібних розрихлювачів, s – площа профілю поперечного перерізу витка спіралі активатора, m^2 , D_s – діаметр циліндричної спіралі активатора, m^2 , k_s – крок спіралі, m^2 , H – висота сушильної камери, м.
- коефіцієнт заповнення сушильної камери матеріалом, $\eta=0,9$.

Для визначення продуктивності сушарки за насінням льону олійного визначимо об'єм її сушильної камери (рис.5.3):

$$V = V_1 - V_2, \quad (5.1)$$

де V_1 – об'єм сушильної камери без врахування об'єму активаторів, m^3 ;
 V_2 – загальний об'єм спіралеподібних активаторів, m^3 .

При цьому

$$V_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - D_1)^2}{4} \cdot H, \quad (5.2)$$

$$V_2 = n_{s.o.} \cdot s \cdot \sqrt{(\pi \cdot D_s)^2 + k_s^2} \times \frac{H}{k_s^2}, \quad (5.3)$$

де s – площа перерізу витка активатора, м^2 ; D_s – середній діаметр витка активатора, м .

Підставивши (5.2) і (5.3) в (5.1), отримаємо:

$$V = H \cdot \left(\frac{\pi \cdot (D_2 - D_1)^2}{4} - n_s \cdot s \cdot \sqrt{\frac{(\pi \cdot D_s)^2}{k_s^2} + 1} \right). \quad (5.4)$$

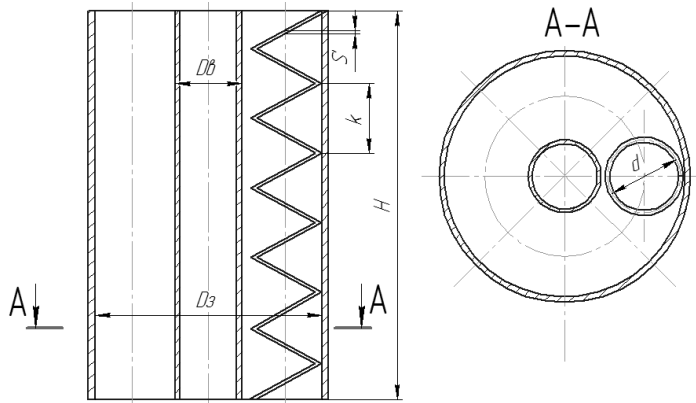


Рисунок 5.3 – Схема для визначення об'єму сушильної камери

Маса матеріалу, що перебуває в сушильній камері, складе:

$$m = V \cdot \gamma \cdot \eta, \text{ кг}, \quad (5.5)$$

де γ – середня питома маса матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для вороху насіння льону олійного з умістом домішок 35-40 % від загальної маси і відносною вологістю 14-10 % приймається $\gamma=350 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Виходячи з тривалості перебування матеріалу в сушильній камері τ , хв. і відомої маси матеріалу, що заповнює сушильну камеру, продуктивність P сушарки визначається за залежністю:

$$P = \frac{m \cdot 60}{T \cdot 1000}, \text{ т/год.} \quad (5.6)$$

Маса висушеного за 1 годину матеріалу визначиться за формулою [1]:

$$P' = P \cdot \frac{100 - w_1}{100 - w_2}, \quad (5.7)$$

де P – маса вологого матеріалу, т; P' – маса сухого матеріалу, т; w_1 – початкова відносна вологість, %; w_2 – кінцева відносна вологість, %.

Кількість випаруваної води:

$$W = (P - P') \cdot 1000, \text{ кг.} \quad (5.8)$$

Тепловміст визначається за формулою [1]:

$$I = 0,24 \cdot t + \frac{d}{1000} \cdot (595 + 0,47 \cdot t), \text{ ккал/г с.п.,} \quad (5.9)$$

де t – температура, °С; d – вологовміст, г/кг с.п.

Витрата тепла на нагрівання матеріалу:

$$q = \frac{P'}{W} \cdot c \cdot (t_2 - t_1), \quad (5.10)$$

де c – питома теплоємність матеріалу, ккал/кг°С; t_1 – температура повітря, °С; t_2 – температура сушильного агента, °С.

Питому витрату сухого повітря встановлено з залежності [1]:

$$t_2 = \frac{I_1 - \frac{q \cdot t_0}{l} - 595 \cdot \left(\frac{1}{l} + \frac{d_0}{1000} \right)}{0,24 + 0,47 \cdot \left(\frac{1}{l} + \frac{d_0}{1000} \right)}, \quad (5.11)$$

де l – питома витрата сухого повітря на 1 кг випаруваної води, кг с.п./кг в.в.
 I_1 – тепловміст сушильного агента, ккал/г с.п.

Годинна витрата повітря:

$$L = l \cdot W, \text{ кг с.п./кг в.в.} \quad (5.12)$$

Приготування сушильного агента можливе шляхом нагрівання повітря електрокалорифером або в результаті згорання палива.

У випадку застосування електрокалорифера для нагрівання повітря годинна витрата електроенергії для насіння льону олійного для заданих параметрів сушіння визначається за формулою:

$$N_e = \frac{(I_1 - I_0) \cdot l \cdot W}{\eta_e \cdot 859,845} \text{ , кВт,} \quad (5.13)$$

де η_e – ккд калорифера.

Годинна витрата палива на сушіння [1]:

$$B = \frac{(I_1 - I_0) \cdot l \cdot W}{H \cdot \eta_1} \text{ , кг,} \quad (5.14)$$

де H – теплотворна здатність палива, кДж/кг; η_1 – ккд топкового агрегату.

Питома витрата палива:

$$b = \frac{B}{P} \text{ , кг/т.} \quad (5.15)$$

Продуктивність і питома витрата пального залежить від властивостей матеріалу, що піддається сушінню, його початкових параметрів, режимів сушіння, а також типу теплоносія.

В результаті розрахунку питома витрата енергоносія на сушіння вороху насіння льону олійного склала 2,77 кг/т. рідкого пального, а питома витрата повітря – 67 кг с.п./кг в.в. при продуктивності сушарки 0,89 т/год і зниженні вологості від 14 до 9 %. У випадку застосування електрокалорифера як джерела теплової енергії для формування сушильного агента годинна витрата електроенергії склала: 27,2 кВт.

Для такої конструкції сушарки додаткові витрати енергії матимуть місце при приведенні в дію розрихлювачів. Водночас застосування перемішування і розпушування матеріалу в процесі сушіння дасть можливість забезпечити більш інтенсивне і якісне сушіння матеріалу, дозволить зменшити тривалість сушіння і збільшити його рівномірність.

5.2.2. Розрахунок витрат потужності на привод активаторів

У процесі перемішування і розпушування матеріалу спіралеподібними активаторами затрачається потужність на подолання опору матеріалу.

Потужність, яка затрачається на приведення в дію одного активатора, наближено визначимо за формулою [3]:

$$N_{\dots} = 47 \cdot g \cdot \psi \cdot D_s^2 \cdot k_s \cdot v_s \cdot \rho \cdot k' \cdot c \cdot L_c \cdot \omega k_3 \cdot 10^{-3}, \quad (5.16)$$

де ψ – коефіцієнт ($\psi=0,3..0,4$); D_s – діаметр спіралі, м; k_s – крок спіралі, м; v_s – частота обертання, хв.^{-1} ; ρ – об'ємна маса матеріалу, кг/м^3 ; k' – коефіцієнт, що залежить від властивостей матеріалу (для легко сипких матеріалів $k'=0,75..1,0$); c – коефіцієнт, що враховує нахил активатора; L – довжина активатора, м; ω – коефіцієнт опору руху ($\omega=4..5$); k_3 – коефіцієнт запасу потужності ($k_3=1,2..1,25$).

Тоді загальна потужність для всіх активаторів

$$N_{p.o.zaг.} = N_{p.o.} \cdot m, \quad (5.17)$$

де, m – кількість активаторів.

Необхідна потужність електродвигуна з урахуванням ККД передач привода визначиться за формулою:

$$N_{\text{дв.}} = N_{p.o.zaг.} / \eta_{np.}, \quad (5.18)$$

де η_{np} – ккд привоу. Для привоу, що містить пасову передачу, конічну зубчасту передачу, підшипники кочення (рис.5.4), загальний ккд становитиме $\eta_{np}=0,85$ [4].

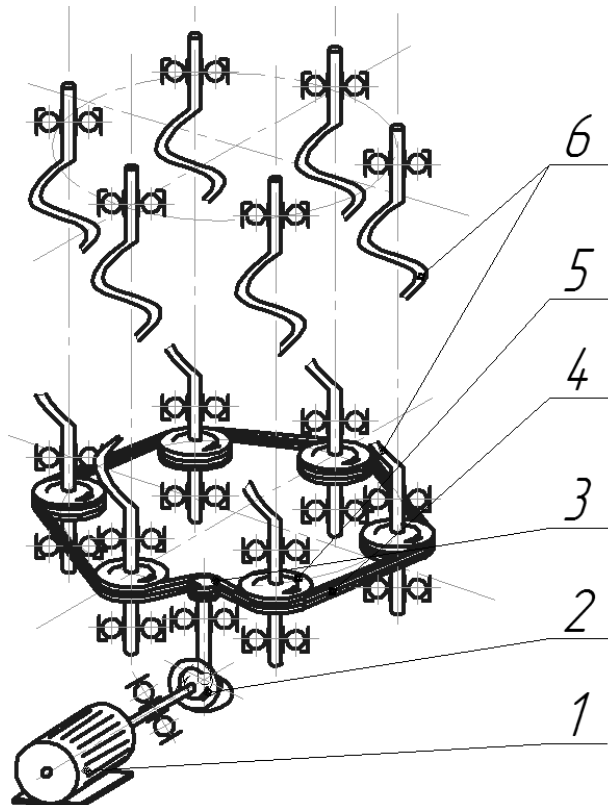


Рисунок 5.4 – Кінематична схема приводу сушарки для визначення ККД:

1 – електродвигун; 2 – зубчаста конічна передача; 3 – ведучий шків; 4 – клинопасова передача; 5 – ведений шків; 6 – спіралеподібний активатор

Розрахована потужність електродвигуна на приведення в дію активних робочих органів склала: $N_{\partial\partial}=0,52$ кВт.

5.2.3. Розрахунок витрат повітря і вибір типу вентилятора

Швидкість повітряного потоку (сушильного агента) на вході у спрямовувачі повітропроводу визначається за загальною витратою сушильного агента:

$$\bar{\omega}_0 = \frac{V_{пов.}}{3600 \cdot F_{пов.}}, \text{ м/с,} \quad (5.19)$$

де $F_{пов.}$ – площа поперечного перерізу повітропроводу, приймається рівною площі поперечного перерізу внутрішньої стінки сушильної камери діаметром $D_в$, м² (рис.5.3); $V_{пов.}$ – об'ємна витрата повітря, м³/год.

$$F_{пов.} = \frac{\pi \cdot (D_1 - s)^2}{4}, \quad (5.20)$$

де s – товщина внутрішньої стінки сушильної камери/

Об'ємна витрата повітря:

$$V_{пов.} = \frac{L}{\rho_{пов.}}, \quad (5.21)$$

де $\rho_{пов.}$ – густина повітря, кг/м³.

Втрати тиску в системі визначається за формулою:

$$P_c = \frac{\rho_{пов.} \cdot \bar{\omega}_0^2}{2 \cdot g} \cdot \xi_k, \quad (5.22)$$

де ξ_k – коефіцієнт місцевого опору.

Динамічний тиск у повітропроводі:

$$P_{\partial} = \frac{\rho_{\text{нов.}} \cdot \bar{\omega}_0^2}{2 \cdot g} . \quad (5.23)$$

Повний тиск вентилятора складе:

$$P_n = P_c + P_{\partial} . \quad (5.24)$$

Потужність N (кВт·год) електродвигуна вентилятора:

$$N_{\partial} = \frac{Q_{\partial} \cdot P_{\partial}}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_{\partial} \cdot \eta_n \cdot \eta_k} , \quad (5.25)$$

де Q_{∂} – кількість агента сушіння, що подається вентилятором, м³/год; P_{∂} – повний тиск, який розвивається вентилятором під час роботи сушарки, Па; η_{∂} – ККД вентилятора ($\eta_{\partial} = 0,7$); $\eta_n = 0,97$ – ККД пасової передачі; $\eta_k = 0,9$ – ККД, яким враховують втрату в підшипниках.

Загальне споживання електроенергії сушаркою:

$$N = N_{\partial} + N_{\partial} .$$

Питома витрата електроенергії на 1 т висушеного матеріалу:

$$N_n = \frac{N}{P} .$$

У результаті розрахунку питома споживання електроенергії склало: 0,98 кВт, витрата електроенергії на 1 т висушеного насіння льону олійного від початкової відносної вологості 14 % до кінцевої 9 % склала 1,1 кВт/т.

У табл.5.1 представлені значення раціональних параметрів сушарки насіння льону олійного і її технічні характеристики на основі проведених

теоретичних (п. 2.3, 2.4, 2.6) та експериментальних (п. 4.1, 4.3, 4.6) досліджень та аналізу роботи сушарки.

Таблиця 5.1 – Рекомендовані параметри та технічна характеристика сушарки насіння льону олійного

Параметри сушарки		Позначення	Величина
Зовнішній діаметр сушильної камери		D_1	1,2 м
Внутрішній діаметр сушильної камери		D_2	0,2 м
Висота сушильної камери		H	1,5 м.
Частота обертання активаторів		ν_s	6 хв. ⁻¹
Кількість активаторів		$n_{p.o.}$	6
Крок циліндричної спіралі активатора		k_s	0,4 м
Діаметр циліндричної спіралі активатора		D_s	0,3 м
Продуктивність сушарки насіння льону олійного при зниженні відносної вологості від 14 до 9 %		P_c	0,89 т/год
Питома витрата	рідкого палива	b	2,77 кг/т с. м.
	електроенергії на нагрівання повітря	N_e	27,16 кВт/ т с. м.
Питома витрата електроенергії (на роботу електродвигунів)		b_e	0,98 кВт
Питоме споживання електроенергії на привод вентилятора і активаторів		N_n	1,1 кВт/т с. м.

5.3. Розрахунок економічної ефективності сушарки

Економічна ефективність сушарки насіння льону олійного визначалась порівняно з барабанною сушаркою СБ-0,5, яку прийнято за базову. Оцінка економічної ефективності проводився згідно з відомою методикою розрахунку економічного ефекту [5].

Економічна ефективність застосування нової сушарки повинна враховувати такі основні показники:

- 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.5.2).

Таблиця 5.2 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

Показник	Одиниця виміру	Машина	
		Базова	Нова
1	2	3	4
Продуктивність сушарки для насіння льону олійного	кг/год.	500	580
Тривалість роботи сушарки протягом року	днів	45	45
Чисельність обслуговуючого персоналу	людей	2	2
Маса сушарки в зборі	кг	750	610
Чиста маса сушарки без покупних частин	кг	670	550
Відпускна ціна сушарки	грн.	23000	-
Собівартість сушарки	грн.	19170	-
Вартість матеріалів у собівартості сушарки	грн.	17300	-
Потужність на привод сушарки	кВт	-	0,98
Потужність на привод вентилятора	кВт	1	0,37
Потужність калорифера	кВт	22,5	27,2
Вартість електроенергії	грн./ (кВт-год.)	0,88	0,88
Коефіцієнт відрахувань на додаткову заробітну плату	%	20	20
Коефіцієнт відрахувань на соціальні потреби	%	37,84	37,84
Вартість покупних виробів нової сушарки	грн.	-	6300
Коефіцієнт конструктивної складності	-	-	1,2
Коефіцієнт зміни залежно від обсягу випуску	-	-	1,1
Коефіцієнт транспортно-заготівельних витрат	-	-	1,1
Кількість вентиляторів	шт.	1	1
Кількість калориферів	шт.	1	1
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 5.3 – Показники економічної ефективності

Показник	Одиниця виміру	Машина		Різниця ($\pm$)
		Базова	Нова	
Продуктивність сушарки	кг/год.	500	880	+380
Річний обсяг робіт	т/рік	360	663,6	+303,6
Чисельність обслуговуючого персоналу	чол.	2	2	-
Затрати праці на сушіння	люд.-год./кг	2×10^{-3}	$1,136 \times 10^{-3}$	$-0,864 \times 10^{-3}$
Річна економія затрат праці при застосуванні нової сушарки	люд.-год.	-	236,3	-
Собівартість сушіння	грн./кг	0,094	0,046	-0,048
Експлуатаційні витрати на сушарку	грн./кг	0,084	0,04	-0,044
Річна економія грошових засобів на експлуатаційних витратах при застосуванні нової сушарки	грн.	-	12289	-
Питомі капіталовкладення у сфері експлуатації сушарки	грн./кг	0,064	0,046	-0,018
Питома металомісткість технологічного процесу сушіння	кг/кг	$2,1 \times 10^{-3}$	$0,96 \times 10^{-3}$	$-1,14 \times 10^{-3}$
Термін окупності	роки	-	2,388	-

5.4. Результати господарсько-виробничої перевірки сушарки для сушіння насіння льону олійного

Для перевірки якості роботи запропонованої сушарки проведено її випробування.

Дослідження проводилися на насінні льону олійного сорту «Південна ніч», одержаного при однофазному збиранні з вмістом домішок 35-40 %. Початкова вологість вороху насіння льону олійного становила 14 %, щільність матеріалу – 350 кг/м^3 . Встановлена початкова схожість насіння – 95 %. Сушіння проводилось при температурі сушильного агента – 45°C , атмосферного повітря – $18\text{--}20^\circ\text{C}$. Швидкість сушильного агента на виході через зовнішню стінку сушильної камери становила 0,6 м/с. Тривалість сушіння – 15 хв.

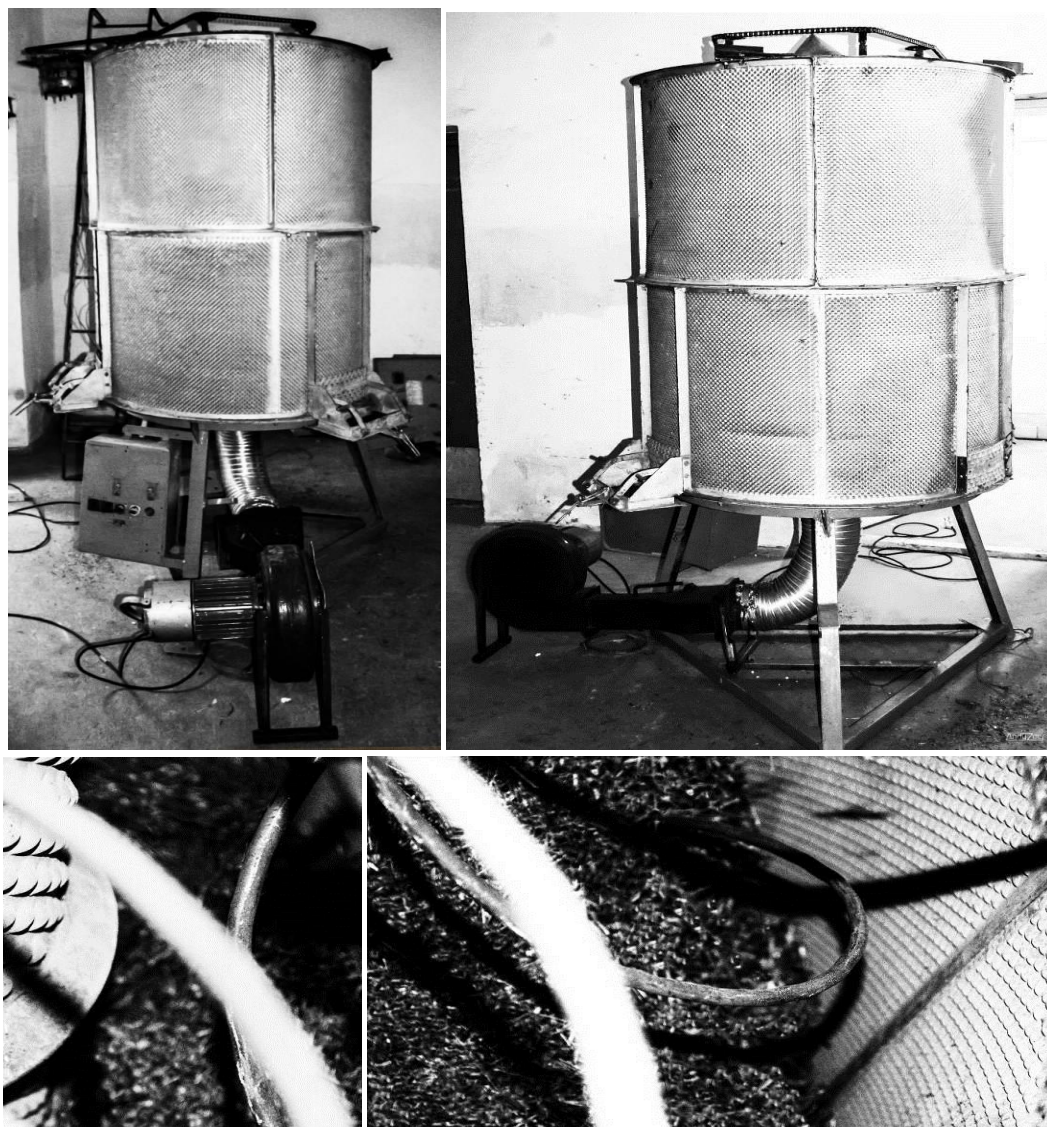


Рисунок 5.5 – Сушарка насіння льону олійного

У результаті перевірки роботи сушарки встановлено, що обґрунтовані теоретично і експериментально геометричні параметри сушарки, а також прийняті режимні параметри сушіння забезпечують ефективне перемішування і розпушування матеріалу в сушильній камері без утворення застійних зон. Сушіння забезпечує рівномірне просушування матеріалу. При сушінні від початкової вологості матеріалу 14 % і температурі сушильного агента на вході в сушильну камеру 45 °С, частоті обертання активаторів 6 хв⁻¹ з кроком їх спіралі 0,4 м, діаметром спіралі 0,3 м і міжосьовою відстанню між двома сусідніми активаторами 0,25 м відбувалось зниження вологості до 9 %.

Результати господарсько-лабораторних досліджень сушіння вороху насіння льону олійного в запропонованій сушарці (рис.5.5) підтверджують ефективність і доцільність її використання.

5.5. Висновки до розділу 5

1. Розроблено конструкцію сушарки для насіння льону олійного зі спіралеподібними активаторами для розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння та обґрунтовано параметри: відношення кроку спіралі до діаметра активатора $k_s / D_s = 1,2$ м, частота обертання активаторів 6 об/хв, споживана потужність на привод активаторів і вентилятора сушарки 0,98 кВт, продуктивність сушарки при сушінні вороху насіння льону олійного від 14 до 9 % – 0,89 т/год, питома витрата рідкого пального: 2,96 кг/т с.м., електроенергії при використанні калорифера для нагрівання повітря: 27,2 кВт/т с.м.

2. Розрахунок економічної ефективності використання сушарки свідчить про доцільність її використання для сушіння насіння льону олійного. Річний економічний ефект від застосування сушарки становить 12289 грн.

3. У результаті дослідно-виробничих досліджень встановлено, що запропонована сушарка є працездатною.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У монографії представлено теоретичне узагальнення і запропоновано нове вирішення науково-прикладної задачі, яке полягає у вдосконаленні технологічного процесу сушіння вороху насіння льону олійного за рахунок інтенсифікації сушіння шляхом розпушування і перемішування шару матеріалу у сушарці запропонованої конструкції.

Застосування запропонованої сушарки, а також методів розрахунку її конструктивних і режимних параметрів дозволить зменшити енерговитрати на сушіння вороху насіння льону олійного.

1. Вдосконалено математичну модель, яка описує переміщення частинки матеріалу у сушильній камері поверхнею спіралеподібного активатора, що дає можливість встановити його геометричні та кінематичні параметри. Встановлено, що найбільша тривалість контакту частинки матеріалу з поверхнею активатора склала 0,21 с при $v_r=1$ рад/с, $k=0,4$ м, $d = 0,01$ м і діаметрі спіралі $D = 0,3$ м в досліджуваному діапазоні варіювання параметрів (крок спіралі 0,2 ... 0,4 м, діаметр прутка активатора $d = 0,005... 0,01$ м, частота обертання спіралі $v_r = 0,1...1$ рад/с).

2. Вдосконалено математичну модель процесу сушіння нерухомого шару матеріалу в циліндричній сушарці при переміщенні фронту сушіння від центру до периферії вздовж радіуса сушарки. Розрахунки показують, що різниця між теоретичними та експериментальними результатами склала не більше 4,5 %.

3. Встановлено, що в процесі сушіння з перемішуванням матеріалу нерівномірність сушіння за товщиною шару знижується порівняно з нерухомим шаром. Експозиція сушіння нерухомого шару матеріалу склала 43,7 хв, у той час як при сушінні з перемішуванням шару матеріалу з різною інтенсивністю – в межах 38,6...41,0 хв.

4. Запропоновано для аналізу кінетики сушіння з перемішуванням матеріалу враховувати коефіцієнт масової частки матеріалу $K_{i(i)}$, а для кількісного аналізу процесу перемішування насінневого матеріалу використовувати коефіцієнт інтенсивності перемішування σ . При значенні $\sigma = 5$ експозиція сушіння зменшується у 1,14 рази.

5. Аналіз процесу вентилявання матеріалу дав можливість теоретично визначити опір повітряному потоку шару сипкого матеріалу в циліндричній сушильній камері сушарки з врахуванням зміни пористості за глибиною шару. Для сушильної камери з діаметром внутрішньої стінки 0,2 м, товщиною циліндричного шару матеріалу 0,4 м, його питомою масою 630 кг/м^3 і пористістю 0,3, висотою сушильної камери 2 м при швидкості сушильного агента на вході в матеріал 2 м/с втрата тиску становить 71 Па.

6. Коливні режими сушіння з поперемінною подачею сушильного агента та атмосферного повітря дозволяють знизити енерговитрати на сушіння до 35 %. Доцільно встановлювати температуру сушильного агента для насіння льону олійного для посівних цілей 40 °С, для технологічних цілей – з постійною температурою сушильного агента 60 °С, – з поперемінною подачею сушильного агента 20/60 °С;

7. Найбільш ефективними для перемішування і розпушування матеріалу є активатори з діаметром $D_s = 0,25$ м у формі спіралі і кроком $k_s = 0,3$ м. Ступінь перемішування матеріалу прямо пропорційний кількості обертів активаторів і, меншою мірою, залежить від частоти обертання. Для ефективного розпушування і перемішування матеріалу в процесі сушіння, без його пошкодження частота обертання активаторів повинна бути 5-7 об/хв.

8. В результаті аналізу рівняння регресії рівномірності сушіння встановлено, що на рівномірність сушіння впливає швидкість сушильного агента і частота обертання активаторів, і, меншою мірою, температура сушильного агента і крок спіралі. Всі чотири фактори є значущими. Найбільш рівномірне сушіння в межах варіювання досліджуваних параметрів має місце при частоті обертання активаторів

$v_s = 12$ об/хв, температурі сушильного агента на вході в сушильну камеру $t = 55$ °С, кроці спіралі $k = 0,35$ м і швидкості сушильного агента $v = 1,2$ м/с. Аналіз рівняння регресії процесу сушіння вороху льону олійного показав, що на швидкість сушіння впливає вологість матеріалу і температура сушильного агента, і, меншою мірою, частота обертання активаторів. При цьому всі три фактори є значущими. Зі збільшенням частоти обертання активаторів швидкість сушіння зростає.

9. Встановлено раціональні параметри сушарки: відношення кроку спіралі до діаметра активатора $k_s / D_s = 1,2$ м, частота обертання активаторів 6 об/хв, споживана потужність на привод активаторів і вентилятора сушарки 0,98 кВт, продуктивність сушарки при сушінні вороху насіння льону олійного від 14 до 9 % – 0,89 т/год, питома витрата рідкого пального: 2,96 кг/т с.м., електроенергії при використанні калорифера для нагрівання повітря: 27,2 кВт/т с.м.

10. Розрахований річний економічний ефект від застосування сушарки становить 12289 грн. У результаті господарсько-лабораторних досліджень встановлено, що запропонована сушарка є працездатною.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

До розділу 1: «Загальна характеристика льону олійного як об'єкта збирання і післязбиральної обробки».

1. Ворошилов А. И. Исследование процесса сушки мелких семян масличных культур и обоснование схемы сушильной установки : Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1977. – 26 с.
2. Дідух В.Ф. Збирання та первинна переробка льону-довгунця / В. Ф. Дідух., І. М. Дударев, Р. В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2008. – 215 с
3. Дударев И.Н. Обоснование технологии уборки масличного льна и конструкции средств для ее реализации / И.Н. Дударев // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. / РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства». – Минск, 2011. – Вып. 45. – С. 120-126.
4. Дударев. І. М. Універсальна технологія збирання та післязбиральної обробки льону / І. М. Дударев // Науковий журнал «Технологічні комплекси», № 1,2 (5,6), 2012 – С. 148-152.
5. Живетин В. В. Лен: вчера, сегодня, всегда / В.В.Живетин, Л.Н.Гинзбург, А.И.Рыжов. – М.: Полигран, 1995. – 117,[1]с.
6. Живетин В. В. Масличный лен и его комплексное использование / В.В. Живетин, Л.Н. Гинзбург; [Центр НИИ комплекс. автоматизации лег. пром-сти]. – М.: ЦНИИЛКА, 2000. – 92 с.
7. Зеленко В.И. Неравномерность сушки в плотном слое / В.И. Зеленко. // Мех. и электр. с/х., 1986, № 1. – С. 32-35.
8. Зеленко В.И. Обобщенные кривые кинетики сушки / В.И. Зеленко. // Мех. и электр. с/х., 1986, № 1. – С. 56-58.
9. Зінченко О.І. Рослинництво: за ред. О.І. Зінченка / О.І.Зінченко,. В.Н. Салатенко, М.А. Білоножко. – К.: Аграрна освіта, 2001. – 591с.
10. Карпенко А. Н. Сельскохозяйственные машины [Текст]: учеб. для вузов / А.Н.Карпенко, В. М. Халанский, – М. Агропромиздат, 1989. – 527 с.
11. Карташевич С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний технологических комплексов) : монография / С. М. Карташевич. – Минск : [б. и.], 2001. – 287 с.
12. Ким Л. В. Технология хранения зерна: Учеб. пособие Текст. / Л. В. Ким, Т. В. Зяблова. – Воронеж.: Воронежская государственная технологическая академия, 1999. – 52
13. Лурье М.Ю. Сушильное дело. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 711 с.

14. Лыков А.В. Тепломассообмен / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 479 с.
15. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470 с.
16. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя. – М., 1985.
17. Окунь Г.С. Расчет продолжительности и энергоемности процесса сушки зерна в слое с помощью ЭВМ / Г.С. Окунь, И.И. Верцман, Ю.В. Есаков // Труды ВИМ, 1984, т. 100. – С. 73-80.
18. Оробинский Д. Ф. Исследование процесса сушки вороха и семян льна с целью его интенсификации в условиях Северо-Запада : Автореф. дис. канд. техн. наук. Каунас, 1973. – 29 с.
19. Пат. 21502А Україна, МПК (2006) F26B 17/00. Сушарка для сипких матеріалів / Божидарнік В.В, Приймак О.В, Кужель Е.В., Фесенко О.О.; заявл. 21.03.1995; опубл. 16.12.19970
20. Пат. 27977 Україна, МКВ A01F26B 17/04. Сушарка для сипких матеріалів / Дударев І.М., Кірчук Р.В., Кокалюк Л.Ю. ; заявл. 01.06.07 ; опубл. 26.11.07
21. Пат. 43495 Україна, МПК (2009) A01F26B 17/00. Сушарка для сипких матеріалів / Божидарнік В.В, Приймак О.В, Кужель Е.В., Фесенко О.О.; заявл. 05.01.2009; опубл. 25.08.2009, бюл. № 16
22. Пат. 52066 Україна, МПК (2009) F26B 17/00. Сушарка коробочок льону / Божидарнік В.В, Кужель Е.В., Приймак О.В; заявл. 25.02.1995; опубл. 10.08.2010, бюл. № 15.
23. 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
24. Порев И. А. Исследование процесса сушки семян льна в коробочках : Автореф. дис. канд. техн. наук. – М.: 1973. – 26 с.
25. Птицин С.Д. Физические основы влагопереноса в семенах сельскохозяйственных культур, – Труды ВИМ, вып. 35, 1978. – С. 12-14.
26. Рогаш А.Р. Льноводство [Текст] / А. Р. Рогаш. – М. :Колос, 1967 – 583 с.
27. Сай В. А. Вибір технології збирання льону олійного у зоні західного полісся / В. А. Сай, В. Ф. Дідух, І. В.Тараймович // Проблеми легкой и текстильной промышленности Украины № 15. – 2009. – С. 84-87.
28. Санин А. А. Технология возделывания льна масличного в зоне среднего Поволжья. (рекомендации) / А.А.Санин., Л.А.Косых, В.В.Глуховцов. – Кинель, 2006.
29. Сергеев А. Г. Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров 2-е изд., перераб. и доп. / А. Г. Сергеев. – Л.: ВНИИЖ, 1975 г. – 382 с.

30. Соколов Л. Е. Агротехника и первичная переработка льна: лабораторный практикум : учебное пособие / Л. Е. Соколов, Е. А. Конопатов ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2006. – 141 с.
31. Хомич А.В., Дударев І.М. Технологія збирання олійного льону // Шляхи відродження галузей льонарства і коноплярства та підвищення ефективності їх наукового забезпечення: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (Глухів, 8-10 лют. 2011 р.) / М-во аграр. політики та продовольства, НААН [та ін.]. – Суми: ТОВ “ТД“Папірус”, 2011. – С. 127-132.
32. Aerodynamic and solid flow properties for flaxseeds for pneumatic separation by using air stream Ayman Hafiz Amer Eissa (Agriculture Engineering Department, Faculty of Agriculture, Minoufiya University, Shibin El-Kom, 32516, EGYPT)
33. Cihan A. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice /Ahmet Cihan, Kamil Kahveci // Journal of Food Engineering. – 79. – 2007. – P. 293-298.
34. Doymaz I. The thin-layer drying characteristics of corn / I. Doymaz, M. Pala // Journal of Food Engineering. – 60. – 2003. – P. 125-130.
35. Mills J.T. (John T.) Spoilage and heating of stored agricultural products: prevention, detection and control. Research Branch Agriculture and Agri-Food Canada, 1989.)
36. Mujumdar M.S. (ed.) – Handbook of Industrial Drying. Third Edition. Edited by Arun S. Mujumdar CRC Press 2007.
37. Rafiee Sh. Thin Layer Drying Properties of Soybean / Sh. Rafiee, A. Keyhani, M. Sharifi, A. Jafari, H. Mobli, and A. Tabatabaeefar // J. Agric. Sci. Technol. – Vol. 11. – 2009. – P. 289-300.
38. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) Yalcın Coşkuner, Ersan Karababa *Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, University of Mersin, 33343, Mersin, Turkey.

До розділу 2: «Теоретичне обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного».

1. Василенко П.М. Методика построения расчентых моделей функционирования механических систем (машин и машинных агрегатов). Учебное пособие / П.М. Василенко, В.П. Василенко – К: КИСМ, 1980. – 138 с.
2. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 9-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с: ил.
3. Карпенко А. Н. Сельскохозяйственные машины [Текст]: учеб. для вузов /
4. Карташевич С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний

технологических комплексов) : монография / С. М. Карташевич. – Минск : [б. и.], 2001. – 287 с.

5. Кірчук Р.В. Розробка сепаратора вороху льону [Текст]: дисертація ... канд. техн. наук: (05.05.11) / Р В Кірчук; МОН України, ЛДТУ. — Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2001. — 198 с. іл.

6. Лыков, А. В. Теория сушки [Текст] / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1968. – 470 с.

7. Малин Н.И. Энергосберегающая сушка зерна / Н. И. Малин — М.: Колос, 2004. — 240 с.

8. Методические рекомендации по математическому моделированию процесса сушки и охлаждения зерна в установках плотного слоя. – М., 1985.

9. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов [Текст] : производственно-практическое издание / В.И. Муштаев, В. М. Ульянов. — М. : Химия, 1988. – 352 с. : ил.

10. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий : в 2 ч. Ч. 2 / Г. М. Островский [и др.]; ред. Г. М. Островский [и др.]. – СПб. : Профессионал, 2006. - 916 с.

11. Птицин С.Д. Зерносушилки / С.Д. Птицин – М.: Машиностроение, 1966. – 180 с.

12. Рогаш А.Р. Льноводство [Текст] / А. Р. Рогаш. – М. :Колос, 1967 – 583 с.

13. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс): Учебник для строит. вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1983.—288 с, ил.

14. Шаройко Е.А., Чернавский Н.П. Хранение семян сельскохозяйственных культур и кормовых трав. – М.: Колос, 1980.

15. Cihan A. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice /Ahmet Cihan, Kamil Kahveci // Journal of Food Engineering. – 79. – 2007. – P. 293-298.

16. Mujumdar M.S. (ed.) – Handbook of Industrial Drying. Third Edition. Edited by Arun S. Mujumdar CRC Press 2007.

17. Otten, L. Determination of the specific heat of agricultural materials / L. Otten, G. Samaan. – Canadian Agricultural Engineering, 1980.

18. Rafiee Sh. Thin Layer Drying Properties of Soybean / Sh. Rafiee, A. Keyhani, M.

До розділу 3: «Програма і методика експериментальних досліджень».

1. Аністратенко В.О. Математичне планування експериментів в АПК: Навч. Посібник / В.О. Аністратенко, В. Г. Федоров –К.: Вища шк., 1993. – 375 с.

2. 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.

3. 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.

4. Карташевич С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний технологических комплексов) : монография / С. М. Карташевич. – Минск : [б. и.], 2001. – 287 с.
5. Мельников С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешкин, П.М. Рошин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Колос. Ленингр. отд-ние, 1980. – 168 с.
6. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.
7. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий : в 2 ч. Ч. 1 / Г. М. Островский [и др.]; ред. Г. М. Островский. - СПб. : Професионал, 2004. - 841 с.
8. 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
9. Рогаш А.Р. Льноводство [Текст] / А. Р. Рогаш. – М. :Колос, 1967 – 583 с.
10. Санин А. А. Технология возделывания льна масличного в зоне среднего Поволжья. (рекомендации) / А.А.Санин., Л.А.Косых, В.В.Глуховцов. – Кинель, 2006.
11. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. — 9-е изд., стер. — М.: Высш. шк., 2003. — 479 с: ил.
12. Хайліс Г.А., Федорусь Ю.В. Механіка рослинних матеріалів. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2004. – 302 с.

До розділу 4: «Аналіз результатів експериментальних досліджень».

1. Круг Г. К. Статистические методы в инженерных исследованиях Текст. / Г. К. Круг. – М.: Высшая школа, 1988. – 216 с.
2. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий : в 2 ч. Ч. 1 / Г. М. Островский [и др.]; ред. Г. М. Островский. - СПб. : Професионал, 2004. - 841 с.
3. Рогаш А.Р. Льноводство [Текст] / А. Р. Рогаш. – М. :Колос, 1967 – 583 с.
4. Санин А. А. Технология возделывания льна масличного в зоне среднего Поволжья. (рекомендации) / А.А.Санин., Л.А.Косых, В.В.Глуховцов. – Кинель, 2006.
5. Ящук А.А. Обґрунтування параметрів сушарки насіння льону олійного [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: (05.05.11) / А. А. Ящук. — Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2014. — 171 с. іл.

6. Mujumdar M.S. (ed.) – Handbook of Industrial Drying. Third Edition. Edited by Arun S. Mujumdar CRC Press 2007.

До розділу 5: «Виробнича перевірка та техніко-економічний розрахунок сушарки».

1. Карташевич С. М. Механико-технологические основы повышения эффективности механизированных комплексов для послеуборочной обработки зерна и семян (теория, расчет, результаты проектирования и испытаний технологических комплексов) : монография / С. М. Карташевич. – Минск : [б. и.], 2001. – 287 с.
2. Пат. № 69227 Україна, МПК (2011) F26 B17/12, F26 B17/18. Сушарка для сипких матеріалів / Ящук А.А., Кірчук Р.В., Дідух В.Ф. заявник і власник патенту Луцький національний технічний університет.; заявл. 26.09.2011.; опубл. 25.04.2012, бюл. № 8.
3. Старшов Г.И. Основы проектирования и расчет технологического оборудования пищевых предприятий: учебн. пособие / Г.И. Старшов, С.Н. Никоноров, А.И. Никитин. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. – 187 с.
4. Суюмбаев Х. У. Детали машин. Выбор электродвигателя. Кинематический расчет привода / Х. У. Суюмбаев, А. Ю. Кульчаев. – Каб.-Балк. Ун-т, 2003. -21с.
5. Шведик М. С., Методика розрахунку економічного ефекту конструкторської розробки дипломного проекту. Методичні вказівки до обґрунтування економічної частини дипломного проекту для студентів спеціальності 7.090215 “Машини і обладнання сільськогосподарського виробництва” машинобудівного факультету денної і заочної форм навчання. / М. С. Шведик, В. І. Ткачик – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛДТУ, 2006. – 40 с.

Міністерство освіти і науки України

Кірчук Руслан Васильович, Ящук Андрій Анатолійович

Наукове видання

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ВОРОХУ НАСІННЯ
ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО**

Монографія

Редакційно-видавничий відділ

Луцького національного технічного університету

Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Редактор: А.А.Ящук

Комп'ютерний набір та верстка: А.А.Ящук

Підписано до друку 28.02.2015 р.

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman. Папір офсетний.

Ум. друк. арк. 10,25. Обл.-вид. арк. 10,0.

Наклад 300 прим. Зам. № 66.

Друк – РВВ ЛНТУ, 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

Свідоцтво Держкомтелерадіо України ДК № 4123 від 28.07.2011 р.

Кірчук Р.В.

312 Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння льону олійного: Монографія / Р.В. Кірчук, А.А.Ящук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013. – 164 с.

ISBN

У монографії представлені відомості про фізико-механічні властивості вороху насіння льону олійного як об'єкта сушіння. Проаналізовано способи та засоби механізації сушіння сипких сільськогосподарських матеріалів. Представлено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, яка полягає у забезпеченні інтенсифікації технологічного процесу сушіння вороху насіння льону олійного шляхом розпушування і перемішування шару матеріалу з врахуванням його структурних характеристик у запропонованій новій сушарці.

Рекомендується науковцям, аспірантам, студентам та інженерним працівникам, які займаються питаннями механізації сушіння сипких матеріалів.

УДК 631.365.2:633.521

ББК: 41.47