

УДК 664.65.05; 664.69.002.5; 664.7.002.5; 636.085

№ держреєстрації 0121U114567

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002

тел. +38(057) 7003888 <http://btu.kharkov.ua>, info@btu.kharkov.ua



ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи

Валерій МИХАЙЛОВ

ПРО НАУКОВОДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Розробка інноваційних енергозберігаючих технологій, процесів та обладнання для сепарації, транспортування та здрібнення зерна з отриманням нових видів борошна та крупи»

(остаточний)

Керівник НДР

д.т.н., проф.













Богомолів О.В.

Харків – 2023

Рукопис закінчено 22 грудня 2023 року

Результати цієї роботи розглянуто науково-технічною радою факультету мехатроніки та інжинірингу, протокол №7 від 26.12.2023 р.

СПИСОК АВТОРІВ

1. Керівник НДР, завідувач кафедри ОПХВ докт. техн. наук, професор		Богомолов О.В. (заг. керівн., розд. 1, 2, 3, реферат, висновки)
2. Відповідальний виконавець: канд. техн. наук, доцент Виконавці:		Іващенко С.Г. (вступ, реферат, висновки)
3. Канд. техн. наук.		Ірклієнко В.І. (розд. 3 висновки)
4. Канд. техн. наук., доцент		Гурський П.В. (розд. 2, висновки)
5. Канд. техн. наук., доцент		Лук'янов І.М. (розд. 2)
6. Канд. техн. наук., доцент		Денисенко С.А. (розд. 2, література)
7. Канд. техн. наук., доцент		Міленін А.М. (розд. 3)
8. Канд. техн. наук., доцент		Маяк О.А. (розд. 3, література)
9. Канд. пед. наук., доцент		Мітяшкіна Т.Ю. (розд. 1)
10. Канд. техн. наук., доцент		Сичов А.І. (розд. 2)
11. Канд. техн. наук., доцент		Кісь-Коркіщенко Л.В. (розд. 1)
12. Аспірант		Богомолов О.О. (розд. 2)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 83 с, 15 іл, 36 табл., 67 джерел.

ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ, ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ, УДАРНІ СЕПАРАТОРИ, ЗДРІБНЕННЯ ЗЕРНА

В сучасних умовах в Україні вирощується багато зернового матеріалу, з якого, в свою чергу, виробляється велика кількість борошна, круп, інших харчових продуктів. Запорукою отримання якісно очищеного зернового матеріалу є використання засобів сепарації зернових сумішей в тому числі важкороздільних. Великим значенням при виробництві борошна та круп є використання новітніх технологій, прогресивного обладнання при подрібненні зерна та виробництві круп.

Метою наукової роботи є розробка та обґрунтування продуктивних, енергозберігаючих засобів з очищення зернових сумішей, розділення за пружними властивостями насіння, ефективного подрібнення зерна та виробництва нових видів круп.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси очищення, транспортування, розділення, подрібнення зерна та виробництва якісних круп.

Предмет дослідження – обґрунтування параметрів технологічних процесів, розробка та експериментальні дослідження ударних сепараторів, дискового здрібнювача для розколювання та подрібнення зерна.

Складено фізичні моделі процесів зачерпування при різних режимах роботи норії. Отримано аналітичні залежності для визначення складових опору зачерпування і коефіцієнтів зачерпування в залежності від специфічних фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів і швидкості руху ківшів.

Проведено аналіз енергозберігаючого обладнання для сепарації насіння

за пружними властивостями компонентів сумішей. Для визначення пружних характеристик зерна на різних підкладках (моделюючих матеріал деки) створена експериментальна установка, що дозволяє визначити дальності польоту насіння після його удару об похилу відбивну поверхню, що сепарує. Побудовані варіаційні криві дальності польоту насіння після удару об похилу відбивну поверхню для різних видів зерна.

Обґрунтовано можливість сепарації зернових сумішей за пружністю в залежності від дальності польоту насіння після удару об похилу відбивну поверхню. Обґрунтована конструктивна схема гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора. Проведені експериментальні дослідження з визначення залежності розподілу маси різних видів зерна по лотках сепаратора під час сепарації. Визначені оптимальні значення параметрів сепарації зерна на гравітаційному багатоярусному ударному сепараторі.

Розроблено експериментальну установку для дослідження процесу подрібнення зерна. Проведено повний факторний експеримент на дисковому здрібнювачі. Визначені значення факторів, що забезпечують мінімальну енергоємність y_G і максимальну прохідну здатність y_P при максимальному виході повноцінного продукту y_M , частоту обертання ротора, подачу зерна, зазор між дисками.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА КІВШЕВИМИ НОРІЯМИ	10
1.1. Ефективність заповнення ковшів при завантаженні по ходу тягового елемента	10
1.2. Дослідження опору зачерпування при пуску норії	13
1.3. Опір зачерпуванню при сталому режимі роботи	20
1.4. Опір зачерпування по ходу тягового органу	23
РОЗДІЛ 2. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ	25
2.1. Аналіз енергозберігаючих способів та обладнання для сепарації зернових сумішей	25
2.2. Розробка та експериментальні дослідження ударних сепараторів	32
РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗДРІБНЕННЯ ЗЕРНА З ОТРИМАННЯМ БОРОШНА ТА КРУП	50
3.1. Зерно пшениці як сировина для виробництва продуктів харчування	51
3.2. Експериментальна установка для дослідження процесу подрібнення зерна	53
3.3. Аналіз результатів розколювання зерна пшениці	60
3.4. Обґрунтування і визначення частоти обертання ротора	61
3.5. Результати проведення повного факторного експерименту на дисковому здрібнювачі	65
Загальні висновки	73
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	75

ВСТУП

Стале забезпечення національної харчової безпеки України залежить від збільшення валового об'єму зернових культур. Прогнозований зріст задовольнить запит на постачання продуктів харчування населення не тільки України, а і Світу. Збільшення площі земель під зернові культури на сьогодні практично неможливе, за даним [1] розораність земель України найбільша в світі і сягає 80%.

У наслідок широкомасштабної військової агресії та бойових дій, які ведуться на близько 34% території України, страждають верхні найродючіші шари ґрунтів, які відновлюються найповільніше – один сантиметр за сто років [2]. Відповідно, частка родючих земель, що деградують збільшилась на 13% [3].

Урожайність зернових культур в Україні у 2022 році наближається до 43,4 ц/га і значно поступається урожайності Європейських країн, де вона досягає 80 ц/га [4].

Відповідно статистичним даним Міністерства аграрної політики України за 2022 рік, лише 30% насіннєвого матеріалу задовольняє вимогам ДСТУ. У провідних країнах Світу цей показник досягає 95% [4].

Необхідність покращення якісних і кількісних характеристик процесу підготовки насіннєвого матеріалу з підвищеним біологічним потенціалом регламентовано жорсткими вимогами, які висувають до зернових і, особливо, насіннєвих матеріалів закордонні покупці сільськогосподарської продукції. У січні-серпні 2022 року Україна експортувала понад 20 млн. т. зернових культур, що на 25% менше, ніж за аналогічний період 2021 року. За вісім місяців 2022 року за кордон було продано 4,1 млн т пшениці (1,2 млрд дол. США), кукурудзи – 15,1 млн т (3,8 млрд дол. США), ячменю – 0,8 млн т (0,2 млрд дол. США). Найбільшими покупцями українського зерна у січні-серпні 2022 року, як і раніше, були країни Азії, Євросоюзу та Африки [5].

На якість насіннєвого матеріалу суттєво пливають агроєкологічні та технічні і технологічні чинники протягом усього процесу підготовки насіння, починаючи від підготовки ґрунту, своєчасного виконання агротехнологічних операцій під час вирощування, збирання, обробки та завершуючи завантаженням на зберіганням. Визначальний вплив на отримання якісного насіння відбувається на етапі післязбиральної обробки. Кінцевою метою якого є отримання зернівок, що мають найвищу енергію росту та польову схожість, а отже можуть забезпечити збільшення майбутнього врожаю. Протягом усього процесу підготовки насіння відбувається багаторазова взаємодія зернівок з робочими органами машин і обладнання, що призводить до травмування частини насіннєвого матеріалу.

Отримання насіння найвищої якості з мінімальним відсотком травмованих зернівок поряд з його обробкою фізичними полями різної природи дозволяє отримати насіннєвий матеріал з поліпшеним біологічним потенціалом.

Якість процесу підготовки насіннєвого матеріалу залежить від ефективності машин і обладнання, що реалізують процес. До технологічного обладнання висуваються жорсткі вимоги з ресурсозбереження та ощадливої взаємодії робочих органів машин з частинками насіннєвого матеріалу.

Основною проміжною технологічною операцією з підготовки насіннєвого матеріалу є його транспортування. Транспортування, в залежності від розробленої технологічної лінії, відбувається стрічковими, скребковими, ковшовими, шнековими транспортерами та пневмотранспортуючими машинами. Під час багаторазової взаємодії зернівок з робочими органами транспортуючих машин, відбувається мікро та макро- травмування зернівок, що значно знижує біологічний потенціал насіння, його енергію проростання та урожайність.

Для транспортування насіннєвого матеріалу у вертикальному напрямку використовують ковшові елеватори (норії). Досліджено, до 60 % травмування зернівок відбувається під час завантаження та розвантаження ковшів норій. Особливо небезпечним для зернівок є саме етап розвантаження, який відбувається на високих швидкостях та під дією відцентрової сили та сили тяжіння. Але, з огляду на те, що транспортування норіями є одним з найбільш поширених, ефективних і економічно обґрунтованих способів, то виникає задача із розробки технічних засобів із суттєвого зниження травмування зерна на цьому етапі.

РОЗДІЛ 1. ТРАНСПОРТУВАННЯ ЗЕРНА КОВШЕВИМИ НОРІЯМИ

1.1. Ефективність заповнення ковшів при завантаженні по ходу тягового елемента

У більшості конструкцій норій, як вітчизняних, так і зарубіжних виробників живлячі лотки встановлюються з двох сторін, забезпечуючи завантаження норії, як по ходу, так і проти ходу. У літературних джерелах не вказується, з якою метою застосовується завантаження по ходу. Наводяться дані лише про те, що коефіцієнт заповнення ковшів менше, ніж при завантаженні по ходу, а отже і продуктивність норії при такому завантаженні буде менше. Рекомендується також встановлювати живильний лоток нижче горизонтальної осі направляючого барабана, хоча конкретних значень висоти установки не наводиться [6, 7].

Можна припустити, що заповнення ковшів по ходу пов'язано з необхідністю зменшення пошкоджень зерна, що має знижену міцність внаслідок різних причин.

Аналіз процесу зачерпування при завантаженні проти ходу і по ходу, показує, що динамічний вплив на зерно в другому випадку менше. Це обумовлено збігом напрямки руху вниз зернового потоку і ковшів, в той час як при завантаженні і відтворенню насипу проти ходу має місце зустрічний ударну дію.

Для виявлення причин травмування зерна розглянемо результати дослідження міцних властивостей зернових матеріалів, наведених в роботі [8] в якості основного об'єкта був обраний один з найбільш схильних до різних механічних операцій матеріал – пшениця. Як відомо, розрізняють три види пшениці: тверду, м'яку зі склоподібним ендоспермом і м'яку з борошністим ендоспермом. Було встановлено, що міцність і здатність до руйнування залежить від поєднання вологості і скловидності зерна. При одній і тій же

скловидності зі збільшенням вологості зерно володіє меншим модулем пружності, тобто меншою жорсткістю. У сухого зерна оболонка має великий модулем пружності, ніж у ендосперму. Внаслідок цього в тендітній оболонці навіть при малих пружних деформаціях з'являються мікро тріщини, через які можуть проникати мікроорганізми і цвіль. При цьому збільшується поверхня зерна, знижує його міцність при повторних ударах в інших елементах норії.

Встановлено, що при вологості пшениці в межах 12,5-12,8% і нижче, зерно в цілому, особливо його скловидні сорти, з їх більш сухою оболонкою, являє собою досить крихке тіло, яке при динамічних навантаженнях руйнується при малій витраті енергії. При вологості 17-18% зерно являє собою пружно-пластичне тіло, в результаті чого робота руйнування зростає, а знову утворена поверхня за рахунок залишкової деформації зменшується, збільшуючи міцність зерна. Руйнування вологих зерен відбувається після великої залишкової деформації, тобто після внесення суттєвих змін до форми. Значення енергії руйнування і величини залишкових деформацій наведені в роботах [9, 10, 11], дозволяють визначити критичну швидкість до удару. Внаслідок малої жорсткості вологого зерна удар буде не пружним.

Все вищесказане дає можливість визначитися з вибором виду завантаження. Перш за все, необхідно встановити для якої подальшої технологічної операції здійснюється подача зернового матеріалу норією. Якщо транспортування здійснюється в млини для подрібнення, то завантаження сухого зерна можна виробляти проти ходу. Якщо зерно з тріщинами на оболонці, що характерно при порушенні режимів сушки, то краще завантаження вести по ходу, щоб не зменшувати якість зерна.

Особливу увагу необхідно приділяти контролю вологості. Всі зернові матеріали з вологістю менше 12,5% необхідно завантажувати в ковші по ходу. Пшениця з оптимальною вологістю 14,5% і вище може завантажуватися проти ходу. Зерно кукурудзи має більш пружну і крихку оболонку і м'який ендосперм, тому її схильність до травмування дуже велика. Навіть при

оптимальній вологості кукурудзи 14% завантаження необхідно проводити по ходу. Крім того робота норії повинна відбуватися при швидкостях 0,7-1,2 м/с для сухого зерна ($W < 12\%$) та 1,2-2 м/с та для з вологістю 14% та вище. З метою зменшення пошкоджень висота підйому норії не повинна перевищувати 30 м, для зменшення травмування при падінні вниз осипи і заповнення силосів для зберігання.

Найбільш складний вибір способу завантаження при транспортуванні зерна для зберігання. З досвіду експлуатації при вологості менше 14% можливо тривале і безпечне зберігання до 1 року, більше року – до 9% і нижче. Наведемо оптимальні показники вологості для деяких зернових культур: зернові 14-14,5%, соя – до 12,5%, соняшник – до 8%, арахіс – до 9%, інші масляні – до 12,5% (за даними інтернету). Що стосується зернових з малим опір зрушенню (коефіцієнтом внутрішнього тертя), це пшоно, горох, жито при вологості до 14%, то їх необхідно для зберігання завантажувати в ковші по ходу.

Всі продукти переробки зернових: комбікорми, соняшникове лушпиння, а також інші відходи після обвалення, мінеральні добрива та інше подібне раціональне раціонально завантажувати проти ходу.

Для визначення коефіцієнта заповнення необхідно враховувати специфічні особливості процесу такого типу завантаження. Швидкість руху ковша буде набагато більше швидкості осипання насипу, утвореною надходженням з лотка. Захоплюючи частину потоку і занурюючись в насип, ківш швидко заповнюється до повного обсягу, а в нижній частині зустрічається з об'ємом матеріалу, витісненого з попередніх ковшів під дією відцентрових сил при підйомі вгору по дузі барабана, як це було показано в розділі 1.2. При цьому обсяг витісненого шару внаслідок опору буде менше, ніж витіснений об'єм при зачерпуванні з насипу, з протилежного боку, що утворюється подачею матеріалу проти ходу.

Визначити обсяг витісняється шару і залишковий обсяг в ковші при

зачерпуванні походу надзвичайно складно. В цьому випадку можна використовувати дані з роботи [12] про можливе збільшення обсягів ковшів понад стандартних на 10%, а коефіцієнт заповнення визначати за залежністю:

$$\psi_{nx} = \psi_{z3}^* \cdot \frac{1,1 \cdot V_{z2}}{V_{z3}}, \quad (1.1)$$

де ψ_{nx} – фактичний коефіцієнт заповнення по ходу;

ψ_{z3}^* – фактичний коефіцієнт заповнення ковшів з зустрічного насипу;

V_{z2} – стандартний повний обсяг ковша;

V_{z3} – об'єм по водному рівню.

По цій залежності ψ_{nx} більше, чим ψ_{z3}^* , але менше ψ_z – що визначається завантаженням проти ходу, що підтверджується практикою експлуатації.

1.2. Дослідження опору зачерпування при пуску норії

Запуск норії зазвичай проводиться після завантаження бункера і утворення насипу, при цьому відбувається заповнення ковшів, занурених в насип. Запуск норії при порожньому бункері призведе до його тривалого заповнення і до тривалої роботи норії зі зниженою продуктивністю. У цьому випадку опір визначається режимом пуску і полягає в необхідності подолання сил інерції розгінних мас, що знаходяться між ковшами, і сил опору зрушенню цих же мас. Для визначення цих сил необхідно визначити кількість ковшів n , що знаходяться на дузі черпання з центральним кутом $\phi_{зч}$, та масу транспортуємого матеріалу.

Загальний опір зачерпування в несталому режимі визначається залежністю:

$$F_{ds} = F_i + \sum_{k=1}^{n-1} F_{mk} + F_s, \quad (1.2)$$

де F_i – інерційна складова опору зачерпування;

F_m – опір зсуву на поверхні руху маси матеріалу, що знаходиться між ковшами k і $k+1$;

F_s – опір зсуву по боковим поверхням мас, що зсуваються.

Інерційна складова визначається, як:

$$F_i = m_n \cdot a_\tau,$$

де m_n – маса, що зсувається та розміщена на дузі зачерпування, що визначається кутом $\phi_{3ч}$; a_τ – прискорення мас при пуску.

У відповідності до ствердження про (круглу) циліндричну поверхню зсуву, бокова поверхня зсунутих мас визначається площею кругового сегмента с центральним кутом $\phi_{3ч}$:

$$S_{CM} = \frac{R_K^2}{2} \left(\frac{\phi_{CM} \cdot \pi}{180} - \sin \phi_{3ч} \right). \quad (1.3)$$

Зрушувана маса при пуску буде рівна:

$$m_M = [A \cdot S_{CM} - V_{Z2} \cdot (n-1)] \cdot \gamma, \quad (1.4)$$

де A – ширина ковша;

V_{Z2} – об'єм ковша по водному рівню;

γ – насипна маса матеріалу.

Тангенційне прискорення при пуску буде визначатися в режимі розгону ходової частини норії:

$$a_\tau \approx \frac{2R_K \cdot \phi_{3ч}}{t^2}.$$

Як відомо, час пуску t асинхронного двигуна визначається як [13, 14, 15]:

$$t = \frac{J_{np} \cdot \omega_{\text{эд}}}{T_{\text{ср.п}} - T_C},$$

де J_{np} – приведений момент інерції ходової частини норії:

$$J_{np} = K(J_P + J_M) + \frac{m_X \cdot D_B^2}{4 \cdot i_P^2 \cdot \eta_M} + \frac{2J_B}{i_P^2}, \quad (1.5)$$

де $K = 1,15$ – коефіцієнт, що враховує обертання частини привода;

J_P – момент інерції ротора електродвигуна;

J_M – момент інерції муфти на валу електродвигуна (якщо J_M

невідомий, то $K = 1,5$);

m_X – маса ходової гілки норії;

i_P – передатне число редуктора;

$J_B = m_{OB} \cdot R_B^2$ – момент інерції барабана;

$m_{OB} = 7,8 \cdot \pi \cdot D_B \cdot \delta \cdot B_B$ – маса барабана;

δ – товщина ободу барабана;

B_B – ширина барабана.

Середній пусковий момент електродвигуна визначається з виразу [15]:

$$T_{\text{ср.п}} = \frac{\psi_{\text{max}} + \psi_{\text{min}}}{2} \cdot T_{\text{НОМ}},$$

де $\psi_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}}}{T_{\text{НОМ}}}$ – максимальна кратність пускового моменту;

$\psi_{\text{min}} = \frac{T_{\text{min}}}{T_{\text{НОМ}}}$ – мінімальна кратність пускового моменту.

Номінальний момент електродвигуна:

$$T_{\text{НОМ}} = 974 \frac{N_{\text{эд}}}{n_{\text{эд}}},$$

де $N_{\text{эд}}$ и $n_{\text{эд}}$ – відповідно потужність та частота обертання двигуна.

Статичний момент на валу електродвигуна:

$$T_C = \frac{T_B}{i_P \cdot \eta_M},$$

де $T_B = F_t \cdot D_B$ – момент на валу барабана;

$$F_t = 1,1 \frac{Q \cdot H}{3,6 \cdot \mathcal{G}_L} \text{ – окружне зусилля, що передається барабаном;}$$

Q – продуктивність норії (т/ч);

H – висота норії; \mathcal{G}_L – швидкість стрічки.

Маса ходової частини норії складе:

$$m_X = (2q_X + q_G) \cdot H + \pi \cdot D_B \cdot q_G, \quad (1.6)$$

де q_X и q_G – відповідно розподілені маси холостої та вантажної гілок норії.

Опор зсуву по поверхні насипу частини маси матеріалу, що знаходиться між ковшами і рухається з ними, визначиться як:

$$F_M = \tau \cdot A \cdot t_K,$$

де $\tau = p \cdot \lambda$ – дотичне напруження на поверхні зсуву;

t_K – шаг ковшів;

λ – коефіцієнт зсуву;

A – ширина ковша.

Ущільнюючий тиск у кожній частині маси складе:

$$p = \frac{m_0 \cdot g}{A \cdot t_K} \sin(90 - \phi),$$

де m_0 – маса матеріалу в проміжній частині;

ϕ – кут знаходження ковша, відрахований від вертикальної осі барабана.

Маса матеріалу в проміжній частині дорівнює:

$$m_0 = \frac{1}{n-1} [S_{CM} \cdot A - V_{Z2} \cdot (n-1)].$$

Таким чином, опір зсуву маси матеріалу, що знаходиться між ковшами, складе:

$$F_M = m_0 \cdot g \cdot \lambda \cdot \sin(90 - \phi). \quad (1.7)$$

Опір руху внаслідок тертя по боковим поверхням матеріалу і поверхням ковша можна прийняти по рекомендаціям для зачерпування ковшовими навантажувальними машинами, як:

$$F_S = 0,25 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} F_C. \quad (1.8)$$

В табл. 1.1 наведено параметри зачерпування при пуску для норії продуктивністю $Q = 100$ т/ч з наступними технічними характеристиками: $g_{II} = 2,4$ м/с, кількість ковшів типу SPS280-180HP на 1 м $n = 5$, погона маса вантажу $q_{II} = 113,7$ Н, електродвигун потужністю $N_{эд} = 18,5$ кВт, частота обертання $n_{эд} = 1470$ об/хв, момент інерції ротора $J_p = 0,127$ кГ · м², кратності пускового моменту $\psi_{max} = 2,4$ и $\psi_{min} = 2,2$, передаточне число привода 24,52, діаметр барабана $D_B = 768$ мм, товщина стінки барабана $\delta = 5$ мм, матеріал – пшениця с насипною густиною 800 кг/м³.

Параметри зачерпування при пуску

t_K	a_n	m_K	F_u	m_0	Φ	T	F_C	$\sum F_C$	F_{TP}	$F_{зач} = K_{зач} \cdot q_r$	q_r	$K_{зач}$
с	м/с ²	Кг	Н	кг	Гра д	Н/м ²	Н	Н	Н	Н	Н/м	-
0,5 4	6,52 9	171, 6	4,0 5		0	464	26,98	8604	21,6	279,6	113, 7	2,416
					20	436	25,3					
					40	355, 5	20,62					
					60	232	13,45 9					

Встановлено, що коефіцієнт зачерпування при пуску складає $K_{зач} = 2,416$, а загальний опір зачерпування – $F_{дс} = 279,6$ Н (табл. 1.1).

1.3. Опір зачерпуванню при сталому режимі роботи

Для сталого режиму роботи норії розглянута наступна фізична модель утворення опору зачерпування. Згідно з нею опір зачерпування складається з: опору переміщенню призм з матеріалу, видавленого з ковшів, по поверхні каналу, прорізаного ковшами в насипу при роботі; опору сил зсуву по бокових поверхнях призм і опору при врізанні ковшів в насип. Перші два види опору є постійними, і визначається сумою опору руху ковшів, які знаходяться на дузі їх переміщення в насипу (рис. 1.1). Третій вид опору є періодичним і носить ударний характер. Періодичність удару визначається часом повного заповнення ковшів в процесі зачерпування (рис. 1.2).

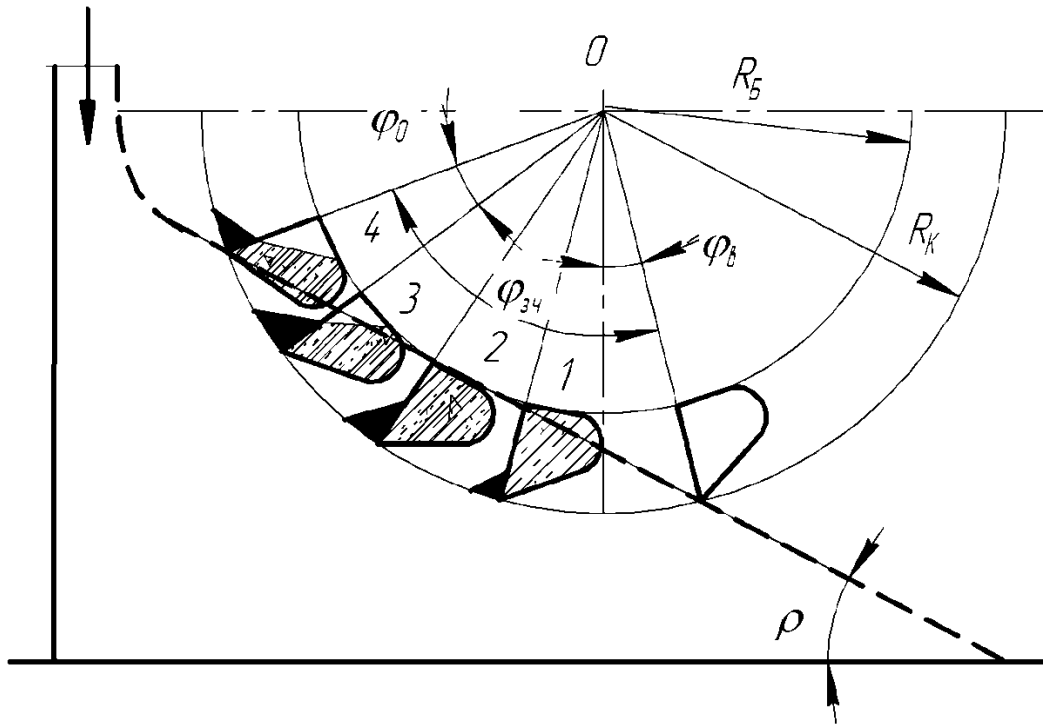


Рис. 1.1. Схема розміщення ковшів та призм на дузі черпання

Відповідно до прийнятої моделі опір зачерпуванні при сталому русі можна представити як:

$$F_{dp} = \sum_{k=1}^{n-1} F_C + F_S + F_b, \quad (1.9)$$

де F_C – опір зсуву призми перед ковшем при заданому його положенні на дузі переміщення;

n – число ковшів на дузі зачерпування;

F_S – опір зсуву по боковим поверхням;

F_b – опір зачерпування внаслідок удару по дну ковша.

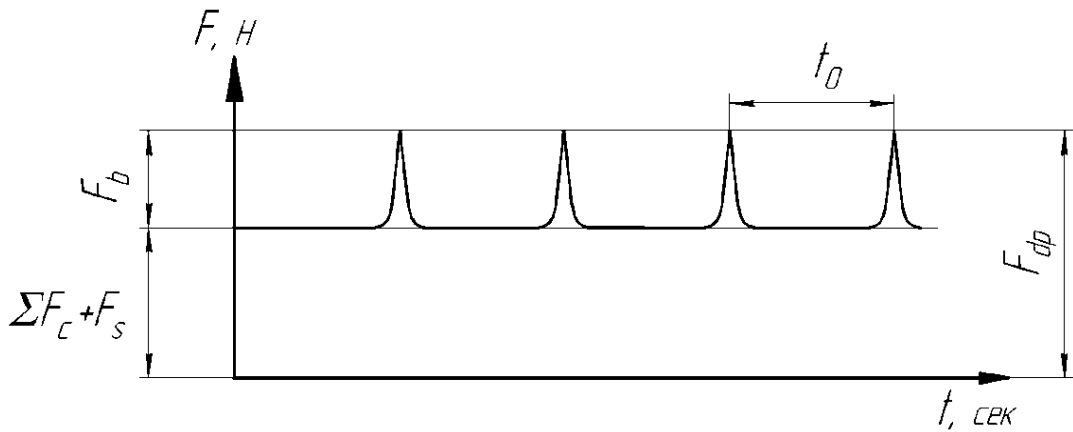


Рис. 1.2. Схема пульсацій опору зачерпуванню

На рис. 1.3 показані параметри утвореної призми витискання, що відповідає поточному куту повороту ковша на дузі зачерпування. Бокова поверхня призми уявляє собою прямокутний трикутник з одним криволінійним катетом. Висота призми в заданому положенні ковша буде визначатися висотою витісненого шару в попередньому положенні, збільшеної на висоту витісненого шару в поточному положенні. Шар буде зменшуватися, внаслідок збільшення обсягу призми і, відповідно, її поверхні. Зменшення висоти призми буде також обумовлено переходом до щільній структурі під дією стискаючих сил. У цьому випадку висоту призми в поточному положенні ковша можна визначити як:

$$h_c = \frac{1}{K_c} \cdot [h + h^* \cdot (V - V')], \quad (1.10)$$

де h – висота витісненого шару в попередньому положенні;

h^* – висота шару, витісненого шару в заданому положенні;

V – обсяг призми в заданому положенні;

V' – обсяг призми в попередньому положенні;

$K_c = \frac{1-n}{1-m}$ – коефіцієнт ущільнення;

m и n – відповідно пористість рихлої та щільної структур.

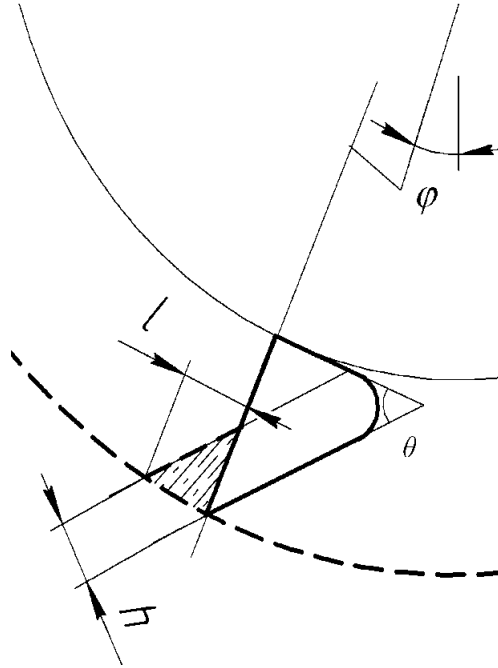


Рис. 1.3. Параметри призми витискання

При цьому маса призми складе:

$$m_p = V \cdot \gamma \cdot K_C.$$

Складова маси, що створює ущільнюючий тиск, буде рівна:

$$m_p' = m_p \cdot \sin(90 - \phi).$$

Відцентрова сила визначається як:

$$F_{Ц} = m_p \cdot R_{Ц} \cdot \omega^2. \quad (1.11)$$

Ущільнюючий тиск відповідно складе:

$$p = \frac{m_p' \cdot g + F_{Ц}}{A \cdot l}.$$

Довжину основи призми визначено як:

$$l = \frac{2V \cdot \sin(90 - \theta)}{A \cdot h_C}, \quad (1.12)$$

де θ – кут зачерпування ковша.

В результаті опір зрушенню призми дорівнюватиме:

$$F_c = \tau \cdot A \cdot l, \quad (1.13)$$

де $\tau = p \cdot \lambda$ – дотичні напруження на поверхні зсуву.

Удар ковша при зачерпуванні буде суттєво відрізнятися від удару в'язко пружного тіла о перешкоду. В роботі [16] відмічено, що ударна дія потоку дискретних часток по перешкоді залежить від форми часток та їх взаємодії в структурі потоку. В нашому випадку ударна дія ковша при зачерпуванні буде супроводжуватися переходом від рихлої структури до щільної, опір зсуву часток і збільшення щільності зачерпуваної маси.

Ударний імпульс визначаємо, як:

$$N_b = m \cdot g_L \cdot (1 + K).$$

При зачерпуванні зернової маси удар буде абсолютно не пружним ($K=0$) зі зміною маси внаслідок миттєвого ущільнення.

В цьому випадку зачерпувана маса визначиться, як:

$$m_b = V_{z2} \cdot \gamma \cdot K_c, \quad (1.14)$$

де V_{z2} – повний обсяг ковша по міжнародним стандартам.

Сила удару буде рівна:

$$F_b = \frac{m_b \cdot g_L}{t_b \cdot \lambda}, \quad (1.15)$$

де $t_b = \frac{\varphi_B^0 \cdot 3.14}{180 \cdot \omega}$ – час удару;

φ_B – кут повороту при заповненні ковша (рис. 1.1);

ω – кутова швидкість.

Параметри зачерпування при сталому режимі

Φ	h_c	m_p	T	F_c	Θ	$\sum F_c$	t_b	F_b	F_s	F_{dp}	$K_{зач}$
Град	Мм	Кг		Н	Град	Н	сек	Н	Н	Н	-
20	42,7	0,42	463,4	8,6	40	54,13	0,057	134,27	13,6	202,2	1,748
40	48,35	1,05	761,6	19,66							
60	63,73	1,487	902,6	26,13							

В табл. 1.2 наведено параметри зачерпування при сталому режимі роботи норії, з технічною характеристикою, що розглянуто вище. Визначено коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії $K_{зач} = 1,748$; опір зачерпування $F_{dp} = 202,2$ Н.

1.4. Опір зачерпування по ходу тягового органу

Процес зачерпування по ходу істотно відрізняється від процесу зачерпування при завантаженні проти ходу. При заповненні бункера по ходу в його правій половині утворюється насип з кутом укусу ρ . Після пуску норії, матеріал, що зачерпується, перекидається в ліву половину бункера, де поступово утворюється така ж насип.

При сталому русі ківш, переходячи на криволінійну ділянку руху, захопить частину потоку з завантажувального лотка. Частина потоку, що залишилася, буде надходити вниз, поповнюючи рівень насипу. В процесі подальшого руху по прорізаному та «підтримуємо» попередніми ковшами каналу ківш буде поповнюватися зрушеною вниз частиною захопленого потоку і частково із насипу, що осипається. Повне заповнення ковша відбудеться в нижній частині каналу, куди буде обсипатися частина насипу з протилежного боку. Зачерпування відбудеться без удару, так як він буде погашений подушкою матеріалу, що знаходиться в ковші. Таким чином, опір зачерпуванню буде

менше, ніж опір зачерпуванню при завантаженні проти ходу.

Розрахунок опору зсуву призм, що утворюються внаслідок видавлювання шару з ковша під дією відцентрової сили при русі вгору по каналу, необхідно вести виходячи з повного обсягу ковша V_{z2} . Для реалізації такої моделі, завантажувальний лоток необхідно встановлювати так, щоб нижня кромка днища була нижче горизонтальної осі барабана на величину:

$$\Delta \approx 1,5h / \cos \rho, \quad (1.16)$$

де h – висота потоку, що надходить з завантажувального лотка.

Порівняльний аналіз і оцінка отриманих результатів показує, що розрахункові значення коефіцієнтів зачерпування, отримані за приведеними залежностями, мають той же порядок, що і їх значення, наявні в довідковій літературі. Це свідчить про те, що представляється можливим отримувати уточнені дані для кожного конкретного сипучого матеріалу на відміну від відомих даних, що мають однакові значення для приблизно однакових матеріалів, та ще для діапазону малих швидкостей.

З наведених залежностей випливає, що збільшення коефіцієнтів зачерпування при збільшенні швидкостей руху носить нелінійний зростаючий характер. Це підтверджується результатами роботи [17], метою якої було встановити можливість застосування високих швидкостей (2,3-6,2) м/с для збільшення продуктивності норій. Було виявлено, що при швидкостях понад 5 м/с, різко зростала питома потужність приводу. Пульсуюча ударна складова опору зачерпування є основною причиною виникнення поздовжніх і поперечних коливань стрічки, процес яких досліджено у роботі [18].

РОЗДІЛ 2. ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ

2.1 Аналіз енергозберігаючих способів та обладнання для сепарації зернових сумішей

Аналіз фізико-механічних властивостей зерна і важковідокремлюваних бур'янів показує, що найбільші відмінності ознак подільності спостерігаються в їхній пружності. Досвід практичного застосування обладнання, в яких використовується ця ознака подільності, також підтверджує перспективність очищення зернового матеріалу від важковідокремлюваних бур'янистих домішок за відмінностями пружних властивостей.

Перші дослідження із сепарації насіння на похилих відбивних поверхнях були проведені наприкінці 40-х років Птіциним С.Д. [19, 20] і Поповим Н.Ф. [21]. Вихідним посиланням роботи була відмінність у пружних властивостях сухого і вологого зерна.

Вирішуючи завдання виділення більш сухих – тобто, що володіють підвищеними посівними якостями насіння, Птіцин С.Д. пропонує робити сортування свіжезбираного зерна за допомогою удару його по площині.

У ході досліджень визначалися показники сепарації зерна при ударі, для чого була використана лабораторна установка (рис. 2.1), що включає бункер 1 для засипання вихідного матеріалу з вигрібним валиком 2, похилу плиту 3, розташовану під кутом й приймальну камеру 4, розділену на відсіки для фракцій зерна різної вологості.

Основну увагу автор приділяє впливу геометричних факторів (висоти розташування бункера, розміру приймальної камери і розташування відсіків) на ефективність сепарації. Однак, експериментальне визначення відповідних залежностей для конкретних матеріалів (насіння гороху, віки, пшениці) здійснювалося без урахування взаємного впливу факторів процесу.

Н.Ф. Попов продовжив дослідження, переносячи їх у виробничі умови.

Не обмежуючись насінням сферичної форми (горох), він досліджував можливість практичного застосування сепарації ударом для вирівнювання по вологості насіннєвого матеріалу пшениці, жита і ін. культур. Отримані ним дані свідчили про господарську цінність запропонованого способу підготовки насіннєвого матеріалу.

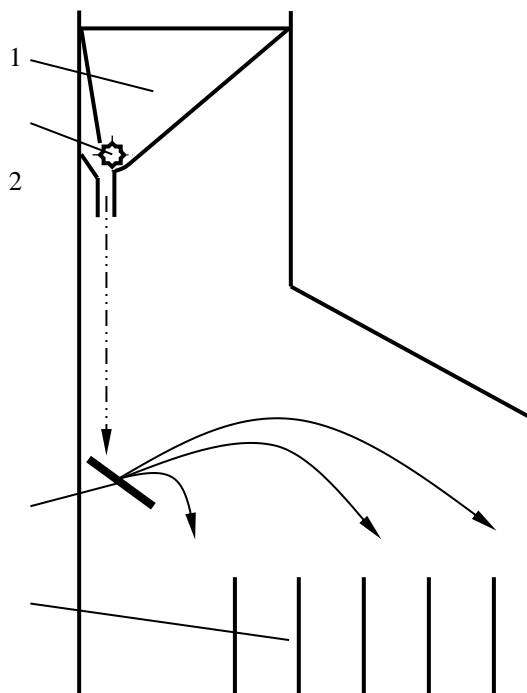


Рис. 2.1. Схема обладнання для сортування зерна ударом: 1 – бункер; 2 – вигрібний валік; 3 – похила плита; 4 – приймальні камери

В 50-х – 60-х роках розробка обладнання для сепарації методом удару була продовжена Бобровим С.Ф. [22], Рябовим П.І. [23], Висоцьким В.К. [24] і ін. Основною тенденцією досліджень залишалось використання відмінності в пружних властивостях для одержання вирівняного по вологості матеріалу.

С.Ф. Бобров, удосконалюючи конструкцію сортувальної установки, вводить до розгляду вертикальну координату кромки перегородок, що розділяє відсіки приймальної камери. Експериментальне визначення траєкторій польоту після удару, проведене ним при різних висотах скидання і кутах нахилу відбивної поверхні, дозволило йому прийти до висновків:

– на характер сепарації значний вплив здійснює кутове розсіювання в горизонтальній і вертикальній площинах, яке зростає з ростом відхилення форми насіння від сферичної;

– оскільки згідно із загальною теорією удару, траєкторії руху часток, відбитих зі швидкостями, однаковими по модулю, але різними за напрямком, зі збільшенням часу польоту зближаються, відсіки приймача слід розташовувати нижче місця удару. Причому по мірі віддалення від місця удару, перегородки слід знижувати уступами (рис. 2.2).

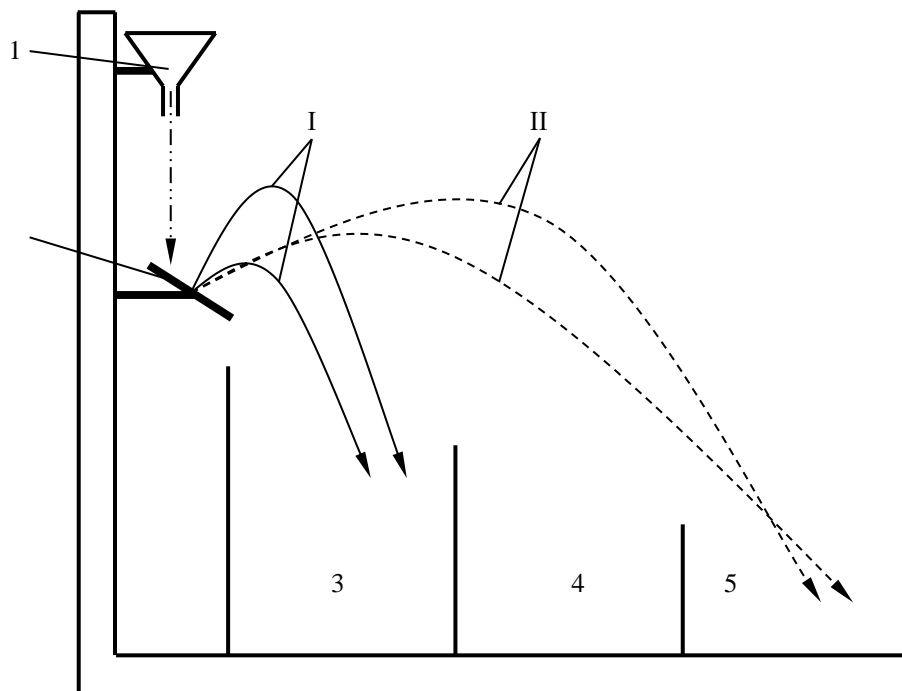


Рис. 2.2. Схема установки для сепарації зерна за пружними властивостями із прийомною камерою, що знижується:

1 – бункер; 2 – похила плита; 3, 4, 5 – відсіки приймача I – траєкторії при $v_1 = 1$ м/с; II – при $v_2 = 2$ м/с

Подальше вивчення впливу технологічних і конструктивних параметрів установки з похилою відбивною поверхнею проводилося П.І. Рябовим. Порівнюючи криві розподілу довжини горизонтального польоту насіння при

установці прийомної камери на рівні відбивної поверхні і нижче її на 300 мм, автор показав, що зі зниженням класифікатора розподіл зміщується від місця удару, причому поділ насінневої суміші поліпшується. Іншим важливим висновком роботи є висновок про зниження коефіцієнта відновлення K у міру зростання висоти падіння насіння. П.І. Рябов також робить, на основі експерименту, висновок, що варіаційні ряди розподілу K практично не мають змін від того, чи кидалися зерна поодинці або безперервним потоком, чи перебувало насіння даної культури в суміші з іншим насінням або без сторонніх домішок. Одним з цікавих напрямків збільшення ефективності поділу компонентів – створення спеціальних умов для орієнтації несферичних насін у момент удару. С.А. Шукюров [25] пропонує використовувати у відбивному сепараторі напрямну увігнуту площину, по якій насіння скочують від живильного валика до точки удару об відбивну поверхню (рис. 2.3).

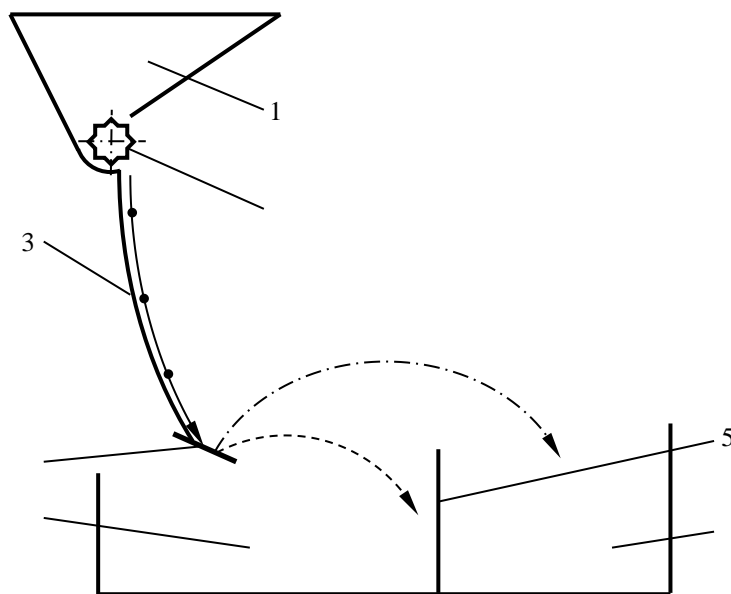


Рис. 2.3. Схема відбивного сепаратора з напрямною поверхнею:
 1 – бункер; 2 – живильник; 3 – напрямна поверхня; 4 – відбивна поверхня;
 5 – ділільник, 6, 7 – відсіки приймача

Зміст її введення – забезпечити торкання в момент удару еліпсоїдного насіння такою його точкою, яка дає на всьому протязі контакту переміщення з ковзанням, що приводить до збільшення часу контакту й найбільшому падінню швидкості до моменту відриву. Тоді різниця в дальності польоту сферичного і еліпсоїдного насіння стає максимальною. За даними автора, при виділенні з насіннєвого матеріалу сої недорозвиненого та морозобійного насіння використання прямої поверхні дозволяє збільшити подачу в кілька разів при збереженні ефективності сепарації.

Зрозуміло, що з економічних міркувань, особливої уваги та вивчення потребують способи та процеси сепарації в яких на самий процес сепарації енергія не витрачається.

Найбільш простим за конструкцією і не потребуючим енерговитрат на процес сепарації (за винятком підйому насіння на певну висоту) є ударний сепаратор – виконаний як похила площина, об яку вдаряються насіння при падінні і відскакують, при цьому залежно від пружності на певну величину.

Основним недоліком такого пристрою є те, що частки суміші розділяються, випробувавши однократний удар об похилу площину. При однократному ударі часток не кулястої форми (усе насіння є такими) об похилу площину, траєкторії польоту насіння після удару будуть багато в чому залежати від положень частки щодо площини в момент удару, і із цієї причини насіння з різними пружними властивостями можуть попадати в той самий приймач, тобто якість поділу суміші при однократному ударі буде недостатньою. Якщо ж частка буде декілька разів стикатись із площиною, то за рахунок осереднення по поверхні частки точок контакту із площиною при ударах на результат сепарації вплине середнє значення коефіцієнта відновлення швидкості.

Якість сепарації на відбивній площині можна підвищити за рахунок декількох щаблів сепарації. Цей принцип реалізовано в сепараторі представленому на рис. 2.4, що має три ступеня сепарації.

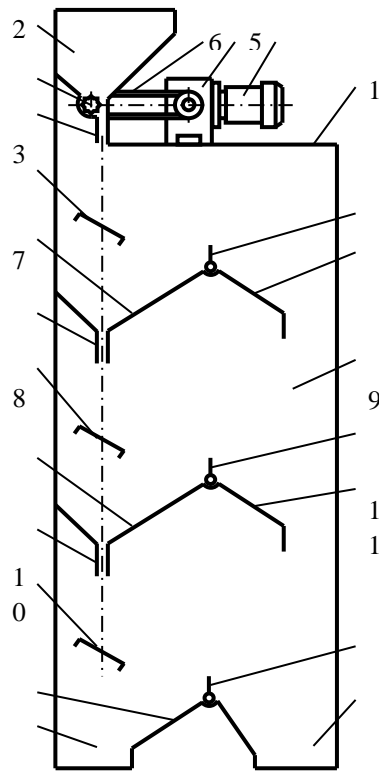


Рис. 2.4. Схема триступінчастого відбивного сепаратора: 1 – корпус; 2 – бункер; 3 – живильник; 4 – електродвигун; 5 – редуктор; 6 – пасова передача; 7 – щілинний отвір; 8 – відбивні поверхні; 9 – регульовані ділільники; 10, 11, 14 – скатні поверхні; 12 – живильні щілини; 13, 15, 16 – вивантажувальні вікна

Сепаратор складається з корпусу 1 рамного типу, бункера 2, встановленого на корпусі, активного живильника 3 з робочим органом – рифленим валиком, електродвигуна 4, редуктора, 5 і пасової передачі 6. Щілинний отвір 7 живильника встановлено над відбивною поверхнею 8 першого щабля сепарації. Каскад, робочих органів, розміщених усередині корпусу, включає три щаблі сепарації. Кожна із щаблів включає похилу відбивну поверхню 8, регульований ділільник 9, виконаний у вигляді пластини, закріпленої нижньою частиною на осі; і дві скатні поверхні 10 і 11, причому скатна поверхня 10, розташована між відбивною поверхнею та ділільником, і утворює живильну щілину 12 для нижче розташованого щабля,

а поверхня 11 закінчується вивантажувальним вікном 13. Скатна поверхня 14 нижнього щабля, що примикає до ділника з боку відбивної поверхні також закінчується вивантажувальним вікном 15. Вивантажувальне вікно 16 для очищеної фракції розміщено під вікном 13 верхніх щаблів.

Процес очищення зернової суміші відбувається в такій послідовності:

Вихідний матеріал засипається в бункер 2, відтіля він за допомогою рифленого валика живильника 3 подається в робочу зону сепаратора. Живильник формує вузький плоский потік часток, що падають під дією сили ваги на похилу відбивну поверхню 8 верхнього щабля, після удару об відбивну поверхню, насіння змінюють швидкість і напрямок польоту. Повноцінні насіння ріпаку, що мають високу пружність, здобувають більш високу швидкість і перелітають через пластину ділільника 9. Ділільник відрегульований таким чином, щоб непружні насіння бур'янистих рослин не могли перелітати його верхню крайку. При цьому частина зернової суміші такі не перелітає через крайку ділільника.

Зернова суміш, яка перелетіла через ділільник, попадає на скатну поверхню 11, по якій надходять у вивантажувальне вікно 13, а потім до вікна 16 виводу очищеної фракції. Насінневий матеріал, що не перелетів через крайку ділільника по скатній поверхні 10 надходить до щілинного отвору 12 і через нього падає на відбивну поверхню нижчерозташованого щабля.

На другому й третьому щаблі процес поділу повторюється. Очищені зерна надходять у вивантажувальне вікно 16, а непружна фракція – у вивантажувальне вікно 15.

Якість очищеного матеріалу й відсоток виходу очищеної фракції регулюється поворотом ділільника за допомогою рукояток, виведених на зовнішню бічну поверхню корпусу і шкалою настроювання. Величина подачі регулюється зміною числа обертів рифленого валика.

За рахунок трьохкратного удару якість сепарації підвищується на 12...18 % в залежності від засміченості суміші.

2.2. Розробка та експериментальні дослідження ударних сепараторів

Для поділу зернових сумішей за пружними властивостями промисловістю випускається лише одна машина, так звана паддімашина. Хорольський машинобудівний завод виготовив кілька таких сепараторів. Широкого поширення, однак, ці машини не набули через складність конструкції, недостатньо високої питомої продуктивності, великої метало- та енергоємності та низки інших причин. Спроби розробити пристрої, крім падді-машин, що розділяють зернові суміші за пружними властивостями, винахідниками робилися та представлені у роботах [26, 27, 28]. Однак пристрій, описаний у [26], не знайшов застосування через невисоку якість сепарації, а сепаратори, описані в [27, 28], не знайшли поширення через складність конструкції.

Найбільш простим за конструкцією і не вимагають енерговитрат (за винятком підйому насіння на певну висоту) є ударний сепаратор – похила площина, яку ударяються насіння при падінні і відскакують, при цьому залежно від пружності на певну величину.

Основним недоліком такого пристрою є те, що частинки суміші поділяються, зазнавши одноразового удару похилу площину. При одноразовому ударі частинок не кулястої форми (все насіння є такими) про похилу площину, траєкторії польоту насіння після удару багато в чому залежатимуть від положень частинки щодо площини в момент удару, і з цієї причини насіння з різними пружними властивостями може потрапляти в один і той ж приймач, тобто якість поділу суміші при одноразовому ударі буде недостатньою. Якщо ж частка буде кілька разів стикатися з площиною, то за рахунок опосередкування поверхні частинки точок контакту з площиною при ударах, на результат сепарації вплине середнє значення коефіцієнта відновлення швидкості, що істотно підвищить якість.

Сепарація сипких сумішей за пружністю на гравітаційних відбивних

поверхнях має в порівнянні з іншими способами сепарації на похилих поверхнях, вібросепарація на фрикційних площинах, або поділ у гвинтовому каналі ряд переваг:

- ударна взаємодія насіння із поверхнею проводиться при їхніх рівних швидкостях і при однакових кутах між векторами швидкості і нормаллю до поверхні, що забезпечує рівні умови для всього насіння суміші;
- область зустрічних і пересічних потоків насіння мінімальна, що знижує ймовірність порушення процесу через взаємні зіткнення насіння;
- вільний рух насіння до і після удару дозволяє проводити сепарацію тільки за пружними властивостями, крім фрикційного впливу поверхні, що має істотне значення при очищенні високопружного насіння, що мають близькі фрикційні властивості з деякими видами насіння бур'янистих рослин;
- обладнання для здійснення способу мають просту конструкцію стійкий режим роботи й легко піддаються регулюванню.

Процес сепарації на відбивній поверхні можна умовно розділити на три стадії:

- набуття насінням початкової швидкості до моменту удару;
- косий удар насіння по відбивній поверхні, у результаті якого відбувається зміна швидкості і напрямку їх руху;
- вільний рух насіння до моменту їх поділу на фракції по дальності польоту.

Найбільше поширення набула схема сепарації насіння за пружними властивостями (рис. 2.5), у якій швидкість насіння до моменту удару досягається за рахунок падіння їх певної висоти H під дією сили ваги. Відбивна поверхня 1 встановлюються під кутом α до обр'їю. Цей кут виходячи з максимальної дальності польоту визначено в $22^\circ 30'$ [29]. Тоді кут між напрямком руху насіння до удару й нормаллю до поверхні також дорівнює α . Після удару насіння рухається, без урахування опору повітря, по параболічних траєкторіях. Більш пружне насіння має і більш протяжну траєкторію руху. Відмінності в пружних

властивостях насіння проявляються у відмінностях дальності їх польоту L_1 . Чим більше різниця в дальності польоту ΔL_1-L_2 пружного (L_1) і менш пружного (L_2) компонентів, тим вище ефективність їх сепарації. Отже завдання підвищення ефективності очищення насіння за пружними властивостями зводиться до визначення умов, при яких різниця в дальності польоту насіння та засмічувачів максимальна.

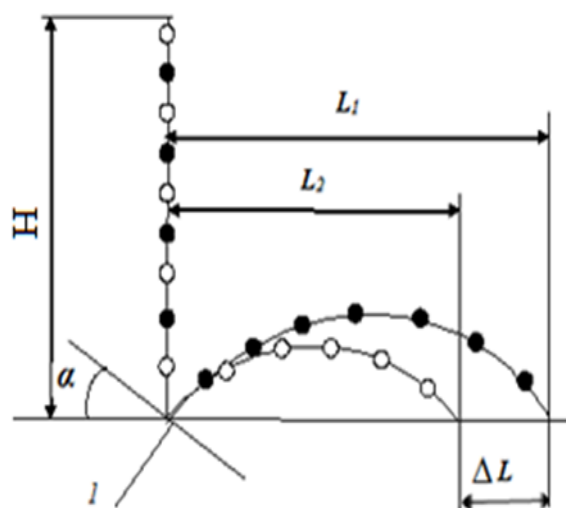


Рис. 2.5. Схема визначення дальності польоту насіння після удару об похилу сталю відбивну поверхню
 1 – відбивна поверхня; ●○→ – насіннева суміш; ●→ більш пружний компонент; ○→ менш пружний компонент

Для експериментальних досліджень були обрані насіння найбільш поширених в Україні культур: пшениця, ячмінь, кукурудза, соняшник, горох, соя, та просо. Якості ударної поверхні обрані сталь та фанера технічна. Висота скидання H обрана 0,3м. Такою вона установлена з технологічних та конструктивних міркувань, а також з ручного обслуговування в блочно-модульному ударному сепараторі.

Аналіз варіаційних кривих (рис. 2.6 – 2.9) дальності польоту після удару цих культур свідчить про доволі значний розбіг цього показника як на фанері технічній так і на сталі, найбільший він для гороху, при чому зі зміщенням в сторону більших величин на фанері технічній для всіх культур без винятку.

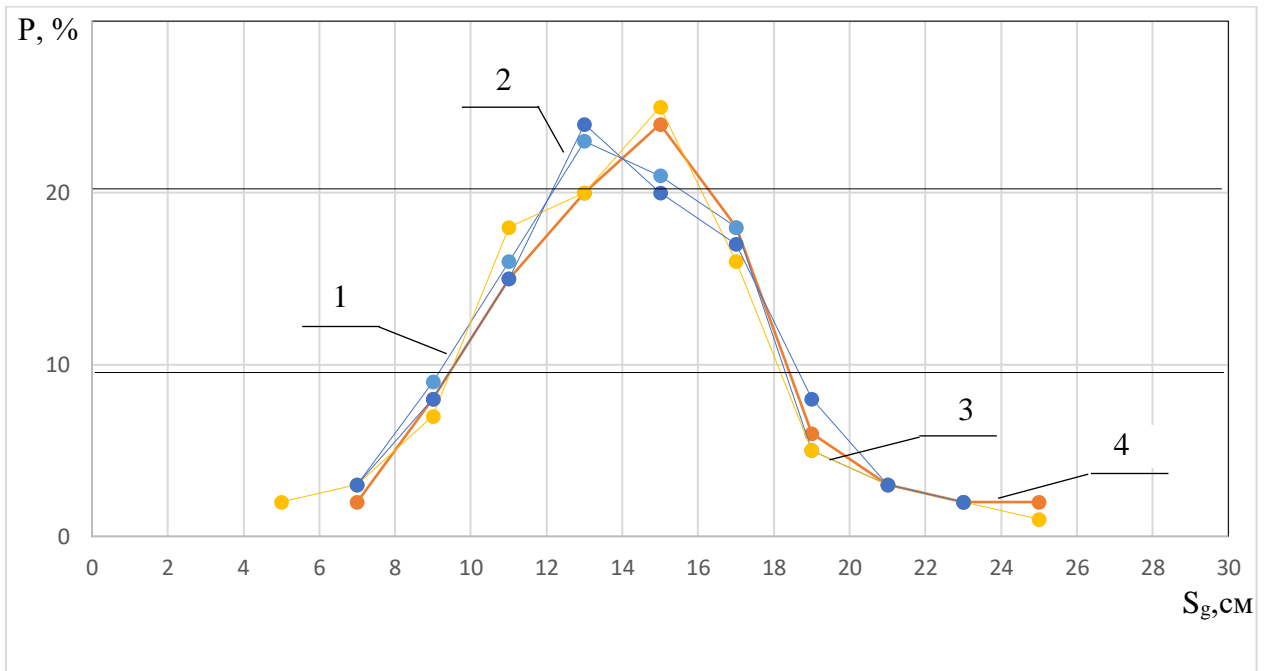


Рис. 2.6. Графіки дальності польоту насіння продовгуватої форми після удару по технічній фанері:

1 – ячмінь; 2 – соняшник; 3 – кукурудза; 4 – пшениця

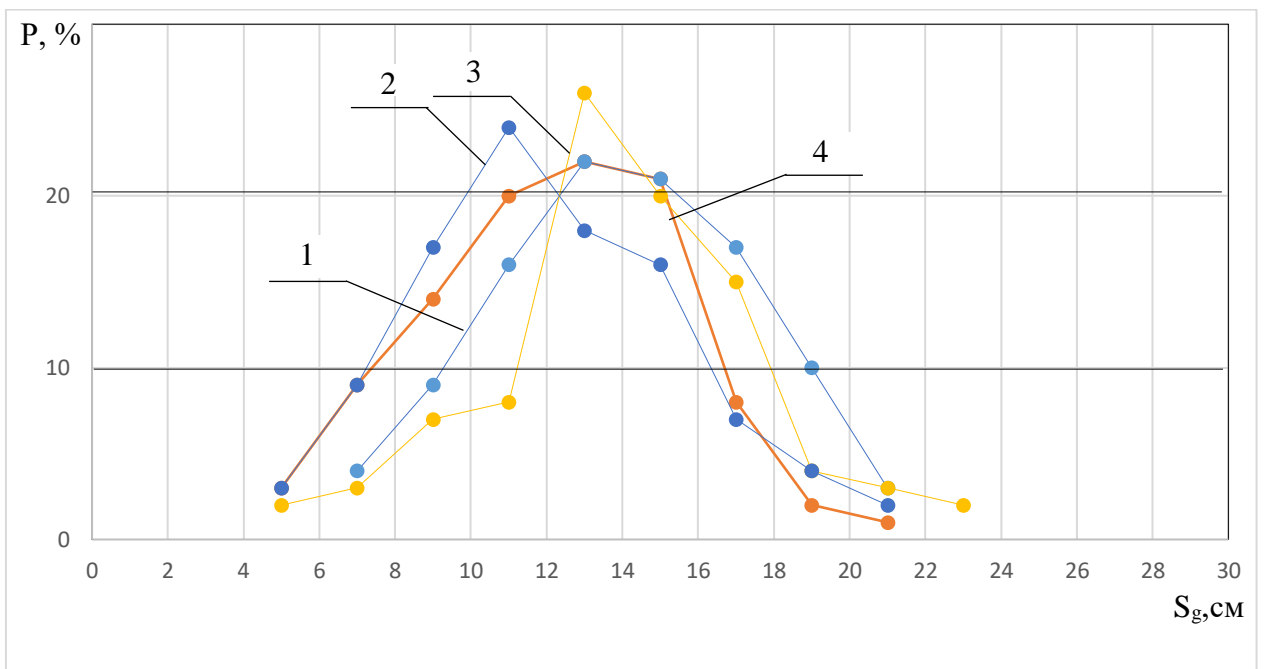


Рис. 2.7. Графіки дальності польоту насіння продовгуватої форми після удару по сталі: 1 – ячмінь; 2 – соняшник; 3 – кукурудза; 4 – пшениця

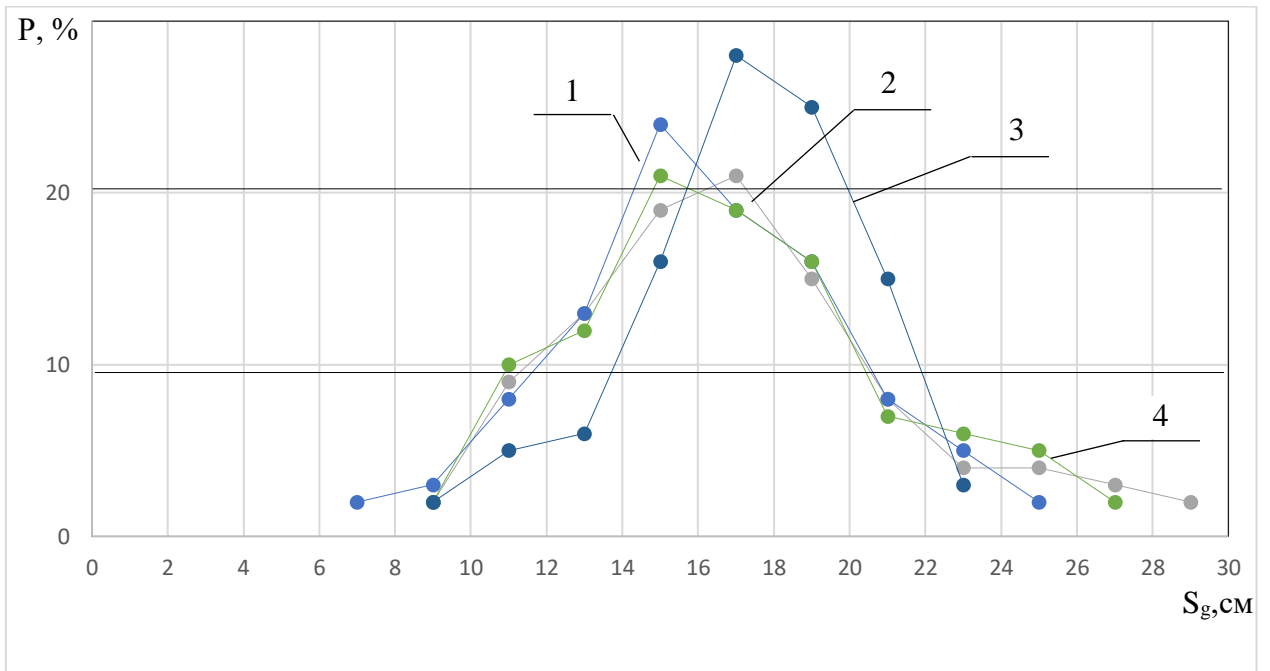


Рис. 2.8. Графіки дальності польоту насіння округлої форми після удару по технічній фанері: 1 – соя; 2 – горох; 3 – просо; 4 – ріпак

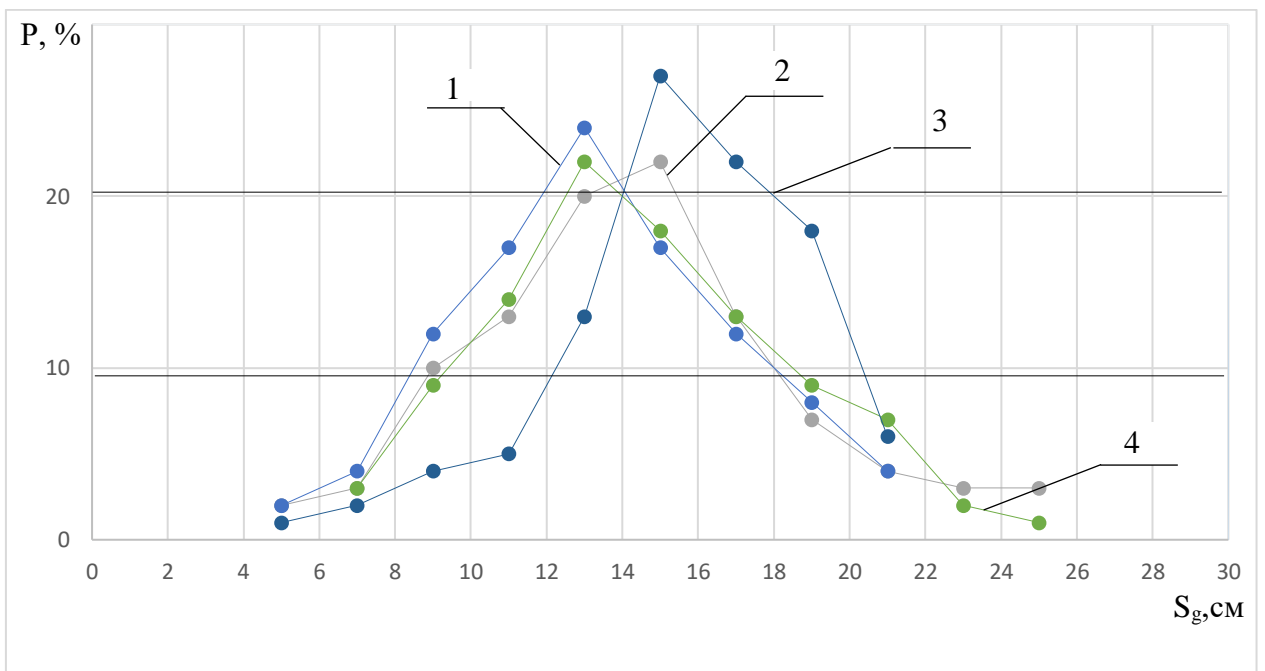


Рис. 2.9. Графіки дальності польоту насіння круглої форми після удару по сталі:

1 – соя; 2 – горох; 3 – просо; 4 – ріпак

Найменша дальність польоту після удару у ячменя по сталі. А взагалі вирисовується тенденція, що більш округлі насіння мають більшу величину польоту насіння після удару у гороха наприклад до 30см і для округлого насіння вона є більш сталою. Дальність польоту для всіх культур є більшою на фанері технічній за рахунок пружних властивостей самої поверхні. Кількість відскоків на фанері, як правило, - 3,4 на сталі- 2,3 відскоки. Ці результати дозволяють зробити висновок про необхідність використання багатократних ударів під час сортування насіння. З цих міркувань, а також з метою спрощення конструкції фанеру технічну можна рекомендувати в якості робочої поверхні багатоярусного ударного сепаратора, що реалізовано в блочно модульному гравітаційному ударному сепараторі.

Використовуючи залежність дальності польоту зерна, після першого удару і загальної кількості не більше чотирьох ударів можна рекомендувати поперечний і поздовжній розміри поверхонь, що сепарують (поперечний – 0,2 м, поздовжній – 1,5 м).

Конструктивна схема багатоярусного ударного сепаратора представлена на рис. 2.10.

Багатоярусний ударний сепаратор складається з живильного бункера 1, похилих з поз довжньо-поперечним нахилом неперфорованих 2 і приймачів продуктів поділу 3.

У цьому сепараторі зернова суміш з живильного бункера послідовно надходить на каскад дек, що відбивають. Деки мають поперечний і поздовжній нахили по відношенню до горизонту, і розташовані так, що зернова суміш, зазнавши удару об одну, стикається з розташованою поруч. Чим вище пружність зерна, тим більше ударів воно відчуває у проміжку між рядом розташованими деками, отже, і більшу відстань вздовж поздовжньої осі переміститься від місця подачі. Зійшовши з верхніх дек, зерно під впливом сили тяжіння знову набирає необхідну швидкість і вдаряється об деку, розташовану нижче, але зі зміщенням від місця подачі на відстань, пропорційне, зрештою, пружності зерна. Далі

процес повторюється у другому ярусі, а потім і в усіх інших, нижчерозташованих парах дек (ярусах).

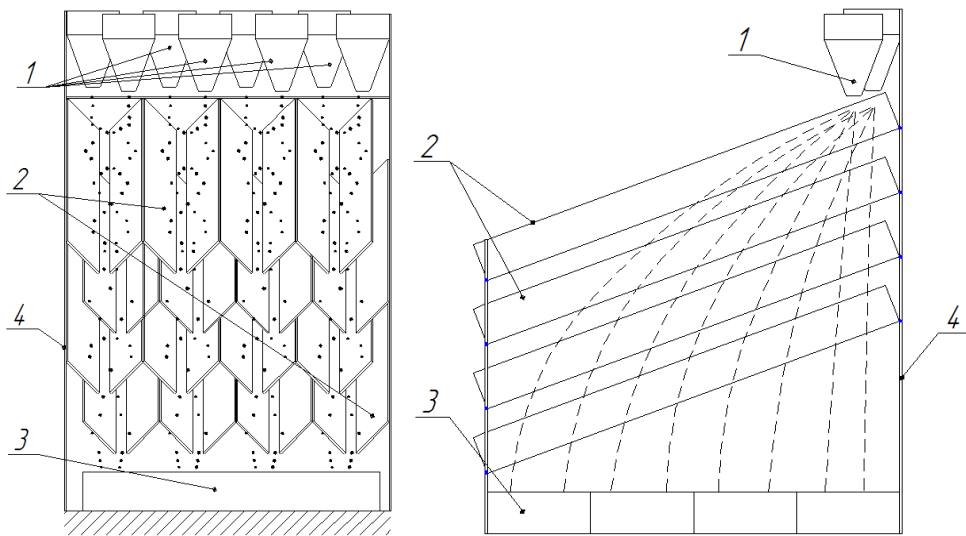


Рис. 2.10. Принципіальна схема гравітаційного багатоярусного ударного сепаратора:

1 – бункер; 2 – ударні сепаруючі поверхні; 3 – приймачі продуктів сепарації; 4 – корпус сепаратора

У нижній частині пристрою розташовані приймальні ємності, і найбільш пружні зерна, зрештою, потраплять у найдавший від пристрою живлення приймач. Відповідно подрібнені, щуплі і найменш пружні будуть у ближніх від живильника приймачах. Загальний вигляд багатоярусного ударного сепаратора представлено на рис. 2.11.

Як об'єкти дослідження використовувалися: пшениця, ячмінь, кукурудза, горох, просо, ріпак, соняшник та соя. Експериментальні дослідження проведено у науково-дослідній лабораторії кафедри "Обладнання та переробних і харчових виробництв". Попередньо насіння кожної культури було очищене на пневмо - решітних очисних машинах. Очищене зерно та насіння від мінеральних домішок пройшли обробку на гравітаційному ударному сепараторі та були розділені на 5 фракцій. Після сепарації кожної культури було відібрано зразки у трьох повтореннях з кожного лотка та

зважено на лабораторних вагах. Результати вимірювань середнього значення маси зерна з кожного лотка наведено у таблиці 2.1.



Рис. 2.11. Загальний вигляд модуля багатоярусного ударного сепаратора

Таблиця 2.1

№ п/ п	Найменуван ня культури	Номер приймального лотка				
		№1	№2	№3	№4	№5
		Середня маса 1000 зерен				
1	Пшениця	42,3	43,4	45,5	47,2	48,8
2	Ячмінь	45,55	45,83	46,22	46,90	47,34
3	Горох	485,85	486,23	487,02	490,52	492,41
4	Просо	0,74	0,74	0,75	0,76	0,76
5	Ріпак	3,91	3,93	4,0	4,24	4,37
6	Соняшник	110,21	112,56	115,27	118,12	119,60
7	Соя	160,23	168,45	174,2	175,45	180,21
8	Кукурудза	284,35	286,85	291,02	298,37	301,86

Як видно з таблиці, значення середньої маси відібраних зерен кожної культури зростає від першого лотка до п'ятого. Значить, можна припустити, що вміст 3, 4, 5 лотків містять зерна найбільш підходящі для сівби.

Для визначення параметрів процесу сепарування зерна на гравітаційному ударному сепараторі було проведено виборчі досліді щодо сепарації насіння визначених культур.

На рис 2.12, та рис 2.13 приведені залежності розміру маси насіння в лотках сепаратора для круглої та подовженої форми при поперечному куті 35° для обох випадків та поздовжньому куті 4° для насіння круглої форми та 7° для насіння подовженої форми. Поперечний кут для попередніх дослідів обрано постійним 35° з точки зору скочування домішок з робочої поверхні. Подача теж прийнята постійною - 50 кг/год.

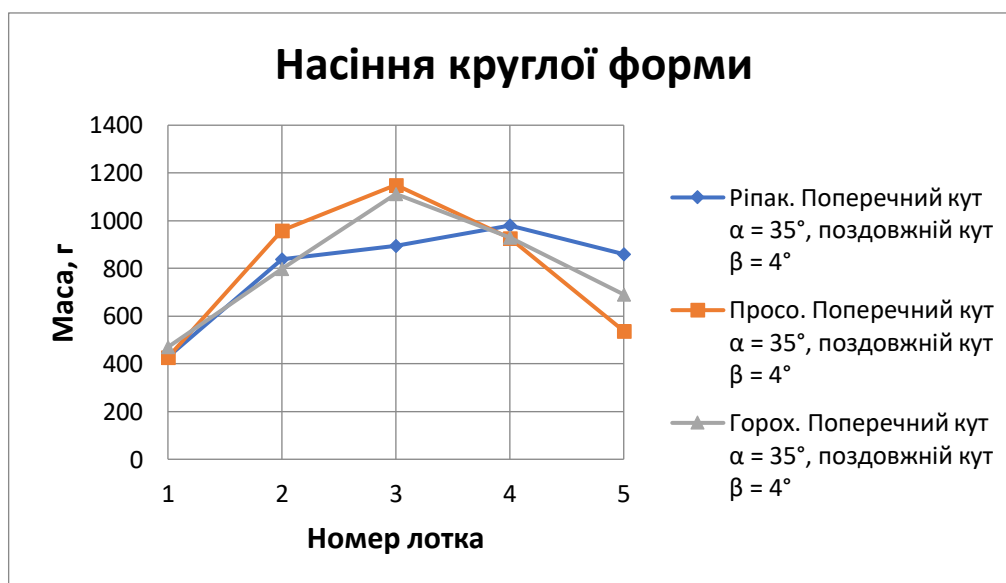


Рис.2.12. Залежність розподілу маси насіння круглої форми в лотках сепаратора.

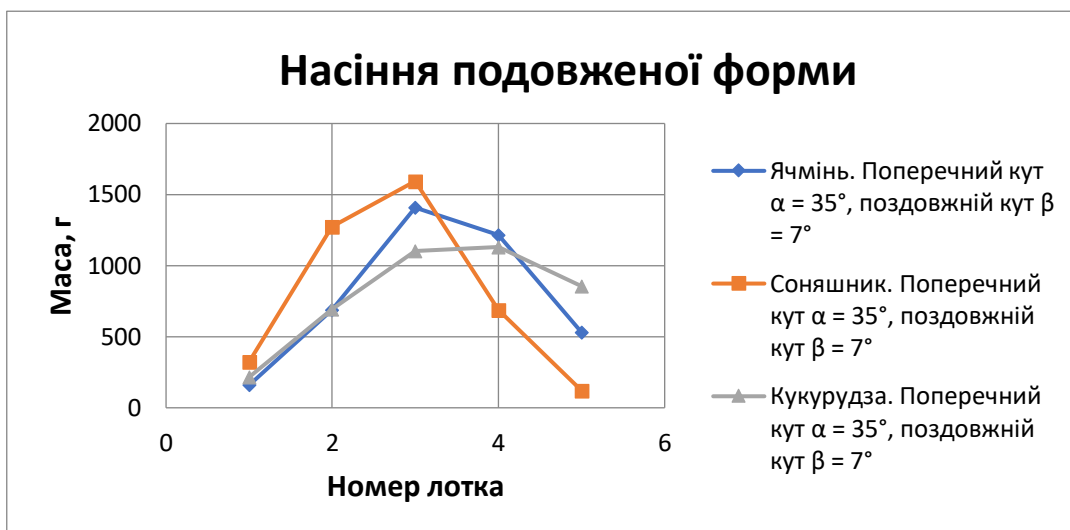


Рис. 2.13. Залежність розподілу маси насіння подовжній форми в лотках сепаратора.

Як видно з рисунків 2.12 та 2.13 розподіл насіння круглої форми носить більш пологий характер і в 4 та 5 лотки поступає більше пружного насіння. Графіки розподілу насіння подовженої форми мають більш виражений екстремум з найбільшою масою для всіх видів у третьому лотку, окрім кукурудзи - в четвертому лотку.

Тобто оскільки середня маса 1000 зерен найбільш зростає в 4 та 5 лотках можна вважати, що кращих результатів сортування насіння на багатоярусному ударному сепараторі слід очікувати для насіння круглих форм.

Для насіння круглої форми максимальне значення маси в лотку №3 досягається при подовжніх кутах менших ніж для насіння подовжній форми.

Пошук оптимальних значень подовжнього кута проведено для насіння пшениці.

Серія однофакторних експериментів дозволила визначити параметри оптимізації факторів, що досліджуються. Для визначення значень факторів були проведені однофакторні експерименти, результати яких наведено на рис. 2.14 - 2.17

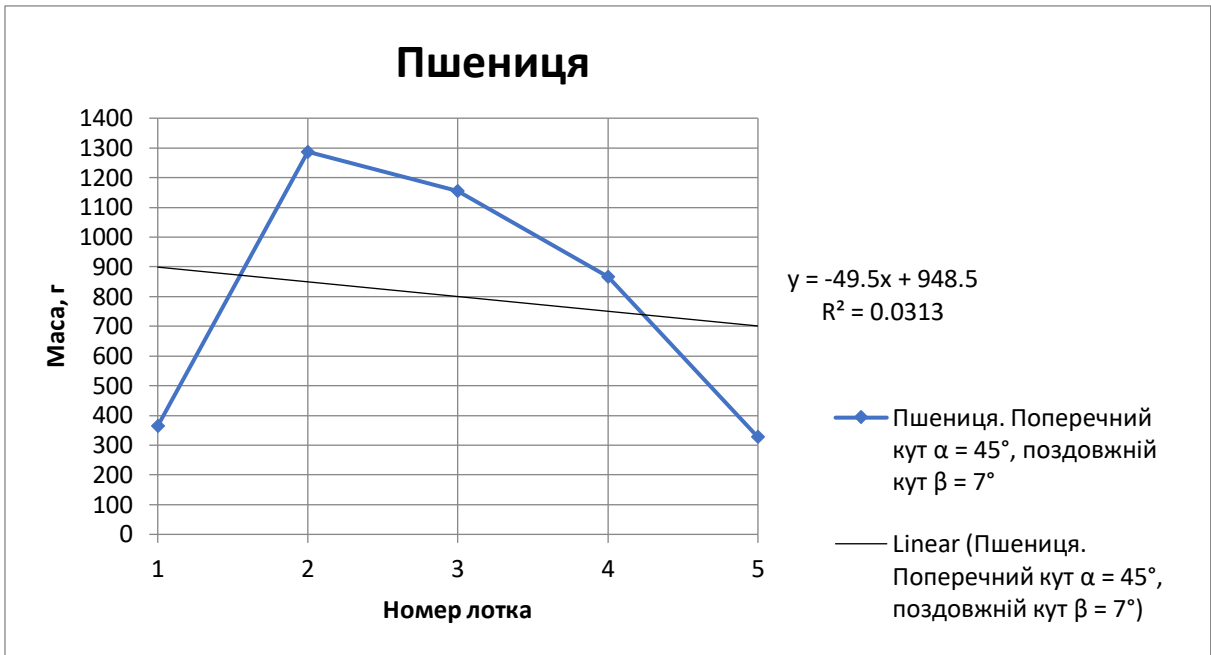


Рис. 2.14. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=45^\circ$, поздовжній кут $\beta=7^\circ$

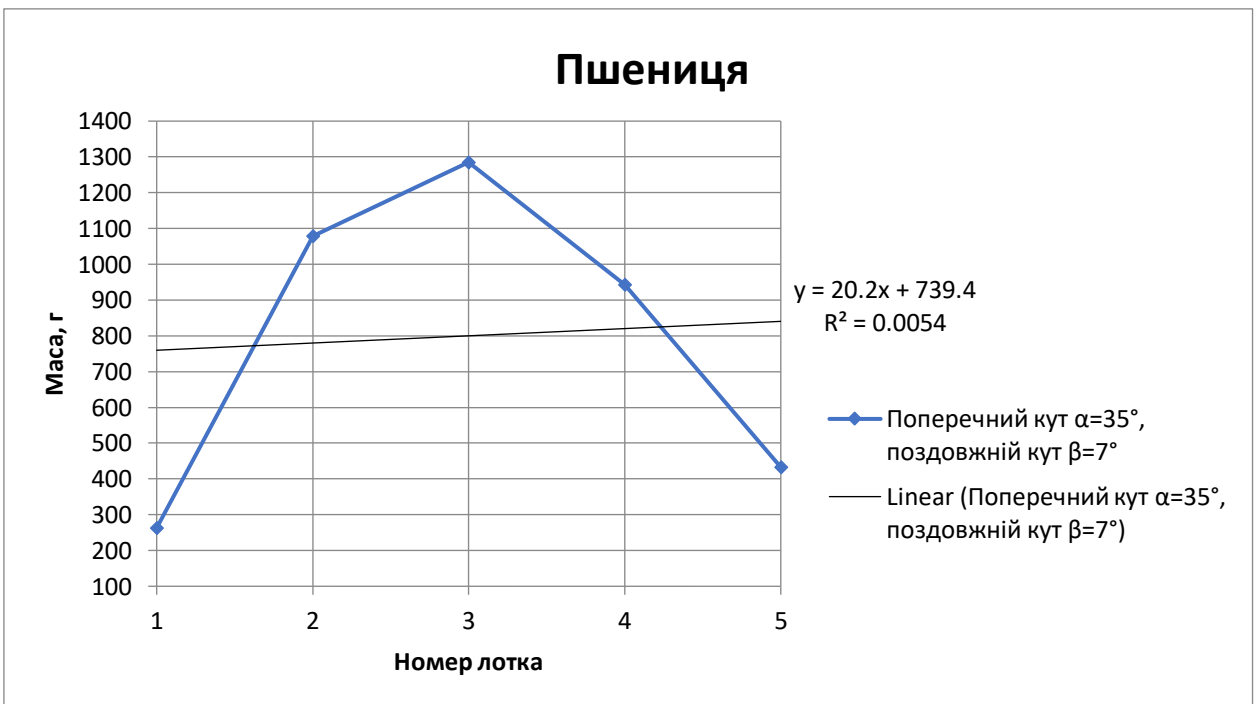


Рис. 2.15. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=35^\circ$, поздовжній кут $\beta=7^\circ$

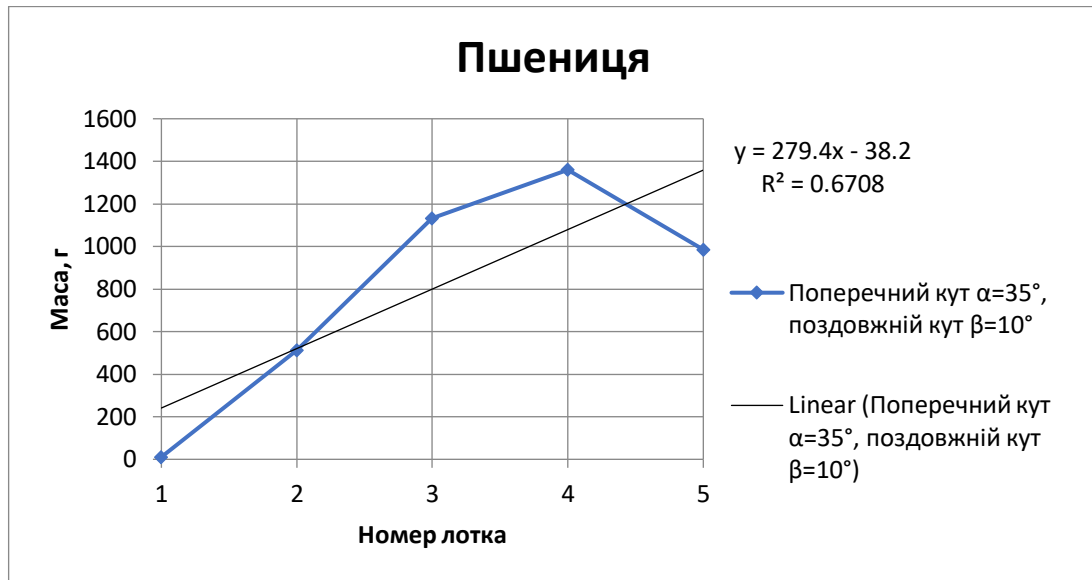


Рис. 2.16. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=35^\circ$, поздовжній кут $\beta=10^\circ$

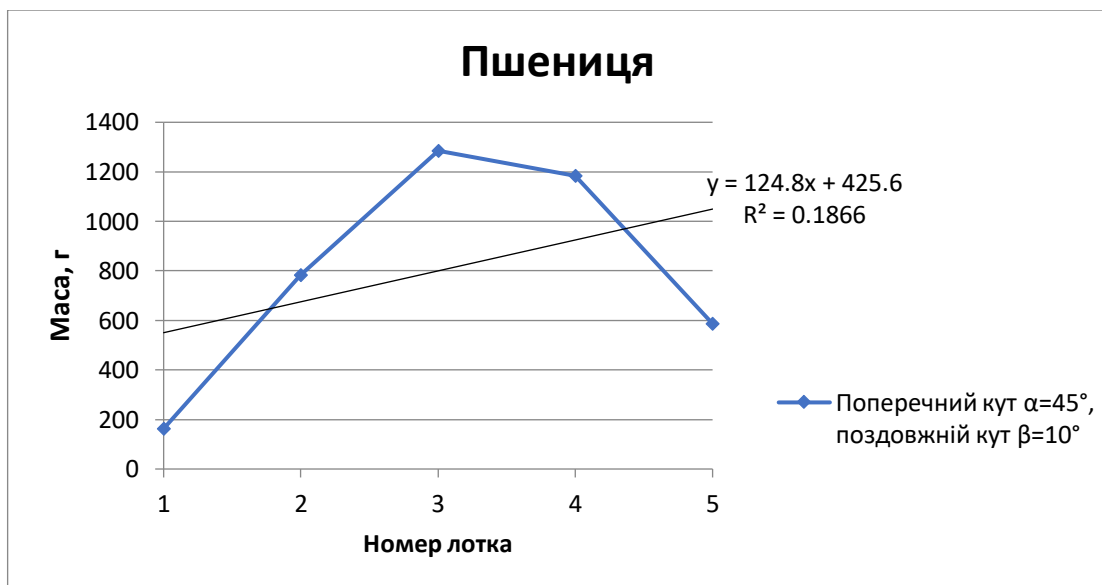


Рис. 2.17. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=45^\circ$, поздовжній кут $\beta=10^\circ$

Для проведення експериментів був обраний трирівневий некомпозіційний план Боксу-Бенкіна 2-го порядку (3,4). Для визначення факторів, які найбільше впливають на критерій оптимізації, застосований метод апіорного ранжирування [30]. В результаті виділено три основні фактори що варіюють: x_1 – поздовжній кут α , град.; x_2 – поперечний кут β , град. подача зерна Q , кг/рік. Верхній та нижній рівні факторів були призначені

за результатами теоретичних досліджень та конструктивних міркувань. Як параметр оптимізації були обрані маси насіння в лотках №3 і №4. У таблиці 2.2 наведені значення факторів і інтервали варіювання факторів.

Таблиця 2.2

Значення факторів і інтервали варіювання факторів

Фактор			Рівні варіювання фактора			Інтервал варіювання
Найменування	Позначення		+1	0	-1	
	натуральне	кодове				
Поперечний кут α , град.	X_1	x_1	40	35	30	5
Поздовжній кут β , град.	X_2	x_2	9	6	3	3
Подача зерна, Q , кг/час.	X_3	x_3	70	60	50	10

В ході планування експериментальних досліджень задаємося нижченаведеними параметрами: надійність результатів дослідження – 0,95; допустима похибка – $\varepsilon = \pm \sigma$; число повторності дослідів – 3. Для усунення помилок використовували критерій Стюдента.

Після проведення експерименту відповідно до матриці планування проведена статистична обробка отриманих результатів. Після підстановки коефіцієнтів регресії для кожної функції оптимізації отримаємо наступні рівняння:

$$y_1 = 21,6 + 0,45x_1 - 0,13x_2 + 0,1x_3 + 0,46x_1x_2 + 0,54x_2x_3 + 2,22x_1x_3 - 2,49x_1^2 - 0,74x_2^2 - 2,08x_3^2;$$

$$y_2 = 21,6 + 0,15x_1 - 0,04x_2 - 0,1x_3 + 0,23x_1x_2 + 0,11x_2x_3 + 1,29x_1x_3 - 1,92x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,67x_3^2;$$

Порівнюючи отримане значення, ts_{b_i} з коефіцієнтами рівняння регресії, отримали наступні рівняння регресій:

$$y_1 = 21,6 + 0,45x_1 + 0,46x_1x_2 + 0,54x_2x_3 + 2,22x_1x_3 - 2,49x_1^2 - 0,74x_2^2 - 2,08x_3^2; \quad (2.1)$$

$$y_2 = 21,6 + 0,15x_1 - 0,1x_3 + 0,23x_1x_2 + 0,11x_2x_3 + 1,29x_1x_3 - 1,92x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,67x_3^2; \quad (2.2)$$

Використовуючи дані розрахунку з табл. 3 побудували двовимірні перерізи поверхонь відгуку: маса насіння в лотку №3 и маса насіння в - №4.

Перевірку адекватності рівнянь проводили шляхом порівняння дисперсії адекватності з дисперсією параметра оптимізації за критерієм Фішера (1,2). В результаті отриманих розрахунків $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$. Отже рівняння (2.1) и (2.2) адекватні (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Результати статистичної обробки рівнянь регресій

№ п/п	Позначення	Маса в лотку №3	Маса в лотку №4
1	S_y^2	0,0641	0,0012
2	S	0,2534	0,0345
3	$S_{\text{ад}}^2$	0,055	0,0014
4	$F_{\text{расч.}}$	0,857	1,2
5	$F_{\text{табл.}}$	2,12	2,12
6	$G_{\text{расч.}}$	0,2241	0,2371
7	$G_{\text{табл.}}$	0,3346	0,3346

Результати канонічних перетворень рівнянь регресій для двомірних перетинів представлені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Результати канонічних перетворень рівнянь регресії для двомірних перетинів поверхонь відгуків

	Параметри оптимізації	Невідомі рівняння	Коефіцієнти рівняння		Координати нового центру, S			Знач. параметра опт. в точці S	Значення факторів в центрі S			Кут пов. осей в центрі S, $\phi, ^\circ$
			B_1	B_2	x_{s1}	x_{s2}	x_{s3}		α , град.	β , град.	Q , кг/год.	
1	Маса в лотку №3, г	$x_1=0$	-0,91	-1,9		0,00	0,00	21,63		6	60	-10
		$x_2=0$	-1,96	-2,35	-0,19		0,05	21,45	34,04		60,5	21
		$x_3=0$	-2,4	-0,8	-0,2	0,13		21,41	33,98	6,38		22
2	Маса в лотку №4, г.	$x_1=0$	-0,37	-1,68		-0,12	0,04	14,9		5,63	60,4	13
		$x_2=0$	-1,7	-1,88	-0,08		-0,05	14,9	34,62		59,5	21
		$x_3=0$	-0,5	-1,79	-0,08	0,05		14,89	34,58	6,15		21

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів сепаратора побудовано двомірні перерізи поверхонь відгуків (рис. 2.18 – 2.20).

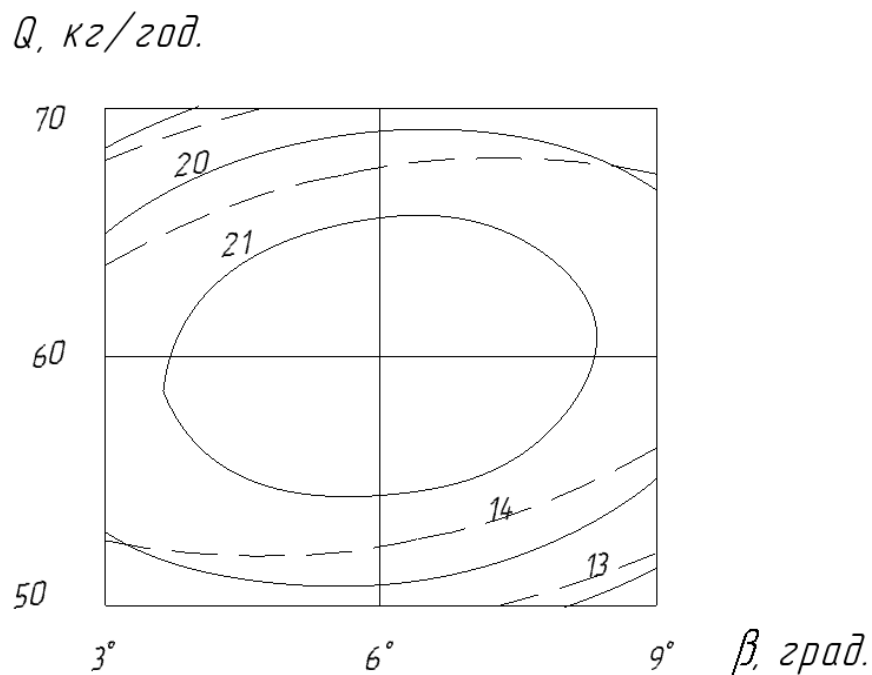


Рис. 2.18. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_1 = 0$), що характеризують вплив поздовжнього кута β (фактор x_2) та подачі зерна Q кг/год. (фактор x_3) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна лінія).

З рис. 2.18 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні поздовжнього кута $\beta=6^\circ$ і подачі зерна $Q=60$ кг/рік. На підставі цього рисунку можна стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: поздовжній кут від 4° до 8° і подача зерна Q від 55 до 65 кг/год.

$Q, \text{ кг/год.}$

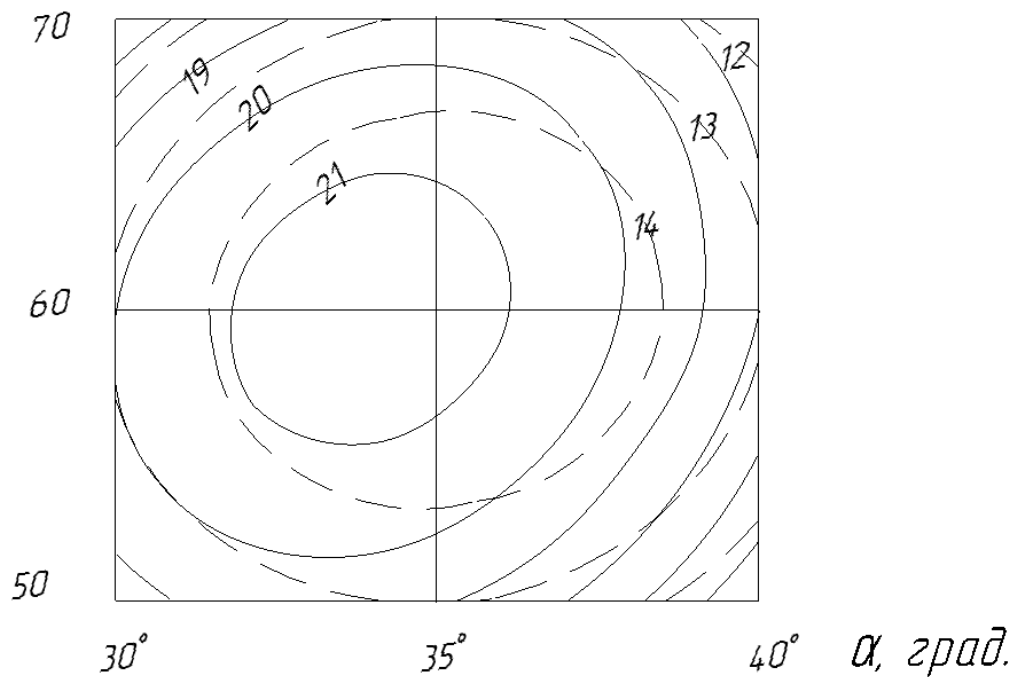


Рис. 2.19. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_2 = 0$), що характеризують вплив поперечного кута α (фактор x_1) та подачі зерна Q кг/год. (фактор x_3) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна лінія).

З рис. 2.19 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 та лотку №4 має місце при значенні поперечного кута $\alpha \beta = 34^\circ$ та подачі зерна $Q = 60$ кг/год. На підставі цього рисунка можна також стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: поперечного кута α від 32° до 37° і подача зерна Q від 55 до 64 кг/год.

β , град.

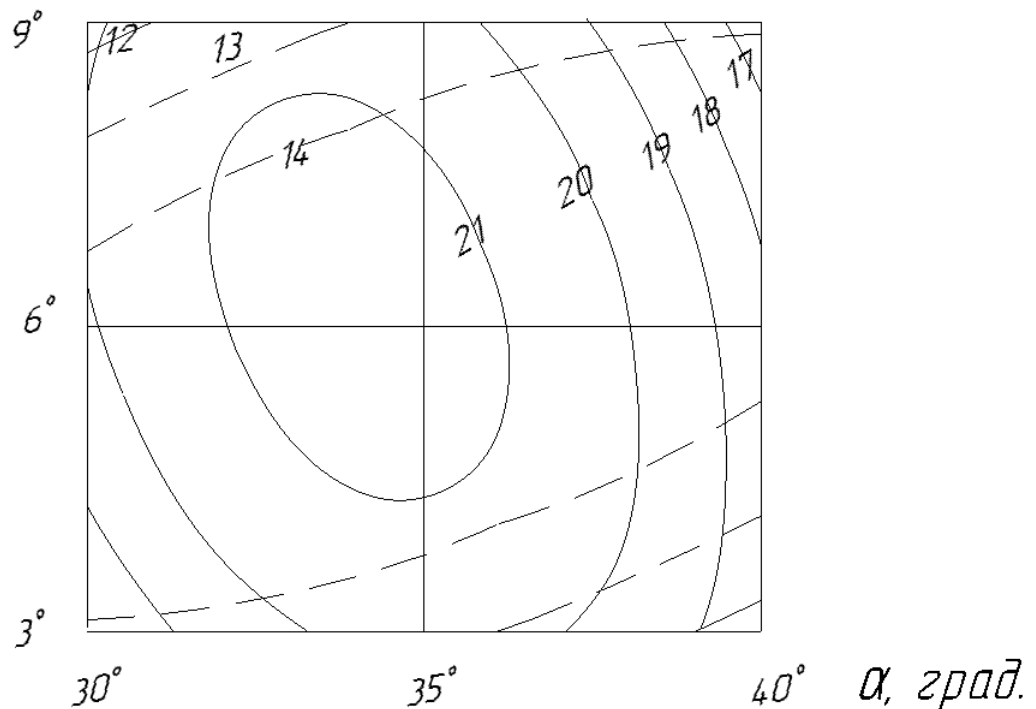


Рис. 2.20. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_3 = 0$), що характеризують вплив поперечного кута α (фактор x_1) та поздовжнього кута β (фактор x_2) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна) лінія).

З рис. 2.20 бачимо, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні поперечний кута $\beta=34^\circ$. і поздовжній кут $\beta = 7^\circ$ подачі зерна $Q=60$ кг/ год. На підставі цього рисунка можна також стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: кут від 32° до 36° поздовжній кут.

З аналізу графіків можна визначити оптимальні значення чинників: поперечний кут $\alpha = 34^\circ$, поздовжній кут $\beta = 6^\circ$ і подача зерна $Q = 60$ кг/год.

На процес сепарації багатоярусному ударному сепараторі енергія не витрачається, тому, що частинки у процесі сепарації переміщуються лише під дією сили тяжіння.

Витрати енергії в багатоярусному ударному сепараторі можливі тільки підйом сипучої суміші в бункер, але вони необхідні всім сепараторів. Відсутність підведення енергії на процес сепарації дозволяє використовувати його в невеликих господарствах для сепарації зерна прямо на полі відразу після збирання з подачею зерна в бункер вручну або за допомогою найпростіших пристроїв.

РОЗДІЛ 3. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗДРІБНЕННЯ ЗЕРНА З ОТРИМАННЯМ БОРОШНА ТА КРУП

Україна є аграрною країною, так як 27 % світових чорноземів знаходяться на її території. У найближчій перспективі основним видом аграрного виробництва в нашій країні буде виробництво зернових і в першу чергу пшениці. Зерно пшениці є основною сировиною для виробництва борошна та крупи. Дві третини населення Землі з усіх рослин, що дають їжу, головним вважають пшеницю [31]. Цей злак дає людству щорічно понад чотириста мільйонів тон зерна – четверту частину зборів зерна за все взагалі в світі. Зерно пшениці, є джерелом поживних речовин - білків, вуглеводів, ліпідів; біологічно активних речовин - вітамінів, ферментів, мінеральних речовин, мікро і макронутриєнтів [32, 33, 34, 35, 36, 37]. Основне призначення пшеничного зерна – стати хлібом. Півкілограма хорошого хліба – це більше половини добової потреби людини в білку, вуглеводах, вітамінах В і Е і багатьох мінеральних речовинах.

На сьогоднішній день економіка України є енергоємною, це стосується і борошномельно – круп'яної переробної промисловості. Тому створення обладнання з низьким енергоспоживанням є актуальним [38, 39, 40]. При цьому крім питань зниження енерговитрат, особливе значення має і підвищення якості продуктів з зерна пшениці та розширення їх асортименту.

В даний час в Україні невеликі сільськогосподарські підприємства, фермерські господарства стоять перед вибором або продавати зібраний врожай великим переробним підприємствам, або будувати цехи по переробці зерна. Як правило на ринку України, виробники обладнання пропонують переробні комплекси середньої потужності для виробництва борошна або крупи. Ці комплекси вимагають великих капітальних витрат. Для їх експлуатації потрібні спеціальні приміщення, кваліфікований обслуговуючий персонал тощо. При цьому якість продукту виробленого на їх обладнанні не

може конкурувати з продуктом зробленим на великих переробних комбінатах [41, 42, 43, 44].

У той же час питання підвищення якості крупи і борошна із зерна пшениці, яке здавалося лежить на поверхні, ніким до теперішнього часу не піднімалось. Суть питання полягає в тому, що присутність в зерні борозенки збільшує зовнішню поверхню, а значить і вміст оболонок. Також в ній накопичується пил, бруд і контаминанти від яких ціле зерно важко очистити. При переробці зерна бруд і контаминанти можуть потрапити і потрапляють в борошно [45, 37, 46]. Якщо ж розколоти зерно по борозенці на дві частини можна отримати доступ робочих органів машин для більш ретельної обробки цієї частини зерна, в результаті якої можна отримати екологічно безпечну продукцію – крупу нового типу і обойне борошно з низьким показником зольності [47, 48]. Крім цього на технологічні властивості зерна твердої пшениці значний вплив мають морфологія і анатомія зернівки. Глибина і розмах борозенки зерна і форма зерна ускладнює процес переробки зерна і виділення з нього ендосперму [49, 50, 51, 52]. Цим питанням в даній роботі приділяється особлива увага.

3.1. Зерно пшениці як сировина для виробництва продуктів харчування

Продовольче зерно служить сировиною для виробництва продуктів харчування: борошно, крупа, манна крупа, макаронна крупка. Побічними продуктами борошномельно-круп'яного виробництва є дрібне зерно, висівки і зародок пшениці. Дрібне зерно і висівки йдуть на корм тваринам.

Зародок пшениці є цінним джерелом біологічно активних речовин і широко використовується в харчовій, кондитерській, хлібопекарській, комбікормовій, парфумерній промисловості і медицині. На борошномельних заводах його отримують як в зерноочисному, так і розмеленому відділенні.

Фуражне зерно пшениці використовують на корм тваринам або як сировину для виробництва комбікорму [53, 54].

Використання зерна на різні цілі визначається перш за все особливостями його хімічного складу. Суттєве значення має також анатомія і структура зерна пшениці. Зернівка містить органічні сполуки - білки, вуглеводи, ліпіди, пігменти, вітаміни, ферменти, мінеральні речовини і воду, являє собою органічну сполуку, яка складається з різних за структурою та властивостями анатомічних частин - ендосперму, зародка і оболонки. Виходячи з цього технологічні властивості зерна можна поділити на фізико-хімічні, біохімічні, структурно - механічні та ін. Всі ці властивості знаходяться один з одним в складному взаємозв'язку, що характерно для живих організмів [55, 56].

Частини зерна розколотого уздовж борозенки показано на рис. 3.1. Видно приховані поверхні, що залягають в глибині зерна. На дні борозенки видно пігментну нитку 1 [56].

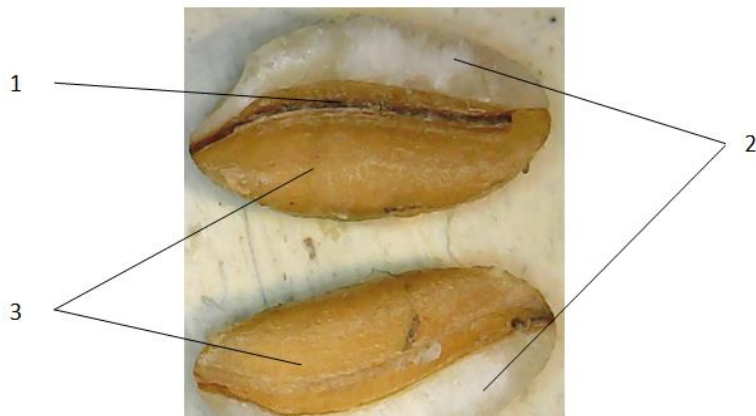


Рис. 3.1. Зерно розколоте вздовж борозенки:

1 – пігментна нитка; 2 – ендосперм; 3 – зовнішні покриви зерна, недоступні для обробки робочими органами машини

Сучасні методи дослідження дозволяють визначити зміст

металовмісних сполук на ділянках зерна. Як приклад можна привести результати дослідження Бофанг Ян і Марі-П'єр [57], які показали в своєму дослідженні розподіл металовмісних сполук на різних ділянках зерна твердої пшениці рис. 3.2.

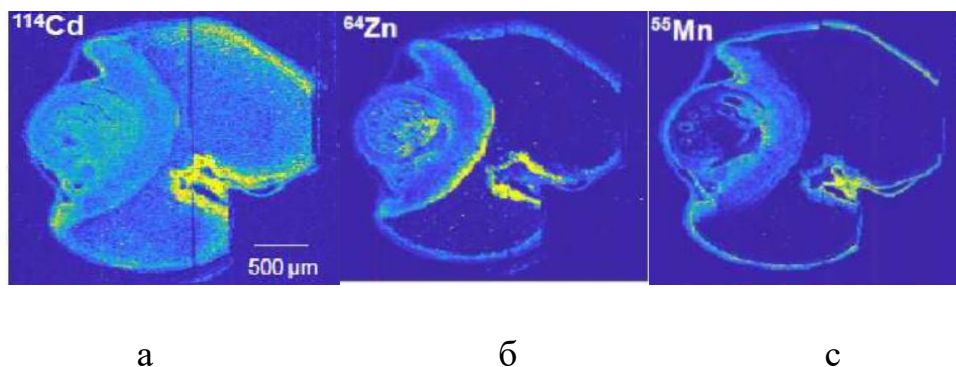


Рис. 3.2. Флуоресцентні мікрофотографії поперечного зрізу зерна

Жовтим кольором показані скупчення кадмію (а), цинку (б), марганцю (в). Як видно, значна частина металів знаходиться в складці борозенки і на поверхні пігментної нитки. Таким чином, після руйнування зерна, деяка частина металовмісних сполук потрапляє в продукт борошно або крупу.

Доступ робочих органів до цих поверхонь, дозволить істотно зменшити зольність зерна [47].

3.2. Експериментальна установка для дослідження процесу подрібнення зерна

Схема здрібнювача для сколювання зерна пшениці показана на рис. 3.1.

Дисковий здрібнювач складається з завантажувального бункера 5 рис. 3.3 закріпленого на верхній кришці 2 робочої камери 1. У середині робочої камери 1 розташовані робочі органи, виконані у вигляді дисків - верхнього 6 і нижнього 3. Верхній диск 6 через дистанційну шайбу 9 кріпиться чотирма болтами 4 до верхньої кришки 6.

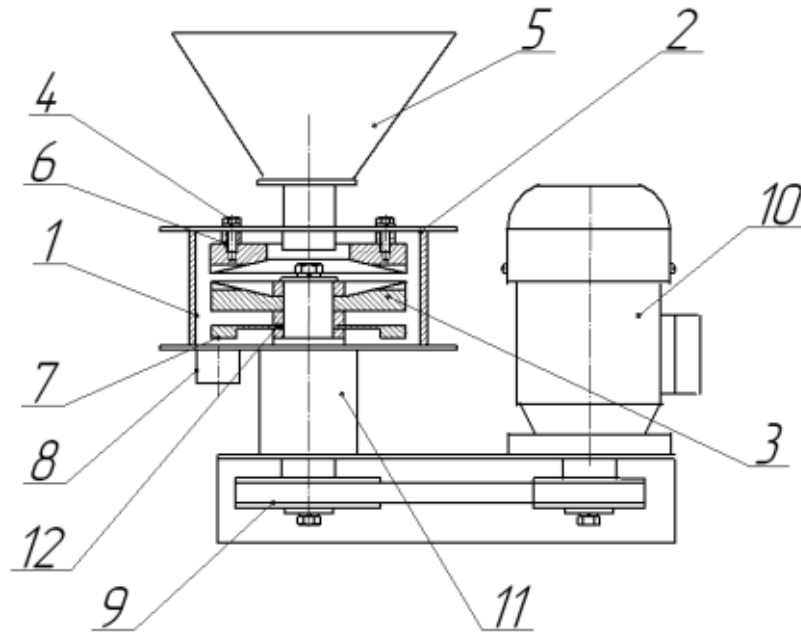


Рис. 3.3. Конструктивна схема дискового здрібнювача зерна пшениці
 1 – робоча камера; 2 – верхня кришка; 3 – нижній диск; 4 – болти регулювальні;
 5 – завантажувальний бункер; 6 – верхній диск; 7 – активатор; 8 – патрубок;
 9 – ремінна передача; 10 – двигун; 11 – корпус підшипників;
 12 – втулка

Нижній диск 3 і лопатевий активатор 7 закріплені на валу 14 через дистанційні втулки 17 за допомогою болта 15. Вал встановлений в підшипниковому корпусі 11. Обертання вала здійснюється від двигуна 10 через ремінну передачу 9. На нижній кришці закріплений патрубок 8. Робоча поверхня рухомого і не рухомого дисків виконана аналогічно, у вигляді усічених конусів як показано на рис. 3.2. Кут, утворений похилими поверхнями дисків дорівнює 14 градусів. На дисках нарізані рифлі при змиканні рифлів верхнього і нижнього дисків утворюється форма отвору каналу що здрібнює у вигляді циліндра.

При роботі здрібнювача електродвигун 10 (рис. 3.3) через клинопасову передачу приводить в обертання нижній диск 3. Зерно через живильний патрубок 5 рівномірно подається в центральну частину здрібнювача і

потрапляє в робочий простір між дисками 6, 3. Зернівка 2 під дією відцентрової сили надходить в канавку між дисками і в результаті взаємодії розколюється уздовж борозенки на дві або більше частин рис. 3.4.

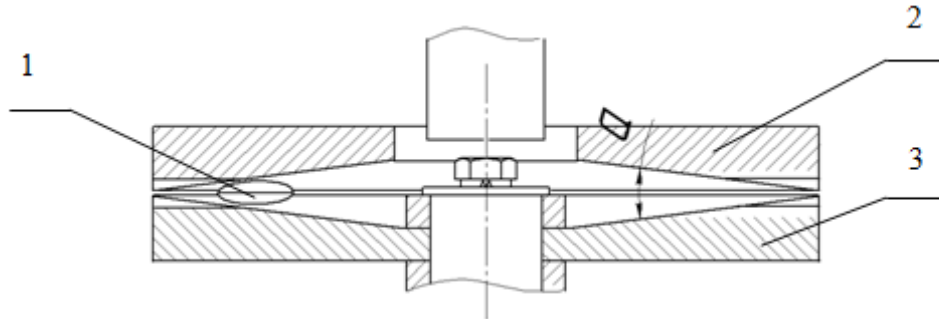


Рис. 3.4. Поперечний розріз робочих органів дискового здрібнювача
1 – зернівка; 2 – нерухомий диск; 3 – рухомий диск

Продукти дроблення підхоплюються лопатевим активатором 7 і виводяться через розвантажувальний патрубок 8. Обертання від двигуна до диска здрібнювача здійснюється клинопасовою передачею 9.

Привод здрібнювача здійснюється через клинопасову передачу від трифазного двигуна 2 АІР 71 С потужність 0,37 кВт, частота обертання валу двигуна 2880 об/хв.

Розрахунок кутової швидкості на валу ротора ω_p :

$$\omega_p = \frac{\pi n_p}{30}, 1/с, \quad (3.1)$$

де

$$n_p = \frac{n_d D_1}{D_2}, \text{об/хв.} \quad (3.2)$$

Значення кутової швидкості на валу ротора дискового здрібнювача

№ п/п	D_p , м	D_p , м	n_d , об/мин.	n_p , об/мин.	ω_2 , 1/с
1	0,096	0,146	300	456,3	47,8
2	0,096	0,146	800	1216,7	127,3

Кінематична схема приводу дискового здрібнювача приведена на рис. 3.5.

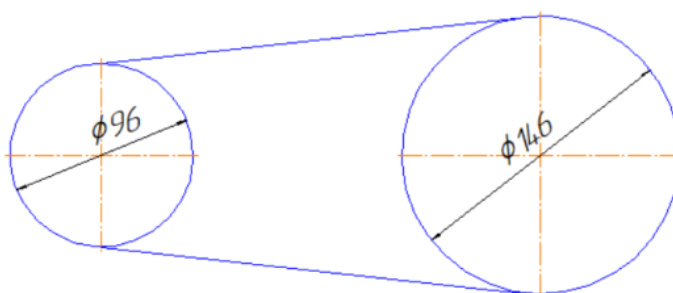


Рис. 3.5. Кінематична схема приводу дискового здрібнювача

На рис. 3.6 показаний загальний вигляд експериментальної установки. Експерименти проводилися в наступній послідовності. Зерном заповнювали бункер 1 живильника 3. Подачу зерна живильника встановлювали регулятором 2 та направляли на здрібнювач 4. Час проведення кожного експерименту фіксували секундоміром і становив 10 с.



Рис. 3.6. Загальний вигляд експериментальної установки для проведення експериментів:

1 – завантажувальний бункер живильника; 2 – регулятор подачі зерна; 3 – живильник; 4 – електродвигун здрібнювача; 5 – дисковий здрібнювач; 6 – пульт управління; 7 – ємність для збору продуктів подрібнення; 8 – перетворювач частоти; 9 – ноутбук

Установка величини обертів на валу двигуна 4 здійснювалася перетворювачем частоти ATV312HU15N4 8 за допомогою програми SoMove_V2.6.2 встановленої на ноутбуці 9. Крім цього програма дозволяла визначати потужність на валу двигуна 10 під час проведення експерименту [58, 59].

3.3. Аналіз результатів розколювання зерна пшениці

В якості випробуваного матеріалу використовувалися лущена озима м'яка пшениця сорту "Смуглянка" (оригіатор: Інститут фізіології рослин і генетики НАН України, м Київ і Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла НААН України Київська обл.) з наступними показниками якості: початкова вологість 14 %; натура 746 г/л; скловидність 70 %; маса 1000 зерен 35,2 г; зольність 1,75 %; коефіцієнт лущення $C_{\text{Ш}}=6$.

Статистичні характеристики навантажень що руйнують зерно уздовж і поперек наведені в таблиці 3.2, аналіз цих значень показує, що їх діапазони відрізняються (мінімум 22,54 Н і 50,97 Н, максимум 37,24 Н і 109,76 Н відповідно), а середнє зусилля руйнування вздовж становить 46,4 % від середнього навантаження поперек. Статистичні характеристики площі зрізу вздовж і поперек зернівки наведені в таблиці 3.3, в таблиці 3.4 наведені середні значення напруги і площі зрізу.

Таблиця 3.2

Статистичні характеристики руйнівного навантаження

Навантаження	Число дослідів	Граничні напруги, Н/мм ²					Станд. помилка	Станд. Відхилення
		Середнє	Медіана	Мода	Min	max		
Уздовж	28	29,68	29,4	29,4	22,5	37,24	0,6549	3,4659
Поперек	28	72,38	67,13	58,8	50,9	109,76	3,1718	16,7838

Статистичні характеристики площі зрізу

Навантаження	Кільк. дослідів	Площа зрізу, мм ²					Станд. похибка	Станд. відхилення
		Середнє	Медіана	Мода	min	max		
Уздовж	28	4,05	4,15	4,3	3	5,3	0,0964	0,5106
Поперек	28	7,2189	7,25	7,4	5,77	9,5	0,1706	0,9031

Таблиця 3.4

Середні значення напруги і площі зрізу

	Середня площа $S_{зк.}$, мм	Середнє навантаження P, N	Середня напруга, $N/мм^2$
Уздовж	4,0	29,7	7,4
Поперек	7,2	72,4	10,0

Графічне зображення результатів експериментів в координатах «площа – навантаження» (рис. 3.7, 3.8) наочно демонструє збільшення навантаження зі збільшенням площі.

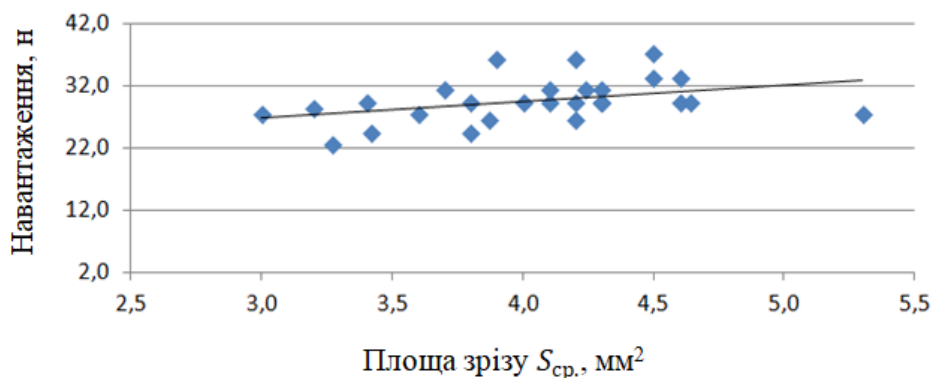


Рис. 3.7. Залежність навантаження від площі зрізу при руйнуванні уздовж зернівки по борозенки

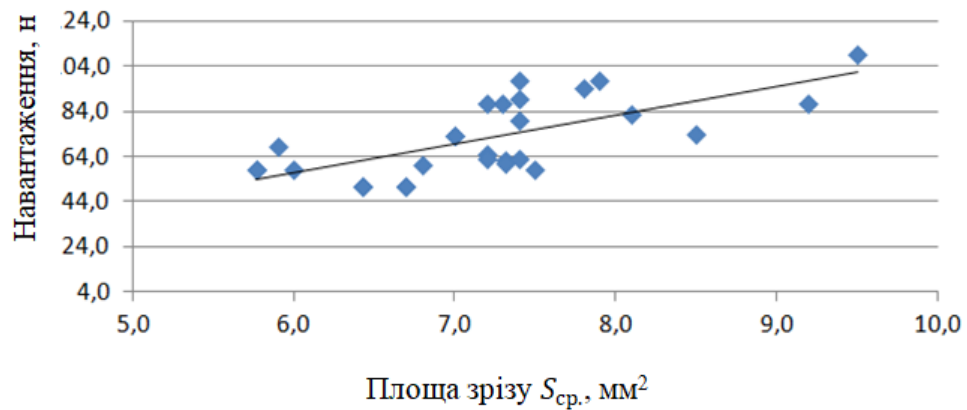


Рис. 3.8. Залежність навантаження від площі зрізу при руйнуванні поперек зернівки

Середні значення руйнівних навантажень в залежності від площі поперечного перерізу змінюються істотно і по суті для зернівки з більшою площею відколу необхідні більш високі зусилля, а отже і більш високі витрати енергії (табл. 3.4).

Отримано регресійні залежності між площею перетину зернівки і зрізуючими напруженнями представлені на рис. 3.7, рис. 3.8.

Рівняння регресії залежності навантаження від площі зрізу при руйнуванні зернівки уздовж борозенки має такий вигляд

$$y=2,6726 \cdot S+18,862 \cdot R^2=0,155. \quad (3.3)$$

Рівняння регресії залежності навантаження від площі зрізу при руйнуванні зернівки поперек борозенки має наступний вигляд:

$$y=12,887 \cdot S-20,648 \cdot R^2=0,4809. \quad (3.4)$$

Встановлено слабка залежність зусилля що руйнує від площі відколу. Визначено, що навантаження зростає з ростом площі відколу. Середні

значення напруг для зерна пшениці розколотої уздовж зернівки по борозенці складають $7,4 \text{ Н/мм}^2$, середнє значення напружень для зерна пшениці розколотої поперек осі зернівки склало $10,0 \text{ Н/мм}^2$. Отже скол зерна уздовж по борозенці є менш енергоємним.

3.4. Обґрунтування і визначення частоти обертання ротора

На підставі проведеного аналізу технологічного процесу подрібнення зерна і результатів теоретичних досліджень [47, 60] були визначені три фактори: частота обертання диска $n - X_1$; подача зерна $Q - X_2$; зазор між дисками $h - X_3$. В якості критерію оптимізації визначена питома енергія подрібнення (E , Вт·год./кг) і маса продукту залишком на сите $\emptyset 2,5 \text{ мм}$ (M , г).

Для визначення значення і інтервалу фактора n проведемо однофакторний експеримент. Встановимо на нульовому рівні два фактора – пропускна здатність $Q=30 \text{ кг/год.}$ і зазор між дисками $h=0,3 \text{ мм}$.

За допомогою частотного перетворювача 8 встановлювали частоту обертання на валу двигуна здрібнювача в діапазоні від 140 хв^{-1} до 1600 хв^{-1} . Потужність двигуна визначали за допомогою електронного трифазного вимірювача потужності мережі N14 з похибкою вимірювання: $\pm 0,1 \%$.

Частоту обертання вала двигуна $n_{\text{дв.}}$ заміряли тахометром Venetech GM8905 з похибкою вимірювання: $\pm 1 \%$. Частоту обертання диска n визначали за формулою з урахуванням передавального відношення клинопасової передачі:

$$n = i \cdot n_{\text{дв.}}, \quad (3.5)$$

де i – передавальне відношення передачі, $i=1,52$;

$n_{\text{дв.}}$ – частота обертання вала двигуна.

Результати обчислень занесені в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5

Значення частоти обертання диска n від частоти обертання вала двигуна $n_{дв.}$. (Передавальне відношення $i=1,52$)

	Частота обертів, мин^{-1}						
$n_{дв.}$	140	270	540	800	1000	1350	1600
N	92,1	177,6	355,3	526,3	657,9	888,2	1052,6

Результати експериментів по визначенню потужності N і маси продукту $m_{(\emptyset 2,5)}$ (залишок на ситі $\emptyset 2,5$), в залежності від частоти обертання диска n , занесені відповідно в таблиці 3.6 і 3.7.

Таблиця 3.6

Залежність потужності Y_{ui} (N) від частоти обертання диска X_u (n)

U	X_u	Y_{ui}			$\sum_{i=1}^m Y_{ui}$	\bar{Y}_i	S_u^2
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$			
1	92,1	11,12	11,31	11,05	33,48	1	92,1
2	177,6	22,22	22,08	22,5	66,8	2	177,6
3	355,3	40,7	40,54	40,23	121,47	3	355,3
4	526,3	59,23	58,96	59,27	177,46	4	526,3
5	657,9	62,1	62,07	62,32	186,49	5	657,9
6	888,2	74,3	73,98	74,45	222,73	6	888,2
7	1052,6	99,9	99,05	99,56	298,51	7	1052,6

Залежність сходу продукту Y_{ui} ($m_{(02.5)}$) від частоти обертання диска X_u (n)

U	X_u	Y_{ui}			$\sum_{i=1}^m Y_{ui}$	\bar{Y}_i	S_u^2
		$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$			
1	92,1	9,4	9,22	9,41	28,03	1	92,1
2	177,6	13,41	13,65	13,02	40,08	2	177,6
3	355,3	20,85	21,05	19,98	61,88	3	355,3
4	526,3	15,09	15,96	14,95	46,0	4	526,3
5	657,9	15,16	14,85	15,25	45,26	5	657,9
6	888,2	15,92	15,12	16,01	47,05	6	888,2
7	1052,6	16,74	16,25	17,27	50,26	7	1052,6

Для оцінки декількох дисперсій використовуємо критерій Кохрена, за умови наявності однакового числа паралельних дослідів (приймаємо кількість дослідів рівне 3):

$$G_{\text{расч}} = \frac{s_j^2 \max}{\sum_{j=1}^N s_j^2}, \quad (3.6)$$

де N – кількість дослідів

s_j^2 – дисперсії в рядках

Табличне значення критерію Кохрена $G_{\text{табл.}}$ визначаємо для відповідного рівня значущості $q=0,05$ числа ступенів свободи $f=N-1=15-1=14$ і числа вимірювань (кількість вибірок) $m=3$.

Результати розрахунків перевірки гіпотези про однорідність дисперсій за критерієм Кохрена представлені в табл. 3.8.

Результати розрахунків перевірки гіпотези про однорідність дисперсій
за критерієм Кохрена

Значення дисперсного аналізу	Y_{ui} (E)	Y_{ui} ($m_{(02.5)}$)
Найбільша з дисперсій в рядках плану $s_{j \max}^2$	0,1830	0,3236
Сума дисперсій $\sum_{j=1}^N S_j^2$	0,4087	1,2799
Розрахункове значення критерію Кохрена $G_{расч}$	0,4479	0,2529
Табличне значення критерію Кохрена $G_{табл.}$	0,5612	

Розрахункові значення $G_{расч}$ вищі за табличне значення $G_{табл.}$, отже, можна припустити, що обидві дисперсії однорідні [61].

Використовуємо дані таблиць 3.2 та 3.3 та побудуємо залежність потужності N на валу двигуна і маси продукту $m_{(02.5)}$ від частоти обертання диска n .

Як видно з графіка представленого на рис. 3.9 максимальний вихід продукта відповідає $n=355,3$ об/хв. на валу двигуна при подальшому зростанні числа оборотів йде падіння виходу продукту з одночасним зростанням потужності. Приймаємо значення рівня рівне 350 об/хв., а інтервал фактора в діапазоні від 200 до 500 об/хв.

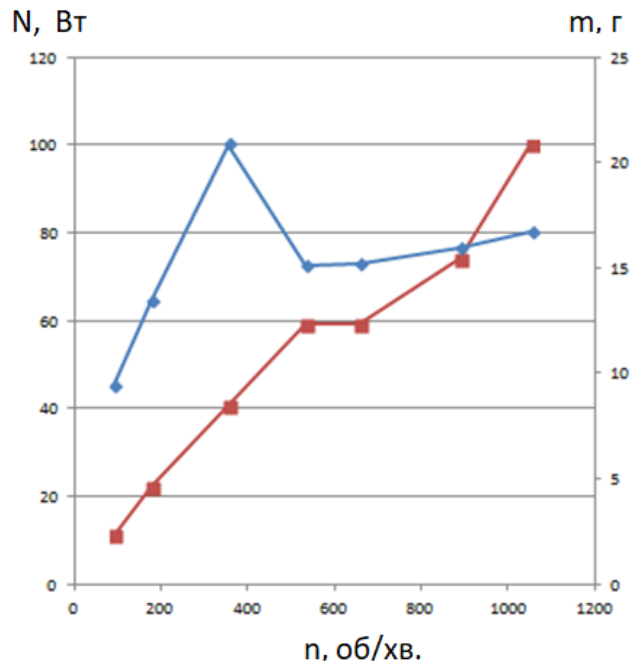


Рис. 3.9. Залежність потужності N і маси m (сход продукту з сита $\varnothing 2,5$) від частоти обертання диска n

Після того як визначені значення рівнів і інтервалів трьох факторів і функція оптимізації можна приступити до факторному аналізу.

3.5. Результати проведення повного факторного експерименту на дисковому здрібнювачі

Для проведення експериментів був обраний трирівневий некомпозіційний план Боксу-Бенкіна 2-го порядку. Для реалізації плану була розроблена програма в Microsoft Excel, алгоритм якої відповідав методикам обробки експериментальних даних [62, 63, 43, 65, 66, 50]. Параметрами оптимізації обрані: 1 – питомі енерговитрати, E , кВт·год./кг; 2 – пропускна здатність, P , кг/год.; 3 – відсоток маси залишку на ситі $\varnothing 2,5$, M , %.

Для визначення факторів, що роблять найбільший вплив на критерій оптимізації, застосований метод апіорного ранжирування [63, 66]. В результаті виділено три основні фактори що варіюють: x_1 - частота обертання

диска, n , об/хв; x_2 - подача зерна Q , кг/год.; x_3 - зазор між дисками, h , мм. Верхній нижній рівні факторів були призначені з конструктивних міркувань і за результатами теоретичних досліджень (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Значення факторів і інтервали варіювання факторів

Фактор			Рівні варіювання фактора			Інтервал варіювання
Найменування	Позначення		+1	0	-1	
	натуральне	кодове				
Частота обертання диска n , об/хв.	X_1	x_1	500	350	200	150
Подача зерна, Q , г/хв.	X_2	x_2	30	45	60	15
Зазор між дисками, h , мм	X_3	x_3	0,5	0,3	0,1	0,2

У таблиці 3.9 наведені значення факторів і інтервали варіювання факторів.

В ході планування експериментальних досліджень задаємося нижченаведеними параметрами: надійність результатів дослідження – 0,95; допустима помилка – $\varepsilon = \pm \sigma$; число повторностей дослідів – 3. Для усунення помилок використовували критерій Стюдента.

Перед початком дослідів встановлювали значення факторів згідно матриці планування експерименту для кожного параметра оптимізації при сталому режимі роботи здрібнювача здійснювали збір продуктів подрібнення

в перебігу 10 секунд. Потужність визначали за допомогою ватметра, включеного в питому мережу лабораторної установки. Після закінчення дослідів продукти подрібнення просіювали на лабораторному просіювачі.

Пропускна здатність здрібнювача P (кг/год.) визначали за формулою:

$$P = \frac{0,36 \cdot M}{t}; \quad (3.7)$$

де M – маса наважки, гр.;

t – тривалість збору наважки, 10с.

Енергоємність процесу подрібнення E (кВт·год./кг) визначили за формулою:

$$E = \frac{N}{P}; \quad (3.8)$$

де N – потужність електродвигуна при робочому навантаженні, кВт;

P – пропускна здатність, кг/год.

Після проведення експерименту відповідно до матриці планування проведена статистична обробка отриманих результатів. Визначали дисперсію дослідів S_y^2 і відтворюваність дослідів G

Визначили коефіцієнти регресії.

Після підстановки коефіцієнтів регресії для кожної функції оптимізації отримаємо наступні рівняння:

$$y_E = 0,92 + 0,08x_1 - 0,08x_2 + 0,04x_3 + 0,6x_1x_2 + 0,4x_1x_3 - 0,08x_2x_3 + 0,8x_1^2 + 0,7x_2^2 + 0,4x_3^2; \quad (3.9)$$

$$y_P = 27,8 + 0,4x_1 + 0,69x_2 + 0,2x_3 + 1,49x_1x_2 + 2,52x_1x_3 + 5,3x_2x_3 - 5,3x_1^2 - 3,4x_2^2 - 1,4x_3^2; \quad (3.10)$$

$$y_M = 67,8 - 0,07x_1 - 0,47x_2 - 0,6x_3 + 1,26x_1x_2 - 2,2x_1x_3 + 0,7x_2x_3 - 2,6x_1^2 - 1,6x_2^2 - 2x_3^2 \quad (3.11)$$

Порівнюючи отримане значення, ts_{b_i} з коефіцієнтами рівняння регресії, отримали наступні рівняння регресій:

$$y_E = 0,92 + 0,08x_1 - 0,08x_2 + 0,04x_3 + 0,6x_1x_2 + 0,4x_1x_3 - 0,08x_2x_3 + 0,8x_1^2 + 0,7x_2^2 + 0,4x_3^2; \quad (3.12)$$

$$y_P = 27,8 + 0,69x_2 + 1,49x_1x_2 + 2,52x_1x_3 + 5,3x_2x_3 - 5,3x_1^2 - 3,4x_2^2 - 1,4x_3^2; \quad (3.13)$$

$$y_M = 67,8 + 1,26x_1x_2 - 2,2x_1x_3 + 0,7x_2x_3 - 2,6x_1^2 - 1,6x_2^2 - 2x_3^2 \quad (3.14)$$

Перевірку адекватності рівнянь проводили шляхом порівняння дисперсії адекватності з дисперсією параметра оптимізації за критерієм Фішера. В результаті отриманих розрахунків $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$. Отже рівняння (3.12-3.14) адекватні.

Для визначення значень факторів, що забезпечують мінімальну енергоємність y_G і максимальну прохідну здатність y_P при максимальному виході повноцінного продукту y_M , складені системи диференціальних рівнянь і провели їх канонічне перетворення [67].

Використовуючи дані розрахунків побудували двовимірні перерізи поверхонь відгуку: E – енергоємності; P – прохідної здатності; M – процентного виходу продукту залишком на ситі $\emptyset 2,5$ мм. Для побудови графіків використовували програми MathCAD v14 і Компас 3D V15 [67]. Графіки представлені на рис. 3.10, 3.11, 3.12.

При $x_1=0$ максимальне значення пропускної здатності $P=27,75$ кг/год. ($Q=45,62$ кг/год., $h=0,27$ мм) і максимальний процентний вихід повноцінного продукту $M=68,1$ % ($Q=45,0$ кг/год., $h=0,2$ мм) відповідають значенням питомої енергоємності $E=0,94$ кВт·год./кг ($Q=43,4$ кг/год., $h=0,19$ мм).

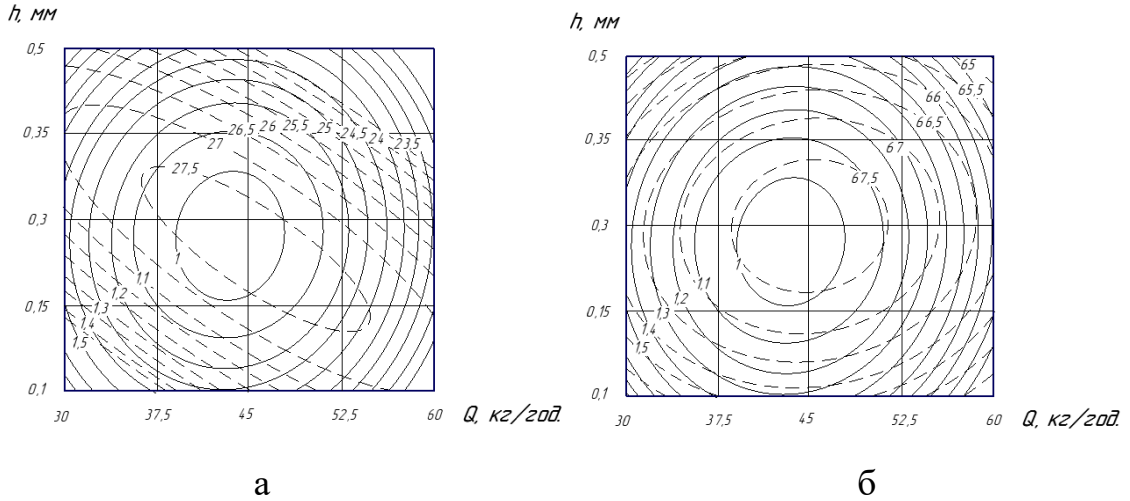


Рис. 3.10. Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив подачі зерна Q (фактор x_2) і зазору між дисками h (фактор x_3) на: а – питому енергоємність E і пропускну здатність P ; б – питому енергоємність E і відсоток маси залишку на ситі $\Phi 2,5 M$

При $x_2=0$ максимальне значення пропускної здатності $P=27,75$ кг/год. ($n=350$ об/хв., $H=0,3$ мм) і максимальний відсоток виходу повноцінного продукту $M=68,1$ ($n=350$ об/хв., $H=0,3$ мм) відповідають значенням питомої енергоємності $E=0,93$ кВт·год./кг ($n=363$ об/хв., $h=0,2$ мм).

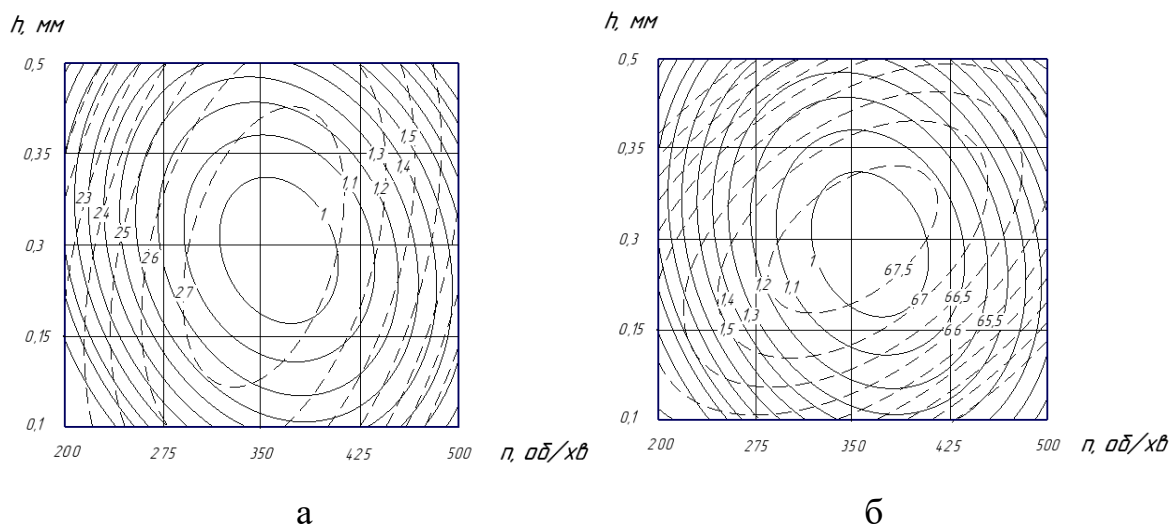
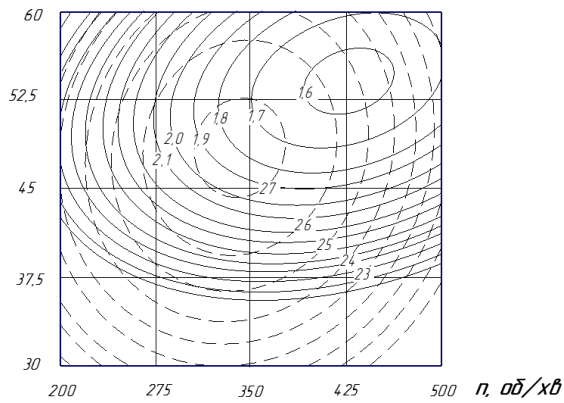


Рис. 3.11. Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив частоти обертання ротора n (фактор x_1) і зазору між дисками h (фактор x_3) на: а – питому енергоємність E і пропускну здатність P ; б – питому енергоємність E і відсоток маси залишку на ситі $\Phi 2,5 M$

При $x_3=0$ максимальне значення пропускну здатності $P=27,75$ кг/год. ($n=317,63$ об/хв., $Q=58,75$ кг/год.) і максимальний відсоток виходу повноцінного продукту $M=68,1\%$ ($n=317$ об/хв., $Q=58,75$ кг/год.) відповідають значенням питомої енергоємності $E=1,57$ кВт·год./кг ($n=430,48$ об/хв., $Q=53,82$ кг/год.).

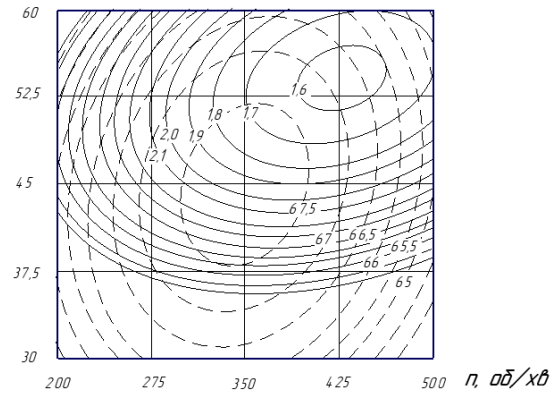
Зі збільшенням подачі зерна спостерігається зменшення пропускну здатності і збільшення питомої енергоємності E кВт·год./кг. Це можна пояснити тим, що збільшення маси зерна в живильній горловині машини збільшує тиск зернової маси зерна на крайній ряд зерна в поясі що подає, порушуючи їх орієнтування, а значить і зростання питомої енергоємності з одночасним зменшенням процентного виходу повноцінного продукту.

$Q, \text{ кг/год}$



а

$Q, \text{ кг/год}$



б

Рис. 3.12. Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують вплив частоти обертання ротора n (фактор x_1) і подачі зерна Q (фактор x_2) на: а – питому енергоємність E і пропускну здатність P ; б – питому енергоємність E і відсоток маси залишку на ситі $\Phi 2,5 \text{ М}$

Підтвердження цього припущення можна бачити на рис. 3.13. Знімок зроблений після зупинки ротора зі знятою верхньою кришкою дрібнювача на поверхні нижнього диска 1. Крайній ряд містить зерна 2 частково подрібнені але не розколоті по борозенці, що підтверджує додаткові витрати на подрібнення.



Рис. 3.13. Поверхня нижнього диска при знятій верхній кришці:
1 – поверхня нижнього диска; 2 – зерна частково подрібнені

При збільшенні зазору між дисками питома енергоємність зростає. Це пов'язано з тим що частинки подрібненого зерна потрапляють на плоскі поверхні дисків (поверхню між сусідніми рифлями) тим самим викликаючи додаткове збільшення енергії на їх подрібнення (до процесу сколювання додається процес стирання).

За результатами аналізу рівнянь (3.3), (3.4) і (3.5) методом накладання двовимірних перерізів поверхонь відгуку (рис. 3.10, 3.11, 3.12) прийнято компромісне рішення і визначені раціональні значення досліджуваних факторів з умови досягнення максимального відсотка виходу повноцінного продукту і мінімальної питомої енергоємності. Частота обертання ротора $n=336,5$ об/хв.; подача зерна $Q=46,5$ кг/год.; зазор між дисками $h=0,3$ мм.

Продуктивність здрібнювача можна збільшити, за допомогою механізму, який примусово збільшить подачу зерна в робочу камеру машини (простір між дисками).

Загальні висновки

1. Визначено залежності, що дозволяють визначати коефіцієнт заповнень ковшів при зачерпуванні з насипу та при їх завантаженні проти ходу і по ходу тягового елемента.

2. Встановлено, що низьке значення коефіцієнта заповнення ковшів, при зачерпуванні з насипу, є наслідок витіснення шару зерна, під дією відцентрової сили, що виникає при обертанні ковшів у вертикальній площині, щодо центру обертання.

3. Для отримання оптимальних значень коефіцієнтів заповнення ковшів необхідно погоджувати швидкість досипаючого потоку з лотка зі швидкістю тягового елемента. З'ясовано умови попадання досипаючого потоку в ківш і залежність кроку ковшів від його максимальної висоти.

4. Складено фізичні моделі процесів зачерпування при різних режимах роботи норії. Отримано аналітичні залежності для визначення складових опор зачерпування і коефіцієнтів зачерпування в залежності від специфічних фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів і швидкості руху ковшів.

5. Проаналізовано кілька важливих схем поділу частинок при ударі, як об вертикальну, і об похилу площини. Показано, що спосіб сепарації сумішей за пружними властивостями є недостатньо вивченим, що не враховує особливостей форми та деформацій під час удару, часу зіткнення та площі контакту. Розгляд задачі на прикладі удару кулястої частинки дозволяє поширити її на тіла форми.

6. Показано переваги багаторазового удару перед одноразовим за рахунок опосередкування по поверхні частинки точок контакту з площиною, що істотно підвищує якість сепарації завдяки тому, що останню зумовлюватиме середнє значення коефіцієнта відновлення швидкості. Ця перевага реалізована у розробленому та виготовленому багатоярусному

ударному сепараторі.

7. Аналіз варіаційних кривих дальності польоту насіння удару для всіх без виключення культур свідчить про значний розбіг цього показника як по фанері технічній так і по сталі, зі зміщенням в сторону більших величин на фанері технічній. При цьому більш округле насіння мають більшу величину польоту після удару і вона є більш сталою. Фанеру технічну можна рекомендувати в якості робочої поверхні багатоярусного ударного сепаратора.

8. Встановлено, що при сепарації на багатоярусному ударному сепараторі маса 1000 зернин усіх культур зростає від 1 до 5 лотка, при цьому більш пружні насіння потрапляють в 3-5 лотки з більшою масою 1000 зернин, схожістю та енергією проростання і можуть бути рекомендовані для сівби.

9. Визначені оптимальні значення параметрів сепарації зерна на гравітаційному багатоярусному ударному сепараторі: поперечний кут $\alpha = 34^\circ$, поздовжній кут $\beta = 6^\circ$ і подача зерна $Q = 60$ кг/год.

10. Розроблено експериментальну установку для дослідження сколювання зерна пшениці при проведенні процесу подрібнення. Величину обертів на валу двигуна встановлювали перетворювачем частоти ATV312HU15N4 за допомогою програми SoMove_V2.6.2 встановленої на ноутбучі. Крім цього за допомогою програми визначали потужність на валу двигуна під час проведення експерименту.

11. Зазначені середні значення руйнівних навантажень в залежності від площі поперечного перерізу змінюються істотно і для зернівки з більшою площею відколу необхідні більш високі зусилля. Середні значення напруг для зерна пшениці складають $7,4$ Н/мм², а середні значення напруг для зерна пшениці розколотої поперек осі зернівки складають $10,0$ Н/мм², тобто скол зерна уздовж борозенці є менш енергоємним.

12. Для визначення значення і інтервалу фактора n проведено однофакторний експеримент. Встановлено що максимальний вихід продукта відповідає $n=355,3$ об/хв. на валу двигуна при подальшому зростанні числа

оборотів йде падіння виходу продукту з одночасним зростанням потужності.

13. Встановлені інтервали варіювання факторів: частота обертання диска n , 200...500 об/хв., подача зерна, Q , 30...60 г/хв., зазор між дисками, h , 0,1...0,5 мм. Визначені значення факторів, що забезпечують мінімальну енергоємність і максимальну прохідну здатність при максимальному виході повноцінного продукту . Частота обертання ротора $n=336,5$ об/хв.; подача зерна $Q=46,5$ кг/год.; зазор між дисками $h=0,3$ мм.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакум В.В. Обоснование параметров технологического процесса сепарации семенных смесей на фрикционных неперфорированных колеблющихся поверхностях: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.20.01 /Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. - Харьков, 1984. - 20 с.
2. Высоцкий В.К. Сортирование семян по упругости //Селекция и семеноводство. - 1964. - №4. с 1214.
3. Жмай Л.Г. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян овощных культур на вибрационной семяочистительной машине: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.20.01 /Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. - Харьков, 1990. -20 с.
4. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. - М.: Колос, 1978. - 287 с.
5. Птицын С.Д. Сепарация зерна при ударе: Доклады всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина. Вып. 3. - М.: Изд-во МСХ СССР, 1948. - С. 44-48.
6. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А., Попухин А. И. Подъемно-транспортные машины зерноперерабатывающих предприятий. М. Агропромиздат, 1985. 320 с.
7. Пунков С. П., Стародубцева А. И. Хранение зерна, элеваторно-складское хозяйство и зерносушение. М.: Агропромиздат, 1990. 367 с.
8. Злочевский В. Л., Борисов А. П. Исследование прочностных свойств зерновых материалов. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 180 с.
9. Богомоллов А. В., Белостоцкий В. А., Лукьянов И. М. Определение прочности зерна пшеницы при ударе и выбор кинематического режима работы нории. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Випуск № 152. Матеріали XV*

Міжнародної наук.-практ. конф. «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв». Харків, 2014. С. 26–33.

10. Li Yaoming, Chandio Farman Ali, Ma Zheng, Lakhia Imran, Sahito Abdul Razaque et. al. Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2018. № 11. P. 35-41. 10.25165/j.ijabe.20181103.3737.

11. Gupta R. K., Das S. K., Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading, *J of Food Engg*, 2000. № 46. P. 1–8.

12. ASTM E 112 – 10 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 26 p.

13. Таубер Б.А. Подъемно-транспортные машины. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Экология, 1991. 528 с.

14. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підйимальних і транспортувальних машин. Підручник для ВУЗів. Київ: Вища школа, 2009. 248 с.

15. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А. Подъемно-транспортные установки: учебник / по направлению «Пищевая инженерия». Москва: КолосС, 2007. 465 с.

16. Лебедев А. Е. К расчету процесса ударного взаимодействия потока твердых частиц с преградой. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*, 2011. Т. 54. Вып. 6. С. 105–106.

17. Korzen, Z., Dudek, K.: Reclaiming with a high-speed bucket wheel with centrifugal discharge. *Bulk Solids Handling*, 1991. № 11(3). P. 615–626.

18. Ловейкин В. С., Бортун В. Н. Оптимізація режиму пуску ківшового елеватора при транспортуванні подрібненої деревени та продуктів її переробки. *Науковий вісник НУБІП України. Серія: Техніка і енергетика АПК*. К., 2012. Вип.170. Ч.1. С. 160–169.

19. Птицын С.Д. Сепарация зерна при ударе / С.Д. Птицын // Доклады ВАСХНИЛ, 1948.– №3.– С. 57–66.

20. Птицын С.Д. Сепарация зерна при ударе / С.Д. Птицын //Труды ВИМ, 1949.–Т. 12.–С. 79–84.
21. Попов Н.Ф. Сортирование зерна по влажности и спелости /Н.Ф. Попов // Селекция и семеноводство, 1948. – № 10.–С. 79–84.
22. Бобров С.Ф. Разделение зерна по принципу упругости и зависимости от угла наклона отражательных плиток /С.Ф. Бобров //Науч.записки Херсонского СХИ. – Киев, 1959.–Вып. 8.–С. 127–136.
23. Рябов П.И. Разделение семян по их упругим свойствам /П.И. Рябов // Тр. Саратовского ин-та механ.сельск.хоз-ва.-Саратов,1957. –Вып.П, С.31–37.
24. Высоцкий В.К. Сортирование семян проса по упругости / В.К. Высоцкий //Селекция и семеноводство, 1961. –Т. 4.–С. 63–67.
25. Шукюров С.А. Сортирование семян сои по упругим свойствам: Автореферат дис. ... канд.техн.наук. – Новосибирск: 1984. – 19 с.
26. Вибрационная машина для очистки и сортирования зерна: А.с. № 1514424, СССР, МКИ В 07 В 13/00 / П.М.Заика, А.В. Козаченко, А.В.Богомолов, А.Д.Михайлов. - № 4349058/29-03; Заявл. 28.12.87; Оpubл. 15.10.89, Бюл. № 38. - 3 с.
27. Вибрационный сепаратор для разделения смеси семян по упругим свойствам: А.с.№ 1459738 СССР, - МКИ В 07 В 9/00 / П.М.Заика, В.М.Лукьяненко, А.В.Богомолов и др. - № 4214968/29-03; Заявл. 23.03.87; Оpubл. 23.02.89,Бюл. № 7. - 3 с.
28. Устройство для сортировки семян: А.с. № 122233 СССР, МКИ В 07 В 13/00 / П.М.Заика, С.Д.Бакеев, А.В.Богомолов, И.В.Чалый. - № 3728592/29-03; Заявл. 16.04.84; Оpubл. 7.04.86, Бюл. № 13. - 3 с.
29. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. - М.: Колос, 1978. - 287 с.
30. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издательство «Наука», М., 1976 г. с. 278

31. Мачихина Л.И. Научные основы продовольственной безопасности зерна (хранение и переработка).— М.: ДеЛи принт, 2007. — 382с.
32. Беркутова Н.С. О морфологическом строении оболочек и химическом составе зерна пшеницы целинного края / Н.С. Беркутова, У.Д. Казаков // Известия вузов. Пищевая технология. – 1964. – №6. – С.17-19.
33. Бутковский В.А. Мукомольное производство. – М.: Агропромиздат, 1990. 272 с.
34. Бутковский В.А., Мерко А.И., Мельников Е.М. Технологии зерноперерабатывающих производств. - М.: Интеграф сервис -1999 - 472 с.
35. Быкова А.С., Ващенко Е.В.. Учебно-методическое пособие по микробиологии для студентов направления подготовки 6091501 «Товароведение» – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2016. – с.181.
36. Мерко И.Т., Моргун В.А. Научные основы и технология переработки зерна. - О. 2001. – 285 с.
37. Сакович Г.С., Безматерных М.А. Физиология и количественный учет микроорганизмов. Учебное электронное текстовое издание. Подготовлено кафедрой «Технология органического синтеза» Научный редактор: доц., канд. хим. наук И.С. Селезнева ГОУ ВПО УГТУ–УПИ Екатеринбург, 2005 164с.
38. Брюховецкий А.Н., Чурсин В.Ю. Факторы, влияющие на энергоемкость процесса измельчения кормов в измельчителе роторного типа ирт-ф-25/40 "фермер" с применением универсального рабочего органа. В сборнике: Современные научно-практические решения XXI века Материалы международной научно-практической конференции. Общая редакция: В.И. Оробинский, В.Г. Козлов. 2016. С. 246-251.
39. Верещинський О.П. Техніко–економічна оцінка ефективності сортових помелів пшениці / О.П. Верещинський // Хранение и переработка зерна. – 2009. – №9. – С.34-35.

40. Матвийчук Н.М. Приоритеты реализации политики энергосбережения в Украине. ECONOMICS AND MANAGEMENT. Juvenis scientia 2016 № 1 Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки. Луцк. Матвийчук Н.М. Приоритеты реализации политики энергосбережения в Украине. ECONOMICS AND MANAGEMENT. Juvenis scientia 2016 № 1 Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки. Луцк.

41. Фролов Е. А., Богомолова В. П., Иркиенко В. И. Повышение эффективности функционирования малых хозяйств агропромышленного комплекса // Вісник 17 Харків. держ. техн. ун-ту сіл. госп-ва. - Харків : ХДТУСГ, 2002. - Вип. 9: Сучасні напрямки технології та механізації процесів перероб. та харч. вир-в. - С. 252-259.

42. Богомолов О.В., Сафонова О.Н., Чудик Ю.В., Иркиенко В.И. Получение мучных смесей с помощью универсальной малогабаритной мини-мельницы. Вестник ХГПУ. Выпуск 123. 2000г.

43. Филин В. обоснование разработки оборудования для мини-цехов по переработке зерна. Журнал: Хлебопродукты (Москва) Номер: 2 Год: 2009 47-49 с.

44. Филин В.М., Филин Д.В. Многофункциональные машины для миникрупцехов // Хлебопродукты. – 2002. – № 5. – С. 12–13.

45. Роева Н.Н. Безопасность продовольственного сырья и продуктов питания. Учебно-практическое пособие. – М., МГУТУ, 2009. 156с. <https://studfile.net/preview/6894094/>

46. . Jessica Anderson Whole grain wheat – effects of peeling and pearling on chemical composition, taste and colour Institutionen för Livsmedelsvetenskap Publikation nr 311 Swedish University of Agricultural Sciences Uppsala 2011 Department of Food Science.

47. Богомолов О.В., Ірклієнко В.І. Інноваційна технологія виробництва крупи нового виду // Вісник Харківського національного

технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. Випуск 207. С. 68-75.

48. Богомолов О.В., Ірклієнко В.І. Новий напрямок в технології переробки зерна пшениці. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. Випуск 207. С. 5-12.

49. Егоров Г. А. Практикум по технологии муки, крупы и комбикормов. – М.: Агропромиздат, 1991. – 208 с.

50. Федотов В. А. Связь морфолого-анатомических характеристик зерна пшеницы с технологическими свойствами. Опубликовано в 2017, Выпуск № 12 (66) Декабрь 2017, 21-28.

51. Dobraszczyk B.J. 1994 Fracture mechanics of vitreous and mealy wheat endosperm. J. Cereal Sci. 19, 273–282. (doi:10.1006/jcrs.1994.1034) Google Scholar Endosperm texture in wheat. J. Cereal Sci. 36, 327–337. (doi:10.1006/jcrs.2002.0468).

52. Enoch T. Quayson, William Atwell, Craig F. Morris, Alessandra Marti Empirical rheology and pasting properties of soft-textured durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. durum) and hard-textured common wheat (*T. aestivum*) Journal of Cereal Science Volume 69 May 2016 Pages 252-258. DOI: 10.1016/j.jcs.2016.03.017.

53. Егоров Г. А., Линниченко В. Т., Мельников Е. М., Петренко Т. П. - М. Практикум по технологии муки, крупы и комбикормов. - 2-е изд., доп. и перераб. - : Агропромиздат, 1991. - 208 с.: ил.

54. Мерко И.Т. Структура и эффективность технологических процессов производства муки [Текст] / И.Т. Мерко, В.А. Моргун, Н.Е. Погирной. – М.: Колос, 1983. – 239с.

55. Беркутова Н. С., Швецова И. А. Микроструктура пшеницы / – М.: Колос, 1977. – 122 с.).

56. Mark Andrew Edwards. 'Morphological features of wheat grain and genotype affecting flour yield', PhD thesis, Southern Cross University, Lismore, NSW. Copyright M Edwards 2010.

57. Bofang Yan, Marie-Pierre Isaure, Sandra Mounicou, Hiram Castillo-Michel, Wout De Nolf, Christophe Nguyen, Jean-Yves Cornu. Cadmium distribution in mature durum wheat grains using dissection, laser ablation-ICP-MS and synchrotron techniques, *Environmental Pollution* (2020), doi: <https://doi.org/10.1016>

58. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод : учеб. пособие / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М. : Academia, 2004. – 248 с.

59. Мигуренко Р. А. Научно-исследовательская работа: учебнометодическое пособие / Р. А. Мигуренко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт дистанционного образования (ИДО). – 2-е изд., стер. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – 184 с.

60. Богомоллов О.В., Ірклієнко В.І. Новий напрямок в технології переробки зерна пшениці. // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2019. Випуск 207. С. 5-12.

61. Бабин А.В., Ракипов Д.Ф. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург 2014. Информационный портал УрФУ <https://www.urfu.ru/>.

62. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издательство «Наука», М., 1976 г. с. 278

63. Кононюк А.Е. Основы научных исследований том 2. Издательство «КТН» 04210, г.Киев, пр. Героев Сталинграда, 8, корпус 8, оф. 1. Киев 2010

64. Кононюк А.Е. Основы научных исследований том 3. Издательство «КТН» 04210, г.Киев, пр. Героев Сталинграда, 8, корпус 8, оф. 1. Киев 2010
65. Кононюк А.Е. Основы научных исследований том 4. Издательство «КТН» 04210, г.Киев, пр. Героев Сталинграда, 8, корпус 8, оф. 1. Киев 2010
66. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента. М., "Легкая индустрия", 1974, 262с.
67. Беркутова Н.С. Качество муки в зависимости от микроструктуры алейронового слоя зерновки пшеницы / Н.С. Беркутова // Мукомольно-элеваторная промышленность. – 1967. – №. – С.25.