



друкарня-видавництво
ТВОРИ
творюємо разом

ISBN 978-617-558-140-7



www.tvoru.com.ua

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТА ЕКОЛОГООРІЄНТОВАНОГО ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОРМОВИРОБНИЦТВА АПК УКРАЇНИ



**Віктор Мазур
Ганна Панцирева
Ігор Купчук
Сергій Бурлака
Євгеній Волинець**

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТА ЕКОЛОГООРІЄНТОВАНОГО ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОРМОВИРОБНИЦТВА АПК УКРАЇНИ

Монографія

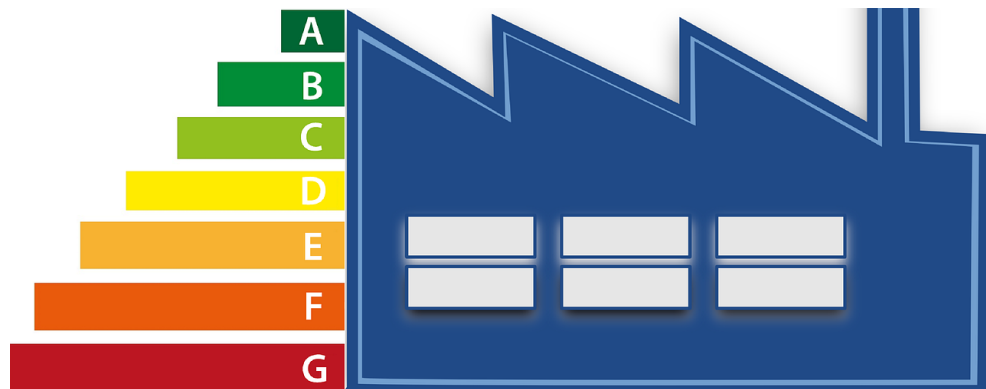
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



ВІКТОР МАЗУР
ГАННА ПАНЦИРЕВА
ІГОР КУПЧУК
СЕРГІЙ БУРЛАКА
СВГЕНІЙ ВОЛИНЕЦЬ

**РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТА ЕКОЛОГООРІЄНТОВАНОГО
ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
КОРМОВИРОБНИЦТВА АПК УКРАЇНИ**

Монографія



*Видано за рахунок видатків загального фонду державного бюджету
прикладного дослідження на тему: «Розробка науково-технологічного
забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання
потенціалу біоресурсів» (0124U000444)*

Вінниця 2024

УДК 631.171:658.011.56

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (Протокол № 4 від 22 жовтня 2024 р.).

Рецензенти:

Володимир Кравчук, доктор технічних наук, професор, академік НААН України, завідувач лабораторії науково-технічного забезпечення технологій виробництва, переробки та використання біомаси Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України;

Руслан М'ялковський, доктор с.-г. наук, професор Подільського державного аграрно-технічного університету;

Олексій Алексеев, кандидат с.-г. наук, доцент Вінницького національного аграрного університету.

Мазур В.А., Панцирева Г.В., Купчук І.М., Бурлака С.А., Волинець Є.О. Розробка енергоефективного та екологоорієнтованого техніко-технологічного забезпечення для кормовиробництва АПК України. Вінниця. ВНАУ. 211 с.

У монографії представлені дослідження, які формують підґрунтя для підвищення ефективності виробництва продукції тваринництва шляхом розробки екологоорієнтованих, високоефективних технологій вирощування кормових культур та енергоефективного техніко-технологічного забезпечення виробництва кормів для сільськогосподарських тварин. Автори монографії – Віктор Мазур, Ганна Панцирева, Ігор Купчук, Сергій Бурлака, Євгеній Волинець є виконавцями прикладного дослідження на тему: «Розробка науково-технологічного забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання потенціалу біоресурсів» (Панцирева Г.В., Купчук І.М., Бурлака С.А., Мельник М.В., Коробко А.А., Волинець Є.О.), номер державної реєстрації 0124U000444. Наукові дослідження колективу авторів спрямовані на відновлення родючості ґрунту на грубо рекультивованих угіддях, що зазнали впливу бойових дій (створення ефективних механізмів підвищення родючості ґрунтів за рахунок акумуляції атмосферного азоту та накопичення органічної речовини при вирощуванні зернобобових культур задля посилення процесів гуміфікації) із одночасним удосконаленням технології кормовиробництва задля поліпшення конверсії кормів в продукцію тваринництва.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
Розділ 1. Сучасні тенденції кормовиробництва в контексті формування високопоживної кормової бази та енергоефективної переробки	6
1.1. Наукові основи сучасних тенденцій розвитку кормовиробництва України	6
1.2. Формування ринку зернобобових культур та продукції її переробки на корм в Україні	13
1.3. Основні технологічні прийоми переробки зернобобових культур при виробництві високобілкових кормів	21
Розділ 2. Методика проведення експериментальних та польових досліджень	29
2.1. Методика та обладнання для проведення експериментальних досліджень процесів подрібнення та теплової обробки в технології кормовиробництва	29
2.1.1. Розробка конструкції енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна	29
2.1.2 Методика та вимірювальне обладнання для дослідження процесу подрібнення	32
2.1.3 Методика та вимірювальне обладнання для дослідження процесу термічної обробки	38
2.2. Методика проведення польових досліджень	43
Розділ 3 агроекологічний потенціал зернобобових культур в Україні	47
3.1. Наукові основи органічного виробництва сої в Україні	47
3.2. Агроекологічна оцінка сортових ресурсів сої	58
Розділ 4. Продуктивність та якість урожаю зернобобових культур	82
4.1. Урожайність та якість насінневої продукції сої	82
4.2. Економічна оцінка технологій вирощування зернобобових культур	91

4.3. Біоенергетична оцінка технологій вирощування зернобобових культур	96
Розділ 5 теоретичні основи процесу подрібнення сировини в технології кормовиробництва	101
5.1. Складання рівнянь руху елементів вібродискової дробарки	101
5.2. Визначення основних експлуатаційних параметрів машини	117
5.3. Дослідження реологічних характеристик сипкого середовища	121
5.4. Обґрунтування закономірностей процесу руйнування	132
Розділ 6. Основні результати експериментальних досліджень енергоефективних процесів приготування кормів для сільськогосподарських тварин	143
6.1 Дослідження амплітудно-частотних та енергетичних параметрів вібраційної дискової дробарки	143
6.2. Визначення технологічних параметрів процесу подрібнення зерна вібраційною жисковою дробаркою	146
6.3. Статистична обробка результатів експериментальних досліджень процесу подрібнення зерна вібраційною дисковою дробаркою	148
6.4. Експериментальне обґрунтування режимів роботи дробарки за якісними показниками подрібненого корму	160
6.5. Експериментальні дослідження режимів сушіння зернобобових трав в технології кормовиробництва для сільськогосподарських тварин	167
ПІСЛЯМОВА	173
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	176
АВТОРСЬКА ДОВІДКА	198

ПЕРЕДМОВА

Сучасний стан вітчизняного ринку кормів та кормових ресурсів ставить під сумнів ефективне виконання ним функції забезпечення продовольчої безпеки держави в частині виробництва продукції тваринництва. На сьогоднішній день ситуація на внутрішньому ринку кормів характеризується переважанням використання кормів власного виробництва, посиленням конкуренції між вітчизняними товаровиробниками та постачальниками біологічних добавок для кормів та низьким рівнем розвитку промислового кормовиробництва. Вказані явища посилюються прагненнями України до інтенсифікації галузі кормовиробництва на основі трансферу інновацій та участі у процесах міжнародної економічної інтеграції. При цьому значна частина кормових ресурсів користується попитом на зовнішньому ринку (шрот, зернофураж, насіння багаторічних трав тощо), хоча далеко не завжди вітчизняна експортована продукція виявляється більш конкурентоспроможною на світовому ринку.

Сучасні підходи у розвитку кормовиробництва в Україні залишилися постійними, орієнтованими виключно на курс розвитку українського тваринництва, яке визначає і кількісні, і якісні критерії виробництва кормів, його напрями, обсяги, перспективи. За таких ізольованих умов розвитку, українське кормовиробництво позбавлене статусу самостійної галузі сільського господарства, що несе за собою прогалини у політиці держави щодо запровадження стабілізуючих, стимулюючих заходів.

Автори монографії розкривають пипання стосовно механізмів і напрямів розробки енергоефективного та екологоорієнтованого техніко-технологічного забезпечення для кормовиробництва вітчизняного АПК України які можуть слугувати науково-методичним підґрунтям для вирішення практичних завдань оптимізації задля розробки практичних рекомендацій з удосконалення технологічних прийомів вирощування та переробки кормових культур.

Розділ 1. СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ КОРМОВИРОБНИЦТВА В КОНТЕКСТІ ФОРМУВАННЯ ВИСОКОПОЖИВНОЇ КОРМОВОЇ БАЗИ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ ПЕРЕРОБКИ

1.1. НАУКОВІ ОСНОВИ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ КОРМОВИРОБНИЦТВА УКРАЇНИ

У вирішенні проблем соціально-економічного розвитку країни кожна з галузей економіки посідає важливе й відповідне місце. Одні безпосередньо створюють національні ресурси, інші формують умови й інфраструктуру для їх виробництва, доступності, максимальної користі усім верствам населення. Аграрне виробництво є не лише одним із ключових секторів української економіки, забезпечуючи національну продовольчу безпеку, але й прямо впливає на світовий агропродовольчий сектор і глобальну продовольчу безпеку. Вторгнення РФ в Україну посилило негативний вплив після пандемії COVID-19, екстремальних кліматичних явищ на стійкість світової продовольчої системи, тоді як останнім часом роль Чорноморського регіону на світових продовольчих ринках зростала [1, 2, 10-11].

За роки незалежності України, забезпечення кормами галузі тваринництва та їх ефективне використання залишалися складною і невирішеною проблемою. Військова агресія РФ на території України, економічна, геополітична, кліматична нестабільність, глобальна продовольча криза загострила довоєнні проблеми і зумовила виникнення нових загроз і викликів у кормовиробництві. У зв'язку із сьогоdnішніми реаліями проблема забезпечення населення високоякісною їжею стає все більш глобальною, зростає попит на харчові продукти з високим вмістом білка хорошої якості, а також потреба у збалансованих білками кормах для худоби [12].

Потенціал України – це сприятливі ґрунтово-кліматичні умови для виробництва якісної, безпечної продукції та наявність ефективних логістичних шляхів сполучення. У результаті дослідження встановлено, що ключовими факторами присутності України на ринку кормів в ЄС є потреба у

високобілкових кормах. Збільшення продуктивності сільськогосподарських тварин і рентабельності виробництва продукції тваринництва вимагає збалансованого харчування і зменшення вартості кормів у структурі витрат завдяки використанню високобілкових кормів. Для України важливо сприяти розвитку ринку високобілкових і сипучих кормів на промисловій основі, а також розвитку органічного виробництва кормів і тваринництва. Розвиток конкурентоспроможного ринку кормів в Україні та розв'язання екологічних і соціальних проблем інтенсивного тваринництва вимагає вдосконалення законодавства, щоб відповідати вимогам директив ЄС щодо виробництва, переробки та ефективного використання кормових ресурсів [13].

Петриченко В. та інші [14]. здійснили аналіз потенційного впливу військової агресії із врахуванням невизначеності тривалості на глобальну продовольчу безпеку за моделлю торгівлі загальної рівноваги. Мазур В. та ін. [15] зазначає, що війна в Україні призвела до серйозної глобальної продовольчої кризи через комплексні проблеми в постачанні та підвищення цін на сільськогосподарську продукцію, яка виникла через COVID-19 і політично-економічні труднощі. Кризові явища на глобальних ринках продовольства та добрив, пов'язані з воєнними діями в Україні, мають широкомасштабні та довгострокові наслідки для цінової політики та глобальної продовольчої безпеки. У доповіді «Assessing Food Insecurity in 2022/23 at National and SubNational Levels in 50 Countries Vulnerable to the Effects of the Ukraine-Russia Crisis» опублікованої FAO (2022), зазначається, що нинішній конфлікт між Україною та РФ збільшує ризики подальшого погіршення ситуації з продовольчою безпекою на глобальному рівні.

Сучасний ринок кормів характеризується переорієнтацією на виробництво високобілкових культур для вирішення проблем харчового та кормового протеїну зі стійкою тенденцією до розвитку агротехнологій, виробництва та переробки. Зростання продуктивності сільськогосподарських тварин і рентабельності продукції тваринництва вимагає збалансованих раціонів і зниження вартості кормів у структурі витрат за рахунок використання

високопротеїнових кормів. Для України важливо сприяти розвитку ринку високопротеїнових і сипучих кормів на промисловій основі, а також розвитку виробництва органічних кормів і тваринництва.

Кормовиробництво є одним із елементів національного продовольчого ланцюга, що забезпечує тваринництво якісними і безпечними кормами. Враховуючи динамічність розвитку аграрного сектору, ринку кормів, економічних, геополітичних і кліматичних викликів, виникає потреба у дослідженні тенденцій кормовиробництва з урахуванням ризиків і загроз сучасності. Тому завдання даного дослідження полягало у детальному вивченні ситуації, що склалася на ринку кормів України, а також аналіз економічних, політичних, продовольчих, глобальних викликів і проблем аграрного виробництва [16].

Сучасний стан кормовиробництва характеризується зменшенням його потенціалу, що відбувається на тлі загального скорочення темпів розвитку тваринництва, зниження продуктивності праці в цій галузі через обмеження можливостей оновлення матеріально-технічної бази та зростання частки вартості кормів в собівартості продукції тваринництва. Першочерговим завданням на шляху формування системи сталого розвитку в Україні стоїть нарощування обсягів виробництва продукції тваринництва. Українське тваринництво розвивається двома способами: екстенсивним та інтенсивним. Перший передбачає призупинення процесу зменшення поголів'я сільськогосподарських тварин і формування високопродуктивного стада, необхідної кормової бази й гідного утримання. Другий базується на підвищенні продуктивності сільськогосподарських тварин за рахунок ефективного використання високоякісних кормів і збалансованих раціонів. Сьогодні актуальними залишаються як перший, так і другий спосіб, оскільки ситуація в тваринництві критична і вимагає не лише якісних, а й кількісних змін [1, 17].

За період 2000-2023 рр. поголів'я великої рогатої худоби (ВРХ) зменшилося на 75,6 % (в тому числі корови на 72,6 %), свині на 34,7 %, спостерігається нарощування поголів'я птиці на 36,2%. Однак, внаслідок

російського вторгнення на територію України в 2022 році порівняно з попереднім роком втрачено 15-20 % поголів'я сільськогосподарських тварин, зокрема відносний спад поголів'я на 1 січня 2023 р. у порівнянні з даними на 1 січня 2022 р становив: 15 % ВРХ, з них 12 % корів, 10 % свиней та 13 % птиці. У такій ситуації товаровиробники змушені переорієнтовуватися, шукати альтернативні шляхи для відновлення галузі. Нарощування поголів'я сільськогосподарських тварин з метою вирішення продовольчої безпеки є екстенсивним шляхом розвитку, тому воно має відбуватися в раціональних межах з урахуванням перспектив максимального використання генетичного потенціалу сільськогосподарських тварин [18-19].

Разом з тим, дослідження науковців та практика окремих господарств свідчить, що дана галузь є досить прибутковою та пріоритетною для України. Поряд з негативними вищеперерахованими тенденціями спостерігається нарощування продуктивності корів, за останні сім років продуктивність корів у всіх категоріях господарств зростає з 4644 кг на рік до 5435 кг, або на 17 %, навіть в умовах воєнного 2022 р. приріст продуктивності склав 5,4 % до попереднього 2021 р. Зрозуміло, що у сільськогосподарських підприємствах продуктивність корів зростає швидшими темпами відповідно на 14 % і 4,5 %. Головними завданнями для поліпшення ринку тваринницької галузі є формування ринку високоякісних безпечних кормів [20].

Історично склалося, що українське кормовиробництво ніколи не розвивалося, як автономна галузь, хоча світова практика переконує у реальних можливостях виробників кормів різних видів виступати самостійними суб'єктами, як внутрішнього, так і зовнішнього аграрного ринку, орієнтуючись на ринкове середовище, потреби споживачів (як виробників-тваринників, так і різних посередницьких структур торговельної ланки), а також власний виробничий потенціал і результати внутрішніх маркетингових досліджень. На відміну від них, господарства населення функціонують за рахунок самозабезпечення і використання громадських пасовищ, і в такий спосіб утримують відносний баланс на ринку кормів. Однак, в цілому переміщення

виробничих потужностей на господарства населення має негативні наслідки, оскільки характеризується веденням екстенсивного способу господарювання і базується насамперед на високій трудомісткості виробничого процесу [10, 21].

Стан розвитку польового кормовиробництва в Україні за останні кілька років залишається незмінним і характеризується скороченням посівних площ кормових культур. За період 1990-2021 рр. площа під кормовими культурами зменшилася з 11,9 млн га до 1,5 млн га або на 87,%, за період 2000-2021 рр. на 78,2%. За останні 12 років значним чином зменшилася площа посіву трав: багаторічних – на 2036,7 тис. га або на 71,2%, однорічних – на 1489,3 тис. га або на 84,9%. Однак, зросла частка посіву багаторічних трав в загальній площі посіву кормових культур на 12,9%, а однорічних трав зменшилася на 7,6%. У цілому частка кормових культур у загальній посівній площі зменшилась за період 2000-2021 рр. з 26% до 5,4%, або на 20,6% (рис. 1.1).

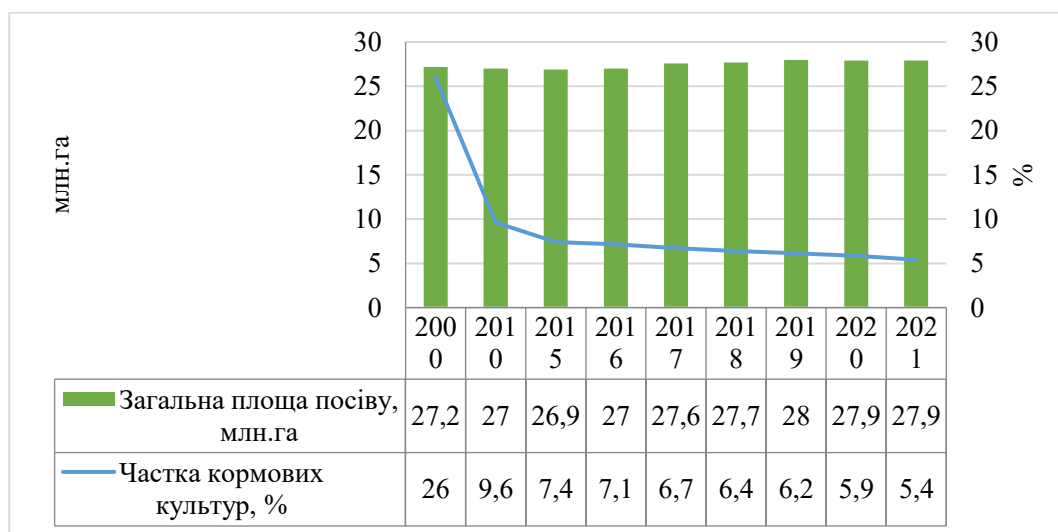


Рисунок 1.1. Частка кормових культур у загальній посівній площі в Україні

Сучасні підходи у розвитку кормовиробництва в Україні залишилися постійними, орієнтованими виключно на курс розвитку українського тваринництва, яке визначає і кількісні, і якісні критерії виробництва кормів, його напрями, обсяги, перспективи. За таких ізольованих умов розвитку, українське кормовиробництво позбавлене статусу самостійної галузі сільського

господарства, що несе за собою прогалини у політиці держави щодо запровадження стабілізуючих, стимулюючих заходів. На корпоративному рівні також відсутні економічні мотиви для прояву інвестиційного інтересу як з боку внутрішніх бізнес суб'єктів, так і з боку зовнішніх.

Сучасний стан українського ринку кормів та кормових ресурсів ставить під сумнів ефективне виконання ним функції забезпечення продовольчої безпеки держави в частині виробництва продукції тваринництва. Кормозабезпечення базується на використанні кормів власного виробництва, посиленням конкуренції між українськими товаровиробниками та постачальниками біологічних добавок для кормів та низьким рівнем розвитку промислового кормовиробництва. Воєнна агресія РФ в Україні зумовила зростання цін на корми та енергоносії, дефіцит кормової сировини, проблеми у логістичних ланцюгах, що призводить до збільшення витрат на виробництво. Особливої уваги потребують питання пов'язані із нейтралізацією наслідків бойових дій в деокупованих регіонах, прифронтових територіях. Підвищення продуктивності кормових культур можливо досягти двома способами: оптимізацією структури посівних площ кормових культур на зрошуваних і неполивних землях та використанням енергоощадних технологій їх вирощування [21].

В Україні сформовано бази даних перспективного селекційного матеріалу кормових культур. Щороку українськими науковцями і селекціонерами створюються і впроваджуються нові високопродуктивні сорти зернофуражних культур, бобових і злакових трав з підвищеними якісними показниками і врожайністю. Крім того, кормові культури можуть використовуватися для рекультивації деградованих, малопродуктивних та техногенно забруднених земель, ведення органічного землеробства, тощо. Досвід інших країн свідчить про те, що в умовах глобалізації розвивається товарне кормовиробництво, як найбільш оптимальний шлях ринкової орієнтації є формування спеціалізованих кормовиробничих підприємств, для забезпечення потреб малого і середнього агробізнес [22].

Науковообґрунтованим є польський досвід у розвитку кормовиробництва і

забезпечення тваринництва кормами в Україні. Зазначаючи, що виходячи із ключових трендів розвитку кормовиробництва у світі основні шляхи подальшого його розвитку в Україні стосуються підвищення рівня їхньої екологічної безпечності, розвитку використання активних кормових добавок, зокрема лікувального характеру, оптимізації структури кормів і годівлі тварин, підвищення якості кормів та можливості зміни структури їх виробництва, активізації виробництва кормів господарствами населення, – підвищення ефективності використання кормів, спеціалізації на кормовиробництві, інноватизації й цифровізації галузі, що стане в Україні повністю можливе після закінчення воєнних дій та забезпечення можливості безпечного господарювання на деокупованих територіях.

Для забезпечення стійкості сільського господарства, місцеві ресурси для сільськогосподарського виробництва і кормовиробництва, такі як земельні угіддя, ліси, водні екосистеми, мають бути захищені від забруднення та надмірного видобутку поживних речовин. Необхідне удосконалення стійких методів ведення сільського господарства за рахунок підвищення ефективності використання поживних речовин, збільшення повторної переробки поживних речовин, зменшення відходів, нарощування виробництва продукції сільського господарства, зменшення викидів парникових газів і підвищення продуктивності сільського господарства через інтеграцію галузей. Інтеграція сільськогосподарського виробництва має величезний потенціал для покращення переробки або відновлення поживних речовин. Дослідження підтверджують, що трансфер інновацій самовідновлюваного землеробства дозволяє раціонально використовувати природні ресурси як за екологічними, так і за економічними компонентами і досягати ефективного й довгострокового зростання.

Значний потенціал кормовиробничої галузі України дозволяє забезпечити не лише власні потреби у кормовому білку, але й вийти на світовий ринок кормів в якості постачальника продуктів глибокої переробки. Для вирішення проблем і викликів кормовиробництва, відновлення діяльності агровиробників необхідний комплексний підхід із підтримкою на місцевому, державному і міжнародному

рівнях. Необхідно здійснити реструктуризацію посівних площ, агротехнологічних підходів до технології вирощування кормів, використовувати спеціальне обладнання для розмінування земель сільськогосподарського призначення, закріплення на міжнародному і державному рівнях підтримки галузі кормовиробництва, розробка спеціальних програм для стимулювання розвитку тваринництва, перш за все молочного скотарства у сегменті малого і середнього агробізнесу. Необхідно розвивати стале екологічно безпечне кормовиробництво, що сприятиме розвитку усіх галузей сільського господарства і створюватиме можливості для розвитку виробництва з доданою вартістю [23].

1.2. ФОРМУВАННЯ РИНКУ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР ТА ПРОДУКЦІЇ ЇЇ ПЕРЕРОБКИ НА КОРМ В УКРАЇНІ

У будь-якій країні, незалежно від рівня розвитку її економічного потенціалу, продовольче забезпечення населення є однією з найважливіших соціально-економічних проблем. В Україні питання гарантування продовольчої безпеки країни знаходяться на стадії становлення. В умовах значного зниження рівня платоспроможного попиту населення в Україні все більше загострюється проблема дефіциту білка в харчуванні тварин [24].

Водночас, незважаючи на значний потенціал виробництва та переробки зернобобових культур в Україні, цей ринок перебуває нині лише на стадії становлення, а питання, пов'язані з розвитком цього виробництва та бізнесу у даній сфері, належать до маловивчених. Потребують поглибленого дослідження теоретико-методичні аспекти формування ринку сої, як основної зернобобової культури, та продуктів її переробки, комплексна оцінка його сучасного стану. Актуальними завданнями нині є розробка стратегії розвитку соєвого підкомплексу на основі гармонізації попиту та пропозиції, оптимізація розміщення посівних площ під соєю, обґрунтування необхідності та конкретних обсягів державної підтримки.

Станом на сьогодні зернова галузь зіткнулася не лише з наслідками пандемії коронавірусу, що паралізували світову торгівлю та логістику, а й також

певною мірою з досить суттєвими проблемами, спричиненими наслідками глобальних змін клімату та повномасштабною війною. Упродовж останніх років спостерігався дефіцит опадів на всій території України, а також і в умовах Лісостепу правобережного. Унаслідок цього розвивалася й поглиблювалася весняна повітряна засуха, яка на багатьох площах південних областей поєдналася з ґрунтовою. Дещо стабілізували ситуацію потужні опади у травні-червні, однак загальна тенденція щодо дефіциту вологозабезпечення зберігатиметься й надалі, адже цей рік уже перевершив попередні за аномально високою температурою повітря, яка на кілька градусів перевищує багаторічну норму. Тому досить складно робити висновки щодо перспектив зернової галузі, адже в одних регіонах ситуація є досить складною, як це сталося в Одеській області, в деяких виробництво буде на рівні середнього багаторічного рівня, а в інших можна очікувати певне зростання, враховуючи динаміку зміни посівних площ. Тому цілком можливо обґрунтувати прогнози з огляду на сучасний стан, основні тренди та тенденції [1-2].

За своїм біохімічним складом соя є унікальною, провідною білково-олійною культурою світового землеробства. Питома вага сої в структурі світового виробництва олійних культур становить 58%. За темпами росту і обсягів виробництва соя не має собі рівних у країнах Європи (рис. 1.2). Соя здатна швидко підвищувати культуру землеробства, відроджувати і поліпшувати родючість ґрунту, збільшувати обсяг доступних продуктів і кормів, вона займає центральне місце у вирішенні білка.

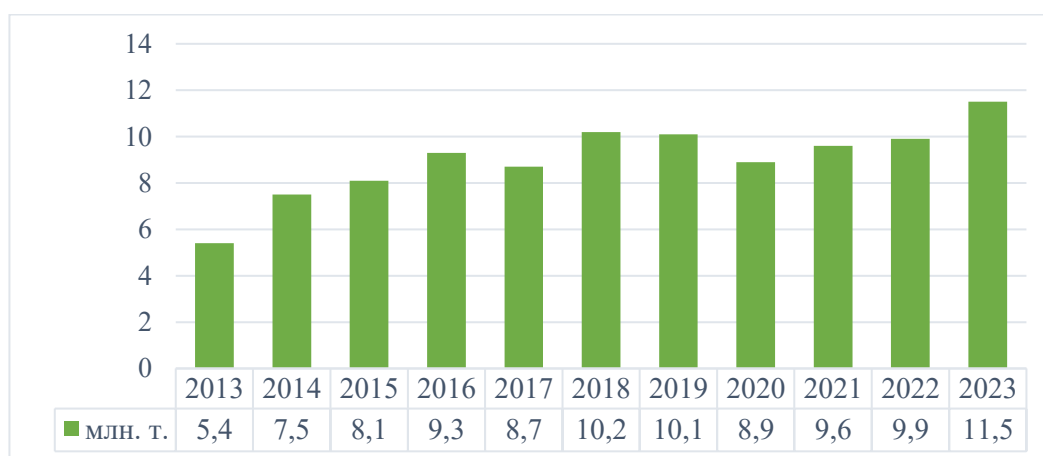


Рисунок. 1.2. Динаміка виробництва сої в країнах Європи (2013-2023 рр.)

Виробництво сої в країнах Європи має чітку тенденцію до зростання починаючи з 2020 р. Аналізуючи дані обсягів виробництва встановлено, що у 2023 р. темп росту сягнув 11,5 млн. т., що на 16,2 % більше ніж у 2022 р. За останнє десятиріччя найменше сої зібрано у 2013 р., порівнюючи з 2023 р. динаміка виробництва сої в країнах Європи зросла на понад 113,0 % (табл.1.1).

Таблиця 1.1

Обсяги виробництва сої в Україні та Європі, млн. т.

Європейська країна	Роки		Прибавка	
	2022	2023	млн. т.	%
Україна	3732	4410	+678	+18,2
Італія	610	1040	+430	+70,5
Сербія	440	404	-36	-8,3
Франція	380	420	+40	+10,5
Австрія	244	275	+31	+12,7
Хорватія	200	253	+53	+26,5
Угорщина	127	165	+38	+29,9
Словаччина	130	165	+34	+26,5
Всього	9870	11482	+1613	+18,2

Необхідно зазначити, що Україна є лідером по виробництву сої у Європі та входить у десятку найбільших світових країн виробників за 2013-2023 рр. [15, 23]. За даними Міністерства сільського господарства США (USDA) Україна піднялася в рейтингу на дві позиції, поступаючись лише Бразилії – 39 %, США – 37 %, Індії – 27 %, Аргентини – 11 %, Китаю – 10 %, Парагваю та Канаді [24]. Згідно зі звітом Іноземної сільськогосподарської служби (ФАС) Міністерства сільського господарства США у 2023 р. виробництво сої в Індії досягне 12 млн. т., а врожай буде зібрано з 12,8 млн. га. Світове виробництво сої за останні два десятиліття зросло до майже 50-55 млн. т. Крім того, збільшується торгівля продуктами її переробки. За даними досліджень й аналізу даних FAO-AMIS, прогнозована пропозиція сої поточного маркетингового сезону становитиме

426,4 млн. т., що на 6,3 % більше від попереднього періоду.

Упродовж останнього десятиріччя посівні площі сої зросли майже на 50 % (рис. 1.3). Нижчі вимоги до добрив, використання збереженого насіння, високий попит з боку ЄС і попит на внутрішньому ринку зробили дану культуру сприятливою для багатьох господарств Європи.

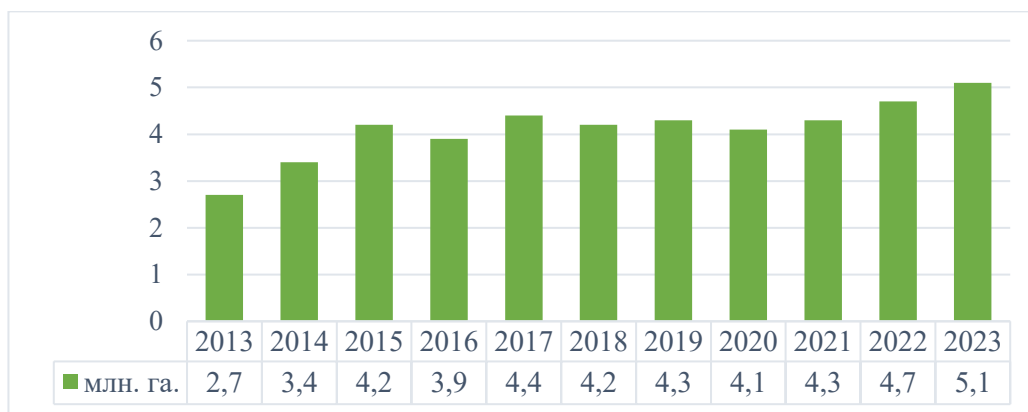


Рисунок. 1.3. Динаміка посівних площ сої в країнах Європи (2013-2023 рр.)

У ході опрацьованих статистичних даних встановлено, що впродовж останніх років посівні площі під соєю збільшуються. Відтак, у 2023 р. посівні площі в Європі по соєсіянню становили 5,1 млн. га., що на 8,5 % більше ніж у 2022 р. За останнє десятиріччя найменші посівні площі відмічені у 2013 р., порівнюючи з 2023 р. динаміка в країнах Європи зросла на 88,9 %.

Попри військовий стан, Україна активно збільшує посіви сої (рис. 1.4). Так, у поточному році в структурі посівних площ під олійними на сою припадає 20% (19% – у 2022 р. та 15% – у 2021 р.). Цьому сприяла передусім цінова кон'юнктура на ринку олійних культур.

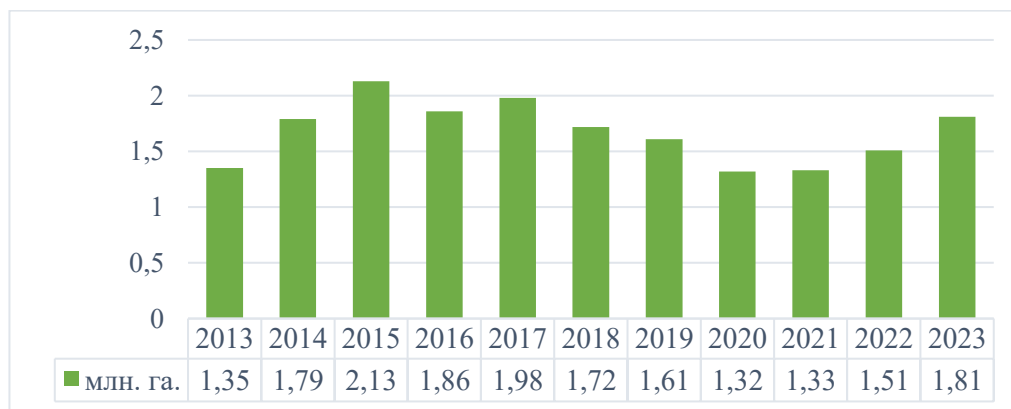


Рисунок. 1.4. Динаміка посівних площ сої в Україні (2013-2023 рр.)

Аналогічна тенденція по динаміці посівних площ зайнятих під культурою сої зафіксована і в Україні [24]. Аналізуючи статистичні дані Державної служби статистики встановлено, що у 2023 р. під посівами сої зайнято 1,81 млн. га. українських земель, що на 19,9 % більше ніж у 2022 р. За останнє десятиріччя найменші посівні площі відмічено у 2020 р., порівнюючи з 2023 р. динаміка зросла на понад 37,2 %.

Соя залишається в активному попиті. У 2023 р. ціни на сою зросли на 500 грн/т та відповідно становлять 460-470 \$/т. Відтак, виробництво сої в Україні у 2023 році сягнув 4,82 млн. т. (рис. 1.5).

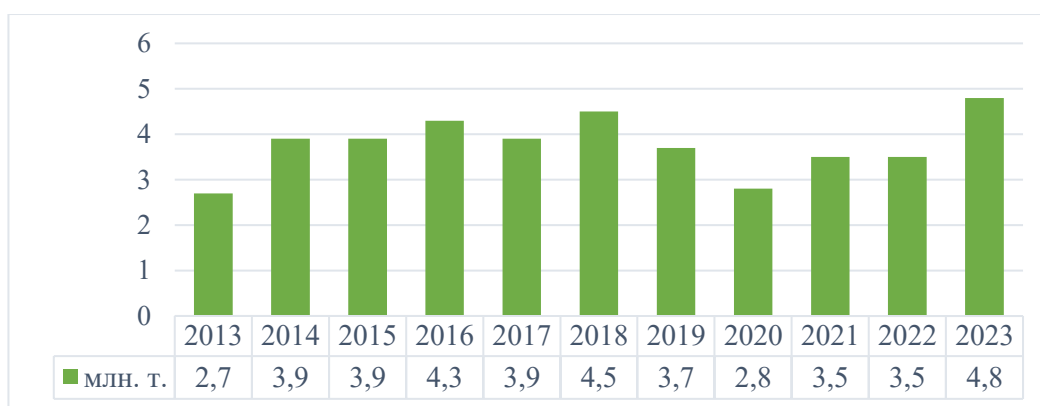


Рисунок. 1.5. Валовий збір сої в Україні (2013-2023 рр.)

Середня врожайність сої – 2,6 т/га, хоча вона займає лише – 11% загальних посівних площ зернових та олійних культур (рис. 1.6). Так як площі під соєю загалом по Європейському континенту збільшились на 7%, при цьому прогнозується валовий збір культури в Європі на 16,3% вищий, ніж минулого року.

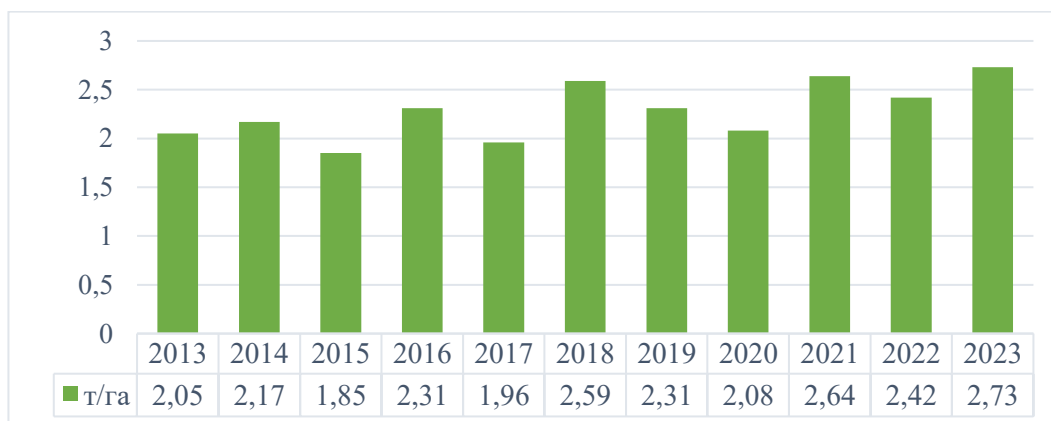


Рисунок. 1.6. Середня врожайність сої в Україні (2013-2023 рр.)

З огляду на перспективи розвитку сою можна вирощувати на досить великій території правобережного і лівобережного Лісостепу України, тобто у «соєвому поясі країни», до якого входять 8 областей лісостепової зони та дві степової, де наразі вирощується 79 % сої і, біля 10 % припадає на південне і центральне Полісся, а також західні регіони України. Таким чином в умовах змін клімату, територіальна трансформація «соєвого поясу» є передумовою для становлення нового етапу у виробництві культури сої, сприятиме раціональному використанню гідротермічних ресурсів регіону, збільшенню обсягів виробництва насіння сої, біологізації землеробства, одержанню високоякісної, органічної продукції [24].

У результаті агроєкологічного обґрунтування ролі сої у вирішенні проблеми рослинного білка в Україні перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні та розробленні сортових технологій вирощування сої. Накопичення у насінні сої білка і жиру, за даними різних авторів, залежить від багатьох агротехнічних прийомів. Не останню роль серед них займає сорт, як біологічна основа технології. Існують суперечливі дані про вплив строків сівби і норм висіву на вміст у насінні сої білка і жиру. Одні вчені свідчать, що вони впливають на хімічний склад насіння, інші вважають, що вміст білка і жиру не залежать від строків сівби і норм висіву. Починаючи з фази повного цвітіння (R1-R2), у цих органах посилюються гідролітичні процеси і починається відтік утворених продуктів розпаду в репродуктивні органи. Значна кількість амінокислот та амідів потрапляє у дозріваюче насіння з коренів за рахунок внесення живлення, де атмосферний азот симбіотичною фіксацією зв'язується і відновлюється до амонійної форми. Тому за високих доз азотних добрив, які негативно впливають на метаболізм азоту в рослині рослин, спостерігається пригнічення синтезу білків. З метою агроєкологічного обґрунтування органічної технології вирощування сої в умовах України, особливо важливо з'ясувати дію фіксованого азоту із атмосферного повітря, позакореневого підживлення комплексними біодобривами на процеси росту, розвитку та насінневої продуктивності сої.

Домінуючими трендами, які спостерігаються у світовому землеробстві в останнє десятиріччя є удосконалення технологій вирощування зернобобових культур на основі досягнень біотехнології та систем органічного землеробства. Характерно, що на полях України, не дивлячись на військовий стан, обсяги використання таких технологій зростають. Провідниками еко-інноваційних технологій, у першу чергу, є великі агрохолдинги, які фінансово незалежні. Це дає можливість їм не лише отримувати високі врожаї, а і значно скорочувати навантаження на ґрунт. Саме розширення систем органічного землеробства є позитивним фактором, оскільки сприяє підвищенню рівня загальної культури землеробства. За встановленими даними, біля 70 % сої – це сорти генетично модифіковані. Ці продукти переважають розробки вітчизняної селекції за рівнем врожайності, а технології їх вирощування завдяки застосуванню бактеріальних препаратів та мікродобрів мають значну перевагу в системі догляду за посівами. Саме завдяки цим технологіям спостерігається значне розширення площ посіву сої. На даному етапі соєсіяння не може конкурувати із досягненнями зарубіжних дослідницьких центрів, навіть на власних ринках в галузі біотехнологій країн Європи. Відтак, головною ціллю Європейського Зеленого Курсу є перетворення Європи на кліматично нейтральний континент. Для того, щоб не втратити вплив на вітчизняний ринок виробництва сої, необхідно шукати шляхи співпраці з провідними науково-дослідними центрами та агрокомпаніями. Поряд із цим, значна увага в країнах сталого сільського господарства, зокрема ЄС, приділяється екологізації та зменшенню негативного впливу інтенсивних технологій вирощування сільськогосподарських культур на довкілля. Це досягається, в першу чергу, за рахунок зменшення обсягів використання пестицидів та мінеральних добрив, пошуку шляхів розширення біологічних заходів, інокуляції, зменшення інтенсивності обробітку ґрунту згідно переходу на екозберігаючі технології No-Till, Strip-Till та Mini-Till. Підвищується роль сівозмінного фактора та роль органічних добрив [25].

Крім того, відродження тваринництва може стати одним із стабілізуючих факторів інтенсифікації виробництва насіння та білково-олійних культур у

повоєнній відбудові держави. Насіння сої містить антипоживні речовини, які мають переважно білкову природу, що дає можливість їх знешкодити дією високої температури. Це: інгібітори протеаз – інгібітори трипсину та хімотрипсину; антивітаміни А, D, Е, В12; сполуки, що знижують доступність таких мікроелементів як цинк, марганець, мідь і залізо; алкалоїди; фітогемаглютеніни; алергени; антигормони, що викликають зоб, і естрогенні ізофлавоїди – геністеїн і даїдзейн; олігосахариди – стахіоза, рафіноза й вербаскоза, які викликають метеоризм; ферменти – уреаза, ліпаза й ліпоксігеназа. Антипоживні речовини викликають у тварин пригнічення росту, зниження ефективності використання корму, захворювання на зоб, гіперфункцію та гіпертрофію підшлункової залози, втрату здатності до запліднення, алергію, рахіт, остеопороз, анемію і паракератоз. Максимально допустима активність інгібіторів трипсину, яка є безпечною для молодняку тварин 3 мг/г або на кожні 10 % протеїну повинно припадати не більше 1 мг/г інгібіторів трипсину. Такий показник як активність уреазу дає змогу непрямим методом оцінити необхідну ступінь термічної обробки бобів сої. Безпечна активність уреазу в термічно обробленому зерні, шротах та інших продуктах переробки сої, крім соєвого молока і пасти, для молодняку тварин повинна становити не більше 0,05 од. рН, на відгодівлі – 0,1 од. рН, для корів – 0,2-0,3 од. рН. У зв'язку з швидким руйнуванням в соєвому молоці та пасті уреазу, в порівнянні з інгібіторами трипсину, в цих кормах ступінь знешкодження антипоживних речовин необхідно контролювати за активністю інгібіторів трипсину. При баротермічній обробці втрачається до 15-20 % лізину, при прожарюванні його вміст може знизитись удвічі. Тому вважається доцільним додавання лізину в раціони для моногастричних тварин, які містять термічно оброблені корми із зерна сої [26].

Обсяги урожаю зернобобових культур не в останню чергу зумовлені поєднанням кількох найсприятливіших чинників – збільшенням посівних площ, інтенсифікацією технології виробництва та збільшенням витрат мінеральних добрив, якісного посівного насіння, інтегрованого захисту рослин.

Аналіз статистичних даних свідчить, що найпомітнішою тенденцією

останніх років є стійке зростання посівних площ у 2017-2019 рр. зокрема, під зернобобовими культурами. Якщо у 2015 році посівні площі зернобобових культур становили близько 14,7 млн гектарів, то у 2019-му вже досягли показника 15,3 млн гектарів, а у 2020-2023 рр. на фоні військових дій істотно знизилось виробництво зерна бобових.

1.3. ОСНОВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРИЙОМИ ПЕРЕРОБКИ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ВИСОКОБІЛКОВИХ КОРМІВ

У сучасних технологіях кормовиробництва, серед всіх видів зернобобових культур, що поширені на території України, пріоритет надається сої, яка характеризується високою поживною цінністю та містить низку вітамінів і мікроелементів, що життєво необхідні для повноцінної годівлі сільськогосподарських тварин [1, 27].

Соя використовується в годівлі всіх видів сільськогосподарських тварин у вигляді борошна, макухи, шроту, білкових концентратів, молока, зеленої маси, сіна, сінажу, трав'яного борошна і силосу (рис. 1.7).

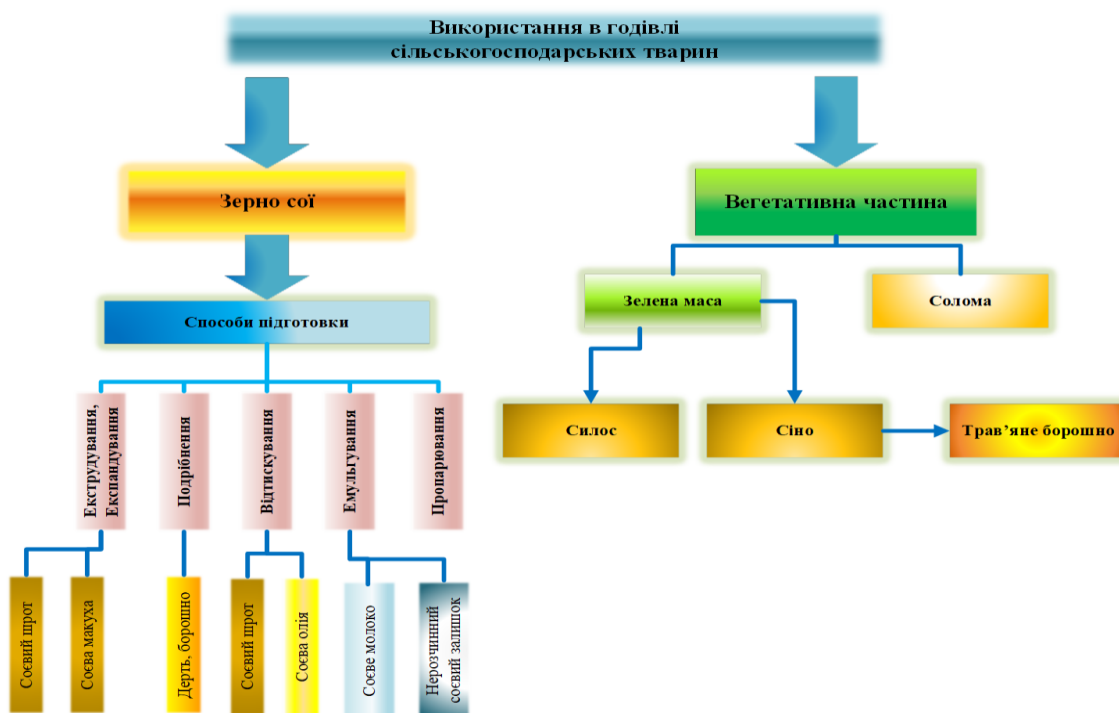


Рисунок 1.7. Основні варіанти використання сої в технології годівлі сільськогосподарських тварин

Зелені стебла сої використовуються для кормів майже всім видам сільськогосподарських тварин, як в сирому вигляді в якості соковитого корму, так і спільно з іншими культурами одночасно. В 1 ц. зелених стебел сої міститься майже 22 корм. одиниць і майже до 0,03 ц протеїну. У порівнянні зі злаковими культурами, в зеленій масі сої міститься в 2-5 разів більше протеїну [25,28].

Сіно зібране з стебел сої за поживністю відповідає конюшині, так в 1 ц соєвого сіна міститься 47-54 корм. од. і 11-15 кг протеїну. Солома, що отримується в результаті збору бобів сої теж йде на корм тваринам і вважається досить якісним кормом. В 1 ц соєвої соломи міститься 39 кормових одиниць, протеїну 3-5,8%, жиру 2,5-3,9%.

Соевий шрот – застосовують в якості білкової основи для приготування різного за складом комбикормів та характеризується високим вмістом рослинних білків та жиру. Протеїн соєвого шроту легко засвоюється організмом тварини. Крім того, соєвий шрот по живильній цінності значно вище, ніж шроти інших культур.

Соева макуха – це спресоване насіння сої після виділення з них жиру, який зазвичай використовується для приготування соєвої олії. Соева макуха має високий вміст білків та характеризується значною біологічною цінністю і засвоюваністю, що робить її незамінним елементом раціону. Крім високоякісних білків в соєвій макусі містяться мікроелементи – кальцій, залізо, фосфор, марганець і цинк. Фахівці пропонують додавати до щоденного раціону тварин до 20% соєвої макухи [29].

Соеве борошно – продукт, отриманий з перероблених насіння сої (соєвих бобів), макухи і шроту. Соеве борошно за якістю амінокислотного комплексу білків і за своїм хімічним складом не поступається сухому знежиреному молоку, маючи лише менший вміст вуглеводів, метіоніну і лізину.

Вчені приходять до єдиної думки, що найперспективніший напрямок підготовки зерна сої до згодовування сільськогосподарським тваринам це приготування рідкої білкової суспензії, тобто соєвого молока, яке за своєю біологічною цінністю не поступається коров'ячому молоку.

Його застосовують для молочної худоби, з метою збільшення надою і жирності молока, а так само при випоювання молодняку телят і поросят в якості заміни дорожого молозивного молока, що в кінцевому підсумку дає можливість знизити витрати виробництва.

Соеве молоко досить цінний за біохімічним складом продукт. Один літр соєвого молока має високу енергетичну цінність (близько 1,73 МДж), містить 28 г засвоюваного протеїну, що відповідно вище, ніж в порівнянні з знежиреним молоком, до того ж соєве молоко містить сиру клітковину в обсязі 0,42%, що сприяє нормальній роботі травної системи. Амінокислотний склад схожий зі складом знежиреного цільного молока, причому в деяких позиціях навіть перевищує його, а саме: по аргініну в 2,7 рази, по гліцину – в 2,75 рази, лізину – на 13,9 %, треоніну – на 43,5%, аланіну – 55,1 % [30].

Телят, привчають до споживання в їжу соєвого молока поступово, протягом 7-10 днів збільшуючи дозування, починаючи з приблизно 0,250 кг на добу. Це дозволяє швидко адаптувати систему травлення тварин при переході з тваринного білка (коров'ячого молока) на рослинний протеїн. У результаті адаптації системи травлення телят, відбувається підвищення виділення ферментів, які відповідають за травлення та, як наслідок, раннє включення в систему травлення підшлункової залози. При використанні соєвого молока в годівлі телят необхідно стежити за кількістю кальцію і фосфору, що обумовлено зниженою доступністю цих елементів в сої. Тому також використовують крейда.

Проведені дослідження свідчать, що використання в раціоні дійних корів в якості білкової добавки соєвого молока сприяє підвищенню надоїв та є економічно обґрунтованим [31].

У сучасному світі багато методів приготування соєвого молока із зерна сої, ось деякі з них: так званий «Китайський» спосіб приготування соєвого молока із зерна сої передбачає заливання водою зерен сої 3-4 частинами води з обов'язковим попереднім промиванням зерна і подальшою витримкою у воді впродовж 12-14 годин при температурі води 16-17°C [32].

Після набухання від вологи зерна знову промивають під чистою водою,

розмелюють з додаванням питної води в пропорції 0,5 л. води на 1 кг розбухлого зерна. До подрібненої пасти додається питна вода температурою 20°C з пропорції 6 до 1. Протягом 30 хвилин маса безперервно перемішується, а потім через сито розмірами отворів 0,2 мм, фільтрується від залишку і суспензій. Частина маси, що залишилася повторно заливається водою в пропорції 1 до 2 і знову фільтрується через те ж саме сито. Потім перша і друга вижимки молока змішуються до утворення єдиного по жирності молока. При цьому вихід кінцевого продукту становить 8-8,5 л. на 1 кг сої.

Технологічні схеми отримання соєвого молока із зерна сої за методом Іллінойсу та Тайванським способом представлені на рис. 1.8 та рис. 1.9.

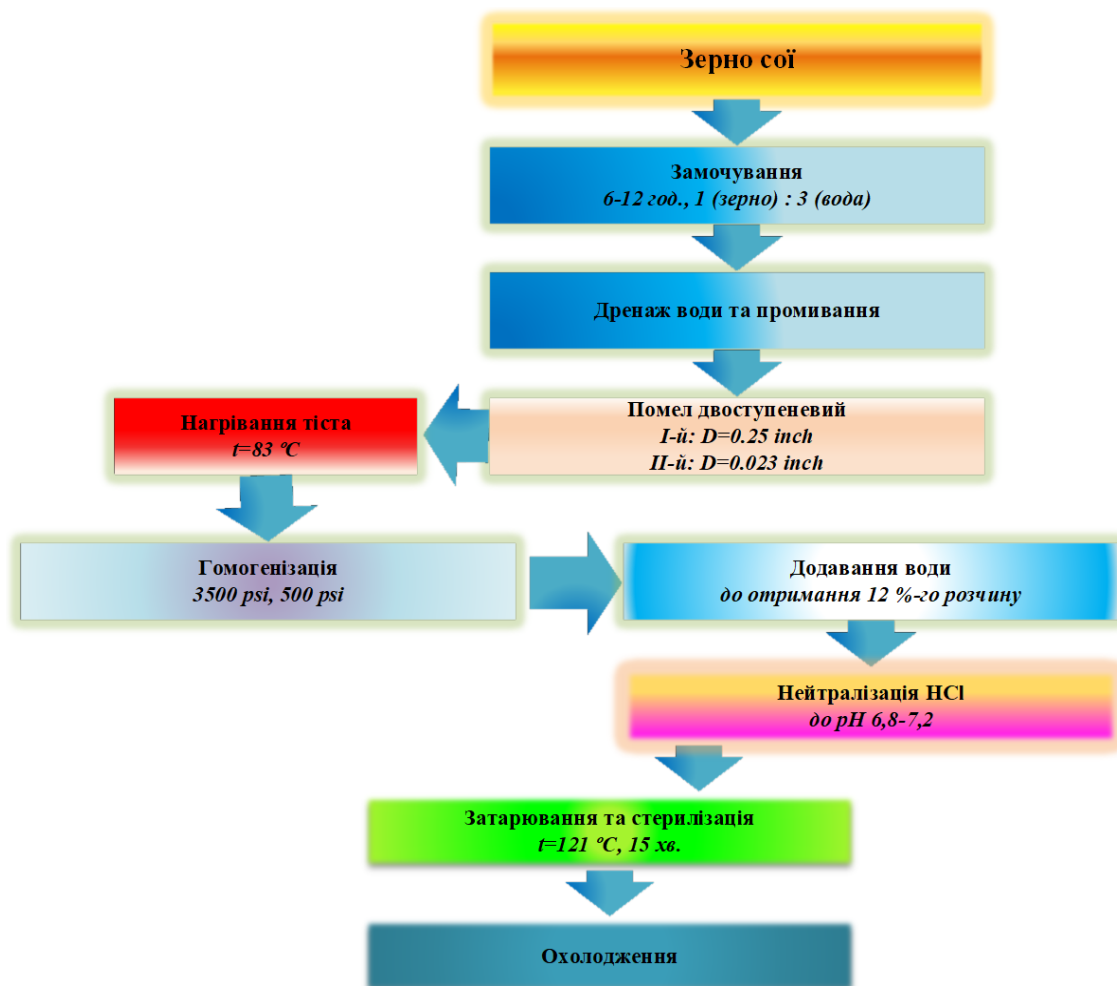


Рисунок 1.8. Метод Іллінойсу

В Україні досить часто використовують спосіб отримання соєвого молока, який реалізовано наступним чином (рис. 1.10): заздалегідь підготовлене і

промите фуражне зерно сої замочується у воді в пропорції 1 до 3, протягом 16-17 год обов'язково в скляній тарі, що обладнана шнеком з електроприводом для рівномірного і безперервного перемішування. Далі, як видно з рис. 5.4 замочене зерно без надлишкової води надходить в інший бункер 4, звідки після ферментативної обробки надходить на стирання.

За допомогою обладнання «Емульсор-ПМСМ-6-12.5» зерно сої подрібнюється у водному середовищі до однорідної пастоподібної маси. При цьому, вода, що використовується у ролі екстрагента, вбирає в себе жири, білки та вітаміни. Далі соєвий екстрагент надходить до харчових ванн 7 та перемішується впродовж 1,5 год лопатевими мішалками 6, після чого надходить до ванни 8.

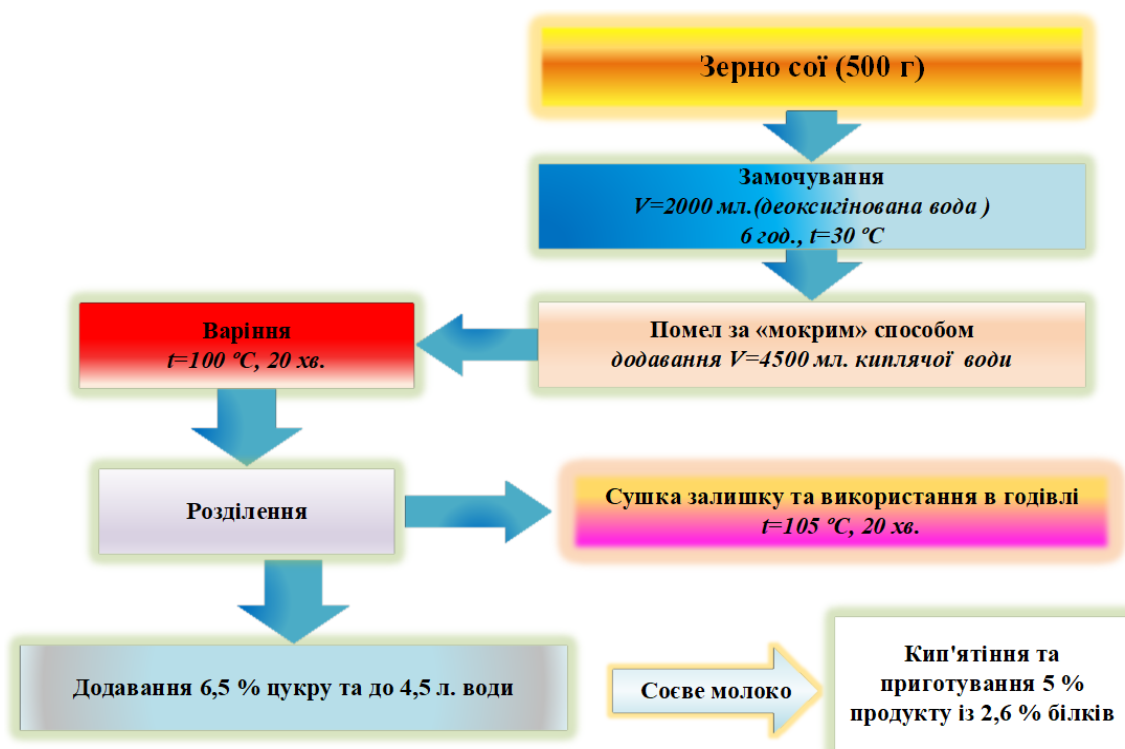


Рисунок 1.9. Тайванський спосіб переробки

Далі за допомогою насоса 9 білкова каша надходить в ванну 10 для теплової обробки. Після проходження пункту 11, молоко надходить на зберігання, позиція 12. Додатково соєве молоко насичується амінокислотами і мінералами взятими з доданих до нього цукру і кісткового жиру. Після перемішування та утворення однорідної маси «багате» соєве молоко йде на корм

тваринам і птиці. Вихід соєвого молока за цим методом становить близько 10-16 літрів з 1 кг соєвого зерна.

Наукові дослідження проведені з застосуванням цього способу показали, що в 1 літрі отриманого соєвого молока міститься приблизно 2,5% жиру, з мінеральних компонентів: кальцію – 0,4 г; фосфору – майже 0,8 г; лізину – 1,25 г; метіоніну – 1,44 г; ізолейцину – 1,61; цукру – до 1%. Соєве молоко перевищує більш ніж в два рази за якісним складом засвоюваного протеїну цільне молоко при жирності від 3% до 5% [30].

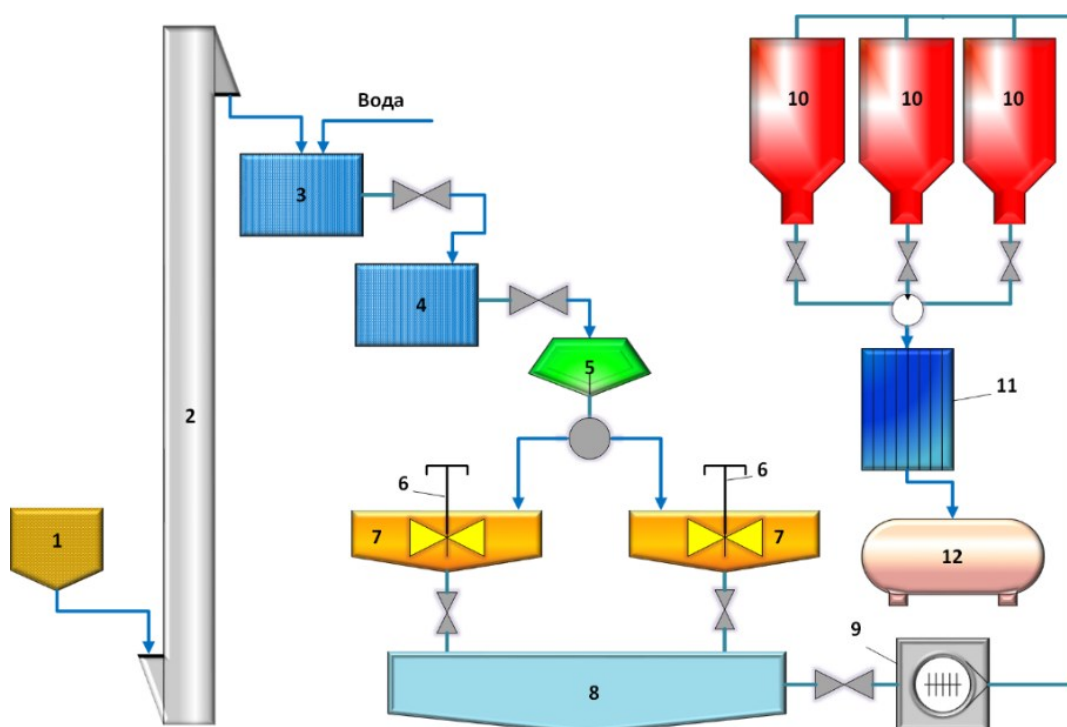


Рисунок 1.10. Машинно-апаратурна лінія традиційного для України способу отримання соєвого молока: 1 – резервуар-дозатор; 2 – НЦГ-10; 3,4 – скляна тара; 5 – емульсор, 6 – мішалка; 7 – харчова ванна; 8 – ванна; 9 – електронасос; 10 – котел; 11 – танкер-охолоджувач; 12 – ємність для зберігання

Ще одним варіантом переробки зернобобових, що зазвичай використовується в господарській діяльності потужних сільськогосподарських підприємств є лінія приготування соєвого молока з продуктивністю 16-18 т за добу (рис. 1.11).

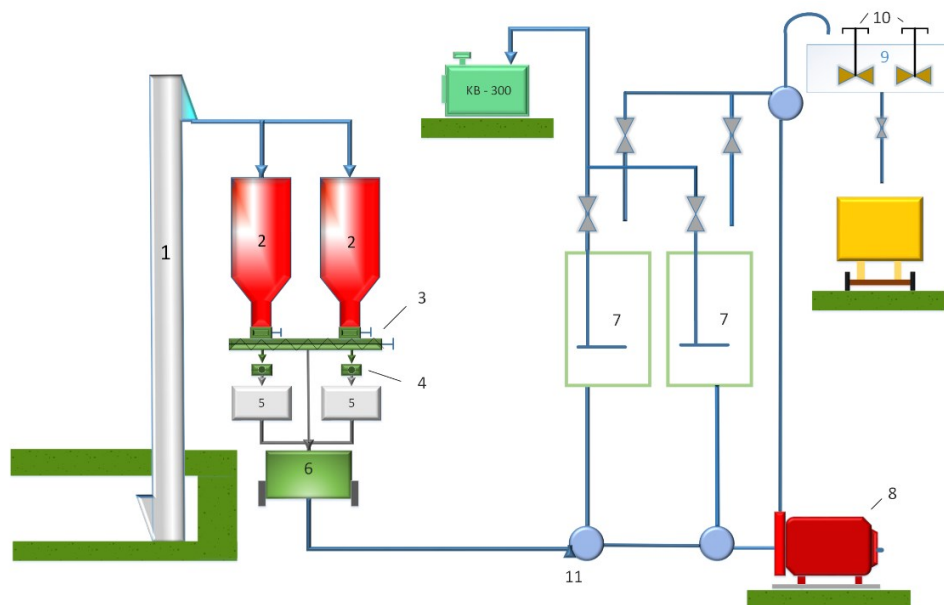


Рисунок 1.11. Схема лінії по отриманню соєвого молока (16-18 т/добу):
 1 – норія НЦГ-10; 2 – резервуар з водою для замочування зерна; 3 – мішалка;
 4 – дозатори; 5 – КДУ-2; 6 – резервуар для прийому білкової каші; 7 – резервуар інактиватор;
 8 – насос; 9 – резервуар для молока; 10 – мішалки; 11 – зливний кран

Технологія приготування соєвого молока полягає в наступному: спочатку зерно сої замочують у воді протягом 16 годин в ємностях по 3 м³. Після закінчення зазначеного часу зерна сої розбухають, збільшуючись при цьому в геометричних розмірах майже в три рази. Потім цю масу подрібнюють. Отриману після подрібнення білкову кашу відправляють в камери для обробки паром від установки KB-300 з метою видалення антипоживних речовин. Далі чиста білкова маса надходить на охолодження. Вихід готової продукції становить 10-14 л соєвого волака з 1 кг зерна сої.

Проаналізувавши принцип роботи основних технологій отримання соєвого молока, можна говорити про те, що всі вони базуються на трьох основних схемах:

- витримування протягом тривалого часу зерна сої в воді, далі отримання дрібнодисперсної фракції зерна шляхом тонкого помелу, змішування з водою, поділ на рідку і тверду фракції, далі теплова обробка, потім охолодження і

зберігання;

- подрібнення зерна сої, отримане соєве борошно змішують з водою, далі проводять термічну обробку отриманого екстрагента і охолоджують;

- отримання дрібнодисперсної фракції зерна шляхом тонкого помелу, змішування з водою, далі теплова обробка, поділ на рідку і тверду фракції, потім охолодження і зберігання. При цьому, за даними досліджень, найбільшу кормову цінність має готовий продукт отриманий за першим варіантом.

Підводячи підсумок проведеному аналізу технологічних ліній отримання соєвого молока можна стверджувати, що всі існуючі способи приготування молока базуються на основних технологічних операціях таких як: отримання дрібнодисперсного помелу, змішування з водою з метою екстрагування білка, фільтрування отриманої каші, теплова обробка, охолодження і короткочасне зберігання, а експлуатаційні витрати виробництва визначаються енергоефективністю обладнання для виконання цих операцій.

Розділ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ТА ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. МЕТОДИКА ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ ТА ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ В ТЕХНОЛОГІЇ КОРМОВИРОБНИЦТВА

2.1.1. Розробка конструкції енергоефективного обладнання для подрібнення фуражного зерна

В результаті енергоаудиту основних складових виробничого циклу переробки зернової маси було встановлено, що частка енерговитрат на подрібнення може досягати 40-65 % [33], в залежності від вологовмісту матеріалу, що піддається обробці та дисперсності готового продукту.

Це пов'язно із тим, що на тваринницьких фермах і комбикормових виробництвах для подрібнення зерна широкого застосування набули молоткові дробарки [34]. У даних технологічних машинах руйнування матеріалу відбувається внаслідок послідовного перебігу стадій: прикладання розподіленого навантаження плоскою гранню шарнірно-підвішеного молотка, виникнення в тілі різного роду деформацій та зростання напружень, досягнення граничних значень напружень та деформацій, розрив зв'язків атомів і молекул між собою [35].

У процесі дроблення відбуваються в основному крихке і пластичне руйнування. Для крихкого руйнування характерна незначна деформація матеріалу, причому після руйнування немає залишкових деформацій. Прикладена енергія витрачається на подолання сил взаємного зчеплення частинок тіла, тобто на утворення нової поверхні. Під час руйнування пластичних матеріалів енергія витрачається як на розрив структурних зв'язків, так і на значні пластичні деформації. Причому енергія, що витрачається на деформацію, перетворюється в теплоту.

Межа міцності матеріалу та гранична його деформація обумовлюється структурно-механічними характеристиками зерна та залежить від сорту,

розмірів, густини, вологовмісту, температури тощо. Так, при збільшенні вологовмісту відбувається зменшення крихкості та межі міцності із одночасним зростанням пластичності та абсолютної деформації, яку зерно може сприймати до початку руйнування.

Подрібнення крихких матеріалів потребує значно менших витрат енергії порівняно з пластичними. Оскільки, як було вже зазначено, крихкість і пластичність ряду матеріалів визначаються їхнім фізичним станом, з енергетичного погляду доцільно подрібнювати матеріал у крихкому стані, що суперечить технологічному регламенту виробництва соєвого молока, відповідно до якого подрібненню передують довготривале вологонасичення зерна.

Таким чином, при подрібненні зерна сої із показником вологовмісту значно вище базисної кондиції спостерігається низька ефективність способу подрібнення ударом, що зумовлено підвищеною пластичністю матеріалу та збільшенням значення граничної деформації, яку зерно може сприймати до руйнування [36]. Також суттєвою проблемою є несвоєчасне виведення готового матеріалу із зони подрібнення внаслідок його налипання на ситі, що призводить до зменшення пропускної здатності дробарки [37].

Таким чином, попередніми дослідженнями [38] було встановлено, що серед низки варіантів підвищення енергоефективності обладнання для подрібнення кормів можна відзначити два перспективні напрямки:

- мінімізація дисипативних втрат в умовах пластичної деформації некондиційного фуражного зерна при взаємодії із робочими органами машини [39];

- зведення до мінімуму часу перебування матеріалу в зоні подрібнення та максимальне наближення фактичної пропускної здатності машини до теоретичної сепараційної здатності сита, що може бути забезпечено своєчасною евакуацією вже подрібненого матеріалу із робочого простору машини [40].

З метою вирішення зазначених проблем, на базі лабораторії кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету було розроблено вібраційну

дискову дробарку (рис. 2.1), в якій при включенні електродвигуна 5 крутний момент через муфту 6, передається на кінематичний вал 7 з противагами 8, обертання якого призводить до створення комбінованого силового та моментного дисбалансу розміщеного на ньому ротора 9 з осями та дисковидними билами 10 [41].

Оброблювальний матеріал безперервно надходить через завантажувальну горловину 2 і подрібнюється внаслідок обертового та коливного руху дисковидних бил 10. Зі зменшенням розмірів частинок подрібнений матеріал під впливом відцентрових сил та знакозмінних навантажень через ситову поверхню зазнає інтенсивної класифікації: частинки рівні або менші діаметру отворів сита 4 вивантажуються через горловину 3, решта – на повторне подрібнення [42].

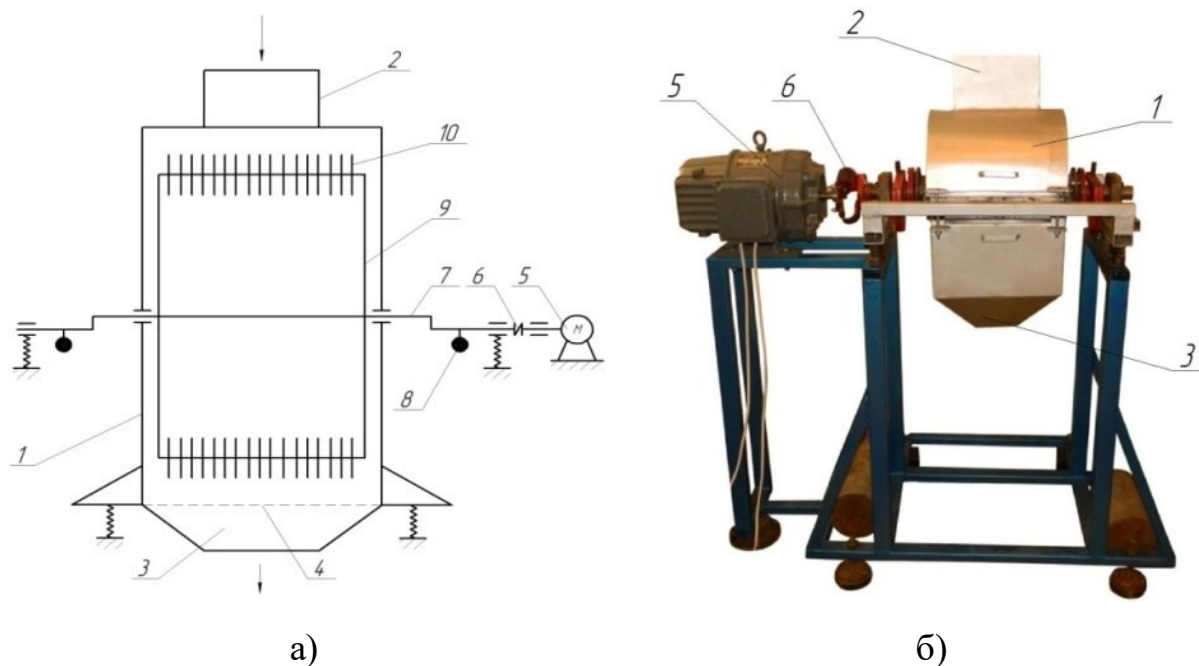


Рисунок 2.1. Вібраційна дискова дробарка: а) – принципова схема; б) – загальний вигляд; 1 – корпус; 2, 3 – завантажувальна та розвантажувальна горловина; 4 – сито; 5 – електродвигун; 6 – муфта еластична; 7 – вал кінематичний; 8 – противаги; 9 – ротор; 10 – біла дискового-типу

Таке поєднання способів подрібнення (удару і різання) надає змогу здійснювати обробку сировини із високим показником вологовмісту при зменшенні енерговитрат на дану технологічну операцію, що було підтверджено

результатами пошукових експериментальних досліджень. Проте, для досягнення високих показників енергоефективності технології переробки сої для кормових потреб, необхідно обґрунтувати раціональні режими роботи запропонованого обладнання.

2.1.2 Методика та вимірювальне обладнання для дослідження процесу подрібнення

Експериментальну частину роботи виконано на базі лабораторій кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету з використанням розробленого стенда (рис. 2.2) та експериментально-дослідного зразка вібраційної дискової дробарки [43] (рис. 2.1).



Рисунок 2.2. Експериментальний стенд: 1 – експериментально-дослідний зразок вібраційної дискової дробарки; 2 – персональний комп’ютер з програмним забезпеченням; 3 – вмикач; 4 – електронний ватметр EMF-1; 5 – дублюючий електромеханічний ватметр; 6 – лабораторний трансформатор АОСН-20-220-75; 7 – акселерометр

Для запису амплітудно-частотних характеристик вібродискової дробарки був розроблений датчик на базі акселерометра ST Microelectronics LIS3DH (рис. 2.3), який має такі характеристики: наднизьке споживання електроенергії-2 мкА; споживання напруги 1,71-3,6 В; регульований діапазон вимірювання прискорення: ± 4 г; ± 8 г; ± 16 г; Інтерфейс SPI/I2C для зчитування даних; вбудований модуль самоперевірки [44].

Принцип роботи розробленого датчика наступний: після підключення датчика до поверхні контейнера вмикають приводний механізм, створюючи змінні коливання контейнера та ротора вібраційної дробарки, що ініціює активізацію вбудованого акселерометра, який починає реєстрацію амплітудно-частотних характеристик. Отримана інформація щодо амплітудно-частотних характеристик обладнання за допомогою USB-кабеля інтерпретується на персональному комп'ютері у вигляді графічних залежностей та цифрової матриці даних. Розроблене програмне забезпечення дозволяє аналізувати віброприскорення, віброшвидкість, вібропереміщення та частоту коливань.

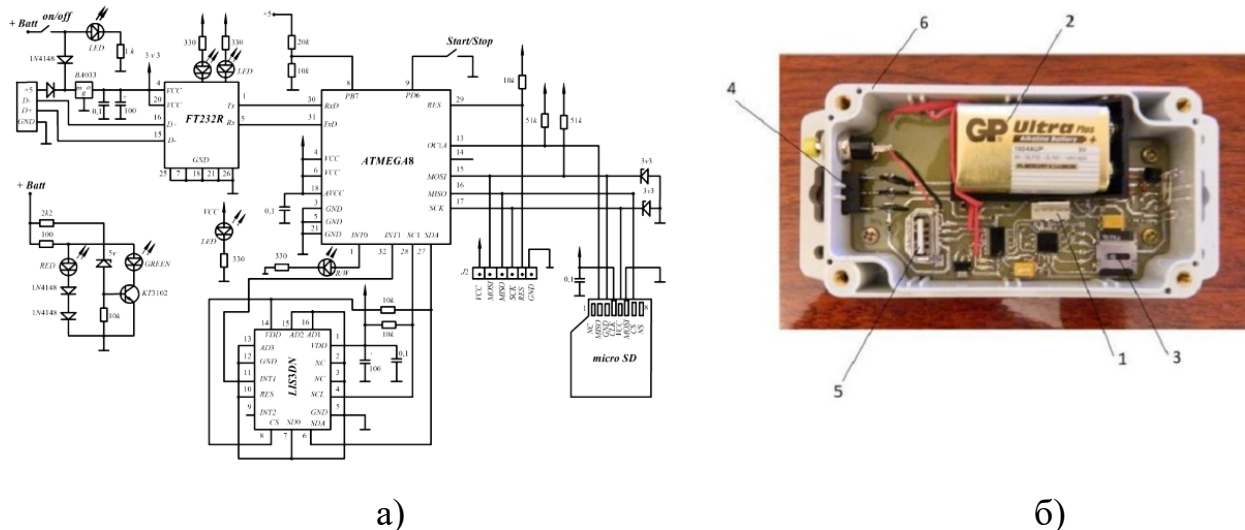


Рисунок 2.3. Акселерометр: а) Апаратно-електронна схема; б) загальний вигляд пристрою; 1 – мікропорт для підключення датчика акселерометра; 2 – батарея живлення; 3 – карта пам'яті; 4 – кнопка живлення; 5 – адаптивний мікропорт для зчитування даних; 6 – корпус акселерометра

Для реєстрації кутової швидкості приводного вала було використано бездротовий тахометр UNI-T UT372 (рис. 2.4, а), принцип роботи якого описаний в технічній документації. Для керування кутовою швидкістю вала електродвигуна використовували автотрансформатор АОЧ-20-220-75 (рис. 2.4, б), призначений для роботи зі змінним струмом.

При визначенні потенційно придатних до використання варіантів ситових поверхонь використовували показник питомої частки проходу подрібненого матеріалу крізь контрольні сита. Під час проведення серії експериментальних досліджень було використано два комплекти сит, які по чергово встановлювались на лабораторну дробарку.

Загальна маса матеріалу що підлягала подрібненню при використанні кожного типорозміру сита (табл. 2.1) становила 10 кг для одного дослідження, який повторювали тричі. Далі, із кожної партії готового корму відбирали проби масою $M=100$ г для подальшого ситового аналізу.

Якісну оцінку виконували шляхом знаходження відсоткового співвідношення маси матеріалу, що пройшов крізь сито до загальної маси проби [45]:

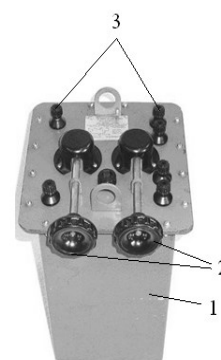
$$K_i = \frac{m_i}{M} \cdot 100, \quad (2.1)$$

де m_i – маса матеріалу, що пройшов через i -те контрольне сито, г. M – маса проби, що відібрана для аналізу, г.

Дослідний матеріал просіювали на лабораторному ситовому аналізаторі А-20 (рис. 3, в), що оснащений наборами лабораторних контрольних сит, підібраних за принципом, відповідності діаметрів отворів d_k , граничним значенням розміру частинок для тонкої, середньої та грубої фракцій: $d_{lim}=0,4$ мм; $d_{lim}=1,0$ мм; $d_{lim}=2,0$ мм; $d_{lim}=3,0$ мм.



а)



б)



в)

Рисунок 2.4. Контрольно-вимірювальні пристрої: а) частотомір UNI-T UT372: 1 – лазерний зчитувач; 2 – цифровий індикатор; 3 – панель управління; б) лабораторний автотрансформатор АОСН-20-220-75: 1 – зовнішній кожух; 2 – регулятори напруги; 3 – вхідні та вихідні клеми; в) ситовий аналізатор А-20: 1 – вібраційна платформа; 2 – ситовий блок; 3 – фіксувальні гвинти; 4 – пилозахисна поверхня; 5 – панель керування

Пробу масою 100 г насипали на верхнє сито і просіювали протягом 1 хв. Частинки матеріалу розміром менше величини отворів ситової поверхні проходять через неї і потрапляють на наступне сито, де цикл повторюється. В результаті матеріал розподіляється між ситами і піддоном відповідно до його фракційного складу. По закінченню процесу розсіву вміст кожного сита зважувався, визначався гранулометричний склад (2.1). Графічні залежності будували по середніх значеннях фракційного складу проб для кожного

типорозміру сит із таблиці 2.1.

Обробку експериментальних даних здійснювали з використанням програмного продукту MS Microsoft Excel 2020.

Таблиця 2.1

Характеристика ситових поверхонь, що почергово встановлювались на лабораторну дробарку

Комплект	Матеріал, з якого виготовлено сито та номер НТД	Номінальний діаметр, d_n , мм	Форма отворів
№1	Сита із металічного дроту (латунь) ISO 3310-1-90	2,0±0,15	Прямокутна
	Сита із металічного дроту (латунь) ГОСТ 3826-82	1,8±0,08	Квадратна
	Сита із металічного дроту (латунь) ГОСТ 3826-82	1,6±0,08	Квадратна
	Сита із металічної дроту (латунь) ГОСТ 6613-86	1,4±0,08	Квадратна
	Сита із металічної дроту (латунь) ГОСТ 6613-86	1,25±0,08	Квадратна
	Сита із металічної дроту (латунь) ГОСТ 6613-86	1,0±0,08	Квадратна
№2	Сита із металічного дроту (латунь) ISO 3310-1-90	4,0±0,15	Прямокутна
	Сита із металічного дроту (латунь) ISO 3310-1-90	3,5±0,15	Прямокутна
	Сита із металічного дроту (латунь) ГОСТ 3826-82	3,25±0,15	Прямокутна
	Сита із металічного дроту (латунь) ГОСТ 3826-82	3,0±0,15	Прямокутна
	Сита із металічної дроту (латунь) ГОСТ 6613-86	2,75±0,15	Прямокутна
	Сита із металічної дроту (латунь) ГОСТ 6613-86	2,5±0,15	Прямокутна

Якість подрібнення концентрованих кормів є особливо важливим показником, що впливає на загальну продуктивність тварин. В результаті подрібнення кормів створюється значна кількість частин із більшою загальною поверхнею, що сприяє прискоренню травлення та підвищенню засвоєння поживних речовин.

Однак при подрібненні зерна для годівлі свиней слід враховувати, що занадто дрібний помел ускладнює евакуаторну функцію шлунка та кишечника, що негативно відображується як на засвоєнні поживних речовин, так і в цілому на окремих функціях органів травлення. Крім того надлишкове подрібнення супроводжується зростанням питомої витрати електроенергії, що негативно

відображається на собівартості всього процесу.

Згідно з чинною нормативною документацією, розрізняють три ступені помелу зерна: тонкий (0,2–1 мм), середній (1,0–1,8 мм) і грубий (1,8–2,6 мм).

Рекомендована тонина помелу зерна для різних груп тварин:

- для поросят сисунів – 0,46...0,78 мм;
- для відлучених поросят – 0,8...0,86 мм;
- для свиней на відгодівлі – 1,0...1,1 мм;
- для коней – 2,0...3,0 мм;
- для великої рогатої худоби, овець – 1,5...2,0 мм;
- для телят, птиці – 1,0...1,5 мм.

Аналіз зоотехнічних вимог до фракційного складу корму [1, 14, 15, 18, 19, 20] для різних груп тварин показав, що традиційна технологія годівлі передбачає використання тонкої фракції (0,4...1,0 мм) для свиней, середньої (1,0...2,0 мм) для ВРХ, телят, овець і птиці та грубої (2,0...3,0 мм) для коней. При цьому, на думку фахівців [46], в сукупному об'ємі готового продукту вміст цільової фракції має становити не менше 70 %.

Таким чином вказані діапазони, умовно, можуть прийняті, як контрольні показники якості процесу подрібнення та бути базисом при виборі та обґрунтуванні режимних параметрів дробарки.

Статистичний аналіз масиву експериментальних даних для отримання функціональної залежності у вигляді множинної регресії другого порядку було отримано за допомогою рототабельного центрально-композиційного планування (РЦКП) багатofакторного експерименту [47].

Метод РЦКП дає змогу більш точно отримати математичний опис розподілу даних за рахунок збільшення кількості експериментів у центральних точках матриці плану і спеціального вибору величини «зіркового значення» α . Обробку експериментальних даних здійснювали у статистичному середовищі STATISTICA 10.0. та Mathcad 15.

2.1.3 Методика та вимірювальне обладнання для дослідження процесу термічної обробки

На перетравність поживних речовин корму впливає співвідношення в раціоні між перетравним протеїном і без азотистими речовинами. Раціонального поєднання амінокислотного складу і високої енергетичної цінності можна досягти при фракційній переробці зеленої маси люцерни в результаті якої отримують два основних компоненти: білково-вітамінна паста та жом [48].

Однак втрати поживних речовин, а отже і якість корму, енергозатрати на процес сушіння залежать від способу та режимних параметрів процесу, які повинні бути науково обґрунтовані для конкретних умов виробництва. Одним із ефективних та широко розповсюдженим способом сушіння аналогічних матеріалів є активне вентиляування атмосферним або підігрітим повітрям нерухомого щільного шару матеріалу. Знання закономірностей протікання процесу сушіння в щільному шарі дасть можливість керувати цим складним процесом, визначити шляхи більш повного використання сушильного потенціалу повітря, визначити раціональну витрату повітря яке продувається через шар матеріалу.

Загальні теоретичні питання трансформації тепла та речовини під час процесу сушіння вирішені для тіл класичної форми. Але в реальному випадку потрібно дещо спростувати цей процес і приймати певні допущення [49]. Наприклад в [50] досліджується процес сушіння листостеблових матеріалів тільки з точки зору масо обмінних процесів, в [51] враховується внутрішнє джерело тепла, яке знаходиться в товстому шарі, в [52] розроблена аналітична математична модель процесів нагріву і сушіння рослинних матеріалів у товстому нерухомому шарі щільність якого змінюється за висотою. У роботі [53] розглянуто питання моделювання режимів сушіння дисперсних матеріалів в реальних сушарках колонного типу. Ці та багато інших теоретичних досліджень реалізуються в реальних машинах, агрегатах для переробки та зберігання продукції рослинництва [54].

Але не зважаючи на такий широкий спектр теоретичних та

експериментальних досліджень, як ми вже вказували, в кожному конкретному випадку потрібно проводити дослідження для обґрунтування способу і визначення раціональних параметрів процесу сушіння рослинної сировини. Отже такі дослідження по сушінню продуктів переробки люцерни є актуальні.

Більшість вологих рослинних матеріалів та їх компонентів, в тому числі і жом із зелених рослин люцерни, відносяться до капілярно-пористих тіл. Криві сушки цих тіл мають два явно виражених періоди: постійної та падаючої швидкості.

Рівняння кривої швидкості сушки в першому періоді має вигляд [55]:

$$-dw/d\tau = N = \text{const} \quad (2.2)$$

де $dw/d\tau$ - швидкість сушки $\frac{\text{кг}_{\text{вол.}}}{\text{кг}_{\text{а,с,р}} \cdot \text{год}}$;

N – швидкість сушки в першому періоді,

τ – час, год.

Аналіз результатів експериментальних досліджень показує, що для опису процесу сушки люцернового жому в другому періоді можна скористатися рівнянням [56]:

$$\frac{dw}{d\tau} / N = \Psi = \frac{(W - W_p)^m}{A + \beta (W - W_p)^m} \quad (2.3)$$

де Ψ – зведена швидкість сушки;

W , W_p – відповідно поточний та рівноважний вологовміст матеріалу, $\frac{\text{кг}_{\text{вол.}}}{\text{кг}_{\text{а,с,р}}}$.

Про рівноважний вологовміст продуктів фракційної переробки люцерни ми вже писали в [57]. Показник ступеня m характеризує взаємозв'язок вологи з матеріалом або показником внутрішньої дифузії вологи і не залежить від параметрів шару і вологовмісту матеріалу. Безрозмірні коефіцієнти A і β залежить від параметрів шару матеріалу (в основному від його товщини).

Час за який середній вологовміст шару матеріалу зменшується від початкового W_0 до кінцевого W_2 значення, складається із тривалості сушки в першому τ_1 і другому τ_2 періодах:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (2.4)$$

Проінтегруємо рівняння (2.2) в межах від W_0 до $W_{кр}$, а рівняння (2.3) від $W_{кр}$ до W_2 , і в результаті отримаємо вирази для визначення тривалості сушіння люцернового жому відповідно в першому і другому періодах:

$$\tau_1 = \frac{W_0 - W_{кр}}{N} \quad (2.5)$$

$$\tau = \frac{1}{N} \left[A \int_{W_2}^{W_{кр}} \frac{dw}{(w - w_p)^m} + \beta (W_{кр} - W_2) \right], \quad (2.6)$$

де $W_{кр}$ – середній критичний вологовміст шару матеріалу, кг/кг, тобто вологовміст при якому перший період сушки переходить в другий.

Після підстановки в рівняння (2.4) значення τ_1 та τ_2 з (2.5) і (2.6), а також враховуючи що для капілярно-пористих тіл, до яких відноситься і жом люцерни, показник ступеня $m=1$ [58], отримаємо рівняння для визначення загальної тривалості сушки шару жому:

$$\tau = \frac{1}{N} \left[W_0 - W_{кр} + A \ln \frac{W_{кр} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_{кр} - W_2) \right], \quad (2.7)$$

В рівнянні (2.7) коефіцієнти A і β , значення критичного та рівноважного вологовмісту визначаються експериментально.

Швидкість сушки матеріалу в першому періоді N залежить від параметрів шару (висота, його щільність) і теплоносія (температура, вологість, швидкість та витрата його) [59].

В результаті аналітичних досліджень було отримано критеріальне рівняння за допомогою якого можна визначити N :

$$N_{uv} = B \left(\frac{v \rho_n l}{\mu g} \right)^{K_1} \left(\frac{H}{l} \right)^{K_2}, \quad (2.8)$$

де V – швидкість повітря та вільний переріз; ρ_n – щільність повітря; l – визначальний розмір частинок (використовують, як правило, середньозважену довжину частинок); μ – динамічна в'язкість повітря; H – висота шару; B – k_1, k_2 – константи які визначаються експериментальним шляхом.

В рівнянні (2.8) N_{uv} – видозмінений критерій Нуссельта для об'ємного коефіцієнта теплообміну. Його значення можна визначити з наступного рівняння [60]:

$$N_{uv} = \frac{\rho_o l^2}{\lambda_n} \cdot \frac{N}{\Delta P'} \quad (2.9)$$

де ρ_o - щільність часток тому в їх природному структурному стані; λ_n - коефіцієнт масо провідності повітря; ΔP – середня різниця парціальних тисків пари біля поверхні частинок і в повітрі.

Із рівнянь (2.8) і (2.9) можна отримати вираз для визначення швидкості сушки в першому періоді:

$$N = B \frac{\lambda_n \Delta P}{\rho_o l^2} \cdot \left(\frac{V \rho_n l}{\mu g} \right)^{K_1} \cdot \left(\frac{H}{l} \right)^{K_2}, \quad (2.10)$$

Середню різницю парціальних тисків ΔP в рівнянні (9) можна виразити через початковий сушильний потенціал який характеризується різницею вологовмісту адіабатично насиченого повітря і того що поступає в шар; висоту шару H – через питома навантаження матеріалу на одиницю площини сітки на якій він знаходиться; швидкість повітря на вільний переріз V – через питому витрату повітря G_n , тобто

$$\Delta P = z_1 (d_n - d_1) = z_1 \Delta d_1; H = z_2 \cdot \rho; V \rho_n = z_3 G_n \rho_n, \quad (2.11)$$

де z, z_2, z_3 – коефіцієнт пропорційності.

Після деяких перетворень рівняння (2.10) отримує:

$$N = (G_n \rho_n)^{K_1} P^{K_2} \Delta d_1 \left[\frac{B z_1 z_2^{K_2} z_3^{K_1} \lambda_n}{\mu \cdot g \cdot \rho_o \cdot l^{2-K_1}} \right] \quad (2.12)$$

Після підстановки рівняння (2.7) значення N із рівняння (2.12), отримаємо рівняння для визначення загальної тривалості сушки шару жому:

$$\tau = \frac{W_0 - W_{kp} + A l_n \frac{W_{kp} - W_0}{W_2 - W_p} + \beta (W_{kp} - W_2)}{G_n \rho_n^{K_1} P^{K_2} \Delta d_1 \left[\frac{B z_1 z_2^{K_2} z_3^{K_1} \lambda_n}{\mu \cdot g \cdot \rho_o \cdot l^{2-K_1}} \right]} \quad (2.13)$$

Дана аналітична залежність визначає загальну тривалість сушіння від цілої низки параметрів, зокрема початкового, критичного, рівноважного і кінцевого вологовмісту, питомої витрати повітря що продувається через шар матеріалу питомого навантаження шару матеріалу, температури і вологості повітря, фізико-хімічних властивостей матеріалу які враховуються коефіцієнтами $m=1$, A і β .

Початковий вологовміст визначається ступенем механічного віджиму

зелених рослин. Цей вологовміст, а також кінцевий, задаються умовами технологічного процесу. Початковий сушильний потенціал повітря визначається по I-d діаграмі, виходячи з середніх значень його температури і його вологості. Значення показників ступеня k_1 і k_2 , а також коефіцієнтів A , β , B , z_1 , z_2 , z_3 визначаються експериментальним шляхом.

Експериментальні дослідження процесу сушки жому з люцерни в товстому шарі проводили на лабораторній установці схема якої наведена на (рис. 2.5).

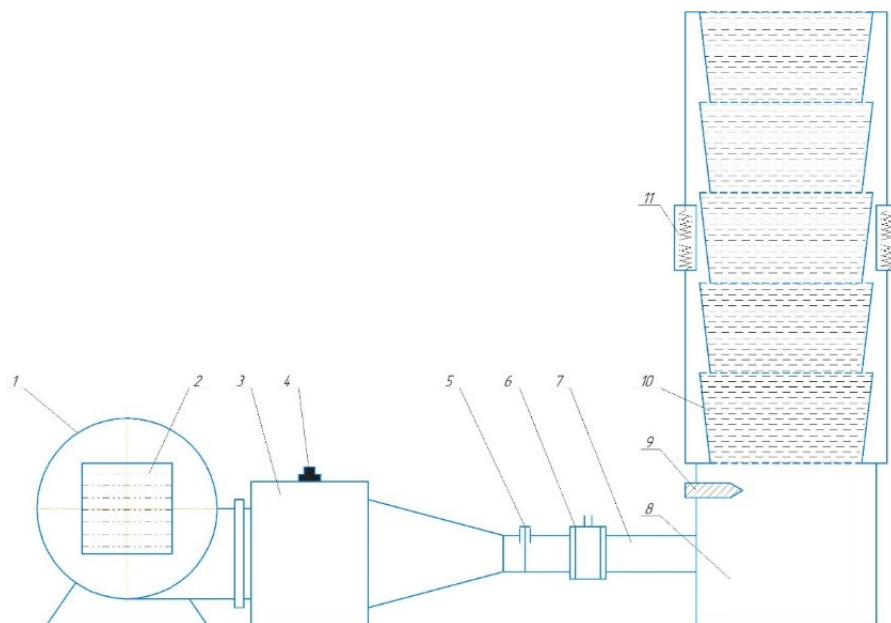


Рисунок 2.5. Схема лабораторної установки: 1 – вентилятор; 2 – електричний калорифер; 3 – розподільна камера; 4 – регулятор температури; 5 – заслінка; 6 – діафрагма; 7 – повітропровід; 8 – змішувальна камера; 9 – датчик температури; 10 – контейнер завантажувальний; 11 – пристрій для герметизації контейнерів

Основними елементами лабораторної установки є вентилятор 1 Ц4–70№8, електрокалорифер 2 ПНЕ-67,5, розподільна камера 3, повітропровід 7, контейнери із масою 10, запірні, регульовальні та вимірювальні апаратура. Витрату повітря контролювали за допомогою діафрагми 6 встановленої на прямолінійній ділянці повітропроводу 7. У змішувальній камері 8 встановлено термометр 9 для контролю температури повітря на вході в сушильну камеру. У камері розміщені 5-10 (в залежності від необхідної висоти шару матеріалу

контейнерів) 10 для зразків досліджуваного матеріалу. Вони мають форму зрізаної чотирикутної піраміди з кутом нахилу бічної поверхні 5° , висотою 0,2 м і площею нижньої основи $0,1 \text{ м}^2$. Дно кожного контейнера виготовлено із сітки з вічками $1,5 \times 1,5 \text{ мм}$, по периметру якого наклеєна м'яка гума. Герметизація між контейнерами забезпечується натяжним пристроєм 11, а бічні стінки контейнерів теплоізовані.

Для автоматичного регулювання температури сушильного агента (повітря) використовували датчик 4, встановлений в розподільній камері 3. Лабораторна установка має три сушильних колонки для проведення досліду в трьох повтореннях. Швидкість повітря в робочій частині каналу заміряли за допомогою діафрагми і тягонапорометра. Одночасно психрометричними термометрами з ціною поділу $0,2$ градуси заміряли температуру повітря на вході в шар матеріалу.

Вологовміст матеріалу в процесі сушки визначали періодичним зважуванням контейнерів зі зразками на лабораторних вагах ТВЕ-12-05. Початковий і кінцевий вологовміст матеріалу визначали за стандартною методикою ДСТУ 29144:2009.

Режимні параметри матеріалу і сушильного агента (повітря) при проведенні дослідів були наступними: середня початкова температура сушильного агента змінювалась послідовно з інтервалом 10 градусів від 297 до 327К , питома витрата повітря – з інтервалами $200\text{-}300 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$ від 340 до $1600 \text{ м}^3/(\text{год} \cdot \text{м}^2)$, а питома навантаження шару матеріалу змінювалося від 7 до 100 кг/м^2 .

2.2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ПОЛЬОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Досліди закладали впродовж 2018–2022 рр. на дослідному полі НДГ «Агрономічне» Вінницького національного аграрного університету, розташованого в межах природо-кліматичної зони правобережний Лісостеп України. Координати: N $49^\circ 11' 31''$, E $28^\circ 22' 16''$. Висота над рівнем моря – 258 м . Польові досліди закладали за традиційною методикою в агрономії на сірих

лісових ґрунтах (ґрунти Luvic Greyic Phaeozem). Вид угіддя – рілля. Поверхня ґрунту – грудкувата. Агрохімічний потенціал поля: вміст гумусу: 2,04–2,22%, легкогідролізованого азоту 61–68, рухомого фосфору 147–213, обмінного калію 80–92 мг кг⁻¹ ґрунту при рНксл 5,2–5,3. Попередник – пшениця озима. Важливу роль у вирощуванні й одержанні високої врожайності зернобобових культур належить метеорологічним умовам, які створюють у вегетаційний період сприятливі умови для росту рослин. Клімат природно-кліматичного району, де проводилися дослідження – характерний для зони Лісостепу правобережного України. Проте нині майже всі посівні площі в межах території України перебувають у зоні ризикованого землеробства з постійним ризиком втрати врожаю за нестачі чи надлишку вологи.

Дослід 1. «Вплив передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом та обробки посівів ретардантом на ріст, розвиток, урожайність і якість насіння сортів сої» (2018-2022 рр.).

Фактор А – сорти сої, занесені до Державного реєстру сортів, дозволених для поширення в 2018 році: Азимут та Голубка.

Фактор В – передпосівна обробка насіння: бактеріальний препарат Ризогумін для сої (Ризогумін (600 г на гектарну норму насіння) з бактеріальними клітинами *Bradyrhizobium japonicum* М-8 або 46 (перший компонент) та фізіологічно активні речовини біологічного походження (ауксини, цитокініни, амінокислоти, гумінові кислоти), мікроелементи в хелатованій формі і сполуки макроелементів у стартових концентраціях (другий компонент).

Фактор С – обробка посівів ретардантом: ретардант – хлормекват-хлорид (750 г/л) ф. BASF CE, Німеччина, в різних концентраціях (без обробки, 0,5 %, 0,75 % та 1 % розчином), що відноситься до групи четвертинних амонієвих сполук. Застосовували дворазову обробку посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації (табл. 2.1).

У день сівби насіння сої обробляли бактеріальним препаратом Ризогумін (600 г на гектарну норму насіння) за допомогою ПКС-20 Супер. Під час вегетації

посівів використовували дворазову обробку посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації. У день сівби насіння сої на контрольному варіанті обробляли водою.

Таблиця 2.2

Схема досліду 1. Вплив передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом та обробки посівів ретардантом на ріст, розвиток, урожайність і якість насіння сортів сої (2018-2022 рр.)

Фактор А – сорт	Фактор В – передпосівна обробка насіння	Фактор С – концентрація ретарданту
А ₁ – Азимут	В ₁ – без передпосівної обробки	С ₁ – без обробки посівів (к)*
А ₂ – Голубка	В ₂ – передпосівна обробка насіння бактеріальним препаратом Ризогумін для сої (<i>Bradyrhizobium japonicum</i> М-8 або 46)	С ₂ – 0,5 % концентрація ретарданту хлормекват-хлорид
		С ₃ – 0,75 % концентрація ретарданту хлормекват-хлорид
		С ₄ – 1 % концентрація ретарданту хлормекват-хлорид

Примітка: (к.) – контроль. За контроль прийнято варіант без передпосівної обробки та без обробки рослин ретардантом. У день сівби насіння сої на контрольному варіанті обробляли водою.

Наукові дослідження виконано шляхом проведення польових і лабораторних дослідів. Дослідження проводилися відповідно до загальноприйнятих методик. Визначення урожаю проводили суцільним обмолотом облікової ділянки комбайном Сампо-500. За необхідності на облікових ділянках виділяли виключки. Перед збиранням урожаю насіння з облікових ділянок збирали спочатку урожай на виключках та захисних смугах,

щоб не відбулось змішування даної продукції із обліковою. Збирали облікові ділянки прямим комбайнуванням. Після збирання кожної ділянки насіння затарювали у мішечок, куди вкладали етикетку із зазначенням номера ділянки, назви варіанта і номера повторення. Після обмолочування мішечки із насінням транспортували у лабораторне приміщення. Зваживши насіння, з кожного мішка відібрали середню (з верхньої середньої і нижньої частини об'єму) пробу масою 1-2 кг для визначення вологості та показників якості. Перші два показники використовували для перерахунку бункерної маси насіння в кілограмах з ділянки на урожайність у тони з 1 га.

Агроекологічну оцінку технологій вирощування зернобобових культур проводили за балансом поживних речовин у ґрунті, як різниця між обсягом витрат поживних речовин, що використовуються рослинами з ґрунту на формування урожаю, до кількості поживних речовин, повернутих до ґрунту з побічною продукцією культур (соломою, стеблами, листям, стерньовими рештками) та симбіотичною азотфіксацією.

Обсяги утворення побічної продукції зернобобових культур визначали експериментально методом зважування загальної біомаси при обмолоті після відділення маси насіння або як встановлене співвідношення між урожайністю насіння та обсягом побічної продукції.

Розрахунок економічної та біоенергетичної ефективності технології вирощування проводили за загальноприйнятими методиками О. К. Медведовський, П.І. Іваненко (1988) «Енергетичний аналіз інтенсивних технологій в сільськогосподарському виробництві» (1988 р.) на основі прямих витрат із технологічних карт загальноприйнятої форми. Енергетичний коефіцієнт розраховували, відношенням енергії отриманої від основної та побічної продукції до затраченої на її вирощування. Вартість насіння, добрив, пального та вирощеного врожаю взято за оптовими цінами станом на 1.01.2022 року.

Розділ 3. АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ

3.1. НАУКОВІ ОСНОВИ ОРГАНІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА СОЇ В УКРАЇНІ

Актуальність досліджень обумовлена пошуком нових підходів щодо підвищення агроєкологічного потенціалу в агроценозах правобережного Лісостепу України у тенденціях змін клімату. До числа найважливіших сільськогосподарських культур в світовому та вітчизняному землеробстві, які займають вагомую частку у продовольчому та кормовому секторі відносять зернобобові культури [60].

На сьогодні в умовах України інтенсифікація землеробства як основний напрям підвищення продуктивності сільськогосподарського виробництва непридатний. Відтак, простежується тенденція до переходу на технології, які ґрунтуються на зменшенні питомої ваги найбільш енергоємних процесів, у тому числі на мінімізації обробітку ґрунту, більш інтенсивного використання біологічного азоту, застосуванні різних рідких комплексних добрив, що забезпечує високий коефіцієнт їх засвоєння рослинами, використанні надбань біотехнології, біопрепаратів, регуляторів росту тощо.

В умовах правобережного Лісостепу України такі технології характеризуються вирощуванням обмеженої кількості культур у сівозміні, серед яких переважають пшениця озима, соняшник, кукурудза; інтенсивним застосуванням мінеральних добрив, обсяги яких за вирощування зазначених культур сягають 200 – 300 кг/га у діючій речовині основних елементів живлення азоту, фосфору і калію, що у фізичній масі мінеральних добрив сягає 1000 кг/га; багаторазовим застосуванням синтетичних пестицидів, кількість внесення яких впродовж одного вегетаційного періоду може складати до 10 разів при вирощуванні однієї культури; частим поверненням на одне і те ж поле вирощуваної культури, що може складати через один-два роки, а для кукурудзи – вирощування підряд впродовж двох-трьох років; неоптимальним чергуванням

культур у сівозміні, коли для кукурудзи та пшениці озимої основним попередником виступає соняшник, а для соняшника – кукурудза [16, 23].

За таких встановлених високих технологічних умов вирощування культур в правобережному Лісостепу, складаються несприятливі умови для росту і розвитку рослин, що вимагає подальшого підвищення обсягів застосування засобів хімізації – мінеральних добрив і синтетичних пестицидів.

Враховуючи нестачу органічних добрив у сучасній сівозміні українського сільського господарства, коли у 2019 році удобрена площа ґрунтів гноєм склала лише 503600 га, що становить лише 2,7 % площі ріллі із розрахунковим внесенням органічних добрив на усю площу ріллі України 0,5 т/га при науково обґрунтованій нормі 18,3 т/га, які б могли частково стабілізувати стійкість таких агроecosystem, постає важлива проблема пошуку альтернативних способів поповнення запасу органічної речовини у ґрунті, що сприятиме не тільки покращенню агроecological стану ґрунтів, але й зумовить підвищення стійкості таких одноманітних агроecosystem до впливу шкочочинних організмів – шкідників, хвороб і бур'янів, чисельність яких різко зросла [60].

У сучасних умовах ведення інтенсивного землеробства України альтернативним способом поповнення запасу поживних речовин і органічної речовини у ґрунті є заорювання побічної продукції найпоширеніших культур, що вирощуються у сівозміні: соломи, стебел і стерні пшениці озимої, ріпаку озимого, кукурудзи, соняшнику та інших [61]. В Україні такий агроecological захід тривалий час не застосовувався, оскільки в часи існування Радянського Союзу солома зернових культур, стебла кукурудзи і соняшнику використовувалися для тваринництва в якості корму та підстилки. Починаючи з 2000-х років різке скорочення тваринницької галузі українського сільського господарства зумовило залишення побічної продукції рослинництва у полі з послідуочим її спалюванням. Лише починаючи з 2010-х років сільськогосподарські підприємства почали подрібнювати рослинні рештки та заорювати у якості органічного добрива.

Проте, більш вагомим чинником збільшення обсягів накопичення

поживних речовин у ґрунтах сільськогосподарських угідь України є заорювання побічної продукції зернобобових культур, яка характеризується значно вищим вмістом поживних речовин у своєму хімічному складі, симбіотичною азотфіксацією зернобобових культур під час їх вирощування, проте агроекологічне значення зернобобових культур у сучасній інтенсивній сівозміні України недооцінене [62].

Одним з важливих завдань сучасного агровиробництва є забезпечення галузі тваринництва повноцінною кормовою та сировиною. Саме завдяки різноманітності кормів, за їх збалансованістю та екологічною безпечністю визначаються численні морфологічні, фізіологічні й екологічні адаптації свійських тварин, що позначаються на їх продуктивності, стані здоров'я та стійкості до умов навколишнього природного середовища. Горох є основною зернобобовою культурою на Україні. Він має велике продовольче, кормове та агротехнічне значення, цінний за широким спектром поживних речовин. Посівні площі гороху на Україні становлять близько 0,3 млн. га [63]. Відтак, винос поживних речовин з ґрунту вирощуваними культурами компенсувався значними обсягами внесення органічних добрив [64].

Разом із тим, ще непоодинокі випадки, коли солома на полях після збирання врожаю просто спалюється. При цьому, безповоротно втрачається з одного гектара біля 1,5–2 т органічної речовини, а також порушується мікрофлора ґрунту. Це призводить до зниження родючості ґрунтів, що позначається і на урожайності сільськогосподарських культур [65].

У ХХІ столітті посівні площі гороху в Україні різко скоротилися, а його агроекологічне значення суттєво зросло. Зменшення посівних площ гороху зумовлено, насамперед, економічними факторами тоді, як почали зростати посівні площі інших, часто малопоширених зернобобових культур [66].

Солома зернобобових культур більше, ніж інші органічні добрива, містить органічної речовини, причому дуже цінних компонентів для підвищення родючості ґрунту: целюлоза, пентозами, геміцелюлоза і лігнін, які є вуглеводними енергетичними субстратами для ґрунтових мікроорганізмів. Це

основний будівельний матеріал для гумусу ґрунту [67-74].

У процесі деструкції соломи утворюються фізіологічно активні речовини, які в малих концентраціях здатні позитивно впливати на ріст і розвиток рослин. Відтак, вихід соломи залежить від сільськогосподарської культури та її рівня врожайності. Співвідношення між основною продукцією і соломою коливається у межах 1:0,8 – 1:2,0. Розрахунки показують, що середньорічні обсяги виходу соломи зернових і зернобобових культур у сільському господарстві України за останні п'ять років становлять 56 млн т. Заорювання даного обсягу соломи може забезпечити повернення в ґрунт близько 280 тис. т азоту, 140 тис. т фосфору і 448 тис. т калію. Цієї кількості елементів живлення достатньо для отримання приросту врожаю зерна пшениці озимої в обсязі 3–3,5 млн т [74].

Найбільшими джерелами постачання поживних решток в Україні за їх обсягами, виходячи з посівних площ, є солома пшениці – 30,3 %, стебла кукурудзи на зерно – 17,9 %, соломи ячменю – 12,0 %, стебла соняшника – 23,8 % та ріпаку – 12,6 %. Максимально застосовуючи рослинні рештки для удобрення сільськогосподарських культур, можна розраховувати на їх щорічне внесення у сприятливі роки близько 5 т/га, в несприятливі – до 3,5 т/га [75].

Розкладання рослинних решток у ґрунті проходить повільно і залежить від якості заорювання й погодних умов. Встановлено, що за 2,5 – 4 місяці розкладається до 46 % соломи, за півтора-два роки – до 80 %. За розкладання 1 т соломи в ґрунті вже через 3 місяці утворюється близько 50 кг гумусу, а через 2 роки – близько 90 – 100 кг [76].

Поряд із зазначеними властивостями побічної продукції зернових культур, як зазначає Панцирева Г.В., зернобобові рослини мають ряд переваг, що може значно збільшити їх позитивний агроекологічний ефект при нижчих економічних затратах. Зростання агроекологічного значення зернобобових культур у сівозміні визначається не лише їх накопиченням органічної речовини з побічною продукцією за більш сприятливого співвідношення між азотом та вуглецем, але й симбіотичною азотфіксацією, стрижневою кореневою системою, що добре розрихлює ґрунт, різноманітністю культур у сівозміні та покращенням

їх чергування, через короткий вегетаційний період зернобобових культур – додатковим накопиченням вологи у ґрунті, очищенням агроєкосистеми від шкідників, хвороб і бур'янів [77]. У той же час необґрунтовано мала посівна площа зернобобових культур в Україні не дозволяє повністю реалізувати їх агроєкологічний потенціал.

У той же час, на думку Ткачука О.П., основний агроєкологічний акцент на сьогоднішній день робиться на традиційних протягом останніх років зернобобових культурах – горосі та сої, але у господарствах починають зростати посівні площі інших зернобобових культур, зокрема нуту, сочевиці, квасолі, бобів [78]. Про їх агроєкологічне значення у сівозміні відомо надзвичайно мало.

Науково-експериментальні дослідження проводили на основі опрацювання матеріалів Державної служби статистики України щодо посівних площ та рівнів урожайності зернобобових культур в господарствах України, зокрема сої, гороху, нуту, сочевиці, квасолі, бобів. На основі довідкових даних було проведено оцінку азотфіксуючої здатності зернобобових культур та обсяг накопичення ними побічної продукції у вигляді їх соломи [79]. Також користувалися довідковими даними щодо вмісту у солі довіджуваних зернобобових культур поживних речовин: азоту, фосфору, калію. Користувалися розрахунковими способами щодо обчислення надходження у ґрунт поживних речовин [2, 80]. Усі зазначені показники порівнювали із традиційними сільськогосподарськими культурами, що вирощуються у інтенсивній сівозміні.

Основними завданнями досліджень було: дослідити посівні площі зернобобових культур в Україні та їх структуру; навести фактичний рівень урожайності досліджуваних зернобобових культур, що вирощуються на території України; здійснити розрахунок обсягів можливого утворення побічної продукції зернобобових культур, що може бути заорана у ґрунт; привести хімічний склад побічної продукції зернобобових рослин за вмістом основних неорганічних речовин, що необхідні рослинам: азоту, фосфору та калію; провести розрахунки обсягів надходження до ґрунту основних елементів живлення рослин: азоту, фосфору і калію при заорюванні рослинних решток

зернобобових культур; проаналізувати процеси симбіотичної азотфіксації зернобобових культур, що вирощуються за інтенсивними технологіями в Україні; рекомендувати зернобобові культури, які здійснюють найбільш позитивний агроекологічний вплив щодо надходження поживних речовин до ґрунту.

За даними Державної служби статистики в Україні у 2022 році посівні площі під зернобобовими культурами становили є дуже низькими. Відтак, на рис. 3.1. наведено дані, щодо посівних площ зернобобових культур (566,0 тис. га).

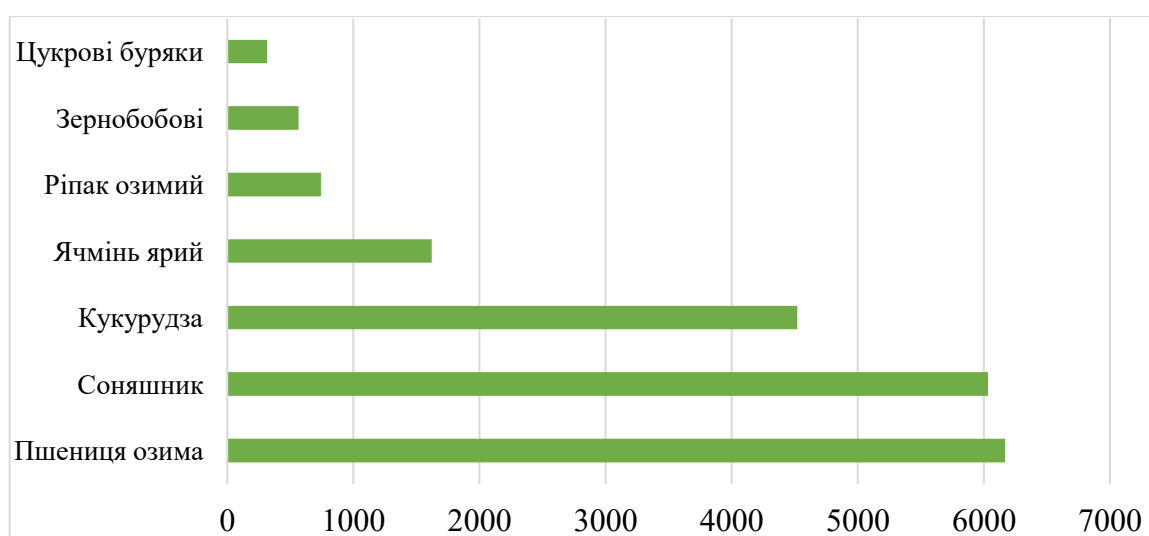


Рисунок. 3.1. Посівні площі основних культур у польових сівозмінах України у 2022 році

Згідно науково обґрунтованих розрахунків, мінімально необхідна посівна площа зернобобових культур у структурі посівних площ польових рослин в Україні для стабілізації агроекологічного стану агроecosистем, має становити не менше 10 % від площі ріллі, а за фактичними даними 3%. Для цього посіви зернобобових культур в Україні необхідно довести до загальної площі 1994190 га, тобто збільшити у 3,5 рази. Від існуючої у 2019 році.

За даними Державної служби статистики (станом на 2015 р.), посівна площа лише сої, без урахування інших зернобобових культур, становила 1999,8 тис. га, що відповідало мінімальним агроекологічним вимогам щодо стабілізації

стану агроєкосистем. Проте, в силу зміни кліматичних умов, що зумовлено з глобальним потеплінням, спостерігалось істотного зменшення урожайності сої і з того часу посівні площі цієї культури почали різко зменшуватись.

Найбільша посівна площа серед зернобобових культур, за даними Державної служби статистики в Україні зафіксована у 2022 році (горох – 347,0 тис. га), а посівна площа сої склала 129,8 тис. га. Решта зернобобових культур мають незначну посівну площу: від 42,0 тис. га – у квасолі, до 3,2 тис. га – у бобів (табл. 3.1).

Таблиця 3.2

Посівні площі та рівень урожайності зернобобових культур в Україні у 2022 році (за даними Державної служби статистики)

№	Вирощувана культура	Посівна площа, тис. га	Урожайність, т/га
1	Соя	129,8	2,29
2	Горох	347,0	2,28
3	Нут	36,0	1,40
4	Сочевиця	8,0	1,39
5	Квасоля	42,0	1,59
6	Боби	3,2	2,32
Всього зернобобових культур		566,0	-

У структурному відношенні частка гороху найбільша серед усіх зернобобових культур, що вирощуються в Україні, становить 61,3 %, частка сої – 22,9 %. Сочевиця та боби у структурі посівних площ серед зернобобових культур України займають найменшу частку – відповідно 1,4 % та 0,6 % (рис. 3.2).

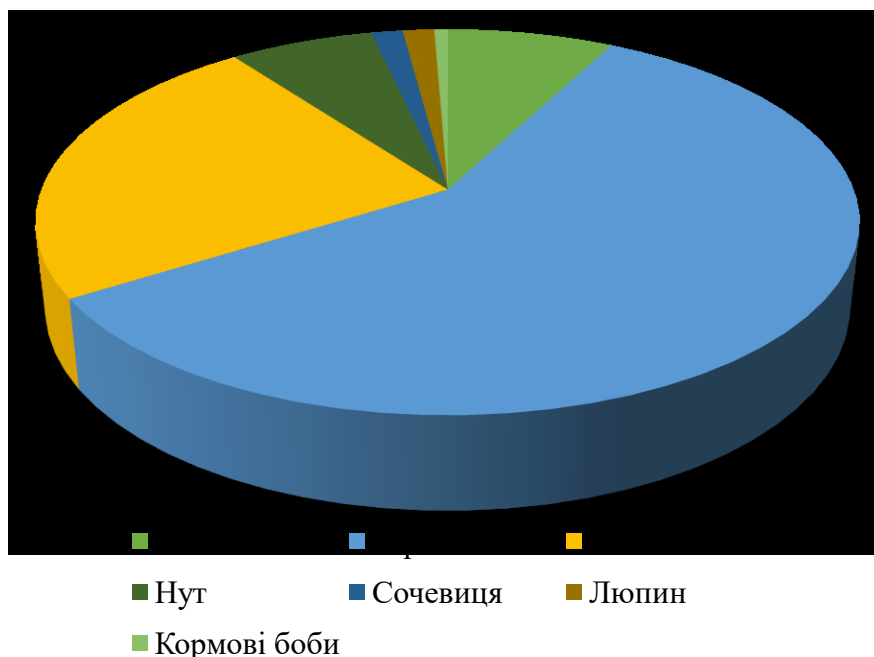


Рисунок. 3.2. Структура посівних площ зернобобових культур в Україні у 2022 році

Середня урожайність зернобобових культур, за даними Державної служби статистики в Україні у 2022 році варіювала в межах 1,39 – 2,32 т/га. Найвищою вона була у бобів, сої та гороху, а найнижча – у сочевиці, нуту та квасолі. Якщо взяти за орієнтир зернову яру культуру – ячмінь ярий, то урожайність зернобобових культур, порівняно з нею, була у 0,7 – 2,4 рази меншою.

Співвідношення зерна до побічної продукції усіх зернобобових культур є подібним і знаходиться у діапазоні 1 : (1,2-1,5). Відтак, найбільше побічної продукції від маси насіння утворюють боби, а найменше – сочевиця (табл. 3.3).

За співвідношенням зерна до побічної продукції, зернобобові утворюють більше побічної продукції, ніж зернові культури і за цим показником наближаються до ріпаку озимого.

Враховуючи середній рівень врожайності зернобобових культур в Україні, нами було розраховано утворення ними вегетативної маси побічної продукції (соломи, стебел). Встановлено, що найбільше побічної продукції у ґрунт можуть повернути боби – 3,5 т/га, соя і горох – на 8,6 % менше, квасоля – на 37,1 %, а найменше – нут і сочевиця – 1,7 – 1,8 т/га.

**Обсяги утворення побічної продукції зернобобових рослин
у інтенсивній сівозміні**

Культура	Співвідношення зерна до побічної продукції	Середній обсяг утворення побічної продукції, т/га
Соя	1 : 1,4	3,2
Горох	1 : 1,4	3,2
Нут	1 : 1,3	1,8
Сочевиця	1 : 1,2	1,7
Квасоля	1 : 1,4	2,2
Боби	1 : 1,5	3,5

Порівняно з іншими польовими культурами інтенсивної сівозміни, повернення до ґрунту побічної продукції зернобобових культур є нижчим, ніж від таких культур як пшениця озима, кукурудза, соняшник, але така ж як при утворенні побічної продукції від ячменю ярого.

У таблиці 3.4 наведені, дані щодо вмісту основних поживних речовин у побічній продукції усіх зернобобових культур подібний і становить: азоту – 10,0–12,0 кг/т, фосфору – 3,4–3,6 кг/т, калію – 4,6–5,0 кг/т.

Децю вищим вмістом поживних елементів у побічній продукції характеризується соя, а решта культур мають приблизно однакові показники. За вмістом азоту зернобобові культури переважають зернові у 2,3–2,7 рази, фосфору – у 1,5–1,6 рази і поступаються за вмістом калію.

Таблиця 3.4

**Характеристика вмісту основних елементів у побічній продукції
зернобобових культур, кг/т**

Культура	N	P	K
Соя	12,0	3,6	5,0
Горох	10,0	3,5	4,6
Нут	10,6	3,5	4,7
Сочевиця	10,8	3,4	4,6
Квасоля	10,6	3,5	4,7
Боби	10,6	3,6	4,7

Із вегетативною масою побічної продукції зернобобових культур, у ґрунт від неї надійде 19,1 – 38,4 кг/га мінерального азоту. Найбільше його буде накопичено за вирощування сої та бобів, а найменше – за вирощування нуту і сочевиці (табл. 3.5).

Таблиця 3.5

Обсяги накопичення у ґрунті основних елементів живлення при заорюванні рослинних решток побічної продукції та симбіотична азотфіксація зернобобових культур, кг/га

Культура	Надійде у ґрунт елементів живлення з рослинними рештками			Симбіотична азотфіксація
	N	P	K	
Соя	38,4	11,5	16,0	120
Горох	32,0	11,2	14,7	100
Нут	19,1	6,3	8,5	80
Сочевиця	18,4	5,8	7,8	85
Квасоля	23,3	7,7	10,3	70
Боби	37,1	12,6	16,5	110

Встановлено, що заорювання побічної продукції рослин сої забезпечує надходження у ґрунт майже у два рази більше мінерального азоту, ніж його надійде за приорювання рослинних решток пшениці озимої.

Встановлено, що найбільше мінерального фосфору надійде у ґрунт при вирощуванні бобів – 12,6 кг/га, а також сої та гороху – 11,2–11,5 кг/га, що у 1,1–1,3 рази більше, ніж надійде його у ґрунт з соломною пшениці озимої. Проте, найменше мінерального фосфору надійде у ґрунт з побічною продукцією сочевиці – 5,8 кг/га.

Надходження калію у ґрунт з побічною продукцією бобів і сої буде найбільшим і складатиме 16,0–16,5 кг/га, а найменше його надійде при вирощуванні сочевиці – 7,8 кг/га.

На відміну від інших сільськогосподарських рослин, зернобобові культури

здатні фіксувати симбіотичний азот з допомогою бульбочкових бактерій та додатково збагачувати ним ґрунт. Найбільше його фіксує соя – 120 кг/га, боби – на 10 кг/га менше, горох – на 20 кг/га, квасоля – на 50 кг/га, нут – на 40 кг/га та сочевиця – на 35 кг/га менше.

Враховуючи системний вплив вирощування зернобобових культур на оптимізацію агроекологічного стану ґрунту, який вміщує перетворення частини органічної маси побічної продукції у гумус, накопичення з неї основних поживних речовин (азоту, фосфору і калію), а також вироблення зернобобовими культурами біологічного азоту у симбіозі з бульбочковими бактеріями, нами було розраховано загальний позитивний вплив усіх зернобобових культур на стан ґрунту, що враховує усі перераховані чинники та представлений у відносних одиницях на рис. 3.3.

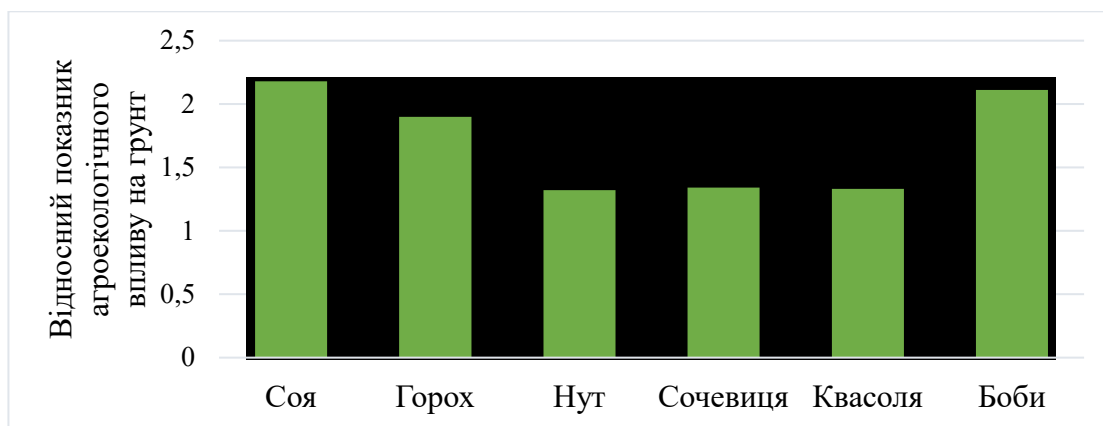


Рисунок. 3.3. Відносний агроекологічний ефект впливу на ґрунт вирощування зернобобових культур

Найбільший позитивний вплив на агроекологічний стан ґрунту здійснює вирощування сої з відносним показником 2,18, а також боби – 2,11. Вирощування гороху має дещо менший показник – 1,90. Решта зернобобових культур – нут, сочевиця та квасоля характеризуються найменшим відносним показником впливу на ґрунт – 1,32 – 1,34.

Доведено, що збільшення площ зернобобових культур у інтенсивній сівозміні здійснить позитивний вплив на агроекологічний стан ґрунту. Відтак, вирощування бобів дозволяє отримати найвищу масу побічної продукції, що

може бути заорана у ґрунт – 3,5 т/га. Тоді, як побічна продукція бобів характеризується найвищим вмістом мінерального фосфору – 3,6 кг/т, що забезпечує надходження у ґрунт найбільше мінерального фосфору – 12,6 кг/га серед усіх зернобобових культур, а також калію – 16,5 кг/га.

Побічна продукція сої характеризується найвищим вмістом азоту – 12,0 кг/т, фосфору – 3,6 кг/т та калію – 5,0 кг/т, що дозволяє після вирощування сої накопичити у ґрунті з побічною продукцією найбільше мінерального азоту – 38,4 кг/га. Також соя характеризується найвищою симбіотичною азотфіксуючою здатністю серед усіх зернобобових культур – 120 кг/га.

Побічна продукція зернобобових культур має вищий вміст азоту у 2,3-2,7 рази, фосфору – у 1,5-1,6 рази, порівняно з побічною продукцією зернових культур. Також при заорюванні побічної продукції сої у ґрунт надійде мінерального азоту у 2 рази, а фосфору – у 1,1-1,3 рази більше, ніж при заорюванні побічної продукції пшениці озимої.

Серед досліджуваних зернобобових культур, що вирощуються в Україні, найбільший позитивний комплексний агроекологічний вплив на ґрунт, що враховує надходження органічної маси з побічної продукції, мінерального азоту, фосфору і калію з нею і симбіотичну азотфіксацію, буде здійснювати вирощування сої.

3.2. АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА СОРТОВИХ РЕСУРСІВ СОЇ

Соя є рентабельною культурою, тому займає значну частку у структурі посівних площ більшості сільськогосподарських підприємств України. Причиною збільшення посівних площ сої в Україні є велика експортна потреба та висока ціна на світовому ринку через великий попит імпортерів на сою в світі [81].

У 2016 р. Україна була рекордсменом зі зростання валового збору зерна сої та першою у світі за приростом експорту сої, випередивши світових виробників цієї культури – США і Бразилію. Виходячи з цього, у недалекому майбутньому Україна може експортувати великі обсяги сої за кордон і за рахунок цього

істотно підвищити рентабельність вирощування цієї культури [82].

Враховуючи зростання посівних площ сої в Україні останніми роками та доведення її посівів до 2 млн. га, виникає необхідність у пошуку перспективних сортів, які б відзначалися вищою продуктивністю, стійкістю до посухи, хвороб, шкідників, вилягання, осипання насіння із коротким вегетаційним періодом, високою якістю насіння та підвищеною азотфіксуючою здатністю [83]. Саме правильно підібраний сорт сої може забезпечити непоганий прибуток.

Соя належить до тепло- і вологолюбивих культур. Тому в умовах нестачі хоча б одного із перерахованих чинників, необхідно обирати посухо- або холодостійкі сорти цієї культури. Також важливою характеристикою сорту сої є період її досягання [84].

При виборі потенційного сорту сої варто звернути увагу також на вміст білка у насінні, висоту рослин та висоту кріплення нижніх бобів, товщину стебла, характер росту рослин, схильність до розтріскування і осипання насіння та інші.

Вміст білка у насінні сої буде важливим показником при експорті насіння сої, зокрема на азійський ринок або при її переробці. Також соя використовується як олійна культура, тому вміст жиру у її насінні також відіграє важливу роль. Вміст білка або жиру у насінні сої може істотно позначатися на її реалізаційній ціні [85].

Від висоти рослин сої прямопропорційно залежить її продуктивність. Також високі рослини сої мають глибоку кореневу систему, яка здатна ефективно використовувати вологу з нижніх шарів ґрунту, що є особливо актуальним в умовах посушливого клімату [86].

Висота кріплення нижніх бобів напряму пов'язана із висотою рослин та важлива для якісного збирання урожаю. При низькому розміщенні бобів від поверхні ґрунту можлива їх втрата при комбайновому збиранні. Тому для комбайнового збирання сортів сої, висота прикріплення нижніх бобів має становити не менше 12 см від поверхні ґрунту. Також сприяє збільшенню висоти прикріплення нижніх бобів зменшення ширини міжрядь при сівбі сої [87].

Товщина стебла рослин сої є важливим показником, що визначає стійкість

сортів до вилягання. Сприяє вилягання рослин сої дуже густий посів, оскільки соя є світлолюбивою культурою, а в умовах загущеного посіву вона буде відчувати нестачу світла, що призведе до зниження гілкування, але сприятиме зростанню висоти рослин, тоншання стебла та вилягання [88].

Схильність сортів сої до розтріскування і висипання насіння з бобів також може зумовити втрату частини урожаю. Тому цей показник також враховують.

Такі параметри сортів сої як висота рослин, висота кріплення нижніх бобів, товщина стебла, схильність до розтріскування бобів та осипання насіння становлять групу технологічних показників, що впливають на умови збирання урожаю комбайновим способом. Стійкість сортів сої до посухи, шкідників, хвороб складають агроекологічні характеристики, що визначають стабільність продуктивності посівів за несприятливих умов довкілля [5, 89].

За раннього посіву сої бажано обирати сорти з опушеним листям, що є більш стійкими до зниження температури. Різні сорти сої характеризуються неоднаковою інтенсивністю росту рослин у різні періоди впродовж вегетаційного періоду. Одні сорти мають дуже повільний початковий ріст та є неконкурентними з бур'янами, а інші мають швидкий початковий ріст. Є сорти з тривалим періодом цвітіння, а інші цвітуть лише близько одного тижня, хоч вегетаційний період у них однаковий [2, 90].

Маса тисячі насінин повністю залежить від ознак сорту і напряму впливає на рівень урожайності. При більшій масі насіння сої, його можна загортати глибше, що сприятиме кращим сходам за посушливої погоди під час сівби.

Терміни дозрівання сої мають значення при використанні її в якості попередника для пшениці озимої або для вчасного внесення добрив та якісного обробітку ґрунту під наступну культуру у сівозміні. За таких вимог необхідно обирати скоростиглі сорти [6, 91].

За Міжнародною класифікацією ФАО, усі сорти сої, залежно від тривалості вегетаційного періоду, поділяються на 13 груп стиглості. В Україні придатні для вирощування лише перші п'ять груп: ультраскоростиглі сорти з періодом вегетації до 85 діб; ранньостиглі сорти – 86-105 діб;

середньоранньостиглі сорти – 106-125 діб; середньостиглі сорти – 126-135 діб; середньопізнньостиглі сорти з періодом вегетації 136-145 діб [8, 92].

Існує рекомендований розподіл груп стиглості сортів сої за географічним зонуванням території України. Зокрема для півдня України рекомендовані ранньостиглі сорти, для центральних областей – скоростиглі та середньостиглі, для півночі та заходу України рекомендуються скоростиглі, ранньостиглі та середньоранні сорти [7, 93]. Також при виборі сортів сої користуються наступною залежністю: ранньостиглі сорти використовують у якості попередників для пшениці озимої; середньостиглі – для збирання сої з оптимальною вологістю насіння без додаткової досушки; пізнньостиглі – при наявності у господарствах великих площ під соєю та неможливістю у короткі строки її зібрати, що запобігає осипанню насіння при перестиганні рослин. Ранньостиглі сорти сої дозволяють зменшити ризики через несприятливі умови вегетації, а сорти з тривалішим періодом вегетації є більш урожайними [94].

Сучасний потенціал урожайності більшості сортів сої, що внесені до Державного реєстру сортів рослин України – понад 3,5 т/га, але фактична урожайність в середньому в Україні складає близько 2 т/га. Подальше збільшення валових зборів сої в Україні має забезпечуватись зростанням її урожайності за раціонального використання сортів. Асортимент сортів сої, що занесені до Державного реєстру сортів рослин України з їх адаптацією до різних ґрунтово-кліматичних умов може забезпечити одержання агропромислом не тільки високих, але й сталих урожаїв сої [95]. У той же час велике різноманіття сортів сої у Державному реєстрі не дозволяє обрати оптимальний варіант щодо забезпечення стабільно високої продуктивності, стійкості до несприятливих чинників довкілля, адже в окремі несприятливі роки сорти сої можуть вилягати, що збільшує їх вегетаційний період, особливо при пізніх строках сівби або за зниження температури в період вегетації.

Оскільки в умовах Правобережного Лісостепу України актуальною залишається проблема нестачі оптимальних попередників під пшеницю озиму, то саме вирощування скоростиглих сортів сої може вирішити дану проблему.

Проте у світовому генофонді сої, у тому числі у Державному реєстрі сортів рослин України, кількість скоростиглих сортів найменша, порівняно із сортами інших груп стиглості. Також більшість сортів цієї групи стиглості мають спільне походження, тому для них є характерні спільні недоліки, зокрема невисока продуктивність, схильність до розтріскування та інші.

Екологічна стійкість сортів сої до несприятливих умов вегетації визначається показниками їх стійкості до посухи та хвороб. Найбільш посухостійкими є сорти ОАЦ Лейквью, Геба, Беркана – по 9,0 бала, а найменш посухостійкими: Легенда – 6,0 бала, Діона – 8,0 бала, Різдвяна, Кобза та ОАЦ Аватар – по 8,2 бала (табл. 3.6).

Таблиця 3.6

**Екологічна стійкість, продуктивність та якість насіння
скоростиглих сортів сої**

Сорт	Посухо- стійкість, бал	Стійкість до хвороб, бал	Урожайність насіння, т/га	Вміст білка у насінні, %	Вміст жиру у насінні, %
Легенда	6,0	8,0	2,30	38,5	21,1
Авантюрин	8,6	9,0	2,26	40,0	21,1
Кобза	8,2	9,0	2,14	39,1	20,7
ОАЦ Аватар	8,2	8,9	2,18	40,4	21,2
Діона	8,0	9,0	3,25	38,5	21,0
Аррата	8,1	9,0	3,00	38,0	21,2
ОАЦ Лейквью	9,0	8,8	2,56	41,7	21,7
ОАЦ Брук	8,5	8,8	2,03	41,7	21,3
Геба	9,0	8,5	2,25	40,2	22,0
Беркана	9,0	8,8	2,45	43,4	20,7
Рогізнянка	8,6	9,0	2,00	41,3	21,2
Арніка	8,7	9,0	2,20	41,0	20,5
Голубка	8,5	8,8	2,33	42,1	21,6
Мелодія	8,4	8,8	2,19	42,1	20,6
Райдуга	8,5	8,7	2,18	42,3	21,2
Красуня	8,3	8,8	2,18	41,3	19,3
Різдвяна	8,2	8,8	2,23	40,4	21,3

Найстійкішими до хвороб є сорти сої Авантюрин, Кобза, Діона, Аррата,

Рогізнянка, Арніка – по 9,0 бала. Найбільш уразливими до хвороб є сорти сої Легенда – 8,0 бала, Гєба – 8,5 бала.

Урожайність насіння скоростиглих сортів сої становить 2,00-3,25 т/га. Найвищою урожайністю відзначались сорти Діона – 3,25 т/га, Аррата – 3,0 т/га. Найменш продуктивними є сорти Рогізнянка – 2,00 т/га, ОАЦ Брук – 2,03 т/га, Кобза – 2,14 т/га.

Між балом посухостійкості скоростиглих сортів сої і вмістом у їх насінні білка встановлений середній позитивний кореляційний зв'язок ($r = 0,620$). Рівняння регресії ($y = 1,2402x + 30,512$) та коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,3838$) залежності вмісту білка у насінні скоростиглих сортів сої (y) до балу їх посухостійкості (x) вказує, що при збільшенні балу посухостійкості на один, вміст білка у насінні також зростає на 1% (рис. 3.4).

Між урожайністю насіння скоростиглих сортів сої та вмістом у ньому білка виявлено середній негативний кореляційний зв'язок ($r = -0,477$). Рівняння регресії ($y = -2,2106x + 45,872$) та коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,2274$) залежності вмісту білка у насінні скоростиглих сортів сої (y) до урожайності насіння (x) вказує, що при збільшенні урожайності на 1 т/га вміст білка у насінні зменшується на 1% (рис. 3.5).

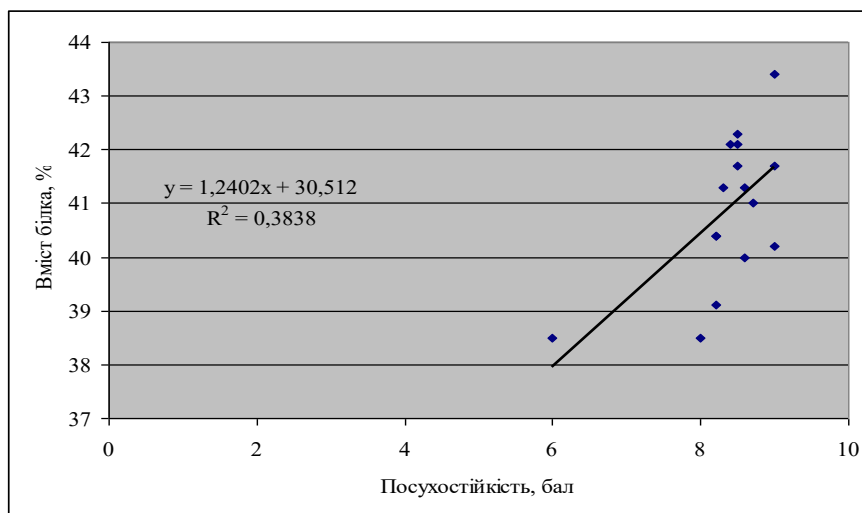


Рисунок 3.4. Кореляційно регресійна залежність, рівняння регресії та коефіцієнт детермінації (R^2) між балом посухостійкості (x) та вмістом білка у насінні (y) скоростиглих сортів сої

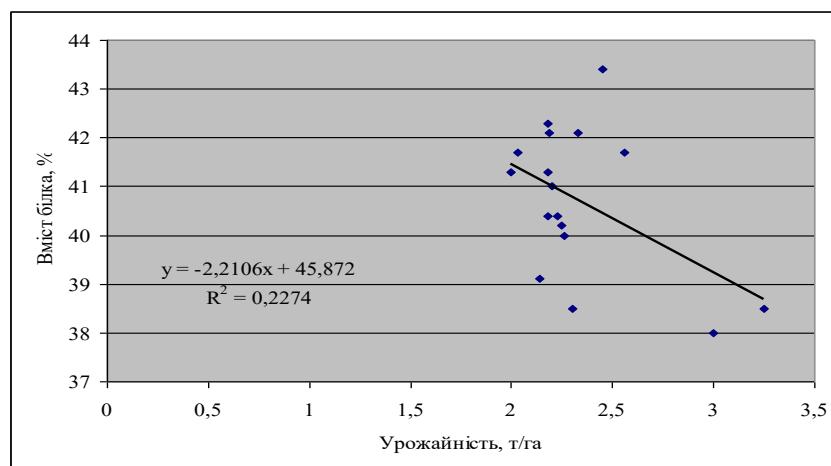


Рисунок 3.5. Кореляційно регресійна залежність, рівняння регресії та коефіцієнт детермінації (R^2) між урожайністю (x) та вмістом білка у насінні (y) скоростиглих сортів сої

Екологічна стійкість сортів сої до несприятливих умов вегетації визначається показниками їх стійкості до посухи та хвороб. Посухостійкість забезпечує високу продуктивність рослин в умовах нестачі вологи. Найбільш посухостійкими є ранньостиглі сорти сої з балом 9: Писанка, Бісер, Естафета, Алінда, Авантюрин, Балатон, Альгіз, ЕС Фавор. Найменшою посухостійкістю володіють сорти Адамос, Лія – по 6 балів, Алмаз, Таверна, Фортеця, ААЦ Інвест 1605 – по 7 балів (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

**Екологічна стійкість, продуктивність та якість насіння
ранньостиглих сортів сої**

Сорт	Посухо- стійкість, бал	Стійкість до хво- роб, бал	Урожайність насіння, т/га	Вміст білка у насінні, %	Вміст жиру у насінні, %
Адсой	8	9	2,71	41,3	22,0
СВХ16Т00С2	8	8	3,25	41,0	21,4
Писанка	9	9	2,26	42,1	20,4
Бісер	9	9	2,36	41,8	20,8

Симфонія	8	9	2,38	40,3	21,2
Ксеня	8	9	3,00	37,6	20,0
Єлена	8	9	3,40	41,5	20,0
Знахідка	8	8	2,75	39,5	22,5
Анжеліка	8	8	2,25	37,8	23,4
Алмаз	7	9	3,16	38,0	25,5
Мерлін	8	8	2,25	40,0	22,0
Говерла	8	9	2,41	38,0	23,5
Богеміанс	8	9	2,00	40,0	21,4
Вільшанка	8	7	3,25	41,5	21,5
Фортуна	8	9	2,50	39,0	19,5
Антрацит	8	9	3,15	38,0	25,0
Дені	8	8	3,00	37,0	22,5
Александрит	8	9	2,80	38,0	20,5
Адамос	6	9	3,20	39,0	23,5
Естафета	9	8	3,70	39,5	22,5
Спритна	8	8	3,70	39,5	22,5
Хвиля	8	9	3,40	41,0	21,5
Сіверка	8	9	2,00	41,5	20,5
Фенікс	8	9	1,90	39,0	20,0
ЕС Ментор	8	8	2,00	40,0	20,0
Фаворит	8	8	2,00	39,0	21,0
Алігатор	8	9	2,35	40,5	21,0
Опус	8	7	2,34	46,0	20,4
Максус	8	9	2,09	41,0	20,7
Султана	8	9	2,38	43,5	21,5
Галлек	8	7	2,00	38,0	18,0
Сілесія	8	9	2,50	40,0	20,5
Байка	8	8	2,50	39,5	22,0

Тріада	8	9	2,28	39,1	21,7
НС Максимус	8	8	2,70	41,0	21,0
Алінда	9	9	2,04	40,5	19,5
Муза	8	9	2,25	41,5	20,5
Ариадна	8	9	2,07	41,1	20,0
Ліссабон	8	8	2,27	39,5	20,0
Педро	8	9	2,19	36,0	22,7
Авантюрин	9	9	2,26	38,0	22,0
ЕС Сенатор	8	8	2,50	41,0	21,0
Відра	8	9	3,00	41,5	20,5
Фуріо	8	9	2,31	40,7	21,6
Аляска	8	9	1,80	41,8	20,0
Зельда	8	9	2,00	39,0	20,0
ЕС Гладіатор	8	8	2,27	43,0	20,5
Перлина	8	9	1,90	38,0	20,5
Етюд	8	9	2,33	40,6	23,3
Балатон	9	8	2,74	42,0	22,7
Віолетта	8	9	2,59	40,5	23,0
Альгіз	9	8	2,88	41,5	21,1
ЕС Фавор	9	9	3,30	40,1	22,2
Майя	8	9	2,62	42,1	22,0
Паллада	8	8	3,67	39,0	20,0
Таверна	7	9	2,71	39,4	20,2
ЕС Альбатор	8	9	3,22	41,5	21,6
ЕС Говернор	8	8	3,24	39,9	22,0
ЕС Директор	8	8	3,34	40,6	21,0
ГЛ Мелані	8	9	3,07	39,8	22,2
Фортеця	7	9	2,58	40,1	20,1
Жаклін	8	8	2,96	39,2	20,5

Адесса	8	8	2,92	39,0	21,9
ААЦ Інвест 1605	7	9	2,24	44,5	19,4
Амбелла	8	9	2,49	38,5	22,0
Лія	6	8	2,26	40,8	21,0
Райдо	8	8	2,50	38,0	21,1
Медея	8	8	2,26	39,0	23,5
Аметист	8	8	2,60	38,0	19,0
Фаєтон	8	8	2,20	39,5	19,5
Оріана	8	8	2,65	38,0	18,2
Устя	8	8	2,65	41,0	19,5

Бал стійкості ранньостиглих сортів сої до хвороб має величину 7–9. Найменшою стійкістю до хвороб володіють сорти сої Галлек, Опус, Вільшанка. Решта сортів сої мають бал стійкості до хвороб 8–9.

Урожайність насіння ранньостиглих сортів сої становить у діапазоні 1,80–3,70 т/га. Найбільш продуктивними сортами є Естафета, Спритна – по 3,70 т/га, Паллада – 3,67 т/га, Хвиля, Єлена – по 3,40 т/га, ЕС Директор – 3,34 т/га, ЕС Фавор – 3,30 т/га, Вільшанка, СВХ16Т00С2 – по 3,25 т/га, ЕС Говернор – 3,24 т/га, ЕС Альбатор – 3,22 т/га. Найменшою урожайністю насіння відзначаються сорти Аляска – 1,80 т/га, Перлина, Фенікс – по 1,90 т/га.

Найвищий вміст білка у насінні мали ранньостиглі сорти сої Опус – 46,0%, ААЦ Інвест – 44,5%, Султана – 43,5%, ЕС Гладіатор – 43,0%, а найменший – Педро – 36,0%, Дені – 37,0%, Ксеня – 37,6%.

Між вмістом білка у насінні та тривалістю вегетаційного періоду ранньостиглих сортів сої виявлений середній прямий кореляційний зв'язок ($r = 0,351$), який показує, що вміст білка у насінні на 35% залежить від тривалості вегетаційного періоду. Рівняння регресії ($y = 0,1391 x + 26,274$) між досліджуваними показниками та графічне відображення залежності з коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,1233$) показує, що при збільшенні тривалості вегетаційного періоду на 1 добу, вміст білка у насінні сої збільшується на 0,12%.

Вміст жиру у насінні ранньостиглих сортів сої становить 18,0–25,5%. Найвищий вміст жиру мали сорти Алмаз – 25,5%, Антрацит – 25,0%, Говерла, Адамос – по 23,5%, Анжеліка – 23,3%, Етюд – 23,3%. Найменший вміст жиру у насінні містили сорти Галлек – 18,0%, Оріана – 18,2%, Аметист – 19,0%.

Середня стійкість до осипання досліджуваних сортів сої становила 8,1 бал. Найвищу стійкість – 9 балів, мали 34 сорти сої. Найнижчий бал стійкості до осипання – 5, мав сорт Алекса, 6 – сорти Артеміда, Аріса, 7 балів – ще 12 сортів.

Бал посухостійкості середньо ранньостиглих сортів сої становив у середньому 8. Найвищий бал – 9, мав 21 сорт сої. Найнижчий бал посухостійкості – 5, мав сорт ОАЦ Аклайм, 6 – сорти Офелія, Фантазія, а 7 балів – ще 16 сортів (табл. 3.8).

Таблиця 3.8

**Показники агроекологічної стійкості, урожайності та якості насіння
середньо ранньостиглих сортів сої**

Сорт	Посухо- стійкість, бал	Стійкість до хвороб, бал	Урожайність насіння, ц/га	Вміст білка в насінні, %	Вміст жиру в насінні, %
Офелія	6	8	20,1	35,6	21,6
Галлек	9	9	26,3	39,3	20,5
НС Діяна	8	9	25,0	44,1	20,7
Орфей	8	9	23,6	41,2	22,3
Брюненсіс	9	9	26,3	39,3	20,5
СВХ15Т1С1	8	8	34,4	38,1	22,3
Таурус	8	9	28,3	44,1	21,1
Марієм	8	8	31,9	40,3	21,7
Стайн 06Х02	8	9	31,4	42,0	19,8
Валюта	8	8	17,5	34,9	23,6
Амадеа	8	9	27,7	40,4	22,9

Албенга	8	8	32,6	41,1	20,8
Монарх	9	9	22,1	39,0	21,7
Феміда	8	8	30,0	37,5	18,0
Золотиста	7	8	30,0	39,7	21,0
Ювілейна	7	8	31,0	39,0	21,5
Святкова	8	8	25,0	38,5	20,5
Омега вiнницька	8	9	21,8	36,8	22,9
КиВін	8	8	21,1	36,2	23,0
Монада	8	9	22,0	38,5	18,8
Смолянка	8	9	26,0	36,6	18,1
Шарм	8	8	20,0	36,0	24,5
Даная	8	9	27,9	38,0	21,6
Георгіна	8	9	31,0	41,5	20,4
Сяйво	8	8	35,0	38,5	21,5
Вежа	8	9	28,0	39,3	19,6
Хуторяночка	8	9	35,0	39,0	20,5
Сузір'я	8	8	35,0	42,5	20,5
Меркур	8	9	28,0	39,5	20,0
Княжна	7	9	26,0	38,5	20,0
Подяка	8	8	37,0	39,5	22,5
Мальвіна	8	8	34,5	39,5	21,5
Кардіфф	8	9	23,4	42,7	20,0
Ромашка	7	8	28,5	40,8	20,9
Золушка	8	9	19,7	39,8	21,3
Луна	8	9	25,0	40,0	20,0
Кофу	8	8	25,0	41,5	22,0
Саска	8	8	35,0	41,0	20,0
Сігалія	8	8	22,0	40,5	21,0

Сінара	8	9	24,8	41,0	21,0
Опалін	8	9	22,6	37,8	21,5
Брюненсіс	9	9	26,3	40,0	19,9
Кассіді	8	9	25,2	40,0	20,0
Кіото	8	8	30,0	43,0	21,0
Криниця	8	9	23,3	39,4	20,0
Діадема	8	9	29,0	38,7	18,8
Поділля					
Софія	8	9	20,0	39,5	21,0
Кордоба	8	8	25,0	39,0	20,0
Мілленіум	8	9	25,0	41,0	20,0
ДХ 618	9	8	25,0	41,5	19,8
ДХ 530	9	8	22,3	41,5	19,8
ОАЦ Каліпсо	9	9	22,7	39,4	21,2
Аріса	8	8	22,0	40,0	22,0
Асука	9	7	25,4	42,0	20,5
Амадеус	8	9	21,7	42,5	19,0
Нордіка	8	9	25,0	40,0	20,0
Абеліна	8	8	18,0	39,5	20,0
Обелікс	9	9	25,1	40,0	22,4
Азимут	8	9	23,8	39,5	21,7
ЕС Тенор	9	9	23,7	39,3	22,3
Переяславка	9	9	22,0	40,1	22,2
Марися	8	9	24,2	41,1	21,0
Ясочка	9	9	22,4	41,6	21,2
Вишиванка	8	9	24,9	39,2	21,8
Корона	9	8	24,0	40,1	21,7
РЖТ Спеда	9	9	20,9	42,8	21,8
Віола	8	9	20,6	41,8	22,3

Скульптор	8	9	21,0	41,9	21,9
ДШ401	8	9	22,2	45,2	20,6
ДШ863	8	9	23,0	44,1	21,0
Емперор	8	9	23,4	42,5	21,5
Самородок	8	9	22,7	41,0	22,0
ОАЦ Прескот	8	9	24,6	40,0	22,3
ОАЦ Морден	8	9	28,6	40,4	22,5
ОАЦ Страйв	8	9	25,5	42,2	22,1
НС Діяна	8	9	25,0	44,1	20,7
Алекса	8	9	28,4	41,4	21,3
Еверест	8	9	25,4	39,7	23,2
РЖТ Свіла	8	9	23,5	43,5	21,3
РЖТ Сфорза	8	9	23,2	45,5	20,2
РЖТ Стумпа	8	9	26,2	40,0	22,3
ЕС Командор	8	9	26,6	42,0	21,2
СГ Кеа	8	9	26,8	41,0	22,1
СГ Анзер	8	9	25,5	40,0	23,1
Амадеа	8	9	27,7	40,4	22,9
Еврідіка	8	9	24,0	42,0	21,6
Сільвія ПЗО	8	9	29,3	38,6	22,6
Ленка	8	9	27,5	43,0	22,0
Вольта	9	8	25,1	40,5	21,7
Таурус	9	8	28,3	44,1	21,1
СБ 142	8	9	30,2	42,5	20,4
СБ 143	9	8	27,6	42,5	20,2
Сопрана	9	8	29,3	39,4	22,4
РЖТ Сірока	9	9	33,4	40,2	22,4
ЕС Адвайзер	8	9	31,5	40,1	22,8
Слобода	8	9	24,7	40,8	20,3

Аврора	8	9	26,6	40,7	21,3
Південна Зоря	7	9	27,3	40,6	21,3
Граф	8	9	32,1	39,9	21,9
Браун	8	9	29,8	37,4	23,4
Регіна	8	9	33,4	41,2	21,8
Стайн 06X02	8	9	31,4	42,0	19,8
Стайн 14X02	8	9	32,6	42,3	20,2
Стайн 09І36	8	9	31,0	38,8	22,0
Стайн 07Ж22	8	9	36,5	40,1	20,6
Моцарт	8	9	30,4	42,8	20,0
Астор	7	8	30,3	40,6	22,3
Нептун	8	8	32,8	39,9	22,0
Тала	8	9	30,4	39,3	22,0
Сіпресс	8	9	34,6	40,6	21,0
Еліна	8	8	33,3	40,5	21,9
Зевс	8	8	30,1	40,1	22,1
Віталіна	8	8	30,3	38,3	22,8
Кармеліта	7	8	30,4	41,0	21,3
Беттіна	8	9	32,2	41,5	21,6
Ауреліна	8	8	31,1	41,9	21,4
Алтона	8	8	32,9	39,1	22,2
Сірелія	8	8	31,0	39,0	22,7
Тіваз	8	8	29,1	40,8	21,9
Туріас	8	8	33,3	38,5	21,5
Інгуз	8	8	31,9	38,3	21,6
Джейд	8	8	33,1	36,8	22,9
Дара	7	8	31,6	37,9	22,4
Марієм	8	8	31,9	40,3	21,7

Ангеліка	9	9	30,0	41,0	20,9
Атакама	8	9	32,3	40,3	21,4
Акардія	8	8	29,7	38,3	21,6
Віста	8	8	30,5	39,8	21,5
Азюра	8	8	29,4	41,8	21,3
Сіберія	7	8	24,5	39,7	20,8
Езра	8	8	36,5	37,2	22,2
ДХ4202	8	9	30,8	39,1	22,0
ДХ4173	8	9	29,7	39,4	21,2
Чураївна	7	9	26,4	40,0	21,3
Солена	8	9	30,1	41,0	21,1
РЖТ Сфінкса	7	9	28,7	42,1	20,7
ЕС Трібор	7	9	29,1	41,3	20,6
ЕС Професор	7	8	29,1	42,3	21,0
ЕС Луксор	8	8	26,8	40,9	21,4
ЕС Композитор	8	9	33,3	40,1	22,0
ЕС Шанцеллор	8	9	28,8	39,9	21,3
ЕС Башелор	7	8	26,8	44,7	18,6
ЕС Декор	8	9	28,4	41,9	21,2
Серенада	6	9	24,9	41,7	18,9
Титан	8	9	29,5	42,3	20,9
Якарі	8	8	32,7	40,9	20,6
Фантазія	6	8	23,7	40,6	19,9
ОАЦ Аклайм	5	9	29,3	40,1	21,3
Витязь 50	8	7	25,0	40,0	22,5
Ізумрудна	7	8	26,0	41,0	21,0
Деймос	8	8	22,0	39,2	22,2

Чернівецька 9	8	8	30,0	36,3	21,5
Артеміда	8	6	24,7	39,7	22,2
Оксана	8	8	18,8	37,6	21,4
Київська 98	8	8	17,8	35,7	21,9
Спринт	8	8	18,5	36,2	23,2
ПР 9368 Б07	9	9	26,6	40,0	21,5
ДМ 503	8	9	31,9	39,4	22,4
Буга	7	9	20,9	39,6	20,5

Середній рівень урожайності насіння досліджуваних сортів сої становив 27,2 ц/га. Найвищою урожайністю відзначалися сорти Подяка – 37,0 ц/га, Езра, Стайн 07Ж22 – по 36,5 ц/га, Саска, Сяйво – по 35,0 ц/га, Сіпрес – 34,6 ц/га, Мальвіна – 34,5 ц/га, СВХ15Т1С1 – 34,4 ц/га, ЕС Композитор, Турізас, Еліна – по 33,3 ц/га. Найнижча урожайність насіння була виявлена у сортів Валюта – 17,5 ц/га, Київська 98 – 17,8 ц/га, Абеліна – 18,0 ц/га, Спринт – 18,5 ц/га, Оксана – 18,8 ц/га.

Середній вміст білка у насінні середньо ранньостиглих сортів сої становив 40,2%. Сорт РЖТ Сфорза мав найвищий вміст білка – 45,5%, також високий вміст білка мали сорти ДШ401 – 45,2%, ЕС Башелор – 44,7%, Таурус, НС Діяна, ДШ863 – по 44,1%, Ленка – 43,0%. В той же час наступні сорти сої відзначалися найнижчим умістом білка у насінні: Валюта – 34,9%, Офелія – 35,6%, Київська 98 – 35,7%, Шарм – 36,0%, КиВін, Спринт – по 36,2%.

Вміст жиру у насінні середньо ранньостиглих сортів сої у середньому становив 21,3%. Найвищим він був у сортів Шарм – 24,5%, Валюта – 23,6%, Браун – 23,4%, Спринт, Еверест – по 23,2%, СГ Анзер – 23,1%. Найнижчий вміст жиру мали сорти Феміда – 18,0%, Смолянка – 18,1% та ЕС Башелор – 18,6%.

Між вмістом жиру та білка у насінні середньо ранньостиглих сортів сої встановлений середній негативний кореляційний зв'язок ($r = -0,330$). Тобто, чим вищий вміст жиру містить насіння середньо ранньостиглих сортів сої, тим нижчий у них вміст білка.

Стійкість до хвороб досліджуваних сортів сої становила 7–9 балів. Найстійкішими до хвороб виявилися сорти НС Вулкан, Маша, Ірина, КСБ 938, Кент, Рапсодія, Малага, СГ Айдер, СГ СР Пікор, Сайдіна, Феєрія, Златослава, НС Аурора, Сава, Тена, Ольвія, Панонка, ЕС Палладор, Стайн 11Х02, Стайн 14Ф06, Стайн 17Ж32, Стайн 15І63, Стайн 13Ж23, а найменш стійкими – сорти Васильківська та Аполон (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

**Показники агроекологічної стійкості, урожайності та якості насіння
середньостиглих сортів сої**

Сорт	Посухо- стійкість, бал	Стійкість до хвороб, бал	Урожайність насіння, ц/га	Вміст білка в насінні, %	Вміст жиру в насінні, %
Валентія	6	8	20,2	35,7	24,3
Васильківська	8	7	22,0	36,1	23,5
Полтава	7	8	25,7	39,2	22,4
НС Вулкан	8	9	23,1	37,1	22,8
Маша	8	9	22,3	36,0	22,2
Ірина	8	9	20,1	39,0	20,6
КСБ 938	6	9	25,0	39,8	20,9
Моравія	8	8	20,0	41,0	21,2
Кент	8	9	20,4	40,6	21,1
Рапсодія	8	9	24,1	38,4	21,6
Амфор	8	8	32,0	41,6	20,5
Малага	8	9	22,5	38,5	21,0
Бісер	8	8	25,0	41,0	20,5
Банжо КС	8	8	18,0	41,5	21,8
СГ Айдер	8	9	20,0	41,0	22,0
СГ СР Пікор	8	9	23,1	41,5	20,9

Сайдіна	9	9	24,1	42,1	21,6
Феєрія	8	9	22,2	40,3	22,3
Златослава	8	9	21,7	38,9	22,2
НС Аурора	8	9	24,1	39,5	22,8
Сава	8	9	24,8	39,5	22,0
Тена	8	9	28,0	37,8	23,4
Ольвія	8	9	29,7	38,8	20,6
Панонка	9	8	25,2	39,3	22,2
ЕС Палладор	9	8	34,6	39,8	20,2
Стайн 11Х02	8	9	28,5	41,4	20,8
Стайн 14Ф06	8	9	34,1	39,7	20,2
Стайн 17Ж32	8	9	33,6	41,6	19,9
Стайн 15І63	8	9	32,6	41,0	21,0
Стайн 13Ж23	8	9	32,6	39,1	20,8
Аполон	8	7	21,8	34,0	23,2

Урожайність насіння середньостиглих сортів сої становить 18,0–34,6 ц/га. Найбільш урожайними були сорти ЕС Палладор – 34,6 ц/га, Стайн 14Ф06 – 34,1 ц/га, Стайн 17Ж32 – 33,6 ц/га, Стайн 15І63, Стайн 13Ж23 – по 32,6 ц/га, Амфор – 32,0 ц/га. Найнижчою урожайністю відзначалися сорти Банжо КС – 18,0 ц/га, СГ Айдер, Моревія – по 20,0 ц/га, Ірина – 20,1 ц/га, Валентія – 20,2 ц/га, Кент – 20,4 ц/га.

Найвищий вміст білка у насінні мали сорти сої Сайдіна – 42,1%, Амфор, Стайн 17Ж32 – по 41,6%, Банжо КС, СГ СР Пікор – по 41,5%, Стайн 11Х02 – 41,4%. Найнижчий вміст білка у насінні мали сорти Аполон – 34,0%, Валентія – 35,7%, Маша – 36,0%, Васильківська – 36,1%.

Найвищий вміст жиру у насінні мали середньостиглі сорти сої Валентія – 24,3%, Васильківська – 23,5%, Тена – 23,4%, Аполон – 23,2%. Найменше жиру містилося у насінні сортів Стайн 17Ж32 – 19,9%, ЕС Палладор, Стайн 14Ф06 – по 20,2%.

Найбільш урожайним був середньо пізньостиглий сорт сої Стайн 20Ф26 – 29,4 ц/га. Найнижчою урожайністю відзначалися сорти Святогор – 22,6 ц/га та Крістіна – 23,7 ц/га (табл. 3.10).

Найвищий вміст білка був у насінні сортів Ананда – 39,7% та Крістіна – 39,0%, а найменший – у сорту Святогор – 37,3%. Найвищий вміст жиру – 22,0% мав сорт Ананда, а найменший вміст жиру був у сортів Крістіна – 20,7% та Стайн 20Ф26 – 20,9%.

Таблиця 3.10

**Показники агроекологічної стійкості, урожайності та якості насіння
середньопізньостиглих сортів сої**

Сорт	Посухо- стійкість, бал	Стійкість до хвороб, бал	Урожайність насіння, ц/га	Вміст білка в насінні, %	Вміст жиру в насінні, %
Святогор	9	9	22,6	37,3	21,2
Крістіна	8	9	23,7	39,0	20,7
Ананда	8	9	25,4	39,7	22,0
Стайн 20Ф26	8	9	29,4	38,6	20,9

Між вмістом білка та жиру у насінні середньостиглих сортів сої виявлений сильний негативний кореляційний зв'язок ($r = -0,665$), тобто чим вищий вміст білка у насінні середньостиглих сортів сої – тим нижчий у ньому вміст жиру.

Рівняння регресії, коефіцієнт детермінації (R^2) та діаграма залежності між вмістом білка та жиру у насінні середньостиглих сортів сої представлені на рис. 3.6.

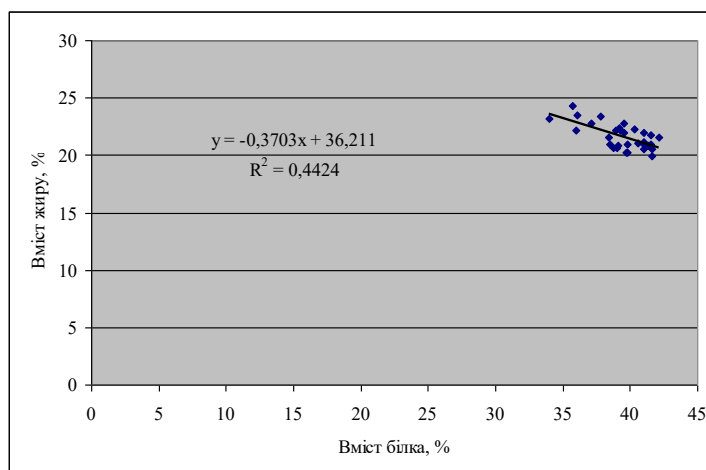


Рисунок 3.6. Кореляційно-регресійна залежність між вмістом білка (x) та жиру (y) у насінні середньостиглих сортів сої

Між урожайністю насіння середньостиглих сортів сої та вмістом у ньому жиру встановлений середній негативний кореляційний зв'язок ($r = -0,535$), тобто чим вища урожайність середньостиглих сортів сої, тим нижчий вміст жиру у насінні.

Поряд із встановленими кореляційно-регресійними залежностями, виявлені окремі поєднання екологічних чинників у середньостиглих сортів сої. Зокрема сорт ЕС Палладор поєднав високу урожайність з високим прикріпленням нижніх бобів, великою висотою рослин та найвищим балом посухостійкості і стійкості до хвороб; сорт Амфор поєднав високу урожайність із високою стійкістю рослин до вилягання та осипання насіння; сорти Стайн 11Х02, Стайн 14Ф06, Стайн 17Ж32, Стайн 15І63, Стайн 13Ж23 поєднали високу урожайність з найвищим балом стійкості до хвороб. В той же час сорти Амфор і Стайн 17Ж32 поєднали високу урожайність та високий вміст у насінні білка.

Отже, серед 31 середньостиглого сорту сої, що внесений до Державного реєстру сортів рослин, придатних до вирощування в Україні у 2021 році, найвищою урожайністю відзначалися сорти ЕС Палладор, Стайн 14Ф06, Стайн, Стайн 15І63, Стайн 13Ж23, Амфор. Найвищий вміст білка у насінні був виявлений у сортів Сайдіна, Амфор, Стайн 17Ж32, Банжо КС, СГ СР Пікор, Стайн 11Х02, жиру – Валентія, Васильківська, Тена, Аполон. Найбільш посухостійкими були сорти Сандіна, Панонка, ЕС Палладор.

Серед групи середньо пізньостиглих сортів сої найбільшою урожайністю відзначався сорт Стайн 20Ф26, найвищим вмістом білка у насінні – Крістіна та Ананда, жиру – Крістіна, найвищою посухостійкістю відзначався сорт Святогор.

Соя, як культура, що може забезпечити людство доступним рослинним білком для харчування, кормом для тваринницької галузі та сировиною для технічних потреб, відзначається постійним нарощуванням її посівних площ. Найбільші країни виробники сої – США, Бразилія і Аргентина, вирощують її переважно на родючих ґрунтах, із сприятливими вологозабезпеченістю і тепловим режимом, у так званому соєвому поясі [1,78].

Україна має суттєвий потенціал для нарощування як посівних площ, так і урожайності сої. Сприятливими регіонами для вирощування сої в Україні є зона Лісостепу, у якій зосереджено близько 60% усіх посівних площ під соєю, Полісся, де її посівні площі у структурі займають 24% і Степ – 16% посівних площ [2,77].

При подальшій посушливості клімату в Україні із підвищенням суми позитивних та активних температур впродовж вегетаційного періоду, зменшенням кількості опадів, поширенням ґрунтової і повітряної посухи, істотно зростатиме роль сортів сої у збереженні її стабільної продуктивності та подальшому підвищенні їх урожайності.

Зростання посівних площ і валових зборів насіння сої в Україні останніми роками значною мірою вимагає впровадження у сільськогосподарське виробництво нових, адаптованих до конкретних ґрунтово-кліматичних умов, з високою стійкістю до несприятливих чинників довкілля, високотехнологічних сортів. Сучасні сорти сої, крім високої урожайності, повинні відзначатися високим вмістом білка і жиру, оптимальною тривалістю вегетаційного періоду, стійкістю до хвороб, шкідників та інших несприятливих чинників навколишнього середовища, технологічністю при вирощуванні, здатністю фіксувати значні обсяги симбіотичного азоту [3].

В Україні достатньо великий сортимент сої різних груп стиглості: ультра скоростиглі, ранньостиглі, середньо ранньостиглі, середньостиглі та середньо

пізньостиглі. В умовах інтенсивного землеробства з екстремальними погодними умовами важливо вирощувати у господарствах кілька сортів різних груп стиглості [8]. Проте визначальним чинником при структурному розподілі між цим групами сортів мають бути показники продуктивності, якості урожаю, технологічності і стійкості до несприятливих умов.

Показниками агроекологічної стійкості сортів сої є їх стійкість до посухи і хвороб. Найбільш посухостійкими виявилися ультра скоростиглі сорти з середнім балом стійкості 8,4 та середньо пізньостиглі – з балом 8,3. Якщо у сортів ультра ранньостиглої групи посухостійкість забезпечується коротким вегетаційним періодом та формуванням урожаю до посухи, то у сортів середньо пізньостиглої групи – за рахунок формування урожаю у пізні строки, після посухи. У той же час середньостиглі сорти сої мали найнижчий бал посухостійкості – 7,9, а ранньостиглі та середньо ранньостиглі сорти – 8,0 балів. Таким чином, найбільш стійкими до посухи виявилися сорти сої груп ультра скоростиглі і середньо пізньостиглі (табл. 3.11).

Середня стійкість до хвороб у всіх груп сортів сої за скоростиглістю була високою. Найбільш стійкими до хвороб виявилися сорти середньо пізньостиглої групи – 9,0 балів. Це найвищий бал з можливих. Ультраскоростиглі сорти мали середній бал стійкості до хвороб 8,8, середньо ранньостиглі і середньостиглі – по 8,6 балів, а ранньостиглі – 8,5 балів.

Таблиця 3.11

Показники агроекологічної стійкості, урожайності та якості насіння груп стиглості сортів сої в Україні

№	Група стиглості сортів	Посухо-стій-кість, бал	Стій-кість до хвороб, бал	Урожай-ність насіння, т/га	Вміст білка в насінні, %	Вміст жиру в насінні, %
1	Ультраскоростиглі	8,4	8,8	2,34	40,7	21,0
2	Ранньостиглі	8,0	8,5	2,59	40,1	21,2
3	Середньоранньостиглі	8,0	8,6	2,73	40,3	21,3
4	Середньостиглі	7,9	8,6	2,52	39,4	21,6
5	Середньопізньостиглі	8,3	9,0	2,53	38,7	21,2

Визначальним показником усіх груп сортів сої за стиглістю є їх середня урожайність. Найвища урожайність встановлена у сортів середньо ранньостиглої групи – 2,73 т/га. Ранньостиглі сорти сої мали урожайність на 5,1% меншу – 2,59 т/га. Середньопізньостиглі і середньостиглі сорти сої мали урожайність на 7,3–7,7% меншу, ніж урожайність середньо ранньостиглих сортів і становила 2,53 і 2,52 т/га відповідно. Найнижчу середню урожайність мали сорти сої ультраскоростиглої групи – 2,34 т/га, що було на 14,3% менше, ніж урожайність середньо ранньостиглої групи.

Найвищий середній вміст білка у насінні мали сорти ультра скоростиглої групи – 40,7%. У середньо ранньостиглої групи вміст білка у насінні був на 0,4% менший – 40,3%, у ранньостиглої групи – на 0,6% менший – 40,1%. Найнижчий середній вміст білка у насінні мали сорти середньо пізньостиглої і середньостиглої груп, відповідно 38,7 та 39,4%, що було на 2,0 та 1,3% менше, ніж у сортів ультра скоростиглої групи.

Середній вміст жиру у насінні сортів сої усіх груп стиглості був приблизно однаковим і становив 21,0–21,6%. Найвищий середній вміст жиру мали сорти середньостиглої групи, а найменший – ультра скоростиглої.

Аналіз отриманих показників засвідчує, що середньо ранньостиглі сорти сої, які відзначаються найвищою середньою урожайністю насіння, є найбільш чисельними за кількістю. Середньо пізньостиглі сорти сої мали найбільшу висоту прикріплення нижніх бобів, найбільшу висоту рослин, найвищі бали стійкості до вилягання рослин, осипання насіння, до хвороб, але мали найменший вміст білка у насінні.

Розділ 4. ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ УРОЖАЮ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР

4.1. УРОЖАЙНІСТЬ ТА ЯКІСТЬ НАСІННЕВОЇ ПРОДУКЦІЇ СОЇ

Обґрунтуванню ефективного використання біологічного потенціалу сорту і природно-кліматичних ресурсів належить важливе значення у розробці та впровадженні у виробництво нової адаптивної сортової технології вирощування. Враховуючи недостатні посівні площі і проблеми кормового рослинного білка, на сьогодні постало питання розглянути в технології окремі аспекти її вирощування, спрямовані на отримання максимального рівня продуктивності. До прийомів, за яких можливо отримати високу врожайність та покращити якість зернобобових культур, відноситься оптимізація адаптивних сортових технологій, із одночасним удосконаленням сучасних наукових принципів підбору нових високопродуктивних сортів, системи удобрення, ефективності передпосівної обробки насіння та використання мікродобрив у позакореновому підживленні рослин, спрямованих на посилення реалізації їх біологічного потенціалу [96].

Оцінюючи кормову та харчову цінність зерна бобових культур, проведення таких досліджень є актуальними для науки та виробництва. Вони базуються на науковому, теоретичному і практичному обґрунтуванні основних прийомів технології вирощування адаптивних сортів зернобобових культур на основі аналізу закономірностей формування зернової та білкової продуктивності залежно від умов регіону зростання [3-4, 97].

Згідно проведеного аналізу наукової літератури, досліджено різні технологічні прийоми вирощування зернових бобових культур з метою забезпечення раціонального використання природного агропотенціалу, що в подальшому сприятиме збільшенню посівних площ основних високобілкових рослин, що мають важливе стратегічне значення [5, 8-9, 11,98].

В умовах органічного землеробства виникає гостра необхідність у проведенні науково-експериментальних досліджень адаптивної сортової

технології вирощування даних зернобобових культур за комплексної взаємодії бактеріальних препаратів, рістрегулюючих речовин на вегетуючих рослинах в умовах зміни клімату [6, 10, 99].

При оцінці ресурсної бази зернобобових культур на основі Державного реєстру сортів рослин України встановлено наявний асортимент сої. До вивчення виокремлено високопродуктивні сорти сої – Азимут, Голубка.

У посівах формування продуктивності визначається за показниками індивідуальної продуктивності рослин. Індивідуальна продуктивність рослин тією чи іншою мірою показує дію чинників, що досліджуються на реалізацію біолого-генетичного потенціалу сортів та певною мірою дозволяє своєчасно впливати на формування насінневої продуктивності. Структура елементів урожаю сої значною мірою залежить від технологічних прийомів вирощування, зокрема передпосівною обробкою насіння бактеріальним препаратом та застосуванням ретардантів.

Експериментально доведено, що для формування максимальної індивідуальної продуктивності та врожайності насіння сої необхідно застосовувати дворазову обробку посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації. Відомо, що впродовж даних періодів у рослин сої відбувається закладання та розвиток генеративних органів. У свою чергу ретарданти впливають на синтез або активність гіберелінів, які відповідають за закладання квіток та їх фертильність. У результаті посилення відтоку елементів живлення до генеративних органів супроводжувалося зростанням врожайності насіння.

Здійснений аналіз елементів структури урожаю сортів сої Азимут та Голубка показав, що впродовж проведення польових досліджень на їх величину значний вплив мали фактори, які були поставлені на вивчення. Результати досліджень індивідуальної продуктивності насіння сої показали (табл. 4.1), що максимальні кількісні показники індивідуальної продуктивності сорту Голубка, а саме кількість бобів на рослині (17,9 шт.) та кількість насіння (32,1 шт.) з однієї рослини були отримані в разі проведення передпосівної обробки насіння

бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів 0,75% розчином ретарданту хлормекват – хлорид.

Таблиця 4.1

Індивідуальна продуктивність сортів сої залежно від технологічних прийомів вирощування в умовах НДГ «Агрономічне», т/га (середнє за 2018-2022 рр.)

Сорт	Передпосівна обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Кількість на рослині, шт.		Маса зерна, г	
			бобів	насінин	1000 насінин	з рослини
Азимут	Без обробки	без обробки (к)	12,1	23,4	156,4	2,73
		0,5	12,3	23,8	157,7	2,78
		0,75	12,6	24,4	159,0	2,86
		1	12,4	24,0	158,7	2,80
	Ризогумін	без обробки	13,4	25,4	159,8	3,11
		0,5	13,8	25,9	160,0	3,16
		0,75	14,4	27,1	166,1	3,35
		1	14,0	26,5	163,2	3,24
Голубка	Без обробки	без обробки (к)	14,6	26,9	164,0	3,29
		0,5	14,9	27,4	164,7	3,34
		0,75	15,6	28,7	166,8	3,45
		1	15,1	27,9	165,4	3,41
	Ризогумін	без обробки	16,4	28,6	166,2	3,54
		0,5	16,8	29,9	167,9	3,67
		0,75	17,9	32,1	170,1	3,88
		1	17,1	30,6	168,7	3,70

Формування кількісних показників на рослині при обробці ретардантом поступалося передпосівній обробці бактеріальним препаратом, але відмінності лежали в межах помилки досліду. Сумісний обробіток насіння бактеріальним

препаратом та обробка посівів 0,75% розчином ретарданту стимулював кількість бобів на рослині і показник був більший за контрольний варіант, зростання кількості зерен лежало в межах помилки дослідження. Мінімальні кількісні показники індивідуальної продуктивності сорту Азимут, а саме кількість бобів на рослині (12,1 шт.) та кількість насіння (23,4 шт.) з однієї рослини були отримані на контролі.

Маса 1000 насінин в середньому по дослідженні складала 160,1 г у сорту Азимут та 166,7 г у сорту Голубка, що є генетично обумовленою ознакою. Відтак, збільшення маси 1000 насінин по варіантах дослідження відбувалось аналогічно іншим показникам індивідуальної продуктивності. Проведення передпосівної обробки насіння сої сприяло отриманню найбільшої маси 1000 насінин 170,1 г, що на 5,9 г більше від показника в контролі сорту Голубка. При обробці посівів ретардантом також фіксували істотне перевищення показника над контрольним варіантом.

Формування загальної насінневої продуктивності залежало від сумарної взаємодії кількості насінин на одній рослині та маси 1000 насінин. Результати структурного формування насіння на рослині свідчать про залежність тенденції впливу передпосівної обробки насіння препаратом на кількісні показники продуктивності рослин сої (рис. 4.1).

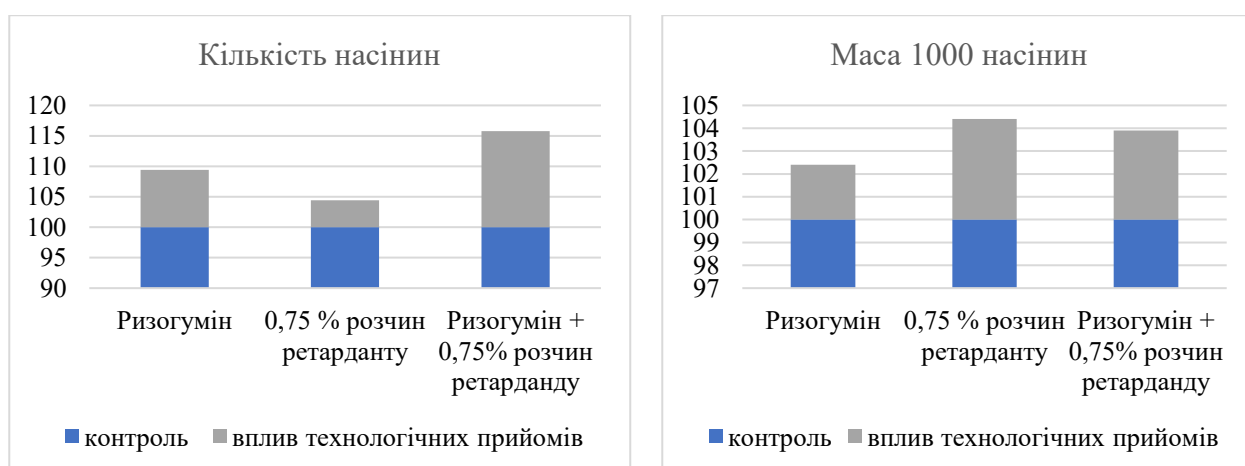


Рисунок 4.1. Формування кількості рослин та маси 1000 насінин рослин сої залежно від передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту (середнє за 2018-2022 рр.)

Встановлено, що максимальна реалізація генетичного потенціалу, а як наслідок і показників індивідуальної продуктивності сої створюється за умови передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогуміном та обробкою посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації.

На цьому варіанті досліду відмічена найбільша маса насіння з однієї рослини у сорту Голубка – 3,88 г, що більше на 0,61 г (або 15,2%), ніж у варіанті, де насіння не оброблялося. Відмічено, що серед варіантів по досліду застосування Ризогуміну та 0,75 % розчину ретарданту сприяло отриманню найвищих показників структури врожаю. Прибавка за досліджуваними показниками у даного варіанту до контролю складала 15,2 %.

Проведеними дослідженнями встановлено, що поєднання передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом та обробки рослин по вегетації ретардантом характеризується позитивним впливом на підвищення показників врожайності сортів, що підлягати до вивчення. Важливим залишається питання застосування ретардантів, а також рівень їх впливу на продуктивність рослин, оскільки у багатьох випадках зміна габітусу має комплексний характер, що охоплює всю рослину, включаючи репродуктивні органи.

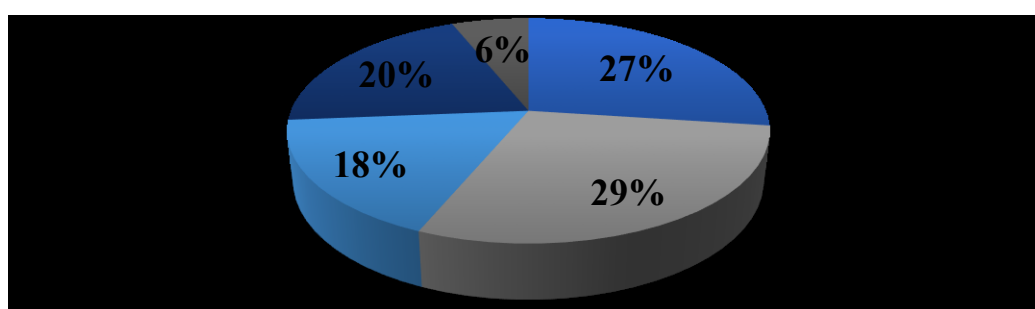
Врожайність зерна визначається генетичними особливостями видів та в залежності від сорту коливається у різних діапазонах (табл. 4.2). Таким чином, обробка вегетуючих посівів сої ретардантом хлормекват- хлорид у концентрації 0,75 % у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація забезпечує найкращі умови для росту, розвитку та формування високої врожайності сортів сої на рівні 2,39-2,58 т/га.

Згідно проведеного дисперсійного аналізу визначено частку впливу факторів, що були поставлені на вивчення на формування урожайності насіння сої (рис. 4.2). Відтак, передпосівної обробки насіння забезпечувала формування 17,4 % урожаю насіння, 29,2 % – сорт, обробка посівів сої хлормекватхлоридом у різних концентраціях забезпечувала формування 20,2 % урожаю та 6,1 % – взаємодія факторів, 27,1 % – гідротермічні умови та інші невраховані фактори.

Урожайність насіння сортів сої залежно від технологічних прийомів вирощування в умовах НДГ «Агрономічне», т/га (середнє за 2018-2022 рр.)

Сорт	Концентрація ретарданту, %	Передпосівна обробка насіння	
		без п.о.н.	Ризогумін
Голубка	без обробки (к)	2,06	2,18
	0,5	2,12	2,25
	0,75	2,24	2,39
	1	2,17	2,30
Азимут	без обробки (к)	2,21	2,46
	0,5	2,29	2,55
	0,75	2,39	2,67
	1	2,32	2,58

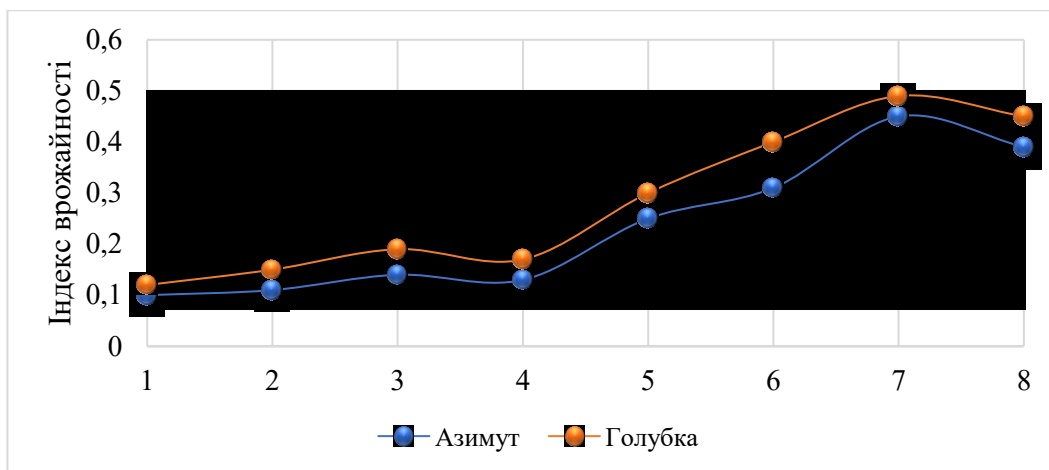
НІР_{0,05} т/га: А-0,02; В-0,03; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,04; ВС-0,14; АВС-0,05
 2018 р. НІР_{0,05} т/га: А-0,01; В-0,03; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,04
 2019 р. НІР_{0,05} т/га: А-0,02; В-0,01; С-0,02; АВ-0,03; АС-0,03; ВС-0,03; АВС-0,04
 2020 р. НІР_{0,05} т/га: А-0,02; В-0,03; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,05
 2021 р. НІР_{0,05} т/га: А-0,02; В-0,01; С-0,02; АВ-0,03; АС-0,03; ВС-0,03; АВС-0,06
 2022 р. НІР_{0,05} т/га: А-0,03; В-0,02; С-0,03; АВ-0,03; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,03.



- Умови року
- Передпосівна обробка насіння
- Взаємодія факторів
- Сорт
- Концентрація ретарданту

Рисунок 4.2. Частка впливу факторів на формування врожайності за передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом та концентрації ретарданту

Індекс урожайності має параболічну залежність від інокулянта у межах певної концентрації ретарданту – якщо в контрольному варіанті індекс урожайності був низьким через нестачу поживних елементів і диференціацію незначної кількості генеративних органів, то за використання дворазової обробки посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першої – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації, він знижувався шляхом накопичення значної маси побічної продукції (рис. 4.3).



Примітка: В1 – контроль, В2 – без п.о.н. + 0,5 % р-н ретарданту, В3 – без п.о.н. + 0,75 % р-н ретарданту, В4 – без п.о.н. + 1,0 % р-н ретарданту, В5 – п.о.н. + без ретарданту, В6 – п.о.н. + 0,5 % р-н ретарданту, В7 – п.о.н. + 0,75 % р-н ретарданту, В8 – п.о.н. + 1,0 % р-н ретарданту.

Рисунок 4.3. Індекс урожайності сої залежно від передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом та концентрації ретарданту, середнє за 2018–2022 рр.

Доведено, що збалансованість зерна сортів сої за вмістом сирого протеїну та жиру робить її важливою та універсальною культурою світового рослинництва. Саме забезпечення оптимальних умов проходження продукційного процесу рослин сої за рахунок використання бактеризації насіння та рістрегулюючих речовин сприяло не тільки формуванню високої урожайності її насіння, але й суттєвому покращанню біохімічних показників і, як наслідок – підвищення вмісту сирого протеїну та жиру. За біохімічним аналізом щодо

визначення вмісту вміст сирого протеїну та жиру виявлено, що максимальні показники мало зерно, яке сформувалося за поєднання бактеризації насіння та дворазової обробки рослин 0,75 % розчином по вегетації ретардантом. Мінімальний вміст сирого протеїну та жиру було розраховано в середньому на контрольному варіанті (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

**Вміст сирого протеїну та жиру в насінні сої залежно від технологічних прийомів вирощування в умовах НДГ «Агрономічне», %
(середнє за 2018-2022 рр.)**

Сорт	Передпосівна обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Сирий протеїн	Жир
Азимут	Без обробки	без обробки (к)	31,1	19,2
		0,5	33,7	19,8
		0,75	36,5	21,9
		1	35,7	21,2
	Ризогумін	без обробки	33,8	19,9
		0,5	35,9	21,5
		0,75	37,6	23,1
		1	36,9	22,4
Голубка	Без обробки	без обробки (к)	35,1	19,9
		0,5	36,3	20,9
		0,75	38,2	22,3
		1	37,0	21,5
	Ризогумін	без обробки	37,6	21,2
		0,5	38,4	21,9
		0,75	40,2	22,8
		1	39,5	21,7
НР _{0,05} т/га (соя): А-0,01; В-0,01; С-0,0; АВ-0,02; АС-0,04; ВС-0,14; АВС-0,05 2018 р. НР _{0,05} т/га: А-0,01; В-0,01; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,04 2019 р. НР _{0,05} т/га: А-0,02; В-0,02; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,04 2020 р. НР _{0,05} т/га: А-0,02; В-0,03; С-0,03; АВ-0,02; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,05 2021 р. НР _{0,05} т/га: А-0,02; В-0,01; С-0,02; АВ-0,03; АС-0,03; ВС-0,03; АВС-0,06 2022 р. НР _{0,05} т/га: А-0,03; В-0,02; С-0,03; АВ-0,03; АС-0,02; ВС-0,02; АВС-0,03.				

Зафіксовано позитивний вплив передпосівної обробки насіння на показники якості. Відтак, у середньому по досліді передпосівна обробка насіння

Ризогуміном збільшила вміст сирого протеїну та жиру у сорту Голубка, відповідно, на 15,7 та 16,6 %; у сорту Азимут – на 12,5 та 9,0 %. Окрім того, сумісне застосування інокуляції насіння та обробки посівів сої ретардантами забезпечило вміст сирого протеїну від 37,6 до 40,2 %, що відповідає нормам та вимогам ДСТУ 4230:2003.

За даними літературних джерел встановлено, що процес біосинтезу білка в насінні сої відбувається під час його дозрівання. Петриченко В.Ф. [1] у своїх працях доводить, що запасні білки утворюються з амінокислот та амідів, які надходять із вегетативної маси. Відтак, починаючи з фази цвітіння, в цих органах посилюються гідролітичні процеси і вплив (реутилізація) азоту в репродуктивні органи. Отже, склад білка в насінні цієї культури в міру її дозрівання змінюється, а кількість альбумінів залишається на рівні 30% у фазах молочно-воскової та повної стиглості, натомість кількість глобулінів легуноподібних із 24% зростає до 46%, а глобулінів віціліноподібних, навпаки, зменшується від 46% до 24%.

У результаті досліджень встановлено, що урожайність сортів сої залежала від погодних умов, сортових особливостей та факторів, що були поставлені на вивчення. Найбільшу урожайність було відмічено за умови передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації. Відтак, на даному варіанті дослідів відмічена найбільша маса насіння з однієї рослини у сорту Голубка – 3,88 г, що більше на 0,61 г (або 15,2%), ніж у варіанті, де насіння не оброблялося. Відмічено, що серед варіантів по досліді застосування Ризогуміну та 0,75 % розчину ретарданту сприяло отриманню найвищих показників структури врожаю.

Однак, одержані результати стосовно збору «сирого» протеїну та жиру в т/га чіткіше підкреслюють зазначену закономірність і доцільність застосування в посівах сої бактеріального препарату Ризогумін та обробку посівів ретардантом хлормекват-хлорид.

Вміст цих показників визначатиме не тільки кормову цінність, але й вихід

продукції з одиниці площі. Вихід сирого протеїну у насінні сорту Азимут становив 0,64-0,88 т/га, у сорту Голубка – 0,78-1,02 т/га. Найбільший вихід жиру було відмічено за умови передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації. Відтак, на даному варіанті досліду вихід сирого жиру у сортів Азимут – 0,55 т/га та Голубка 0,61 т/га.

Збір сирого протеїну істотно залежав від урожайності насіння сої. Застосування досліджуваних технологічних прийомів вирощування сприяло покращенню умов формування врожаю, а також істотному збільшенню збору сирого протеїну у сорту Азимут на 0,26 т/га та у сорту Голубка на 0,29 т/га порівняно з контролем. На вихід жиру також чинила вплив урожайність насіння сої. Відтак, за умови передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації призвело до істотного збільшення збору жиру з одиниці площі у сорту Азимут на 0,15 т/га та у сорту Голубка на 0,17 т/га порівняно з контролем.

4.2. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР

Сучасні технології вирощування в умовах сьогодення мають бути конкурентоспроможними. Виробництво продукції рослинництва в умовах дефіциту ресурсного потенціалу вимагає перегляду підходів, які існували при розподільчо-плановій економіці щодо розподілу виробничих витрат при розробці технологій вирощування зернобобових культур [101-115].

За результатами аналізу структури економічних витрат на вирощування зернобобових культур залежно від передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту за 2018–2022 рр. Встановлено, що найбільша частка затрат припадає на матеріали та паливо.

Загальна вартість витрат насінневої продукції досліджуваних

зернобобових культур залежала від технологічних прийомів, що були поставлені на вивчення. Максимальна вартість витрат насінневої продукції сортів сої була розрахована на варіанті, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація у сорту Азимут – 17331 грн./га та сорту Голубка – 17468 грн./га.

На контрольній ділянці сої сорту Азимут вартість витрат насінневої продукції була найнижчою та становила – 15886 грн./га, що на 16,63 % менше за варіант, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид.

Таблиця 4.4

Структура економічних витрат на вирощування сої залежно від передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту, середнє за 2018-2022 рр., кг/га

Сорт	Передпосівна обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Статті витрат, грн./га				Всього витрат, грн./га
			Матеріали	Дизпаливо	Оплата праці	Інші	
Азимут	Без обробки	без обробки (к)	7784	4615	2226	1261	15886
		0,75	7875	4672	2254	1298	16071
	Ризогумін	без обробки	8105	4806	2315	1314	16540
		0,75	8492	5046	2426	1367	17331
Голубка	Без обробки	без обробки	7811	4615	2226	1288	15940
		0,75	7919	4672	2254	1306	16151
	Ризогумін	без обробки	8135	4806	2315	1346	16602
		0,75	8560	5046	2426	1436	17468

Максимальна вартість витрат насінневої продукції сортів нуту звичайного була розрахована на варіанті, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін-Плюс та двохкратну

обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація у сорту Скарб – 18691 грн./га та сорту Пегас – 18828 грн./га.

На контрольному варіанті сої сорту Скарб вартість витрат насінневої продукції була найнижчою та становила – 17241 грн./га, що на 7,76 % менше за варіант, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін-Плюс та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид.

Максимальна вартість витрат насінневої продукції сортів люпину білого була розрахована на варіанті, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін-Плюс та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація у сорту Вересневий – 16230 грн./га та сорту Чабанський – 16367 грн./га.

На контрольній ділянці люпину білого сорту Вересневий вартість витрат насінневої продукції була найнижчою та становила – 14785 грн./га, що на 8,90 % менше за варіант, де у передпосівну обробку насіння використовували бактеріальний препарат Ризогумін та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид.

Встановлено, що досліджувані технологічні прийоми вирощування суттєво впливали на показники економічної ефективності вирощування досліджуваних зернобобових культур (табл. 4.5). Для оцінки економічної ефективності використовували основні показники: собівартість, умовний чистий прибуток, рівень рентабельності. Вартість одержаної продукції та агресурсів обрані за цінами, що склалися у господарствах центрального регіону України на 1 січня 2022 р. насіння сої – 16300 грн/т.

**Економічна ефективність технології вирощування сої залежно від
передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту,
середнє за 2018-2022 рр., кг/га**

Сорт	Передпосівна обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Вартість продукції, грн./га	Виробничі витрати, грн./га	Собівартість продукції, грн./т	Умовно чистий прибуток, грн./га	Рівень рентабельності, %
Азимут	Без обробки	без обробки (к)	28436	15886	7711	12550	79
		0,75	25571	16071	7145	13500	84
	Ризогумін	без обробки	31095	16540	7587	14264	86
		0,75	33969	17331	7251	16638	96
Голубка	Без обробки	без обробки	29011	15940	7213	13071	82
		0,75	30202	16151	6992	14051	87
	Ризогумін	без обробки	32540	16602	6749	15938	96
		0,75	36857	17468	6542	19389	111

Максимальні показники економічної ефективності, а саме рівень рентабельності – 111% відмічено для технології вирощування сої сорту Голубка, де застосовувались у передпосівну обробку насіння бактеріальний препарат Ризогумін та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація. Собівартість та прибуток при цьому становили відповідно – 6542 грн./т та 19389 грн./га.

Показники економічної ефективності технології вирощування сої сорту Азимут на контрольних ділянках мали наступні значення: прибуток – 12550 грн./га, рівень рентабельності – 79 %, собівартість – 7711 грн./т. Аналогічну тенденцію спостерігали із сортом Голубка. При цьому, показники економічної ефективності технології вирощування даного сорту на контрольних ділянках мали такі значення: прибуток – 15537 грн./га, рівень рентабельності – 90 %, собівартість – 7571 грн./т.

Між показниками економічної ефективності технології вирощування сої

сорту Голубка при застосуванні передпосівної обробки насіння бактеріального препарату Ризогумін та 0,75 % концентрації ретарданту за рахунок формування вищої врожайності насіння на рівні 2,67 т/га, собівартість одиниці врожаю на даному варіанті зменшувалась на 671 грн./т, а умовно чистий прибуток та рівень рентабельності збільшувались на 6318 грн./га та 19 % у порівнянні із контрольним варіантом.

Дещо нижчі показники чистого прибутку зафіксовано за технології вирощування сої (рис. 8.2), що включала у передпосівну обробку насіння бактеріальний препарат Ризогумін-Плюс та за двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид (у фазу 3-й трійчастого листка та бутонізації).

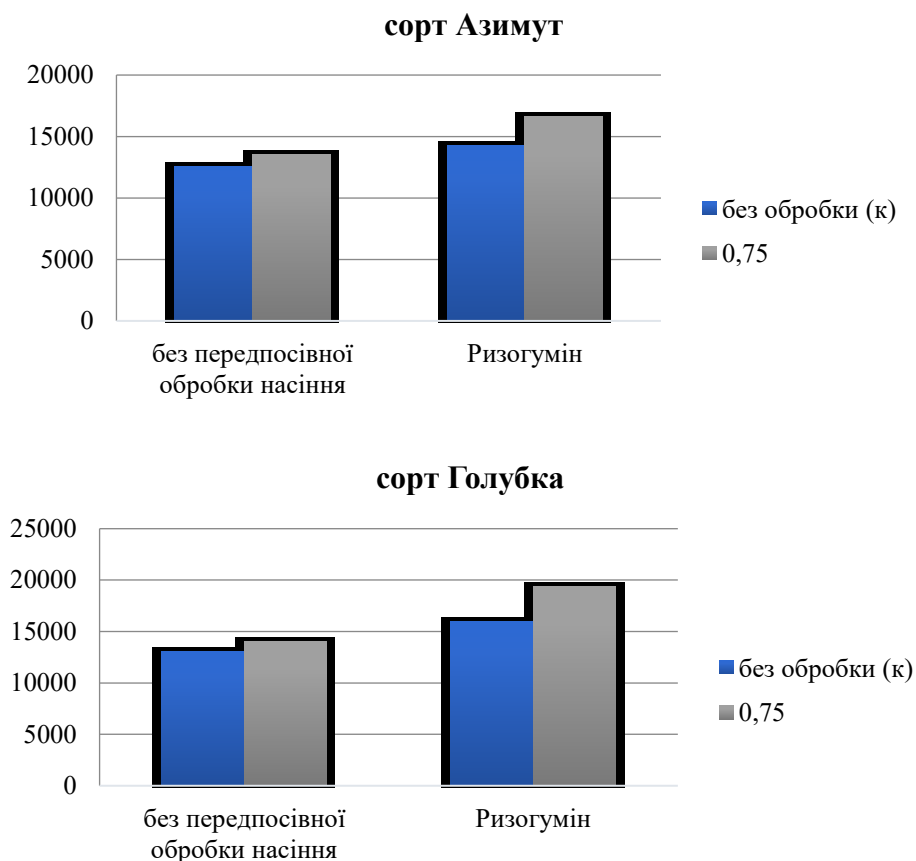


Рисунок 4.2. Умовно чистий прибуток вирощування сої залежно від технологічних прийомів вирощування, грн./га (середнє за 2018-2022 рр.)

Таким чином, аналіз економічних показників показав, що в умовах правобережного Лісостепу України на сірих лісових ґрунтах інтенсифікація

процесу вирощування зернобобових культур при застосуванні передпосівної обробки насіння та використання обробки посівів ретардантом є економічно вигідним елементом технології вирощування. З економічної точки зору найдоцільніше вирощувати наступні сорти зернобобових культур: сої – Голубка.

4.3. БІОЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОЩУВАННЯ ЗЕРНОБОБОВИХ КУЛЬТУР

В умовах правобережного Лісостепу України в кожному господарстві, що спеціалізуються на вирощуванні сільськогосподарських культур, складаються певні економічні умови, які залежать від наявності фінансових ресурсів, технічного забезпечення, кадрового потенціалу, особливостей погодних умов року вирощування. Велику увагу слід приділяти прогнозуванню та врахуванню співвідношення цін на готову продукцію з цінами на поливну воду, добрива, паливно-мастильні матеріали, пестициди, біопрепарати тощо. При цьому необхідно впроваджувати енергоощадні технологічні прийоми вирощування, зокрема мінімізовані системи обробітку ґрунту, дотримання ресурсозберігаючих аспектів. Тому найважливішим складовим елементом наукових досліджень в аграрній галузі є обґрунтування технології вирощування зернобобових культур як з економічної, так енергетичної точок зору [102, 115-120].

Стрімкий розвиток у світі та Україні білково-олійного потенціалу зумовлений великим попитом на зернобобові культури, а також їхню продукцію, оскільки найбільшого використання набувають соєвий, нутовий та люпиновий білки та соєва і люпинова олії. Унікальність насіння досліджуваних зернобобових культур, зокрема люпину та сої, на відміну від соняшника і ріпаку, в тому, що вміст білка в ньому переважає над вмістом жиру. Тому, насіння зернобобових культур, при вирощуванні за сприятливих ґрунтово-кліматичних умов із синергією сучасних технологічних прийомів вирощування, є найважливішим енергетичним білково-олійним ресурсом України. Підвищення урожайності і покращення якості насіння, яких вимагає збільшення матеріально-

технічних і енергетичних ресурсів, а також визначення ступеня використання насіння, добрив, біопрепаратів, техніки та здійснення заходів, які впливають на родючість ґрунту та екологічний стан середовища.

Проведений енергетичний аналіз показав, що чим довше тривав вегетаційний період рослин, тим ефективніше вона споживала енергію Сонця і нагромаджувала більше органічної маси. Енергетична поживність білкових продуктів досить висока: одиниця сухої маси насіння зернобобових культур вміщує у 3–5 разів більше білка, ніж інші польові культури. Тому енергію, яка міститься в урожаї зернобобових, необхідно розраховувати за вмістом білка, жиру і вуглеводів.

За даними Петриченка В.Ф. [1] порівняння енергії, акумульованої в урожаї, із сукупною енергією, затраченою на вирощування і збирання врожаю, дає змогу об'єктивно оцінити технологію вирощування сільськогосподарських культур. У рослинництві на одиницю затраченої сукупної енергії в процесі вирощування культури припадає від 2 до 7 одиниць енергії, акумульованої з урожаю. Одним із найважливіших напрямків інтенсифікації і підвищення на цій основі врожайності зернобобових культур є вдосконалення системи технологічних прийомів, а також впровадження у виробництво нових, продуктивніших сортів, які можуть проявити свої потенційні можливості за оптимального поєднання всіх складових технології вирощування [3]. Тоді як з ростом інтенсифікації технологій вирощування культур збільшується використання матеріально-технічних засобів, а також супутні витрати енергії, що містяться в останніх. Визначення порівняльної ресурсоемкості витрат неоднакових за рівнем енергонасиченості технологій вирощування, аналіз енергоемкості виробництва дозволяє оцінити різні за рівнем інтенсифікації технології, визначити їхню перспективність з погляду ресурсо- та енергозбереження [104, 126]. Збільшення виробництва зерна основних зернобобових культур, зокрема сої, нуту звичайного та люпину білого може бути досягнуте лише завдяки впровадженню високоокупних конкурентоспроможних технологій їх вирощування. Освоєння таких технологій, поряд зі зростанням

урожайності, забезпечить істотне підвищення якості насіннєвої продукції, що відповідає стандартам і вимогам сучасного аграрного ринку.

Структура енергетичних витрат розподілялась згідно затрат наведених у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Структура витрат енергії на вирощування сої залежно від передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту, середнє за 2018-2022 рр., кг/га

Передпосівна обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Статті затрат, МДж/га				Всього затрат, ГДж/га
		Обробіток ґрунту	Матеріали	Сівба і насіння	Збирання урожаю	
Азимут						
Без обробки	без обробки (к)	6885	4075	1124	1967	14051
	0,75	6997	4141	1142	2000	14280
Ризогумін	без обробки	7056	4176	1152	2017	14401
	0,75	7142	4227	1166	2041	14576
Голубка						
Без обробки	без обробки	6723	3979	1098	1921	13721
	0,75	6737	3987	1100	1942	13748
Ризогумін	без обробки	6762	4002	1104	1932	13800
	0,75	6812	4032	1112	1947	13903

Структура енергетичних витрат розподілялась на посівах сої, нуту та люпину білого відповідно таким чином: обробіток ґрунту – 49 %; матеріали – 29 %; сівба і насіннєвий матеріал – 8 % та збирання врожаю – 14 % з відповідним пропорційним розподілом за даними структурними елементами витратного енергетичного балансу (рис. 4.3).



Рисунок 4.3. Структура енергетичних витрат зернобобових культур залежно від технологічних прийомів вирощування, грн./га (середнє за 2018-2022 рр.)

Відтак, максимальну питому вагу в структурі енергетичних витрат мали: обробіток ґрунту % (39 %) та матеріали (29 %). Мінімальна частка (8 %) належить сівбі та насіннєвому матеріалу.

Саме оптимальне комбінунання та розробка нових адаптивних заходів в сортовій технології вирощування зернобобових культур для умов Лісостепу правобережного, дало змогу отримати конкурентноспроможну продукцію: енергетично цінне насіння високої якості (табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Енергетична ефективність технологій вирощування зернобобових культур залежно від передпосівної обробки насіння та концентрації ретарданту, середнє за 2018-2022 рр., кг/га

Передпосів на обробка насіння	Концентрація ретарданту, %	Витрати енергії на вирощування, ГДж/га	Вихід сухої речовини, т/га	Вихід валової енергії, ГДж/га	Енергоємність, ГДж/т сухої речовини	Енергетичний коефіцієнт
Азимут						
Без обробки	без обробки (к)	14051	1,73	31140	17089	1,2
	0,75	14280	1,88	33840	19560	2,3
Ризогумін	без обробки	14401	1,83	32940	18539	2,4
	0,75	14576	2,08	37440	22862	2,6
Голубка						
Без обробки	без обробки (к)	13721	1,86	33480	19759	2,3
	0,75	13748	1,94	34920	21172	2,5
Ризогумін	без обробки	13800	2,07	37260	23460	2,7
	0,75	13903	2,24	40320	26417	2,9

У середньому за роки досліджень (2018-2022 рр.) вихід сухої речовини на рівні 2,24 т/га сорту Голубка одержали за обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обприскування посівів хлормекват-хлоридом у фазі бутонізації, що більше відповідно на 17 % порівняно з контролем (без бактеризації та обробки посівів ретардантом). Крім цього, у сорту сої Азимут приріст до контролю становив 0,35 т/га.

У середньому за роки досліджень (2018-2022 рр.), розрахунки енергетичної ефективності показали, що вирощування досліджуваних культур (сої, нуту звичайного та люпину білого) було досить ефективним. Відтак, найвищі витрати сукупної енергії на вирощування сої у сортів Азимут (14576 ГДж/га) та Голубка (13903 тис. ГДж/га) були на ділянках, де застосовували передпосівну обробку насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та хлормекват-хлоридом у фазу бутонізації, тоді як на контрольних ділянках вони були меншими. Слід відмітити, що із зростання витрат валової енергії на вирощування зростає показник енергоємності, отриманої із урожаєм, оскільки застосування інокулянта та ретарданта зумовило досить суттєве зростання рівня урожаю та накопичення в ньому енергії.

Найвищий вихід енергії, отриманої із урожаєм відмічено у сорту Голубка (40320 ГМДж/га) за внесення 0,75 % розчину хлормекват-хлориду на фоні інокуляції бактеріальним препаратом Ризогумін. Прибавка до контролю відповідно становила 6840 ГДж/га або 17 %. Крім цього, застосування бактеризації насіння та хлормекват-хлориду при вирощуванні сої забезпечило збільшення чистого енергетичного прибутку: у сорту Голубка на 25 %. При аналізі показників енергетичної ефективності, встановлено, що енергоємність врожаю змінювалась і, відповідно, змінювався коефіцієнт енергетичної ефективності. В усіх варіантах дослідження визначений коефіцієнт значно перевищував 1, що вказує про доцільність включення до технології вирощування сої бактеризації насіння та обробки посівів регулятором росту хлормекват-хлориду. Так, коефіцієнт енергетичної ефективності за вирощування сої сорту Голубка становив – 2,9.

Розділ 5 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ СИРОВИНИ В ТЕХНОЛОГІЇ КОРМОВИРОБНИЦТВА

5.1 СКЛАДАННЯ РІВНЯНЬ РУХУ ЕЛЕМЕНТІВ ВІБРОДИСКОВОЇ ДРОБАРКИ

Як показує досвід, модернізація існуючих та створення нових конструкцій вібраційних машин відбувається шляхом використання фундаментальних теоретичних передумов, зокрема механіко-математичних методів для формалізації та розв'язання задач аналізу і синтезу технологічних та конструктивних параметрів розробки.

Для складання рівнянь у відповідності до прийнятих припущень приймаємо систему координат XYZ з рухомими системами координат $x_1y_1z_1$ та $x_2y_2z_2$, до якої, за правилом суперпозиції, вносимо схему досліджуваної машини (рис. 5.1) [126-130].

Запропонована конструкція машини представляється математичною моделлю з 6 ступенями вільності, а саме:

x_1 – зміщення центра мас контейнера вздовж осі OX ;

x_2 – зміщення центра мас ротора вздовж осі OX ;

z_1 – зміщення центра мас контейнера вздовж осі OZ ;

z_2 – зміщення центра мас ротора вздовж осі OZ ;

φ_2 – кутове переміщення ротора відносно осі o_1y_1 ;

φ_3 – кутове переміщення робочого диска відносно осі o_2y_2 .

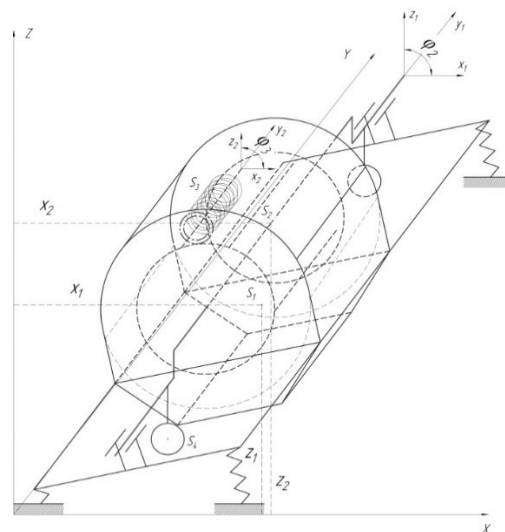


Рисунок 5.1. Схема кінематичного аналізу вібродискової дробарки

У досліджуваній вібросистемі можна виділити чотири характерні маси в загальній масі m (5.1).

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + m_4, \quad (5.1)$$

$$m_1 = m_{\kappa} + m_{\text{зав}} \cdot \mu + m_{\text{o.p.}} + m_{\text{n.в.}}, \quad (5.2)$$

$$m_2 = m_p + m_m, \quad (5.3)$$

$$m_3 = m_{\text{p.д}}, \quad (5.4)$$

$$m_4 = m_{\text{д}}, \quad (5.5)$$

$$m_p = m_{\text{пр.в.}} + m_{\text{н.д}} + m_e + m_{\text{o.д}} + m_{\text{д.о}}, \quad (5.6)$$

де m_{κ} – маса контейнера; $m_{\text{зав}}$ – маса завантаження; μ – коефіцієнт приєднаної маси завантаження; $m_{\text{o.p.}}$ – маса опорної рами; $m_{\text{n.в.}}$ – маса підшипникових вузлів; m_p – маса ротора; m_m – маса муфти; $m_{\text{p.д}}$ – маса робочих дисків; $m_{\text{д}}$ – маса дебалансів; $m_{\text{пр.в.}}$ – маса приводного вала; $m_{\text{н.д.}}$ – маса проміжних дисків; m_e – маса ексцентрикових варіативних механізмів; $m_{\text{o.д.}}$ – маса опорних дисків; $m_{\text{д.о.}}$ – маса дискових осей.

Загальну кінетичну енергію коливної системи можна представити у вигляді:

$$T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \quad (5.7)$$

$$T_1 = \frac{1}{2} m_1 V_1^2 + \frac{1}{2} I_1 \omega_1^2, \quad (5.8)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} m_2 V_2^2 + \frac{1}{2} I_2 \omega_2^2, \quad (5.9)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} m_3 V_3^2 + \frac{1}{2} I_3 \omega_3^2 k u + \frac{1}{2} I_3 \omega_2^2, \quad (5.10)$$

$$T_4 = \frac{1}{2} m_4 V_4^2 + \frac{1}{2} I_4 \omega_2^2, \quad (5.11)$$

де T – загальний вираз кінетичної енергії; T_1 – кінетична енергія контейнера; T_2 – кінетична енергія ротора; T_3 – кінетична енергія робочого диска; T_4 – кінетична енергія противаги; V_1 – абсолютна швидкість ц.м. контейнера; V_2 –

абсолютна швидкість ц.м. ротора; V_3 – абсолютна швидкість робочого диска; V_4 – абсолютна швидкість ц.м. противаги; I_1 – момент інерції маси m_1 відносно осі OY ; I_2 – момент інерції маси m_2 відносно осі O_1Y_1 ; I_3 – момент інерції маси m_3 до осі O_2Y_2 ; I_4 – момент інерції маси; m_4 відносно осі OY ; ω_1 – кутова швидкість повороту контейнера; ω_2 – кутова швидкість ротора; ω_3 – кутова швидкість робочого диска; ku – коефіцієнт передачі крутного моменту.

Для визначення загальної кінетичної енергії коливної системи досліджуваний механізм розбиваємо на елементарні складові – ланки (рис. 5.2), та здійснюємо їх кінематичний аналіз.

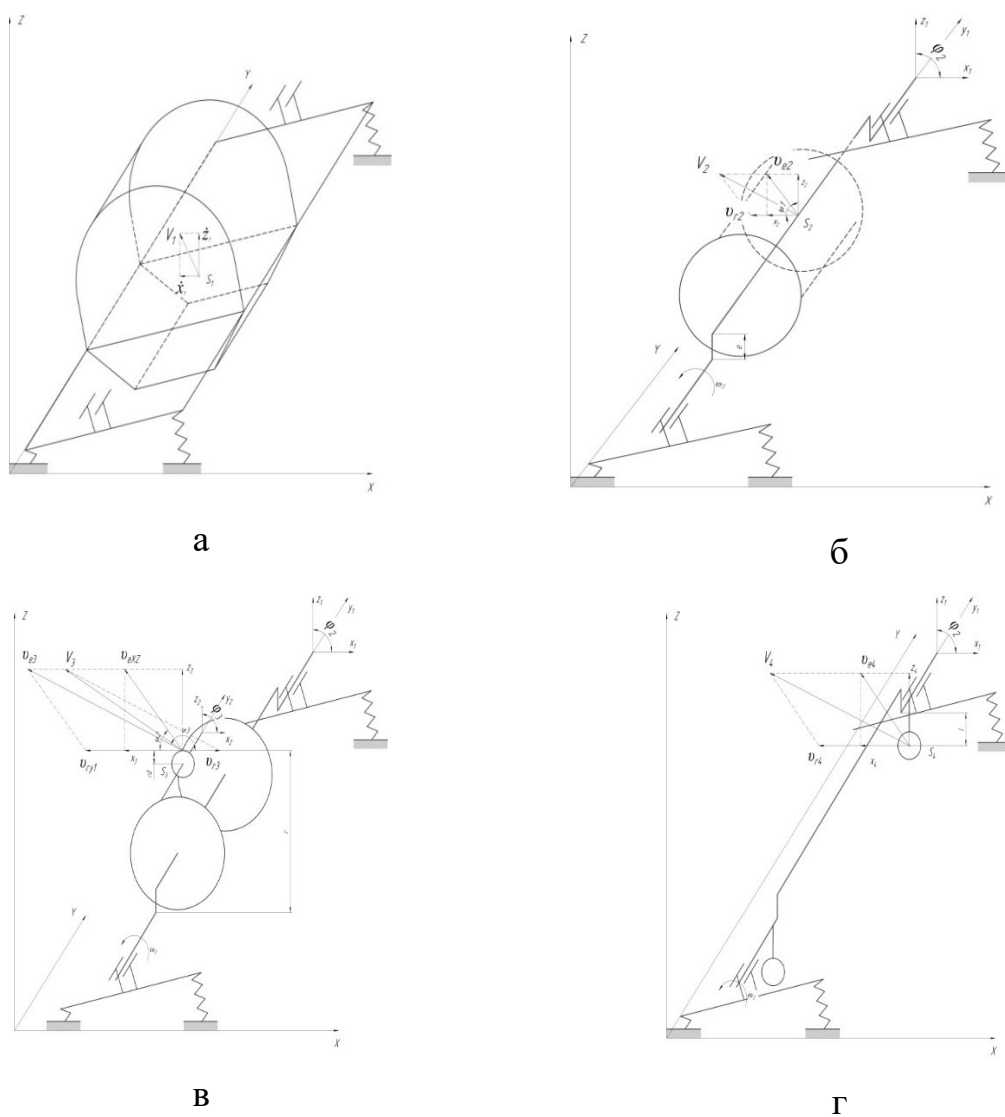


Рисунок 5.2. Розрахункові схеми для визначення абсолютних швидкостей: а) контейнера; б) ротора; в) робочого диска; г) противаги

$$V_1 = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2}, \quad (5.12)$$

де \dot{x}_1, \dot{z}_1 – швидкість ц.м. контейнера відносно осі OX_1 та OZ_1 .

$$V_2 = \sqrt{v_{r2}^2 + v_{e2}^2 + 2v_{r2}v_{e2} \cos \psi_1}, \quad (5.13)$$

де v_{r2}, v_{e2} – відповідно відносна та переносна швидкість ц.м. ротора. ψ_1 – кут між векторами \vec{v}_{r2} та \vec{v}_{e2} .

$$v_{r2} = e \cdot \dot{\phi}_2, \quad (5.14)$$

де e – відстань від ц.м. до відносної осі O_1Y_1 , м; $\dot{\phi}_2$ – кутова швидкість ротора, c^{-1} .

З урахуванням конструктивної особливості розробленого обладнання сформулюємо припущення, що закономірність руху контейнера і ротора ідентичні.

$$v_{e2} = \sqrt{x_2^2 + z_2^2} \cdot \dot{\phi}_2 \rightarrow \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \cdot \dot{\phi}_2, \quad (5.15)$$

де x_2, z_2 – переміщення ц.м. ротора відносно нерухомих осей OX_2 та OZ_2 .

$$\cos \psi_1 = \frac{x_2}{v_{e2}}, \quad (5.16)$$

Враховуючи (ф. 3.16) залежність (3.13) набуде вигляду:

$$V_2 = \sqrt{(e \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \dot{\phi}_2^2 + 2 \cdot e \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1}. \quad (5.17)$$

Швидкість робочого диска:

$$V_3 = \sqrt{v_{r3}^2 + v_{e3}^2 + 2v_{r3}v_{e3} \cos \psi_3}, \quad (5.18)$$

де v_{r3}, v_{e3} – відповідно відносна та переносна швидкість робочого диска;

ψ_3 – кут між векторами відносної і переносної швидкості \vec{v}_{r3} та \vec{v}_{e3} .

$$v_{r3} = r_d \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku, \quad (5.19)$$

де r_d – радіус робочого диска, м; $\dot{\phi}_3$ – кутова швидкість робочого диска, c^{-1}

¹; ku – коефіцієнт передачі крутного моменту $ku=0...1$.

При обертанні робочого ротора обладнання, між кромкою робочого диска

та матеріалом, виникають сили тертя $F_{mp.c.}$, обертання ж робочого диска можливе лише за умови $F_{mp.c.} > F_{mp.z.}$, де $F_{mp.z.}$ – сила тертя у з’єднанні «робочий диск – дискова вісь». При $ku \rightarrow 1$ відбувається збільшення $F_{mp.c.}$, тоді як при $ku = 0$ $F_{mp.c.} = 0.$, та як наслідок $\dot{\phi}_3 = 0.$

Отже, при $ku > 0$:

$$\dot{\phi}_3 = \frac{\dot{\phi}_2 \cdot r_{o.d}}{r_{\partial} \cdot ku}, \quad (5.20)$$

де $r_{o.d}$ – радіус опорного диска, м.

$$v_{e3} = \sqrt{v_{ry1}^2 + v_{eXZ}^2 + 2v_{ry1}v_{eXZ} \cos \psi_2}, \quad (5.21)$$

де v_{ry1} – швидкість робочого диска відносно осі o_1y_1 ; v_{eXZ} – швидкість робочого диска відносно системи координат XYZ; ψ_2 – кут між векторами швидкостей робочого диска \vec{v}_{ry1} і \vec{v}_{eXZ} .

$$v_{ry1} = r \cdot \dot{\phi}_2, \quad (5.22)$$

де r – відстань від кромки робочого диска до осі обертання o_1y_1 , м.

$$v_{eXZ} = \sqrt{x_3^2 + z_3^2} \cdot \dot{\phi}_2 \rightarrow \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \cdot \dot{\phi}_2 \quad (5.23)$$

де x_3, z_3 – переміщення робочого диска відносно нерухомих осей OX та OZ .

$$\cos \psi_2 = \frac{x_1}{v_{eXZ}}, \quad (5.24)$$

Враховуючи (ф. 3.24) рівняння (3.21) набуде вигляду:

$$v_{e3} = \sqrt{(r \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2^2 + 2(r \cdot \dot{\phi}_2)x_1}. \quad (5.25)$$

Оскільки:

$$\cos \psi_3 = -\cos(180 - \psi_3) = -\frac{2x_3 + r \cdot \dot{\phi}_2}{v_{e3}}, \quad (5.26)$$

$$V_3 = \sqrt{(r_{\partial} \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)^2 + (r \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2(r \cdot \dot{\phi}_2)x_1 - 2(r_{\partial} \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)(2x_1 + r \cdot \dot{\phi}_2)}, \quad (5.27)$$

Швидкість ц.м. противаги:

$$V_4 = \sqrt{v_{r4}^2 + v_{e4}^2 + 2v_{r4}v_{e4} \cos \psi_4}, \quad (5.28)$$

де v_{r4} , v_{e4} – відповідно відносна та переносна швидкість ц.м. противаги;

ψ_4 – кут між векторами швидкостей ц.м. противаги \vec{v}_{r4} та \vec{v}_{e4} .

$$v_{r4} = l \cdot \dot{\phi}_2, \quad (5.29)$$

де l – відстань від ц.м. до відносної осі o_1y_1 , м;

Переносна швидкість:

$$v_{e4} = \sqrt{x_4^2 + z_4^2} \cdot \dot{\phi}_2 \rightarrow \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \cdot \dot{\phi}_2, \quad (5.30)$$

де x_4, z_4 – переміщення ц.м. противаги відносно нерухомих осей OX та OZ .

Оскільки:

$$\cos \psi_4 = \frac{x_1}{v_{e4}}, \quad (5.31)$$

із залежності (3.27) отримаємо:

$$V_4 = \sqrt{(l \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2 \cdot l \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1}. \quad (5.32)$$

Після підстановки:

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{2} m_1 [\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2]; \\ T_2 &= \frac{1}{2} m_2 [(e \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2 \cdot e \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1] + \frac{1}{2} I_2 \dot{\phi}_2^2; \\ T_3 &= \frac{1}{2} m_3 [(r_{\partial} \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)^2 + (r \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2(r \cdot \dot{\phi}_2)x_1 - \\ &\quad 2(r_{\partial} \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)(2x_1 + r \cdot \dot{\phi}_2)] + \frac{1}{2} I_3 \dot{\phi}_3^2 ku + \frac{1}{2} I_3 \dot{\phi}_2^2; \end{aligned}$$

$$T_4 = \frac{1}{2} m_4 [(l \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2 \cdot l \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1] + \frac{1}{2} I_4 \dot{\phi}_2^2.$$

Визначення кінетичної енергії всієї системи:

$$\begin{aligned} T = & \frac{1}{2} m_1 [\dot{x}_1^2 + \dot{z}_1^2] + \frac{1}{2} m_2 [(e \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2 \cdot e \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1] + \\ & + \frac{1}{2} m_3 [(r_\partial \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)^2 + (r \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + 2(r \cdot \dot{\phi}_2)x_1 - \\ & - 2(r_\partial \cdot \dot{\phi}_3 \cdot ku)(2x_1 + r \cdot \dot{\phi}_2)] + \frac{1}{2} m_4 [(l \cdot \dot{\phi}_2)^2 + (x_1^2 + z_1^2) \cdot \dot{\phi}_2 + \\ & + 2 \cdot l \cdot \dot{\phi}_2 \cdot x_1] + \frac{1}{2} [(I_2 \dot{\phi}_2^2) + (I_3 \dot{\phi}_3^2 ku) + (I_3 \dot{\phi}_2^2) + (I_4 \dot{\phi}_2^2)]. \end{aligned}$$

Для того, щоб визначити закономірності руху складових елементів досліджуваної вібротривої по кожній із незалежних координат, зручно використати рівняння Лагранжа II роду. При цьому, для кожної узагальненої координати $x, z, y, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ представимо диференціальні рівняння у вигляді [127-130]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = Q_x \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial T}{\partial z} = Q_z \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = Q_{\varphi_1} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = Q_{\varphi_2} \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_3} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_3} = Q_{\varphi_3} \end{array} \right., \quad (5.33)$$

де $Q_x, Q_z, Q_y, Q_{\varphi_1}, Q_{\varphi_2}, Q_{\varphi_3}$ – узагальнені сили опору.

Продиференціювавши отриманий вираз (5.33), знайдемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) = \ddot{x} m_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}} \right) = \ddot{z} m_1 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_1} \right) = 0 \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_2} \right) = \left[\frac{m_3(2rx - 2\ddot{\phi}_2 r^2 - 2ku \cdot r_\delta \dot{\phi}_3 \cdot r + x^2 + z^2) + m_2(x^2 + 2ex + z^2 + 2\ddot{\phi}_2 e^2)}{2} \right. \\ \left. + \frac{m_4(2\ddot{\phi}_2 l^2 + 2lx + x^2 + z^2)}{2} + \ddot{\phi}_2 (I_2 + I_3 + I_4) \right] \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\phi}_3} \right) = ku \cdot r_\delta \cdot m_3 (ku \cdot r_\delta \cdot \ddot{\phi}_3 - (2x + r \cdot \dot{\phi}_2)) + I_3 \cdot ku \cdot \ddot{\phi}_3 \end{array} \right. , \quad (5.34)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial x} = x \cdot \dot{\phi}_2 (m_2 + m_3 + m_4) + m_2 \cdot \dot{\phi}_2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \dot{\phi}_2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_\delta \cdot \dot{\phi}_3 + m_4 \cdot \dot{\phi}_2 \cdot l \\ \frac{\partial T}{\partial z} = z \cdot \dot{\phi}_2 (m_2 + m_3 + m_4) \\ \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \phi_1} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \phi_2} = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial \phi_3} = 0 \end{array} \right. . \quad (5.35)$$

Узагальнену силу можна інтерпретувати як коефіцієнт перед варіацією узагальненої координати у виразі для суми елементарних робіт усіх активних сил [131-134]:

$$\left\{ \begin{array}{l} Qx = F_{кинX} - F_{вiдцX} - C_x \\ Qz = F_{кинZ} - F_{вiдцZ} - G - C_z \\ Q\dot{\phi}_2 = M_{кр1} + F_{кинX} \cdot e - F_{вiдцX} \cdot l - M_{он1(нид)} , \\ Q\dot{\phi}_3 = (M_{кр2} - M_{он2(сировини)}) \cdot ku \end{array} \right. , \quad (5.36)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Qx = (m_2 + m_3)\omega_2^2 e \cos(\omega_2 \cdot t) - m_4\omega_2^2 l \cos(\omega_2 \cdot t) - c_x x \\ Qz = \left[(m_2 + m_3)\omega_2^2 e \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) - m_4\omega_2^2 l \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) - \right. \\ \left. (m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g - c_z z \right] \\ Q\dot{\phi}_2 = \left[M_{kp1} + m_2\omega_2^2 e^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) - m_4\omega_2^2 l^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \right] \\ Q\dot{\phi}_3 = (M_{kp2} - M_{on2(cup)}) \cdot ku \end{array} \right., \quad (5.37)$$

де c_x, c_z – жорсткість пружних елементів уздовж відповідних осей.

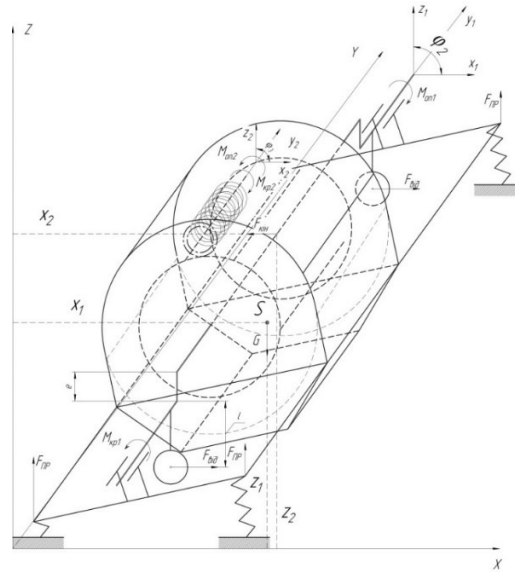


Рисунок 5.3. Схема силового аналізу вібродискової дробарки

Підставляючи значення похідних (5.34), (5.35), узагальнюючих сил системи (5.37), в систему рівнянь (5.36), а також враховуючи дисипативні сили опору в досліджуваній системі, отримуємо вираз (5.38).

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x} + \alpha_x \cdot \dot{x} - x \left[\frac{\dot{\phi}_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_x}{m_1} \right] = \\ \cos(\omega_2 \cdot t) \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4\omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \dot{\phi}_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_\theta \cdot \dot{\phi}_3^2 + m_4 \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot l}{m_1}; \\ \ddot{z} + \alpha_z \cdot \dot{z} - z \cdot \left[\frac{\dot{\phi}_2(m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} \right] = \frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4\omega_2^2 l}{m_1} \times \sin(\omega_2 \cdot t) - \\ \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{m_1}; \\ \frac{m_3(2rx - 2\dot{\phi}_2 r^2 - 2ku \cdot r_\theta \dot{\phi}_3 \cdot r + x^2 + z^2) + m_2(x^2 + 2ex + z^2 + 2\dot{\phi}_2 e^2)}{2} \\ + \frac{m_4(2\dot{\phi}_2 l^2 + 2lx + x^2 + z^2)}{2} + \dot{\phi}_2(I_2 + I_3 + I_4) = M_{kp1} + m_2\omega_2^2 e^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) - m_4\omega_2^2 l^2 \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) \\ - M_{on1(підшипників)}; \\ ku \cdot r_\theta \cdot m_3(ku \cdot r_\theta \cdot \dot{\phi}_3 - (2x + r \cdot \dot{\phi}_2)) + I_3 \cdot ku \cdot \ddot{\phi}_3 = (M_{kp2} - M_{on2(суповини)}) \cdot ku \end{array} \right. \quad (5.38)$$

Знаходимо розв'язок рівняння:

$$\ddot{x} + \alpha_x \cdot \dot{x} - x \left[\frac{\dot{\phi}_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_x}{m_1} \right] =$$

$$= \cos(\omega_2 \cdot t) \left[\left(\frac{(m_2 + m_3)\dot{\phi}_2^2 e - m_4 \dot{\phi}_2^2 l}{m_1} \right) + \right.$$

$$\left. + \frac{m_2 \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \dot{\phi}_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_\partial \cdot \dot{\phi}_3^2 + m_4 \cdot \dot{\phi}_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1} \right],$$

як для лінійного диференційного рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, вважаючи, що $\dot{\phi}_2 = \omega_2$, $\dot{\phi}_3 = \omega_3$;

$$k_x^2 = \frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_x}{m_1} \text{ — власна частота коливань системи;}$$

$$\alpha_x = 2\sqrt{k_x^2 - \omega_2^2} \text{ — коефіцієнт дисипації системи у напрямі осі } OX;$$

$$F_m = \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \text{ — питомий модуль змушуючої сили.}$$

$$+ \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_\partial \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1}$$

При цьому досліджуване рівняння набуває вигляду:

$$\ddot{x} + \alpha_x \cdot \dot{x} + k_x^2 x = F_m \cos \omega_2 t, \quad (5.39)$$

де $x = \bar{x} + x^*$; $\bar{x} = e^{-0.5\alpha_x t} (C_1 \cos \rho_x t + C_2 \sin \rho_x t)$ — загальний розв'язок досліджуваного рівняння; $x^* = B_1 \sin \omega_2 t + B_2 \cos \omega_2 t$ — його частинний розв'язок.

Використовуючи властивості рівнянь з постійними коефіцієнтами, складаємо та розв'язуємо малу систему рівнянь:

$$-B_1 \sin \omega_2 t - B_2 \omega_2^2 \cos \omega_2 t + \alpha_x B_1 \omega_2 \cos \omega_2 t - \alpha_x B_2 \omega_2 \sin \omega_2 t +$$

$$+ k_x^2 B_1 \sin \omega_2 t + B_2 k_x^2 \cos \omega_2 t = F_m \cos \omega_2 t \quad (5.40)$$

$$\begin{cases} -B_2 \omega_2^2 + \alpha_x B_1 \omega_2 + B_2 k_x^2 = F_m \\ -B_1 \omega_2^2 - \alpha_x B_2 \omega_2 + k_x^2 B_1 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_2(k_x^2 - \omega_2^2) + \alpha_x B_1 \omega_2 = F_m \\ B_1(k_x^2 - \omega_2^2) = B_2 \alpha_x \omega_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_1 = \frac{F_m \alpha_x \omega_2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \\ B_2 = \frac{F_m (k_x^2 - \omega_2^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \end{cases} \quad (5.41)$$

Тоді окремий розв'язок рівняння складає:

$$x^* = \frac{F_m}{(k_x^2 - \omega_2^2) + \alpha_x^2 \omega_2^2} (\alpha_x \omega_2 \sin \omega_2 t + (k_x^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t). \quad (5.42)$$

Враховуючи загальний розв'язок рівняння:

$$x = e^{-0.5\alpha_x t} (C_1 \cos j_x t + C_2 \sin j_x t) + \frac{F_m (\alpha_x \omega_2 \sin \omega_2 t + (k_x^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \quad (5.43)$$

Враховуючи початкові умови $x_0 = 0$; $\dot{x}_0 = v_{x0}$ визначаємо постійні диференціювання:

$$C_1 = \frac{F_m (\omega_2^2 - k_x^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2}, \quad (5.44)$$

$$C_2 = \frac{v_{x0}}{j_x} - \frac{0.5 F_m \alpha_x \rho_x^{-1} (k_x^2 + \omega_2^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2}, \quad (5.45)$$

де $j_x = \sqrt{k_x^2 - 0.25\alpha_x^2}$ – частота власних коливань системи.

В результаті отримаємо:

$$x = e^{-0.5\alpha_x t} \left[\frac{F_m (\omega_2^2 - k_x^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \cos j_x t + \left(\frac{v_{x0}}{j_x} - \frac{0.5 F_m \alpha_x j_x^{-1} (k_x^2 + \omega_2^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \right) \times \right. \\ \left. \times \sin j_x t + \frac{F_m (\alpha_x \omega_2 \sin \omega_2 t + (k_x^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \right] \quad (5.46)$$

Через розсіювання енергії у досліджуваній коливній системі вільні коливання затухають, та для усталеного режиму рівняння можна записати наступним чином:

$$x = \frac{F_m \alpha_x \omega_2 \sin \omega_2 t}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} + \frac{F_m (k_x^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \quad (5.47)$$

Тоді:

$$x = \left[\left(\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1} \right) \times \right. \\ \left. \times 2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2 \cdot \omega_2}{m_1}} \right] \times \sin(\omega_2 t) \\ + \left[\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1} \right] \times \\ \times \left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2}{m_1} \right) \\ \left[\frac{\left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2}{m_1} \right)^2 + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2}{m_1}} \right)^2 \omega_2^2}{\left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2}{m_1} \right)^2 + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_4) + c_x - \omega_2^2}{m_1}} \right)^2 \omega_2^2} \right] \times \cos(\omega_2 t)$$

Для руху системи відносно вісі OZ :

$$\ddot{z} + \alpha_z \cdot \dot{z} - z \cdot \left[\frac{\dot{\phi}_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_z}{m_1} \right] = \sin(\omega_2 \cdot t) \left[\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4\omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right],$$

$$k_z^2 = \frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_z}{m_1} - \text{власна частота коливань системи};$$

$$\alpha_z = 2\sqrt{k_z^2 - \omega_2^2} - \text{коєфіцієнт дисипації системи у напрямі осі } OZ;$$

$$F_m = \frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4\omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} - \text{питомий модуль змушуючої сили.}$$

При цьому, досліджуване рівняння набуває вигляду:

$$\ddot{z}_1 + \alpha_z \cdot \dot{z}_1 + k_z^2 z_1 = F_m \sin \omega_2 t, \quad (5.48)$$

$$\text{де } z = \bar{z} + z^*; \bar{z} = e^{-0.5\alpha_z \cdot t} (C_3 \cos j_z t + C_4 \sin j_z t) - \text{загальний розв'язок}$$

досліджуваного рівняння; $z^* = B_3 \sin \omega_2 t + B_4 \cos \omega_2 t$ – його частинний розв'язок.

$$\begin{cases} -B_3\omega_2^2 - \alpha_z B_4\omega_2 + k_z^2 B_3 = F_m \\ -B_4\omega_2^2 + \alpha_z B_3\omega_2 + B_4 k_z^2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_3(k_z^2 - \omega_2^2) - B_4\alpha_z\omega_2 = F_m \\ B_4(k_z^2 - \omega_2^2) + B_3\alpha_z\omega_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} B_3 = \frac{F_m(k_z^2 - \omega_2^2)}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2\omega_2^2} \\ B_4 = \frac{F_m\alpha_z\omega_2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2\omega_2^2} \end{cases}. \quad (5.49)$$

В результаті шукане рівняння набуває вигляду:

$$z = e^{-0.5\alpha_z t} (C_3 \cos j_z t + C_4 \sin j_z t) + \frac{F_m [(k_z^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t - \alpha_z \omega_2 \cos \omega_2 t]}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2}, \quad (5.50)$$

$$\text{де } j_z = \sqrt{k_z^2 - 0.25\alpha_z^2} - \text{частота власних коливань системи.}$$

Враховуючи початкові умови $z_0 = 0$; $\dot{z}_0 = v_{z0}$, визначаємо постійні диференціювання:

$$C_3 = \frac{F_m \alpha_z \omega_2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2}, \quad (5.51)$$

$$C_4 = \frac{v_{z0}}{j_z} + \frac{F_m \omega_2 j_z^{-1} (0.5\alpha_z^2 - k_z^2 + \omega_2^2)}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2}. \quad (5.52)$$

В результаті отримаємо:

$$z = e^{-0.5\alpha_z t} \left[\frac{F_m \alpha_z \omega_2 \cos j_z t}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} + \left(\frac{v_{z0}}{j_z} + \frac{F_m \omega_2 j_z^{-1} (0.5\alpha_z^2 - k_z^2 + \omega_2^2)}{(k_z^2 - \omega_2^2) + \alpha_z^2 \omega_2^2} \right) \sin j_z t \right] + \frac{F_m [(k_z^2 - \omega_2^2) \omega_2^2 \sin \omega_2 t + \alpha_z \omega_2 \cos \omega_2 t]}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} \quad (5.53)$$

Через розсіювання енергії у досліджуваній коливній системі вільні коливання затухають, а для усталеного режиму рівняння можна записати наступним чином:

$$z = \frac{F_m (k_z^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} + \frac{F_m \alpha_z \omega_2 \cos \omega_2 t}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2}. \quad (5.54)$$

$$z = \left[\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e^{-m_4 \omega_2^2 l}}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right) \left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2 \right)}{\left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2 \right)^2 + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2} \right)^2 \cdot \omega_2^2} \right] \times \sin(\omega_2 t) - \left[\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e^{-m_4 \omega_2^2 l}}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right) \cdot 2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2} \cdot \omega_2}{\left(\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2 \right)^2 + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2 (m_2 + m_3 + m_3) + c_z}{m_1} - \omega_2^2} \right)^2 \cdot \omega_2^2} \right] \times \cos(\omega_2 t)$$

Розраховуємо вираз для амплітуди коливань ротора машини по осі ОХ, враховуючи, що:

$$\frac{F_m \alpha_x \omega_2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} = A_x \cos \phi_x \quad (5.55)$$

$$\frac{F_m (k_x^2 - \omega_2^2)}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} = A_x \sin \phi_x \quad (5.56)$$

Після певних математичних перетворень отримуємо:

$$x = A_x (\sin(\omega_2 t) \cdot \cos \phi_x + \cos(\omega_2 t) \cdot \sin \phi_x) = A_x \sin(\omega_2 t + \phi_x), \quad (5.57)$$

$$\text{де } \phi_x = \arctg \left(\frac{k_x^2 - \omega_2^2}{\alpha_x \omega_2} \right).$$

Після певних перетворень отримаємо амплітуду A_x у вигляді:

$$A_x = \frac{F_m \sqrt{\alpha_x^2 \omega_2^2 + (k_x^2 - \omega_2^2)^2}}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} = \frac{F_m}{\sqrt{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2}}. \quad (5.58)$$

Знаходимо складову амплітуди коливань A_z за аналогією.

Використовуючи заміну, маємо:

$$\frac{F_m \alpha_z \omega_2^2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} = A_z \cos \varphi_z. \quad (5.59)$$

$$\frac{F_m (k_z^2 - \omega_2^2)}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} = A_z \sin \varphi_z. \quad (5.60)$$

$$z = A_z (\cos \varphi_z \sin(\omega_2 t) - \sin \varphi_z \cos(\omega_2 t)) = A_z \sin(\omega_2 t - \varphi_z), \quad (5.61)$$

$$\text{де } \varphi_z = \arctg \left(\frac{\alpha_z \omega_2}{k_z^2 - \omega_2^2} \right).$$

Враховуючи вирази, отримуємо складову амплітуди A_z :

$$A_z = \frac{F_m \sqrt{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 - (\alpha_z \omega_2)^2}}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} = \frac{F_m}{\sqrt{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2}}. \quad (5.62)$$

Абсолютна амплітуда коливань $A = \sqrt{A_x^2 + A_z^2}$, що з урахуванням залежностей (5.21) та (5.25), становить:

$$A = \sqrt{\left(\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_2^3 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1}}{\sqrt{\left(\frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_x}{m_1} - \omega_2^2 \right)^2} + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_x}{m_1} - \omega_2^2} \right)^2 \cdot \omega_2^2} \right)^2 + \left(\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right)}{\sqrt{\left(\frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_z}{m_1} - \omega_2^2 \right)^2} + \left(2 \sqrt{\frac{\omega_2(m_2 + m_3 + m_4) + c_z}{m_1} - \omega_2^2} \right)^2 \cdot \omega_2^2} \right)^2}. \quad (5.63)$$

Використовуючи подану залежність, можна визначити інші параметри вібраційного поля для усталеного режиму, що є пропорційним амплітуді та частоті коливань, а саме: віброшвидкість $v = A \cdot \omega$; віброприскорення $a = A \cdot \omega^2$; інтенсивність коливань $I = a \cdot v = A^2 \cdot \omega^3$.

Потужність привода досліджуваної машини можна визначити як [132-136]:

$$N_{np} = (N_{F \max} + N_{тер}) / \gamma_{np}, \quad (5.64)$$

де $N_{F \max}$ – максимальна потужність, що розвивається змушуючою силою для надання виконавчим органам коливальної системи потрібних

параметрів вібрації; $N_{мер}$ – витрати потужності на тертя в опорних вузлах; γ_{np} – к.к.д. привода.

Вираз для потужності змушуючої сили N_F представлено у вигляді добутку $N_F = F_m \cdot v$, де $v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2}$ – вираз віброшвидкості; F_m – модуль змушуючої сили.

Враховуючи, що:

$$\dot{x} = \frac{F_m \alpha_x \omega_2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \cdot (\alpha_x \omega_2 \cos \omega_2 t - (k_x^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t), \quad (5.65)$$

$$\dot{z} = \frac{F_m \alpha_z \omega_2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} \cdot (k_z^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t + \alpha_z \omega_2 \sin \omega_2 t), \quad (5.66)$$

шуканий вираз набуває вигляду:

$$N_{F \max} = \sqrt{\left(\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1} \right)^2 + \left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right)^2} \times$$

$$\sqrt{\left(\frac{\left(\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1} \right) \cdot \alpha_x \omega_2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \right)^2 + \left(\alpha_x \omega_2 \cos \omega_2 t - (k_x^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t \right)^2} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right) \cdot \alpha_z \omega_2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} \right)^2 + \left((k_z^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t + \alpha_z \omega_2 \sin \omega_2 t \right)^2}$$

Потужність на здолаття сил тертя у системі можна визначити [138-145]:

$$N_{тер} = 0,5 \cdot F \cdot \mu \cdot d_{\psi} \cdot \omega_2^2. \quad (5.67)$$

$$N_{тер} = 0,5 \cdot \mu \cdot d_{\psi} \cdot \omega_2^2 \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right) + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t) m_1} \right)^2 + \left(\frac{(m_2 + m_3) \omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4) g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right)^2}. \quad (5.68)$$

де $\mu = 0,05 \dots 0,08$ – коефіцієнт тертя в опорних вузлах; d_{ψ} – діаметр

приводного валу, на яку насаджений підшипник: $d_y = 0,04$ мм.

Таким чином:

$$N = \left[\begin{array}{l} \left(\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1} \right)^2 + \right. \\ \left. \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right)^2 \right) \times \\ \left(\frac{\left(\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1} \right) \cdot \alpha_x \omega_2 \right)^2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} + \right. \\ \left. (\alpha_x \omega_2 \cos \omega_2 t - (k_x^2 - \omega_2^2) \sin \omega_2 t) \right) \\ \left(\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right) \cdot \alpha_z \omega_2}{(k_z^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} \cdot (k_z^2 - \omega_2^2) \cos \omega_2 t + \alpha_z \omega_2 \sin \omega_2 t \right) \right)^2 \times \gamma_{sp}^{-1} \\ 0,5 \cdot \mu \cdot d_y \cdot \omega_2^2 \cdot \left[\left(\frac{\left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1} \right)^2}{(k_x^2 - \omega_2^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} + \right. \right. \\ \left. \left. \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right)^2 \right) \right] \end{array} \right]$$

Навантаження на опорні вузли можна розрахувати, використовуючи припущення, що головною причиною даної дії є наявність у системі незрівноважених обертових мас [146-150], що є причиною виникнення незрівноваженої сили:

$$F_{н.зр.маx} = \sqrt{F_{н.зр.x.маx}^2 + F_{н.зр.z.маx}^2} \quad (5.69)$$

Зважаючи на використання поданої методики, шукані параметри набудуть

вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_{н.зр.x} = F_{н.зр.x} = m_{н.зр} \ddot{x} = (m_2 - m_4) \times \left[\frac{\omega_2 \cos(\omega_2 t) \cdot (\omega_2^2 - k_x^2) - \omega_2^3 \cdot \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} \right)}{(\omega_2^2 - k_x^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} + \frac{m_2 \cdot \omega_2^2 \cdot e + m_3 \cdot r \cdot \omega_2^2 - m_3 \cdot 2ku \cdot r_0 \cdot \omega_3^2 + m_4 \cdot \omega_2^2 \cdot l}{\cos(\omega_2 \cdot t)m_1} \cdot \alpha_x^2 \cdot \sin(\omega_2 t)}{(\omega_2^2 - k_x^2)^2 + \alpha_x^2 \omega_2^2} \right] \\ F_{н.зр.z} = m_{н.зр} \ddot{z} = (m_2 - m_4) \times \left[\frac{\omega_2^2 \alpha_z \cdot \cos(\omega_2 t) + \omega_2^2 \cdot \left(\frac{(m_2 + m_3)\omega_2^2 e - m_4 \omega_2^2 l}{m_1} - \frac{(m_1 + m_2 + m_3 + m_4)g}{\sin(\omega_2 \cdot t) \cdot m_1} \right) \cdot \alpha_z \cdot \sin(\omega_2 t) \cdot (\omega_2^2 - k_z^2)}{(\omega_2^2 - k_z^2)^2 + \alpha_z^2 \omega_2^2} \right] \end{array} \right. \quad (5.70)$$

5.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ

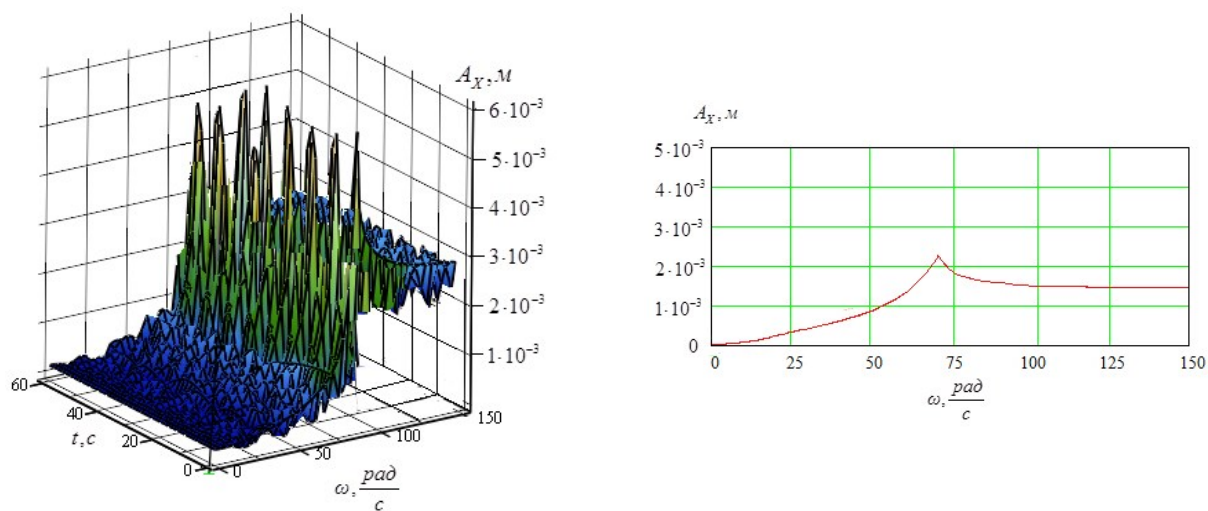
Для вирішення та аналізу отриманих рівнянь руху виконавчого органу вібродискової дробарки застосовувалось математичне середовище MathCatch (рис. 5.4-5.6). Використання даної програми дозволило визначити значення амплітудно-частотних та енергетичних характеристик залежно від кутової швидкості приводного вала неврівноважених мас в інтервалі реального часу для розробки умов роботи системи з мінімальними енерговитратами [151].

Для вирішення поставленої задачі прийнято базу даних, до якої внесено значення: діапазон кутової швидкості приводного вала $\omega_2 = 0 \dots 150$ рад/с, та інтервал фактора часу $t = 0 \dots 60$ с, а також значення прийнятих констант досліджуваної системи (табл. 5.1).

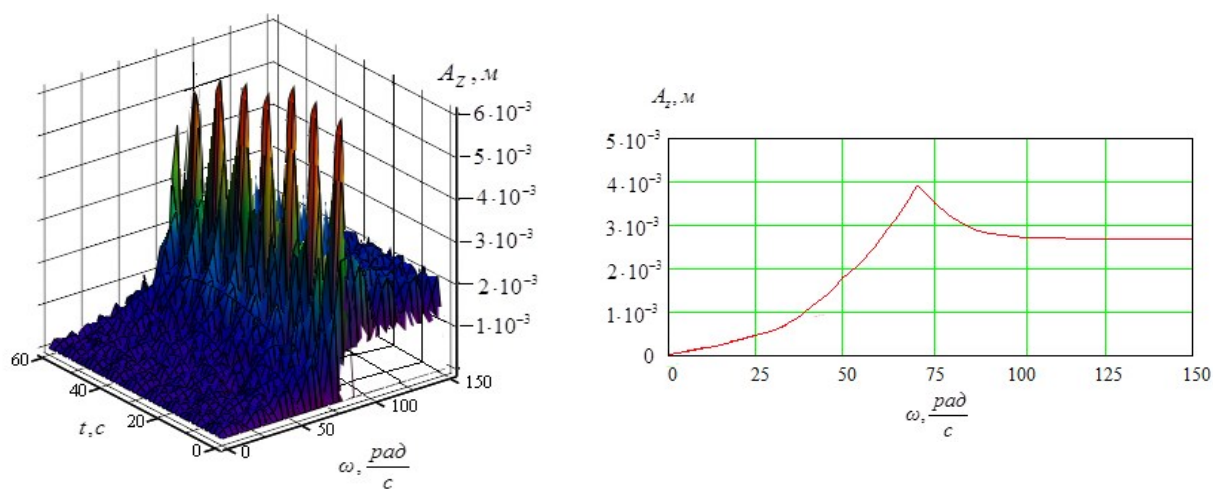
Таблиця 5.1

Чисельні значення основних констант прийнятих для досліджуваної системи

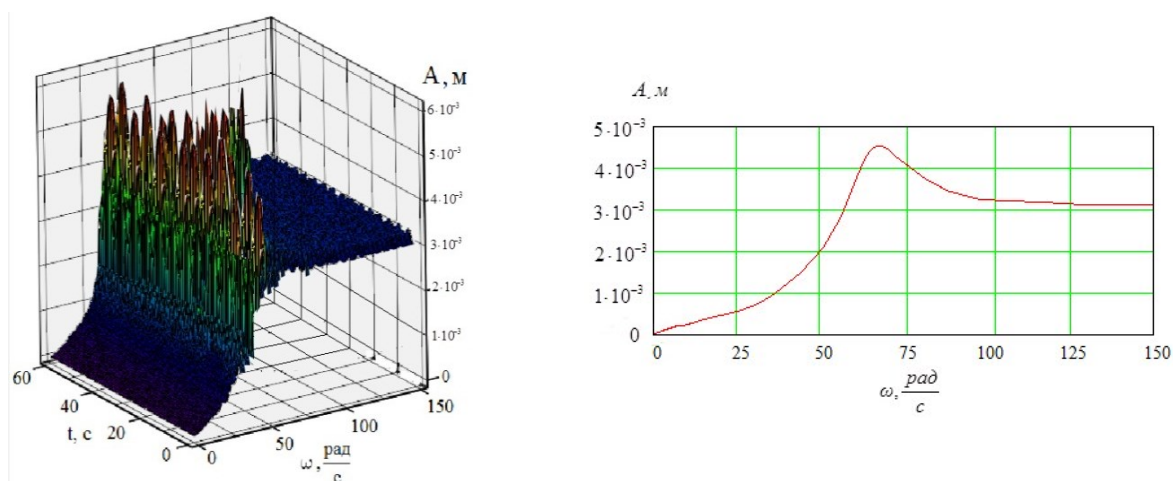
№ з/п	Показник	Тип вібраційного приводу
		Примусовий
1	2	3
1	Характерні маси системи, кг	83,2
1.1	Загальна рухома маса, m	
1.2	$m_1 = m_k + m_{зав} \cdot \mu + m_{o.p} + m_{n.в.}$	
1.3	$m_2 = m_{пр.в.} + m_{н.д} + m_e + m_{o.д} + m_{д.о} + m_m$	
1.4	$m_3 = m_{р.д}$	
1.5	$m_4 = m_\delta$	5,5
2	Характерні розміри елементів системи	
2.1	Відстань від осі обертання до центру мас ротора e , м	0,005
2.2	Радіус робочого диска r_δ , м	0,045
2.3	Радіус опорного диска $r_{o.д}$, м	0,14
2.4	Відстань від вершини робочого диска до осі обертання r , м	0,19
2.5	Відстань від осі обертання до центру мас противаги l , м	0,044
3	Жорсткість пружних елементів C , Н/м	
3.1	по осі OX : C_x	3900
3.2	по осі OZ : C_z	3900



а)

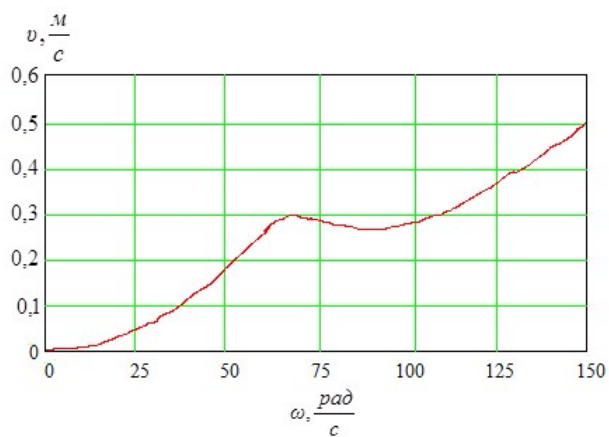
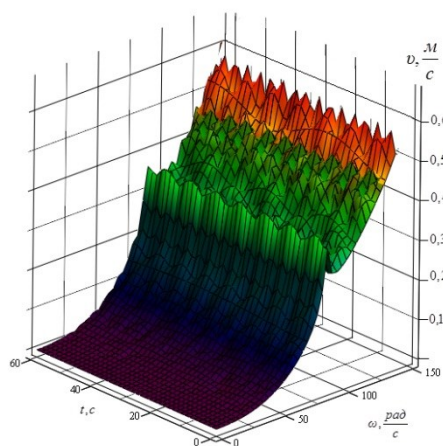


б)

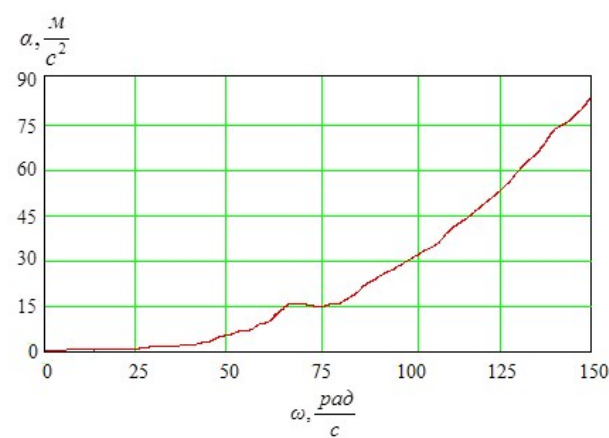
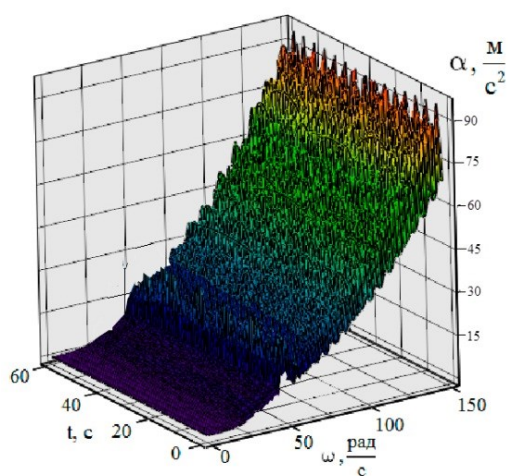


в)

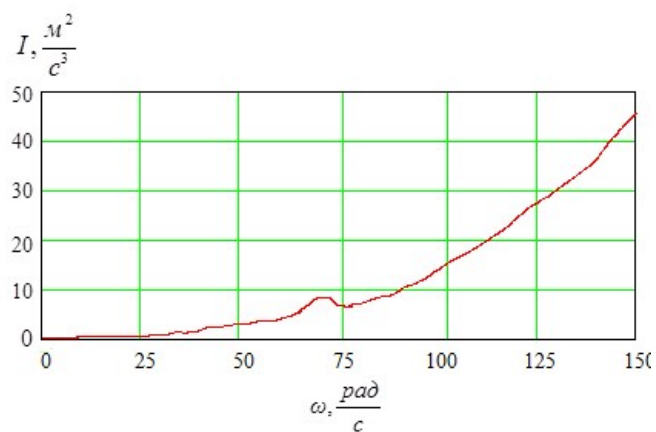
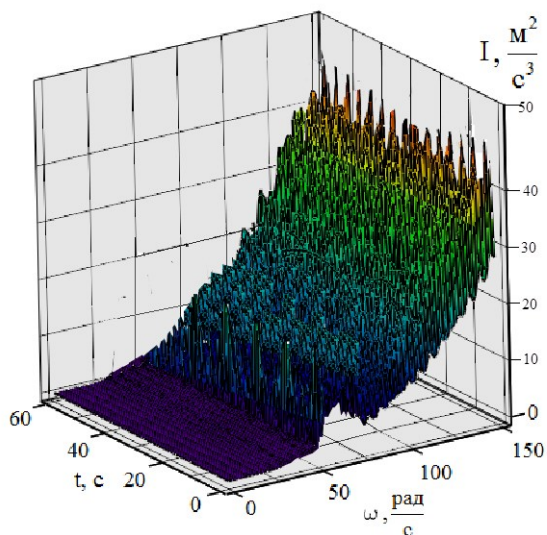
Рисунок 5.4. Амплітудно-частотні характеристики машини:
 а), б) – відповідні амплітудні складові по вісі координат Ox , Oz ; в) – загальна амплітуда коливань виконавчого органу



а)



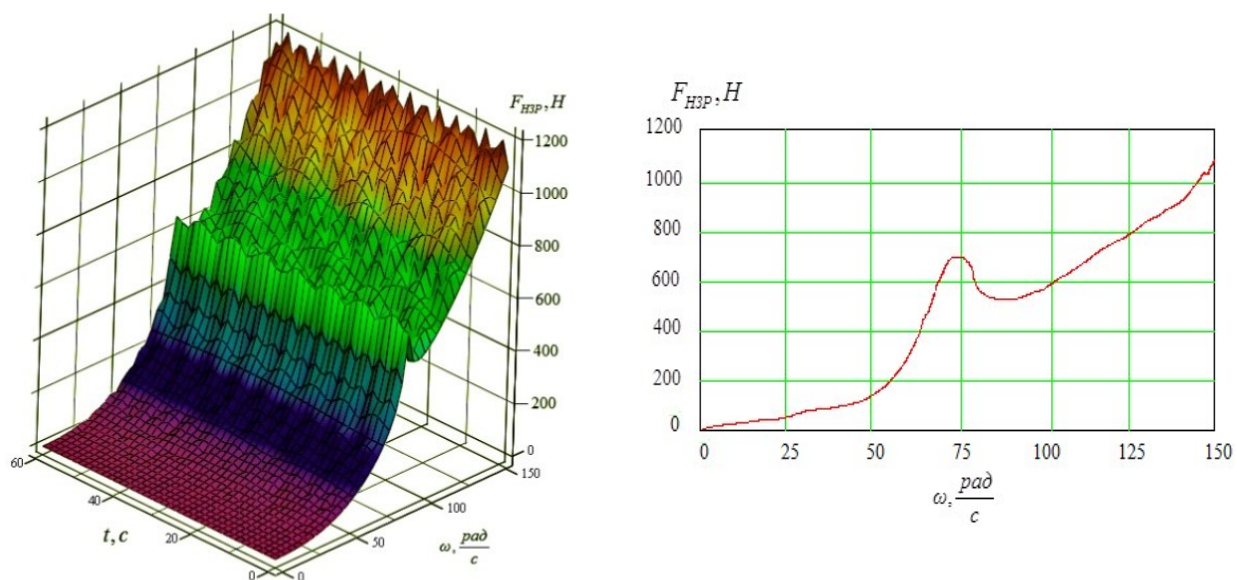
б)



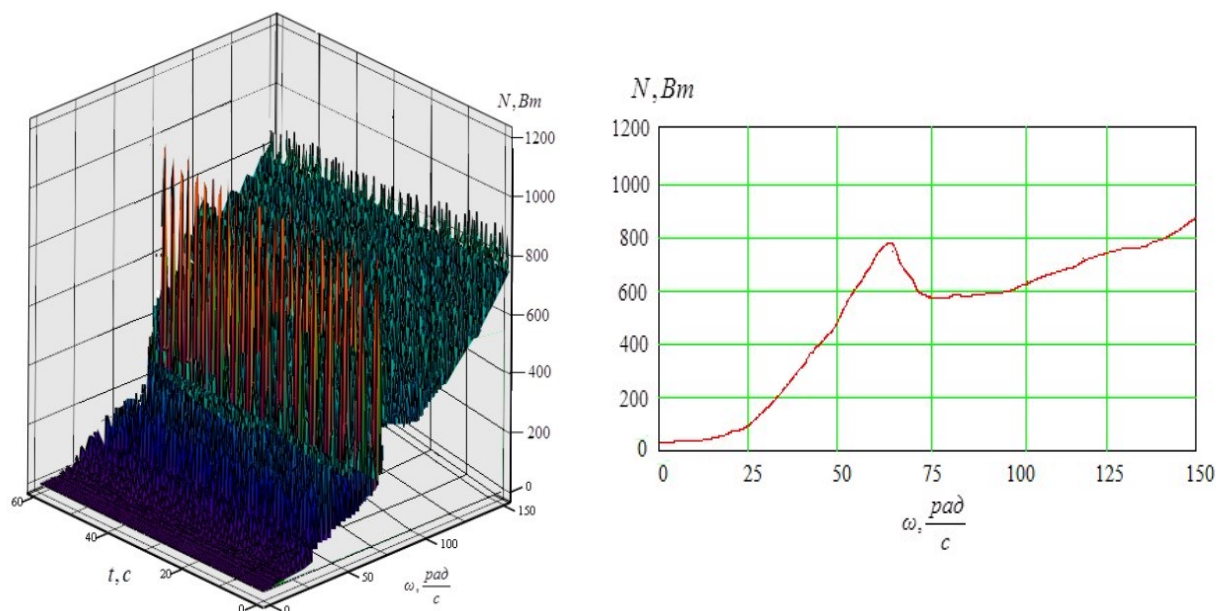
в)

Рисунок 5.5. Швидкісні характеристики вібровідцентрової машини:

а) – віброшвидкість; б) – віброприскорення; в) – віброінтенсивність



а)



б)

Рисунок 5.6. Енергетичні залежності досліджуваної вібр машини:
 а) – навантаження на опорні вузли приводного вала; б) – споживана потужність на приводному валу

При обчисленні використовували рівняння (5.58) і (5.62), які після математичного розв'язку були внесені в тіло програми MathCad для автоматизованого виявлення параметрів роботи.

Теоретичний аналіз представлених диференціальних рівнянь руху

виконавчого органу розробленої вібродискової дробарки, що під час його роботи, без подачі матеріалу, спостерігається резонансний режим по осі OZ до $A_z=3,9$ мм, по осі OX – $A_x= 2,25$ мм при кутовій швидкості приводного валу 70 рад/с. Як результат, пікові значення сумарної амплітуди коливань спостерігаються при 70 рад/с і становлять $A=4,5$ мм.

Аналізуючи графічну залежність віброшвидкості від кутової швидкості приводного валу в резонансному режимі роботи спостерігаються значення до 0,3 м/с при 71 рад/с, пікові значення набувають у зарезонансному режимі при 150 рад/с, та становлять 0,5 м/с. Розглядаючи графічну залежність віброприскорення від кутової швидкості, максимальне значення 82 м/с² спостерігається при 150 рад/с [150].

Аналіз згаданих характеристик розробленої машини дозволив теоретично визначити робочі параметри вібродискової дробарки, що відповідають значенням $A=3...3,1$ мм, $\omega=100...115$ рад/с, при чому споживана потужність становить $N=650...750$ Вт, навантаження на опорні вузли приводного валу $F = 600...650$ Н [142-149].

5.3. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИПКОГО СЕРЕДОВИЩА

У моделюванні енергонасичених механічних процесів, зокрема для операції подрібнення, необхідно враховувати структурно-механічні властивості продукту, здатність його до деформування за різних режимів взаємодії з виконавчим органом технологічної машини.

Зерновий атеріал, що використовується при виробництві концентрованих кормів можна представити у вигляді пружно-в'язко-пластичного, колоїдного, капілярно-пористоготіла, що має білковий каркас, крохмальний наповнювач і целюлозну оболонку, то в якості його найбільш прийнятної реологічної моделі широкого спектру дії може бути прийнята шестиелементна модель, наведена на рис. 5.7.

Запропонована реологічна модель являє собою послідовне з'єднання

моделі ідеального тіла Максвелла (описує еластичну оболонку зерна, що містить зв'язану вологу), тіла що являє собою паралельне з'єднання моделі ідеально-пружного тіла Гука з моделлю ідеальнопластичного тіла Сен-Венана (описує поведінку мучнистого ендосперму, що містить пружно-пластичний крохмальний наповнювач) і моделі тіла Кельвіна (описує поведінку пружного зародка, що містить молекулярну вологу).

Для математичного опису поведінки запропонованої реологічної моделі зерна (рис. 5.8) під впливом прикладеного зусилля F розглянемо окремо кожне з трьох вище перерахованих тіл: M , $HStV$ і K . Тіло Максвелла (M) (рис. 5.9) являє собою послідовне з'єднання ідеально-пружного тіла Гука (H) з ідеально-в'язкою рідиною Ньютона (N).

Так як всебічний рівномірний тиск в кожному матеріалі, незалежно від його реологічних властивостей, викликає пружну деформацію, що супроводжується виникненням дотичних напружень, то в кожному з цих трьох тіл (M , $HStV$ і K), під впливом прикладеного зусилля, будуть виникати однакові дотичні напруги τ [150-156].

На підставі вищесказаного, під дією прикладеного зусилля F , виникає дотичне напруження τ , яке для кожного елемента M – тіла однакове:

$$\tau_1 = \tau_2 = \tau, \quad (5.71)$$

а деформація γ , яка відбувається в M – тілі, дорівнює сумі деформацій кожного його елемента:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (5.72)$$

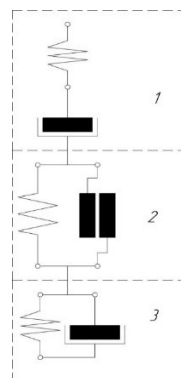


Рисунок 5.7. Реологічна модель зернини: 1 – оболонка; 2 – ендосперм; 3 – зародок.

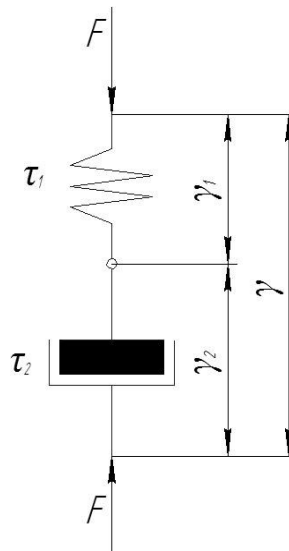


Рисунок 5.8. Реологічна модель оболонки зернини

Дотичне напруження τ , що виникає в Н- тілі, може бути визначене згідно закону Гука за формулою:

$$\tau = \mu \cdot \gamma_1, \quad (5.73)$$

звідки може бути знайдена деформація, яка відбувається в Н – тілі:

$$\gamma_1 = \frac{\tau}{\mu}, \quad (5.74)$$

де: μ – модуль зсуву.

Продиференціювавши рівняння (5.74), одержимо рівняння швидкості деформації, яка відбувається в Н – тілі:

$$\frac{d\gamma_1}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (5.75)$$

Дотичне напруження τ , що виникає в N – тілі, може бути визначено за формулою:

$$\tau = \eta \cdot \frac{d\gamma_2}{dt}, \quad (5.76)$$

звідки отримуємо рівняння швидкості деформації що відбувається в – тілі:

$$\frac{d\gamma_2}{dt} = \frac{\tau}{\eta}, \quad (5.77)$$

де: η – коефіцієнт в'язкості.

Продиференціювавши рівняння (5.72), одержимо рівняння швидкості

деформації, яка відбувається у М – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt}. \quad (5.78)$$

Підставивши рівняння (5.75) і (5.77) в рівняння (5.78), остаточно отримаємо рівняння швидкості деформації, яка відбувається у М – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}. \quad (5.79)$$

HStV – тіло (рис. 5.9) являє собою паралельне з'єднання ідеально-пружного тіла Гука (H) з ідеально-пластичним тілом Сен-Венана (StV).

Так як при паралельному з'єднанні елементів загальна напруга на моделі дорівнює сумі напруг на кожному елементі, то дотичне напруження, τ що виникає в HStV – тілі, може бути визначене:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.80)$$

Дотичне напруження τ_1 , що виникає в H – тілі:

$$\tau_1 = \mu \cdot \gamma_1, \quad (5.81)$$

де: μ – модуль зсуву; γ_1 – деформація, яка відбувається в H – тілі.

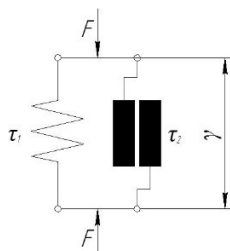


Рисунок 5.9. Реологічна модель ендосперма зернини

Дотичне напруження τ_2 , що виникає в StV – тілі становить:

$$\tau_2 = \tau_T, \quad (5.82)$$

τ_T – межа текучості при зсуві.

Підставивши рівняння (5.81) і (5.82) в рівняння (5.80) отримаємо:

$$\tau = \mu \cdot \gamma_1 + \tau_T, \quad (5.83)$$

Так як при паралельному з'єднанні елементів загальна деформація моделі γ дорівнює деформації кожного елемента:

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma, \quad (5.84)$$

то рівняння деформації, яка відбувається у HStV – тілі, може бути виражене з рівняння (5.83):

$$\gamma = \frac{\tau - \tau_T}{\mu}. \quad (5.85)$$

Продиференціювавши рівняння (5.85), одержимо рівняння швидкості деформації, яка відбувається у HStV – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{d\tau}{dt} - \frac{d\tau_T}{dt} \right). \quad (5.86)$$

Так як межа текучості при зсуві є постійною величиною $\tau_T = \text{const}$, то рівняння (5.86) прийме вигляд:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (5.87)$$

Тіло Кельвіна-Фойгта (К) (рис. 5.10) являє собою паралельне з'єднання ідеально-пружного тіла Гука (Н) з ідеально-в'язкою рідиною Ньютона (N).

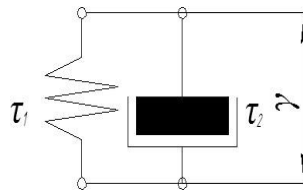


Рисунок 5.10. Реологічна модель зародка зернини

Дотичне напруження τ , що виникає в К– тілі, може бути знайдено за формулою:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2. \quad (5.88)$$

Згідно закону Гука, дотичне напруження τ_1 , що виникає в Н– тілі:

$$\tau_1 = \mu \cdot \gamma_1, \quad (5.89)$$

де: μ –модуль зсуву, γ_1 – деформація, яка відбувається в Н – тілі.

Дотичне напруження τ_2 , що виникає в N – тілі:

$$\tau_2 = \eta \cdot \frac{d\gamma_2}{dt}, \quad (5.90)$$

де: η –коефіцієнт в'язкостіпри зсуві.

Підставивши рівняння (5.89) і (5.90) в рівняння (5.88), отримаємо:

$$\tau = \mu \cdot \gamma_1 + \eta \cdot \frac{d\gamma_2}{dt}. \quad (5.91)$$

Продиференціювавши рівняння (21), отримаємо:

$$\frac{d\tau}{dt} = \mu \cdot \frac{d\gamma_1}{dt} + \eta \cdot \frac{d^2\gamma_2}{dt^2}, \quad (5.92)$$

звідки:

$$\frac{\eta}{\mu} \cdot \frac{d^2\gamma_2}{dt^2} + \frac{d\gamma_1}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (5.93)$$

Загальна деформація моделі γ :

$$\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma. \quad (5.94)$$

Тоді рівняння (5.93) набуде вигляду:

$$\frac{\eta}{\mu} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt}. \quad (5.95)$$

Звідки може бути отримано рівняння швидкості деформації, яка відбувається у К – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} - \frac{\eta}{\mu} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2}, \quad (5.96)$$

або:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \left(\frac{d\tau}{dt} - \eta \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} \right). \quad (5.97)$$

Далі розглянемо послідовне з'єднання М і HStV тіл, при якому деформації, що в них відбуваються – додаються:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (5.98)$$

Продиференціювавши рівняння (5.98), одержимо рівняння швидкості деформації, що відбувається у М-HStV – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt}. \quad (5.99)$$

Підставивши в рівняння (5.99) рівняння швидкості деформації, яка відбувається у М – тілі (5.79), і рівняння швидкості деформації, яка відбувається у HStV – тілі (5.87), остаточно отримаємо рівняння швидкості деформації, яка

відбувається у М-НStV – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{d\tau}{dt}, \quad (5.100)$$

або:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}. \quad (5.101)$$

Послідовне з'єднання М-НStV і К тіл дозволить побудувати запропоновану реологічну модель зерна (Рис. 5.7). Враховуючи вищесказане, знайдемо деформацію, що виникає даному при послідовному з'єднанні:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2. \quad (5.102)$$

Продиференціювавши рівняння (5.102), одержимо рівняння швидкості деформації, яка відбувається у М-НStV-К – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt}. \quad (5.103)$$

Підставивши в рівняння (5.103), рівняння швидкості деформації, яка відбувається у М-НStV – тілі (5.101), і рівняння (5.97), остаточно отримаємо рівняння швидкості деформації відбувається у М-НStV-К – тілі:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta_1} + \frac{1}{\mu_3} \cdot \left(\frac{d\tau}{dt} - \eta_2 \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} \right), \quad (5.104)$$

звідки:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta_1} + \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{d\tau}{dt} - \frac{\eta_2}{\mu_3} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2}, \quad (5.105)$$

або:

$$\frac{\eta_2}{\mu_3} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu_1} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu_2} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu_3} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta_1}. \quad (5.106)$$

Оскільки пропонується реологічна модель (рис. 5.7) структурно складається з трьох складних тіл (М, НStV і К), але математично описує одне тіло – зерно, то коефіцієнти пружності та в'язкості цих тіл можуть бути прийняті рівними:

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu, \quad (5.107)$$

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta. \quad (5.108)$$

Тоді рівняння (5.106) набуде вигляду:

$$\frac{\eta}{\mu} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{1}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}, \quad (5.109)$$

звідки:

$$\frac{\eta}{\mu} \cdot \frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{d\gamma}{dt} = \frac{3}{\mu} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}. \quad (5.110)$$

Розділивши ліву і праву частини рівняння (5.110) на $\frac{\eta}{\mu}$, отримаємо:

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} + \frac{\mu}{\eta} \cdot \frac{d\gamma}{dt} = \frac{3}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu \cdot \tau}{\eta^2}. \quad (5.111)$$

Отриманий вираз є диференціальним рівнянням другого порядку. Для його вирішення застосуємо метод пониження порядку похідною за допомогою переходу. Для цього позначимо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = z(t), \quad (5.112)$$

$$\frac{d^2\gamma}{dt^2} = \frac{dz}{dt}. \quad (5.113)$$

Тоді рівняння (5.111) можна записати у вигляді диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{dz}{dt} + \frac{\mu}{\eta} \cdot z = \frac{3}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu \cdot \tau}{\eta^2}. \quad (5.114)$$

Вирішенням цього диференціального рівняння буде вираз виду:

$$z = e^{-\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} \left[\int_0^t \left(\frac{3}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu \cdot \tau}{\eta^2} \right) \cdot e^{\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} dt + C_0 \right]. \quad (5.115)$$

Так як на початку процесу руйнування зерна ударним різанням воно знаходиться в ненапруженому стані, то довільна постійна $C_0 = 0$:

$$z = e^{-\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} \left[\int_0^t \left(\frac{3}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu \cdot \tau}{\eta^2} \right) \cdot e^{\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} dt \right]. \quad (5.116)$$

Процес руйнування зерна ударним різанням складається з трьох послідовних фаз. Перша фаза полягає в контакті зерна лезом, в результаті чого в

ньому виникає напруження стиснення, що характеризується величиною його деформації. Друга фаза настає, коли напруження стиснення досягає деякої граничної величини, обумовленої міцністю зерна, і проявляється в утворенні в ньому тріщини. Третя фаза полягає в кінцевому руйнуванні цілісної структури [157].

Оскільки зернина являє собою агрегат окремих тіл неоднорідної будови, з яких одні мають меншу межу текучості, ніж інші. За умови прикладання до тіла деякого зусилля F , одні його частини піддаються тільки пружним деформаціям, а інші починають текти, з перебігом вони поступово звільняються від напруги і вона починає розподілятися на більш пружні частини зерна, отже, напруга на ці частини зростає, а деформація поступово збільшується [186-189].

Після зворотного переходу згідно рівняння (5.112, 5.113) отримаємо:

$$\frac{d\gamma}{dt} = e^{-\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} \left[\int_0^t \left(\frac{3}{\eta} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\mu \cdot \tau}{\eta^2} \right) \cdot e^{\int_0^t \frac{\mu}{\eta} dt} dt \right]. \quad (5.117)$$

Проінтегрувавши рівняння (5.117), остаточно отримаємо рівняння для визначення величини деформації, що відбувається у М-НStV-К тілі:

$$\gamma = \left[\tau \left(\frac{e^{-\frac{2\mu \cdot t}{\eta}} - 1}{2\mu} - \frac{e^{-\frac{\mu \cdot t}{\eta}} - 1}{\mu} \right) \right]^{\frac{\mu \cdot t}{\eta}} \quad (5.118)$$

На структурно-механічні властивості матеріалу в певній мірі впливає вологість. У таблиці 5.2 наведені значення реологічних коефіцієнтів для обраного матеріалу в залежності від вологості [190].

Таблиця 5.2

Значення реологічних коефіцієнтів

Відносна вологість W , %	13-14	16-17	19-20	22-23	25-26
Модуль зсуву, μ (МПа)	8,61	5,07	3,05	2,43	2,25
Коефіцієнт в'язкості, η (МПа·с)	29,68	20,22	14,22	11,51	10,87
Межа міцності, $\tau_{гр.}$ (МПа)	2,9	1,75	1,035	0,875	0,825

Абсолютна деформація, яка відбувається в зерні під дією прикладеного зусилля, може бути знайдена за формулою:

$$\Delta h = \gamma \cdot b, \quad (5.119)$$

де: Δh – абсолютна деформація зерна під дією прикладеного зусилля, м; γ – відносна деформація; b – товщина зерна, м.

Теоретично робота руйнування одного зерна в умовах ударно-різального навантаження може бути знайдена за формулою:

$$A^T = F \cdot \Delta h = F \cdot \gamma \cdot b. \quad (5.120)$$

де: F – зусилля, прикладене до зерна, Н.

Нормальні напруження, що виникають в зерні під дією прикладеного зусилля, можуть бути знайдені за формулою:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (5.121)$$

де A – площа поперечного перерізу зерна, м².

Тоді:

$$F = \sigma \cdot A, \quad (5.122)$$

Враховуючи, що відповідно до III теорії міцності при одновісному навантаженні:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}, \quad (5.123)$$

$$\sigma = 2\tau_{\max}. \quad (5.124)$$

Підставивши рівняння (5.118) і (5.124) в (5.120) отримаємо:

$$A^T = 2\tau_{\max} \cdot S_o \cdot \left[\tau_{\max} \cdot \left(\frac{e^{\frac{2\mu t}{\eta}} - 1}{2\mu} - \frac{e^{\frac{\mu t}{\eta}} - 1}{\mu} \right) \right]^{\frac{\mu t}{\eta}} \cdot b. \quad (5.125)$$

Аналіз графічної залежності 5.11 дозволяє зробити висновок, що збільшення прикладеного зусилля, та як наслідок напружень зсуву в зерні, призводить до нелінійного зростання його відносною деформації.

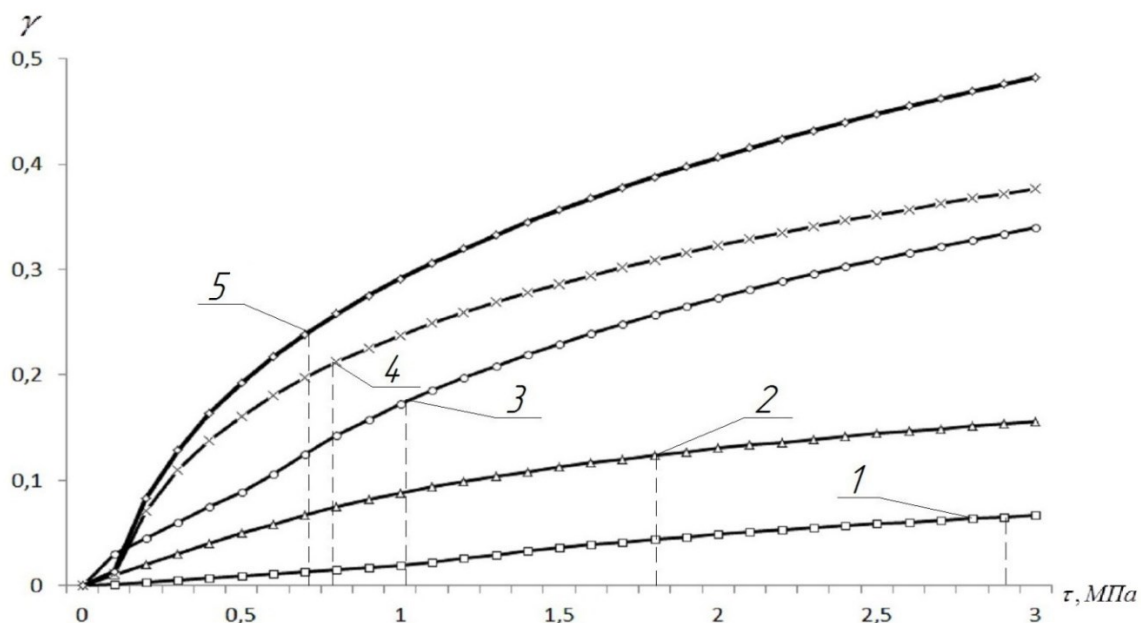


Рисунок 5.11. Залежність відносної деформації зернини від дотичних напружень при відносній вологості: 1. $W=13-14\%$; 2. $W=16-17\%$; 3. $W=19-20\%$; 4. $W=22-23\%$; 5. $W=25-26\%$

На початковому етапі прикладання зусилля до зернини, в матеріалі виникають переважно пружні деформації, про що свідчить характерна форма кривої. Так, для зерна відносної вологості $W=25-26\%$ в межах напружень $0 \dots 0,19$ МПа, спостерігається стрімке зростання відносної деформації до $0,08$. При подальшому зростанні $\tau 0,19 \dots 0,825$ МПа форма деформаційної кривої дещо змінюється та набуває вигляду вітки параболи, що свідчить про переважаючі пластичні деформації, які відбуваються в зернині, аж до його руйнування при $0,825$ МПа та деформації $0,24$.

При руйнуванні зернини вологістю $13-14\%$ (рис. 5.12) теоретична робота руйнування включає в себе роботу на подолання пружних та пластичних деформацій та становить $0,09$ Дж, зі збільшенням вологості до $25-26\%$ цей показник становить $0,195$ Дж.

Узагальнення даних висновків дозволять оцінити величини пластичних та пружних абсолютних деформацій в матеріалі при дослідженні кінетики подрібнення.

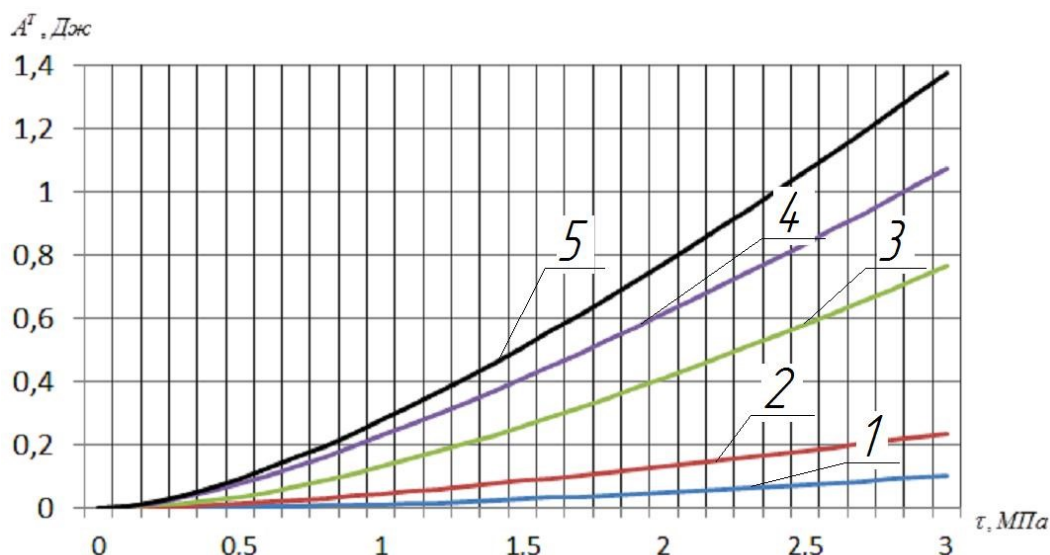


Рисунок 5.12. Залежність теоретичної роботи руйнування зернини від нормальних напружень при відносній вологості: 1. $W=13-14\%$; 2. $W=16-17\%$; 3. $W=19-20\%$; 4. $W=22-23\%$; 5. $W=25-26\%$

5.4. ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ПРОЦЕСУ РУЙНУВАННЯ

Залежність між дисперсністю подрібнювальних твердих тіл і затратами енергії на процес подрібнення прийнято називати законом подрібнення. В даний час відомо декілька таких експериментально знайдених законів, кожний із яких справедливий тільки в області достатньо грубої дисперсії.

Як було показано Чарльзом, багато із них можуть бути формально виражені наступним емпірично встановленим співвідношенням:

$$d\varepsilon = -C'' dX / X^m = C' dS / S^{2-m}, \quad (5.127)$$

де ε – енергія, що передається одиниці об'єму тіла, що руйнується, X – середній розмір зерен, m^2 ; S – питома поверхня, m^{-1} ; C'' , C' та m – емпірично підібрані константи.

Проінтегрувавши співвідношення (5.127) при $m=1$ отримаємо вираз:

$$\varepsilon = C' \ln(S / S_0), \quad (5.128)$$

де S_0 – питома поверхня твердого тіла до його подрібнення. Цей вираз представляє собою відомий закон Кірпічова-Кіка, отриманий при додатковому припущенні про незалежність спектра уламківдроблення від розміру частин

[156].

Крім того, закон Кірпічова-Кіка отримують із теорії пружності, відповідно до якої для руйнування тіла об'ємом V необхідно затратити енергію рівну:

$$U_0 = \frac{\sigma_0^2}{2E} V = eV, \quad (5.129)$$

де σ_0 – межа міцності, Па; E – модуль Юнга, Па; V – об'єм матеріалу, м³.

При досягненні гранично напруженого стану шляхом стиснення, геометрично подібні тіла незалежно від їх розміру розколюються подібно один одному. При цьому, знову утворена поверхня та середній розмір частинок визначається розмірами тіла X і рівні відповідно $\alpha_1 X$ та $\alpha_2 X^2$, де α_1 та α_2 – постійні, що не залежать від розмірів тіла, що руйнується. Якщо тілу передається енергія $U'_0 > U_0$, то це призводить до збільшення цих коефіцієнтів, які при постійній щільності енергії $e = U_0 / V$ залишаються постійними [156].

По теорії пружності, при $\sigma < \sigma_0$ руйнування тіла не відбувається, і після розвантаження вся отримана ним енергія розсіюється. Однак відомо, що навіть незначна періодична механічна дія призводить до утворення втомлюванісних тріщин, в результаті чого тверді тіла руйнуються при $\sigma < \sigma_0$. Затрати енергії на втомлювалісний процес подрібнення тим більші, ніж більша величина різниці $\sigma_0 - \sigma$, та визначається числом циклів що передують руйнуванню [157]. Базуючись на цьому, припустимо, що кількість енергії, яка необхідна для руйнування твердого тіла розміром X на частини, сумарна поверхня яких рівна $\alpha_2 X^2$, та завжди визначається постійною величиною щільності енергії, що необхідна для крихкого руйнування.

Розглянемо, на основі вищесказаного, подрібнення частинки, об'єм якої V становить bX_0^3 . Для спрощення будемо вважати, що в кожному акті руйнування із кожної частинки утворюється n^3 однакових відповідно значно менших частинок. Кожна із цих частинок подрібнюється незалежно від других також на n^3 частин. Лінійний розмір частинок після першого акту рівний X_0 / n , після другого X_0 / n^2 , після i -го X_0 / n^i . Оскільки число частинок рівне n^{3i} , то поверхня

таких частинок після i -го акта з врахуванням фактора форми поверхні α_2 рівна:

$$s = \alpha_2 (X_0 / n^i)^2 n^{3i} = \alpha_2 X_0^2 n^i. \quad (5.130)$$

Так як об'єм твердого матеріалу в процесі подрібнення не змінюється, впродовж всіх іактів руйнування затрачається робота, яка із врахуванням об'ємного фактора форми рівна:

$$U = beX_0^3 i; i = U / eV = \varepsilon / e. \quad (5.131)$$

Визначаючи із виразу (5.131) кількість циклів через величину затраченої енергії і підставляючи в (5.130), отримаємо:

$$s = \alpha_2 X_0^2 n^{U/eV} = s_0 n^{\varepsilon/e}. \quad (5.132)$$

Оскільки в (5.132) $n^{\varepsilon/e}$ не залежить від розмірів частинок, після усереднення по всьому спектру розмірів початкових частинок і ділення обох частин (5.132) на об'єм подрібнювального твердого тіла отримаємо:

$$S = S_0 \exp(\varepsilon / e \ln n), \quad (5.133)$$

де S – питома поверхня матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

Дискретний характер процесу руйнування твердих тіл не дозволяє записати рівняння подрібнення монодисперсних частин в диференціальній формі. Проте для подрібнення множинної сукупності частин, розміри яких представляють собою майже безперервний спектр, такий запис цілком можливий. Розглянемо процес руйнування двох частинок з розміром X та $X + \Delta X$, які відрізняються на деяку малу величину ΔX . З точністю до 2-го порядку затрати енергії на руйнування цих частинок рівні відповідно:

$$U_1 = beX^3, U_2 = be(X^3 + 3X^2 \Delta X),$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = 3beX^2 \Delta X, \Delta \varepsilon = \Delta U / bX^3 = 3e \Delta X / X. \quad (5.134)$$

В результаті однократного руйнування кожної частинки сумарна (знову утворена) поверхня їх уламків стає рівною:

$$\Delta s_1 = \alpha_2 X^2, \Delta s_2 = \alpha_2 (X^2 + 2X \Delta X),$$

$$\Delta s = \Delta s_2 - \Delta s_1 = 2\alpha_2 X \Delta X, \Delta S = \frac{\Delta s}{bX^3} = \frac{2\alpha_2}{b} \frac{\Delta X}{X^2}. \quad (5.135)$$

Різниці енергій ΔU відповідає приріст поверхні Δs . Розділивши (5.134) на

(5.135), отримаємо рівняння для затрат енергії в залежності від розмірів частин і приросту поверхні:

$$dU / ds = \Delta U / \Delta s = 3beX / 2\alpha_2. \quad (5.136)$$

Усереднюючи (5.136) по всьому спектру розмірів частинок та враховуючи, що $dU = Vd\varepsilon$; $ds = VdS$; (S – питома поверхня, рівна $6/X$), отримаємо рівняння подрібнення, яке запишемо у вигляді:

$$d\varepsilon = \frac{9be}{a_2} \frac{dS}{S}. \quad (5.137)$$

Робота сил тертя, тобто робота поверхневої деформації та руйнування, енергія пластичних деформацій і робота на утворення та руйнування агрегатів залежать від дисперсності матеріалу. Можна вважати, що при постійному тиску створеному в дробарці, робота, що витрачається на тертя пропорційна новоутвореній поверхні. Енергія, що затрачається на пластичні деформації, в першому наближенні також пропорційна поверхні.

На основі вищесказаного виведемо рівняння, що зв'яже затрати енергії на подрібнення та дисперсності матеріалу, із врахуванням затрат енергії на пластичні деформації в поверхневих шарах та інші втрати, що зростають пропорційно збільшенню питомої поверхні. Товщину шарів, в яких відбуваються поверхневі деформації, будемо вважати постійною величиною ($l = const$), що не залежить від крупності частинок. Будемо також вважати масштабне зміцнення при подрібненні, як таке, яким можна знехтувати.

В кожному окремому акті руйнування затрати енергії на пластичні деформації визначаються об'ємом області деформації, який для частинок будь-якої форми прийmemo рівним:

$$n^3 b [X_1^3 - (X_1 - 2l)^3] = b \left[X^3 - \left(X - \frac{2l}{\alpha_1} \right)^3 \right], \quad (5.138)$$

де $X_1 = \alpha_1 X$ – середній розмір уламків руйнування, m^2 ; b – об'ємний фактор форми, n^3 – середня кількість осколків, рівна $1/\alpha_1^3$.

Розглянемо тепер процес руйнування деякої твердої частинки розміром X

із врахуванням втрат енергії на необоротні деформації та ефекти на її поверхні.

Для руйнування частинок необхідно передати їм енергію:

$$U = b \left\{ eX^2 + \beta \left[X^3 - (X - l_1)^3 \right] \right\} + (\chi + \alpha_2 \sigma_{II}) X^2, \quad (5.139)$$

де β – щільність енергії пластичних деформацій, що передують руйнуванню, Дж/м³; $l_1 = 2l / \alpha_1$, мм; χ – поверхнева щільність роботи сил тертя та енергії утворення і руйнування агрегатів; σ_{II} – вільна поверхнева енергія, Дж/м². Для частинки розмірів $X - \Delta X$ аналогічні затрати енергії становлять:

$$U + \Delta U = b \left\{ e(X + \Delta X)^2 + \beta \left[(X + \Delta X)^3 - (X + \Delta X - l_1)^3 \right] \right\} + (\chi + \alpha_2 \sigma_{II})(X + \Delta X)^2. \quad (5.140)$$

Віднімаючи (5.139) із (5.140) та враховуючи приріст поверхні при руйнуванні $ds = 2\alpha_2 X \Delta X$ з точністю до малих 2-го порядку, отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{ds} = \frac{b}{2\alpha_2 X dX} & \left\{ \begin{aligned} & eX^3 + 3eX^2 dX + \beta \left[\begin{aligned} & X^3 + 3X^2 dX - (X - l_1)^3 \\ & - 3(X - l_1)^2 dX \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\} + \\ & \left\{ \begin{aligned} & -eX^2 - \beta \left[X^3 - (X - l_1)^3 \right] \end{aligned} \right\} \\ & + \frac{2X(\chi + \alpha_2 \sigma_{II}) dX}{2\alpha_2 X dX} = \frac{3be}{2\alpha_2} X + \frac{3b\beta}{2\alpha_2} \left[X - \frac{(X - l_1)^2}{X} + \frac{\chi}{2\alpha_2} + \sigma_{II} \right]. \end{aligned} \quad (5.141)$$

Враховуючи, як і раніше, що $dU / ds = d\varepsilon / dS$, $X = 6/S$, отримаємо рівняння для затрат енергії на подрібнення:

$$d\varepsilon = \frac{9be}{\alpha_2} \frac{dS}{S} + \frac{3b\beta}{2\alpha_2} \left(2l_1 - \frac{l_1^2 S}{6} \right) dS + \left(\frac{\chi}{\alpha_2} + \sigma_{II} \right) dS,$$

або

$$d\varepsilon = \frac{9be}{\alpha_2} \frac{dS}{S} + \left(\frac{3b\beta l_1 + \chi}{\alpha_2} + \sigma_{II} \right) dS - \frac{b\beta l_1^2}{4\alpha_2} S dS. \quad (5.142)$$

В рівнянні (5.142) перший член являє собою затрати енергії на об'ємну деформацію твердого тіла відповідності до закону Кірпічова-Кіка, другий – на непружні деформації, роботу сил тертя та створення нових поверхонь, третій враховує зміну об'єму області пластичних деформацій в зв'язку із зміною розміру частин.

Густина витрат енергії, необхідної для руйнування частинки наближено рівна:

$$\left[(\alpha_2 \beta l^2 + \alpha_2^2 \sigma_{II} + \chi) X^2 + b e X^3 \right] / b X^3 = e + [\alpha_2 (\beta l + \sigma_{II}) + \chi] / b X,$$

при достатньо малому X зростає значно швидко зі зменшенням X (при $X > l$).

Разом з тим густина енергії, яку подрібнювач передає матеріалу в одиничному акті руйнування, визначається конструкцією останнього і в кожному конкретному випадку обмежена.

Максимальна кількість механічної енергії, що отримує частинка в кожному акті, визначимо рівним $\varepsilon_m V_m$. Частина цієї енергії W витрачається на пластичні деформації та інші втрати. Якщо при цьому $\varepsilon_m V_m \leq W + \sigma_0^2 V_m / 2E$, то подрібнення матеріалу, об'єм якого менший V_m , може проходити тільки шляхом «втоми», що призводить до різкого зростання затрат енергії на даний процес. Тому у якості першого припущення будемо вважати, що частинки об'ємом $V < V_m$ взагалі не подрібнюються. Таких частинок, що отримують енергію, але практично не подрібнюються, зі збільшенням дисперсності накопичується все більше, що призводить до сповільнення всього процесу.

Враховуючи вищесказане, порахуємо затрати енергії, які призводять безпосередньо до руйнування частинок. При цьому, будемо вважати затрати енергії на граничні деформації та різні втрати однаковими для всіх частинок, розміри яких більші X_m – мінімального розміру подрібнюваної частинки. Частинки розміром $X \leq X_m$ або розсіюють всю підведену до них енергію, або частково ця енергія витрачається на пластичні деформації, що призводять до зміни структури твердого тіла. Із врахуванням «баластних» частинок, розміром $X \leq X_m$ із загальних затрат, рівних $V_0 d\varepsilon$ де V_0 – сумарний об'єм частинок. Кількість енергії, що витрачається безпосередньо на подрібнення, в результаті якого поверхня збільшується на ds , становить:

$$dW = \left[\sum_X V_i - \sum_{X < X_m} V_i \right] d\varepsilon = d\varepsilon V (1 - V_{0m} / V_0), \quad (5.143)$$

де V_{0m} – сумарний об'єм частинок, розміри яких $X \leq X_m$, значення V_{0m} / V_0

рівне нулю на початку подрібнення, та близьке 1 при тривалому подрібненні. Враховуючи, що співвідношення S/S_m , де S_m – питома поверхня гранично подрібненого матеріалу із розмірами частинок $X \leq X_m$, мають одні і ті ж значення у відповідних граничних випадках і, що в широкому діапазоні дисперсності між значеннями питомої поверхні і масовим вмістом фракції із розмірами частинок менше даного, спостерігається пропорційність, а співвідношення між відношенням S/S_m та відносним вмістом тонкої фракції практично не змінюється при подрібненні, можна записати:

$$dW = V_0 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right) d\varepsilon. \quad (5.144)$$

Підставляючи (5.144) у вираз (5.141), отримуємо залежність із врахуванням граничного значення щільності енергії, що передається подрібнювачем матеріалу в одиничному акті руйнування, та із врахуванням непродуктивних затрат на деформацію малих частинок [209-219]:

$$\frac{d\varepsilon}{dS} = \frac{9be}{\alpha_2 S \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)} + \frac{3b\beta l_1 + \chi + \alpha_2 \sigma_{II}}{\alpha_2 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)} - \frac{b\beta l_1 S}{4\alpha_2 \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)}. \quad (5.145)$$

Із врахуванням масштабного ущільнення:

$$e = e_0 \left(1 + 1,6\sqrt{C_m / X} + 0,6C_m / X \right),$$

де $X = 6/S$, а e_0 – робота граничних пружних деформацій масивних частинок:

$$\frac{d\varepsilon}{dS} = \frac{b}{\alpha_2} \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)^{-1} \left[\frac{9e_0}{S} + 5,9e_0 \sqrt{\frac{C_m}{S}} + 3\beta l_1 + 0,9e_0 C_m \right] + \frac{\chi + \alpha_2 \sigma_{II}}{b} - \frac{\beta l_1 S}{4}. \quad (5.146)$$

Для достатньо великих S рівняння (5.145) прийме вигляд:

$$\frac{d\varepsilon}{dS} = \left(1 - \frac{S}{S_m} \right)^{-1} \frac{3b\beta l_1 + 0,9e_0 C_m + \chi + \alpha_2 \sigma_{II}}{\alpha_2}. \quad (5.147)$$

Для малих S , навпаки, $S/S_m < 1$ в залежності від величини S , як раніше було показано, переходить в рівняння Кірпічова-Кіка або Ріттингера.

Нехтуючи величиною $(\alpha_2 \sigma_{II} + \chi)X^2$, порівняно із енергією пластичних

деформацій із умови $\varepsilon_m X_m^3 = \beta[X_m^3 - (X - l_1)^3] + eX_m^3$, легко знайти величину X_m (мінімальний розмір частинки, що піддається подрібненню):

$$X_m = \frac{l_1}{1 + \sqrt[3]{\frac{\varepsilon_m - \beta - e}{\beta}}} \approx \frac{3\beta l_1}{\varepsilon_m - e},$$

$$(\varepsilon_m - \beta - e)X_m^3 + \beta(X_m - l_1)^3 = 0. \quad (5.148)$$

Із врахуванням затрат енергії на утворення нової поверхні і роботу сил тертя, рівних $(a_1\sigma_{II} + \chi)X^2$ для випадку $l < X$, отримаємо:

$$X_m = \frac{a_2(\beta l + \sigma_{II} + \chi/a_2)}{b(\varepsilon_m - e)}.$$

Майже завжди реальні значення $\beta > (\varepsilon_m - e)$, тому $X_m > l_1$. Наближене значення в (5.148) достатньо точно при $X_m > l_1$ або при $\beta > (\varepsilon_m - e)$. Із врахуванням затрат енергії на утворення нової поверхні та роботу сил тертя величина X_m буде становити дещо більше значення в (5.148).

При $\varepsilon_m < (\beta + e)$ величина X_m визначається лише затратами на поверхневі явища: роботу сил тертя та на утворення і руйнування агрегатів. Із врахуванням вищесказаного, рівняння для X_m запишеться у вигляді:

$$b(\varepsilon_m - \beta - e)X_{m1}^3 - (\alpha_2\sigma_{II} + \chi)X_{m1}^2 = 0; \quad X_{m1} = \frac{\alpha_2\sigma_{II} + \chi}{b(\varepsilon_m - \beta - e)}. \quad (5.149)$$

Рівняння подрібнення в області розмірів частинок від X_m до X_{m1} , де X_m та X_{m1} – значення, що визначаються із виразів (3.148) і (3.149), набуде вигляду:

$$d\varepsilon = \frac{9b(e + \beta)}{a_2} \frac{dS}{S(1 - S/S_m)} + \left(\frac{\chi}{a_2} + \sigma_{II} \right) \frac{dS}{(1 + S/S_m)}. \quad (5.150)$$

Інтегрування диференціального рівняння подрібнення (5.150) в межах від S_0 до S_i від $\varepsilon = 0$ до ε дає залежність між затратами енергії та результатом подрібнення в широкому діапазоні дисперсності:

$$\varepsilon = \frac{9be}{a_2} \left(\ln \frac{S}{S_0} + \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} \right) + \frac{S_m}{a_2} (3b\beta l_1 + \chi) \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} + \frac{b\beta l_1^2 S_m^2}{4a_2} \left(\frac{S - S_0}{S_m} - \ln \frac{S_m - S_0}{S_m - S} \right). \quad (5.151)$$

Енергію, що затрачається на подрібнення, умовно можна розмежувати на

роботу затрачену на подолання пружних та пластичних деформацій:

$$A_T = A_{ПЛ} + A_{ПП}, \quad (5.152)$$

внаслідок чого в матеріалі утворюються тріщини, та як наслідок – руйнування.

Тоді, з врахуванням (5.129):

$$A_{ПП} = e \cdot V; \quad A_{ПЛ} = \beta \cdot V. \quad (5.153)$$

Базуючись на кривих теоретичної роботи руйнування (рис. 5.12) та відносної деформації зернини (рис. 5.11) знайдемо величину абсолютної пластичної деформації, значення затрат енергії на подолання пружних та пластичних деформацій та відповідно коефіцієнтів щільності енергії e та β в одиничному акті руйнування (табл. 5.3), при об'ємі зернини $V=250 \cdot 10^{-9} \cdot \text{м}^3$.

Таблиця 5.3

Визначення параметрів енергоємності процесу

Параметри	Відносна вологість матеріалу, %				
	13-14	16-17	19-20	22-23	25-26
A^T , Дж	$94 \cdot 10^{-3}$	$121 \cdot 10^{-3}$	$152,8 \cdot 10^{-3}$	$174 \cdot 10^{-3}$	$195,94 \cdot 10^{-3}$
$A_{ПП}^T$, Дж	$12,19 \cdot 10^{-3}$	$36 \cdot 10^{-3}$	$47 \cdot 10^{-3}$	$65 \cdot 10^{-3}$	$82 \cdot 10^{-3}$
$A_{ПЛ}^T$, Дж	$82,71 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	$105,8 \cdot 10^{-3}$	$109 \cdot 10^{-3}$	$113 \cdot 10^{-3}$
e , Дж/м ³	$48,76 \cdot 10^3$	$144 \cdot 10^3$	$188 \cdot 10^3$	$260 \cdot 10^3$	$340 \cdot 10^3$
β , Дж/м ³	$330,84 \cdot 10^3$	$340 \cdot 10^3$	$423,2 \cdot 10^3$	$436 \cdot 10^3$	$452 \cdot 10^3$
$\gamma_{пл}$	0,035	0,045	0,077	0,085	0,092
$\Delta h_{пл}$, м	$0,22 \cdot 10^{-3}$	$0,283 \cdot 10^{-3}$	$0,484 \cdot 10^{-3}$	$0,535 \cdot 10^{-3}$	$0,579 \cdot 10^{-3}$

Для спрощення розрахунків припустимо, що в актах руйнування частинки руйнуються так, що їх лінійний розмір в середньому зменшується в два рази ($\alpha_1 = 1/2$), що дозволяє вважати $\alpha_2 = 3$ та значення фактора форми $b = 1$. Великою поверхневою щільністю роботи сил тертя та енергії утворення і руйнування агрегатів можна знехтувати, так як її значення на кілька порядків менше коефіцієнтів e та β [220].

Питому площу поверхні матеріалу діаметром x можна знайти із виразу:

$$S_x = \frac{6}{\rho_x d_x}; \quad (5.154)$$

де ρ_x, d_x – відповідно питома вага зерна фракції x (кг/м³) та середній діаметр частинки даної фракції (м).

Враховуючи, що:

$$d = \frac{d_1 P_1 + d_2 P_2 + \dots + d_n P_n}{100}, \quad (5.155)$$

де d_n – середній розмір отворів двох сусідніх сит, м; P_n – масовий вихід частинок конкретного класу ($\sum P = 100\%$) отримаємо:

$$S = \frac{600}{\rho(d_1 P_1 + d_2 P_2 + d_3 P_3 + d_4 P_4 + d_5 P_5 + d_6 P_6)}.$$

Враховуючи, що $\rho = 480 \dots 530$ кг/м³ [56] $S = 7200 \dots 11660$ м²/м³.

Усереднена питома площа поверхні частинки початкових розмірів S_0 за даними [221] становить $1,25 \dots 1,40$ м²/кг, або $857 \dots 923$ м²/м³.

Оскільки можна зробити припущення, що в дробарці роторного типу матеріал не подрібнюється більше, ніж до розмірів зерен крохмалю, то, виходячи із цього, питома площа поверхні мінімальної частинки, що не піддається подрібненню $S_m = 46500 \dots 54000$ м²/м³. Із врахуванням питомої густини матеріалу $\rho_3 = 1150 \dots 1350$ кг/м³, побудуємо залежність енерговитрат на подрібнення 1 кг матеріалу в широкому діапазоні дисперсності.

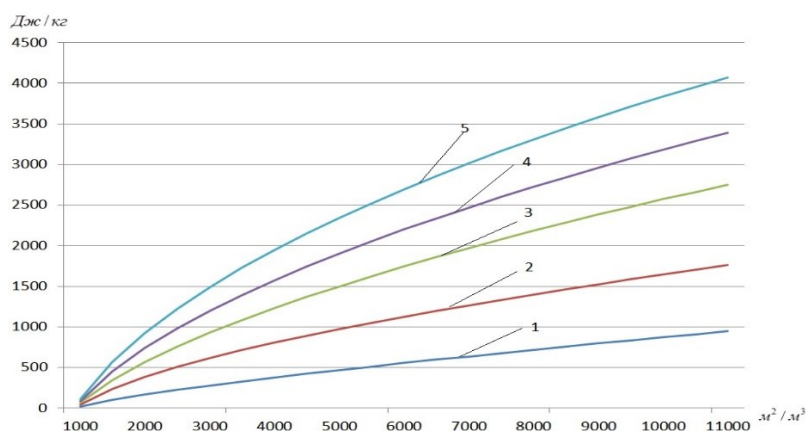


Рисунок 5.13. Залежність енерговитрат на подрібнення матеріалу в залежності від питомої площі поверхні готового продукту: 1. $W=13-14\%$; 2. $W=16-17\%$; 3. $W=19-20\%$; 4. $W=22-23\%$; 5. $W=25-26\%$

Із графічної залежності (рис. 5.13) встановлено, що при збільшенні вологості матеріалу, значно зростають питомі енерговитрати для досягнення площі поверхні $7500 \dots 10000 \text{ м}^2/\text{м}^3$, що задовольняє вимоги спиртового виробництва. Так, для здрібнення матеріалу з відносною вологістю $W=13-14\%$ енерговитрати становлять $650-800 \text{ Дж/кг}$, $W=25-26\%$ відповідно $3200-3700 \text{ Дж/кг}$, що зумовлено збільшенням пластичності матеріалу та опору зерна подрібненню.

Розділ 6. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИГОТУВАННЯ КОРМІВ ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТВАРИН

6.1 ДОСЛІДЖЕННЯ АМПЛІТУДНО-ЧАСТОТНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ ДИСКОВОЇ ДРОБАРКИ

На рис. 6.1, а показано експериментальні залежності амплітуди коливань від кутової швидкості ротора та величини подачі матеріалу, звідки видно, що на холостому ході (без подачі матеріалу) зі зростанням величини кутової швидкості ω графічні криві амплітуди коливань контейнера А поділяються на три зони: дорезонансну, у якій поступово відбувається зростання амплітуди $A=4$ мм у діапазоні значень кутової швидкості $\omega=0\dots45$ рад/с; резонансну, де спостерігається максимальне значення амплітуди $A=4,6$ мм при $\omega=45\dots100$ рад/с; зарезонансну, де відбувається стабілізація амплітуди коливань у межах $A=3,35\dots3,4$ мм [158].

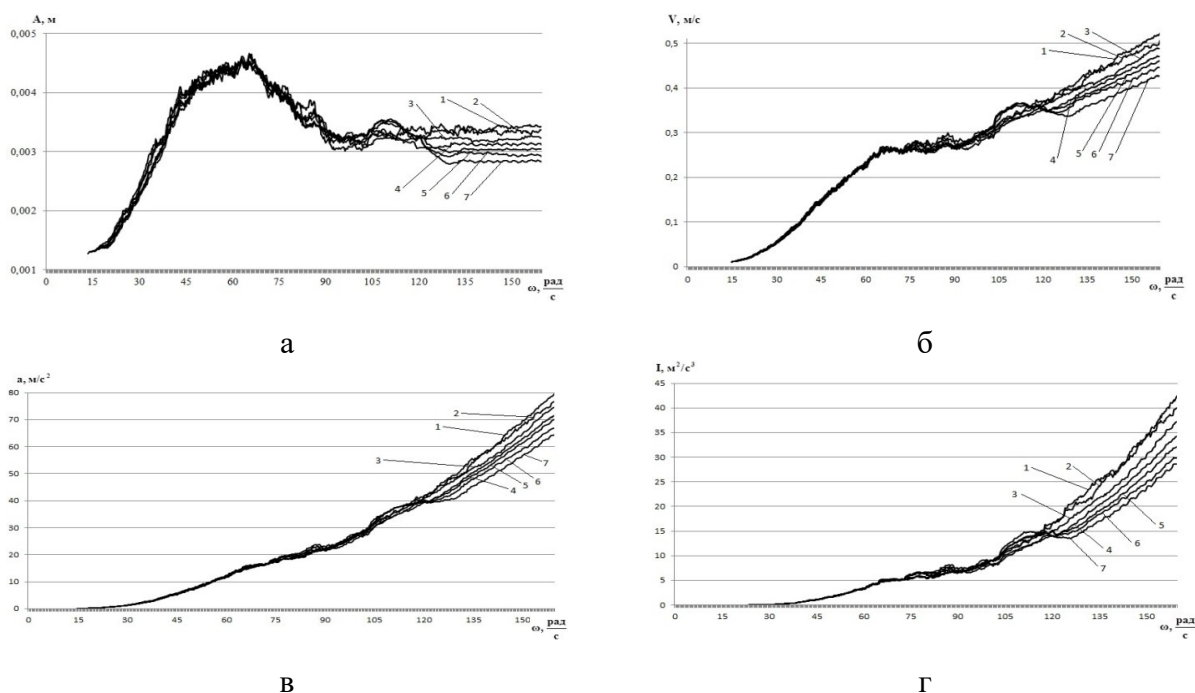


Рисунок 6.8. Амплітудно-частотні характеристики вібраційної дискової дробарки: а) амплітуда; б) віброшвидкість; в) віброприскорення; г) інтенсивність коливань; 1 – без подачі матеріалу; 2 – при подачі 100 кг/год; 3 – при подачі 200 кг/год; 4 – при подачі 300 кг/год; 5 – при подачі 400 кг/год; 6 – при подачі 500 кг/год; 7 – при подачі 600 кг/год.

Із надходженням матеріалу в робочу камеру дробарки (при $\omega=100$ рад/с) внаслідок збільшення коливних мас, спостерігається зростання амплітуди коливань в діапазоні 3,2...3,5 мм (обернено-пропорційно масі, що завантажується), а зона зарезонансу зміщується вправо по вісі абсцис та настає при кутовій швидкості $\omega=120...125$ рад/с. Зі збільшенням подачі матеріалу значення амплітуди коливань в зарезонансному періоді зменшуються внаслідок зростання дисипативних сил технологічного середовища та становить $A=2,8...3,3$ мм.

Аналіз експериментальної залежності віброшвидкості v виконавчого органа дробарки від кутової швидкості ротора (рис. 6.1, б) та величини подачі матеріалу показав значення 270 мм/с у зоні резонансу при 65 рад/с, після чого залежність набуває лінійного характеру зростання із значенням 340...360 мм/с за експлуатаційного режиму роботи.

Також було визначено експериментальну залежність віброприскорення a та інтенсивності коливань I виконавчого органа дробарки (рис. 6.1, в, рис. 6.1, г), на яких чітко відображено, що після проходження зони резонансу (при $\omega=45...100$ рад/с) залежності набувають лінійного характеру зростання, а їх значення за експлуатаційного режиму роботи при 120..125 рад/с, становлять відповідно $a=40-46$ м/с² та $I=18-21$ м²/с³.

У загальному випадку до основних енергетичних параметрів вібрації можна віднести роботу змушуючих сил або моментів та внутрішніх сил опору коливальної системи [159]. Робота зовнішніх сил створюється незрівноваженими масами та витрачається на здолаття сил опору системи та забезпечення коливного руху виконавчих органів вібраційної технологічної машини із заданими параметрами. Внутрішні сили опору коливної системи становлять сили реактивного та дисипативного опору [160].

На рисунку 6.2 представлено експериментальну залежність споживаних енерговитрат на привод дробарки від кутової швидкості приводного валу та подачі матеріалу при діаметрі отворів сепарувальної поверхні $d=2$ мм.

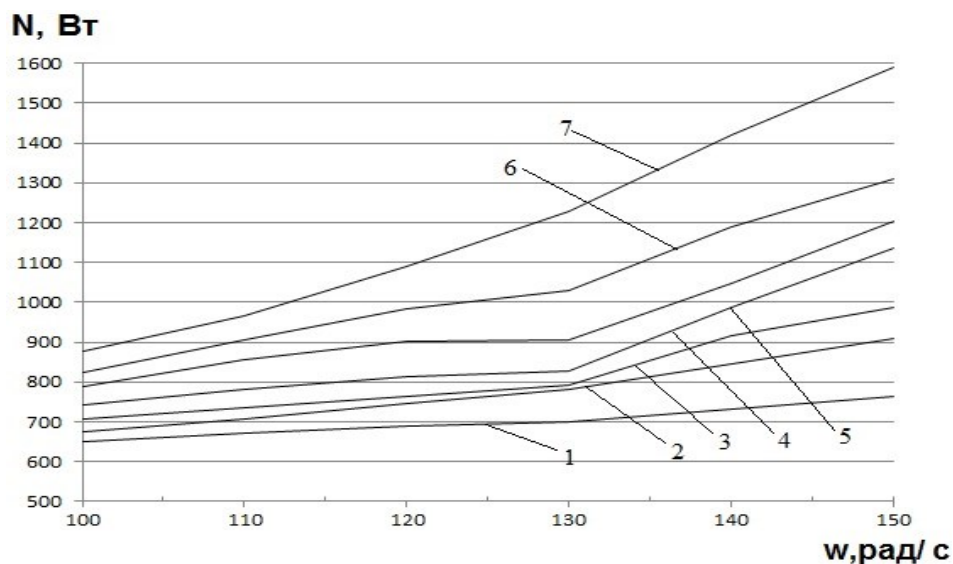


Рисунок 6.2. Залежність споживаної потужності електродвигуна від кутової швидкості приводного валу: 1 – при відсутності подачі матеріалу; 2 – при 100 кг/год; 3 – при 200 кг/год; 4 – при 300 кг/год; 5 – при 400 кг/год; 6 – при 500 кг/год; 7 – при 600 кг/год.

З поданої залежності видно, що при роботі машини без подачі матеріалу зі зростанням частоти ω споживана потужність N збільшується практично пропорційно. Коли відбувається підвищення ступеня завантаженості робочої камери (збільшується подача матеріалу), амплітуда коливань контейнера зменшується, а витрати потужності зростають, разом з цим, при перевищенні частоти $\omega=128\dots130$ рад/с, спостерігається майже квадратичне зростання N , що свідчить про збільшення реактивного та дисипативного опору матеріалу внаслідок його рециркуляції та несвоєчасного виведення із робочої зони. При робочій частоті машини $\omega=120-125$ рад/с споживана потужність електродвигуна, при подачі матеріалу $Q=100\dots600$ кг/год, становить: $N=740\dots1160$ Вт.

При цьому, як видно з рис. 6.3, зростання подачі матеріалу при сталій кутовій частоті $\omega=130$ рад/с супроводжується майже квадратичним зростанням потужності N , яку споживає електропривод з мережі, що спричинено розсіюванням енергії в оброблюваному середовищі.

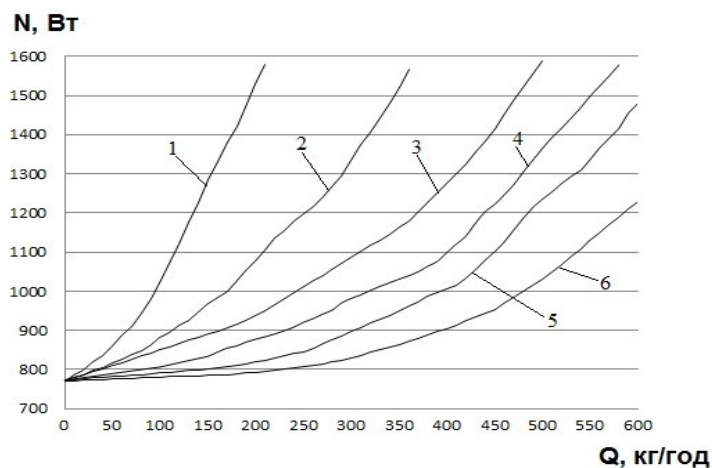


Рисунок 6.3. Залежність споживаної потужності електродвигуна від подачі матеріалу: 1 – при $d=1$ мм; 2 – при $d=1,25$ мм; 3 – при $d=1,4$ мм; 4 – при $d=1,6$ мм; 5 – при $d=1,8$ мм; 6 – при $d=2$ мм.

Разом з тим, спостерігається пряма залежність між збільшенням діаметру отворів сепараційної поверхні та радіусом кривизни вітки параболи $N(Q)$, що свідчить про зростання втрат енергії на подолання опору матеріалу, який затримується в робочій камері дробарки внаслідок зниження пропускної здатності сита при зменшенні діаметра його отворів.

6.2. ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА ВІБРАЦІЙНОЮ ЖИСКОВОЮ ДРОБАРКОЮ

На рисунку 6.4 показано зміну продуктивності машини залежно від кутової швидкості приводного вала та діаметра отворів сепараційної поверхні.

Аналізуючи отриману залежність, можна дійти висновку, що продуктивність P зростає зі збільшенням кутової швидкості ротора ω , проте, при досягненні кутової швидкості $\omega=125-135$ рад/с і більше, спостерігається зменшення приросту продуктивності, що свідчить про надмірну рециркуляцію вже подрібненого матеріалу.

Результати експериментальних досліджень продуктивності обладнання P в залежності від кутової швидкості приводного вала ω та вологовмісту W , відображені на рис. 6.5, звідки можна зробити висновок, що значною мірою на продуктивність впливає вологість матеріалу, зокрема при рівній кутовій

швидкості ротора ($\omega=130$ рад/с) продуктивність зменшилась більш як на 25 %, а саме із 450 кг/год. до 325 кг/год при подрібненні матеріалу із вологовмістом 13-14% та 25-26% відповідно.

Для визначення впливу кутової швидкості приводного вала дробарки та діаметра отворів сепараційної поверхні на питомий прохід крізь контрольне сито було здійснено ряд експериментів, на основі даних яких побудовано графічні залежності рис. 6.6.

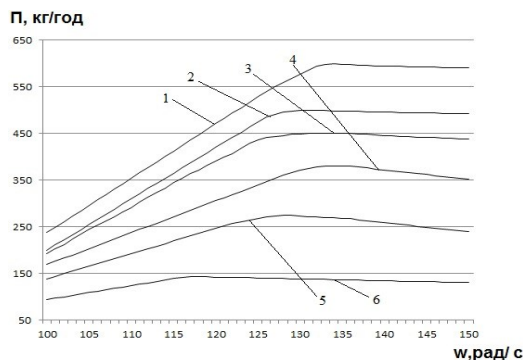


Рисунок 6.4. Залежність продуктивності від кутової швидкості приводного валу:
1 – при $d=2$ мм; 2 – при $d=1,8$ мм;
3 – при $d=1,6$ мм; 4 – при $d=1,4$ мм;
5 – при $d=1,25$ мм; 6 – при $d=1$ мм.

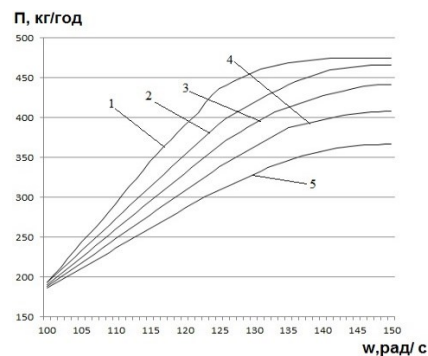


Рисунок 6.5. Залежність продуктивності від кутової швидкості приводного валу:
1 – при $W=13-14$ %; 2 – при $W=16-17$ %; 3 – при $W=19-20$ %;
4 – при $W=22-23$ %; 5 – при $W=25-26$ %.

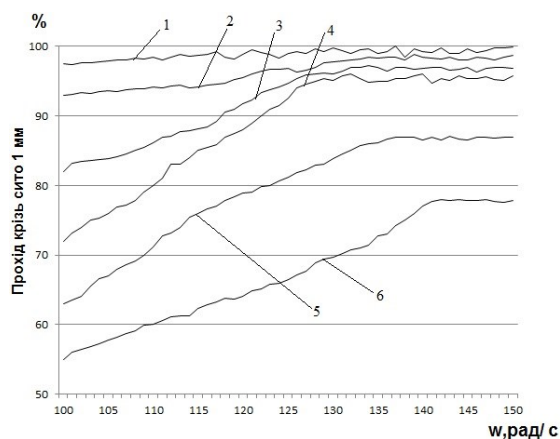


Рисунок 6.6. Питома частка матеріалу в залежності від кутової швидкості приводного валу: 1 – при $d=1$ мм; 2 – при $d=1,25$ мм; 3 – при $d=1,4$ мм;
4 – при $d=1,6$ мм; 5 – при $d=1,8$ мм; 6 – при $d=2$ мм.

З даних залежностей видно, що криві, які характеризують питому частку матеріалу при різних діаметрах отворів встановлених сит, змінюються в дві фази, залежно від кутової швидкості ротора. На першій фазі спостерігається приріст «проходу» крізь контрольне сито пропорційно кутовій швидкості, на другій – крива вирівнюється, а приріст прямує до нуля. Крім того, як видно із графіків, при діаметрі отворів сепараційної поверхні $d=2$ мм, питома частка матеріалу, що пройшла крізь контрольне сито становить 78-79% за кутової швидкості ротора від $\omega=140$ рад/с, що не задовольняє умови описані вище.

6.3. СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗЕРНА ВІБРАЦІЙНОЮ ДИСКОВОЮ ДРОБАРКОЮ

Ґрунтуючись на результатах попередніх експериментальних даних досліджуваного процесу подрібнення за використання розробленої вібраційної дискової дробарки роторного типу, здійснено статистичний аналіз якісних та енергетичних параметрів процесу (табл. 6.1).

Якісними та енергетичними параметрами оптимізації досліджуваних процесів визначено: продуктивність Π , кг/год; питомий прохід крізь контрольне сито K , %; N – споживані енерговитрати, Вт.

$$\Pi = f(a, Q, W, d), \quad (6.1)$$

$$K = f(a, Q, W, d), \quad (6.2)$$

$$N = f(a, Q, W, d), \quad (6.3)$$

де a – віброприскорення, м/с^2 ; d – діаметр отворів сепараційної поверхні, мм; Q – величина подачі матеріалу, кг/год; W – відносна вологість матеріалу, %.

Дослідження впливу перерахованих вище факторів на якісні та енергетичні параметри досліджуваного процесу під час здійснення однофакторних експериментів пов'язане зі значними труднощами та об'ємами робіт. Тому доцільно здійснити статистичний аналіз для отримання функціональної

залежності у вигляді множинної регресії другого порядку за допомогою рототабельного центрально-композиційного планування (РЦКП) багатофакторного експерименту [167].

Метод РЦКП дає змогу більш точно отримати математичний опис розподілу даних за рахунок збільшення кількості експериментів у центральних точках матриці плану і спеціального вибору величини «зіркового значення» α .

Кількість факторів (РЦКП) становить:

$$k = k_{\text{я}} + 2n + k_0, \quad (6.4)$$

де $k_{\text{я}}$ – кількість факторів у ядрі плану; n – кількість факторів; $2n$ – кількість досліджень у зіркових точках; k_0 – кількість факторів у центрі плану з координатами $(0,0\dots0)$. Рототабельність композиційного плану набувається за умови, що величина зіркового плеча α вибирається з інтервала $\alpha = 2^{\frac{n}{4}}$ при $n \leq 5$, тобто для чотирифакторного експерименту, $\alpha = 2$.

Аналіз статистичних характеристик отриманих даних показав, що коефіцієнти їх асиметрії прямують до нуля, тобто розподіл експериментальних даних є симетричним та апроксимується за нормальним законом.

Таблиця 6.1

Статистична характеристика якісних та енергетичних параметрів досліджуваного процесу

Показник	Значення параметрів		
	μ , кг/год	K , %	N , Вт
Кількість факторів, шт.	26	26	26
Мінімальне значення	230	66,7	793
Максимальне значення	455	95,6	1595
Середнє значення	322,4	84,6	1102
Верхня величина довірчого інтервала	345,6	88,6	1206
Нижня величина довірчого інтервала	299,1	80,7	997
Геометричне середнє	317,6	84	1075

Гармонічне середнє	312,9	83,4	1050
Медіана	305,5	86,2	1034
Мода	299	85,3	1595
Частота моди	2	2	2
Нижній кuartиль	281	80,9	910
Верхній кuartиль	376	93,2	1276
Розмах	225	28,9	802
Кuartиль розмаху	95	12,3	366
Асиметрія	0,493	-0,724	0,739
Коефіцієнт ексцесу (куртозису)	-0,462	-0,883	-0,629

За негативного значення асиметрії несиметричність вибірки за зміщенням центру розподіляється праворуч, у протилежному разі – навпаки. Негативний коефіцієнт ексцесу свідчить про закругленість піка досліджуваного розподілу, додатній – про загостреність вершин [169].

Встановлено такі значення рівнів факторів в умовному масштабі: мінімальний -1 , середній 0 , максимальний $+1$ та зіркові значення $-\alpha$; $+\alpha$. Істинні значення факторів матриці РЦКП встановлені на основі здійснення пошукових експериментів і наведені в табл. 6.2. Для проведення РЦКП повнофакторного експерименту було складено матрицю планування експериментів, які подані в таблиці 6.3.

Для оцінки адекватності отриманих регресійних рівнянь використаємо аналітичні та графічні методи аналізу. Гіпотезу про відтворюваність дослідів перевіряємо за допомогою критерію Кохрена, який показує, що на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні, тому що розрахункове значення критерію менше за табличне.

Рівні факторів та інтервали варіювання параметрів оптимізації

Фактори	Рівні факторів					Інтервал варіювання
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$	
x_1 – віброприскорення, m/s^2	30	35	40	45	50	5
x_2 – подача матеріалу, $kg/год$	200	300	400	500	600	100
x_3 – вологість матеріалу, s	14	17	20	23	26	3
x_4 – діаметр отвору сит, mm	1,2	1,4	1,6	1,8	2	0,2

Оцінку адекватності отриманих математичних моделей провадимо за критерієм Фішера, який показав, що розрахункові значення значно нижчі від критичних, відповідно отримані регресійні моделі адекватно описують поверхні відгуку, та їх можна використовувати в цілях оптимізації досліджуваних процесів [170].

Таблиця 6.3

Чотирифакторна матриця для визначення оптимальних параметрів процесу подрібнення

№ дослідю	Фактори										Параметри		
	x_1	x_2	x_3	x_4	$F(x_1, x_2, x_3, x_4)$	$a, m/s^2$	$Q, kg/год$	$W, \%$	d, mm	$\Pi, kg/год$	$K, \%$	$N, Вт$	
1	+	+	+	+	+	45	500	20	1,8	387	80,9	1335	
2	-	+	+	+	-	35	500	20	1,8	321	70,7	928	
3	+	-	+	+	-	45	300	20	1,8	297	81,3	997	
4	-	-	+	+	+	35	300	20	1,8	271	67	804	
5	+	+	-	+	-	45	500	16	1,8	455	81,2	1276	
6	-	+	-	+	+	35	500	16	1,8	311	71,2	917	
7	+	-	-	+	+	45	300	16	1,8	299	81,8	935	
8	-	-	-	+	-	35	300	16	1,8	283	67,5	793	
9	+	+	+	-	-	45	500	20	1,4	343	93	1570	
10	-	+	+	-	+	35	500	20	1,4	230	85,1	945	
11	+	-	+	-	+	45	300	20	1,4	279	94	1186	

12	-	-	+	-	-	35	300	20	1,4	236	85	854
13	+	+	-	-	+	45	500	16	1,4	376	91	1520
14	-	+	-	-	-	35	500	16	1,4	269	86	934
15	+	-	-	-	-	45	300	16	1,4	299	91,3	1102
16	-	-	-	-	+	35	300	16	1,4	281	86,3	867
17	+A	0	0	0	0	50	400	18	1,6	399	93	1101
18	-A	0	0	0	0	30	400	18	1,6	260	72	815
19	0	+A	0	0	0	40	600	18	1,6	392	93,2	1595
20	0	-A	0	0	0	40	200	18	1,6	330	93,6	877
21	0	0	+A	0	0	40	400	22	1,6	300	91	1320
22	0	0	-A	0	0	40	400	14	1,6	400	95,6	1070
23	0	0	0	+A	0	40	400	18	2	398	66,7	910
24	0	0	0	-A	0	40	400	18	1,2	282	94,2	1595
25	0	0	0	0	0	40	400	18	1,6	344	93,5	1200
26	0	0	0	0	0	40	400	18	1,6	340	93,6	1205

Перевірку значущості коефіцієнтів регресії здійснюємо за t-критерієм. Розрахункові значення критеріальної оцінки відображені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Значення розрахованих критеріїв до отриманих регресійних моделей

Критерій оцінки	Позначення критерію	Функція відгуку		
		<i>П</i>	<i>К</i>	<i>N</i>
Коефіцієнт детермінації;	R^2	0,89	0,81	0,95
Дисперсія адекватності	$S_{ад}$	82882	2387	1667389
Дисперсія відтворюваності	$S_{відт}$	774,4	40	7852
Критерій Фішера	F	1,6	2,17	1,28
Критичне значення критерію Фішера	$F_{\alpha, f1, f2}$	5,8 _{0,05;4;26}		

Після обробки експериментальних даних у статистичному середовищі STATISTICA 10.0 [174] було отримано коефіцієнти комплексних рівнянь множинної регресії 2-го порядку та побудовано такі залежності:

- продуктивності від віброприскорення, подачі, вологості матеріалу та діаметра перфорації (4.6):

$$P = 380 - 11,5a - 0,4Q + 7W - 24,8d + 0,24a^2 - 0,5W^2 - 11,3d^2 + 0,02aQ - 0,06aW - 5,3ad - 0,05QW + 0,16Qd + 16,7Wd \quad (6.6)$$

- прохідної здатності від віброприскорення, подачі, вологості матеріалу та діаметра перфорації (4.7):

$$K = 81,83 - 1,3a + 0,07Q + 1,48W + 12,62d + 0,03a^2 - 0,05W^2 - 3,2d^2 + 0,04aW - 0,25ad - 1,7Wd \quad (6.7)$$

- споживаних енерговитрат від віброприскорення, подачі, вологості матеріалу та діаметра перфорації (4.8).

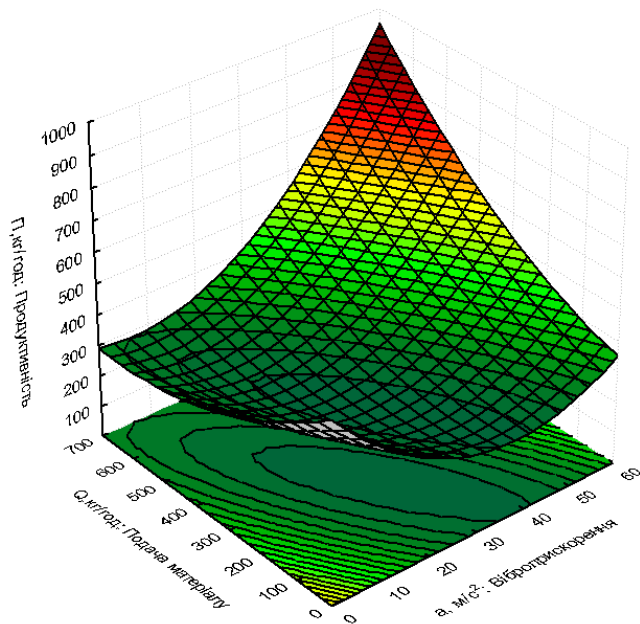
$$N = 1042,7 - 19,7a - 1,5Q - 11,2W - 78d + 0,42a^2 - 1,05W^2 - 178d^2 + 0,096aQ + 0,74aW - 18,2ad - 0,2QW - 0,8Qd + 13,62Wd \quad (6.8)$$

За результатами проведених експериментів досліджень та випробувань розробленої вібраційної дробарки роторного типу для здрібнення зернової маси на основі побудованих поверхонь відгуку досліджуваного процесу (рис. 6.7-6.12) визначено раціональні технологічні параметри її роботи (табл. 6.5), компромісне значення яких отримано методом Крамера в математичному середовищі “Mathcad 15”.

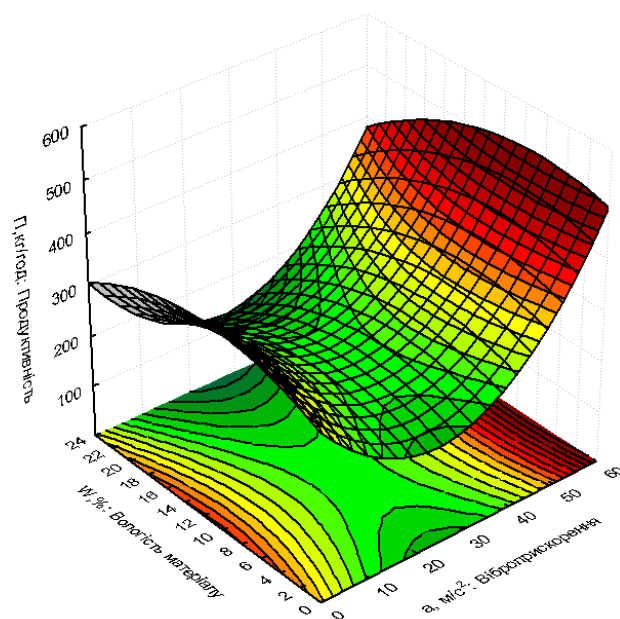
Таблиця 6.5

**Раціональні режимні параметри досліджуваного процесу
подрібнення зерна**

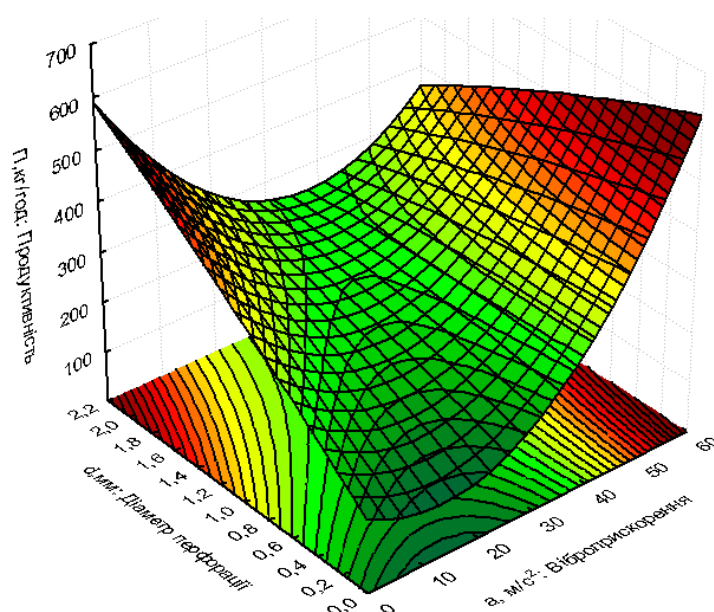
Технологічний параметр	Раціональне значення
Віброприскорення, м/с ²	32-38
Подача матеріалу, кг/год	342-480
Відносна вологість матеріалу, %	17-18
Діаметр отворів сепараційної поверхні, мм	1,6-1,8



а)



б)



в)

Рисунок 6.7. Поверхні відгуків та їх проекції для продуктивності у парній взаємодії основних факторів:

а) – віброприскорення та подача матеріалу; б) – віброприскорення та вологість матеріалу; в) – віброприскорення та діаметр отворів сепараційної поверхні.

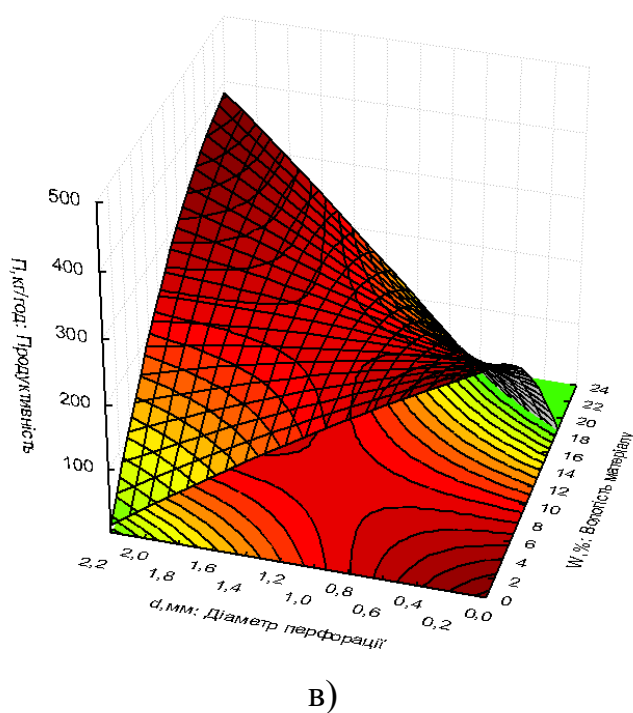
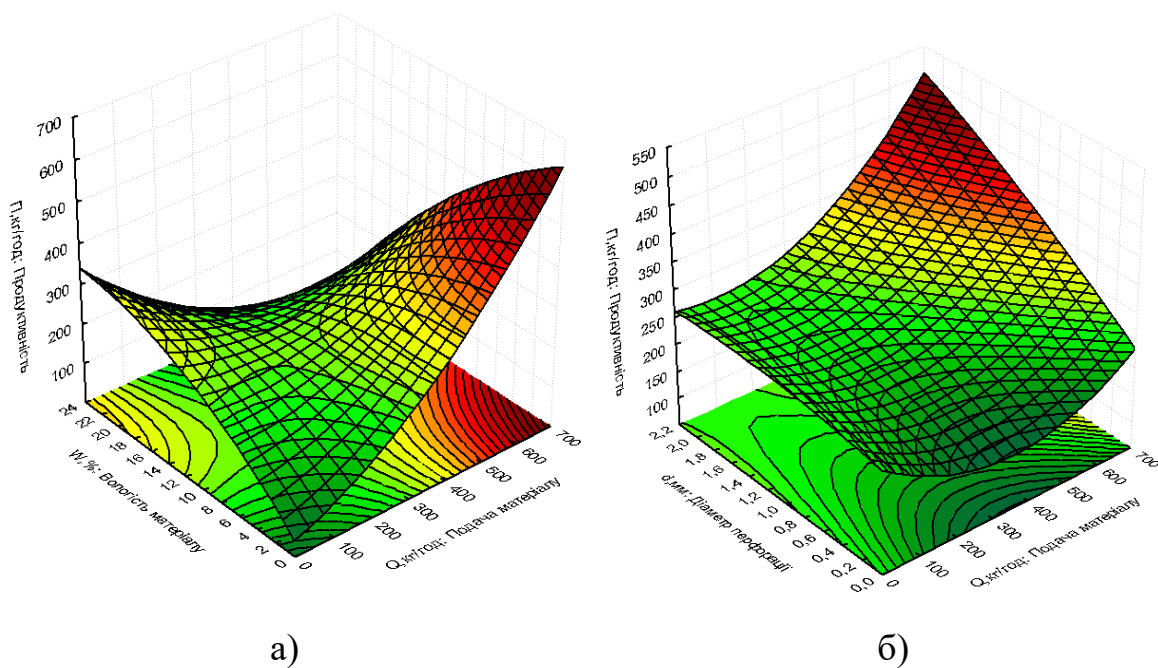
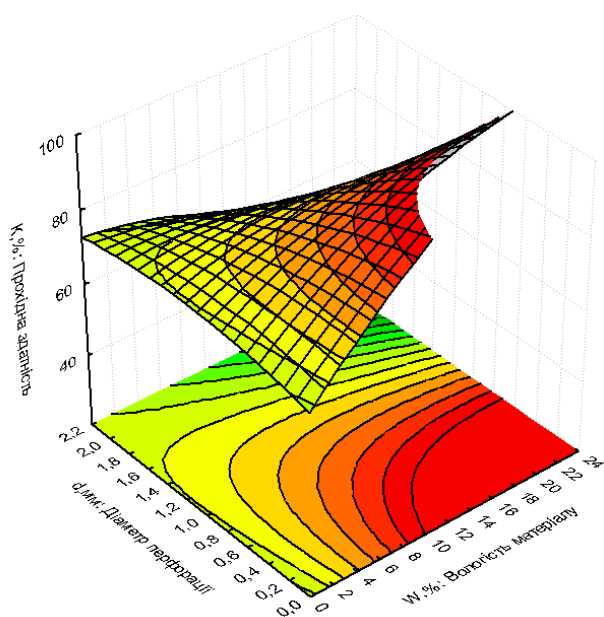
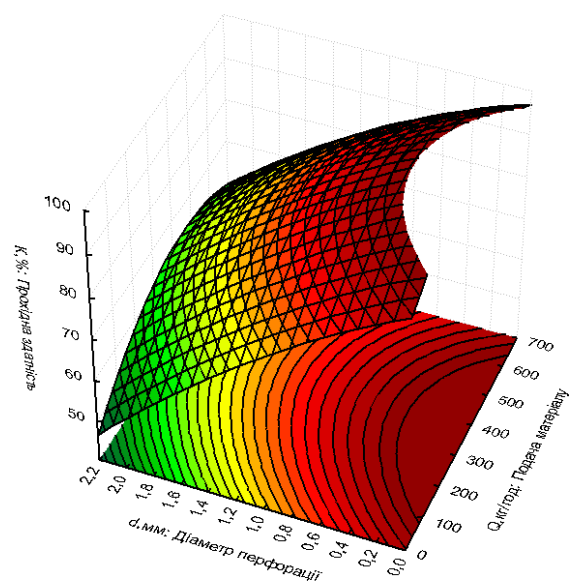


Рисунок 6.8. Поверхні відгуків та їх проекції для продуктивності у парній взаємодії основних факторів:

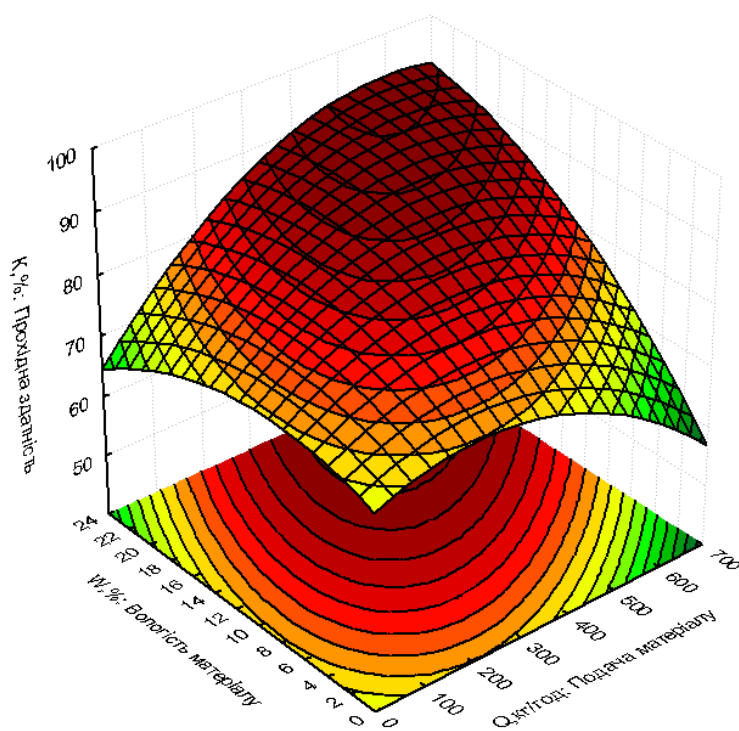
а) – вологість та подача матеріалу; б) – подача матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні; в) – вологість матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні.



а)



б)



в)

Рисунок 6.9. Поверхні відгуків та їх проєкції для питомого проходу крізь контрольне сито у парній взаємодії основних факторів:

- а) – вологість матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні;
 б) – подача матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні; в) – вологість та подача матеріалу.

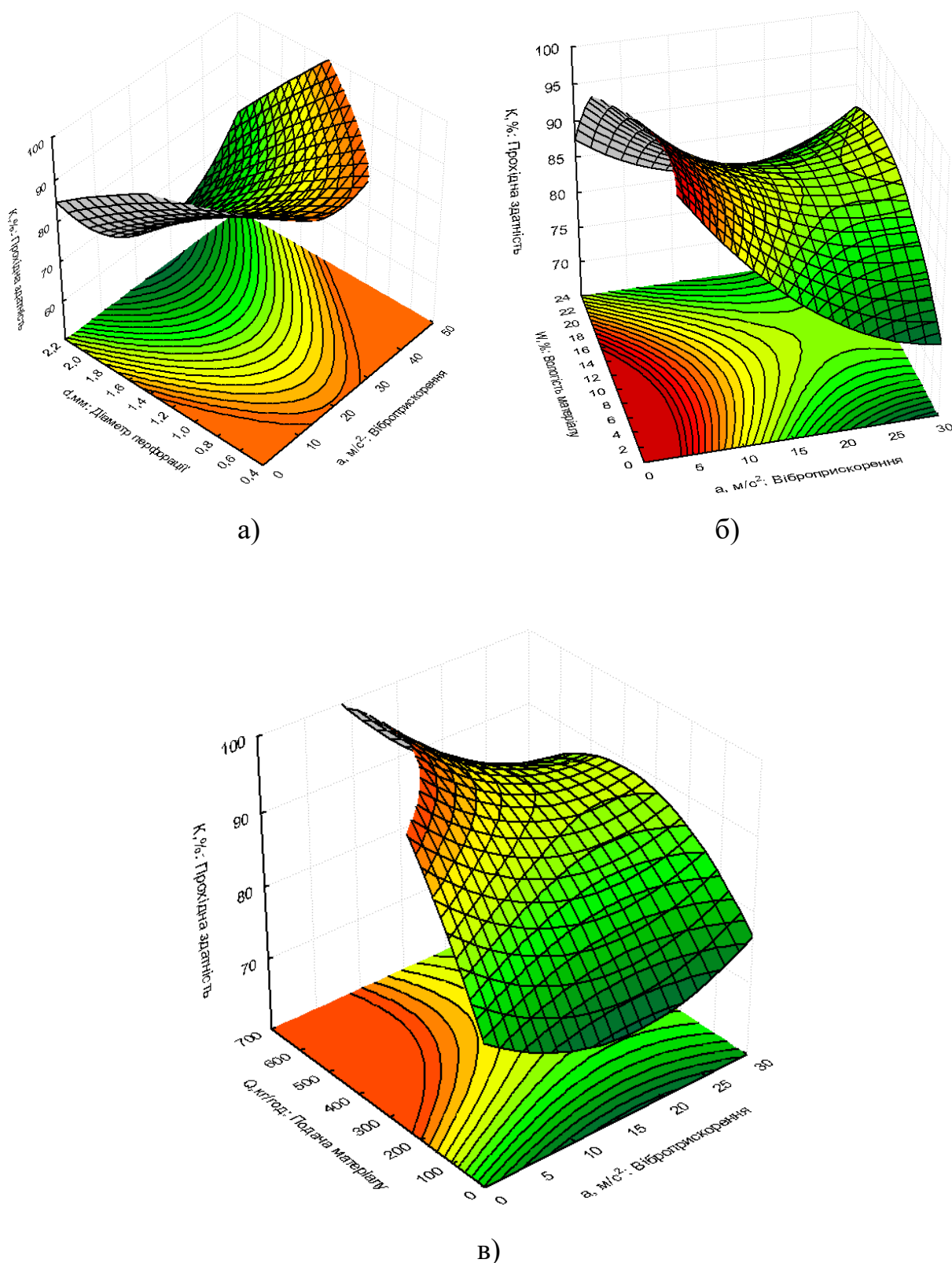


Рисунок 6.10. Поверхні відгуків та їх проєкції для питомого проходу крізь контрольне сито у парній взаємодії основних факторів:

а) – віброприскорення та діаметр отворів сепараційної поверхні;
 б) – вологість матеріалу та віброприскорення; в) – віброприскорення та подача матеріалу.

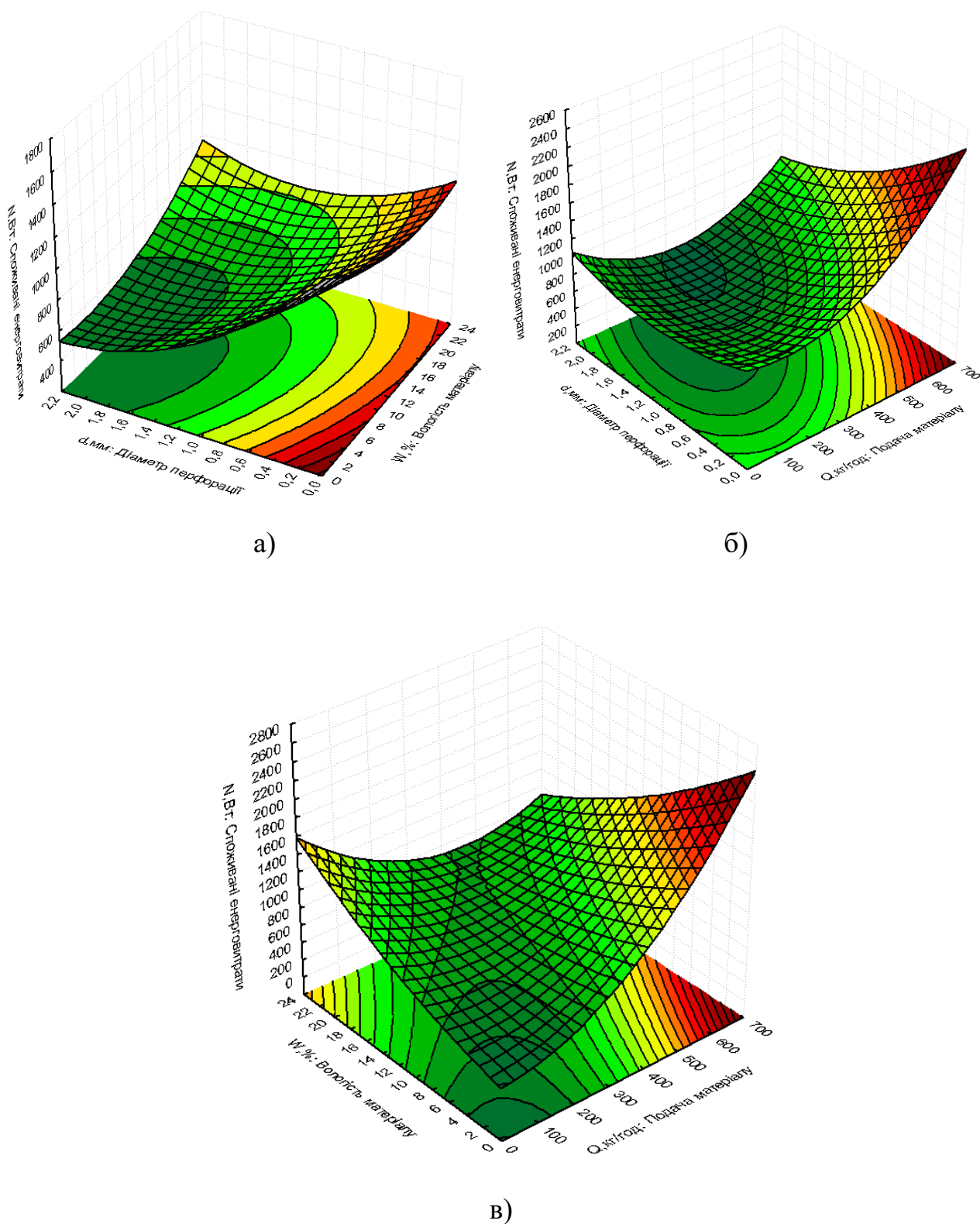


Рисунок 6.11. Поверхні відгуків та їх проєкції для споживаних енерговитрат у парній взаємодії основних факторів:

а) – вологість матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні;
 б) – подача матеріалу та діаметр отворів сепараційної поверхні; в) – вологість та подача матеріалу.

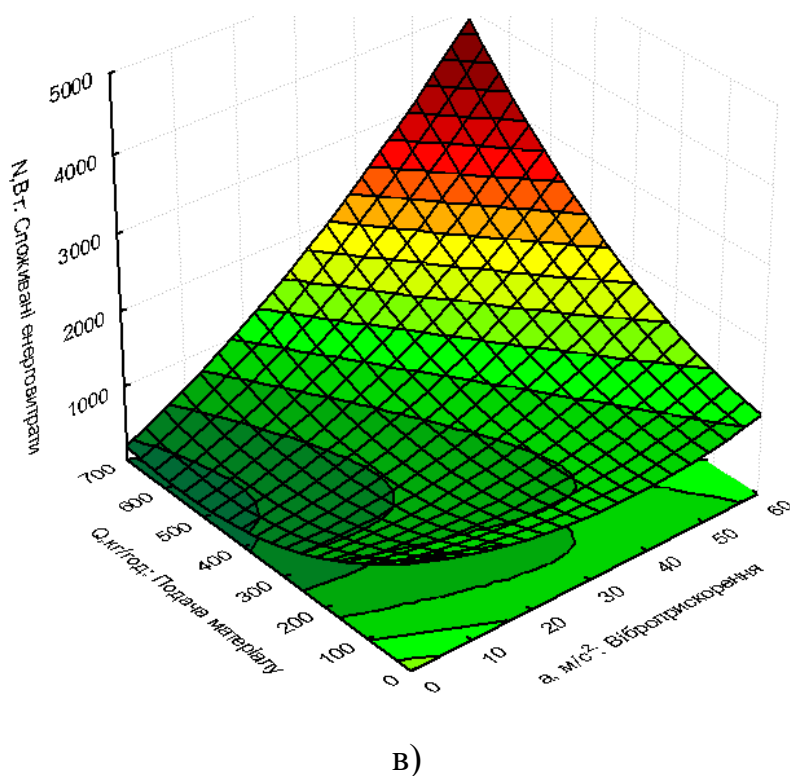
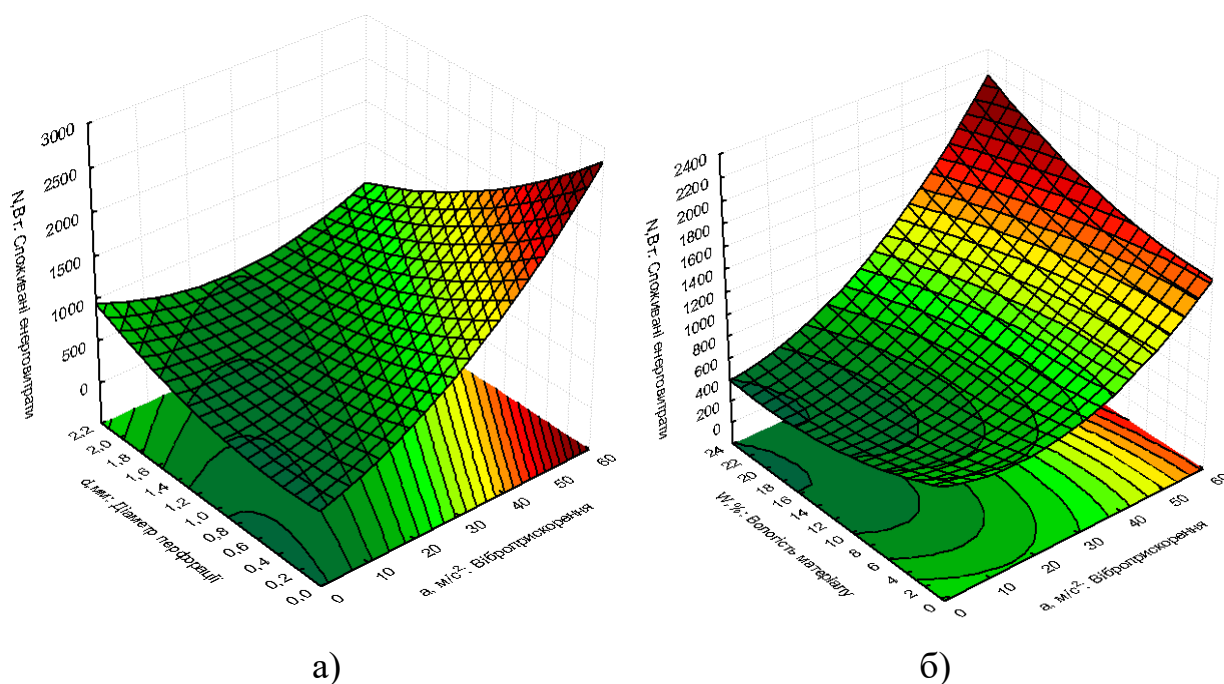


Рисунок 6.12. Поверхні відгуків та їх проєкції для споживаних енерговитрат у парній взаємодії основних факторів:

а) – віброприскорення та діаметр отворів сепараційної поверхні; б) – вологість матеріалу та віброприскорення; в) – подача матеріалу та віброприскорення.

Також визначено, що за цих параметрів якісні та енергетичні характеристики процесу подрібнення зернової сировини вібраційною дисковою дробаркою набувають своїх оптимальних значень: продуктивність становить 320...450 кг/год, питомий прохід крізь контрольне сито 85...95% за споживаних енергетичних затрат 1,2...1,5 кВт на привод дробарки.

6.4. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ДРОБАРКИ ЗА ЯКІСНИМИ ПОКАЗНИКАМИ ПОДРІБНЕНОГО КОРМУ

Основною метою досліджень представлених в даному підрозділі є обґрунтування діапазонів значень режимних та конструктивних параметрів вібраційної дискової дробарки при застосуванні в технології приготування концентрованих кормів для згодовування сільськогосподарським тваринам, шляхом експериментальної оцінки процесу подрібнення за критерієм якості готового продукту та відповідності нормативним вимогам технології годівлі. Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- здійснити пошукові експериментальні випробування та встановити робочі діапазони амплітудно-частотних характеристик вібраційної дискової дробарки;
- провести експериментальні дослідження процесу подрібнення фуражного зерна при використанні сит із різним діаметром отворів d та визначити варіанти типорозмірів, які можуть бути встановлені для забезпечення гранулометричного складу готового продукту відповідно зоотехнічним вимогам.

Враховуючи конструктивні особливості дробарки та кінематичні зв'язки між її конструктивними елементами, були зроблені деякі припущення [171]:

- закони руху ротора (разом з дисками) і камери (разом із сепараційною поверхнею) ідентичні;
- найбільш технологічно прийнятним для здійснення імпульсного дроблення є режим при якому забезпечується наявність «жорстких» ударів та зіткнень робочих органів із об'єктом обробки, які характерні для таких кінематичних режимів, коли для усталеного руху, швидкість руху ротора на

початку фази $\varphi_p = 0$ рад миттєво зростає від $v=0$ м/с до $v=const$ та миттєво набуває нульового значення вкінці першої чверті періоду коливань при $\varphi_p = \frac{\pi}{2}$, прискорення на початку ($\varphi_p = 0$) та вкінці ($\varphi_p = \frac{\pi}{2}$) фази теоретично прямує до нескінченності $a \rightarrow \infty$, в діапазоні значень $\varphi_p = 0 \dots \frac{\pi}{2} - v=const$, $a \approx 0$. Для діапазону значень $\varphi_p = \frac{\pi}{2} \dots \frac{3\pi}{2}$ та для останньої чверті періоду коливань при $\varphi_p = \frac{3\pi}{2} \dots 2\pi$, зміна швидкості та прискорення відбувається за аналогічними закономірностями. Такі закономірності руху можуть бути досягнуті при експлуатації вібраційної дробарки в резонансному режимі.

- своєчасне видалення матеріалу із зони подрібнення відбуватиметься при режимах роботи, під час яких динамічні навантаження при взаємодії елементів в системі «робочий орган – сировина» є незначними («м'яккі» удари) або практично відсутні (безударна взаємодія). При цьому, як показують дослідження науковців [172], для ефективного перебігу процесу сепарації найкращим варіантом є зведення ударних імпульсів до нульових значень. У першому випадку швидкість коливань в довірчому наближенні змінюється за лінійним законом: від $v= v_{max}$ до $v= 0$ в інтервалах $\varphi_p = 0 \dots \frac{\pi}{2}$ і $\varphi_p = \pi \dots \frac{3\pi}{2}$, та зростаючи в зворотньому порядку при $\varphi_p = \frac{\pi}{2} \dots \pi$ і $\varphi_p = \frac{3\pi}{2} \dots 2\pi$, модуль прискорення при будь-яких значеннях φ_p є сталою величиною ($a \neq 0 = const$), проте на границях діапазонів $\left(0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \text{ і } 2\pi\right)$ відбувається миттєва зміна напрямку вектора прискорення, що супроводжується нежорстким зіткненням («м'яким» ударом) робочого органу із матеріалом. Для безударної взаємодії сепараційних елементів дробарки із матеріалом необхідною умовою є забезпечення зміни модуля прискорення і швидкості в мінімальних діапазонах значень, при чому графіки функцій $v(\varphi_p)$ та $a(\varphi_p)$ повинні мати вигляд плавних кривих (синусоїда, косинусоїда, парабола тощо) без стрімких перегинів на границях описаних вище діапазонів $\left(0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} \text{ і } 2\pi\right)$. Описані закономірності зміни кінематичних параметрів, в більшій чи меншій мірі, можуть бути отримані при експлуатації

технологічного обладнання вібраційного типу на дорезонансних та зарезонансних режимах.

- найбільш ефективний режим роботи дробарки знаходиться в межах досягнення технічного компромісу між попередніми умовами;
- інтенсивність коливань – це комплексний параметр, який враховує швидкість та прискорення коливань.

В результаті проведених досліджень АЧХ було отримано осцилограми амплітуди, швидкості, прискорення та інтенсивності коливань від кутової швидкості ротора (рис. 6.13), які показують, що разом із збільшенням кутової швидкості ω графічні криві амплітуди коливань A та похідних параметрів поділяються на три характерних зони: дорезонанс, резонанс та зарезонанс.

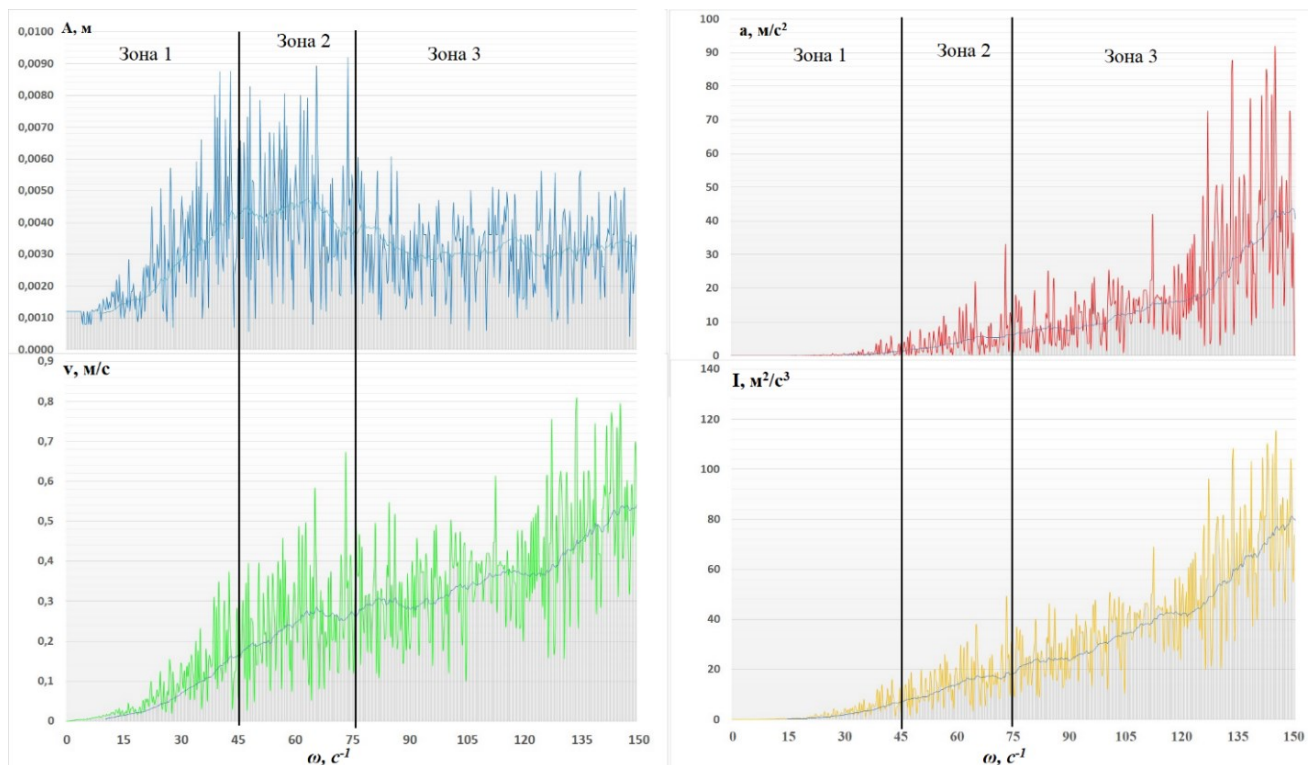


Рисунок 6.13. Амплітудно-частотні характеристики лабораторної моделі вібраційної дробарки: Зона 1 – дорезонансний режим; Зона 2 – резонансний режим; Зона 3 – зарезонансний режим; $A, м$ – амплітуда коливань; $v, м/с$ – віброшвидкість; $a, м/с^2$ – віброприскорення; $I, м^2/с^3$ – інтенсивність коливань; $\omega, с^{-1}$ – кутова швидкість ротора

Аналіз числового масиву частотних характеристик в програмному середовищі MS Microsoft Excel 2020 дозволив прийти до висновку, що впродовж всього діапазону кутових швидкостей, що відповідають роботі машини в режимі резонансу ($\omega = 45 \dots 75 \text{ c}^{-1}$) спостерігається наявність «жорстких» ударів, «м'які» режими спостерігаються при значеннях кутової швидкості $\omega = 75 \dots 150 \text{ c}^{-1}$, що відповідає зоні зарезонансу. При експлуатації дробарки в режимі дорезонансу характерним є майже повна відсутність ударів при $\omega = 28 \dots 39 \text{ c}^{-1}$ із поступовим переходом до «нежорсткої» ударної взаємодії робочих органів із сировиною ($\omega = 28 \dots 39 \text{ c}^{-1}$). Для значень $\omega = 0 \dots 27 \text{ c}^{-1}$ розгорнутий аналіз та обробка числових даних не проводились, оскільки за такої кутової швидкості ротора, розрахункове значення зусилля ротора є нижчим за критичне зусилля руйнування матеріалу [173].

Таким чином, для досягнення технічного компромісу між забезпеченням ударного імпульсу для подрібнення та потрібних режимів контактної взаємодії при вібросепарації було прийнято, що найбільш ефективні режими експлуатації дробарки можуть знаходитись в межах значень амплітудно-частотних характеристик, які отримані за кутової швидкості $\omega = 75 \dots 130 \text{ c}^{-1}$. За таких умов, будуть спостерігатися динамічні навантаження від «жорстких» ударів на початку зони зарезонансу ($\omega = 75 \dots 85 \text{ c}^{-1}$) до зони більш «м'яких» – по мірі зростання кутової швидкості ω від 85 c^{-1} до 130 c^{-1} . При цьому подальше підвищення ω є недоцільним, оскільки це може призвести до зменшення продуктивності процесу сепарації внаслідок утворення та надмірної рециркуляції повітряно-продуктового шару всередині робочого простору дробарки під дією колових сил створюваних ротором.

Результати гранулометричного аналізу, представлені на рис. 6.14 та рис. 6.15 у вигляді графічних залежностей, за якими можна визначити питому частку цільової фракції корму в сукупному об'ємі готового продукту при використанні різних діаметрів сита (d , мм) та варіації динамічних режимів роботи дробарки, які визначаються кутовою швидкістю ротора.

Отже, аналіз графічних залежностей представлений на (рис. 6.14) показує,

що при використанні сепараційних поверхонь $d=1,0$ мм в діапазоні значень кутової швидкості ротора $\omega = 75 \dots 85 \text{ c}^{-1}$, можна отримати матеріал тонкої фракції (0,4...1,0 мм), що відповідає зоотехнічним вимогам – 70...74 % в сукупному об'ємі готового продукту. При $d=1,6$ мм та $\omega = 100 \dots 125 \text{ c}^{-1}$ вміст цільової тонкої фракції становив – 71...73 %, для $d=1,8$ мм – гранулометричний склад готового продукту відповідає зоотехнічним вимогам (70 %) лише при умові забезпечення кутової швидкості ротора $\omega = 125 \text{ c}^{-1}$. Для $d=1,4$ мм та при $\omega = 75 \dots 125 \text{ c}^{-1}$ було отримано придатний (70...72 %) для використання в годівлі свиней продукт подрібнення.

В процесі подрібнення зернового матеріалу до ступеня придатного для годівлі ВРХ (рис. 6.15) було встановлено, що використання маже всіх випробовуваних варіантів діаметрів сепараційної поверхні, окрім $d=4,0$ мм, дозволяє отримати 70-77 % готового продукту грубої фракції. Проте подальший аналіз впливу кутової швидкості на частку цільової фракції в загальному об'ємі корму показав, що використання поверхні розділення із діаметром отворів $d=2,75$ мм – дозволяє отримувати 73...75 % грубої фракції в межах найбільш широкого діапазону значень кутової швидкості ротора $\omega = 75 \dots 125 \text{ c}^{-1}$.

Подальше обґрунтування діапазонів значень режимних та конструктивних параметрів вібраційної дискової дробарки при застосуванні в технології приготування концентрованих кормів полягає у комплексному аналізі та виборі таких значень, які б узгоджувалися із раніше отриманими результатами АЧХ (рис. 6.13) та раніше прийнятим передумовам і припущеннями, та водночас дозволяли забезпечити отримання готового продукту, фракційний вміст якого відповідає зоотехнічним вимогам годівлі (рис. 6.14 і рис. 6.15). Отримані результати наведені на рис. 6.16.

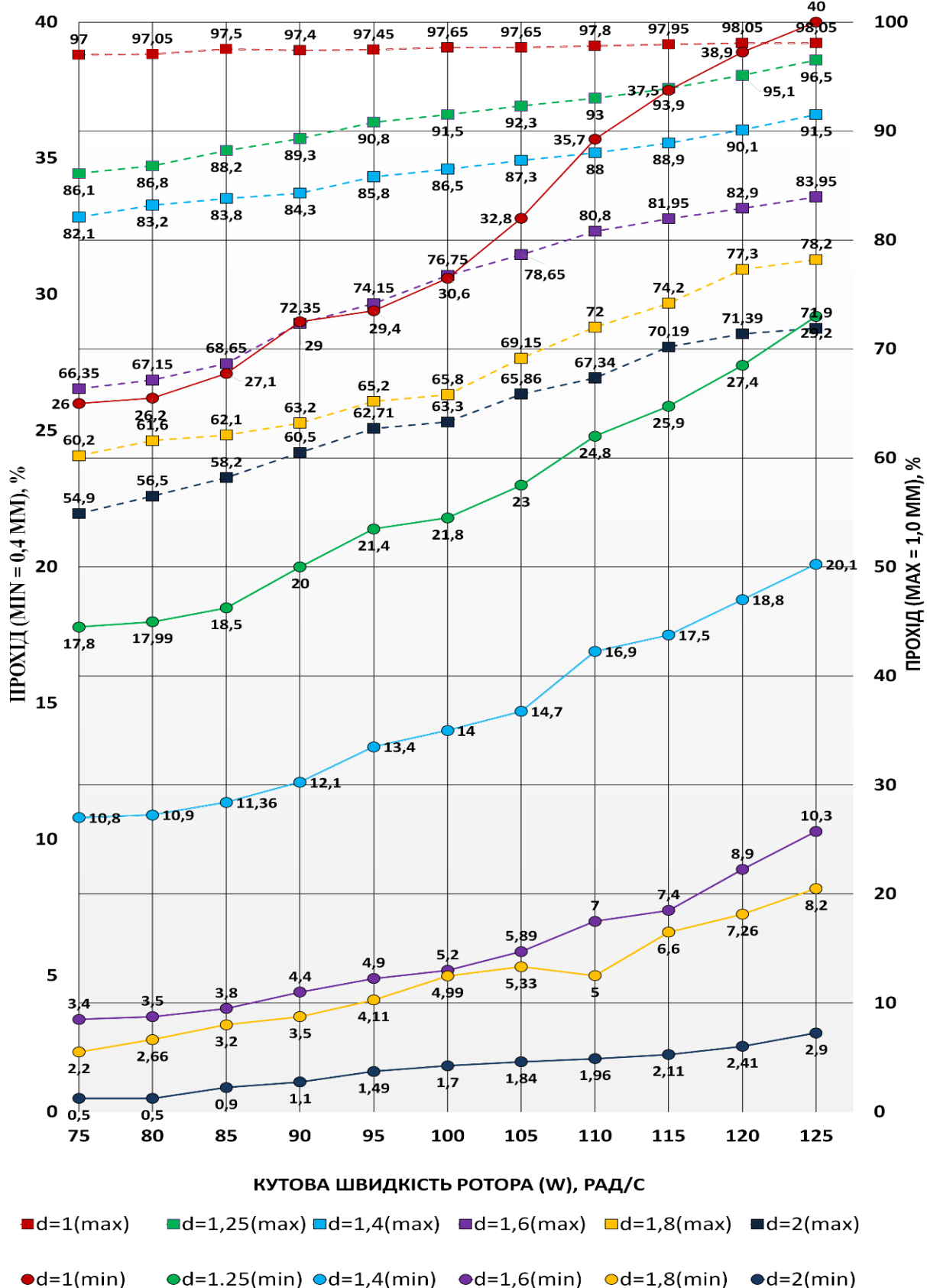


Рисунок 6.14. Результати досліджень фракційного складу корму в залежності від кутової швидкості ротора дробарки при використанні набору сит № 1 (межі контрольних розмірів $d_{\text{кmin}}=0,4$, $d_{\text{кmax}}=1,0$ мм)

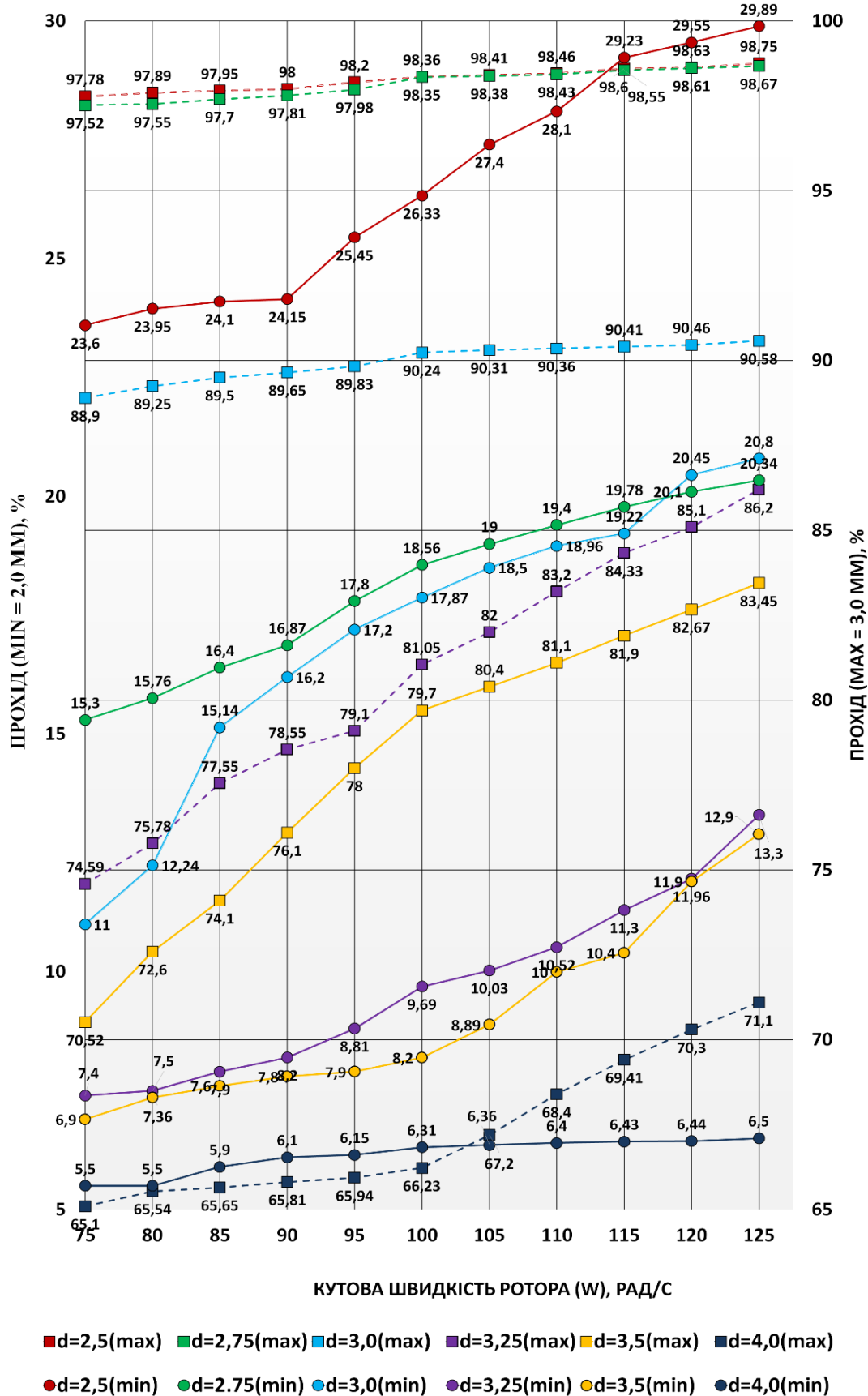


Рисунок 6.15. Результати досліджень фракційного складу корму в залежності від кутової швидкості ротора дробарки при використанні набору сит № 2 (межі контрольних розмірів $d_{kmin}=2,0$ та $d_{kmax}=3,0$ мм)

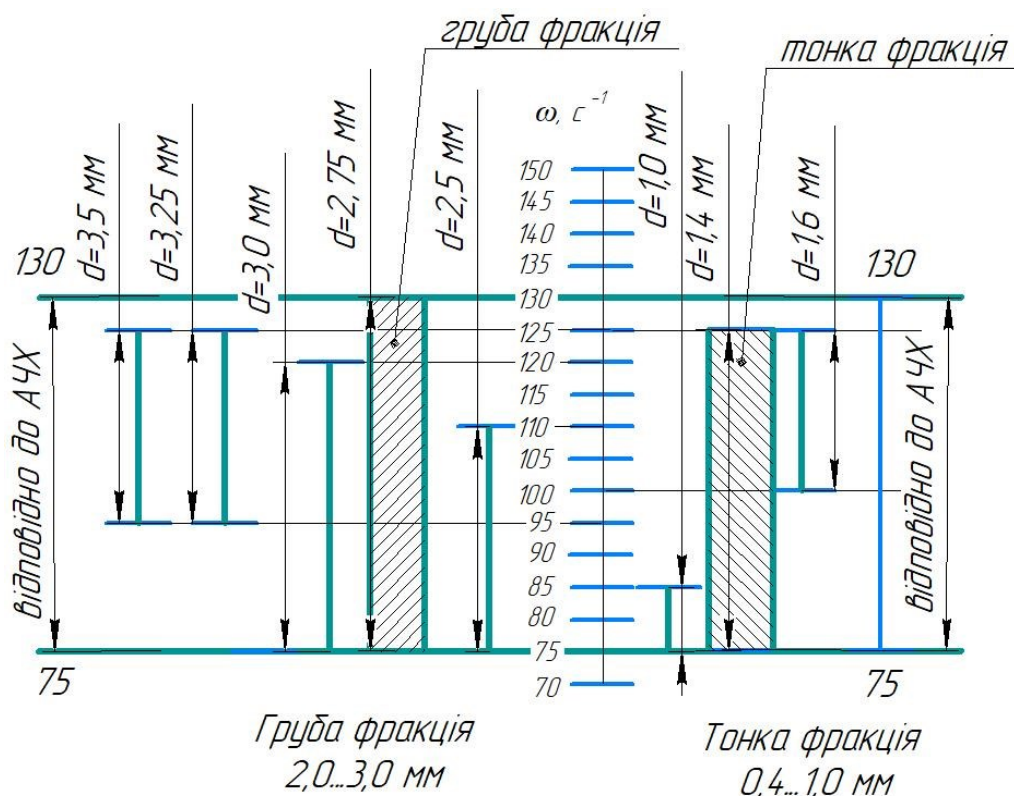


Рисунок 6.16. Діапазони значень режимних та конструктивних параметрів вібраційної дискової дробарки при застосуванні в технології приготування концентрованих кормів для свиней та ВРХ

Враховуючи результати досліджень АЧХ (рис. 6.13) та фракційного аналізу подрібненого матеріалу (рис. 6.14 та рис. 6.15) нами було встановлено, що для отримання корму для ВРХ найкращим варіантом буде використання сита із діаметром отворів $d=2.75$ мм та забезпечення значення кутової швидкості ротора в діапазоні $\omega = 75 \dots 130$ с^{-1} . Здійснювати тонке потрібнення концентрованого корму варто при значенні $\omega = 75 \dots 130$ с^{-1} використовуючи сепараційну поверхню із діаметром отворів $d=1.4$ мм.

6.5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СУШІННЯ ЗЕРНОБОБОВИХ ТРАВ В ТЕХНОЛОГІЇ КОРМОВИРОБНИЦТВА ДЛЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТВАРИН

Аналіз великої кількості кривих, які були отримані при різних режимах, дозволив визначити окремі залежності швидкості сушки в першому періоді і

загальну тривалість сушки шару люцернового жому від початкового сушильного потенціалу (рис. 6.17), питомої витрати повітря, питомого навантаження шару.

Встановлено що швидкість сушки шару в першому періоді прямо пропорційне початковому сушильному потенціалу повітря: $N \sim \Delta d$ що згоджується з рівняннями п.2.1.3. Зі збільшенням питомої витрати повітря яке продувається через шар матеріалу, спостерігається значне зменшення тривалості сушіння (рис. 6.18).

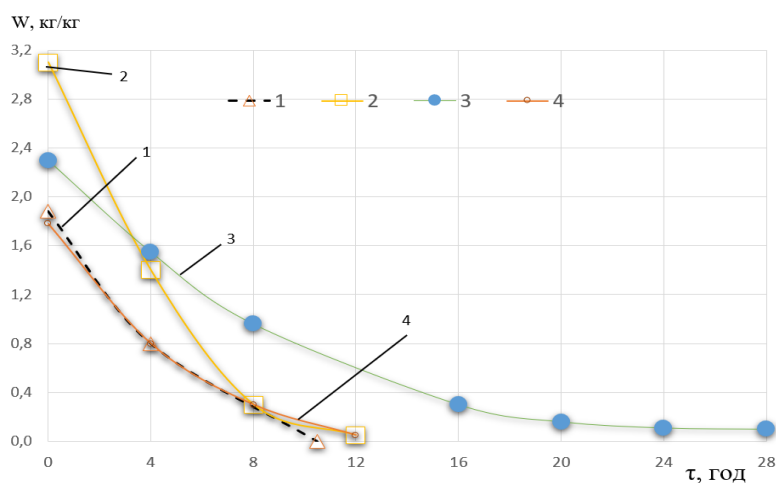


Рисунок 6.17. Кінетика сушіння від початкового сушильного потенціалу Δd (г.вол./кгс.п.) при $P_{ш}=21,0$ кг/м²; $G_{п}=500$ м³/год: 1 – 10,2; 2 – 4,5; 3 – 6,7; 4 – 10,0

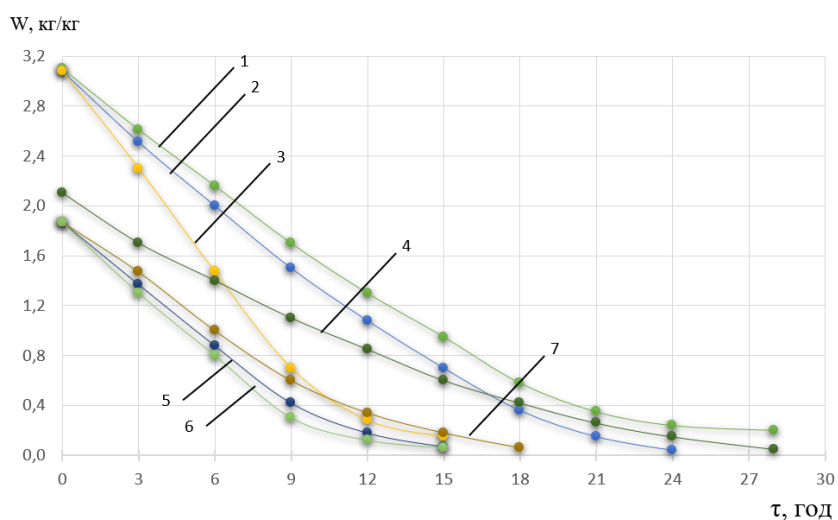


Рисунок 6.18. Кінетика сушіння від питомої витрати повітря $G_{п}$ (м³/год) при $P_{ш}=44,2$ кг/м²; $\Delta d = 10$ Г_{вол.}/КГ_{с.п.}: 1 – 500; 2 – 560; 3 – 1115; 4 – 340; 5 – 875; 6 – 910; 7 – 480.

Якщо в логарифмічних координатах побудувати залежність N від $G_n \rho_n$, то отримаємо пряму лінію, тангенс кута нахилу якої до осі абсцис дорівнює показнику ступеня K_1 рівнянь (п.2.1.3). В межах зміни G_n від 340 до 1300 м³/год $K_1 = 0,65$ тобто $N \sim \rho_n G_n^{0,65}$. При аналізі впливу питомого навантаження шару люцернового жому на швидкість сушки і тривалість процесу встановлено що нахил кривих сушки зі збільшенням питомого навантаження зменшується (рис. 6.19). Середня швидкість сушки при цьому різко зменшується (рис. 6.20).

Із рис. 5 видно що незалежно від режиму сушки залежності N від P являють собою паралельні прямі. Тангенс кута нахилу цих прямих до осі абсцис чисельно дорівнює показнику ступеня K_2 рівнянь (п.2.1.3) і становить $-0,972$, тобто наближається до -1 . Множник в квадратних дужках в цих рівняннях при зміні режимних параметрів шару і повітря зберігає постійне значення і дорівнює $0,0107$.

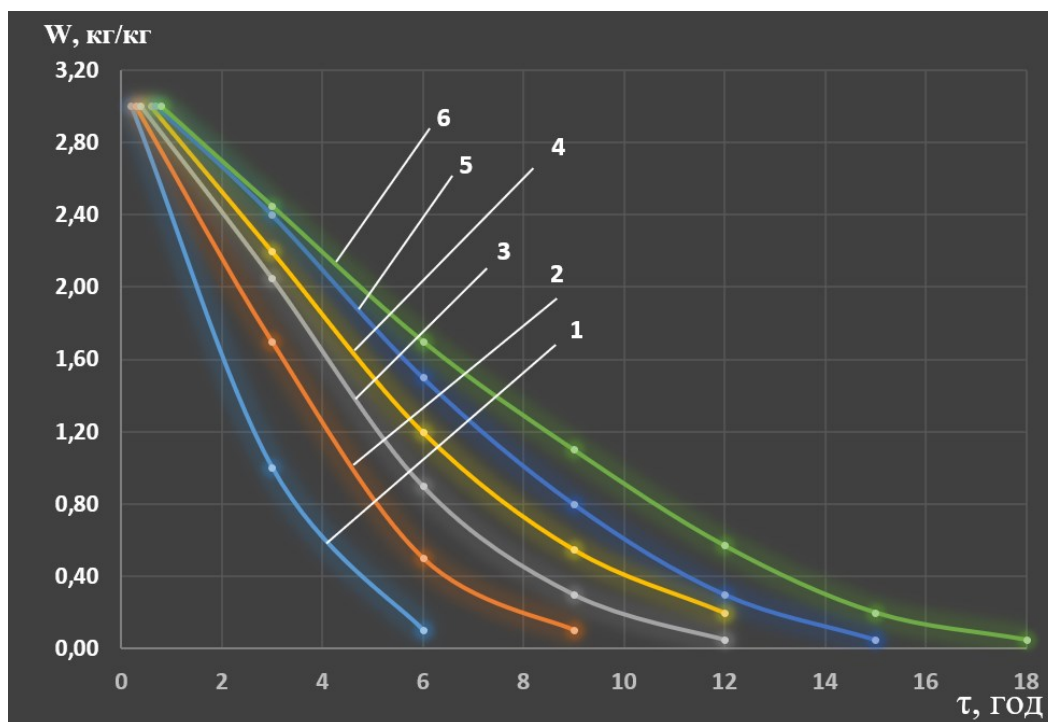


Рисунок 6.19. Кінетика сушіння від питомого навантаження матеріалу $P_{ш}$ (кг/м²) при $\Delta d = 10,1$ Гвол./кгс.п., $G_n = 500$ м³/год.: 1 – 13,8; 2 – 21,6; 3 – 28,9; 4 – 36,1; 5 – 43,5; 6 – 50,5

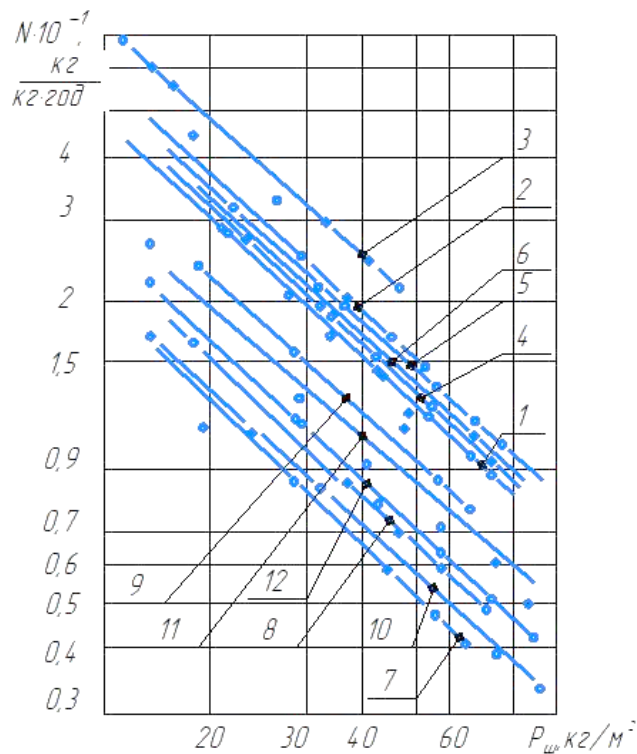


Рисунок 6.20. Залежність швидкості сушіння матеріалу в першому періоді від питомого навантаження

Таким чином, обробка експериментальних даних дозволила отримати наступне рівняння для визначення швидкості сушки шару в першому періоді.

$$N = \frac{0,0107}{P_{ш}} \Delta d_1 (G_n \rho_n)^{0,65} \quad (6.9)$$

Для подальших досліджень зробимо деякі перетворення: візьмемо інтеграл, а потім помножимо обидві частини рівняння на $N/(W_{кр} - W_2)$, і для $m=1$ отримаємо:

$$\frac{N\tau_2}{W_{кр} - W_2} = \frac{A}{W_{кр} - W_2} \ln \frac{W_{кр} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta \quad (6.10)$$

Для визначення коефіцієнтів A і β будували за експериментальними кривими тривалості сушіння для різних значень W_2 залежність величини $N\tau_2/(W_{кр} - W_2)$ як функції від $\left(\frac{1}{W_{кр} - W_2} \cdot \ln \cdot \frac{W_{кр} - W_p}{W_2 - W_p}\right)$ при $P_{ш} = \text{const}$.

В результаті отримали пряму лінію яка по осі ординат відсікає відрізок який дорівнює β , а тангенс кута нахилу цієї лінії до осі абсцис визначає коефіцієнт A .

Встановлено що на величину коефіцієнтів A та β впливає питоме навантаження матеріалу. Залежність цих коефіцієнтів від величини $P_{ш}$ наведена на (рис. 6.21).

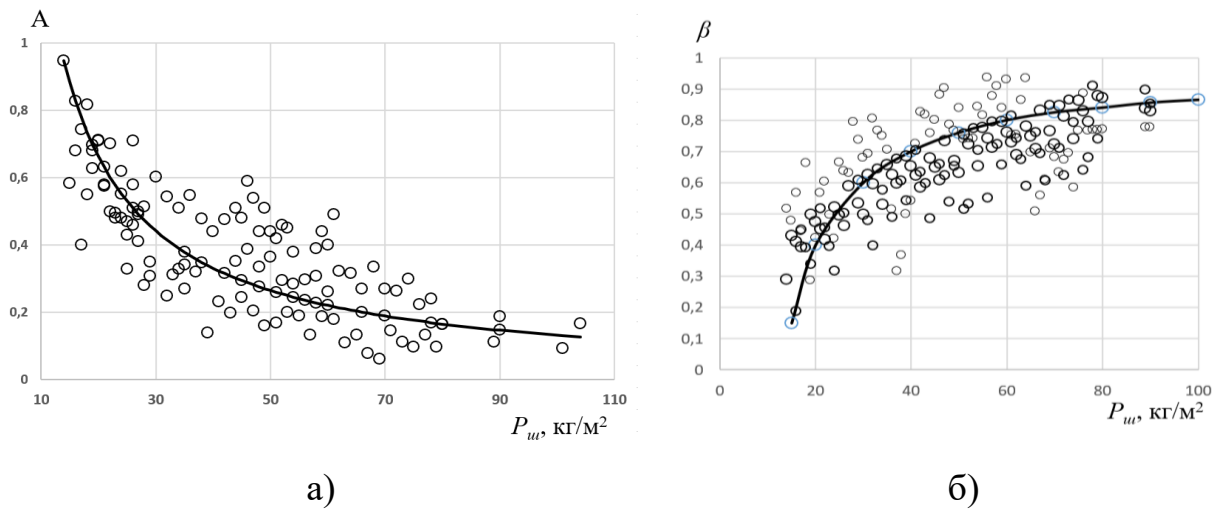


Рисунок 6.21. Залежність безрозмірних коефіцієнтів A (а) і β (б) від питомого навантаження матеріалу

Представлені на рис. 6.21 (а, б) залежності можна описати емпіричними залежностями:

$$A = 13,25 \cdot P_{ш}^{-1} \quad (6.11)$$

$$\beta = 0,24 (P_{ш} - 10)^{0,3} \quad (6.12)$$

Результати обробки експериментальних даних дозволяють отримати аналітичні залежності для визначення основних режимних параметрів процесу сушки люцернового жому товстому шару. Так, наприклад, необхідно питому витрату повітря можна визначити з наступної залежності:

$$G_n = \left\{ \frac{[W_0 - W_{kp} + \ln \frac{W_{kp} - W_p}{W_2 - W_p} + \beta (W_{kp} - W_2) \cdot P_{ш}]^{1,54}}{0,0107 \rho_n^{0,65} \Delta d_1 \cdot \tau} \right\} \quad (6.13)$$

Аналогічно можна отримати залежності для визначення часу сушки в першому і другому періоді для любого поточного вологовмісту W :

$$\tau_1 = \frac{P_{ш} (W_0 - W_{kp})}{0,0107 (\rho_n \cdot G_n)^{0,65} \Delta d_1} \quad (6.14)$$

$$\tau_2 = \frac{[13,5 \ln \frac{W_0 - W_p}{W - W_p} + 0,24 P_{ш} (P_{ш} - 10)^{0,3} (W_0 - W)]}{0,0107 (\rho_n G_n)^{0,65} \Delta d_1} \quad (6.15)$$

З рівняння (6.14) і (6.15) випливає, що тривалість процесу сушіння шару люцернового жому в першому періоді не залежить від властивостей матеріалу, а є функцією температури, вологості і питомої витрати повітря, а також питомого навантаження матеріалу на одиницю площі сушарки.

В другому періоду тривалість процесу сушки, окрім цих факторів, залежить від властивостей матеріалу, що враховується коефіцієнтами m , A , β .

Для перевірки отриманих аналітичних залежностей розрахункові данні по тривалості сушіння шару жому були порівняні з експериментальними. Встановлено, що відхилення експериментальних і розрахункових значень тривалості сушки знаходиться в межах $\pm 9\%$, що є прийнятним результатом для подібних процесів.

Таким чином, за відомими температурою і вологістю повітря, середній початковий вологовміст матеріалу, питома навантаження шару матеріалу на одиницю площі сушарки, час сушки, можна за допомогою залежності (6.13) визначити раціональну витрату повітря, яке продувається через шар. Так можна підібрати раціональне обладнання (вентилятор) при проектуванні установок для сушіння жому.

В аналітичних залежностях присутні також рівноважних W_p та критичний W_{kp} вологовміст. Про рівноважний вологовміст і способи його визначення автори вже писали [174]. Критичний вологовміст матеріалу можна визначити з виразу для зведеної швидкості сушки Ψ , яка при $W = W_{kp}$ дорівнює одиниці. З урахуванням вище зазначеного отримаємо:

$$W_{kp} = \frac{13,25}{P_{ш} - 0,24 P_{ш}(P_{ш} - 10)^{0,3}} + W_p \quad (6.16)$$

Як бачимо, критичний вологовміст (тобто вологовміст при якому закінчується перший період сушки і починається другий) не залежить від властивостей матеріалу.

ПІСЛЯМОВА

Дослідженнями встановлено, що врожайність зернобобових культур значно змінювалася залежно від погодних умов року та технологічних прийомів вирощування. Відтак, максимальна врожайність сої – від 2,43 т/ га у сорту Азимут до 2,67 т/га у сорту Голубка. Встановлено, що максимальний рівень прибавки врожаю на ділянках за передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації становив 15,23-16,28 %.

Індекс урожайності має параболічну залежність від інокулянта у межах певної концентрації ретарданту – якщо в контрольному варіанті індекс урожайності був низьким через нестачу поживних елементів і диференціацію незначної кількості генеративних органів, то за використання дворазової обробки посівів ретардантом хлормекват – хлорид: першої – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації, він знижувався шляхом накопичення значної маси побічної продукції.

Найбільший вихід протеїну мав сорт сої Голубка на рівні 1,07 т/га на ділянках за передпосівної обробки насіння бактеріальним препаратом Ризогумін та обробкою посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват – хлорид: першу – у фазу 3-го трійчастого листка, друга – у фазу бутонізації. Встановлено, що максимальний рівень прибавки врожаю при цьому становив 27,10 %.

У середньому за п'ять років досліджень вихід жиру був на рівні 0,40-0,61 т/га. Проте найбільший вихід жиру отримано за вирощування сорту Голубка – 0,61 т/га із прибавкою до контролю 27,87 %. Цей показник також значно залежав від погодних умов вегетаційного періоду сої.

Загальна вартість витрат насінневої продукції досліджуваних зернобобових культур залежала від технологічних прийомів, що були поставлені на вивчення. Максимальна вартість витрат насінневої продукції сортів сої була розрахована на варіанті, де у передпосівну обробку насіння використовували

бактеріальний препарат Ризогумін та двохкратну обробку посівів 0,75 % розчином ретарданту хлормекват- хлорид у фазу 3-й трійчастий листок та бутонізація у сорту Азимут – 17331 грн./га та сорту Голубка – 17468 грн./га.

На основі розробленої реологічної моделі дрібнодисперсного середовища було визначено функціональну залежність розподілу деформації від силових характеристик виконавчого органа та вологості матеріалу: для зерна відносної вологості $W=25-26\%$ в межах напружень $0...0,19$ МПа, спостерігається стрімке зростання відносної деформації до 0,08; при подальшому зростанні дотичних напружень $\tau=0,19...0,825$ МПа форма деформаційної кривої дещо змінюється та набуває вигляду вітки параболі, що свідчить про переважаючі пластичні деформації, які відбуваються в зернині, аж до її руйнування при 0,825 МПа та деформації 0,24.

Встановлено, що при збільшенні вологості матеріалу, значно зростають питомі енерговитрати для досягнення площі поверхні $7500...10000$ м²/м³: для здрібнення матеріалу з відносною вологістю $W=13-14\%$, енерговитрати становлять 650-800 Дж/кг, $W=25-26\%$ відповідно 3200-3700 Дж/кг, що дозволило уточнити технологічні режими досліджуваного процесу.

За результатами проведених експериментальних досліджень було отримано амплітудно-частотні та енергетичні характеристики приводного механізму вібраційної дискової дробарки, що за робочої частоти машини $\omega=100...125$ рад/с становлять: амплітуда коливань $A=2,8...3,3$ мм; віброприскорення $a=40...46$ м/с² та споживані енерговитрати, при подачі матеріалу $Q=100...600$ кг/год, становить: $N=740...1160$ Вт.

За результатами багатофакторного експерименту одержано математичні моделі у вигляді множинної регресії другого порядку, аналіз яких дозволив отримати оптимальні технологічні параметри роботи досліджуваного обладнання: робочий режим віброприскорення $a=32...38$ м/с²; геометричні параметри сепараційної поверхні $d=1,6...1,8$ мм; подача матеріалу $Q=342...480$ кг/год; відносна вологість матеріалу $W=17-18\%$; визначено, що за цих параметрів якісні та енергетичні характеристики процесу здрібнення набувають

своїх оптимальних значень: продуктивність становить 320...450 кг/год за споживаних енергетичних затрат 1,2...1,5 кВт на привод дробарки.

За результатами лабораторних досліджень встановлено діапазони значень режимних та конструктивних параметрів вібраційної дискової дробарки при застосуванні в технології приготування концентрованих кормів для згодовування конкретним групам сільськогосподарських тварин у відповідності до зоотехнічних вимог. Для ВРХ: сепараційна поверхня з діаметром отворів $d=2.75$ мм з кутовою швидкістю ротора $\omega =75...130$ с⁻¹– що дозволяє отримати 73...75 % грубої фракції в межах найбільш широкого діапазону. Для приготування концентрованих кормів для відгодівлі свиней варто використовувати сито з діаметром $d=1.4$ мм за кутової швидкості ротора $\omega =75...130$ с⁻¹, що забезпечить 70...72 % однорідності готового продукту.

За результатами лабораторних досліджень процесу сушіння зернобобових трав методом активного вентиляювання встановлено, що привалість сушіння в першому періоді не залежить від властивостей матеріалу, а тільки від параметрів шару і повітря. Також отримані математичні залежності для визначення раціональних параметрів процесу сушіння, які можна використати для підбору обладнання промислового зразка сушарки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Puyu V., Bakhmat M., Pansyryeva H., Khmelianchyshyn Y., Stepanchenko V., Bakhmat O. Social-and-Ecological Aspects of Forage Production Reform in Ukraine in the Early 21st Century. *European Journal of Sustainable Development*. 2021. Vol. 10, № 1. P. 221–228. DOI: 10.14207/ejsd.
2. Петриченко В.Ф., Корнійчук О.В. Стратегія розвитку кормовиробництва в Україні. *Корми і кормовиробництво*. Вінниця, 2012. Вип. 73. С. 3–10.
3. Петриченко В.Ф. Наукові основи виробництва і використання сої у тваринництві. *Корми і кормовиробництво*. 2012. Вип. 71. С. 3 – 11.
4. Петриченко В.Ф., Корнійчук О.В., Векленко Ю.А. Сталий розвиток лукопасовищного кормовиробництва в умовах змін клімату. *Вісник аграрної науки*, 2018. № 96(6). С. 25-32. <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk201806-04>.
5. Voronetska, I.S., Kravchuk, O.O., Petrychenko, I.I., Sprynchuk, N.A., & Korniyuchuk, H.V. (2020). Efficiency of the domestic feed market activity in Ukraine. *Feeds and Feed Production*, 90, 191-204. doi: 10.31073/kormovyrobnytstvo202090-17
6. Побережна А.А. Соевий шрот — основний високобілковий інгредієнт для комбікормів Пропозиція, 2008. URL: <https://propozitsiya.com/ua/soieviy-shrot-osnovniy-visokobilkoviy-ingrediientdlya-kombikormiv>.
7. Abay, K.A., Breisinger, C., Glauber, J., Kurdi, S., Laborde, D. & Siddig, K. (2023). The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. *Global Food Security*, 36, article number 100675.
8. Adegbeye, M.J., Reddy, P.R.K., Obaisi, A.I., Elghandour, M.M.M.Y., Oyebamiji, K.J., Salem, A.Z.M., Morakinyo-Fasipe, O.T., Cipriano-Salazar, M. & Camacho-Díaz, L.M. (2020). Sustainable agriculture options for production, greenhouse gasses and pollution alleviation, and nutrient recycling in emerging and transitional nations - an overview. *Journal of Cleaner Production*, 242, article number 118319. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118319.
9. Horrocks R. Dwain and Vallentine John F. Harvested Forages. Part IV:

Harvesting and storing forage crops 1999. Pp.339-351. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-356255-5.X5022-6>.

10. Lage C.F.A., Räisänen S.E., Stefenoni H., Melgar A., et al. Lactational performance, enteric gas emissions, and plasma amino acid profile of dairy cows fed diets with soybean or canola meals included on an equal protein basis. *Journal of Dairy Science*. Received 6 May 2020, Accepted 27 October 2020, Available online 15 January 2021. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18851>.

11. Mazur V.A., Didur I.M., Pantsyreva H.V., Telekalo N.V. Energy-economic efficiency of growth of grain-crop cultures in conditions of right-bank forest-steppe zone of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, № 4. P. 26–33.

12. Vdovenko S.A., Pantsyreva G.V., Palamarchuk I.I., Lytvyniuk H.V. Symbiotic potential of snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.) depending on biological products in agrocoenosis of the Right-Bank Forest-steppe of Ukraine. *Ukrainian journal of Ecology. Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, № 3. P. 309–314.

13. Vdovenko S.A., Pantsyreva G.V., Palamarchuk I.I., Lytvyniuk H.V. Symbiotic potential of snap beans (*Phaseolus vulgaris* L.) depending on biological products in agrocoenosis of the Right-Bank Forest-steppe of Ukraine. *Ukrainian journal of Ecology. Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, № 3. P. 309–314.

14. Petrychenko, V., Likhochvor, V., Voronetska, I., Fedoryshyna, L., & Petrychenko, I. (2021). High protein feed market: Current trends and prospects for Ukraine. *Financial and Credit Activities: Problems of Theory and Practice*, 1(36), 359-368.

15. Mazur V., Pantsyreva H., Ovcharuk O., Mazur K., Myalkovsky R., Tkach O., Verholiuk S. Features of the functioning of the assimilation apparatus of lupinus albus depending on the use of eco-biological preparations. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*. 2023. Vol. 13 (2). P. 74–88.

16. Didur I., Bakhmat M., Chynchyk O., Pantsyreva H., Telekalo N., Tkachuk O. Substantiation of agroecological factors on soybean agrophytocenoses by analysis of variance of the Right-Bank Forest-Steppe in Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10, № 5. P. 177–182. DOI: 10.15421/2020_206

17. Alaru, M., Talgre, L., Ereemeev, V., Tein, B., Luik, A., Nemvalts, A. & Loit, E. 2014. Crop yields and supply of nitrogen compared in conventional and organic farming systems. *Agricultural and Food Science* 23(4), 317–326. doi: 10.23986/afsci.46422
18. Babich A.O., Petrychenko V.F., Kulyk M.F., Makarenko P.S. 1998. Methods of conducting experiments on fodder production and animal feeding. Kyiv: Agrarian Science, 78 p.
19. Bakhmat M., Padalko T., Krachan T., Tkach O., Pansyryeva H., Tkach L. 2023. Formation of the Yield of *Matricaria recutita* and Indicators of Food Value of *Sychorium intybus* by Technological Methods of Co-Cultivation in the Interrows of an Orchard. *Journal of Ecological Engineering*. Vol. 24, Issue 8. P. 250-259. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/166553>
20. Monarkh V.V., Pansyryeva H.V. Stages of the Environmental Risk Assessment. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 9, № 4. P. 484-492. https://doi.org/10.15421/2019_779
21. Hnatiuk T.T., Zhitkevich N.V., Petrychenko V.F., Kalinichenko A.V., Patyka V.P. 2019. Soybean Diseases Caused by Genus *Pseudomonas* Phytopathenes Bacteria. *Mikrobiol. Z.* 81(3):68-83. <https://doi.org/10.15407/mikrobiolj81.03.068>
22. Pawlewicz, A., Brodzinska, K., Zvirbule, A. & Popluga, D. 2020. Trends in the development of organic farming in Poland and Latvia compared to the EU. *Rural Sustainability Research*, 43(388), 1–8. <https://doi.org/10.2478/plua-2020-0001>
23. Jansson, T., Andersen, H.E., Gustafsson, B.G., Hasler, B., Höglind, L. & Choi, H. 2019. Baltic Sea eutrophication status is not improved by the first pillar of the European Union Common Agricultural Policy. *Regional Environmental Change* 19(8), 2465–2476. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01559-8>
24. Keres, I., Alaru, M., Ereemeev, V., Talgre, L., Luik, A. & Loit, E. 2020. Long-term effect of farming systems on the yield of crop rotation and soil nutrient content. *Agricultural and Food Science* 29(3), 210–221. doi: 10.23986/afsci.85221
25. Kupchuk I. M., Solona O. V., Derevenko I. A., Tverdokhlib I. V. Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher.

INMATEH–Agricultural Engineering. 2018. Vol. 55, № 2. P. 113–120.

26. Mazur V.A., Mazur K.V., Pantsyreva H.V., Alekseev O.O. Ecological and economic evaluation of varietal resources *Lupinus albus* L. in Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2018. Vol. 8, № 4. P. 148–153.

27. Mazur V.A., Pantsyreva H.V., Mazur K.V., Didur I.M. Influence of the assimilation apparatus and productivity of white lupine plants. *Agronomy Research*. 2019. Vol. 17, № 1. P. 206–219. DOI <https://doi.org/10.15159/AR.19.024>

28. Mazur V.A., Mazur K.V., Pantsyreva H.V. Influence of the technological aspects growing on quality composition of seed white lupine (*Lupinus albus* L.) in the Forest Steppe of Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 9, № 1. P. 50-55.

29. Mazur V.A., Didur I.M., Myalkovsky R.O., Pantsyreva H.V., Telekalo N.V., Tkach O.O. The productivity of intensive pea varieties depending on the seeds treatment and foliar fertilizing under conditions of right-bank forest-steppe Ukraine. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2020. Vol. 10, № 1. P. 101–105. DOI: 10.15421/2020_16

30. Mazur V.A., Myalkovsky R.O., Pantsyreva H.V., Mazur K.V., Alekseev O.O. Influence of the photosynthetic productivity and seed productivity of white lupine plants. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. Vol. 9, № 4. P. 665–670.

31. Damborg V.K., Jensen S.K., Weisbjerg M.R., Adamsen A.P., Stødkilde L. Screw-pressed fractions from green forages as animal feed: Chemical composition and mass balances. *Animal Feed Science and Technology*. 2020. Vol. 261.

32. Hansen M., Andersen C.A., Jensen P.R., Hobley T.J. Scale-up of alfalfa (*Medicago sativa*) protein recovery using screw presses. *Foods*. 2022. Vol. 11 (20). P. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11203229>.

33. Zubko V., Plavynska S., Plavynskyi V., Plavynska O., Saienko A., Roubik H. Inactivation of anti-nutrients in soybeans via micronisation. *Research in Agricultural Engineering*. 2022. Vol. 68, № 3. P. 157-167. DOI: 10.17221/2/2021-RAE.

34. Solona O., Kupchuk I. Dynamic synchronization of vibration exciters of the three-mass vibration mill *Przegląd Elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96, № 3.

P. 161–165. DOI: 10.15199/48.2020.03.35

35. Honcharuk I., Kupchuk I., Solona O., Tokarchuk O., Telekalo N. Experimental research of oscillation parameters of vibrating-rotor crusher. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, № 3. P. 97–100. DOI: 10.15199/48.2021.03.19.

36. Mazur V., Tkachuk O., Pansyryeva H., Kupchuk I., Mordvaniuk M., Chynchyk O. Ecological suitability peas (*Pisum Sativum*) varieties to climate change in Ukraine. *Agraarteadus*. 2021. Vol. 32, № 2. P. 276–283. DOI: 10.15159/jas.21.26

37. Kupchuk I., Yaropud V., Hraniak V., Poberezhets Ju., Tokarchuk O., Hontar V., Didyk A. Multicriteria compromise optimization of feed grain grinding process. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2021. Vol. 97, № 11. P. 179–183. DOI: 10.15199/48.2021.11.33

38. Poberezhets Ju., Chudak R., Kupchuk, I., Yaropud V., Rutkevych V. Effect of probiotic supplement on nutrient digestibility and production traits on broiler chicken. *Agraarteadus*. 2021. Vol. 32, № 2. P. 296–302. DOI: 10.15159/jas.21.28

39. Paziuk V., Vyshnevskiy V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Substantiation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2021. Vol. 14 (63), № 2. P. 137–146.

40. Honcharuk I., Kupchuk I., Yaropud V., Kravets R., Burlaka S., Hraniak V., Poberezhets Ju., Rutkevych V. Mathematical modeling and creation of algorithms for analyzing the ranges of the amplitude-frequency response of a vibrating rotary crusher in the software Mathcad. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98, № 9. P. 14–20. DOI: 10.15199/48.2022.09.03

41. Polievoda Y., Kupchuk I., Hontaruk Y., Furman I., Mytko M. Method for determining homogeneity of fine dispersed mixtures based on the software analysis of photo cross-cut of the sample. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98, № 11. P. 109–113. DOI: 10.15199/48.2022.11.20.

42. Bandura V., Bezbah I., Kupchuk I., Fialkovska L. Innovative methods of drying rapeseeds using microwave energy. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2023. Vol. 26, Iss. 2. P. 217–230.

43. Mazur O., Kupchuk I., Voloshyna O., Matviiets V., Matviiets N., Mazur O. Genetic determination of elements of the soybean yield structure and combining ability of hybridization components. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 2023. Vol. 26, № 2. P. 163–178. DOI: 10.15414/afz.2023.26.02.163-178

44. Spirin A., Kupchuk I., Tverdokhlib I., Polievoda Yu., Kovalova K., Dmytrenko V. Substantiation of modes of drying alfalfa pulp by active ventilation in a laboratory electric dryer. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98, № 5. P. 11–15. DOI: 10.15199/48.2022.05.02

45. Mostovenko V., Mazur O., Didur I., Kupchuk I., Voloshyna O., Mazur O. Garden pea yield and its quality indicators depending on the technological methods of growing in conditions of Vinnytsia region. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 2022. Vol. 25, № 3. P. 226–241. DOI: 10.15414/afz.2022.25.03.226-241

46. Poberezhets J., Kupchuk I., Yaropud V., Burlaka S. Digestibility of nutrients and broiler chicken productivity under the action of probiotic entero-active. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2021. № 4 (299). С. 182–186. DOI:10.31891/2307-5732-2021-299-4-182-187

47. Купчук І.М., Дідик А.М. Експериментальна оцінка якості подрібнення зернових кормів залежно від конструкційних параметрів та режимів експлуатації вібраційної дискової дробарки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2022. № 2 (105). С. 33–44. DOI: 10.37128/2306-8744-2022-2-4

48. Kupchuk I., Poberezhets Yu., Kravets R. Research of the rheological parameters of feed grain in the process of the combined impact-cutting grinding. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2021. № 3 (114). С. 49–58.

49. Янович В.П., Купчук І.М., Соломко І.В. Патент на корисну модель України. Спосіб подрібнення сипкої сировини. №103864. Публікація відомостей 12.01.2016, Бюл. № 1.

50. Купчук І.М. Розроблення конструктивної схеми керованого вібраційного приводу для транспортних і технологічних машин АПК. *Сучасні моделі розвитку агропромислового виробництва: виклики та перспективи*: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції, Глухів, 27 вересня 2018 р. С. 88-91.

51. Купчук І.М., Шаргородський С.А., Телекало Н.В., Токарчук О.А. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v.1.0» («Harvesting cereals v.1.0»): Свідоцтво № 100674 від 17.11.2020. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюл. № 62, 2021.

52. Купчук І.М. Визначення теоретичної роботи руйнування зерна кукурудзи. *Сучасні проблеми землеробської механіки*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції. Київ, 17–19 жовтня 2018 р. С. 35-37.

53. Янович В.П., Купчук І.М., Давидюк Н.О., Бокатюк М.В. Патент на корисну модель України. Спосіб змішування сипких матеріалів. №103892. Публікація відомостей 12.01.2016, Бюл. № 1

54. Купчук І.М. Експериментальне дослідження якісних показників процесу подрібнення фуражного зерна. *Молодь і технічний прогрес в АПК. Інноваційні розробки в аграрній сфері*: матеріали міжнародної науково-практичної конференції, Харків, 22 березня 2019 р. С. 82-83.

55. Купчук І.М. Дослідження процесу подрібнення зерна кукурудзи при виробництві комбікормів. *Молодий вчений модерну – фундамент розвитку освіти, науки та бізнесу в Україні*: матеріали всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції, Дніпро, 20 травня 2020 р. С. 63-66.

56. Солоня О.В., Янович В.П., Купчук І.М. Патент на корисну модель України. Вібророторна дробарка. №124326. Публікація відомостей 10.04.2018, Бюл. №7.

57. Mazur O., Kupchuk I., Biliavska L., Biliavskiy Yu., Voloshyna O., Mazur O., Razanov S. Ecological plasticity and stability of soybean varieties under climate change in Ukraine. *Acta Fytotechnica et Zootechnica*. 2023. Vol. 26, № 4. P. 398–411.

DOI: 10.15414/afz.2023.26.04.398-411

58. Poberezhets J.M., Yaropud V.M., Kupchuk I.M., Kolechko A.V., Rutkevych V.S., Hraniak V.F., Burlaka S.A., Voitsitskyi O.V. Efficiency of a food supplement containing *Saccharomyces cerevisiae* culture in the diet of broiler chickens. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2023. 14 (3). P. 354–357.

59. Чудак Р.А., Побережець Ю.М., Шпаковська (Льотка) Г.І., Купчук І. М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Монографія «Сучасні кормові добавки у годівлі птиці». Свідоцтво № 113764 від 13.07.2022; заяв. № с202202596 від 23.06.2022.

60. Мазур В.А., Гончарук І.В., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Телекало Н.В., Купчук І.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Монографія «Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур» : Свідоцтво № 104195 від 21.04.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

61. Pantsyreva H., Mazur K. Research of early rating soybean varieties on technology and agroecological resistance. *Theoretical and practical aspects of the development of modern scientific research: scientific monograph. Part 2*. Riga, Latvia: Publishing House «Baltija Publishing», 2022. P. 84–108. DOI: 10.30525/978-9934-26-195-4-182

62. Мазур В.А., Ткачук О.П., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Особливості технології вирощування малопоширених зернобобових культур: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2021. 172 с.

63. Мазур В.А., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Алексєєв О.О. Сортові ресурси зернобобових культур в Україні: сучасний стан і перспективи використання: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2022. 196 с.

64. Мазур В.А., Ткачук О.П., Панцирева Г.В. Сортові ресурси сої в Україні. Вінниця. ТОВ «ТВОРИ», 2023. 220 с.

65. Мазур В.А., Клименко М.О., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Демчук О.А. Ріст, розвиток та продуктивність гороху за обробки його посіву структурованою водою. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 4 (23). С. 165-175. DOI: 10.37128/2707-5826-2021-4-14

66. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Дідур І.М., Прокопчук В.М. Люпин білий. Генетичний потенціал та його реалізація у сільськогосподарське виробництво: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2018. 231 с.

67. Заболотний Г.М., Мазур В.А., Циганська О.І., Дідур І.М., Циганський В.І., Панцирева Г.В. Агробіологічні основи вирощування сої та шляхи максимальної реалізації її продуктивності: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2021. 276 с.

68. Мазур В.А., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Купчук І.М. Соя в інтенсивному землеробстві: монографія. Вінниця: Нілан-ЛТД, 2022. 220 с.

69. Мазур В.А., Мазур К.В., Панцирева Г.В. Виробництво і експорт зернових та зернобобових культур в умовах військового стану. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 3 (26). С. 66–76. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-3-5

70. Мазур В.А., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Верхолюк С.Д. Технологічність, екологічність та продуктивність середньоранньостиглих сортів сої. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2022. № 1 (95). DOI: [10.31548/dopovid2022.01.006](https://doi.org/10.31548/dopovid2022.01.006)

71. Мазур В.А., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Мордванюк М.О. Енергетична ефективність технологічних прийомів вирощування нуту в умовах зміни клімату. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 2 (25). С. 5–13. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-2-1

72. Honcharuk I., Kupchuk I. Study of mechanical-rheological parameters of feed grain during to the impact-cutting loading. In: *Theoretical and practical aspects of the development of modern scientific research: scientific monograph*. Part 2. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 1–28.

73. Гончарук І.В., Купчук І.М., Яропуд В.М., Бурлака С.А., Руткевич В.С., Войціцький О.В. Вібраційна конусна дробарка з керованим віброприводом. Патент на корисну модель № 154529. Публікація відомостей 22.11.2023, Бюл.№ 47.

74. Мазур В.А., Дідур І.М., Мордванюк М.О., Панцирева Г.В. Спосіб підвищення продуктивності вирощування нуту звичайного. Патент на корисну модель № 152887. Публікація відомостей 26.04.2023, Бюл. № 17.

75. Панцирева Г.В. Вплив технологічних прийомів вирощування на зернову продуктивність зернобобових культур в умовах Правобережного Лісостепу України. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2020. № 5 (87). DOI: [10.31548/dopovidi2020.05.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi2020.05.003)

76. Мазур В.А., Гончарук І.В., Панцирева Г.В., Телекало Н.В. Агроекологічне обґрунтування технологічних прийомів вирощування зернобобових культур: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2020. 192 с.

77. Pantsyreva H., Stroyanovskiy V., Mazur K., Chynchyk O., Myalkovsky R. The influence of bio-organic growing technology on the productivity of legumins. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. Vol. 11, № 3. P. 35–39. DOI: 10.15421/2021_139

78. Ткачук О.П., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Екологічна оцінка середньостиглих і середньо пізньостиглих сортів сої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 1 (24). С. 5–15. DOI: 10.37128/2707-5826-2022-1-1.

79. Mazur V., Tkachuk O., Pantsyreva H., Demchuk O. Quality of pea seeds and agroecological condition of soil when using structured water. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, № 7. P. 53–60. DOI: 10.48077/scihor.24(7).2021.53-60

80. Mazur V., Tkachuk O., Pantsyreva H., Kupchuk I., Mordvaniuk M., Chynchyk O. Ecological suitability peas (*Pisum Sativum*) varieties to climate change in Ukraine. *Agraarteadus*. 2021. Vol. 32, № 2. P. 276–283. DOI: 10.15159/jas.21.26

81. Bondarenko V., Havrylianchik R., Ovcharuk O., Pantsyreva H., Krusheknyckiy V., Tkach O., Niemec M. Features of the soybean photosynthetic productivity indicators formation depending on the foliar nutrition. *Ecology, Environment and Conservation*. 2022. Vol. 28, Aug Suppl. Issue. P. 20–26.

82. Панцирева Г.В. Фотосинтетична і насіннева продуктивність люпину білого залежно від інокуляції та стимулятора росту в умовах Правобережного Лісостепу України. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка*. 2018. Вип. 29. С. 47–53.

83. Honcharuk I., Pantsyreva H. Efficiency of growing legumes crops in Ukraine. *Integration of traditional and innovation processes of development of modern science: collective monograph*. Riga, Latvia: Publishing House «Baltija Publishing», 2020. P. 42–65. DOI: 10.30525/978-9934-26-021-6-31

84. Mazur V., Didur I., Tkachuk O., Pantsyreva H., Ovcharuk V. Agroecological stability of cultivars of sparsely distributed legumes in the context of climate change. *Scientific Horizons*. 2021. Vol. 24, № 1. P. 54–60.

85. Панцирева Г.В. Вплив елементів технології на функціонування асиміляційного апарату люпину білого. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2018. Вип. 3. С. 55–61.

86. Didur I.M., Pantsyreva H.V., Telekalo N.V. Agroecological rationale of technological methods of growing legumes. *The scientific heritage*. 2020. Vol. 1, № 52. P. 3–7.

87. Kupchuk I., Telekalo N. Substantiation of the constructive and mode parameters of vibratory disc crusher for the farm animals compound feeds production. In: *Development of scientific, technological and innovation space in Ukraine and EU countries: collective monograph*. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2021. P. 166–194.

88. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Дідур І.М. Спосіб підвищення продуктивності люпину білого. Патент на корисну модель № 146538. Публікація відомостей 24.02.2021, Бюл. № 8.

89. Pantsyreva H., Aliksieiev O. Study of soil conservation technology and environmental stability of rural areas taking into account limited resources and climate change. *Agro-ecological potential of soil cover of Vinnytsia region: scientific monograph*. Riga, Latvia: Publishing House «Baltija Publishing», 2023. P. 91–118. DOI: 10.30525/978-9934-26-290-6-5

90. Mazur V., Pansyryeva H. Scientific aspects of technologies of growing, storage and processing of legumins. *Development of scientific, technological and innovation space in Ukraine and EU countries: collective monograph*. Riga, Latvia: Publishing House «Baltija Publishing», 2021. P. 195–220.

91. Мазур В.А., Панцирева Г.В. Рід *Lupinus L.* в Україні: генофонд, інтродукція, напрями досліджень та перспективи використання: монографія. Вінниця: ВНАУ, 2020. 200 с.

92. Pansyryeva H., Mazur K. The state of the soil cover of Ukraine in the context of bio-organic technologies for growing agricultural crops. *Agro-ecological potential of soil cover of Vinnytsia region: scientific monograph*. Riga, Latvia: Publishing House «Baltija Publishing», 2023. P. 119–142.

93. Панцирева Г.В. Економічна оцінка технології вирощування представників роду *Lupinus L.* *Перспективні напрями розвитку економіки, обліку, фінансів та права: теорія і практика: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції*. Полтава: ЦФЕНД, 2019. Ч. 1. С. 38–39.

94. Панцирева Г.В. Економічна ефективність вирощування люпину білого в умовах Правобережного Лісостепу України. *Сучасний стан та перспективи розвитку економіки, обліку, менеджменту, фінансів та права: збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції*. Полтава: ЦФЕНД, 2019. Ч. 5. С. 45–47.

95. Панцирева Г.В. Вплив кліматичних умов на врожайність рослин люпину білого. *Кліматичні зміни та сільське господарство. Виклики для аграрної науки та освіти: збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції за участю ФАО*. Київ, 2018. С. 142–145.

96. Панцирева Г.В. Ріст, розвиток і продуктивність сортів люпину білого в умовах Правобережного Лісостепу України. *Вісник Львівського національного університету природокористування «Агрономія»*. 2019. № 23. С. 103–111. DOI: 10.31734/agronomy2019.01.103

97. Мазур В.А., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Обґрунтування адаптивної сортової технології вирощування зернобобових культур в Правобережному Лісостепу України. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. № 3 (18). С. 5–16. DOI: 10.37128/2707-5826-2020-3-1

98. Мазур В.А., Дідур І.М., Ткачук О.П., Панцирева Г.В. Агроекологічна стійкість сортів квасолі звичайної до несприятливих умов вегетації. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2021. № 2 (90). DOI: 10.31548/dopovidi2021.02.006

99. Панцирева Г.В. Особливості водоспоживання рослин люпину білого в умовах Правобережного Лісостепу України. *Вісник Львівського національного університету природокористування «Агронімія»*. 2020. № 24. С. 72–77. DOI: 10.31734/agronomy2020.01.072

100. Панцирева Г.В. Сортові ресурси зернобобових культур в Україні: сучасний стан та перспективи використання. *Сільське господарство та лісівництво*. 2020. № 2 (17). С. 30–41. DOI: 10.37128/2707-5826-2020-2-3.

101. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Мордванюк М.О., Затолочний О.В. Вплив технологічних прийомів вирощування на польову схожість та виживаність нуту в умовах правобережного Лісостепу України. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 3 (22). С. 5–13. DOI: 10.37128/2707-5826-2021-3-1

102. Мазур В.А., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Мордванюк М.О. Симбіотична діяльність рослин нуту залежно від технологічних прийомів вирощування. *Корми і кормовиробництво*. 2021. Вип. 92. С. 62–71.

103. Мазур В.А., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Мордванюк М.О. Симбіотична діяльність рослин нуту залежно від технологічних прийомів вирощування. *Корми і кормовиробництво*. 2021. Вип. 92. С. 62–71. DOI: 10.31073/kormovyrobnytstvo202192-06

104. Pansyreva H.V. Influence of the assimilation apparatus and productivity of white lupine plants. International scientific-practical conference. *Agronomy Research. Biosystems Engineering*, May 6, 2020, Estonia, Tartu. P. 1–2.

105. Pantsyreva H., Mazur K. The influence of bio-organic growing technology on the productivity of legumes. *Colloquium-journal*. 2021. № 12 (99). P. 2. P. 24–30. DOI: 10.24412/2520-6990-2021-1299-24-30

106. Панцирева Г.В. Функціонування асиміляційного апарату та продуктивність рослин люпину білого. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2019. № 5 (81). DOI: 10.31548/dopovidi2019.05.004

107. Панцирева Г.В. Біоенергетична ефективність вирощування сої. *Meaningful artificial intelligence – 2024: збірник матеріалів круглого столу*, м. Київ, 26 січня 2024 р. Київ: ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2024. С. 33–34.

108. Панцирева Г.В. Особливості експорту зернобобових культур в умовах військового стану. Міжнародна наукова конференція «*Радіаційна і техногенно-екологічна безпека людини та довкілля: стан, шляхи і заходи покращення*», 16 червня 2023 р., Миколаїв. С. 68–72.

109. Панцирева Г.В. Сортові ресурси зернобобових культур в Україні: сучасний стан та перспективи використання. Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих вчених та студентів «*Сучасні тенденції розвитку агропромислового сектора економіки в умовах конвергенції*», 14-15 травня 2020 р., Вінниця, ВНАУ. С. 1–3

110. Панцирева Г.В. Особливості використання нуту у харчовій промисловості. Всеукраїнська науково-практична конференція «*Інноваційні технології та підвищення ефективності виробництва харчових продуктів*», 20 жовтня 2023 р., Умань. С. 12–14.

111. Панцирева Г.В. Обґрунтування адаптивної сортової технології вирощування зернобобових культур в Правобережному Лісостепу України. Міжнародна науково-практична конференція «*Використання інноваційних технологій в агрономії*», 3-4 червня 2020 р., Вінниця, ВНАУ. С. 1–2.

112. Гончар М.В., Панцирева Г.В. Особливості вирощування нуту в умовах військового стану. Міжнародна наукова конференція «*Радіаційна і техногенно-екологічна безпека людини та довкілля: стан, шляхи і заходи покращення*», 16 червня 2023 р., Миколаїв. С. 26–29.

113. Панцирева Г.В. Особливості формування продуктивності зернобобових культур в умовах Правобережного Лісостепу України. Всеукраїнська науково-практична конференція *«Напрями досліджень в аграрній науці: стан та перспективи»*, 5-6 листопада 2020 р., Вінниця, ВНАУ. С. 1–2.

114. Гончар М.В., Панцирева Г.В. Характеристика сортів нуту за комплексом господарсько-цінних ознак. Міжнародна науково-практична конференція *«Сталий ланцюг харчування та безпека крізь науку, знання та бізнес»*, 18 травня 2023 р., Харків. С. 176–177.

115. Панцирева Г.В. Дослідження екологічної стійкості та зернової продуктивності середньостиглих сортів сої в Україні. Всеукраїнська науково-практична конференція *«Молодий вчений модерну – фундамент розвитку освіти, науки та бізнесу в Україні»*, 22 червня 2022 р., Дніпро. С. 233–237.

116. Панцирева Г.В. Вплив технологічних аспектів на польову схожість та виживаність рослин люпину білого. *Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації: Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції*. Переяслав-Хмельницький, 2019. Вип. 51. С. 349–352.

117. Pansyryeva H.V. Influence of the assimilation apparatus and productivity of white lupine plants. International scientific-practical conference. *Agronomy Research. Biosystems Engineering*, May 6, 2020, Estonia, Tartu. P. 1–2.

118. Панцирева Г.В. Господарсько-біологічна оцінка перспективних сортів люпину кормового в Україні. *Органічне агровиробництво: освіта і наука: збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Київ: ДУ «НМЦ «Агроосвіта», 2018. С. 89–91.

119. Панцирева Г.В. Генетичний потенціал сортів люпину білого і його реалізація у сільськогосподарське виробництво. *Органічне виробництво і продовольча безпека: матеріали доповідей учасників VI Міжнародної науково-практичної конференції*. Житомир: О.О. Євенок, 2018. С. 173–175.

120. Панцирева Г.В. Господарсько-біологічна оцінка перспективних сортів люпину кормового в Україні. *Органічне агровиробництво: освіта і наука: збірник тез Всеукраїнської науково-практичної конференції*. Київ: ДУ «НМЦ «Агроосвіта», 2018. С. 89–91.

121. Чудак Р.А., Побережець Ю.М., Купчук І.М., Вугляр В.С. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Монографія «Використання кормових добавок і комбікормів нового покоління у годівлі свиней та птиці». Свідоцтво № 113768 від 13.07.2022; заяв. № с202202597 від 23.06.2022.

122. Купчук І.М., Полевода Ю.А., Дідик А.М., Побережець Ю.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Креслення з описом «Вібраційна дискова дробарка VCS-1» : Свідоцтво № 108853 від 23.10.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 67, 2021.

123. Купчук І.М., Яропуд В.М., Полевода Ю.А., Гонтар В.Г. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Креслення з описом «Вібраційна дробарка VCS-2» : Свідоцтво № 108856 від 23.10.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 67, 2021.

124. Chudak, R.A., Ushakov, V.M., Poberezhets, Y.M., Lotka, H.I., Polishchuk, T.V., Kazmiruk, L.V. (2020). Effect of Echinacea pallida supplementation on the amino acid and fatty acid composition of Pharaoh quail meat. *Ukrainian Journal of Ecology*, 10(2), 302–307. DOI: 10.15421/2020_101.

125. Kaletnik, G., Honcharuk, I., Okhota, Y. (2020). The Waste-free production development for the energy autonomy formation of Ukrainian agricultural enterprises. *Journal of Environmental Management and Tourism*, 11 (3), 513–522. [https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3\(43\).02](https://doi.org/10.14505//jemt.v11.3(43).02)

126. Palamarchuk, I., Rogogvskii, I., Titova, L., Omelyanov, O. (2021). Experimental evaluation of energy parameters of volumetric vibroseparation of bulk feed from grain. *Engineering for Rural Development*, 20. 1761–1767.

127. Nanka, A., Ievlev, I., Sementsov, V., Boyko, D., Sementsov, V. (2019). On modeling the process of cutting an elastic material with a sharp blade. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture "Innovative projects in the field of technical service of machines"*. 201. 114–123.

128. Чудак Р.А., Побережець Ю. М., Лютка Г. І., Купчук І. М. Сучасні кормові добавки у годівлі птиці: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2021. 281 с.

129. Мазур В.А., Гончарук І.В., Дідур І.М., Панцирева Г.В., Телекало Н.В., Купчук І.М. Інноваційні аспекти технологій вирощування, зберігання і переробки зернобобових культур: монографія. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2021. 180 с.

130. Чудак Р.А., Побережець Ю.М., Купчук І.М., Вугляр В.С. Використання кормових добавок і комбікормів нового покоління у годівлі свиней та птиці: монографія. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2022. 248 с.

131. Kupchuk I., Kravets R., Burlaka S., Dubrovina O. Theoretical research of process regularities of grinding structural heterogeneous organic materials. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2 (109). С. 12–19. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-2

132. Мазур В.А., Ткачук О.П., Дідур І.М., Панцирева Г.В. Технологічність та агроекологічна стійкість скоростиглих сортів сої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 4 (23). С. 96–111. DOI: 10.37128/2707-5826-2021-4-8

133. Побережець Ю.М., Яропуд В. М., Купчук І.М. Яєчна продуктивність та гематологічні показники курок-несучок під впливом пробіотичної добавки. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2021. № 3. С.127–134. DOI: 10.31210/visnyk2021.03.15

134. Kupchuk I., Poberezhets Ju., Kravets R., Lavreniuk P. Energy intensity of the process of destruction of feed grain in conditions of dynamic contact interaction with the edge of the disc impactor. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 2 (117). С. 97–103.

135. Solona O., Kupchuk I. Development of a functional model of a vibrating mill with adaptive control system of mode parameters. In: *Modernization of research area: national prospects and European practices: scientific monograph*. Riga, Latvia: Baltija Publishing, 2022. P. 302–328. DOI: 10.30525/978-9934-26-221-0-12

136. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М. Патент на корисну модель України. Вібророторна дробарка. № 85270. Публікація відомостей 11.11.2013, Бюл. № 21.

137. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М., Вітязь А.О. Патент на корисну модель України. Вібророторна дробарка. №93370. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

138. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М., Гусак І.В., Соломко І.В. Патент на корисну модель України. Вібровідцентрова дробарка. № 87816. Публікація відомостей 25.02.2014, Бюл. №4.

139. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М., Полевода Ю.А. Патент на корисну модель України. Віброланцюгова дробарка. № 88614. Публікація відомостей 25.03.2014, Бюл. №6.

140. Янович В.П., Купчук І.М., Янович Л.П., Полевода Ю.А. Патент на корисну модель України. Вібраційна дробарка «ЯКУП». № 91028. Публікація відомостей 25.06.2014, Бюл. №12.

141. Янович В.П., Купчук І.М., Бабій Г.Р., Павлик Н.М. Патент на корисну модель України. Вібраційний двоконтейнерний млин. №93366. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

142. Янович В.П., Купчук І.М., Полевода Ю.А. Патент на корисну модель України. Спосіб подрібнення матеріалів. №101578. Публікація відомостей 25.09.2015, Бюл. № 18.

143. Солоня О.В., Купчук І.М., Янович В.П., Полевода Ю.А. Патент на корисну модель України. Керований вібропривод. №131864. Публікація відомостей 11.02.2019, Бюл. № 3.

144. Купчук І.М., Шаргородський С.А., Холодюк О.В., Левчук К.І., Гонтарук Я.В., Дідик А.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.1.5» («Harvesting cereals v. 1.1.5»): Свідоцтво № 102287 від 03.02.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 63, 2021.

145. Купчук І.М. Патент на корисну модель України. Вібраційна дискова дробарка «VCS-1». № 133726. Публікація відомостей 25.04.2019, Бюл. № 8.

146. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Алексеєв О.О., Мазур К.В. Спосіб енергетично ефективної технології вирощування люпину білого. Патент на корисну модель № 143188. Публікація відомостей 10.07.2020, Бюл. № 13.

147. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Дідур І.М. Спосіб вирощування люпину білого. Патент на корисну модель № 143465. Публікація відомостей 27.07.2020, Бюл. № 14.

148. Гончарук І.В., Купчук І.М., Яропуд В.М., Бурлака С.А., Бистрицький О.П. Вібраційна дробарка з керованим віброприводом. Патент на корисну модель № 154857. Публікація відомостей 27.12.2023, Бюл. № 52.

149. Купчук І.М., Зубар І.В., Онищук Ю. В., Дідик А. М., Замрій М.А. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Комп'ютерна програма «Harvesting Cereals Optimization v. 1.2» («Harvesting cereals v. 1.2»): Свідоцтво № 103729 від 05.04.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 64, 2021.

150. Yanovych V., Kupchuk I., Kovalchuk O. Theoretical studies of energy parameters of vibration-disk crusher starch containing substance. *SWorld journal: Technical sciences*. 2016. Issue 11. P. 17–24.

151. Yanovych V., Kupchuk. I. Development of movement mathematical model for executive bodies of gyroscope-type mill. *SWorld journal: Technical sciences*. 2017. Issue 13. P. 174–184. DOI: 10.21893/2227-6920.2017-13.052

152. Poberezhets J., Kupchuk I. Effectiveness of the use of probiotics in the diet of broiler chickens. *Roczniki Naukowe Polskiego Towarzystwa Zootechnicznego*. 2021. Vol. 17 (4). P. 9–16. DOI: 10.5604/01.3001.0015.6857

153. Yanovych V., Kupchuk I. Determination of rational operating parameters of vibration crusher in accordance with dispersion of material. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2017. № 2 (97). С. 104–108.

154. Купчук І.М. Дослідження процесу подрібнення зерна дисковим ударним елементом. *Технічний сервіс агропромислового, лісового і транспортного комплексів*. 2018. № 11. С. 41–48.

155. Купчук І.М. Перспективи розвитку конструктивних схем вібраційних приводів транспортних і технологічних машин АПК. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2018. № 3 (90). С. 44–52.

156. Купчук І.М. Експериментальні дослідження процесу подрібнення фуражного зерна вібраційною дисковою дробаркою. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2019. № 3 (94). С. 68–75. DOI: 10.37128/2306-8744-2019-3-9

157. Солоня О.В., Купчук І.М., Гонтар В.Г., Дідик А.М. Оцінка впливу швидкісних режимів ротора на споживання електроенергії приводом вібраційної дискової дробарки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. № 4 (99). С. 40–48.

158. Паламарчук І.П., Янович В.П., Купчук І.М., Гнатюк В.В. Патент на корисну модель України. Вібраційна машина для обробки зерно-круп'яної сировини. № 93362. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

159. Ольшанський В.П., Сліпченко М.В., Твердохліб І.В., Купчук І.М. Коливання імпульсно навантаженого осцилятора з квадратичним опором у складі дисипативної сили. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 2 (101). С. 35–45. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-2-4

160. Kupchuk I., Tokarchuk O., Hontar V., Zamrii M. The kinematic analysis of a vibration crusher for feed grain. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 1 (100). С. 32–38. DOI: 10.37128/2306-8744-2021-1-4

161. Мазур В.А., Панцирева Г.В., Затолочний О.В. Порівняльна характеристика сортів нуту за комплексом господарсько-цінних ознак в умовах правобережного Лісостепу України. *Сільське господарство та лісівництво*. 2021. № 1 (20). С. 5–15. DOI: 10.37128/2707-5826-2021-1-1

162. Янович В.П., Купчук І.М., Корольчук В.С., Бражник В.О. Патент на корисну модель України. Спосіб подрібнення сипкої сировини. №103862. Публікація відомостей 12.01.2016, Бюл. № 1.

163. Янович В.П., Купчук І.М., Мельник Ю.І. Патент на корисну модель України. Спосіб обробки зерно-круп'яної сировини. №103863. Публікація відомостей 12.01.2016, Бюл. № 1.

164. Янович В.П., Купчук І.М., Соломко І.В., Ковальчук О.С. Патент на корисну модель України. Спосіб одержання вискодисперсних помелів. №103103. Публікація відомостей 10.12.2015, Бюл. № 23.

165. Янович В.П., Купчук І.М., Лазаренко Л.О., Мазур О.О. Патент на корисну модель України. Спосіб подрібнення матеріалів. №103191. Публікація відомостей 10.12.2015, Бюл. № 23.

166. Паламарчук І.П., Янович В.П., Бражник В.О., Купчук І.М. Патент на корисну модель України. Віброторна дробарка. №101642. Публікація відомостей 25.09.2015, Бюл. № 18.

167. Янович В.П., Купчук І.М., Бражник В.О., Соломко І.В. Патент на корисну модель України. Віброторна дробарка. №101585. Публікація відомостей 25.09.2015, Бюл. № 18. Янович В.П., Купчук І.М.,

168. Козинський Ю.П., Колесник В.Р. Патент на корисну модель України. Спосіб сушіння сипких матеріалів. №103193. Публікація відомостей 10.12.2015, Бюл. № 23.

169. Янович В.П., Купчук І.М., Корольчук В.С., Ковальчук О.С. Патент на корисну модель України. Спосіб одержання дрібнодисперсних порошків. №101586. Публікація відомостей 25.09.2015, Бюл. № 18.

170. Янович В.П., Купчук І.М., Полевода Ю.А. Патент на корисну модель України. Спосіб подрібнення сипких матеріалів. №101579. Публікація відомостей 25.09.2015, Бюл. № 18.

171. Янович В.П., Пазюк О.Д., Пазюк В.М., Купчук І.М. Патент на корисну модель України. Вібраційна сушарка. № 93364. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

172. Янович В.П., Купчук І.М., Мельник Ю.І., Юзва Н.В. Патент на корисну модель України. Вібраційний дезінтегратор. №93365. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

173. Янович В.П., Купчук І.М., Пазюк О.Д., Рябоконт В.М. Патент на корисну модель України. Вібраційна конусна дробарка. № 93363. Публікація відомостей 25.09.2014, Бюл. № 18.

174. Купчук І.М., Полевода Ю.А., Яропуд В.М. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. Креслення з описом «Шеретувальна машина VCS-1»: Свідоцтво № 108854 від 23.10.2021. Авторське право і суміжні права. Офіційний бюлетень № 67, 2021.

Мазур Віктор Анатолійович



кандидат сільськогосподарських наук, професор, ректор Вінницького національного аграрного університету, провідний науковий співробітник. Бібліографічні дані: у 1988 р. закінчив з відзнакою агрономічний факультет Вінницького філіалу Української сільськогосподарської академії і отримав кваліфікацію вченого агронома за спеціальністю «Агрономія». Віктор Мазур працює у Вінницькому національному аграрному університеті з 1992 р.

У 1989-1992 рр. – навчався в аспірантурі Української сільськогосподарської академії за спеціальністю «Селекція і насінництво», у 1994 р. успішно захистив кандидатську дисертацію на тему: «Вихідний матеріал для селекції гібридів кукурудзи, вирощуваних по екологічно чистих технологіях» та здобув науковий ступінь кандидата сільськогосподарських наук за спеціальністю 05.03.05 – селекція і насінництво.

Тривалий час очолював агрономічний факультет та був проректором з науково-педагогічної та навчальної роботи. Основними напрямками наукової діяльності є розробка сучасних технологій вирощування основних сільськогосподарських культур.

Мазур В.А. має 220 публікацій, з них 118 наукового та 1050 навчально-методичного характеру, у тому числі 88 наукові праці, опубліковані у вітчизняних фахових і міжнародних рецензованих виданнях. Є співавтором 5 навчальних посібників, 11 монографій, 1 методичного посібника, 1 підручника, 1 електронного посібника, 4 колективних монографій, а також є співавтором 6 патентів на корисну модель. Під керівництвом професора захищено 5 кандидатських дисертацій.

Наукова діяльність вченого направлена на агроекологічне обґрунтування технологій вирощування сільськогосподарських культур та екологізації технологій. Є членом Науково-методичної комісії з «Агрономії» при

Міністерстві аграрної політики та продовольства України, входить до складу експертів ДАК МОН України. Плідна багаторічна науково-педагогічна діяльність професора відзначена трудовою відзнакою «Знак пошани» та знаком «Відмінник аграрної освіти та науки» другого ступеня, Почесною грамотою Міністерства аграрної політики та продовольства України та Вінницької обласної державної адміністрації та обласної ради. У 2015 р. – нагороджений Грамотою Верховної Ради України.

Віктор Мазур приймав участь у міжнародних наукових заходах – у січні 2016 р. у міжнародній конференції (м. Братислава, Словаччина), у травні 2016 р. в конгресі Мережі університетів Чорноморського регіону 12-й конференції ректорів (м. Тбілісі, Грузія), у вересні 2016 р. у зборах учасників Вишеградської асоціації університетів (м. Геделле, Угорщина), у жовтні 2017 р. у церемоніях з нагоди 65-річчя Словацького аграрного університету (м. Нітра, Словаччина), у грудні 2017 р. в конференції у Технічному університеті м. Зволен (Словаччина), у 17 травні 2018 р. у міжнародному форумі (м. Яси, Румунія), у червні 2018 р. у конгресі (м. Салоніки, Греція), у вересні 2018 р. у конференції (м. Краків, Польща) та жовтні 2019 р. в конференції (м. Бухаресті, Румунія). Проходив міжнародне науково-педагогічне стажування (серпень 2019, Польща).

Мазур В.А. є керівником прикладного дослідження на тему: «Розробка методів удосконалення технології вирощування зернобобових культур з використанням біодобрив, бактеріальних препаратів, позакореневих підживлень та фізіологічно-активних речовин» (Мазур В.А., Дідур І.М., Іваніна В.Д., Ткачук О.П., Панцирева Г.В., Вradій О.І.), номер ДР 0120U102034.

Читає дисципліни: «Технічні культури», «Технологія виробництва продукції рослинництва», «Вступ до фаху».



Панцирева Ганна Віталіївна

кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри лісового, садово-паркового господарства, садівництва та виноградарства факультету агрономії та лісівництва, провідний науковий співробітник Вінницького національного аграрного університету.

У 2012 році здобула повну вищу освіту на базі Вінницького національного аграрного університету і отримала кваліфікацію агронома-дослідника освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр». У 2013 році здобула другу вищу освіту за спеціальністю «Облік і аудит» на базі Інституту післядипломної освіти та дорадництва ВНАУ. У 2019 р. здобула ступінь вищої освіти Магістр за спеціальністю «Садово-паркове господарство».

Трудова діяльність розпочата у 2013 р. з посади агронома фермерського господарства, а педагогічна у 2015 р. з посади асистента кафедри лісового, садово-паркового господарства та кормовиробництва агрономічного факультету Вінницького національного аграрного університету.

У 2013-2015 рр. – навчалась в аспірантурі Вінницького національного аграрного університету на державній формі навчання за спеціальністю 06.01.09 – рослинництво. 27 грудня 2017 року успішно захистила кандидатську дисертацію за темою «Формування зернової продуктивності люпину білого залежно від технологічних прийомів вирощування в умовах правобережного Лісостепу» за спеціальністю 06.01.09 – рослинництво під керівництвом к. с.-г. наук, професора Мазура В.А.

У листопаді 2020 р. присвоєно вчене звання доцента кафедри лісового, садово-паркового господарства, садівництва та виноградарства Вінницького національного аграрного університету. Постановою президії Комітету з державних премій України в галузі науки і техніки Кабінету Міністрів України від 6 листопада 2020 року, Панциревій Ганні Віталіївні було призначено стипендію Кабінету Міністрів України для молодих вчених.

Панцирева Г.В. є основним виконавцем прикладного дослідження на тему: «Розробка методів удосконалення технології вирощування зернобобових культур з використанням біодобрих, бактеріальних препаратів, позакореневих підживлень та фізіологічно-активних речовин» (Мазур В.А., Дідур І.М., Ткачук О.П., Панцирева Г.В.), номер ДР 0120U102034.

Ганна Віталіївна є автором близько 140 наукових праць, з яких 9 – вітчизняних і 5 зарубіжних монографій, 30 – статей у наукових журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus / Web of Science, 3 патенти на корисну модель.

З 2020 року залучена до складу редакційної колегії наукового фахового видання категорії «Б» «Сільське господарство та лісівництво», в якому можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії за галуззю аграрні науки. З березня 2021 року виконує обов'язки голови Наукового товариства студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених ВНАУ.

Наукова діяльність присвячена розробці технологічних прийомів вирощування зернобобових культур на основі ресурсо- та енергобезпечності. Результати своїх наукових розробок Ганна Панцирева неодноразово презентувала на Міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях. За трудові здобутки Г. Панцирева нагороджена грамотами та подяками Вінницького національного аграрного університету.

Ганна Панцирева приймає участь у міжнародних наукових заходах та проходила закордонне стажування на базі Університету Економіки в Кракові (Польща).

Читає дисципліни: «Стандартизація і управління якістю продукції рослинництва», «Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва», «Екологічна стандартизація і сертифікація» та ін.



Купчук Ігор Миколайович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв, заступник декана з наукової роботи інженернотехнологічного факультету Вінницького національного аграрного університету. Бібліографічні дані: у 2012 році здобув повну вищу освіту, і отримав кваліфікацію інженера-дослідника освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» зі спеціальності 8.091902 «Механізація сільського господарства».

Трудова діяльність розпочалась у 2006 р. з посади різноробочого тракторного стану ТОВ «Голубіївка» Калинівського району Вінницької області. З липня 2011 р. по листопад 2011р. працював на посаді інженератехнолога технологічного відділу ВАТ «Брацлав» (сmt. Брацлав, Немирівського району, Вінницької області).

Свою науково-педагогічну діяльність Ігор Купчук розпочав з 2014 року на посаді асистента кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці факультету механізації сільського господарства Вінницького національного аграрного університету.

У 2012-2015 р.р. – навчався в аспірантурі Вінницького національного аграрного університету (05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв).

У 2017 р. успішно захистив дисертацію на тему: «Обґрунтування технологічної схеми та конструктивної реалізації вібраційного подрібнення сировини спиртового виробництва» та здобув науковий ступінь кандидата технічних наук. У 2021 році присвоєно вчене звання доцента кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці.

З вересня 2017 року по серпень 2020 року – старший викладач, з вересня 2020 року по грудень 2023 року – доцент кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці, з грудня 2023 року – доцент кафедри технологічних процесів

та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету.

Загальна кількість наукових та навчально-методичних праць складає 199 публікацій, у т. ч. 40 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 55 статей у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), 20 свідоцтв про реєстрацію авторського права на твір та 57 патентів України на корисну модель.

Купчук Ігор Миколайович приймає активну участь у виконанні досліджень, як основний виконавець науково-дослідних робіт, що фінансуються за рахунок коштів Державного бюджету України:

- 02.2021-12.2023 рр. – відповідальний виконавець науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка комплексу енергоефективного і ресурсощадного обладнання та перспективних технологій годівлі сільськогосподарських тварин АПК України» (ДР № 0121U108589);

- з 02.2022 р. – керівник науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка науково-технічного забезпечення енергетичної автономії АПК на основі еколого ефективного використання агробіомаси для виробництва біопалив» (ДР № 0122U000844, період виконання 02.2022-12.2024 рр.);

- з 01.2024 року – відповідальний виконавець прикладного дослідження «Розробка науково-технологічного забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання потенціалу біоресурсів» (ДР № 0124U000444, період виконання 01.2024-12.2026 рр.).

Основна частина наукових досліджень Ігоря КУПЧУКА спрямована на розробку науково-технічного забезпечення для підвищення енергонезалежності підприємств АПК, а також на розробку та впровадження енергоефективних техніко-технологічних рішень приготування кормів для сільськогосподарських тварин.

Основні навчальні курси: «Теоретична механіка», «Прикладна механіка» та «Інтелектуальні мехатронні системи керування».



Бурлака Сергій Андрійович

доктор філософії з галузевого машинобудування, старший викладач кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету. Бібліографічні дані: 2015-2017 р.р., отримав кваліфікацію інженера-дослідника зі спеціальності «Механізація сільського

господарства.

2017-2018 - аспірант з відривом від виробництва та асистент кафедри «Двигунів внутрішнього згорання та альтернативних паливних ресурсів» факультету механізації сільського господарства Вінницького національного аграрного університету (за сумісництвом), 2018 – аспірант з відривом від виробництва та асистент кафедри «Загальнотехнічних дисциплін та охорони праці» інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (за сумісництвом), 2019-2021 - аспірант з відривом від виробництва та асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (за сумісництвом), з 01.07.2021 р - 31.08.2021 р. – асистент кафедри «Електроенергетики, електротехніки та електромеханіки» інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету, з 01.09.2022 і до цього часу старший викладач кафедри «Технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв» Вінницького національного аграрного університету У 2021 р. успішно захистив дисертацію на тему: «Підвищення ефективності використання машинних агрегатів при роботі на суміші палив» та здобув науковий ступінь доктора філософії з галузевого машинобудування.

Опублікував результати наукових досліджень у 55 наукових працях, серед яких 11 статей, у виданнях, що входять до наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 3 статті у закордонних виданнях (англійською мовою), 30 статей

у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), 4 тези у збірниках матеріалів конференцій, 2 розділи монографії (англійською мовою), що опубліковані в закордонному видавництві, 2 патенти України, 3 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір.

Впродовж 2019-2023 років Бурлака С.А. є виконавцем госпдоговірної науково-дослідної роботи: «Забезпечення ефективності роботи двигунів внутрішнього згорання працюючих на різних видах біопалива шляхом розробки змішувача з електронним керуванням чутливим до навантажувально-швидкісних режимів» (номер державної реєстрації 0118U001423, термін виконання 04.2018-11.2019 рр.) та державної науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка комплексу енергоефективного і ресурсощадного обладнання та перспективних технологій годівлі сільськогосподарських тварин АПК України» (номер державної реєстрації 0121U108589, термін виконання 2021-2023 рр.).

Бурлака Сергій Андрійович є старшим науковим співробітником двох науково-дослідних робіт, які виконує Вінницький національний аграрний університет за рахунок коштів державного бюджету: науково-технічної (експериментальної) розробки «Розробка науково-технічного забезпечення енергетичної автономії АПК на основі еколого ефективного використання агробіомаси для виробництва біопалив» (номер державної реєстрації 0122U000844, термін виконання 2022-2024 рр.), прикладного наукового дослідження «Розробка науково-технологічного забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання потенціалу біоресурсів» (номер державної реєстрації 0124U000444, термін виконання 2024-2026 рр.).

До сфери наукових інтересів Сергія Бурлаки входить: розробка науковотехнічного забезпечення для автономного енергопостачання сільськогосподарських об'єктів за рахунок відновлюваних джерел енергії, вирішення задач техніко-технологічного оновлення агропромислового комплексу.

Основні навчальні курси: «Новітні методи та технології використання обладнання переробних та харчових виробництв», «Теорія розрахунку обладнання переробних та харчових виробництв».



Волинець Євгеній Олександрович

асистент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету.

Бібліографічні дані: у 2018 році здобув повну вищу освіту, і отримав кваліфікацію інженера-конструктора освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування.

Науково-педагогічну діяльність Євгеній Волинець розпочав з 2023 року на посаді асистента кафедри загальнотехнічних дисциплін та охорони праці інженерно-технологічного факультету. З 2024 асистент кафедри охорони праці та біотехнічних систем у тваринництві факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету.

З 2020 року навчається в аспірантурі Вінницького національного аграрного університету на державній формі навчання з відривом від виробництва за спеціальністю 181 Харчові технології. Тема дисертаційної роботи «Обґрунтування технології та конструктивно-режимних параметрів вібраційного змішувача харчових сумішей»

Волинець Є.О. має 11 публікацій, у т. ч. 8 опубліковані у вітчизняних фахових виданнях, є співавтором 2 патентів на корисну модель та 1 авторського свідоцтва на науковий твір.

З січня 2024 року року Волинець Є.О. – виконавець державної НДР № 0124U000444 «Розробка науково-технологічного забезпечення підвищення родючості ґрунтів та раціонального використання потенціалу біоресурсів» (період виконання січень 2024 року – грудень 2026 року), що фінансується за рахунок коштів Державного бюджету України. Плановий обсяг фінансування – 2250 тис. грн.

Читає дисципліни: «Теорія механізмів і машин», «Машини, обладнання та їх використання для переробки с.-г. продукції», «Мехатроніка і мобільна робототехніка», «Технічна мікробіологія» та ін.

Наукове видання

Віктор МАЗУР
Ганна ПАНЦИРЕВА
Ігор КУПЧУК
Сергій БУРЛАКА
Євгеній ВОЛИНЕЦЬ

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ТА
ЕКОЛОГООРІЄНТОВАНОГО ТЕХНІКО-
ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ
КОРМОВИРОБНИЦТВА АПК УКРАЇНИ

Монографія

Підписано до друку 05.11.2024.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк цифровий.
Друк. арк. 13,00. Умов. друк. арк. 12,09.
Наклад 100 прим. Зам. № 7781/1.

Видавець та виготовлювач ТОВ «Нілан-ЛТД».
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного
реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої
продукції серія ДК № 4299 від 11.04.2012 р.
21034, м. Вінниця, вул. Немирівське шосе, 62а.
Тел.: 0 (800) 33-00-90, (096) 97-30-934, (093) 89-13-852, (098) 46-98-043.
e-mail: info@tvoru.com.ua
<http://www.tvoru.com.ua>