

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ЯКУШКІН ВЛАДИСЛАВ СЕРГІЙОВИЧ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ  
В.о. завідувача кафедри механізації  
сільського господарства  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Анатолій ПОЛЯКОВ  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023\_ р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ГРУБИХ  
СТЕБЛОВИХ КОРМІВ

Спеціальність 208 Агроінженерія

Кваліфікаційна робота  
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Керівник:  
канд. с.-г. наук, доцент  
Євген ЧАПЛИГІН  
\_\_\_\_\_

Оцінка: \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_  
бали/за шкалою ЄКТС/за національною шкалою

Київ – 2023

## Зміст

Вступ	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	8
1.1 Способи заготівлі й зберігання стеблових кормів	8
1.2 Фізико-механічні властивості завантаження кормових монолітів	11
1.3 Аналіз конструкцій завантажувальних машин для виїмки кормів зі сховищ	13
1.4 Аналіз досліджень процесу виїмки стеблових кормів зі сховищ	.....20
1.5 Висновки за розділом	.....24
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ	25
2.1 Дослідження кінематики комбінованого різального апарату	25
2.2 Дослідження роботи прорізних ножів	32
2.3 Дослідження довжина дуги ножа в зоні різання	38
2.4 Обґрунтування потужності приводу віддільника	41
2.5 Обґрунтування продуктивності комбінованого різального апарату	43
2.6 Розрахунок площі перерізу різання	44
2.7 Енергоємність процесу різання	47
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	50
3.1 Опис експериментальної установки	50
3.2 Результати досліджень енергоємності та якості подрібнення	54
3.3 Оптимізація параметрів процесу	60
3.4 Результати показників якості і енергетичності в залежності від основних параметрів віддільника	70
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	78
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	84

## РОЗДІЛ

### 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 1.1 Способи заготівлі й зберігання грубих стеблових кормів

«Основним джерелом задоволення потреб тваринництва є корми рослинного походження – стеблові корми. Заготівля й зберігання їх займає важливе місце в системі заходів щодо організації кормової бази. Підвищення поживної цінності, поліпшення смакових якостей і збільшення виходу кормів може бути досягнуте на основі росту й поліпшення поживності рослин шляхом застосування відповідних агротехнічних прийомів, строгого дотримання правил заготівлі, зберігання й споживання їх.

Основними стебловими кормами є: силос, сінаж, розсипне, подрібнене й пресоване сіно, солома й інші поживні відходи рослинництва.

Для зберігання силосу й сінажу застосовують башти, напівбашти, та траншеї. В останні роки найбільш широке поширення одержали траншеї, але їх потрібно використовувати в тих випадках, коли корм заготовляють у великих кількостях і в стислі строки. Траншейний спосіб зберігання забезпечує широкий фронт робіт при завантаженні силосу і його виїмці, дозволяє використовувати усі види транспорту і автомашини, причепи, навантажувачі; має порівняно невеликі капіталовкладення.

Якість корму значною мірою залежить від типу силососховищ і їхньої герметизації. Мінімальні втрати сухої речовини спостерігаються при силосуванні у баштах, а максимальні – в курганах і скиртах» [3].

«В облицьованих горизонтальних траншеях втрати сухої речовини в Лісостепу й Поліссі становлять 7...20 % і залежать в основному від способу накриття, у не облицьованих наземних спорудах сягають 30 % і більше. При накритті поліетиленовою плівкою вони становлять 6...7 %. Втрати сухої речовини у баштах складають 10...14 %» [5].

«Отже, в облицьованих горизонтальних силососховищах при ретельному ізолюванні корму від навколишнього середовища можна одержати гарний силос або сінаж з мінімальними втратами.

За типом розміщення траншеї ділять на наземні, напів заглиблені та заглиблені. Вибір типу траншей залежить від рівня ґрунтових вод, рельєфу місцевості, наявності будівельних матеріалів. Найбільш придатні, з точки зору зручності експлуатації, наземні траншеї. Вони забезпечують високу якість корму, не вимагають спеціальної дренажної системи для відведення дощових та талих вод, легкодоступні для механізованого завантаження і для їх вивантаження. Будівництво велико тонажних силосних траншей місткістю 5 тис. тон та більше не виправдано. Якість силосу в таких траншеях низька через велику їх поверхню й довготривале заповнення.

При закладанні силосу в траншею щоденний ущільнений шар маси повинен становити 70-100 см, а строк їх заповнення 4-5 днів» [3].

«Башти більш дорогі споруди, ніж траншеї, їх потрібно використовувати при менших об'ємах кормів і для закладання найбільш цінних, наприклад бобових культур. У минулі роки в Україну завозились металеві герметичні башти з нижнім розвантаженням маси виробництва американської фірми "Харвестор". Нижнє розвантаження маси спочатку вважали як досягнення. Але такий спосіб розвантаження має суттєві недоліки. Перш за все, при нижньому розвантаженні швидко зникає вуглекислота, що накопичується на дні споруди, а звільнений нею простір займає повітря, викликаючи вторинну ферментацію і зігрівання корму. Крім того, швидкість нижнього розвантаження виявилась дуже невисокою, оскільки корм не встигає достатньо швидко опускатися» [4].

«Недостатньо ефективним є і вакуумний спосіб консервування з відкачуванням із сховища повітря, яке проводиться після заповнення сховища зеленою масою. В ретельно накритому капітальному сховищі і без відкачування повітря весь кисень досить швидко витрачається на дихання

клітин і створюється такий склад повітря, який обумовлює успішне зберігання кормів.

Тенденція переходу до горизонтальних бетонних траншей великої місткості спостерігається в закордонних країнах (США, Франція, Англія, Швеція й ін.) у міру укрупнення ферм» [4].

«Буртове й курганне силосування через велике псування зовнішніх шарів силосу не може бути визнане досконалим, тому що у багатьох випадках вартість зіпсованого силосу перевищує витрати на будівлю найпростіших силосних споруд. Досліди, проведені Інститутом кормів показали, що при силосуванні кукурудзи молочно-воскової стиглості з вологістю 74...75 % у буртах-курганах, що вміщали до 1,5 тис. тонн маси, вихід силосу становив 74 %, при силосуванні в земляній траншеї досягав 84%» [10].

«Аналіз способів зберігання силосу показує, що в наш час і в майбутньому основна маса силосу буде закладатися в горизонтальних наземних траншеях і частково в буртах з укриттям плівкою.

Для заготівлі сіна рекомендуються наступні технологічні способи: із природних і сіяних трав з пресуванням в тюки, із штучним сушінням, подрібненого із застосуванням активного вентилявання, розсипного й пресованого з активним вентиляванням» [11].

«Зберігають подрібнене сіно в сітчастих баштах і скиртах біля місць споживання.

Технологія заготівлі розсипного не подрібненого сіна із застосуванням активної вентиляції передбачає підсушування скошеної трави в полі до вологості 35...45 %, а пресованого сіна до вологості 30...35 %, Досушують сіно в скиртах на сушильному пункті до вологості 18...20 % атмосферним і підігрітим повітрям установками УДС-300, УВТ-10, ВПТ і вентиляторами. Застосування цієї технології на 10..15 % підвищує збір біологічного врожаю сіна, дає можливість майже повністю зберегти вміст у ньому каротину» [5].

«Місця скиртування сіна й соломи найбільше доцільно вибирати безпосередньо на території ферми. Для цієї мети виділяється спеціальна площадка, захищається й оснащується необхідним протипожежним устаткуванням, Наземні горизонтальні облицювальні силосні траншеї також розташовуються на території ферми. Це дозволяє більш повно використовувати машини для навантаження й роздачі корму, знизити витрати праці й засобів на щоденну доставку корму, виключити нераціональне використання техніки в бездоріжжя» [5].

## **1.2 Фізико-механічні властивості завантаження кормових монолітів**

«При виконанні технологічного процесу відбору кормів зі сховищ відбувається взаємодія між робочими елементами (ножами) і оброблюваним середовищем (кормовим монолітом). Фізико-механічні властивості кормових монолітів значно впливають на геометрію й кінематику робочих органів, визначають режими їхньої роботи.

Дослідженню фізико-механічних властивостей кормових монолітів присвячений ряд робі. Основна увага при цьому приділялася вивченню їхньої міцності під час відбору й опір моноліту різанню, зсуву, жорсткості стебел, коефіцієнтів тертя, щільності. Крім того, визначались такі характеристики як опір на розрив, стиск, міцність стебел при розтягу й стиску» [7].

В основу теоретичних і експериментальних досліджень цих питань покладена творча спадщина академіка В.П. Горячкіна, експериментальна теорія різання академіка В.А. Желіговського. Проведені роботи з теорії різання дозволяють вирішувати основні питання інженерних розрахунків по деяким вузькоспеціалізованим машинам, вказують на складність взаємодії робочих органів із сільськогосподарськими матеріалами й значні труднощі аналітичних розрахунків і необхідність експериментальних методів» [14].

«Найбільш вивченим є опір сіно-соломистої маси стиску, що досліджувалася в процесі пресування. Під дією масових сил моноліт здобуває кінцеву щільність, яка є одним з основних показників його механічної міцності.

Зміна щільності моноліту по висоті сховища наведена в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Щільність кормів по висоті сховищ, кг/м<sup>3</sup>

Висота відбору проб,	Сінаж люцерновий	Сінаж злакобоб	Сіно люцернове	Солома ячмінна	Силос кукурудзяний
4	—	—	122,4	53,1	620,0
3	470	570	125,8	55,0	629,8
2	496	606	128,1	57,5	640,1
1	525	640	130,0	60,0	650,0

Щільність моноліту впливає на більшість інших його властивостей: опір різанню, розриву, зсуву, тертя, деформацію, явище релаксації й ін.

З наведених даних видно, що щільність кормів по висоті сховища при збільшенні глибини розташування шару на кожний метр змінюється на 3...5%» [14].

«Дослідженнями встановлено, що сіно-соломиста маса має високий опір різанню, що й наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Опір різанню грубих кормів

Види грубих кормів	Вологість, %	Питомий опір різанню, Н/м при щільності маси		
		c=70кг/м <sup>3</sup>	c=50кг/м <sup>3</sup>	c=30кг/м <sup>3</sup>
солома пшениці	10,3	1400	900	500
солома горохова	10,9	1100	700	350
сіно з люцерни	11,8	1600	1150	600

Дослідженнями доведено, що стебла соломи й сіна в скиртах розташовуються в основному горизонтально й відхилення площини їхнього

залягання від горизонталі не перевищує  $20^\circ$ . Тому опір зсуву в горизонтальній площині незначний» [12].

«Важливим фактором, що впливає як на опір різанню, так і транспортування матеріалу є коефіцієнт тертя. Існують два основних види коефіцієнта тертя: об поверхню робочих органів (зовнішнє тертя) стебел об стебла (внутрішнє тертя).

Коефіцієнт тертя руху в 1,2...2,0 рази менший коефіцієнта тертя спокою» [13].

### **1.3 Аналіз конструкцій завантажувальних машин для виїмки кормів зі сховищ**

«При заготівлі кормів у горизонтальних сховищах найважливішою й найменш механізованою технологічною операцією є їхній відбір. Дотримання певних правил при відборі кормів зі споруджень різних типів має велике значення в збереженні його кормових якостей і зниженні втрат. Через недосконалість засобів механізації й недотримання технології відбору кормів зі сховищ, втрати поживних речовин становлять 8...13%. Щоб звести ці втрати до мінімуму, треба не порушувати монолітності корму в тій його частині, яка сьогодні не буде виїнята. Тільки при дотриманні цього правила тварини щодня будуть одержувати свіжий доброякісний корм» [18].

«Для відбору кормів зі сховищ і навантаження їх у транспортні засоби застосовуються різні машини й засоби малої механізації.

Використання засобів малої механізації приводить до полегшення важкої ручної праці, але не до підвищення її продуктивності. В умовах всезростаючої концентрації поголів'я ці засоби стали безперспективними.

Як основні засоби механізації відбору кормів з горизонтальних сховищ, знайшли застосування два типи навантажувальних машин і навантажувачі періодичної дії й навантажувачі безперервної дії (рисунок 1.1)» [18].



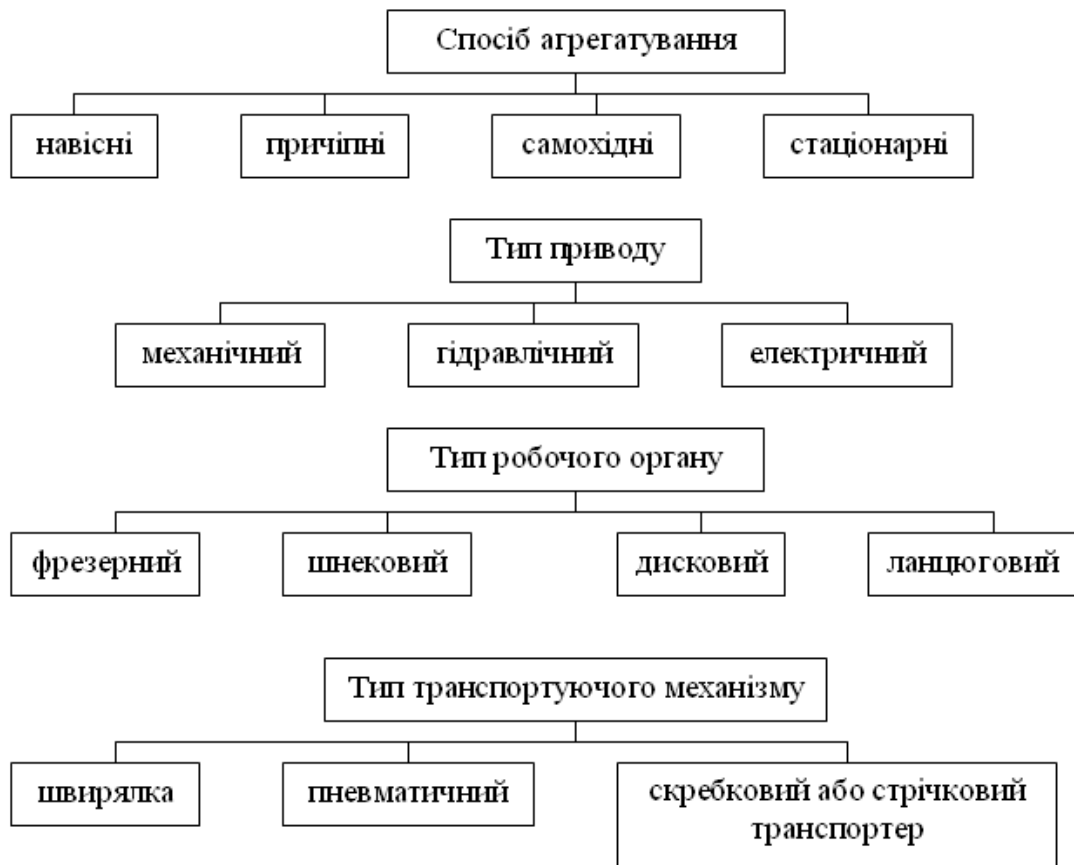


Рисунок 1.1 – Класифікація навантажувачів стеблових кормів безперервної дії

«Таким чином, всі типи навантажувачів безперервної дії можна класифікувати на навісні, причіпні, самохідні й стаціонарні; по типу приводу робочого органу: механічні, електричні й гідравлічні; по типу робочих органів: фрезобарабанні, шнекові, дискові, ланцюгово-пластинчаті; по типу транспортуючих органів: з вентилятором розкидачем, з ексгаустером, зі шнековим, скребковим і стрічковим транспортером; по способу подачі робочого органу: маятникові, щоглові і рамні.

Серед машин періодичної дії широке поширення одержав навантажувач-екскаватор ПЕ-0,8Б. Такі навантажувачі не поліпшують технологічність корму, що навантажується, більше того, навантаження здійснюється великими порціями без рівномірного розпушення й додаткового подрібнення. Крім того, порційне навантаження залежаного

корму ускладнює нормовану роздачу його мобільними кормороздавачами. Використання навантажувачів періодичної дії на заборі кормів зі сховищ приводить до руйнування граничного шару моноліту, що веде до втрат поживних речовин» [16].

«В останні роки для навантаження силосу з горизонтальних силососховищ і грубих кормів зі скирт все більше поширення одержують машини безперервної дії, які працюють за принципом поступового відділення корму роторними робочими органами. Останні, у порівнянні з навантажувачами періодичної дії, безумовно більш перспективні. Висока продуктивність, додаткове подрібнення корму, гладка й тверда поверхня, що залишається в сховищі моноліту корму, забезпечення забору корму зі сховищ висотою 5 м і більше, максимальна збереженість поживних речовин, автоматизація процесу навантаження корму роблять навантажувачі безперервної дії незамінними на великих й середніх тваринних фермах.


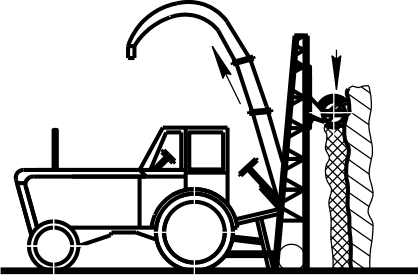
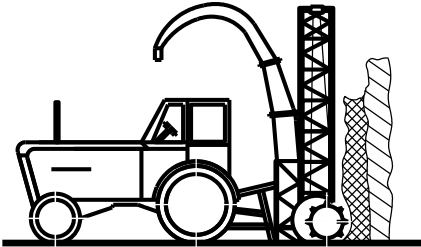
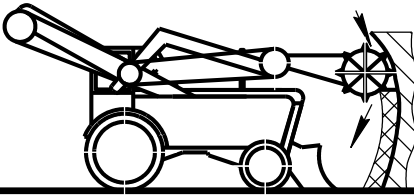
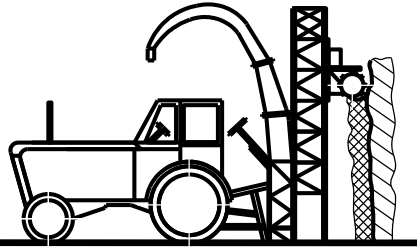
Дослідженнями встановлено, що тварини з'їдають подрібненого силосу на 8...12 % більше, а не з'їденого силосу залишається 2...7 %» [14].

«Промисловістю освоєне виробництво ряду навантажувачів безперервної дії. Ці машини розроблялися більшою мірою на основі відомих параметрів торфовидобувних, землеобробних і дорожньо-будівельних фрезерних машин. У результаті було запропоновано багато типів машин, призначених в основному для навантаження силосу або грубих кормів, і мало універсальних» [16].

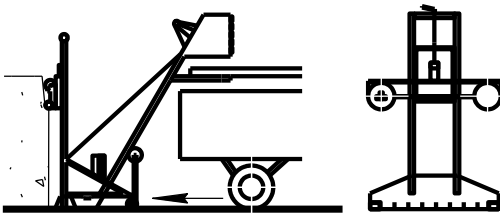
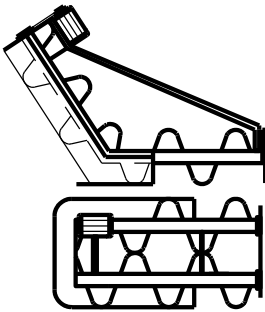
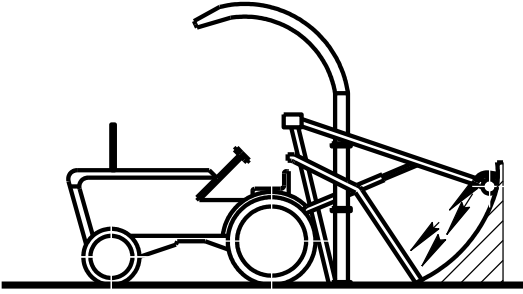
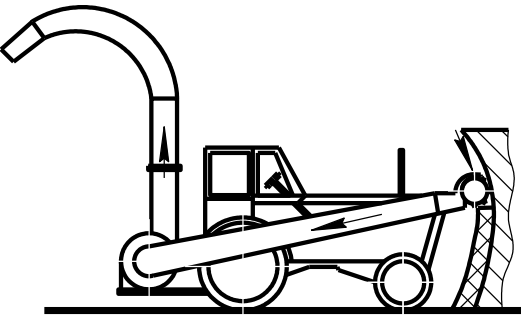
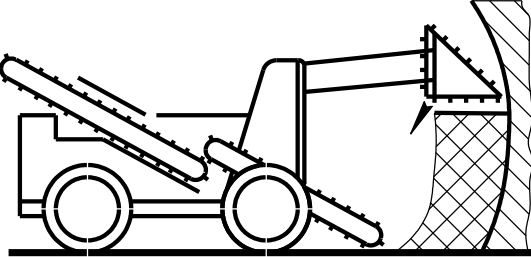
«Технологічні схеми й технічні характеристики вітчизняних і деяких закордонних навантажувачів наведені в таблиці (1.3.). Аналіз даних, наведених у таблиці, показує, що більшість навантажувачів виконана у вигляді навісного обладнання до колісних тракторів. Рідше зустрічаються самохідні, причіпні й навісні на автомобілі. Обмежене застосування причіпних навантажувачів пояснюється тим, що вони в агрегаті із трактором мають низьку маневреність, складний привід робочих органів, незручні в експлуатації. З метою спрощення кінематичної схеми приводу забірною

робочого органу в деяких навантажувачах, наприклад, "Сайла-Вейтор", F-80A, ПСГ-20 застосований гідропривід» [18].

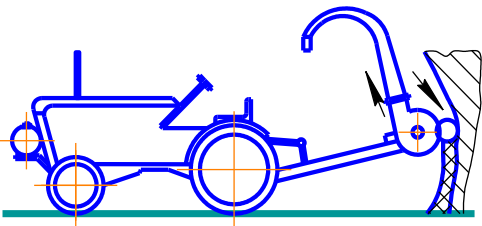
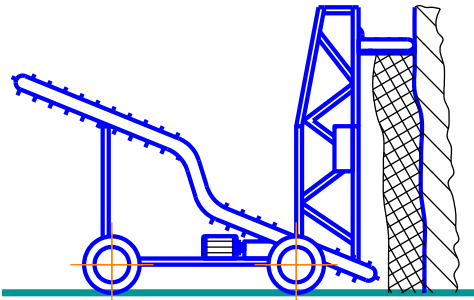
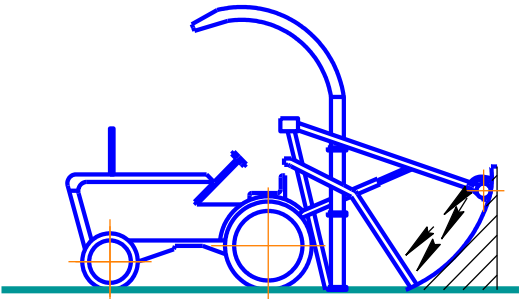
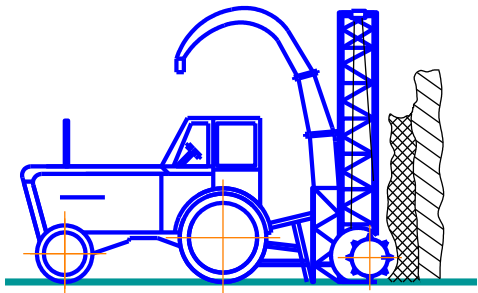
«Таблиця 1.3. Технологічні схеми й технічні характеристики вітчизняних і деяких закордонних навантажувачів

Назва машини	Технологічна схема	Характеристика робочого органу
Навантажувач силосу VSZ-140		Фрезбарабан штифтовий
Навантажувач силосу "СНОУ"		Фрезбарабан з стрільчатими ножами
Навантажувач силосу F-80A		Пилоподібний шнек
Навантажувач силосу БИИФ		Фрезбарабан з пружинними пальцями
Навантажувач силосу ПЛУТО		Шнек з Г-подібними ножами

Продовження таблиці 1.3.

Навантажувач силосу- Стефаноизе		Дискова пилка з активним шнеком
Навантажувач силосу НИАЕ		Спарений активний шнек
Навантажувач стеблових кормів ПСК-5		Фрезбарабан з Г- подібними ножами
Фуражир ФН-1,2		Фрезбарабан з сегментними ножами
Електрофікований навантажувач ЭК-5		Ланцюгово- планковий

Продовження таблиці 1.3.

Навантажувач-аммонізатор силосу ПАС-ВИК		Фрезбарабан з Г-подібними ножами
Навантажувач силосу ПСЭ-20		Ланцюгово-планковий
Універсальний навантажувач силосу ПСГ-20		Фрезбарабан з стрільчатими ножами
Навантажувач силосу ПСГ-20		Фрезбарабан з стрільчатими ножами

Примітка» [18].

«Існують навантажувачі з приводом від електричної мережі (ПСЭ-20, ЭК-5). Вони досить зручні в експлуатації, мають низькі експлуатаційні витрати та можливість пуску в будь-яких кліматичних умовах, однак недостатньо універсальні. За кордоном досить широке розповсюдження одержали стаціонарні електрифіковані вивантажувачі (Стефанайзе - Франція, НІАЕ - Англія, Пужен - США, Вадербрун - Швеція), особливо на великих молочних й відгодівельних комплексах. Ці машини надійні в роботі, зручні в

обслуговуванні, мають високі техніко-економічні показники. Стаціонарні електрифіковані вивантажувачі можуть працювати в автоматизованому режимі, забезпечуючи задану продуктивність і високу рівномірність потоку корму, що вивантажується.

Енергоємність і продуктивність навантажувача безперервної дії в значній мірі залежать від конструкції різального апарату. Найбільше поширення одержали фрезобарабанні, дискові й шнекові пили, шнекові фрези й ланцюгово-пластинчаті контури» [19].

«Фрезобарабанні апарати обладнані ріжучими ножами, які використовуються при виїмці зв'язаного, погано подрібненого стеблового корму. Такими робочими органами обладнані вітчизняні навантажувачі ФН-1,4 і ПСК-5,0. Навантажувачі закордонного виробництва, наприклад, "БІФ" обладнаний фрез-барабаном із пружинними пальцями; "Фармханд" і "Плутто", обладнані ріжучими шнеками, Ї забезпечують високу продуктивність на виїмці дрібно подрібненого силосу. При випробуванні цих навантажувачів було відзначено значне зниження продуктивності при збільшенні довжини часток силосу.

Основний недолік фрезерних барабанів Ї низька продуктивність (до 15 т/год.) і висока енергоємність (2,6...5,2 кВт. год/т).

Шнекові фрезерні барабани відрізняються від циліндричних тим, що замість ножів до поверхні циліндра кріпляться по гвинтовій лінії зубчасті витки. Основні недоліки такого робочого органу полягає в складності перевантаження відокремлюваного корму на транспортер розвантажника, низькій продуктивності (до 17 т/год.) і незадовільній роботі на погано подрібненому кормі» [19].

«Для забору силосу й сінажу з горизонтальних сховищ найбільш вигідно застосовувати машини з ланцюгово-пластинчатими робочими органами. Подібні робочі органи мають дослідні зразки силосонавантажувачів ПСЭ-20, ЭК-5 і ПСС-5,5. Працюючи за принципом пошарового згрібання в горизонтальній площині, ці робочі органи додатково

не подрібнюють й не розщеплюють корм, проте енергоємність їх в 2...2,5рази менша, ніж у фрезбарабанів.

З даних таблиці 1.3. видно, що робочі органи барабанного типу відрізняються високою енергоємністю при порівняно низькій продуктивності. Особливо незадовільно вони працюють при навантаженні грубих кормів (низька якість подрібнення, недостатня висота початку фрезерування й ін.) Це пояснюється розмаїттям ріжучих елементів, недостатнім вивченням процесів взаємодії їх з монолітом і обґрунтуванням геометричних параметрів» [19].

#### **1.4 Короткий огляд досліджень процесу виїмки стеблових кормів з горизонтальних сховищ**

«Аналітичному й експериментальному дослідженню процесу безперервного відділення кормів від моноліту фрезерним барабаном і ланцюгово-пластинчатим віддільником присвячені роботи А.Н. Крамаренко, Г.Й. Єрмохіна, Л.І. Хворостянова, П.Д. Сокольника, Н.П. Алексенко, В.Д. Тімонина» [5, 7, 12, 13].

«Велику увагу дослідники приділили вивченню фізико-механічних властивостей кормових монолітів у сховищі, що значно впливають на енергетичні показники робочих органів, що відокремлюють. Окремі роботи присвячені дослідженню процесу відділення кормів робочими органами фрезобарабанного типу. Однак обґрунтування застосування фрезерного барабана, як робочого органу землеробних машин відноситься до більш раннього періоду. Основним вченням по цьому питанню є праці академіка В.П. Горячкіна і його послідовників» [14, 16].

«Крамаренко А.Н. проводив аналітичні й експериментальні дослідження процесу роботи фрезбарабана й ланцюгово-штифтового віддільника з урахуванням шаруватої структури кормів у сховищах. При цьому основна увага приділялася питанням відділення грубих кормів. У

процесі досліджень фізико-механічних властивостей грубих кормів визначався склад, вологість, щільність корму в сховищах, опір зсувненню, згрібанню з вільної поверхні, коефіцієнти тертя по сталі, деформація й закономірності різання різними ножами.

У результаті експериментальних досліджень ним встановлено, що витрата енергії на фрезерування стрілчастими ножами на 20...22 % більша, ніж Г-подібними, а при зустрічному фрезеруванні на 10...12 % менша в порівнянні з супутнім» [15].

«Єрмохін Г.І. присвятив свою роботу дослідженню фрезерного барабана при навантаженні силосу. У результаті аналітичного й експериментального дослідження автор дійшов висновку, що для вивантаження силосу доцільно застосовувати фрезерний барабан з верхнім викидом. Встановлено, що при верхньому викиді енергоємність фрезерування на 13...23 % менша для Г-подібних ножів і на 4...16 % для плоских радіальних штифтів» [15].

«При дослідженні фізико-механічних властивостей силосу визначалися: щільність залежно від глибини залягання (парабола), коефіцієнт розпушування (1,65...2,2), вологість маси траншей по глибині, коефіцієнт тертя руху по сталі. Єрмохін Г.І. дійшов висновку, що при коловій швидкості 5...10 м/с і подачі фрезерного барабана 22...30 мм/с відділення силосу від моноліту здійснюється відривом, розшаруванням і розпушенням ущільненої маси й тільки частково прорізанням окремих, затиснених у масиві стебел корму. Енергоємність процесу зі збільшенням подачі зменшується, особливо при великій глибині фрезерування 400 мм. Мінімальну енергоємність мають плоскі ножі, максимальну ї крючкові штифти.

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень автор рекомендує наступні конструктивні й кінематичні параметри навантажувача: тип різальних елементів Г-подібні ножі; діаметр фрезерного барабана – 600...650 мм, швидкість фрезерування – 5,0 м/с, глибина фрезерування –



300...400 мм, подача 4...32 мм/с, максимальне заглиблення навантажувача – 1,2 м» [15].

«Технологічний процес забору й подрібнення грубих кормів зі скірт досліджував Тімонин В.Д. Становить інтерес запропонована ним конструкція навантажувача з 2-х ланковою стрілою, на якій навішаний барабан-подрібнювач грубих кормів. Автором рекомендуються наступні режими роботи подрібнювача: подача  $S = 0,1 \dots 0,2$  м/с; швидкість різання  $V = 34$  м/с. Питома енергоємність різання складала 1,38...1,85 кВт. год/т» [16].

«Питанням дослідження навантажувача безперервної дії для стеблових кормів присвячена робота Сокольника П.Д. Ним проведено аналітичне й експериментальне дослідження роботи навантажувача з верхнім викидом (зустрічне фрезерування). Методом гаммаскопії визначалася щільність стеблових кормів, що перебували у сховищах. Визначено коефіцієнти тертя кормів по сталі. Результати досліджень показали, що із загальної потужності, необхідної для привода навантажувача, 45...50 % витрачається на роботу фрезерування, 36...45 % на завантаження й 4...5 % на холостий хід фрези» [17].

«Процес відділення консервованих і грубих кормів від монолітів дисковим віддільником досліджував Алексєнко Н.Л.

«В своїй роботі Л.І. Хворостянов розглянув процес виїмки консервованих кормів зі сховищ ланцюгово-пластинчатим віддільником.

При дослідженні фізико-механічних властивостей консервованих кормів визначалися опір розриву, коефіцієнти спучування, бічного тиску.

При відділенні корму дослідним робочим органом енергоємність процесу складала:

- на кукурудзяному силосі 0,157 кВт.год/т;
- на злакобобовому сінажі - 0,207 кВт.год/т;
- на люцерновому сінажі - 0,215 кВт.год/т.

У роботах, присвячених дослідженню процесу відділення корму від монолітів, особлива увага приділялася вивченню характеру взаємодії

ріжучих елементів у специфічних технологічних умовах. В основі аналізу цих процесів лежать основні поняття теорії різання лезом, розробленої академіком Горячкиним» [14...16].

«На відміну від процесу різання окремих стебел, відділення корму від монолітів пов'язане з перерізанням шару хаотично орієнтованих часток, ущільнених у процесі заповнення сховища й зберігання.

На процес різання шару стебел істотно впливають не тільки фізико-механічні властивості самих рослин але й характер їхньої орієнтації щодо леза, деформація шару, що передує різанню, геометричні параметри й режими роботи ріжучих елементів» [22].

«З огляду досліджень по механізації виїмки кормів з горизонтальних сховищ і різанню стеблових матеріалів видно, що незважаючи на суперечливість зроблених висновків, складність отриманих залежностей, процес взаємодії робочих органів з кормовим монолітом досить вивчений. При цьому, основними параметрами й режимами роботи фрезбарабана, які визначалися в процесі дослідів є: діаметр, швидкість, подача й глибина фрезерування, а ланцюгового робочого органа і швидкість ланцюгів, подача й глибина фрезерування.

У наведених дослідженнях, у більшості випадків вивчався лише процес відділення корму від моноліту, виходячи з умови його мінімальної енергоємності. В окремих роботах розглядався вплив параметрів конструкцій і режимів роботи на якісні показники» [22].

«Енерговитрати на технологічний процес розглядаються в розчленованому виді, однак залежності, що визначають витрати на попереднє ущільнення шару в зоні різання, у роботах не зустрічаються. Крім того, робочі органи, сприяючи зниженню шкідливих, попередніх різанню деформацій у зоні руйнування, дотепер не досліджені. Звідси виникає необхідність обґрунтування технологічного процесу фрезерування попередньо ущільненого моноліту, робочого органу для його здійснення й параметрів комбінованого різального апарату» [22].

## 1.5 Висновки за розділом

Проведений аналіз дозволяє зробити наступні висновки:

1. Для виробництва кормів найбільш перспективною вважається заготівля силосу в наземних спеціально облицьованих силосних траншеях великої місткості (від 1000 до 3000т) і грубих стеблових кормів у скиртах.
2. Найбільш повно вимогам виїмки і завантаження силосу й грубих кормів, а також їх наступній механізованій роздачі задовольняють навантажувачі безперервної дії.
3. Аналіз роботи навантажувачів із фрезерними барабанними робочими органами показують, що ці машини не універсальні і відзначаються високою енергетичною ємністю й нестабільними якісними показниками роботи.
4. Витрата енергії на попереднє ущільнення кормів в зоні руйнування становить 25...35 % від загальних енергетичних витрат на відділення.

Мета й задачі досліджень.

Встановлені висновки дозволяють можливість сформулювати мету дослідження: обґрунтування технологічного процесу відділення стеблових кормів від моноліту та режимних параметрів роботи комбінованого різального апарату навантажувача кормів, що забезпечують зниження енергетичної ємності й поліпшення якісних показників.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання.

1. Аналітично обґрунтувати найбільш раціональну технологічну схему віддільника навантажувача стеблових кормів.
2. Провести дослідження по обґрунтуванні параметрів і режимів роботи комбінованого різального апарату віддільника навантажувача кормів.
3. Розробити методику інженерного розрахунку комбінованого різального апарату.
4. На підставі теоретичних досліджень надати техніко-економічну оцінку запропонованої конструкції різального апарату.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1 Дослідження кінематики комбінованого різального апарату

«Під фрезеруванням стеблових кормів (силос, солома й ін.) розуміємо процес відділення від бурту шарів маси ножами, закріпленими на фрезерному барабані. Технологічний процес фрезерування силосованої маси й грубих кормів має багато спільного з роботою стаціонарних подрібнювачів, однак має ряд особливостей, головні з яких наступні: відсутність протиріжучої частини, складний рух робочих елементів (обертальний і переносний), циклічний характер процесу. Не менш важливою відмінністю є відсутність живильного механізму, що дозволяє подати рослинну масу в попередньо ущільненому виді.

Ущільнення є одним з основних факторів, що значно впливають на якісні й енергетичні показники роботи живильних і подрібнювальних апаратів. Як відзначає академік Гарячкін В.П., витрата енергії на подачу сягає 30...50 % від всієї витраченої енергії» [16].

«З аналізу діаграм фрезерування стеблових монолітів (рис. 2.1) можна побачити, що процесу зрізання деякого об'єму корму передуює процес ущільнення його в цій зоні, робота якого "А" займає значну частину діаграми "В".

Рослинна маса являє собою пружно-в'язкий матеріал, ущільнення якого супроводжується пружними й пластичними деформаціями. При повному знятті навантаження, коли шар пройшов живильні вальці, товщина його відновлюється на 60...80 %» [16].

«Час до проходження чергового ножа по цьому сліду, значно більший часу відновлення моноліту. Тому робота ущільнення повторюється при черговому ході ножа кожним з ріжучих елементів, установлених на фрезерному барабані» [16].

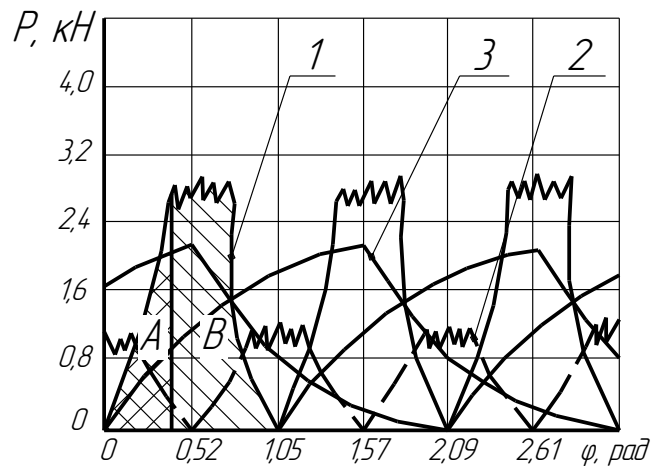


Рисунок. 2.1 – Фазова характеристика роботи віддільників кормів

- 1 - діаграма різання кормів одинарного ножа фрезерного барабана;  
 2 - діаграма різання кормів одинарного ножа комбінованого віддільника; 3 - діаграма зусиль роботи прорізного ножа

«На фазовій характеристиці пунктиром показані діаграми ножових елементів, зони деформації яких не накладаються, являються суміжними по ширині віддільника. Проходження ножів по суміжних слідах не забезпечує утримання моноліту в ущільненому стані попереднім ножем, а витрачена раніше енергія ущільнення повертає моноліт у вихідне положення й втрачається.

Для досягнення поставленої мети пропонується комбінований різальний апарат (рисунок 2.2).

Таким чином у конструкції пристрою необхідно мати елементи, що зможуть утримувати моноліт в ущільненому стані, досягнутого проходженням фрезерних ножів в зоні відділення і які забезпечать у ній постійне розподілене навантаження.

Додаткові прорізні ножі, установлені на границях зон фрезерування (деформації) забезпечують утримання моноліту в ущільненому стані в інтервалах проходів фрезерних елементів» [16].

«На відміну від відомих конструкцій пропонується схема вимагає узгодження кінематичних і геометричних параметрів фрезерних і прорізних ножів, що забезпечують їх синхронну роботу, визначення зусиль, що виникають при їх спільному русі, енергетичних витрат на процес відділення корму» [16].

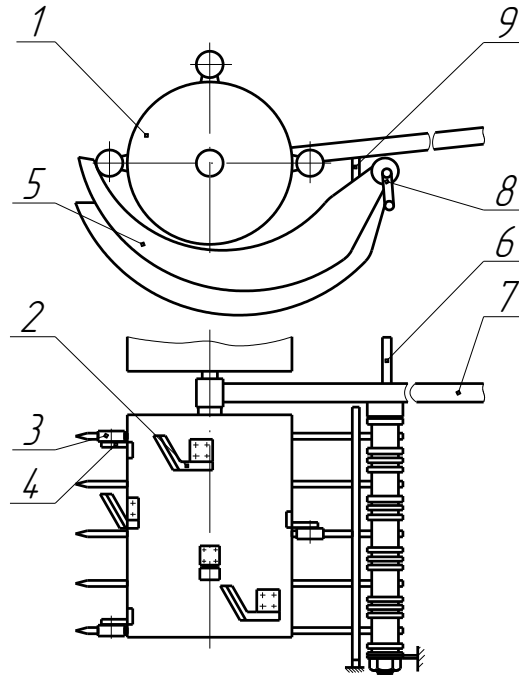


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема комбінованого віддільника

1 - фрезерний барабан; 2 – робочий ніж; 3 - ролик; 4 – кронштейн ролика; 5 - прорізний ніж; 6 – вісь кріплення прорізних ножів; 7 - стріла; 8 - обмежник; 9 - упор

«Відмінною особливістю розглянутого комбінованого апарату є наявність пакета додаткових ножів. Привід ножів здійснюється за допомогою роликів, закріплених на барабані.

Абсолютна швидкість точок ножа 2 (рис. 2.3) залежить від окружної й переносної швидкостей барабана.

Для одержання рівняння траєкторії, при нерухомій стрілі навантажувача, приймаємо за початок координат точку "m", а вісь "y" направляємо по радіусі-вектору відносно осі хитання.

При повороті барабана з роликом на кут  $\varphi$ , центр профілю ножа переміститься із точки  $A$  в точку  $A_0$  по дузі, описаної із центра обертання» [16].

«Розв'язання системи (2.1) відносно  $V_e$  має вигляд:

$$\vartheta_e = \vartheta \cdot \frac{\cos \beta \cdot \sin(\gamma + \beta) - \sin \beta \cdot \cos(\gamma + \beta)}{\sin(\gamma + \beta)}$$

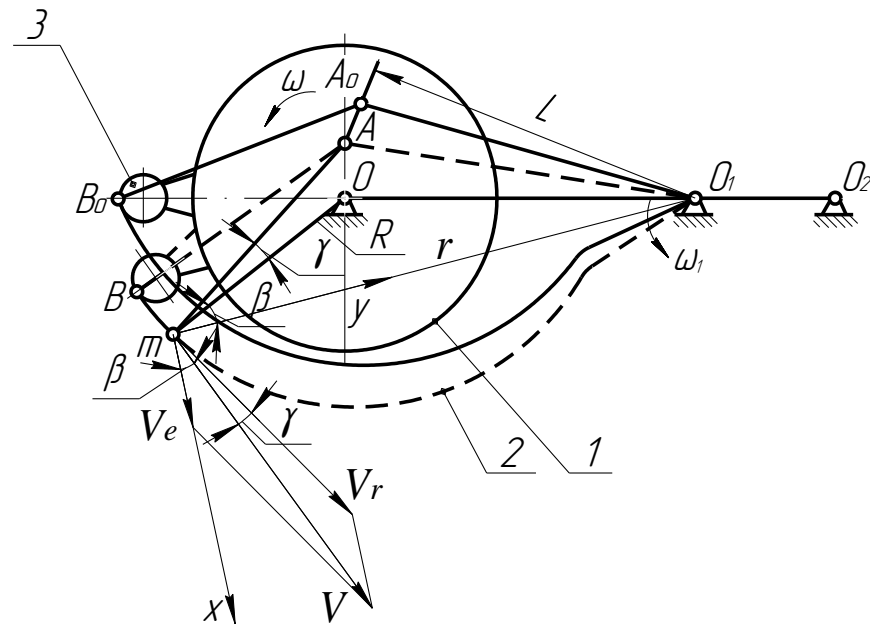


Рисунок 2.3 – Схема для визначення відносної швидкості ножа при нерухомій стрілі навантажувача» [16].

«Підставляючи значення кутів, що входять у формулу (2.2) із трикутника отримаємо:

$$\times \left[ R + L \cdot \cos \omega t - \frac{L \cdot \sin \omega t (R^2 + r^2 + 2Rr \cdot \cos \omega t)}{\sqrt{(R - 2L \cdot \cos \omega t)(2Rr^2 + R^3) - r^4 + 4R^2 L^2 \cdot \sin^2 \omega t}} \right]$$

Тоді:

$$\omega_i = \frac{\omega \cdot R}{R^2 + L^2 + 2RL \cdot \cos \omega t} \times$$

$$\times \left[ R + L \cdot \cos \omega t - \frac{L \cdot \sin \omega t (R^2 + r^2 + 2Rr \cdot \cos \omega t)}{\sqrt{(R - 2L \cdot \cos \omega t)(2Rr^2 + R^3) - r^4 + 4R^2 L^2 \cdot \sin^2 \omega t}} \right]$$

Таким чином, на швидкість точок додаткового ножа при нерухомій стрілі навантажувача впливають режимні й конструктивні параметри віддільника. З формули видно, що в межах кута повороту ролика відносно осі барабана, ніж врізається в масу, а в межах  $\left(\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi\right)$  ролик плавно котиться по тильному профілю, утримуючи масу до підходу фрезерного ножа» [16].

«Абсолютна швидкість точки "m" (швидкість різання ножа) при рухомій стрілі (рис. 2.4) визначається із залежності:

$$v_a = \sqrt{v_e^2 + v_n^2 - 2v_e v_n \cdot \cos \alpha_i}$$

де  $v_n$  – швидкість в обертовому русі навколо осі підвісу стріли  
 $v_n = \omega_z \cdot R_i$ ;

де  $\omega_z$  – кутова швидкість повороту стріли;

$R_i$  – радіус-вектор точки "m" відносно осі підвісу стріли» [16].

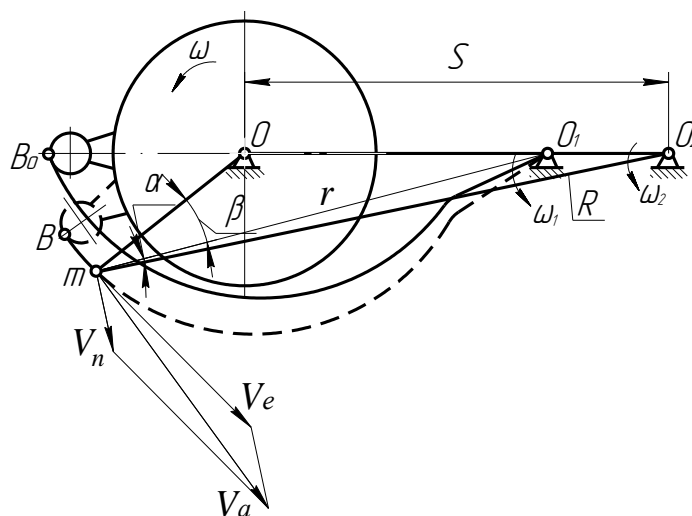


Рисунок 2.4 – Схема для визначення абсолютної швидкості відрізного ножа при рухомій стрілі навантажувача



«Значення кута  $\alpha_i$  між напрямками векторів швидкостей і радіуса-вектора “ $R_2$ ” визначаємо із трикутника .

$$\alpha_i = \arccos \frac{R + S \cdot \cos \omega t}{\sqrt{R^2 + S^2 + 2RS \cdot \cos \omega t}} - \arccos \frac{R + L \cdot \cos \omega t}{\sqrt{R^2 + L^2 + 2RL \cdot \cos \omega t}}$$

$$R_2 = \sqrt{R^2 + S^2 + 2RS \cdot \cos \omega t}$$

де  $S$  – довжина стріли» [16].

«Аналіз отриманих залежностей показує: кутова швидкість обертання ножа й абсолютна швидкість точок леза залежать від кута повороту барабана (рис. 2.5).

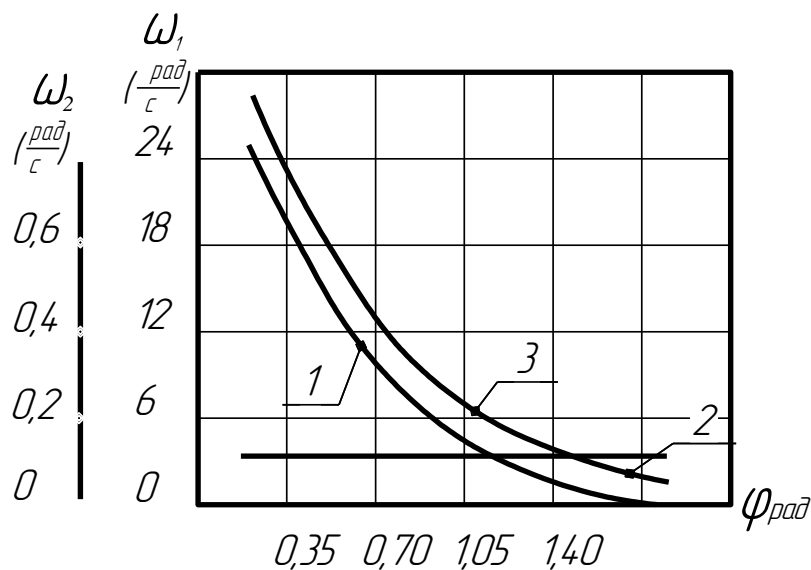


Рисунок 2.5 – Залежність кутової швидкості додаткового ножа від кута повороту ролика: 1 - відносна швидкість; 2 - переносна швидкість; 3 - абсолютна швидкість» [16].

«На початковому етапі ніж обертається з великою швидкістю, до моменту врізання ножа ( $\varphi = 1,57$  рад) швидкість його поступово

зменшується. Це пов'язано зі зміщенням центра профілю ножа відносно осі барабана. Таке зміщення викликане необхідністю створення умов роботи ножа, при яких пружний стан моноліту досягає свого максимального значення поступово, тому що при більших швидкостях деформуються пружні елементи й лише по мірі уповільнення швидкості відбувається деформація в'язких елементів.

Додаткові ножі, поряд з ущільненням моноліту, прорізають у ньому вертикальні щілини. Тому форма леза ножа повинна забезпечувати оптимальні умови процесу різання.

До форми леза висуваються наступні вимоги:

- кут ковзання  $\tau$  повинен зростати зі збільшенням радіуса-вектора;
- дуга різання повинна бути мінімальною;
- глибина різання при повороті ножа на той самий кут у міру видалення точок різання від осі обертання повинна зменшуватися;
- повинна дотримуватися умова защемлення;

Найбільш повно цим вимогам відповідає лезо, виконане по ексцентричному колу» [16].

«Побудова такого леза (рис. 2.6) виконується по заданим  $\tau_{\max}$ ,  $\tau_{\min}$  і радіусу кола й при необхідності перевіряється на умову защемлення.

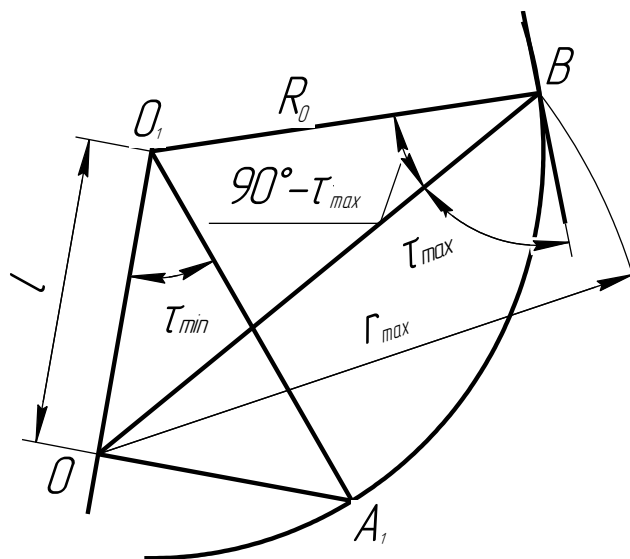


Рисунок 2.6 – Схема побудови кривої леза ножа» [16].

## 2.2 Дослідження роботи прорізних ножів

«Процес різання стебел рослин, як пружно-в'язкий матеріал може бути описаний внаслідок застосування закону Гука.

На рис.2.7 наведена схема проникнення ножа в шар стебел під дією зовнішньої сили. У процесі проникнення ножа в стебла матеріалу, що контактують із лезом, виникають напруження.

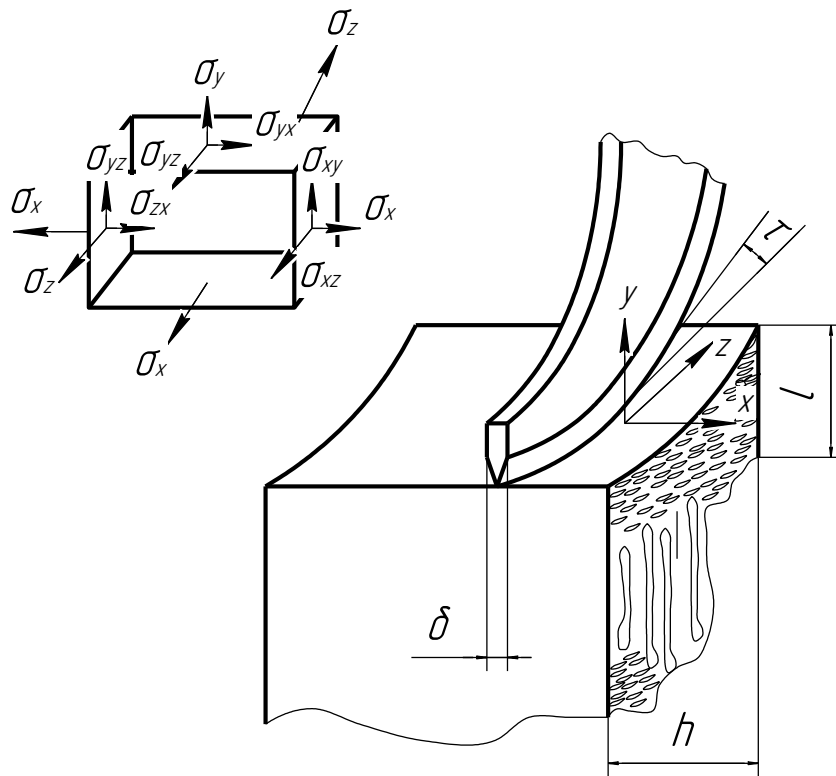


Рисунок 2.7 – Схема проникнення ножа в шар стебел:

$\delta$  – товщина леза ножа;  $l$  – товщина шару стебел;  $h$  – ширина шару стебел» [14].

«Об'ємний напружений стан у зоні руйнування описується рівнянням:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\sigma_x}{dx} + \frac{d\sigma_{xy}}{dy} + \frac{d\sigma_{xz}}{dz} &= \rho \frac{d^2 U}{dt^2} \\ \frac{d\sigma_{xy}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\sigma_{yz}}{dz} &= \rho \frac{d^2 l}{dt^2} \\ \frac{d\sigma_{xz}}{dx} + \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\sigma_z}{dz} &= \rho \frac{d^2 \theta}{dt^2} \end{aligned} \right\}$$

де  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}$  – компоненти напружень, що діють на елементарний об'єм;

$U, l, \theta$  – переміщення стебел по осям  $x, y, z$ » [14].

«Систему рівнянь (2.8) розв'яжемо при граничних умовах: при  $y=0$

$$\begin{cases} 0 & \text{якщо } -\frac{\sigma}{2} \geq x > \frac{\sigma}{2} \\ -\frac{m_i}{F_H} & \text{якщо } -\frac{\sigma}{2} \leq x \leq \frac{\sigma}{2} \end{cases}$$

$$\sigma_{xy} = 0$$

$$\sigma_{yz} = \begin{cases} 0 & \text{якщо } -\frac{\sigma}{2} > x > \frac{\sigma}{2} \\ -\frac{m_i}{F_H} \cdot \cos \tau & \text{якщо } -\frac{\sigma}{2} \leq x \leq \frac{\sigma}{2} \end{cases}$$

При  $y = 1$

$$\sigma_y = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = 0$$

при  $z=0$

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \begin{cases} 0 & \text{якщо } y > y_1 \\ -\frac{m_a}{F_H} & \text{якщо } y = y_1 \end{cases} \quad \sigma_{xz} = 0 \\ \sigma_{yz} &= \begin{cases} 0 & \text{якщо } y > y_1 \\ -\frac{m_a}{F_H} \cdot \cos \tau & \text{якщо } y < y_1 \end{cases} \end{aligned}$$

при  $z=l \setminus (H/2)$

$$\sigma_z = \sigma_{xz} = \sigma_{yz} = 0$$

де  $F_n$  – площа леза ножа

$$F_n = l_n \cdot \delta$$

Де  $l_n$  – довжина ножа, що приймає участь у різанні;

$\delta$  – товщина леза» [14].

«Закон Гука для ортотропного тіла представимо у вигляді рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= E_x \left[ \frac{du}{dx} + \nu_1 \left( \frac{dl}{dy} + \frac{d\theta}{dz} \right) \right] \\ \sigma_y &= E_y \left[ \frac{dl}{dy} + \nu_2 \left( \frac{du}{dx} + \frac{d\theta}{dz} \right) \right] \\ \sigma_z &= E_z \left[ \frac{d\theta}{dz} + \nu_3 \left( \frac{du}{dx} + \frac{dl}{dy} \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{xy} &= 2G \left( \frac{dl}{dx} - \frac{du}{dy} \right) \\ \sigma_{xz} &= 2G \left( \frac{du}{dz} - \frac{d\theta}{dx} \right) \\ \sigma_{yz} &= 2G \left( \frac{dl}{dz} - \frac{d\theta}{dy} \right) \end{aligned} \right\}$$

де  $E_x, E_y$  – модулі пружності відповідно вздовж і поперек волокон стебел;

$G$  – модуль зсуву;

$\nu_1, \nu_2$  – коефіцієнти Пуассона.

Між коефіцієнтами Пуассона  $\nu_1, \nu_2$  і модулями пружності  $E_x, E_y$  існує залежність:

$$\nu_2 = \nu_1 \cdot \frac{E_y}{E_x}$$

Розв'язуючи спільно системи рівнянь, знаходимо значення напружень і переміщень на кожній осі при сформульованих граничних умовах» [14].

«Враховуючи, що при різанні попередньо ущільненого матеріалу деформації в лезі ножа локалізуються, можна допустити, що вплив граничних умов на нормалі до осі  $X$  поверхні незначні. Тоді задача

зводиться до визначення напружень у двовимірній постановці. По площині  $y_{oz}$  система рівнянь спроститься:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_y}{dy} + \frac{d\sigma_{yz}}{dz} = \rho \frac{d^2 l}{dt^2} \\ \frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{d\sigma_{yz}}{dy} = \rho \frac{d^2 \theta}{dt^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_y = E_y \left( \frac{dl}{dy} + \nu_z \frac{d\theta}{dz} \right) \\ \sigma_z = E_z \left( \frac{d\theta}{dz} + \nu_a \frac{dl}{dy} \right) \\ \sigma_{yz} = 2G \left( \frac{d\theta}{dy} + \frac{dl}{dz} \right) \end{cases}$$

Розв'язання систем рівнянь дозволить визначити величини напружень і переміщень часток. Розв'язком поставленої задачі є визначення мінімальної величини суми кінетичної й потенційної енергій деформацій. При цьому кінетична енергія деформації елементарної частки стебла може бути обчислена для об'ємного напруженого стану» [14].

«Потенційна енергія деформації дорівнює:

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{2} \iint_F \left[ \sigma_x \frac{du}{dx} + \sigma_y \frac{dl}{dy} + \sigma_z \frac{d\theta}{dz} + 2\sigma_{xy} \left( \frac{du}{dy} + \frac{dl}{dx} \right) + 2\sigma_{xz} \left( \frac{du}{dz} + \frac{d\theta}{dx} \right) + 2\sigma_{yz} \left( \frac{dl}{dz} + \frac{d\theta}{dy} \right) \right] dF$$

де  $dF$  – елементарна площа контакту ножа із шаром стебел, що рівна похідній довжини й товщини леза» [14].

«Враховуючи те, що в розглянутому випадку основна частка руйнуючої енергії обумовлена дією дотичних напружень  $\sigma_{xy}$  через малі величини інших складових, ними можна знехтувати.

Рівняння показує, що руйнування відбувається під дією дотичних напружень зсуву й зусилля залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу й параметрів ножа.

Процес різання волокнистих матеріалів лезом полягає в наступному: лезо ножа, діючи на тіло, створює руйнівні напруження, розсовуючи його гранями й переборюючи сили тертя» [14].

«На рис. 2.8 представлена схема сил, що діють на ріжучу частину ножа.

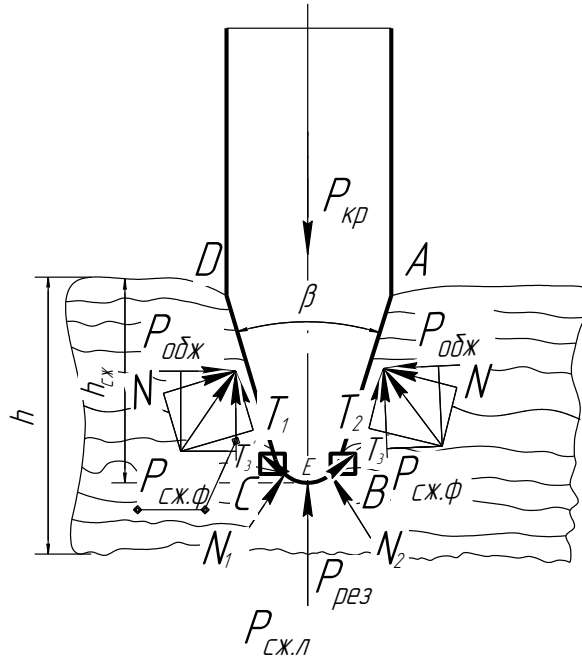


Рисунок 2.8 – Схема сил, що діють на лезо ножа в процесі різання

Після того, як лезо ВС ножа стикається із шаром рослинної маси, починається вигин стебел. Через те, що стебла рослин мають пористу будову й між ними є порожнечі, одночасно з вигином відбувається їхній стиск. Виникає сила попереднього стиску шару лезом  $P_{ст.л}$ . У міру просування ножа зусилля стиску зростає й коли воно досягає величини, необхідної для різання шару, починається процес надрізання шару стебел. У міру просування леза, зруйновані волокна розсовуючи бічними гранями АВ і DC, викликають додатковий опір від сил стиску» [16].

«Величина й розподіл цих сил визначають у свою чергу інтенсивність і характер зношування ріжучої частини ножа в процесі різання, У зв'язку з цим розрізняють три зони зношування на ріжучій частині ножа:

- по бічних гранях АВ і DC, де діють сили  $P_{обж}$  ;
- по лезу ВС, де діють сили  $P_{різ.}$  і  $P_{ст.л}$

Кромку леза точка Е розділяє на дві ділянки – ВЕ і СЕ.

Ділянка ВЕ оточена рослинною масою від Е до В, а ділянка ЕС від Е до С.

На ділянці СЕ діє сила тертя  $T_3$ , а на ділянці ВЕ – сила тертя  $T_2$ . Тоді зусилля різання буде дорівнювати:

$$\text{де } T = T_1 = T_2, \text{ а } T' = T_1 \cdot 3' = T_1 \cdot 3''$$

Аналіз формули показує, що виникаючі в процесі різання шару маси напруження стиску лезом і похилими фасками, приводять до зростання критичних зусиль різання» [14].

«Розглянемо схему сил, що діють на лезо ножа при прорізання попередньо ущільненого шару стебел (рис. 2.9).

У випадку прорізання попередньо ущільненого шару стебел відсутня сила стиску фасками. Виключаючи силу з формули, маємо:

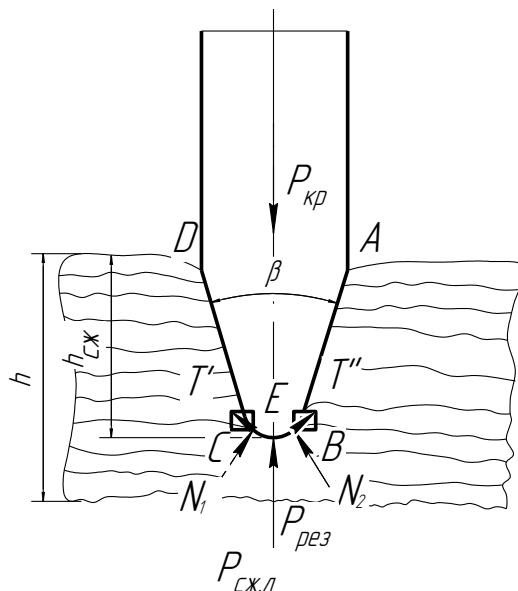


Рисунок 2.9 – Схема сил, що діють на лезо ножа в процесі різання попередньо ущільненого шару стебел» [14].

«У формулі основним вважаємо зусилля на прорізання шару маси.



Відомо, що на підставі закону Гука зусилля різання стебел  $P_{\text{різ}}$  визначається як добуток площі леза  $F_l$  на руйнівні напруження  $\sigma_d$ .

Залежність справедлива для різання рубанням. При ковзному різанні на шар матеріалу, крім нормальних тисків, діють дотичні сили, які викликають розтяг волокон у напрямку перпендикулярному нормальним тискам. Волокна стебел одночасно піддаються зминанню й розтягу, внаслідок чого руйнівні напруження при ковзному різанні трохи менші, ніж при різанні рубанням» [16].

«Залежність справедлива для випадку статичної взаємодії ножа із шаром. При швидкісному різанні, в початковий період руху прорізного ножа.

Із теорії пружності відомо, що значення коефіцієнта динамічності коливається в межах  $1,1 \dots 1,3$ . В такому випадку залежність показує, що при динамічному різанні зусилля для різання необхідно більше чим при статичному.

При дослідженні процесу різання на основі теорії об'ємного напруженого стану нами отримана залежність зусилля, необхідного для різання, що враховує модуль зсуву при зрізі

Рівняння дозволяє визначити зусилля, необхідне для різання шару стебел одним ножом. Але при роботі різального апарату в масі можуть виявитися одночасно кілька прорізних та фрезерних ножів» [14].

### 2.3 Дослідження довжини дуги ножа в зоні різання

«Для узгодження довжини дуги контакту додаткового ножа з масою необхідно, щоб її величина дорівнювала шляху, пройденому фрезерним ножом у зоні різання. Довжина шляху, пройденого фрезерним ножом, визначається як добуток його швидкості  $V$  на час перебування в зоні різання  $t$  в інтервалі кутів входу  $\alpha_{\text{max}}$  і виходу  $\alpha_{\text{min}}$  з маси (рис. 2.10).

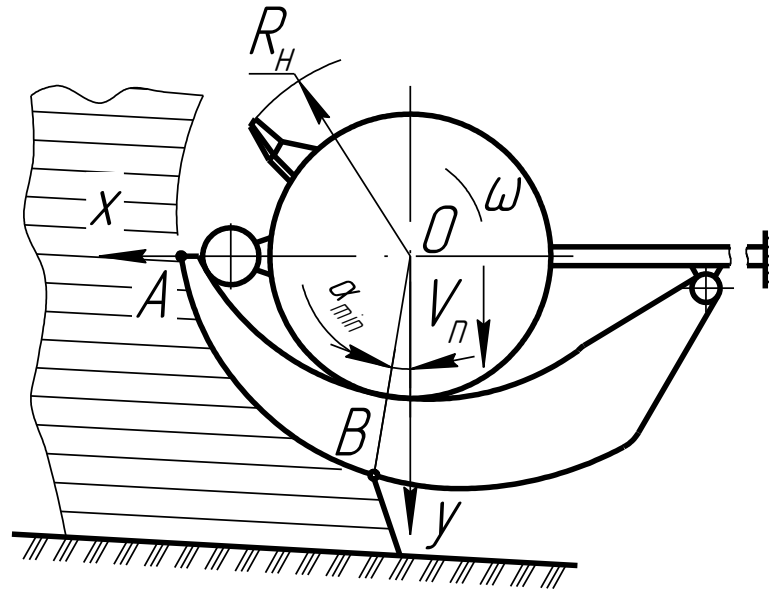


Рисунок 2.10 – Схема визначення довжини дуги прорізного ножа в зоні різання» [15].

«Абсолютна швидкість ножа при прямому фрезеруванні визначається по формулі:

$$v_a = \omega \cdot R \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha_i}$$

Де  $\omega$  – кутова швидкість обертання барабана;

$\alpha_i$  – поточний кут повороту ножа;

$\lambda$  – кінематичний показник траєкторії фрезерного ножа.

Тоді по теоремі про середнє, значенням безперервної функції  $v_a = f(\alpha_i)$  в інтервалі  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$  буде відношення означеного інтеграла від цієї функції до довжини інтервалу  $(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$ » [15].

«Враховуючи те, що підінтегральний вираз отриманої формули не виражається через елементарні функції, проведемо оцінку означеного інтеграла

$$\int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha} d\alpha$$

по нерівності Буняковського:

$$\left[ \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} f(\alpha)g(\alpha)d(\alpha) \right]^2 \leq \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} [f(\alpha)]^2 d\alpha \cdot \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} [g(\alpha)]^2 d\alpha$$

Для цього представимо підінтегральну функцію у вигляді:

$$\sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha}, \text{ так що } f(\alpha) = 1, \quad g(\alpha) = \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha}$$

Нерівність Буняковського є точною оцінкою інтеграла, з деякою похибкою його можна використовувати як рівність:» [15].

$$\int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha} d\alpha \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} 1 \cdot \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha_{\max}} \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \sin \alpha} d\alpha$$

«Після перетворення маємо:

$$l_H = R_H (\alpha_{\max} - \alpha_{\min}) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{\cos \alpha_{\max} - \cos \alpha_{\min}}{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}}$$

при  $\alpha_{\max} = \pi/2$  отримуємо:

$$l_H = \left( \frac{\pi}{2} - \alpha_{\min} \right) \cdot R_H \sqrt{1 + \frac{1}{\lambda^2} - \frac{4}{\lambda} \cdot \frac{\cos \alpha_{\min}}{\pi - 2\alpha_{\min}}},$$

де  $\alpha_{\min}$  – кут виходу фрезерного ножа з моноліту

$$\alpha_{\min} = \arctan \frac{\sqrt{8Rh - h^2} - S_H}{2 \cdot (R + h)}$$

де  $S_H$  – подача на один оберт барабана» [15].

«Аналізуючи формулу бачимо, що довжина шляху контакту ножа з масою (шлях різання) залежить від радіуса барабана –  $R_n$ , глибини фрезерування –  $h$ , кінематичного режиму фрезерування –  $\lambda$  і кутів входу  $\alpha_{\max}$  і виходу  $\alpha_{\min}$  ножів з маси. Кінематичний режим фрезерування  $\lambda$  визначається відношенням колової швидкості  $V_o$  до поступальної  $V_n$ .

Для визначення оптимального режиму роботи комбінованого різального апарату необхідно врахувати й інші технологічні параметри процесу, такі як швидкість різання й подача залежно від виду відокремлюваного корму, зоотехнічних вимог, пропонованих до якісних показників процесу в реальних виробничих умовах» [15].

## 2.4 Обґрунтування потужність приводу віддільника

«Відомо, що потужність  $N$ , витрачена на роботу подрібнювального пристрою, розподіляється на безпосереднє різання корму, на відкидання подрібненого продукту і на привод різального апарату без навантаження.

У формулі перший член враховує втрати енергії на тертя в підшипниках і тертя бічних поверхонь деталей об повітря, а другий член на повідомлення швидкості повітря:

$$A'_1 = R_1 \cdot f_1 \cdot r + \tau_1 \cdot z_n (S_n + b_1 \cdot l_1 \cdot \sin \psi_1),$$

де  $f_1$ ,  $R_1$  – коефіцієнт тертя й реакції сил в опорах;

$r$  – радіус цапф;

$S_n$  – площа проекції ножа на напрямок обертання;

$\tau$  – питомий момент тертя;

$z_n$  – число рухомих ножів;

$b_1$ ,  $l_1$ ,  $\psi_1$  – відповідно ширина, довжина й кут встановлення ножа» [16].

«Другий член у формулі дорівнює:

$$B \cdot \omega^3 = \frac{m_B \cdot \varepsilon_1^2 \cdot \vartheta_e^2}{2},$$

де  $m_B$  – секундна маса повітря, переміщувана ножем;

$\varepsilon_1$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує різницю швидкості ножа й переміщуваного повітря;

$V_e$  – лінійна швидкість центра лобової поверхні ножа

$$m_B = \frac{\rho_B \cdot F_H \cdot z_H \cdot \vartheta_H}{g},$$

де  $\rho_B$  – густина повітря;

$F_H$  – площа лобової поверхні ножа» [16].

$$F_H = b_1 \cdot l_1 \cdot \cos \tau \cdot \sin \psi$$

«Підставивши значення  $m_B$ ,  $F_H$  у рівняння, враховуючи, що

$$\vartheta_H = \omega \cdot r_{Ц},$$

отримаємо:

$$B_1 = \frac{\rho_B \cdot z_H \cdot b_1 \cdot l_1 \cdot \cos \tau \cdot \sin \psi \varepsilon_1^2 r_{Ц}^2}{2g}$$

Після відповідних перетворень рівняння приймає вид:

$$x \omega + \frac{\rho_B \cdot z_H \cdot b_1 \cdot l_1 \cdot \cos \tau \cdot \sin \psi \varepsilon_1^2 r_{Ц}^2}{2g} \cdot \omega^3$$

З урахуванням отриманих рівнянь маємо кінцевий вид формули:» [16].

$$x \omega + \frac{\rho_B \cdot z_H \cdot b_1 \cdot l_1 \cdot \cos \tau \cdot \sin \psi \varepsilon_1^2 r_{Ц}^2}{2g} \cdot \omega^3$$

## 2.5 Обґрунтування продуктивності комбінованого різального апарату

«Продуктивність навантажувача за один цикл можна визначити по формулі:

$$Q_{\text{ц}} = \frac{V \cdot \rho}{t},$$

де  $V$  – обсяг маси, що зрізується за робочий хід;

$\rho$  – щільність матеріалу;

$t$  – час циклу.

Обсяг маси, що зрізується за робочий хід визначається з виразу:

$$V = F \cdot a \cdot n(z - 1),$$

де  $F$  – площа перерізу стружки, знятої ножом за один оберт барабана;

$a$  – відстань між додатковими ножами (крок ножів);

$n$  – число обертів барабана за робочий хід;

$z$  – число додаткових ножів» [16].

«Час встановлення комбінованого апарату над монолітом залежить від маневреності навантажувача й майстерності машиніста. Для навантажувачів приймають .

Аналіз залежності показує, що для визначення технічної продуктивності навантажувача стеблових кормів з комбінованим різальним апаратом необхідно знати його конструктивні й режимно-кінематичні параметри.

Продуктивність залежить від щільності кормового моноліту, подачі й швидкості холостого ходу комбінованого апарату, кроку додаткових ножів і площі поперечного перерізу стружки, що зрізується ножом, у проміжках між ними» [15].

## 2.6 Розрахунок площі перерізу різання

«У процесі роботи навантажувача відділення корму від моноліту фрезерним барабаном відбувається у вигляді стружки.

Відділення стружки при вільному фрезеруванні робочими органами сучасних навантажувачів відбувається з постійно змінним об'ємом, тому що різанню передують ущільнення моноліту пропорційно зусиллю різання.

Лінія АВ (рис. 2.11) відповідає верхній межі моноліту до початку різання. Після входження ножа в моноліт у точці А відбувається його ущільнення й лінія АВ у міру переміщення займає положення АВ. Сама стружка зрізується по лінії траєкторії АС. Після виходу із зони різання слід ножа займає положення АС. Надалі процес повторюється. Площа АВВ пропорційна роботі ущільнення, виконуваної ножем при кожному проході.

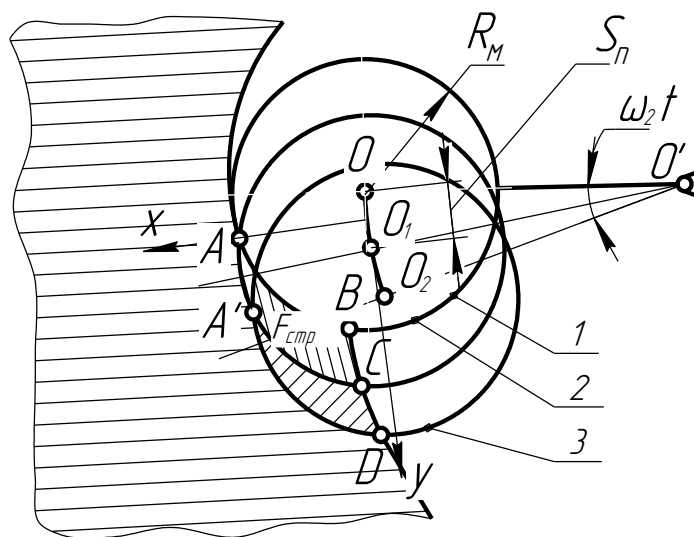


Рисунок 2.11 – Схема утворення стружки при вільному фрезеруванні:  $R_M$  - траєкторії ножів фрезерного барабана;  $S_n$  – подача барабана» [15].

«Відбір корму досліджуваним віддільником проходить у вигляді стружки без значного додаткового ущільнення.

Розглянемо площу перерізу стружки, утвореної ножами фрезбарабана за один оберт і відповідній йому подачі  $S_n$ . Для одержання рівняння

траєкторій 1, 2 і 3 приймаємо за початок координат точку  $O$  (рис. 2.12). При подачі барабана, що відповідає одному оберту ножа, центр барабана зміститься із точки  $O_1$  в точку  $O_2$  по дузі радіуса  $O_1O$ .

З достатнім ступенем наближення міркуємо, що за один оберт барабана в силу малої подачі й великої довжини стріли підвісу, центр його переміститься по прямій» [15].

«Рівняння траєкторії 1 (AB) з центром в точці  $O_1$  має вид кола:

$$x^2 + \left(y + \frac{S_H}{2}\right)^2 = R^2$$

Рівняння кола із центром у точці  $O_1$ :

$$x^2 + \left(y - \frac{S_H}{2}\right)^2 = R^2$$

де  $R$  – радіус кола точки леза ножа

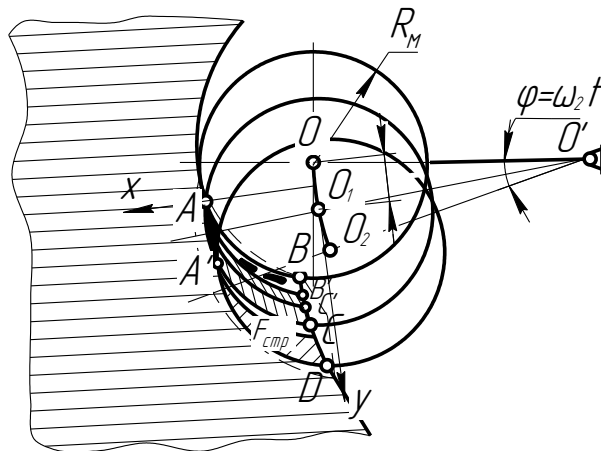


Рисунок 2.12 – Схема утворення стружки при фрезеруванні ущільненого моноліту» [15].

«Рівняння лінії (3) має вигляд:

$$x = R - h,$$

де  $h$  – глибина фрезерування.

Рівняння у полярній системі координат перетвориться у вигляд:



$$\begin{cases} \rho \cdot \cos \alpha = x \\ \rho \cdot \sin \alpha = y \end{cases}$$

Площу перерізу стружки  $F$  знаходимо, замінюючи траєкторії 1 і 2 дугами кола, а подачу  $S_H$  – прямолінійною ділянкою:

$$F = \frac{1}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (\rho_2^2 - \rho_1^2) d\alpha + \frac{1}{2} \int_{\alpha_2}^{\pi/2} (\rho_2^2 - \rho_1^2) d\alpha$$

Розв'язуючи систему рівнянь відносно  $\rho$  і підставляючи отримані розв'язки у формулу отримаємо:

$$F = \frac{1}{2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \left[ \frac{4R^2 - S_H^2 \cdot \cos^2 \alpha - 2S_H \cdot \sin \alpha \sqrt{4R^2 - S_H^2 \cdot \cos^2 \alpha}}{4} + \frac{(R - h)^2}{\cos^2 \alpha} \right] d\alpha +$$

Інтегруючи рівняння по частинам отримуємо:

$$\begin{aligned} F = & \frac{1}{2} \cdot R^2 (\alpha_2 - \alpha_1) - \frac{1}{16} \cdot S_H^2 (\sin 2\alpha_2 - \sin 2\alpha_1) + \frac{3}{8} \cdot S_H \cdot \cos \alpha_2 \times \\ & \times \sqrt{4R^2 - S_H^2 \cdot \cos^2 \alpha_2} - \frac{3}{2} \cdot R^2 \arcsin \frac{S_H \cdot \cos \alpha_2}{2R} - \frac{1}{8} \cdot S_H \cdot \cos \alpha_1 \times \\ & \times \sqrt{4R^2 - S_H^2 \cos^2 \alpha_1} + \frac{1}{2} R^2 \arcsin \frac{S_H \cdot \cos \alpha_1}{2R} - \frac{1}{2} (R - h)^2 \times \\ & \times (\tan \alpha_2 - \tan \alpha_1), \end{aligned}$$

де  $\alpha_1$  – кут виходу попереднього ножа відносно положення центра барабана при наступному зрізі;

$\alpha_2$  – кут виходу ножа поточного зрізу стружки, рівний» [15].

$$\alpha_2 = \arctan \frac{\sqrt{8Rh - h^2} + S_H}{2(R + h)}$$

Таким чином, отримана залежність утворення стружки дозволяє розрахувати площу перерізу стружки при заданій подачі  $S_H$ , глибини фрезерування та геометричних розмірів барабана.

## 2.7 Енергетична ємність процесу різання

«Для подрібнення стеблових кормів основне рівняння соломосилосорізки, отримане академіком В.П. Горячкіним, дозволяє записати енергоємність процесу у вигляді залежності:

Витрати енергії на процес залежать від питомого опору матеріалу (моноліту) різанню  $\varphi_0$ , щільності й довжини одержуваних при подрібнюванні часток, обумовленої зоотехнічними вимогами.

Стосовно фрезерних робочих органів, довжину різання, як правило, визначають із геометричних і конструктивних міркувань залежно від конкретної кінематичної схеми віддільника» [12].

«З урахуванням особливостей конструкції комбінованого різального апарату й можливої орієнтації стебел у зоні різання максимальна довжина часток (рис. 2.13) після відділення може бути визначена як діагональ  $BD_1$  по формулі:

$$l_{p.max} = \sqrt{l^2 + a^2 + S_H^2},$$

де  $l = AB$ ,  $a = AD$ ,  $S_H = AA$

$$l = S_H \cdot \tan \varphi_0$$

При діагональному (BD) положенні частки довжина її складає:



«Остаточно факторна характеристика за критерієм оптимізації енергоємності, що підлягає експериментальній перевірці може бути представлена в загальному виді:

$$l = f(c, S_{\text{н}}, h, a, \vartheta)$$

де  $C$  – стала, що характеризує фізико-механічні властивості моноліту.

Аналіз процесу взаємодії комбінованого різального апарату з кормовим монолітом дозволив:

- отримати залежності для визначення основних його параметрів;
- підтвердити припущення про можливість зниження енергоємності процесу за рахунок постійного втримання моноліту в зоні фрезерування в ущільненому стані;
- показати можливість регулювання ступені подрібнення;
- скласти факторну характеристику процесу, що підлягає експериментальній перевірці з метою оптимізації його параметрів і параметрів віддільника залежно від фізико-механічних властивостей кормових монолітів» [12].

### РОЗДІЛ 3.

## МЕТОДИКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 3.1 Опис експериментальної установки

«Дослідження робочого процесу відділення кормів проводилося на експериментальній установці, що являє собою навантажувач ПСК-5, наприкінці стріли якого встановлений комбінований віддільник. Комбінований різальний апарат (рис. 3.1) являє собою барабан діаметром 240 мм, з горизонтальною віссю обертання, на поверхні якого по гвинтовій лінії розміщені Г - подібні фрезерні ножі й ролики, установлені на осях кронштейнів з випередженням на  $60^\circ$ . Під барабаном, у площині роликів, розміщені додаткові прорізні ножі, які мають спільну вісь, закріплену на стрілі.

Прорізні ножі (рис. 3.2), установлені на осі, здійснюють обертовий рух. Щоб ножі не провисали в момент підйому стріли передбачений знімний обмежник. Торканню ножа об поверхню барабана при виході ролика з його профілю запобігає упор, закріплений на кожусі.

Привід віддільника електричний. Передача від електродвигуна потужністю 10,5 кВт до валу фрезерного барабана здійснюється через два конічні редуктори й карданний вал.

Прорізні ножі виготовлені з листової сталі. Для додання твердості, на тильному профілю їх приварені смуги, які утворюють бігову дорожку роликів.

Ролики (рис. 3.3) встановлені на підшипниках і закріплені в кронштейнах.

Фрезерні ножі (рис. 3.4) виготовлялися по шаблону із сталі 65Г з наступним наплавленням і заточенням ріжучих кромek» [13].

«Принцип роботи установки. Послідовно включається привід шнека й вентилятора, а потім віддільника, вмикається подача. При обертанні барабана ролики, набігаючи по черзі на доріжки прорізних ножів, приводять їх в рух,

утворюючи вертикальні щілини. Фрезерні ножі зрізують масу між прорізними ножами в перпендикулярній до них площині й виводять її із зони відділення. Під дією стріли, що опускається з вантажем, прорізні ножі утримують масу в стисненому стані.

Частота обертання барабана при дослідженні процесу відділення корму змінювалася змінними шківками в межах 450...800 хв-1

Подача встановлювалася дросель регулятором, закріпленим у кабіні трактора» [13].



Рисунок 3.1 – Комбінований віддільник стеблових кормів

1 – робочий барабан; 2 - фрезерний ніж; 3 - ролик; 4 - прорізний ніж; 5 - вісь; 6 - упор; 7 - обмежник; 8 – кожух барабана; 9 - рама для кріплення.



Рисунок 3.2 – Загальний вид прорізних ножів



Рисунок 3.3 – Привідні ролики барабана

«Зусилля стиску регулювалося змінними вантажами, встановленими на кожусі віддільника, у межах 2...5 кН.

Величина відхилення прорізних ножів, змінювалася шляхом переміщення роликів у прорізах кронштейнів у межах 40...60 мм.

Крок ножів змінювався регулювальними втулками й шайбами.

Живлення електродвигуна здійснювалося від мережі змінного струму напругою 220/380 В. через щит управління, встановлений у кабіні трактора» [13].



Рис. 3.4. Фрезерні ножі віддільника

«У процесі дослідження вимірялися: зусилля на фрезерних і додаткових ножах, зусилля стиску, час досліду й переміщення віддільника, маса відділеного корму; задавалися: глибина фрезерування, подача й частота обертання, хід і крок додаткових ножів. Оцінювався гранулометричний склад

відібраного корму в кожному досліді по масовому вмісту часток відповідної довжини.

Для вимірювання зусиль на фрезерних ножах, стійка одного з них оснащувалася тензорезисторами типу ПКБ, наклеєними на мостовій схемі. Перетворені сигнали механічних величин підсилювалися за допомогою підсилювача ТОПАЗ-3-01 і записувалися на світлочутливий папір осцилографом Н117.

Продуктивність визначалася взяттям проб за певний час, фіксований секундоміром з ціною поділки 0,2с, з наступним зважуванням» [13].

«Величина продуктивності визначалася по формулі:

$$Q = 3,6 \cdot \frac{q}{t},$$

де  $q$  – маса відібраної проби корму;

$t$  – час взяття проби.

Знаючи загальну ефективну потужність досліду, обчислену по площі діаграми, і масу відділеного моноліту корму за одиницю часу  $Q$ , знаходимо енергоємність (критерій оптимізації для кожного рядка матриці).

Для визначення якості подрібненого корму після відділення бралися проби.

У відібраній пробі частки поділялися на класи, інтервали яких склали до 10 мм, 10...20 мм, 20...30 мм, 40...60 мм і понад 60 мм. Зважування часток кожного класу проводилося на аналітичних вагах із ціною поділки 0,05 г.

Оцінка вірогідності експериментальних даних проводилася із використанням теорії ймовірності і математичної статистики» [13].

«Перед реалізацією плану експерименту на відповідному виді корму визначалися його основні фізико-механічні характеристики: щільність, вологість і середня довжина часток і стебел, опір різанню, коефіцієнти тертя і бокового тиску, модуль пружності наведених в табл. 3.1.



Для визначення вказаних характеристик використані відомі методи, застосовані відповідно до умов процесу» [13].

«Таблиця 3.1 – Характеристика досліджуваних кормів

Корма	Строк зберігання, місяців	Висота забору проб, м	Вологість, %	Щільність, кг/м <sup>3</sup>	Середня довжина стебел, мм
силос кукурудзяний	9,5	4,0...4,5	70,3	610,0	96
		2,5...3,0	73,4	623,6	
		1,0...1,5	75,8	636,0	
сіно з люцерни	11	3,5...4,0	17,1	119,8	485
		2,5...3,0	18,9	126,5	
		1,0...1,5	21,4	132,0	

Коефіцієнти тертя визначалися у діапазоні тисків 0,1...0,4 МПа й швидкостей 10...18 м/с. за методикою Омельченко А.А. для робочих поверхонь фрезерних і додаткових ножів» [13].

### 3.2 Результати досліджень енергоємності та якості подрібнення

«Для дослідження процесу відділення стеблових кормів від монолітів і навантаження їх у транспортні засоби був визначений метод математичного планування багатофакторного експерименту.

У якості критеріїв оптимізації (параметрів) прийняті енергоємність, що характеризує досконалість технологічного процесу й ступінь подрібнення, оцінювана вмістом часток 40...60 мм у пробі відібраного типу корму: силосу кукурудзяного та сіна з люцерни.

Були відібрані п'ять факторів, які найбільш впливають на параметри оптимізації: швидкість фрезерування  $V(x_1)$ , зусилля стиску  $P(x_2)$ , глибина фрезерування  $h(x_3)$ , хід  $l(x_4)$  і крок  $a(x_5)$  додаткових ножів, ставився повний факторний експеримент» [13].

«Рівні та інтервали варіювання факторів наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Фактори, інтервали й рівні варіювання

Фактори	Швидкість фрезерування $V$ м/с	Зусилля стиску $P$ , кН	Глибина фрезерування $h$ , м	Крок ножів $a$ , м	Хід ножів $l$ , м
Основний рівень $x_i = 0$	14,5	3,5	0,20	0,08	0,06
Інтервал варіювання, $\varepsilon$	2,5	1,5	0,05	0,02	0,02
Верхній рівень $x_i^B = +1$	17,0	5,0	0,25	0,10	0,08
Нижній рівень $x_i^H = -1$	12,0	2,0	0,15	0,06	0,04
Зіркове плече: $\alpha = +1,547$	18,4	5,8	0,28	0,11	0,09
$\alpha = -1,547$	10,6	1,2	0,12	0,05	0,03

Для дослідження процесу прийнятий план другого порядку, що дозволяє одержати уявлення про функцію відгуку за допомогою полінома другого ступеня.

В цій області домінуюче значення має коефіцієнт регресії при квадратичних членах і ефектах взаємодії» [13].

«Для визначення оптимального сполучення факторів  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  необхідно отримати математичний опис поверхонь відгуку, утворених енергоємністю –  $y$  й ступенем подрібнення –  $y'$ . Найбільш зручним для досліджень є центральний композиційний рототабельний план, що дозволяє

отримати рівномірну інформацію по всім напрямкам факторного простору. Ядром плану є факторний експеримент, що включає 32 досліди. Для опису поверхні відгуку поліномом другого порядку, кожній змінній необхідно дати хоча б три значення.

У результаті реалізації плану отримаємо значення критеріїв оптимізації енергоємності і ступені подрібнення для силосу й сіна.

Відтворюваність процесу перевіряли за критерієм Кохрена.

Після розрахунків коефіцієнтів регресії перевіряли гіпотезу адекватності представлення результатів дослідів поліномом другого порядку.

Адекватність математичної моделі другого порядку перевіряли за допомогою критерію Фішера» [16].

«Для знаходження критерія Фішера й розрахунків значимості коефіцієнтів регресії побудували допоміжні таблиці й по їхніх результатах знайшли дисперсію неадекватності й дисперсію, що характеризує помилку досліду для досліджуваних видів кормів.

Значимість відмінності  $b = y$  перевіряли по критерію Ст'юдента, обчисленому по формулі» [16].

«Після перевірки відтворюваності процесу значення критеріїв Кохрена дорівнюють:

для енергоємності:

для відокремлення силосу кукурудзяного від моноліту  $G = 0,05S$ ;

для відокремлення сіна з люцерни від моноліту  $G = 0,05S$ ;

для якості подрібнення – відповідно 0,07 і 0,045.

При числі незалежних оцінок дисперсії  $f_n = 43$  і числі степенів свободи кожної оцінки  $F_u = 4$ , табличне значення  $G$  – критерію при п'ятивідсотковому рівні значимості дорівнює 0,30.

У результаті перевірки отримано  $G < G_{\text{т}}$ . Отже, однорідність оцінки дисперсій знаходиться в допустимих межах» [16].

«Рівняння регресії за результатами реалізації ортогонального плану для критеріїв оптимізації процесу відділення корму від моноліту в умовних змінних мають вигляд:

для силосу кукурудзяного:

$$\begin{aligned}\hat{y} = & 0,6356 + 0,0298x_1 + 0,0047x_2 - 0,0591x_3 - 0,0050x_4 - 0,0171x_5 + \\ & + 0,0263x_1^2 + 0,0036x_2^2 + 0,0371x_3^2 + 0,0166x_4^2 + 0,0257x_5^2 - 0,011x_1x_2 - \\ & - 0,0201x_1x_3 + 0,0129x_1x_4 - 0,0039x_1x_5 + 0,0312x_2x_3 + 0,0045x_2x_4 - \\ \hat{y} = & 71,507 - 1,80x_1 + 0,651x_2 - 2,049x_3 + 1,335x_4 - 1,905x_5 + 1,75x_1^2 + \\ & + 1,308x_2^2 + 1,067x_3^2 + 2,60x_4^2 + 2,331x_5^2 - 0,371x_1x_2 + 1,003x_1x_3 + \\ & + 0,703x_1x_4 - 1,621x_1x_5 - 0,647x_2x_3 + 1,053x_2x_4 - 0,059x_2x_5 + \\ & + 0,072x_3x_4 - 0,928x_3x_5 - 0,228x_4x_5;\end{aligned}$$

для сіна з люцерни:

$$\begin{aligned}\hat{y} = & 1,2434 + 0,0081x_1 - 0,0151x_2 - 0,0370x_3 - 0,0062x_4 - 0,0138x_5 + \\ & + 0,0487x_1^2 + 0,0167x_2^2 + 0,0141x_3^2 + 0,0266x_4^2 + 0,0281x_5^2 - 0,0131x_1x_2 - \\ & - 0,0136x_1x_3 - 0,0101x_1x_4 - 0,0028x_1x_5 + 0,0088x_2x_3 + 0,0045x_2x_4 - \\ & - 0,0098x_2x_5 - 0,0169x_3x_4 - 0,0078x_3x_5 - 0,0090x_4x_5 \\ \hat{y} = & 71,972 - 2,422x_1 + 0,273x_2 - 7,381x_3 + 1,432x_4 - 4,132x_5 + \\ & + 2,0x_1^2 + 0,895x_2^2 + 0,955x_3^2 + 1,517x_4^2 + 0,275x_5^2 - 0,684x_1x_2 - \\ & - 1,172x_1x_3 + 0,753x_1x_4 - 2,891x_1x_5 + 0,622x_2x_3 + 1,178x_2x_4 - \\ & - 0,322x_2x_5 + 0,572x_3x_4 + 0,0066x_3x_5 + 0,00228x_4x_5;\end{aligned}$$

З отриманих рівнянь помітно, що найбільший вплив на енергоємність процесу виявляє фактор  $x_a$  – глибина фрезерування. Зі збільшенням глибини фрезерування питома витрата енергії на відділення порції корму зменшується. З ростом цього фактора якість подрібнення корму погіршується» [16].

«Другим фактором по силі впливу на енергоємність відділення корму є  $x_1$  – швидкість фрезерування. При збільшенні цього параметра енергоємність росте. Це пов'язано з тим, що збільшення значення даного фактору не приводить до зростання масової продуктивності робочого органу, а за

рахунок росту частоти входження ножових елементів в масу збільшується робота різання. Збільшення швидкості фрезерування викликає додаткове подрібнення маси.

Найменший коефіцієнт регресії в рівнянні (3.7) отриманий перед фактором  $x_2$  – зусилля стиску, а в рівняннях (3.9; 3.10) перед фактором  $x_4$  – глибина ходу ножів. Знак мінус перед ними означає, що зі збільшенням зусилля стиску при відборі силосу й ходу ножів при здрібнюванні сіна відбувається зменшення енергоємності процесу. Це пов'язане з тим, що в силу високої початкової щільності укладеної силосної маси, подальше зростання зусилля стиску зумовлює збільшення витрат енергії на привід додаткових ножів. При подрібненні сіна, збільшення ходу ножів призводить до мінімального зниження роботи на попереднє ущільнення маси в зоні відділення» [16].

«Другим після глибини фрезерування фактором, що впливає на якість подрібнення є  $x_5$  – крок ножів (відстань між ножами). Збільшення цього фактора спричинює погіршення якості подрібнення.

З парних взаємодій найбільш значимим для питомої енергоємності процесу відділення корму є ефект взаємодії факторів  $x_a$  і  $x_4$  на силосі й  $x_1$ , на сіні.

Якщо два фактора одночасно будуть перебувати на різних рівнях, наприклад  $x_a$  на верхньому,  $x_4$  на нижньому для силосу або  $x_1$  на верхньому,  $x_4$  на нижньому для сіна, то функція відгуку буде зменшуватися за рахунок зниження роботи попереднього ущільнення маси в зоні відділення й збільшення глибини фрезерування.

Знак "мінус" перед ефектами взаємодій  $x_a$  і  $x_4$ ,  $x_1$  і  $x_4$  означає, що якщо ці фактори будуть знаходитися на різних рівнях, то функція відгуку буде збільшуватися» [16].

«Для якості подрібнення найбільш значимим є ефект парної взаємодії факторів  $x_1$  і  $x_5$ . Якщо два фактори будуть перебувати на різних рівнях, то якість подрібнення буде поліпшуватися. Наприклад, якщо,  $x_1$  – на нижньому,

$x_5$  – на верхньому рівнях, то покращення якості відбудеться в силу додаткового перетинання часток корму лезом фрезерного ножа.

Інші ефекти парних взаємодій менш значимі.

Після розрахунку коефіцієнтів регресії перевіряли гіпотезу адекватності представлення результатів дослідів поліномом другого порядку.

Адекватність математичної моделі другого порядку перевіряли за критерієм Фішера» [16].

«Табличне значення  $F$  – критерія для умов експерименту при п'ятивідсотковому рівні значимості становить  $F_{0,05} = 1,5$ .

Оскільки в нашому випадку табличне значення  $F$  – критерію більше обчислених, то гіпотезу про адекватність описану рівняннями результатів експерименту можна вважати вірною з 95 %-ю надійністю.

Табличне значення критерію Стюдента при п'яти процентному рівні значимості  $t_{0,05}=1,98$ . Враховуючи, що ,то за другим критерієм гіпотезу про адекватність можна прийняти з 95 % ймовірністю.

Значимість більшості коефіцієнтів регресії при квадратичних членах і парних взаємодіях факторів підтвердила початкову гіпотезу про нелінійний характер досліджуваних функцій відгуку, що описують процес відділення стеблових кормів» [16].

У розкодованому значенні рівняння мають вигляд:

для силосу кукурудзяного:

$$E = 1,9681 - 0,0772\vartheta - 0,2041P - 4,1864h - 6,616l - 2,961a + 0,0042\vartheta^2 + \\ + 0,1600P^2 + 14,84h^2 + 41,5l^2 + 14,25a^2 - 0,0285\vartheta P - 0,1608\vartheta h + \\ + 0,258\vartheta l - 0,078\vartheta a + + 4,160\vartheta a + 1,500Ph - 2,80Pl - 11,200Pa - \\ - 17,300ha - 8,000la.$$

$$K = 210,27 - 7,932\vartheta - 58,71P - 184,42h - 1187,05l - 79,17a + 0,28\vartheta^2 + \\ + 58,13P^2 + 426,8h^2 + 6500l^2 + 832,5a^2 - 0,992\vartheta P - 5,624\vartheta h + \\ + 20,06\vartheta l - 8,0\vartheta a + 86,27Ph + 351,0Pl - 19,67Pa - 72,0hl - \\ - 928,0ha - 570,0la.$$

для сіна з люцерни:

$$E = 2,8628 - 0,1720\vartheta - 0,1737P - 0,1861h - 0,7060l - 7,225a + \\ + 0,0078\vartheta^2 + 0,7420P^2 + 5,6400h^2 + 66,500l^2 + 71,25a^2 - 0,0352\vartheta P - \\ - 0,1088\vartheta h - 0,2020\vartheta l - 0,056\vartheta a + 1,1733Ph + 1,50Pl - 3,2670Pa - \\ - 16,9hl - 7,8ha - 22,5la.$$

$$K = 183,71 - 5,614\vartheta - 31,132P - 233,10h - 859,3l + 251,96a + \\ + 0,32\vartheta^2 + 39,78P^2 + 382,0h^2 + 3792,5l^2 + 687,5a^2 - 1,824\vartheta P - \\ - 9,376\vartheta h + 15,06\vartheta l - 37,82\vartheta a + 82,93Ph + 392,67Pl - 107,33Pa + \\ + 572,0hl + 66,0ha + 70,0la$$

Розрахункові дані, які отримані за допомогою математичних рівнянь добре узгоджуються з експериментальними даними. Наприклад, для експериментальних умов дослід, проведеного при  $V=17$  м/с,  $P=0,5$  тони,  $h=0,15$  м,  $a=0,06$  м,  $l=0,04$  м, показники енергоємності процесу для силосу й сіна по математичним рівнянням складають: 0,7491; 1,2998 кВт.год/т, а якість подрібнення відповідно становить: 81,3 %, і 79,9%. За результатами проведеного експерименту значення цих критеріїв становлять: енергоємність процесу – 0,7298; 1,3188 кВт. год/т., а якість подрібнення кормів становить – 79,6 %; 78,4 %.

### 3.3 Оптимізація параметрів процесу

«Для визначення оптимальних значень факторів, що впливають на процес відділення, використовувався класичний метод аналізу, що полягає в розв'язку систем рівнянь частинних похідних від рівнянь регресії по кожному фактору.

Системи диференційних рівнянь, отриманих з рівнянь мають вигляд:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0,0526x_1 - 0,0107x_2 - 0,0201x_3 + 0,0129x_4 - 0,0039x_5 = -0,298;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = -0,0107x_1 + 0,0072x_2 + 0,0312x_3 + 0,0045x_4 - 0,0081x_5 = 0,0047;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_3} = -0,0201x_1 + 0,0312x_2 + 0,0742x_3 - 0,0112x_4 - 0,0173x_5 = 0,0591;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_4} = 0,0129x_1 + 0,0045x_2 - 0,0112x_3 + 0,0332x_4 - 0,0032x_5 = 0,0050;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x_5} &= -0,0039x_1 - 0,0084x_2 - 0,0173x_3 - 0,0032x_4 + 0,0514x_5 = \\ &= 0,0171. \end{aligned}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 3,50x_1 - 0,372x_2 + 1,003x_3 + 0,703x_4 - 1,6219x_5 = 1,80;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_2} = -0,372x_1 + 2,616x_2 - 0,647x_3 + 1,053x_4 - 0,059x_5 = -0,651;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_3} = -1,003x_1 + 0,647x_2 + 6,134x_3 + 0,072x_4 - 0,928x_5 = 2,049;$$

$$\frac{\partial y}{\partial x_4} = 1,703x_1 + 1,053x_2 + 0,072x_3 + 5,200x_4 + 2,228x_5 = -1,335;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x_5} &= -1,622x_1 - 0,059x_2 - 0,928x_3 + 0,228x_4 + 4,662x_5 = \\ &= 1,905. \end{aligned}$$

Спільним розв'язком систем з п'яти рівнянь і аналогічно отриманих систем з рівнянь знайдемо координати центру в старих осях координат, а розв'язком рівнянь при підстановці в нього нових визначена величина параметрів оптимізації.

Розрахункові дані оптимальних значень факторів і критеріїв оптимізації зведені в табл. 3.3.

Координатами центру поверхні є оптимальні значення факторів» [16].

«Рівняння регресії, представлене в канонічній формі має вигляд

$$\begin{aligned} y - 0,6250 &= 0,1124x_1^2 + 0,4507x_2^2 + 0,5085x_3^2 + 0,221x_4^2 + \\ &+ 0,8157x_5^2 \end{aligned}$$

Оскільки всі коефіцієнти при квадратичних членах мають позитивні знаки, то поверхня відгуку, описана рівнянням (3.7) являє собою п'ятимірний



параболоїд з координатами центру поверхні  $x_{1a} = -6,0334$ ;  $x_{2a} = 0,2923$ ;  $x_{3a} = -3,8650$ ;  $x_{4a} = 0,1700$ ;  $x_{5a} = 0,7451$  (фактори відповідно мають значення: швидкість барабана 13,15 м/с; зусилля стиску 3,9 кН; глибина фрезерування 0,18 м; хід ножів 50 мм; крок ножів 110 мм). Центр фігури перебуває поблизу центру експерименту, тобто екстремум лежить у досліджуваній області, що підтверджує правильність вибору меж варіювання змінними» [16].

«Таблиця 3.3 – Оптимальні значення факторів і критеріїв оптимізації

Показники	енергоємність, кВт.год/т		якість подрібнення, %	
	Вид корму			
	Силос кукурудзяний		Сіно люцернове	
Число експериментальних точок	43	43	43	43
Кодовані оптимальні значення факторів:				
X1	-6,7875	0,1275	-6,9925	0,1225
X2	-0,2523	3,8000	-0,3512	-0,4000
X3	-3,8650	0,4081	-0,5053	8,9013
X4	0,1700	1,0410	5,2310	-0,0532
X5	0,7451	0,3532	-0,8671	-0,7225
Розкодовані оптимальні значення факторів V, м/с	13,15	14,51	13,97	14,49
<i>P</i> , кН	3,5	3,6	3,3	3,2
h, м	0,18	0,21	0,165	0,155
<i>l</i> , м	0,05	0,06	0,054	0,049
a, м	0,11	0,10	0,063	0,068
Оптимальні значення критеріїв оптимізації	0,6250	1,1589	77,5	76,95

Примітка» [16].

Розглянемо канонічний вид рівняння регресії:

$$y - 77,5 = 0,9228x_1^2 + 0,2720x_2^2 + 0,4021x_3^2 + 0,2291x_4^2 + 0,3653x_5^2$$

«По виду отриманого канонічного рівняння маємо також еліптичний параболоїд. Центр фігури знаходиться в області експерименту й поблизу апріорно обраного центру. На основі аналізу моделей (3.7 і 3.8) за допомогою двовимірних перерізів вирішувалося компромісне завдання, у якому було потрібно знайти значення факторів, що дають мінімум енерговитрат на відборі, при задовільній якості подрібнення.

Двовимірні перерізи поверхонь відгуку, що характеризують енергоємність і якість процесу відбору корму залежно від швидкості фрезерування ( $x_1$ ) і від зусилля стиску ( $x_2$ ) спочатку побудовані при значеннях факторів  $x_3, x_4, x_5$  на нульовому рівні» [16].

Підставивши значення  $x_3=0, x_4=0$  і  $x_5=0$  у рівняння і одержали:

$$y = 0,6536 + 0,0298x_1 - 0,0047x_2 + 0,0263x_1^2 + 0,0036x_2^2 - 0,011x_1x_2$$

$$y' = 76,507 - 1,80x_1 + 0,65x_2 + 1,75x_1^2 + 1,308x_2^2 - 0,371x_1x_2$$

«Координати центрів поверхонь у старих осях визначаємо диференціюванням по  $x_1$  і  $x_2$  й розв'язком спільно отриманих систем рівнянь:

$$x_{1s} = -0,631; \quad x_{2s} = -0,306;$$

$$x'_{1s} = -0,195; \quad x'_{2s} = -0,385;$$

Кути повороту нових осей координат відносно старих, до сполучення з головним осями фігури дорівнюють:

$\alpha = -12^\circ$  для моделі

$\alpha = -20^\circ$  для моделі

Підставивши) значення,  $x_{1s}$ ,  $x_{2s}$  одержимо значення питомих енерговитрат  $y_s$  якості подрібнення корму  $y'_s$  в новому центрі поверхні відгуку;  $y_s = 0,645 \text{ кВт} \cdot \frac{\text{год}}{\text{т}}$ .  $y'_s = 76,003 \%$ .

Тоді у канонічній формі запишемо:

$$Y - 0,645 = 0,0265 \cdot x_1^2 + 0,0125 \cdot x_2^2$$

$$Y' - 76,003 = 1,817 \cdot x_1^2 + 1,241 \cdot x_2^2$$

Підставляючи різні значення відгуків  $Y$  і  $Y'$  в (3.21) і (3.22), одержимо рівняння відповідних контурних кривих поверхонь відгуків – еліпсів, що представляють сукупність спряжених ліній рівного значення показників енергоємності і якості подрібнення» [16].

Результати отриманих розрахунків двовимірних перерізів представлено в таблицях 3.4 і 3.5.

«Таблиця 3.4 – Дані для розрахунків координат основних точок при побудові двовимірних перерізів (енергоємність процесу)

Величина параметру	Швидкість фрезерування		Зусилля стиску	
	X1	V м/с	X2	P кН
0,6450	0	12,88	0	3,60
0,65	0,4344	14,74	0,6325	4,15
0,66	0,7523	16,01	1,0954	4,66
0,67	0,9713	16,88	1,4142	5,31
0,68	1,1492	17,60	1,6733	5,71
0,69	1,3031	18,21	1,8974	6,05
0,70	1,4406	18,76	2,0976	6,35

Примітка» [16].

Аналіз представлених сполучених двовимірних перерізів поверхонь відгуку для процесу різання показує, що мінімальне значення показника енергоємності технологічного процесу в розглянутому перерізі поверхні відгуку при інших режимних факторах, зафіксованих на нульовому рівні, становить 0,645 кВт. год/т і має місце при швидкості обертowego фрезерування 12,88 м/с і зусиллі стиску на сировину 3,6 кН. Оптимальні значення режимних факторів знаходяться в межах: (швидкість різання  $V=11,5...14,5$  м/с і зусилля стиску  $P = 3,2...4,2$  кН).

«Таблиця 3.5 – Дані для розрахунків координат основних точок при побудові двовимірних перерізів (якість подрібнення)

Величина параметру	Швидкість фрезерування		Зусилля стиску	
	X1	V м/с	x2	P кН
76,003	0	14,78	0	3,23
75	0,7407	15,46	0,8963	4,84
74	1,0484	16,08	1,2685	5,40
73	1,2843	16,76	1,5540	5,97
72	1,4832	17,31	1,7947	6,69
71	1,6583	17,93	2,0066	7,17
70	1,8167	18,54	2,1992	7,69

Максимальна масова доля часток, що відповідають зоотехнічним вимогам відносно цих факторів в цьому ж перерізі складає 76,003 %. В області оптимуму фактори мають такі значення: швидкість фрезерування 14,0...16,0 м/с, зусилля стиску – 2,0...4,5 кН» [16].

Аналогічно проведені розрахунки і побудовані двовимірні перерізи для подрібнення силосу кукурудзяного (рисунки 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).

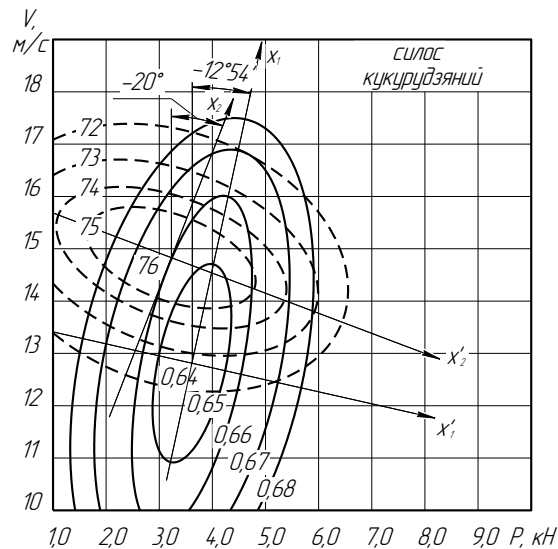


Рисунок 3.5 – Перерізи поверхонь відгуку роботи барабана по факторах  $x_1$  і  $x_2$ : — показник енергоємності процесу; - - - показник якості подрібнення.

«Мінімальне значення показника енергоємності в перерізі області оптимуму відносно швидкості обертання барабана ( $x_1$ ) і глибини фрезерування ( $x_3$ ) при інших факторах, зафіксованих на нульовому рівні (рис. 3.6), складає 0,6280 кВт. год/т, а частинки розмірами 40...60 мм становлять 75,675 %» [16].

«В області оптимуму рекомендовані наступні межі значень розглянутих факторів: швидкість фрезерування – 11,5...14,5 м/с і 15,0...16,5 м/с, і глибина фрезерування 0,165...0,180 і 0,175...0,21 м. Розглянуті двовимірні перерізи показують, що зі збільшенням швидкості фрезерування збільшується енергоємність процесу, а якість подрібненого продукту поліпшується, і навпаки, збільшення глибини фрезерування приводить до зменшення енергоємності й зниження якісного показника робочого процесу» [16].

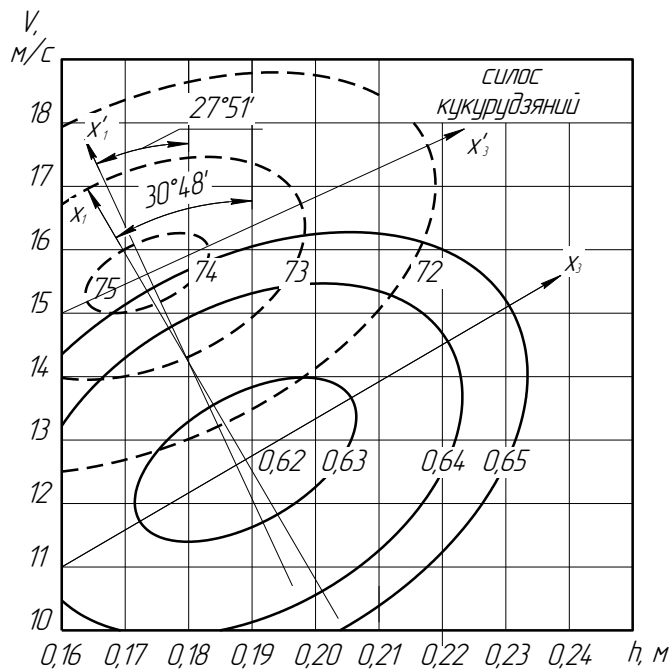


Рисунок 3.6 – Перерізи поверхонь відгуку процесу фрезерування по факторах  $x_1$  і  $x_3$ : — показник енергоємності; - - - показник якості подрібнення.

«Тому для вибору значень параметрів оптимізації можуть бути прийняті наступні межі розглянутих факторів:

- швидкість фрезерування – 11,5...16,5м/с;
- глибина фрезерування – 0,165...0,210м

На рисунку 3.7 представлена залежність енергоємності і якості подрібнення від швидкості фрезерування ( $x_1$ ) і кроку ножів ( $x_5$ ). Мінімальне значення параметра В й максимальне значення в розглянутих перерізах поверхні відгуку при інших факторах зафіксованих на нульовому рівні, дорівнюють 0,6403 кВт.год/т і 75, 909 %, а область оптимуму знаходиться в межах:

- швидкість фрезерування –  $V = 11,0...16,0$ м/с,
- глибина фрезерування –  $a = 0,05...0,105$ м» [16].

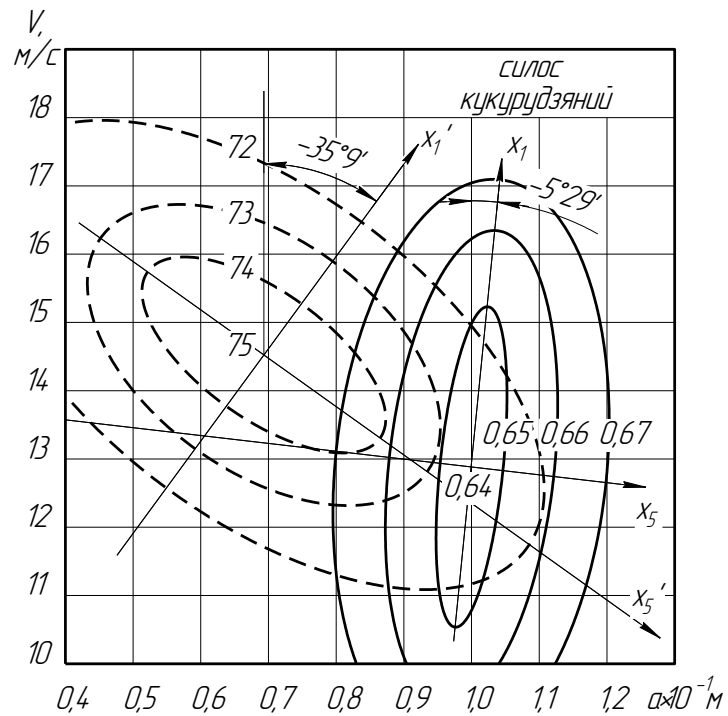


Рисунок 3.7 – Перерізи поверхонь відгуку подрібнення сировини по факторам  $x_1$  і  $x_5$ : — показник енергоємності; - - - показник подрібнення.

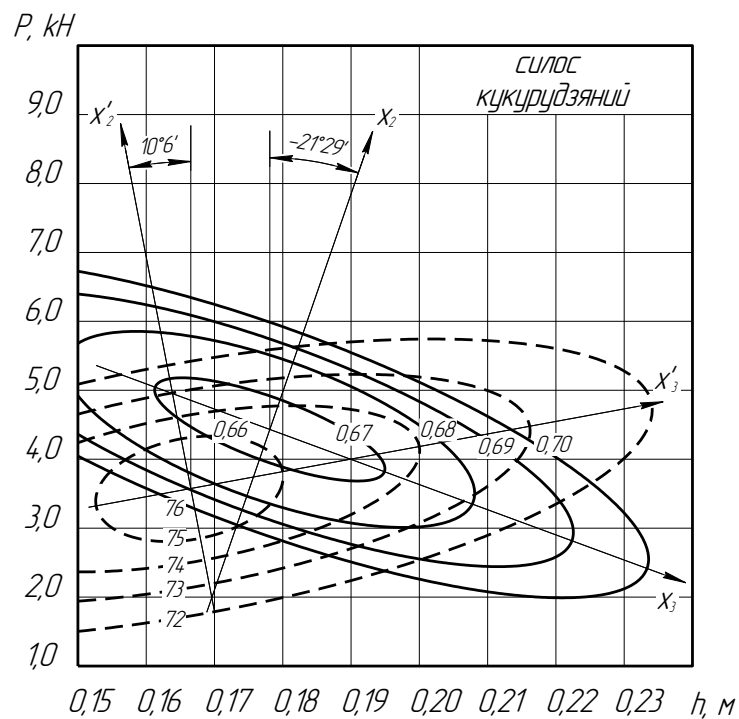


Рисунок 3.8 – Перерізи поверхонь відгуку подрібнення сировини по факторам  $x_2$  і  $x_3$ : — показник енергоємності; - - - показник подрібнення.

При збільшення робочої відстані між пасивними ножами барабана призводить до різкого погіршення якості подрібнення кормів й зниженню енергетичної ємності процесу різання.

«Аналізуючи рисунок 3.8 бачимо, що мінімальне значення показника енергоємності процесу й максимальне процентне співвідношення часток (40...60 мм) у перерізі області оптимуму відносно зусилля стиску ( $x_2$ ) і глибини фрезерування ( $x_3$ ) при інших факторах, зафіксованих на нульовому рівні, відповідно складають 0,6644 кВт. год/т і 76,109 %, а область оптимуму знаходиться в межах:

- зусилля стиску –  $P = 2,7 \dots 5,4 \text{ кН}$ ;
- глибина фрезерування –  $h = 0,155 \dots 0,190 \text{ м}$ .

Оптимальні параметри, рекомендовані за результатами першого етапу досліджень математичних моделей мають наступні значення:

Енергоємність процесу:

- швидкість фрезерування ( $x_1$ ) – 11, 0...15,0 м/с;
- зусилля стиску ( $x_2$ ) – 0,3...0,5 т;
- глибина фрезерування ( $x_3$ ) – 0,16...0,22 м;
- хід ножів ( $x_4$ ) – 0,04...0,06 м;
- крок ножів ( $x_5$ ) – 0,09...0,11 м.

Якість подрібнення:

- швидкість фрезерування ( $x_1$ ) – 0,135...0,175 м/с;
- зусилля стиску ( $x_2$ ) – 0,2...0,45 т;
- глибина фрезерування ( $x_3$ ) – 0,15...0,18 м;
- хід ножів ( $x_4$ ) – 0,04...0,06 м;
- крок ножів ( $x_5$ ) – 0,05...0,08 м» [16].

«При побудові двовимірних перерізів поверхонь відгуку розглядаються лише два фактори, а інші фіксуються на нульових рівнях, які можуть виявитися далекими від оптимальних.

Тому на другому етапі розв'язку оптимізаційної задачі, з метою уточнення значення параметрів, був проведений пошук умовного оптимуму.



Змінюючи з визначеним кроком кожний з факторів і обраховуючи при всіх співвідношеннях факторів значення параметрів  $B$  і можна знайти оптимальні умови протікання процесу» [16].

«При дослідженні залежності була прийнята наступна схема розрахунків:

- показник якості подрібнення  $F$  змінювався в межах 65...75 % в співвідношенні до зоотехнічних вимог;
- фактори  $V, P, h, l$  змінювалися з визначеним кроком у межах інтервалів варіювання;
- для кожного співвідношення  $V, P, h, l$  й прийнятого визначався (крок ножів) з рівняння;
- отримане значення зрівнювалося з попереднім, а перше із прийнятим для зони оптимізації;
- якщо обчислене значення виявлялося менше, то воно запам'ятовувалося для виконання наступного кроку» [16].

Аналіз результатів проведених розрахунків показав, що при параметрах значень масової долі подрібнених часток довжиною 40...60 мм у відділеній порції стеблового корму 70...75 % енергоємність процесу становить 0,638...0,659 кВт. год/т.

### **3.4 Результати показників якості і енергетичності в залежності від основних параметрів віддільника**

«Процесу подрібнення кормів, як способу підготовки його до згодовування, надається виняткове значення, тому що це дозволяє, з однієї сторони, збільшити згодовування, а з іншої – зменшити енергетичні витрати організму.

Аналіз показників якості роботи віддільника проводився на досліджуваних кормах у процесі реалізації плану експерименту.

Результати фракційного аналізу при відділенні з подрібненням силосу, й сіна наведено в табл. 3.6 (у відсотках від маси подрібненого корму).

Проведені досліді показали, що фракції 40...60 мм складають 65...70 % відібраного корму від маси» [14].

«Таблиця 3.6 – Показники якості подрібнення кормів комбінованим різальним апаратом

Вид корму	Межі значень фракцій, мм				
	0...40	40...60	60...80	80...100	Понад 100 мм
силос кукурудзяний	5,5	70	17,5	4,0	3,0
сіно з люцерни	4,0	66	23,0	5,0	2,0

Залежності ступеня подрібнення корму від швидкості, глибини фрезерування й кроку ножів показано на рисунках 3.9, 3.10, 3.11. Поліпшення якісних показників (рисунок 3.9) зі зміною швидкості фрезерування спостерігається до 16,0...17,0 м/с, а подальше її збільшення призводить до переподрібнення корму» [14].

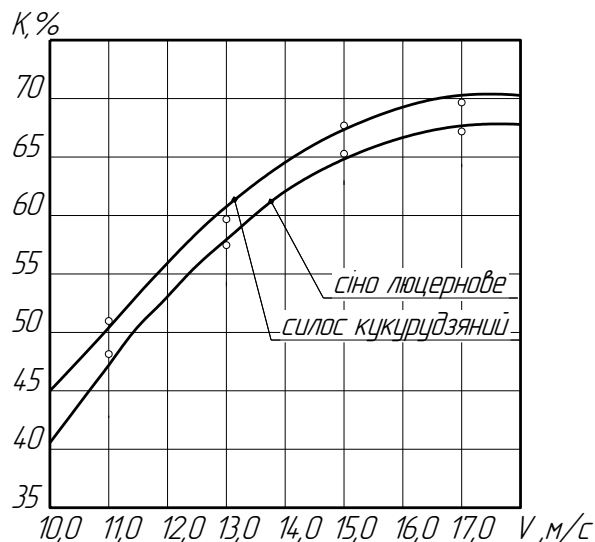


Рисунок 3.9 – Залежність якості подрібнення стеблових кормів від швидкості барабана

Найбільший вплив на якість подрібнення стеблових кормів (рисунок 3.10) має глибина фрезерування сировини.

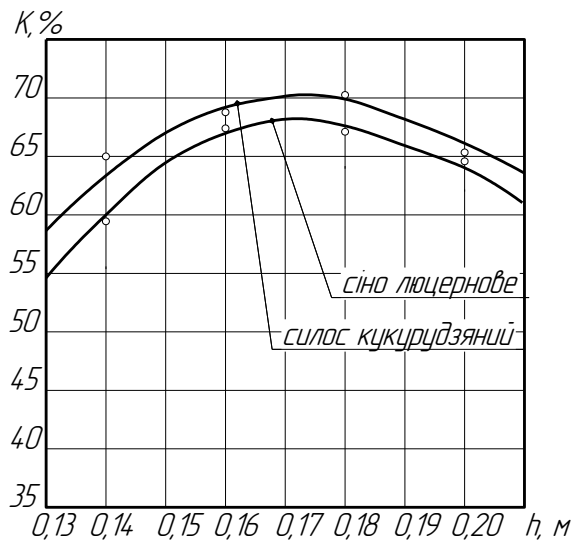


Рисунок 3.10 – Залежність якості подрібнення стеблових кормів від глибини фрезерування

Найкращі якісні показники подрібнення кормів по контрольованій фракції отримані при глибині фрезерування в межах 0,16...0,17 м. З підвищенням глибини фрезерування масова доля часток у подрібнених кормах, які відповідають зоотехнічним вимогам, зменшується.

Головним параметром, для регулювання якості подрібнення, є крок ріжучих ножів. Збільшення кроку ріжучих ножів (рисунок 3.11) спричинює погіршення якості подрібнення стеблових кормів.

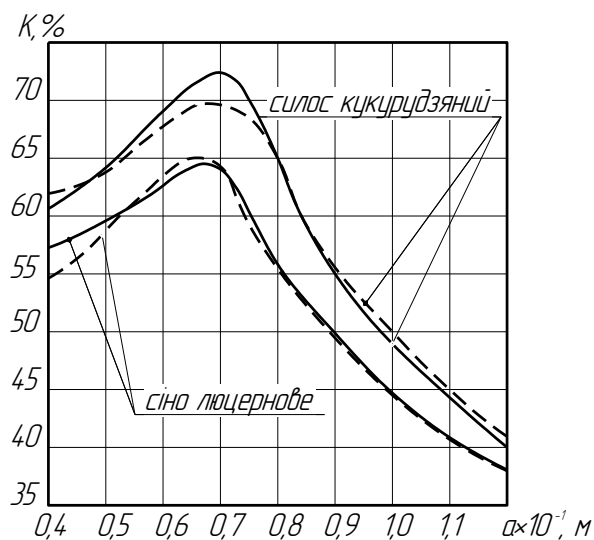


Рисунок 3.11 – Залежність якості подрібнення стеблових кормів від кроку ножів

«Визначальним фактором зменшення енергоємності є попереднє ущільнення маси, витрати якої рівні одній третій від загальних витрат енергії (рисунок 3.12).

Тому з доведенням до мінімуму цих витрат зменшується загальна енергія, затрачена на відділення корму. Із зростанням напружень у зоні відділення робота різання збільшується. Мінімальна енергоємність спостерігалася в межах завантаження робочого органу до 4,0...6,0 кН.

Зі збільшенням глибини фрезерування енергоємність процесу зменшується (рисунок 3.13)» [16].

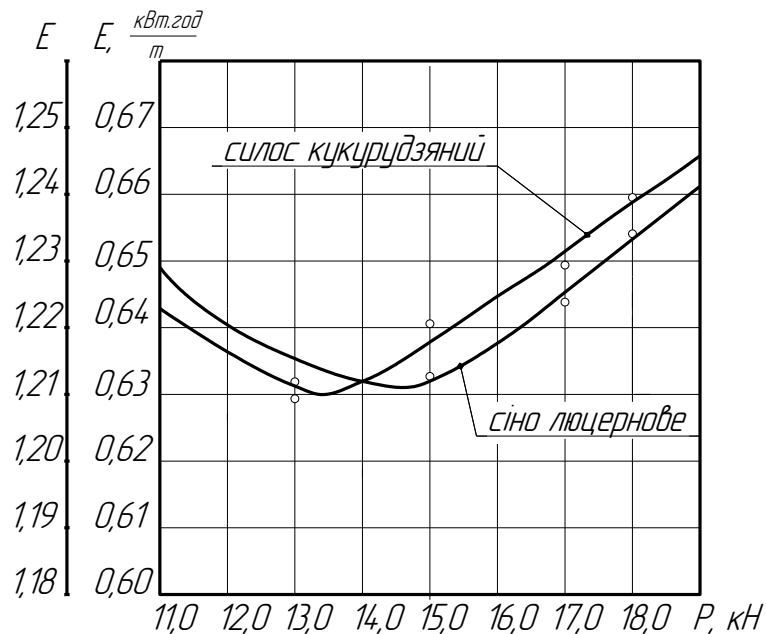


Рисунок 3.12 – Залежність енергоємності процесу подрібнення стеблових кормів від зусилля стиску

«Із збільшенням ходу ножів від 0,03 м до 0,07 м енергоємність зменшується (рис. 3.14).

Однак при значеннях вище  $h = (0,20...0,22)$  м подальше її зменшення не спостерігається, тому що погіршуються умови транспортування й збільшується циркуляція відділеної маси (рис. 3.13). При подальшому

збільшенні ходу ножів енергоємність починає збільшуватися. Це свідчить про те, що на глибині більше 0,07 м, напруження під лезом ножа різко збільшуються, вимагаючи підвищених витрат енергії» [16].

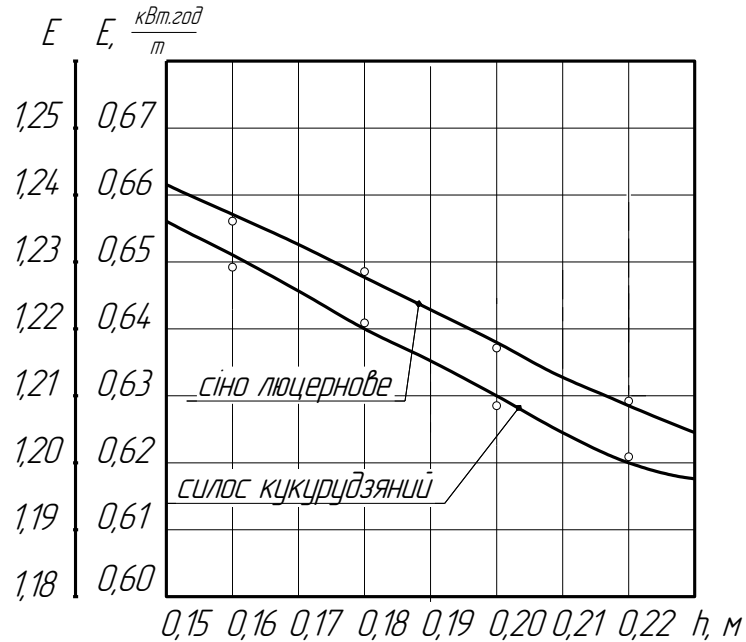


Рисунок 3.13 – Залежність енергоємності процесу подрібнення стеблових кормів від глибини фрезерування

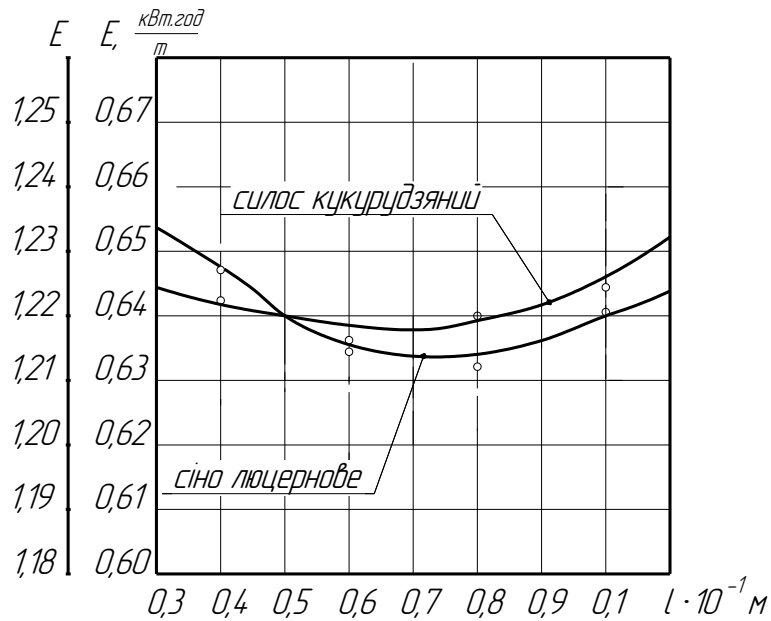


Рисунок 3.14 – Залежність енергоємності процесу подрібнення стеблових кормів від ходу ножів

### 3.5 Продуктивність і енергоємність процесу подрібнення стеблових кормів

«Продуктивність комбінованого різального апарату визначалася хронометруванням і зважуванням відібраної маси на технічних вагах.

Величина експериментальної або фактичної продуктивності менше теоретичної: Залежності  $Q_{\text{теор}}$  й  $Q_{\text{екс}}$  від швидкості фрезерування і глибини фрезерування зображені на рис. 3.15.

У результаті проведених досліджень визначена продуктивність комбінованого різального апарату на різних видах кормів. Вона становить за 1 год.

Чистої роботи:

- для силосу кукурудзяного – 19,8 т/год;
- для сіна люцернового – 7,0 т/год» [16].

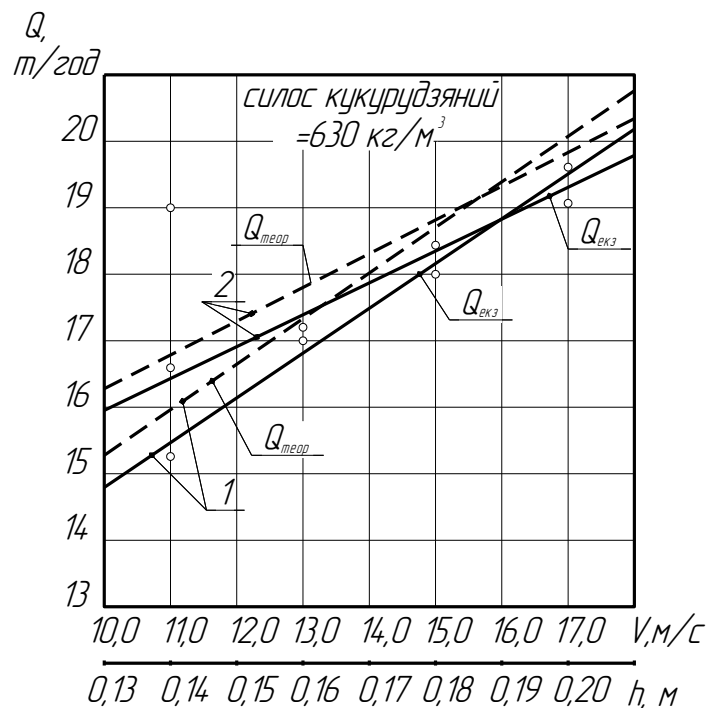


Рисунок 3.15 – Графіки продуктивності процесу різання залежно від швидкості барабана й глибини фрезерування стеблових кормів

«Фактичну продуктивність можна зв'язувати з теоретичною співвідношенням:

$$Q_{\text{екс}} = k \cdot Q_{\text{теор}},$$

де  $k_{\text{пр}}$  – коефіцієнт пропорційності.

За результатами експериментальних досліджень отримані значення коефіцієнта  $k_{\text{пр}}$ , знаходяться у межах 0,75...0,85.

У результаті аналізу даних експериментальних досліджень отримані залежності зміни енергоємності від продуктивності при змінних факторах, наведених на рисунку 3.16» [16].

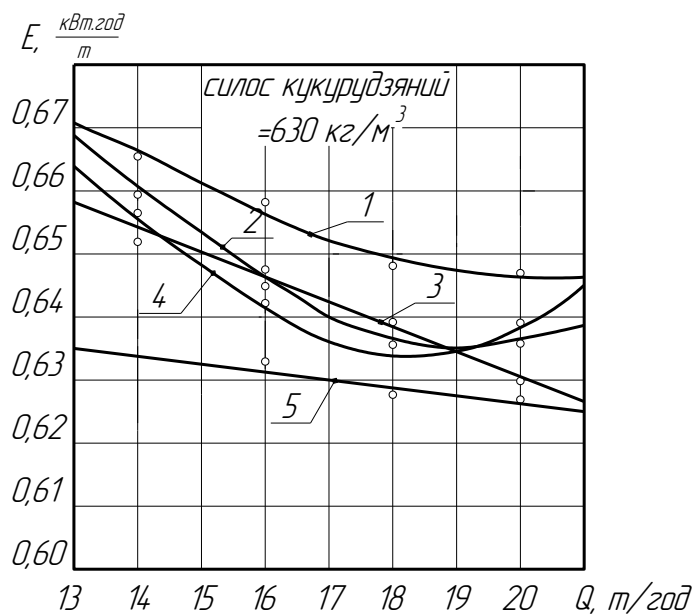


Рисунок 3.16 – Залежності енергоємності процесу подрібнення кормів від продуктивності при різних змінних: 1 - швидкість обертання барабана; 2 - зусилля на різання; 3 - глибина фрезерування кормів; 4 - глибина ходу різальних ножів; 5 - крок ножів.

«При відділенні силосу кукурудзяного при зростаючих значеннях факторів зі збільшенням продуктивності енергоємність процесу знижується. Однак, по досягненню величини продуктивності 18,0...20,0 т/год і значеннях

факторів  $V$ ,  $P$ ,  $h$ , що відповідають їй, отримана мінімальна енергоємність при допустимій якості подрібнення. При більш високих значеннях продуктивності, спостерігається ріст енергоємності й погіршення якісних показників» [16].

«Експериментальне дослідження процесу подрібнення стеблових кормів від монолітів комбінованим різальним апаратом дозволяє зробити наступні висновки:

Зниження витрат енергії на процес подрібнення стеблових кормів від монолітів можливо за рахунок попереднього його ущільнення й утримання в зоні фрезерування в стиснутому стані.

Дослідження методом планування експерименту допомогло одержати математичну модель технологічного процесу подрібнення кормів, оцінити ступінь впливу факторів і їх взаємодії на характер його протікання.

Аналіз математичних моделей дозволив установити, що на енергоємність процесу найбільше впливають: швидкість і глибина фрезерування, а також величина зусилля стиску, на якісні показники – глибина фрезерування й крок ножів» [16].

«При оптимальних значеннях факторів була отримана продуктивність комбінованого різального апарату:

для силосу кукурудзяного – 19,8 т/год;

для сіна люцернового – 7,0 т/год.

Середня енергоємність процесу подрібнення корму складає:

для силосу кукурудзяного – 0,6383 кВт. год/т;

для сіна люцернового – 1,2273 кВт. год/т.

Масова частка часток 40...60 мм у кормі, відібраному в оптимальному режимі роботи, перебувала в межах 70...75 % і забезпечувала оптимальну роботу навантажувачів» [16].



## РОЗДІЛ 4

# ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИЙ СИТУАЦІЯХ У ТВАРИННИЦТВІ

### 4.1. Небезпечні і шкідливі виробничі фактори

«Сучасне сільськогосподарське виробництво безупинно оснащується різноманітними складними машинами й устаткуванням, агрегатами, безпечна робота на який вимагає відповідних знань. Для запобігання травматизму і захворюваності в сільському господарстві необхідні знання по охороні праці, уміння володіти прийомами надання першої медичної допомоги і методами гасіння пожеж.

Істотний вплив на умови праці роблять небезпечні і шкідливі виробничі фактори, що по природі дії класифікуються на такі групи: фізичні, хімічні, біологічні і психологічні» [22].

«До групи фізичних факторів відносяться машини, що рухаються, і механізми, не захищені рухливі елементи виробничого устаткування, вироби і заготівлі що пересуваються, матеріали, підвищена забрудненість і запиленість повітря робочої зони, підвищена чи знижена температура, вологість, швидкість, барометричний тиск, іонізація повітря робочої зони, підвищений рівень шуму, вібрації, іонізуючі і електромагнітні випромінювання, статична напруга, ультрафіолетова й інфрачервона радіація, небезпечний рівень напруги в електричній мережі, підвищена напруженість електричного і магнітного поля, пульсації світлового потоку і яскравість світла, знижена контрастність, пряма й отражена блесткість.

Група хімічних факторів розділяється:

- по характері впливу на організм людини: токсичні, подразливі, канцерогенні, мутаційні впливають на репродуктивну функцію.
- по шляху проникнення в організм людини: через органи подиху, шлунково-кишкового тракту, слизуваті оболонки» [22].

«Група біологічних факторів включає наступні біологічні об'єкти: потогінні мікроорганізми, бактерії, віруси, гриби найпростіші і продукти їхньої життєдіяльності, мікроорганізми.

Група психофізичних факторів по характеру дії поділяється на фізичні і нервовопсихічні перевантаження. До фізичних перевантажень відносяться статичні і динамічні. До нервовопсихічних – розумове перевантаження, перевантаження аналізаторів, монотонність праці» [22]..

## **4.2 Електробезпека**

«На тваринницьких фермах електробезпечність проєктованих об'єктів і більшості установок, що працюють у несприятливих умовах, повинна бути поставлена на перше місце.

Тому електропроводка повинна бути в закритому виконанні. Для цього проводку поміщають у сталеві герметичні труби. Ізоляція проводів повинна бути розрахована на напругу 500 В. Освітлювальну проводку на фермі виконують на ізоляторах. Довжина проміжку між ізоляторами повинна бути не більш 2 метрів, перетин проводу не менш 1,5 мм<sup>2</sup>. Щоб зменшити небезпеку появи напруги на металевих частинах машин необхідно ізолювати від корпусів електроприводів електричну проводку. Заземлення і занулення

здійснюється шляхом приєднання всіх металевих струмоведучих частин устаткування до нульового проводу електромережі» [24].

«Особи, які працюють на машині або установці, повинні працювати в одязі з зав'язаними рукавами, не підходячи близько до струмопровідних частин і не торкатись їх, хоч вони й ізольовані; не торкатися руками проводів, які горять, і не гасити їх водою.

Електричну апаратуру фермерських машин з електроприводом обслуговують лише електромонтери, які мають відповідну підготовку і посвідчення на право обслуговування електроустановок» [24].

### **4.3 Пожежна безпека**

«Пожежна безпека об'єкта повинна забезпечуватись системою запобігання пожежі, системою захисту і організаційними заходами.

Пожежний захист повинен забезпечуватись: максимально-можливим використанням не паливних і важкоспалюємих речовин і матеріалів замість пожежно небезпечних; обмеженням кількістю паливних речовин і їх

розміщення; запобіганням розповсюдження пожежі за межі очага, застосуванням заходів пожежегасіння.

Територія двору, розриви між побудовами не повинні бути забрудненні залишками корму, соломою, сухим навозом і іншими паливними речовинами.

На кожні 50м<sup>2</sup> виробничої площі і 100м<sup>2</sup> площі тваринницької ферми повинен бути один вогнегасник ОХП-5 або вуглекислотний .

В усіх будинках повинні стояти ящики із піском, а в місцях складання кормів – бочки із водою.

Наружне пожаротушення ферми передбачається згідно СНіП 2-31-74. Степінь вогнестійкості конструкцій діючих будинків – друга, категорія виробництва по пожежній безпеці “Д”. Розрахункова витрата води для гасіння пожежі складає близько 10 л/с» [25].

«Потреба у воді на гасіння пожежі визначаємо таким чином:

$$Q = 3,6 g_{роз} t_{пож} z_{пож} , \text{ м}^3 \quad (4.1)$$

де  $g_{роз}$  - розрахунковий об'єм води – 10л/сек.;

$t_{пож}$  - розрахункова тривалість пожежегасіння – 3 год;

$z_{пож}$  - число одночасних пожеж –1.

$$Q = 3,6 \cdot 10 \cdot 3 = 108 , \text{ м}^3$$

Зберігання води на фермі у резервуарах 2х60м<sup>3</sup>» [25].

#### 4.4 Охорона навколишнього середовища

«Для забезпечення охорони навколишнього середовища необхідно дотримуватись таких вимог:

– гноєсховища, збірники гною, котловани, колодязі, ями розташовані на території ферми необхідно обгороджувати.

– на кожній фермі необхідна система сигналізації.

– для відводу рідкого гною влаштовують гнойові канавки, а для її збору гнойові сховища. Очищення гноєсховища необхідно робити по мірі накопичення. Усі гноєсховища повинні бути закриті.

– не допускається з'єднання мереж господарсько питних водопроводів з мережами водопроводів які забезпечують воду питної якості.

– присутність шкідливих і забруднюючих речовин у повітрі робочих виробничих зон в умовах сільськогосподарського виробництва вимагає проведення широкого комплексу охоронних заходів для захисту працівників від захворювань, отруєнь і можливих травм. Також, повітря в сільськогосподарському виробництві забруднюється шкідливими отрутами. В результаті біологічних процесів, які відбуваються в гної на тваринницькій фермі, виділяється сірководень, аміак і інші гази. Іноді концентрація цих шкідливих газів буває настільки велика, що працівники на фермі не може працювати без засобів захисту» [26].

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На підставі аналізу та обґрунтуванню проведених досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Використання мобільних навантажувачів типу ПСК-5,0 і ФН-1,4 для відділення та навантаження стеблових кормів не універсальні, мають високу енергетичну ємність (1,47 і 4,0 кВт год/т), низьку продуктивність навантаження та нестабільні якісні показники.

2. У зв'язку з тим, що кормові моноліти мають пружно-в'язкі властивості витрата енергії на попереднє їх ущільнення у робочій зоні руйнування становить 25...35 % від загальної роботи віддільника.

3. Запропонований комбінований різальний апарат віддільника завантажувача забезпечує утримання моноліту стеблових кормів додатковими ножами за рахунок постійно стискальним зусиллям і дає можливість знизити енергоємність процесу в 2,0...2,5 рази.

4. Застосування на віддільнику навантажувачу додаткових ножів дає можливість регулювати якісні показники процесу різання й забезпечує вихід подрібненої фракції в межах 40...60 мм, що відповідає зоотехнічним вимогам.

5. Отримані методом моделювання аналітичні залежності дозволять з достатньою для практичного використання точністю визначити основні режимні параметри комбінованого різального апарату віддільника завантажувача кормів.

6. Техніко-економічне обґрунтування показало доцільність створення й застосування віддільника навантажувача стеблових кормів з комбінованим різальним апаратом, робота якого забезпечує: зниження енергетичної ємності процесу в два рази, а затрати праці зменшуються на 30%.