

Тема: «Обґрунтування параметрів барабанного ріжучого апарату для  
подрібнення стеблових кормів»

Виконав: Олександр МАТШИНЕЦЬ

Керівник: Наталія ТАРЕЛЬНИК

## **ВСТУП**

### **1. Актуальність теми**

Забезпечення продовольчої стабільності можливе лише за умови розвиненого тваринницького сектору, який потребує безперервного оновлення технічного оснащення та підвищення його результативності. Провідною складовою тваринницької галузі є вирощування великої та дрібної рогатої худоби. Висока продуктивність скотарства досягається лише за рахунок впровадження сучасних механізованих технологій, зокрема у сфері заготівлі та обробки кормів. Основу раціону для великої рогатої худоби становлять грубі рослинні корми, ефективність їх засвоєння обумовлюється якістю її первинної переробки. У підготовчому процесі ключову роль відіграє подрібнення, адже саме ця операція потребує найбільших енергетичних витрат.

### **2. Аналіз стану наукової розробки проблеми**

Для обробки грубих кормових матеріалів застосовують широкий спектр спеціалізованих машин та агрегатів для приготування кормів. Проте значна частина таких установок не забезпечує необхідного рівня подрібнення відповідно до зоотехнічних норм, характеризується підвищеними енергетичними витратами, великою масою та значними розмірами. Крім цього, багато моделей мають складну конструкцію, що ускладнює їх використання, і відзначаються невисокою надійністю. Обмежена універсальність більшості наявних подрібнювальних механізмів не дозволяє ефективно застосовувати їх для різних видів грубих кормів, зокрема тих, що мають жорстке стебло (кукурудза). Суттєвою проблемою також є висока ціна таких машин, що унеможлиблює їх придбання малими фермерськими та особистими господарствами. Отже, створення подрібнювача, який би поєднував високу продуктивність, низьку

енерговитратність і належну якість роботи, залишається актуальним науково-технічним завданням, яке потребує детального дослідження та обґрунтування.

### **3. Мета дослідження**

Метою дослідження є підвищення дієвості дроблення грубих рослинних кормів шляхом розробки конструкції та обґрунтування ключових параметрів ножового механізму дробарки.

### **4. Об'єкт дослідження**

Об'єкт дослідження – технологічний процес дроблення грубих рослинних кормів за допомогою дробильного пристрою.

### **5. Предмет дослідження**

Предмет дослідження – встановлення закономірностей протікання цього технологічного процесу.

### **6. Завдання дослідження**

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання:

- на основі вивчення існуючих уявлень про процес дроблення та аналізу конструктивно-технологічних характеристик сучасних дробильних пристроїв визначити можливі напрями удосконалення технологічного процесу, обрати найбільш перспективну архітектуру пристрою та окреслити шляхи її розвитку;
- розробити конструктивно-технологічну схему ефективного дробильного агрегату та виконати теоретичні розрахунки його продуктивності й енергоспоживання під час роботи;
- провести лабораторні випробування для встановлення раціональних конструкційних показників і найдоцільніших режимів роботи ножового механізму;
- оцінити створений пристрій з погляду вимог охорони праці та безпеки експлуатації;
- обґрунтувати економічну доцільність впровадження запропонованої дробарки в умовах різних типів господарств.

## **7. Методи дослідження**

Для вивчення конструкційних і технологічних характеристик ножового блока застосовані теоретичні та експериментальні підходи. Теоретична частина базується на положеннях теорії обробки матеріалів ножовими інструментами, положеннях теоретичної механіки та опору матеріалів.

Експериментальний етап включав застосування статистичних методів аналізу та принципів організації багатопараметричних випробувань. Для реалізації дослідження було сконструйовано спеціальний дослідний комплекс, на якому виконано випробування дослідного агрегату компактної конструкції.

## **8. Структура та обсяг роботи**

Кваліфікаційна робота містить п'ять розділів, додатки, 3 таблиці, 29 рисунків, 20 джерел.

# 1 ОГЛЯД ПИТАННЯ, МЕТА І НАПРЯМКИ НАУКОВОГО ПОШУКУ

## 1.1 Вимоги, що пред'являються до стеблових кормів

Актуальні дробильні установки для подрібнення грубих кормів повинні відповідати вимогам щодо охорони праці та промислової санітарії. До категорії грубих кормів належать сіно, солома та полова – вони характеризуються значним вмістом клітковини, що коливається в межах 19–45 % [2, 4].

Сухий корм отримують із культурних або природних трав чи їхніх сумішей. Він служить головним джерелом живлення для більшості худоби у період утримання в приміщеннях. Повноцінний кормовий матеріал містить білкові сполуки, клітковину, вуглеводи, мінерали, каротин і вітаміни групи В та D [14].

Необхідний рівень якості забезпечується правильним технологічним процесом сушіння: спочатку трави підсушують у полі до вологості 30–35 %, після чого проводять тюкування і досушують матеріал шляхом активного вентилявання [16]. На якість готового корму впливають видове різноманіття травостою, фаза вегетації під час косіння, спосіб заготівлі та умови подальшого зберігання. Найкращий показник залишкової вологості висушеної маси становить не більше ніж 17 % [7, 8].

Залежно від складу трав і умов їх росту, сіно поділяють на кілька основних типів: бобові сіяні, злакові сіяні, змішані бобово-злакові, а також сіно природних кормових угідь – злакове, бобове та інші [13].

Харчова цінність соломи визначається видом і сортом культури, умовами її вирощування, термінами та способами збирання, а також низкою інших чинників. Найпридатнішою для годівлі вважається солома, отримана із зернобобових і ярих злакових рослин. Натомість солома озимих культур, зокрема пшениці та жита, має нижчу поживність через підвищений вміст клітковини – від 35 до 41 % [5, 19].

У складі соломи міститься близько 3–4 % білків, 1–2 % жиру, 4–6 %

мінеральних речовин і 1–3 мг/кг каротину. Водночас спостерігається дефіцит Ca, P й Na [10]. У жуйних тварин засвоєння поживних речовин становить орієнтовно 40–50 %, тоді як у коней цей показник є нижчим і знаходиться в межах 20–30 % [17].

Солому зазвичай застосовують як часткову заміну сіна, поєднуючи її з силосом або іншими вологими кормами, що сприяє підвищенню її засвоюваності та покращенню раціону тварин [20].

Соковиті та волокнисті корми об'єднують у категорію об'ємних кормів. Хоча вони поступаються концентратам за енергетичною насиченістю, саме ця група найповніше задовольняє фізіологічні вимоги тварин із жуйним типом травлення у збалансованому живленні [11, 18].

До жорстких волокнистих кормових матеріалів відносять сухі рештки після збирання урожаю кукурудзи та споріднених рослинних культур. У період стійлового утримання їх частка в загальному об'ємі кормового раціону може досягати 25–30 % [4].

Матеріал потребує попередньої обробки перед згодовуванням тваринам тверді стеблові корми проходять етап механічного подрібнення, що забезпечує кращу поїдання, підвищує ступінь перетравності та сприяє ефективнішому проходженню травних процесів. Подрібнення є найпростішим і водночас найрезультативнішим методом попередньої обробки таких кормів перед годівлею тварин.

Процес подрібнення забезпечує рівномірність структури корму, поліпшує його технологічні властивості та сприяє кращому поїданню тваринами. Для цього використовують спеціалізовані дробильні машини, які забезпечують отримання часток заданого фракційного складу [15].

Щоб забезпечити раціон клітковинними компонентами здебільшого використовують внутрішню частину кукурудзяних качанів, у складі яких міститься приблизно 0,35–0,37 кормових одиниць і 13–15 г перетравного білка на 1 кг маси [6]. Такі побічні продукти переробки кукурудзи застосовують під час годування та відгодівлі великої рогатої худоби, переважно у подрібненому

стані – самостійно або у поєднанні з іншими кормовими компонентами, а також як інгредієнт комбінованих і гранульованих кормів. При цьому розмір частинок має відповідати вимогам, наведеним у таблиці 1.1.

**Таблиця 1.1 – Розмір частинок подрібнених грубих стеблових кормів**

Вид корму	Розмір частинок подрібненого корму, мм	
	ВРХ	ДРХ
Сіно, солома	30–50	20–30
Зелені стебла кукурудзи	30–50	10–20

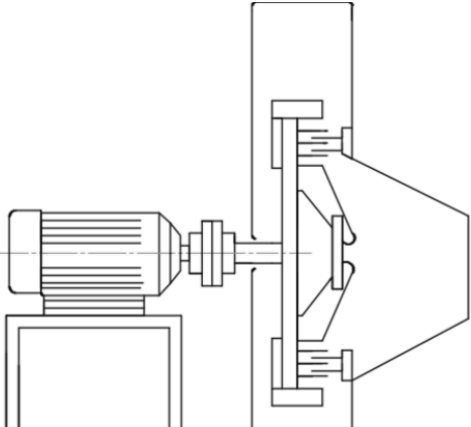
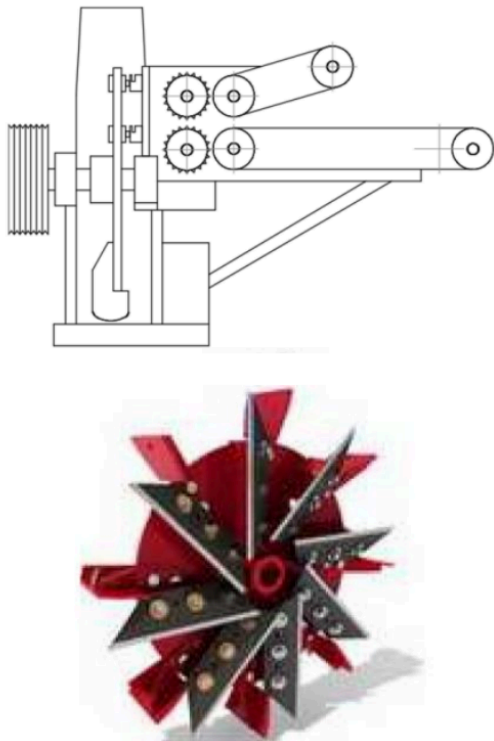
Подрібнювальні машини повинні забезпечувати якісне подрібнення не лише сіна чи соломи, а й сухих стебел культур на кшталт кукурудзи. Одним із пріоритетів сучасного машинобудування у цій сфері є уніфікація технічних засобів, скорочення кількості моделей і створення універсальних пристроїв, здатних ефективно переробляти різні типи грубих кормів із різними фізико-механічними характеристиками.

Розроблення нових високопродуктивних подрібнювачів потребує глибокого розуміння механіко-технологічних властивостей оброблюваної сировини, адже саме ці параметри визначають оптимальні режими роботи машин та якість кінцевого продукту.

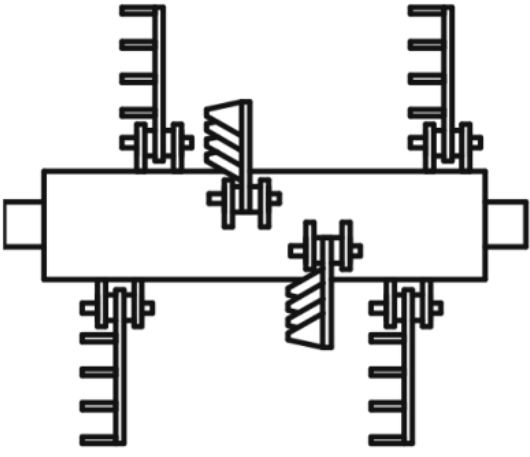
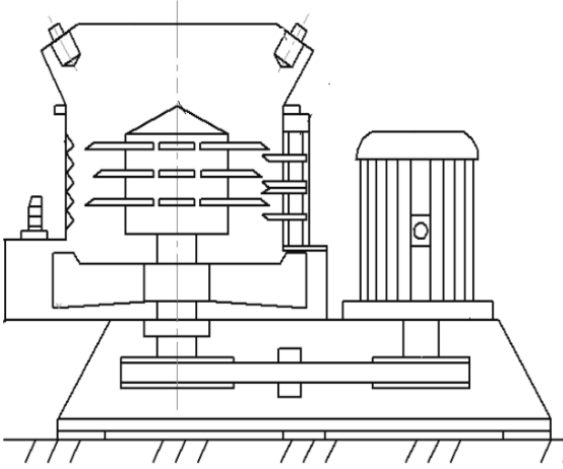
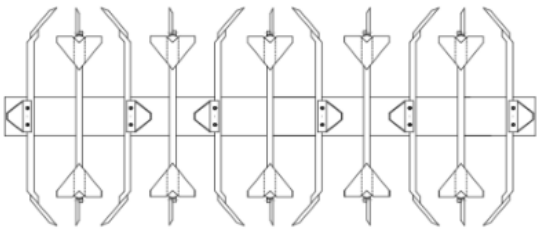
## **1.2 Оцінка технічних особливостей наявних подрібнювальних систем**

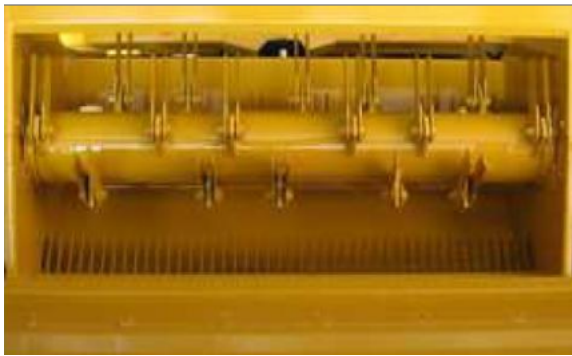
Головною ціллю дослідження є визначення оптимальних конструктивних схем машин, призначених для подрібнення стеблової кормової сировини та пошук шляхів удосконалення їх робочих елементів. На сьогодні у фермерських господарствах застосовують різноманітні типи ріжучих і дробильних механізмів [12], призначених для подрібнення волокнистої кормової сировини. Їх основні різновиди наведено нижче.

**Таблиця 1.2 – Класифікація робочих вузлів подрібнювачів рослинної сировини**

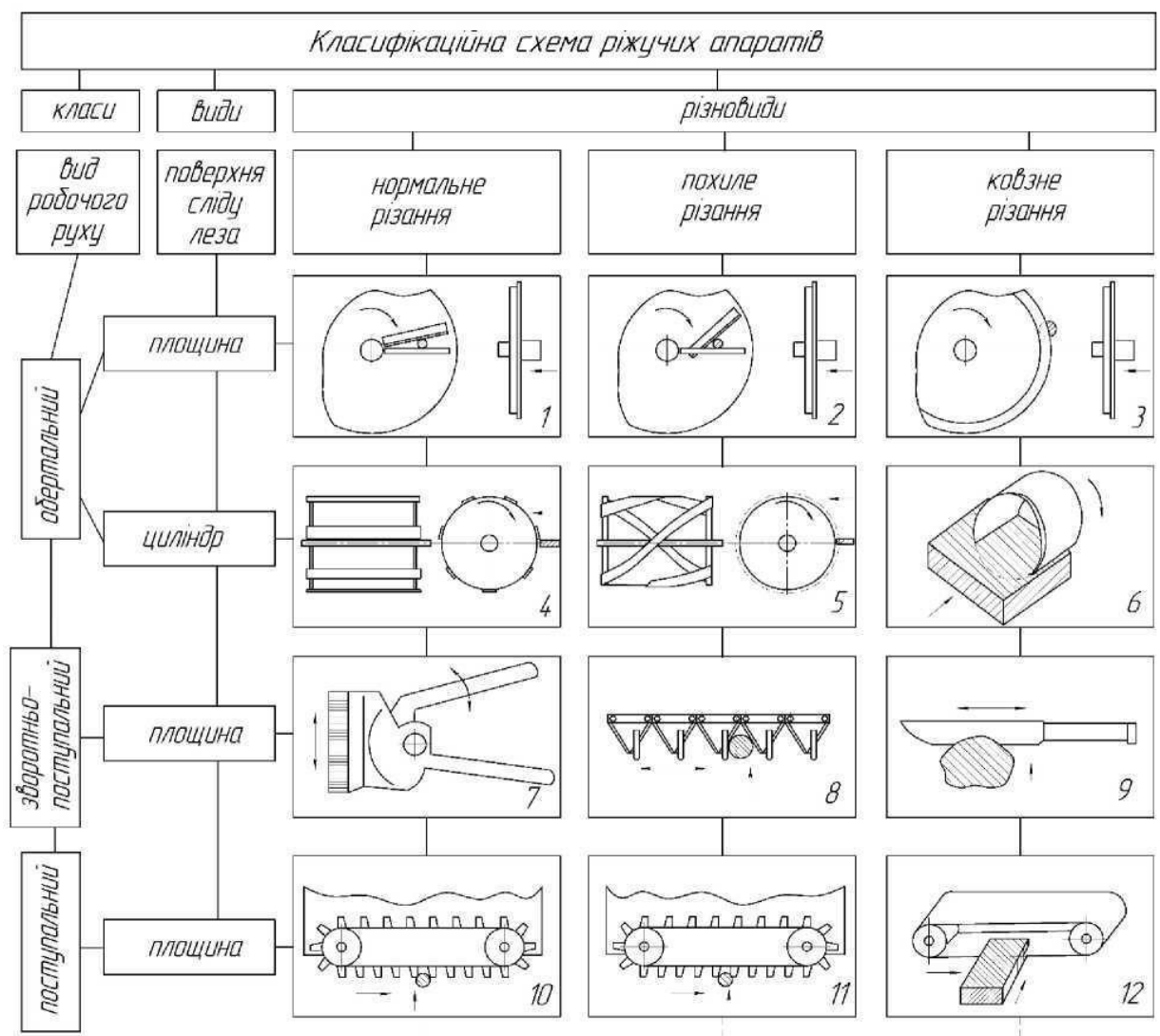
Тип робочого органу	Марка	Винахідники і дослідники	Особливості роботи
<p>Штифтовий</p> 	<p>ИГК-30 Б</p>	<p>Мельников С.В., Резнік Н.Є., Ревенко І.І.</p>	<p>Подрібнення стебел із застосування зламу, розриву і перетирання. Потребую вологості 40 відсотків</p>
<p>З ножами закріпленими на крильчатці</p> 	<p>РСС-6</p>	<p>Мельников С.В., Резнік Н.Є., Брагінець Н.В.</p>	<p>Подрібнення стебел і соковитих кормів використовуючи різання та розчеплення для отримання м'якої маси</p>
<p>Барабанний</p>	<p>РСБ-3,5</p>	<p>Мельников</p>	<p>Подрібнення</p>

	<p>, М4, ИКВ-5 А</p>	<p>С.В., Резнік Н.С., Брагінець Н.В.</p>	<p>стебел із заданою довжиною без розчеплення</p>
<p>З повздовжньо-поперечним різанням</p> 		<p>Еллі А.Я., Рустамов С.І., Горячкін В.П.</p>	<p>Подрібнення стебел різанням і розчепленням, отримання м'якої маси</p>
<p>З багатоплощинними робочими органами</p>		<p>Резнік Н.С., Аюгін П.М., Рустамов С.І.</p>	<p>Забезпечується достатня якість подрібнення, частки</p>

			<p>довжиною 20–50 мм, розщеплені частки складають більше 97 %</p>
<p>Вертикальний ножовий барабан</p> 	<p>ІСК-3, ІС-20А, ІСРВ-1 2, ІСК-30</p>	<p>Мельников С.В., Резнік Н.Є., Ревенко І.І., Вольвак С.Ф.</p>	<p>Вертикальний барабан з декількома рядами ножів, подрібнення виконується за допомогою взаємодії з протиризу</p>
<p>Фрез-барабан</p> 	<p>ФН-1,2, ПСК-5</p>	<p>Шаповалов В.І., Макаров І.В., Мельников С.В.</p>	<p>Виконання конструкції циліндричної форми з Г-подібними ріжучими елементами, що закріплені по спіральній траєкторії</p>
<p>Барабан з шарнірно підвішеними ножами</p>	<p>Дон-15 00Б, SAMPO</p>	<p>Шаповалов В.І., Макаров</p>	<p>Подрібнення стебел за принципом</p>

	І.В., Мельников С.В., Сироватка В.І.	різання пуансоном з розчепленням матеріалу від ударного впливу
---	--	--

Дослідницький інтерес становить спосіб різання з ковзанням, оскільки він забезпечує зменшення енергоспоживання під час подрібнення, що є одним із головних напрямів даного дослідження. На рисунку 1.1 подано класифікаційну схему ріжучих механізмів, розроблену Н. Є. Резніком.



### Рисунок 1.1 – Класифікаційна схема ріжучих апаратів Н.Є. Резніка

Аналіз сучасних конструкцій подрібнювачів свідчить про доцільність використання молотків або штифтів для розщеплення стебел під час обробки грубих кормів. Дослідження ріжучих механізмів, неодноразово проведені різними вченими, підтверджують високу ефективність такого комбінованого впливу на матеріал при його переробці.

З огляду на наведені результати, підвищення продуктивності подрібнювача досягається поєднанням ударного та ковзного способів дії. Оптимальним є створення робочого механізму, який одночасно завдає імпульсного удару по стеблу, порушуючи цілісність волокнистої будови і здійснюючи різання зі зміщенням у місцях розколу, що забезпечує отримання однорідної, добре подрібненої маси, зручної для споживання тваринами.

### 1.3 Порівняльний огляд теоретичних моделей подрібнювального процесу

Теоретичне обґрунтування принципу подрібнення жорстких стеблових кормів ґрунтується на тому, що під час різання шар стебел має бути жорстко зафіксований і не зміщуватись. Тип процесу визначається величиною кута  $\tau$ , який утворюється між перпендикуляром до ріжучої частини та напрямком дії прикладеної сили  $P_p$  [9]. Існує взаємна залежність між різновидами цього процесу: зі збільшенням значення  $\tau$  один спосіб поступово переходить у наступний. Так, коли  $\tau = 0$  – здійснюється пряме різання; при  $0 < \tau \leq \varphi$  – похиле без ковзального ефекту; а за умови  $\tau > \varphi$  – похиле із ковзанням (рис. 1.2).

Слід мати на увазі, що параметр  $\tau$  визначає як тип процесу відокремлення, так і форму розподілу напружень у поперечному зрізі стебла. Зростання зони інтенсивних деформацій може бути досягнуте або підвищенням швидкості руху ріжучого елемента, або зміщенням напрямку зусилля від перпендикулярного положення до нахиленого [1].

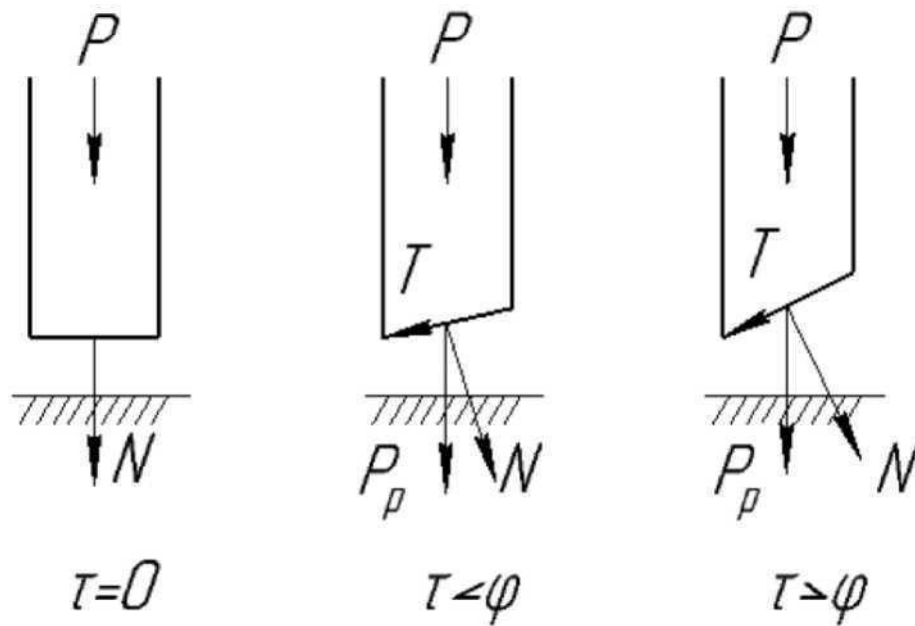


Рисунок 1.2 – Види різання стеблових матеріалів

Слід враховувати те, що функціонування системи впливають наступні фактори: наявність ковзального переміщення леза; ступінь фіксації рослинного шару; величина питомої енергії відокремлення; структурно-механічні параметри рослинної маси; швидкість руху ріжучої частини; геометрія її форми; а також проміжок між ріжучими компонентами [3].

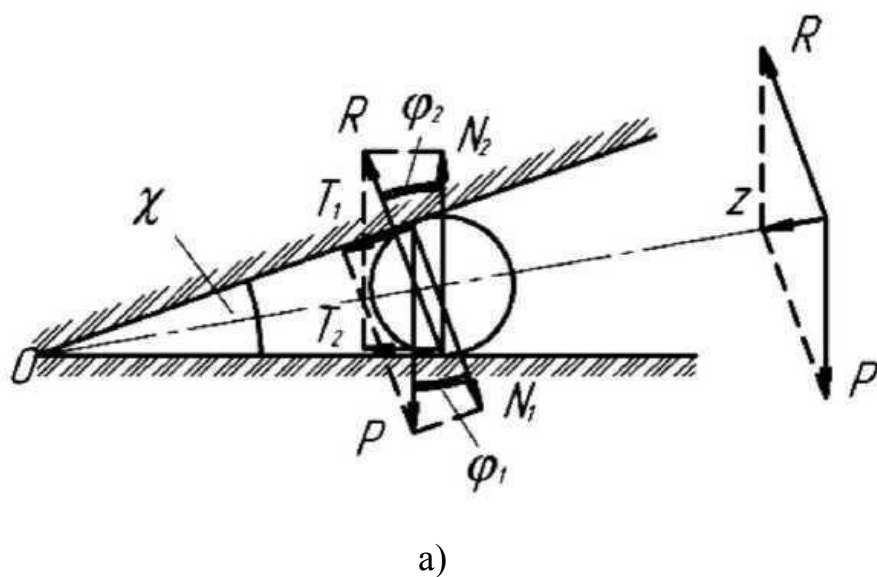
Разом із тим важливою умовою стабільного перебігу процесу поділу є надійне притискання волокнистої маси між ріжучим елементом і опорною пластиною.

Далі розглядаються умови, за яких досягається впевнена фіксація сировини для переробки. На рисунку 1.3 подано приклад моделі круглого стебла, розташованого в зоні взаємодії двох елементів – рухомого ножа та нерухомої опорної пластини.

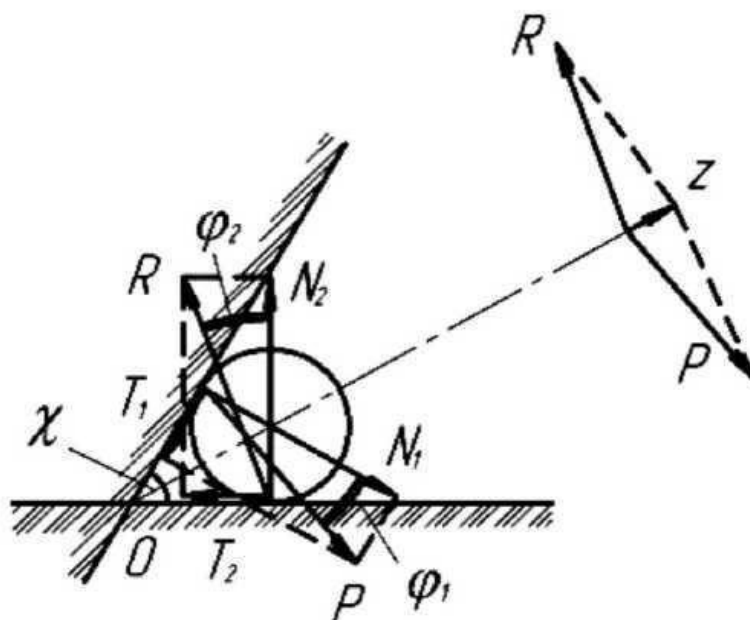
Таким чином, умова повного заміщення запишеться:

$$\chi \leq 2\varphi_{min}, \quad (1.1)$$

в якому  $\varphi_{min}$  – найменший з кутів  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ . Відповідно до результатів експериментів, у дискових установках  $\chi = 40 - 50^\circ$ , в агрегатах з робочим органом барабанного типу –  $\chi = 24 - 30^\circ$ .



а)



б)

Рисунок 1.3 – Защемлення матеріалу:

а – в між лезами;

б – його виштовхування

Неоднорідність фізико-механічних характеристик рослинної сировини під час дії ріжучого елемента зумовлюється способом відокремлення, який визначається орієнтацією площини поділу відносно волокон і напрямом руху леза. Поєднання цих факторів формує основні типи зрізів – уздовж волокон, упоперек та під боковим кутом.

За дослідницького застосування роботи ріжучих механізмів переважно спостерігаються не базові типи зрізів, а проміжні варіанти: нахилений (поздовжньо-поперечний), косопохилий (поперечно-бічний) та комбінований уздовж-бічний. Такі різновиди формуються через нерівномірний кут нахилу стебел відносно площини розділення та поступальний рух шару у подаючому пристрої. Чередування методів впливу, що відбувається внаслідок відгинання стебел у процесі різання, спричиняє появу поздовжніх навантажень, які знижують продуктивність операції та скорочують строк служби ножових елементів. При цьому поверхня зрізу стає нерівною та рваною.

Формування абстрактної схеми поперечного відділення в межах квазістатичного підходу спирається на таку ідею: під час контакту леза з шаром рослинної маси (рис. 1.4,а) на інструмент діють вертикальна складова навантаження  $P$ , опорні реакції  $N_1$  та  $N_2$ , фрикційні зусилля  $F_1$  та  $F_2$  уздовж бічних граней, а також різальний опір від кромки  $P_p$ .

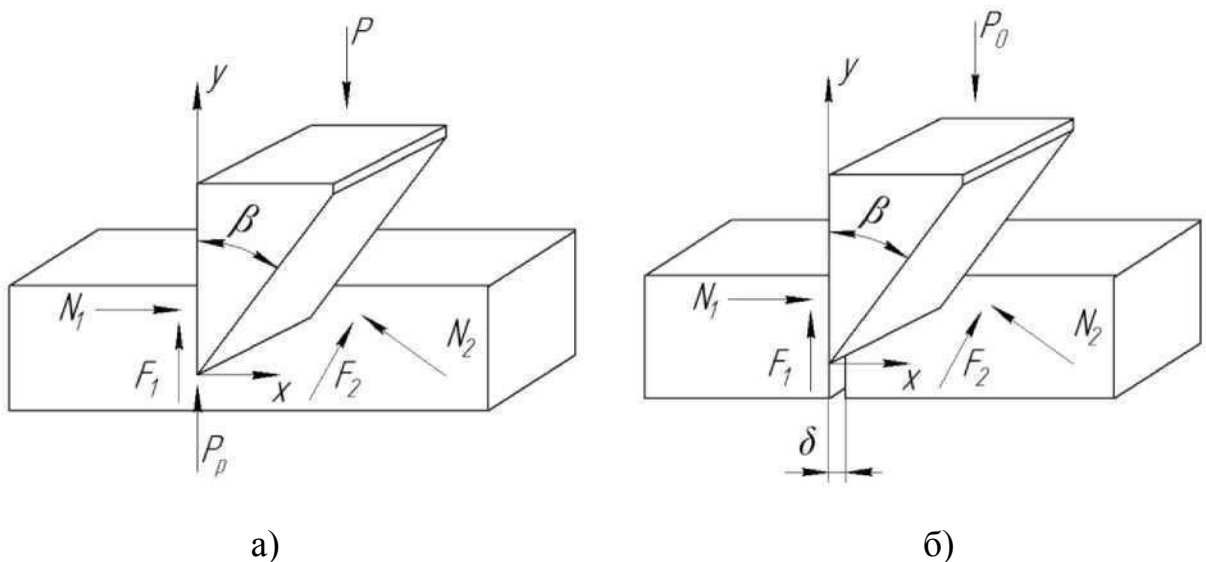


Рисунок 1.4 – Схема сил, що діють на ніж при нормальному різанні:

а – взаємодія ножа з шаром матеріалу;

б – схема для спрощеного дослідження

За припущення рівномірного переміщення ножа рівняння статичної

рівноваги в проєкціях на осі  $x$  та  $y$  набувають відповідного аналітичного вигляду:

$$\{N_1 - N_2 \cos \cos \beta + F_2 \sin \sin \beta = 0 - P + P_p + F_1 \cos \cos \beta + N_1 \quad (1.2)$$

У математичній моделі (1.2) присутні п'ять змінних параметрів:  $N_1, N_2, F_1, F_2, P_p$ . Сучасні науковці запропонували вдосконалений метод визначення цих невідомих величин. У процесі руху ріжучого елемента, коли між оброблюваним матеріалом і його боковими поверхнями виникає тертя зі зсувом, встановлюються такі взаємозалежності між зазначеними параметрами:

$$F_1 = fN_1, H, \quad (1.3)$$

де  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання.

$$F_2 = fN_2, H. \quad (1.4)$$

Далі передбачається, що шар матеріалу вже частково розділений тонким лезом, після чого ніж розсуває обидві його половини при віддаленні  $\delta$  (рис. 1.4,б), що відповідає товщині ріжучої крайки. За таких умов сила опору різанню  $P \square$  дорівнює нулю, а результуюче навантаження приймає значення  $P = P_0$ . Виходячи з наведених положень:

$$N_1 = \frac{P_0(\cos \cos \beta - f \sin \sin \beta)}{2f \cos \cos \beta + (1-f^2) \sin \sin \beta}, H, \quad (1.5)$$

$$N_2 = \frac{P_0}{2f \cos \cos \beta + (1-f^2) \sin \sin \beta}, H. \quad (1.6)$$

Виконавши аналіз зусиль  $P$  і  $P_0$ , шляхом натурних випробувань можна визначити і обчислити  $P_p = P - P_0$ .

При звичайному способі розділення матеріалу зусилля  $P$  та  $P_0$  розташовані під прямим кутом до осі шару. Коли швидкість переміщення леза значно менша за швидкість поширення деформацій у волокнах стебла, напруження в матеріалі розподіляються майже однаково по всьому його поперечному зрізу. Описане вище свідчить про те, що під час повільного нормального різання руйнування зовнішньої оболонки, внутрішніх волокон і серцевини відбувається практично одночасно. Такий підхід вносить певні проблеми, для визначення величини  $P_0$  необхідно виконати значну вибірку послідовних натурних випробувань. А також методика не враховує вплив швидкості руху леза та вологості сировини.

При зміні типу різання змінюється також співвідношення між

нормальними та дотичними складовими зусиль зрізу (рис. 1.5).

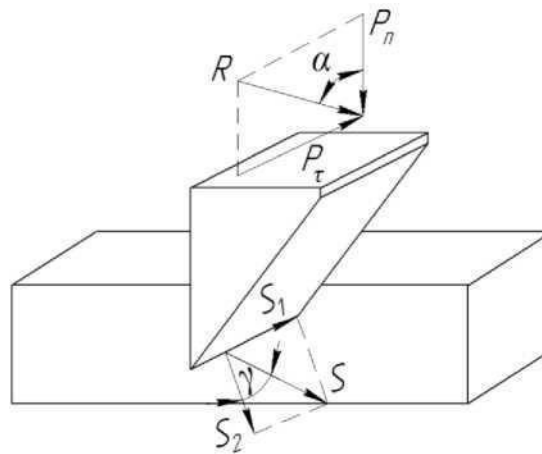


Рисунок 1.5 – Схема діючих сил

Встановлено, що при зниженні величини нормальної складової  $P_n$  сила зсуву  $P_\tau$ , яка забезпечує процес відокремлення матеріалу, збільшується таким чином, щоб результуюче зусилля  $P$  залишалось незмінним:

$$R = \sqrt{P_n^2 + P_\tau^2}, H. \quad (1.7)$$

У процесі роботи різального елемента зміна кута нахилу сумарного зусилля  $R$  відносно перпендикуляра до ріжучої кромки  $\alpha$  у діапазоні  $0-39^\circ$  збігається зі зміною напрямку руху леза  $\gamma$ . У межах цих значень кута  $\alpha$  та  $\gamma$  рівні між собою, що свідчить про відсутність відносного ковзання інструмента по зрізаному матеріалу – це режим нормального зрізу без прослизання.

Коли ж нормальна складова сили зменшується, а дотична – зростає, рівність  $\alpha$  і  $\gamma$  порушується. При  $\gamma > \alpha$  з'являється ковзання леза вздовж зрізу. Такий ефект можливий лише завдяки мікронерівностям або зубцям на ріжучій країці, які сприяють розподілу деформацій у поперечному перерізі стебла. Це забезпечує поступове механічне розділення і спонукає легше занурення ножа в масу матеріалу як у випадку звичайного нормального різання, так і при наявності ковзання.

За низьких швидкостей руху леза руйнівне напруження, утворюються внаслідок великих, але малоконцентрованих деформацій. Зі збільшенням швидкості різання обсяг деформованої зони зменшується, а концентрація

зусиль – навпаки, зростає, через що паралельне зміщення місць впливу між волокнами і ріжучою гранню зменшується. У таких умовах вплив кута загострення на проникнення інструмента в матеріал незначний. Проте малі кути заточування позитивно впливають на процес, оскільки сприяють більшій локалізації деформацій у структурі рослинної сировини.

Розроблення теоретичної схеми процесу різання з урахуванням ковзання ґрунтується на припущенні, що під час взаємодії ріжучого елемента з шаром подрібнюваного матеріалу, при цьому на завершальному етапі виникає комбінація зусиль. До них належать: вертикальна складова зусилля  $P_n$ , реакції опор  $N_1$  і  $N_2$ , опір, який виникає під час відносного переміщення тіл у місці контакту  $F_1$  та  $F_2$ , що виникають на бокових гранях ножа, зусилля опору ковзанню між дотичними поверхнями  $F_3$ , спрямована вздовж леза, а також сила опору різанню  $Q$ .

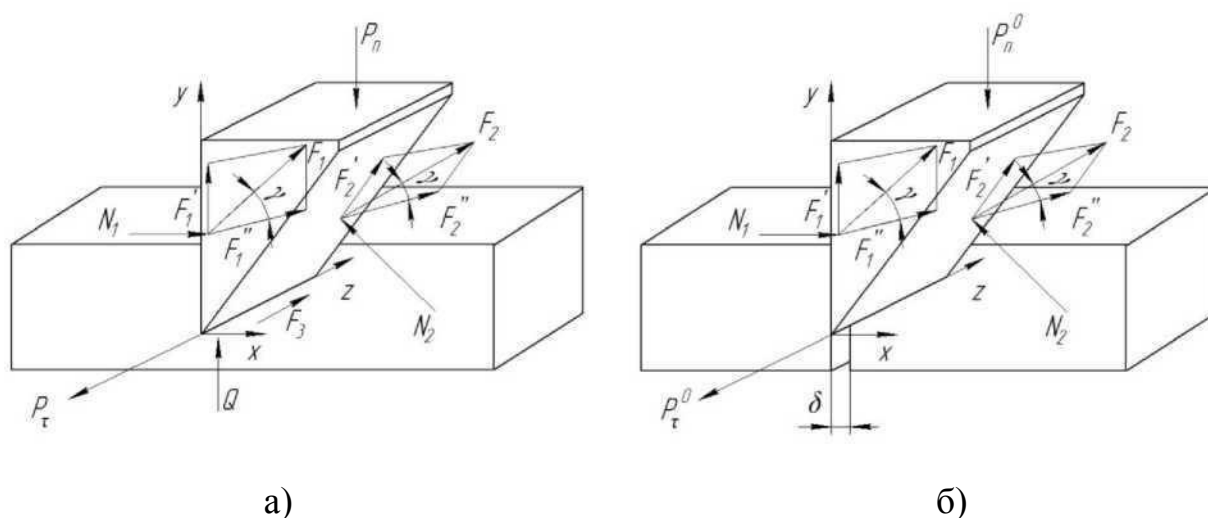


Рисунок 1.6 – Схема сил, що діють на ніж при ковзному різанні:

а – повна схема;

б – спрощена схема

При настанні моменту досягнення сталого поступального руху леза, співвідношення сил, що діють у процесі різання, можна подати у вигляді системи рівнянь рівноваги по координатних осях  $x$ ,  $y$  та  $z$ :

$$\{- P \sin \sin \alpha + Q + F_2 \sin \sin \gamma \cos \cos \beta + F_1 \sin \sin \gamma = 0; \quad N_1 - (1.8)$$

Відповідно до наведено вище, виконається математичне спрощення, при цьому  $Q = 0$ ,  $F_3 = 0$ , а  $P = P_0$ :

$$\{-P \sin \sin \alpha + fN_2 \sin \sin \gamma \cos \cos \beta + fN_1 \sin \sin \gamma + N_2 \sin \sin \beta \quad (1.9)$$

$$N_1 = \frac{P_0 \sin \sin \alpha (\cos \cos \beta - f \sin \sin \gamma \sin \sin \beta)}{2f \sin \sin \gamma \cos \cos \beta + (1 - f^2 \gamma) \sin \sin \beta}, \quad H. \quad (1.10)$$

$$N_2 = \frac{P_0 \sin \sin \alpha}{2f \sin \sin \gamma \cos \cos \beta + (1 - f^2 \gamma) \sin \sin \beta}, \quad H. \quad (1.11)$$

При підвищенні параметрів  $N_1$  і  $N_2$  в вираз (1.9) матимемо співвідношення  $\alpha$  і  $\gamma$ :

$$\tan \tan \alpha = \frac{2f \sin \sin \gamma \cos \cos \beta + (1 - f^2 \gamma) \sin \sin \beta}{(1 + \cos \cos \beta - f \sin \sin \gamma \sin \sin \beta) \cos \cos \gamma}, \quad H. \quad (1.12)$$

Більшість вчених які займались поточним питанням використовували наступну рівність при визначенні зусилля зрізання:

$$P_p = 2EF \tan \tan \alpha \frac{\alpha}{2}, \quad H. \quad (1.13)$$

в якому  $E$  – показник лінійної деформаційної жорсткості речовини, МПа;

$F$  – геометрична площа зрізу деталі в напрямку, перпендикулярному до її осі, мм.

Найслабшою стороною наведеної формули є те, що опис механіко-технологічних характеристик оброблюваного матеріалу здійснюється лише через показник пружності. Варто підкреслити, що під час формування теоретичних основ процесу різання беруть до уваги конструктивний параметр кута різання  $\alpha_1$ .

$$\alpha_1 = \gamma_1 + \beta_1, \quad \text{град.} \quad (1.14)$$

де  $\gamma_1$  – кутова величина загострення ріжучої крайки,

$\beta_1$  – кутове положення ріжучої крайки у робочому органі.

Агрегати, призначені для подрібнення волокнистої кормової маси, кут загострення ножа становить  $\gamma_1 = 12 - 22$  градуси. Нижня межа цього параметра визначається показниками міцності матеріалу ріжучого елемента, тоді як верхня – раціональністю енергетичних витрат у процесі різання.

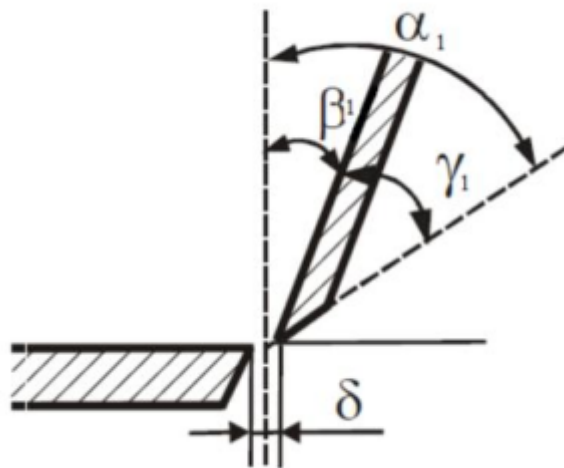


Рисунок 1.7 – Схема ріжучої пари

Проаналізувавши перебіг робочого процесу леза, для функціонування подрібнювачів найбільше значення мають два параметри – сила тиску ножа на рослинну сировину та величина його бокового ковзання. Їх співвідношення описується коефіцієнтами ковзання та змінного зрізу. Відстань між ріжучою кромкою та розташованою напроти упорною пластиною  $\delta$  має знаходитись у межах 0,5–4,6 мм.

Детальне дослідження показало, що класичні теоретичні підходи до опису процесу різання не враховують низку важливих аспектів, головним серед яких є неоднорідність анатомічної структури матеріалу. Крім того, не завжди враховується вплив динамічних факторів, зокрема ударних навантажень під час контакту ножа з матеріалом. Через це єдина узгоджена наукова концепція процесу подрібнення жорстких стеблових кормів поки що відсутня.

Відмінною особливістю барабаних ріжучих систем є те, що кут нахилу ножа відносно контрпластини  $\alpha$  дорівнює куту защемлення  $\chi$ . Тому при розгляді кінематики циліндричного ріжучого вузла у площині, перпендикулярній до площини зрізу, необхідно враховувати такі параметри: товщину шару  $h$ , висоту розташування осі обертання барабана над контрпластиною  $a$ , діаметр барабана  $D$ , а також швидкості подачі матеріалу  $v_u$  та кутову швидкість його обертання  $v_\phi$ .

Рух ріжучих елементів барабана відносно шару сировини з урахуванням

одночасного обертання з кутовою швидкістю  $\omega$  і поступальної подачі зі швидкістю  $v_{ш}$  описується кривою типу трохоїди (рис. 1.8). Рівняння цієї траєкторії в нерухомій системі координат  $OX$  та  $OY$  має вигляд:

$$\begin{aligned} x &= v_{сл} t + \frac{D}{2} \cos \omega t; \\ y &= \frac{D}{2} (1 - \sin \omega t). \end{aligned} \quad (1.15)$$

де  $t$  – тривалість обертання робочого органу на кут  $\omega t$ .

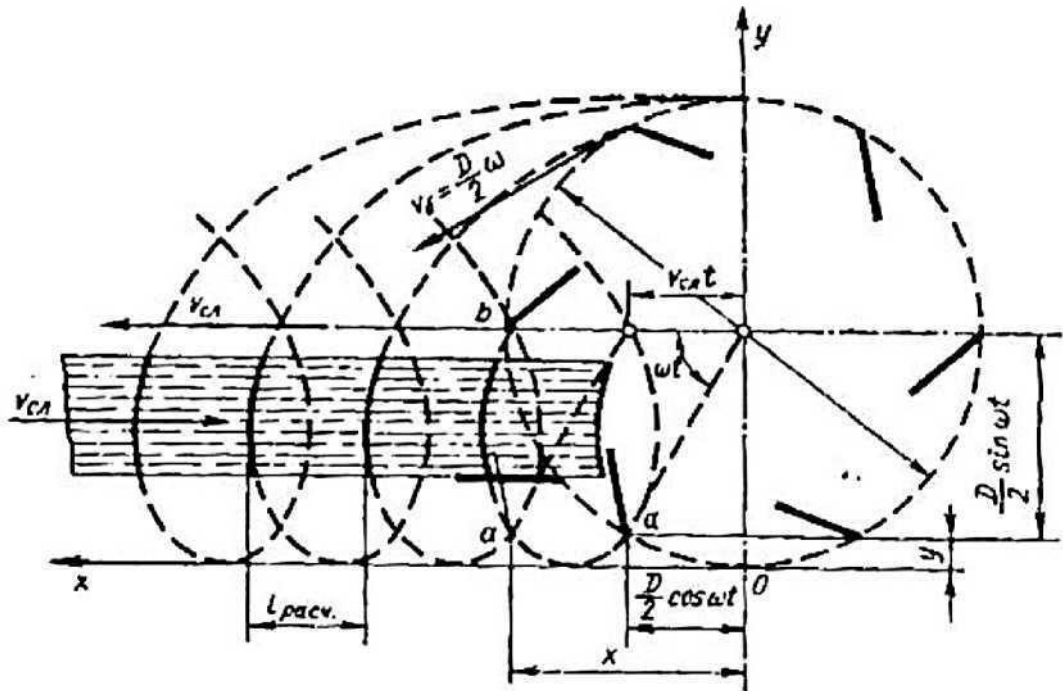


Рисунок 1.8 – Траєкторія руху лез ножів барабана

У процесі побудови моделі прийнято припущення, що не шар кормової маси переміщується до барабана, а навпаки, барабан обертається відносно нерухомого шару зі швидкістю, еквівалентною швидкості подачі матеріалу. Під час визначення послідовних положень ріжучих елементів (рис. 1.8) співвідношення швидкостей  $v_б$  і  $v_{ш}$  умовно приймається близьким до одиниці, що надає траєкторії у вигляді трохоїди витягнутої форми. Це спрощення є основним недоліком розглянутої моделі, адже на практиці швидкість руху шару є значно меншою за лінійну швидкість барабана.

Проміжок, що відокремлює аналогічні позиції на сусідніх траєкторіях трохоїдальної лінії, має постійне значення і слугує показником обчислювальної

протяжності дії ріжучого процесу  $l_{розр}$ . Цей параметр можна знайти, віднявши значення абсциси  $x$  попереднього положення ножа від абсциси  $x_b$  наступного при рівності їх ординат  $y = y_b$  для обох положень, тобто:

$$l_{розр} = x_b - x. \quad (1.16)$$

Припустимо, що середній кут між ріжучими крайками:

$$\theta = \frac{2\pi}{z}, \quad (1.17)$$

де  $z$  – кількість ріжучих крайок барабану.

З виразу (1.15):

$$\sin \sin \omega t = \frac{R-y}{R}, \quad (1.18)$$

далі:

$$\cos \cos \omega t = \sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2}. \quad (1.19)$$

Застосувавши параметр  $\cos \omega t$  у вираз (1.15), матимемо:

$$x = v_{сл} t + R \sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2}. \quad (1.20)$$

Ріжучий елемент  $b$  досягне в масі матеріалу положення, що відповідає куту  $\alpha$ , із затримкою на часовий інтервал  $\Delta t$ , який відповідає періоду, необхідному для повороту барабана на кут  $\theta$ , тобто:

$$\Delta t = \frac{\theta}{\omega}. \quad (1.21)$$

Таким чином, координата по осі  $x$ , що відповідає новій позиції ножа  $b$ :

$$x_b = v_{сл} (t + \Delta t) + R \sqrt{1 - \left(\frac{R-y_b}{R}\right)^2} - v_{сл} t. \quad (1.22)$$

Застосувавши параметр  $\Delta t$  беручи до уваги, що  $y_b = y$  виходячи з рівняння (1.16), матимемо:

$$l_{розр} = x_b - x = v_{сл} \left(t + \frac{\theta}{\omega}\right) + R \sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2} - v_{сл} t - R \sqrt{1 - \left(\frac{R-y}{R}\right)^2} \quad (1.23)$$

Огляд наукових джерел свідчить, що на сучасному етапі розвитку техніки та науки існує потреба в подальшому вивченні процесів подрібнення стеблових кормів як у теоретичному і практичному аспекті. Важливо розробити наукове обґрунтування параметрів конструкції та технологічних характеристик робочого елемента подрібнювального пристрою, який здатний одночасно розщеплювати

стебла, порушуючи їхню внутрішню структуру, і здійснювати ковзне різання вже розщеплених частин.

Визначення раціональних конструктивно-технологічних характеристик доцільно проводити аналітичного розгляду опублікованих наукових робіт із застосуванням методів математичного моделювання, що дозволяють мінімізувати кількість поправочних коефіцієнтів. Відомо, що більшість таких коефіцієнтів у теорії подрібнення стеблової сировини є багатозмінними функціями, дослідження яких потребує значних теоретичних і експериментальних зусиль. Результати аналізу свідчать, що наявні наукові передумови для створення нових високоефективних подрібнювачів залишаються недостатньо розвиненими, а теоретичні засади вимагають подальшого впорядкування та вдосконалення.

## **Висновки до розділу 1**

1. Подрібнення об'ємних кормових матеріалів доцільно здійснювати за допомогою барабанного різального механізму, оскільки така конструкція добре синхронізується з подаючим вузлом і забезпечує продуктивне використання як ріжучих елементів, так і вільно закріплених ударних деталей різноманітної форми.

2. Найбільш доцільним способом руйнування жорстких стеблових кормів є різання зі зміщенням лінії дії, адже така технологія, реалізована у високоефективних барабанних машинах, не потребує складних конструкцій різального вузла й забезпечує зменшення витрат енергії завдяки оптимальному розподілу навантажень на оброблювану рослинну масу. Окрім цього, форма елементів, що виконують ковзне різання, сприяє зменшенню металоємності барабанних подрібнювачів.

3. Підвищення ефективності процесу подрібнення твердих кормових культур забезпечується шляхом удосконалення конструкції ріжучого вузла машини. Модифікований ріжучий механізм має не лише розділяти стеблову масу

з порушенням її внутрішньої структури, а й реалізовувати ковзне різання вже частково подрібненого рослинного матеріалу.

На основі проведених експериментальних і теоретичних досліджень сформульовано концепцію підвищення рівня механізації процесу підготовки волокнистих кормів. Суть підходу полягає у створенні та впровадженні у виробничу практику нового типу подрібнювального обладнання, конструкція якого відзначається високою адаптивністю до різних технологічних і експлуатаційних умов.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОДРІБНЕННЯ РОСЛИННОЇ СИРОВИНИ СТЕБЛОВОГО ТИПУ

Головною метою розділу, присвяченого теоретичним обґрунтуванням, є побудова математичної моделі процесу руйнування жорстких стеблових кормів у подрібнювальному агрегаті, робочий механізм якого поєднує ударне навантаження на рослинну масу з одночасним ковзним розрізанням за допомогою вільно закріплених комбінованих лез.

### 2.1 Теоретичне підґрунтя створення нової конструктивно-технологічної системи подрібнення стеблової сировини

Модернізований варіант конструктивного виконання включає три основні функціональні підсистеми: модуль подачі матеріалу (СЗ), простір, де здійснюється руйнування кормової маси (КП) та вузол відведення подрібненої маси (СВ) (рис. 2.1).

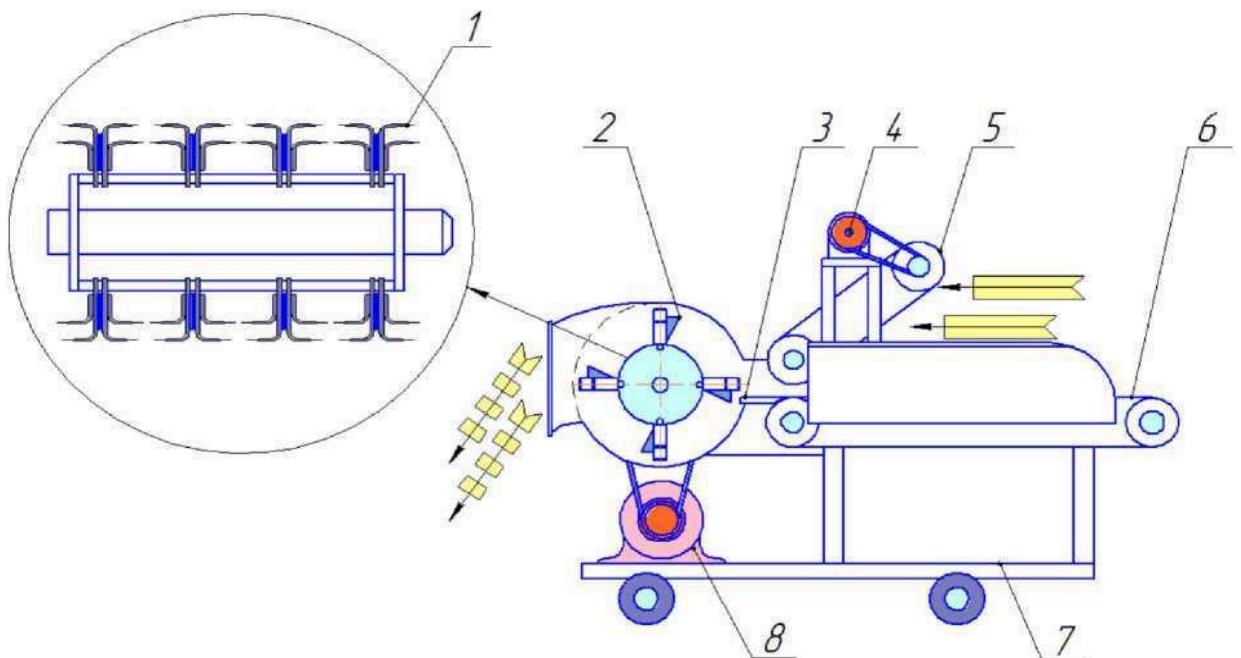


Рисунок 2.1 – Конструктивно-технологічна схема подрібнювача грубих стеблових кормів: 1 – поперечні серпоподібні леза; 2 – вертикальні клиновидні леза; 3 – протирижуча; 4 – привід живильника; 5 – притискний транспортер; 6 – поздовжній транспортер; 7 – рама; 8 – привід барабана

Для розробки різального механізму передбачено як барабан із вільно закріпленими комбінованими лезами, що складаються з вертикальних клиноподібних і поперечних серпоподібних елементів. Така система поєднує ударне відокремлення матеріалу та ковзне розрізання.

Під час роботи установки оператор розміщує необроблену масу на горизонтальній транспортуючій стрічці, після чого вона стискається верхнім подавальним механізмом і у спресованому вигляді надходить у зону різання. Вертикальні клини розколюють частину стебел уздовж волокон, комбіновані ножі уповільнюються, створюючи сприятливі умови для періодичного перетинання поперечними дугоподібними ріжучими елементами. При цьому частково зберігається дія ударного характеру, завдяки чому волокна стебла додатково розриваються, зменшуючи опір зрізуванню шару.

Потік повітря виносить подрібнені фрагменти через розвантажувальний отвір, де встановлене сито, що затримує надмірно довгі частини для повторної обробки. Дослідження функціонування системи на основі принципу «чорної скриньки» (рис. 2.2) засвідчує, що процес руйнування стеблової кормової маси характеризується багатопараметричністю та високим ступенем складності. Його продуктивність оцінюють кількісними та якісними параметрами – питомими енергозатратами  $E_y$  і ступенем подрібнення  $\lambda$ .

Функціональна залежність між параметрами виражається відповідною математичною моделлю:

$$\left\{ \epsilon_y = \left( \frac{N_{\text{П}} N_{\text{Б}} h, h_1, n_6}{q, q_1, \zeta, W, L, h_3, K_{\text{ВН}}, K_{\text{ПН}}} \right); \lambda = \Phi(h, q, W, \zeta, h_1, n_6, h_2, K_{\text{ВН}}, K_{\text{ПН}}, L, h) \right. \quad (2.1)$$

У результаті дослідження конструкцій подрібнювачів жорстких кормових матеріалів, анатомічних особливостей рослинних стебел, наявних теоретичних розробок і математичної залежності параметрів (2.1) можна сформулювати висновок.

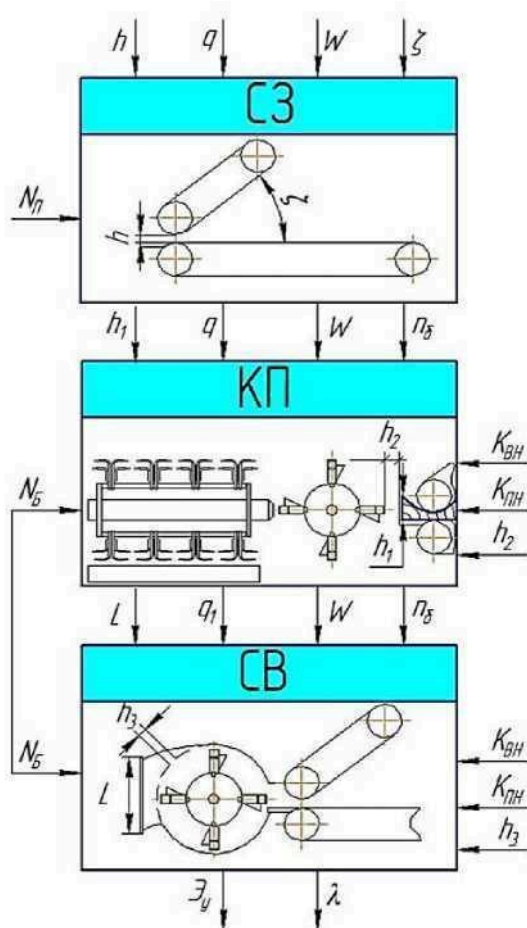


Рисунок 2.2 – Метод чорного ящика: СЗ – система завантаження; КП – камера подрібнення; СВ – система вивантаження;  $h$  – зазор між живильними вальцями;  $q$  – подача матеріалу в камеру подрібнення;  $W$  – вологість матеріалу;  $\zeta$  – кут нахилу притискного транспортера;  $N_{\text{п}}$  – потужність на привід живильника;  $h_1$  – товщина шару матеріалу, що ріжеться;  $n_6$  – частота обертання барабана;  $h_2$  – зазор між ножами і протиріжучою;  $K_{\text{вн}}$  – кількість вертикальних лез;  $K_{\text{пн}}$  – кількість поперечних лез;  $N_{\text{б}}$  – потужність на привід барабана;  $L$  – розміри вивантажного вікна;  $q_1$  – подача подрібненого матеріалу;  $h_3$  – розмір отвору решета;  $h_4$  – зазор між серпоподібними лезами  $\epsilon_y$  – питома енергоємність процесу подрібнення;  $\lambda$  – ступінь подрібнення.

Під час дії леза руйнування сировини відбувається через тиск, створений вершиною двогранного кута робочої частини ріжучого елемента. Процес поділу матеріалу на частини має дві фази: спочатку відбувається його ущільнення, після чого здійснюється власне різання (рис. 2.3).

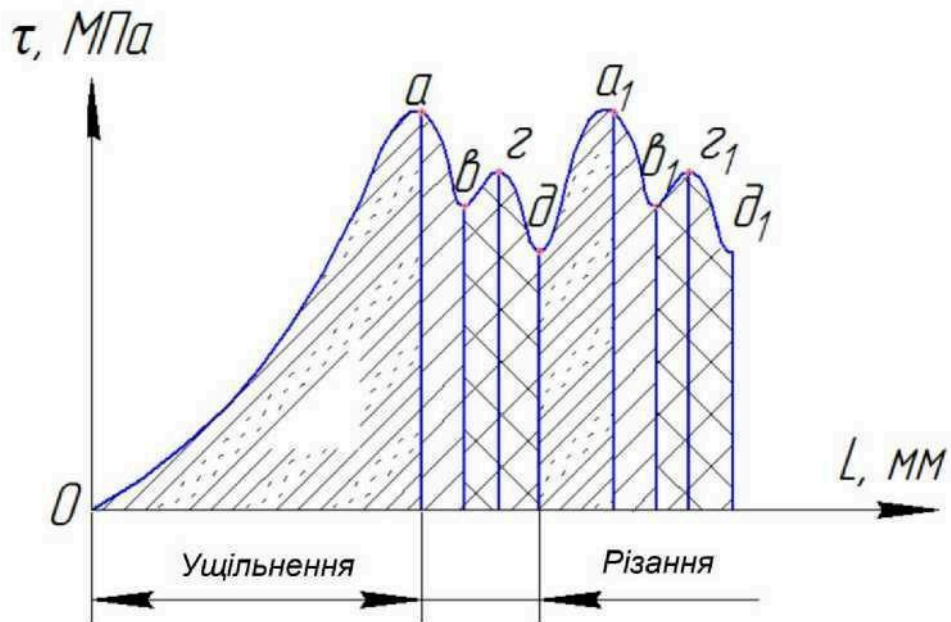


Рисунок 2.3 – Робочий процес різання матеріалу лезом

Стартова ділянка графіку ( $0, a$ ) демонструє момент стискання рослинного стебла. Подальше руйнування одиничного стебла відбувається через послідовну зміну пружних деформацій жилок ( $d, a_1$ ), їх подальше пластичне перетворення ( $a_1, b_1$ ), потім виникнення пружних змін у структурі основної частини ( $b_1, z_1$ ) і завершальну стадію пластичного деформування ( $z_1, d_1$ ).

Отже, операція подрібнення, якщо не враховувати фазу стискання матеріалу, включає чотири послідовні стадії, що вимагає розроблення такої конструкції робочого органу, яка забезпечуватиме високу результативність на кожному з етапів.

На підставі отриманих результатів дослідження висунуто наукове припущення, згідно з яким поліпшення ефективності подрібнення жорстких стеблових кормів може бути досягнуте шляхом застосування ріжучого вузла з вільно підвішеними комбінованими лезами. Такі леза поєднують вертикальні клиноподібні та поперечні дугоподібні елементи, що забезпечує оптимальне поєднання ударного впливу з періодичним різанням. Подібна конструкційна схема створює умови для раціонального формування пружних і пластичних деформацій матеріалу під час його руйнування.

З огляду на викладене, величину супротиву процесу різання можна визначити за таким співвідношенням:

$$P_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n P_1 + \sum_{j=1}^m P_2, \quad (2.2)$$

де  $P_1$  – супротив розрізанню волокон, Н;

$P_2$  – супротив розрізанню основного матеріалу, Н;

$n$  – чисельність провідних волокон у шарі стеблової маси, шт;

$m$  – кількість шарів основної тканини стебел, що знаходяться у товщі шару, одиниць.

При функціонуванні комбіновані ріжучі елементи здатні виконувати кілька типів впливу: розділення стебел за допомогою вертикальних клиноподібних ножів (рис. 2.4,а), розтин матеріалу поперечними серпоподібними лезами, розташованими у кілька рівнів (рис. 2.4, б), а також одночасну дію обох різальних систем (рис. 2.4, в).

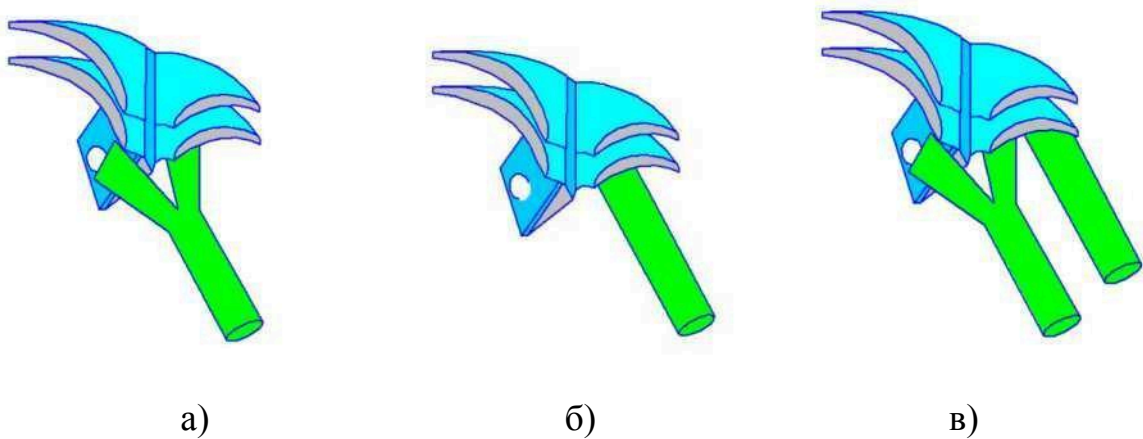


Рисунок 2.4 – Види взаємодії комбінованого ножа зі стеблом

Процес подрібнення можна поділити на дві стадії: першу – зміну поперечного профілю стебла з круглої форми на еліптичну внаслідок стискання, і другу – поступове збільшення площі зрізу з плином часу. Характер перебігу цих стадій визначається геометрією ріжучих елементів, параметрами роботи подрібнювача та фізико-механічними властивостями рослинного тіла. Для встановлення оптимальної будови робочого вузла та вибору раціональних

режимів подрібнення необхідно виконати теоретичні розрахунки.

## 2.2 Теоретичне обґрунтування продуктивності подрібнювача

Параметр продуктивності подрібнювального агрегату інтерпретується як здатність його робочого органу протягом заданого інтервалу часу  $t$  за допомогою всіх ріжучих елементів одночасно відокремлювати певну площу або об'єм із загального поперечного перерізу чи маси шару жорстких стеблових кормів, що потрапляють у робочу зону ріжучого механізму.

$$W_{us} = \frac{n_n S_c}{t}, \frac{M^2}{c}, \quad (2.3)$$

де  $S_c$  – переріз стебла, що зрізає одна ріжуча крайка;

$n_n$  – кількість ріжучих крайок.

На момент зрізання лезом стебло набуває еліпсоподібної форми, тому канонічне рівняння набуває наступного вигляду:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2.4)$$

де  $a$  – більша піввісь;

$b$  – менша піввісь.

З рівняння 2.4. отримуємо:

$$y = \pm b^2 \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}} = \pm \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.5)$$

Верх еліпса:

$$y = f(x) = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.6)$$

Низ еліпса:

$$y = -f(x) = -\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}. \quad (2.7)$$

У своїх дослідженнях Н. Є. Резнік встановив, що найефективнішою геометричною конфігурацією криволінійного ріжучого елемента є спіраль Архімеда. Математичне представлення цієї залежності записується у такій формі:

$$\rho = \rho(\varphi) = \varphi_0 + k_\varphi, \quad (2.8)$$

де  $\varphi_0$  – стартове радіальне розташування;

$\varphi$  – кут обертання радіус-вектору, вздовж якого рухається точка, що формує траєкторію спіральної лінії;

$k$  – переміщення точки вздовж радіус-вектору.

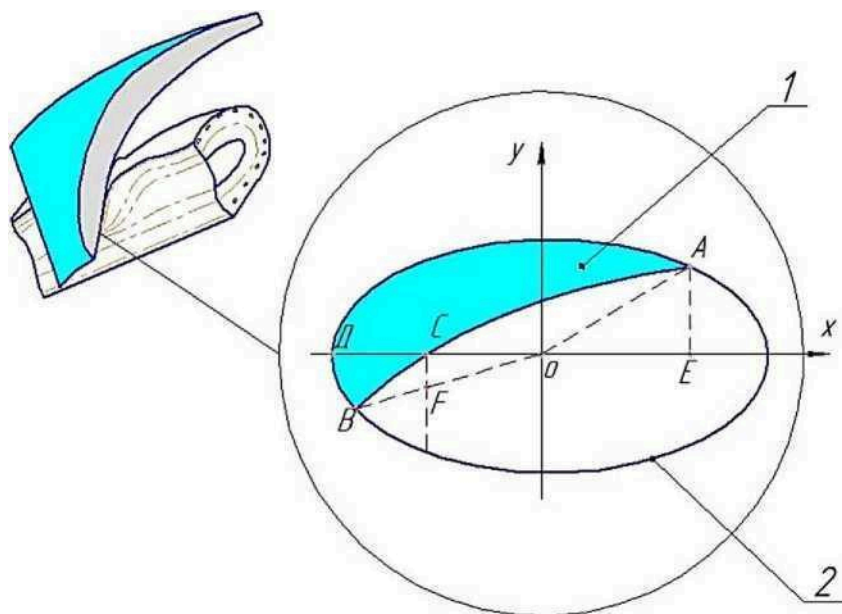


Рисунок 2.5 – Переріз стебла в процесі різання: 1 – площа поперечного перерізу стебла, яку відсікає ніж; 2 – поперечний переріз стебла в стиснутому вигляді

Нормальний переріз шару соломини, відокремлюваного ріжучим елементом, обчислюють як визначений інтеграл. Границі цього інтеграла – відліки точок А та В – знаходять із сукупності рівнянь  $\pm f(x)$ . У полярній формі відліку криву задають залежністю  $\rho = f(\varphi)$ , тобто  $\rho = \rho(\varphi)$  є функцією кута  $\varphi$ :

$$\rho = f(\varphi) \quad \varphi(a^2 \varphi + b^2 \varphi) = a^2 b^2. \quad (2.9)$$

Будемо мати:

$$\left\{ \rho = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \varphi + b^2 \varphi}} \right. \quad \rho = \varphi. \quad (2.10)$$

Оскільки аналітично розв'язати рівняння неможливо, його записують у загальній формі:

$$A(\varphi_A, \rho_A) \text{ або } A(x_A, y_A), \quad (2.11)$$

$$B(\varphi_B, \rho_B) \text{ або } B(x_B, y_B), \quad (2.12)$$

$$C(-\varphi_0 - k\pi; 0), \quad (2.13)$$

$$D(-a, 0). \quad (2.14)$$

Обчислення інтеграла від  $f(x)$  доцільно виконувати у прямокутній системі відліку, а вираз  $\rho(\varphi)$  – у радіально-кутовій системі; у підсумку дістанемо:

$$\begin{aligned} S_c &= \int_{X_0}^{X_A} f(x) dx + \int_{X_0}^{X_B} f(x) dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_C} \rho^2(\varphi) d\varphi - S_{\Delta OAE} + \left( \int_{\varphi_C}^{\varphi_B} \rho^2(\varphi) d\varphi - S_{\Delta} \right. \\ &= \frac{b}{a} \int_{-a}^{x_A} \sqrt{a^2 - x^2} dx + \frac{b}{a} \int_{-a}^{x_B} \sqrt{a^2 - x^2} dx - \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (\varphi_0 + k\varphi)^2 d\varphi - \frac{x_A y_A}{2} - \\ &- \frac{(\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \left( \frac{bx}{2a} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{ab}{2} + \arcsin \frac{x}{a} \right) \Big|_{x_A} - a + \\ &+ \left( \frac{bx}{2a} \sqrt{a^2 - x^2} + \frac{ab}{2} + \arcsin \frac{x}{a} \right) \Big|_{x_C} - a - \frac{1}{k} \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} (\varphi_0 + k\varphi)^2 d(\varphi_0 + k\varphi) - \\ &- \frac{x_A y_A + (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi_B}{2} = \frac{bx_A}{2a} \sqrt{a^2 - x_A^2} + \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x_A}{a} - \frac{bx_C}{2a} \sqrt{a^2 - x_C^2} + \\ &+ \frac{ab}{2} \arcsin \frac{x_C}{a} + \frac{ab}{2} \arcsin(-1) - \frac{x_A y_A + (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Виконавши завершальні алгебраїчні маніпуляції за формулою (2.15),

дістанемо:

$$\begin{aligned} S_c &= \frac{b}{2a} \left( x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left( \arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) - \\ &- \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Об'єднавши вирази (2.3) та (2.16), дістанемо:

$$\begin{aligned} W_{us} &= \frac{bn_H}{2at} \left( x_A \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_C \sqrt{a^2 - x_C^2} \right) + \frac{ab}{2} \left( \arcsin \frac{x_A}{a} + \arcsin \frac{x_C}{a} \right) \\ &- \frac{3ab\pi + x_A y_A (\varphi_0 + k\pi)^2 \operatorname{tg} \varphi}{2}, \text{ м}^2/\text{с}. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Викладені теоретичні засади спираються на припущення, що під дією ударно-ріжучих навантажень стеблова частинка розщеплюється на кілька елементів уздовж поздовжнього зрізу. У більш узагальненому вигляді взаємодія серпоподібних ріжучих елементів із волокнистим кормом відбувається за наведеною схемою.

Етап 1. Ріжучий елемент розташовується на мінімальній відстані від поверхні стебла, ще не торкаючись його, тоді як саме стебло зберігає початкову циліндричну конфігурацію.

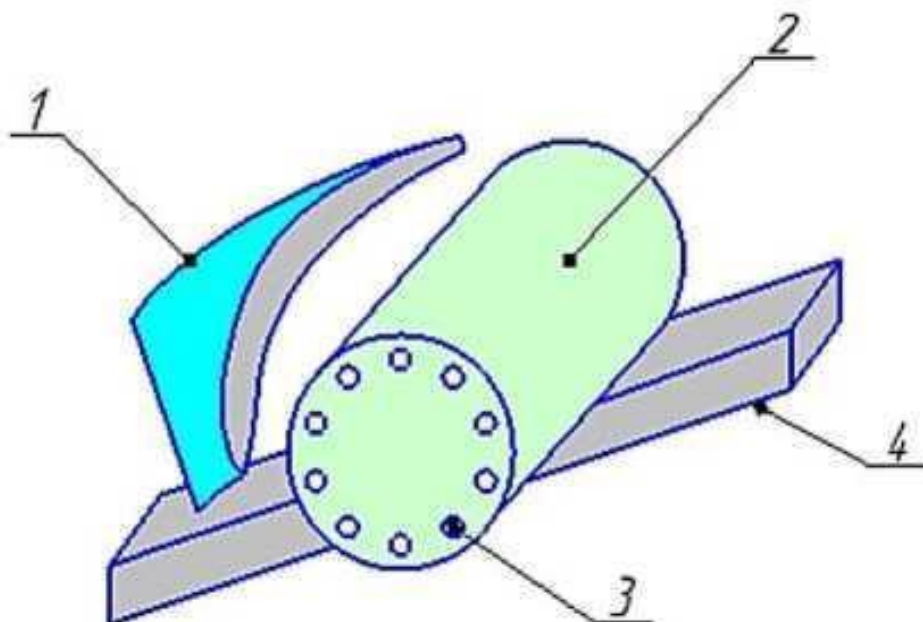


Рисунок 2.6 – До обґрунтування процесу подрібнення: 1 – серповидне лезо комбінованого ножа; 2 – стебло; 3 – прожилки; 4 – протирізальна пластина

Етап 2. У момент початку взаємодії леза зі стеблом виникають пружні деформації як у жилках, так і в основній частині рослинного тіла. Під дією стискання поперечний переріз стебла змінюється з круглої форми на еліптичну (рис. 2.7).

Під час третьої стадії лезо відділяє фрагмент стебла певної довжини. У даному випадку площина зрізу збігається з поперечним перерізом циліндричного об'єкта, роль якого виконує стебло кормової рослини діаметром  $d$ .

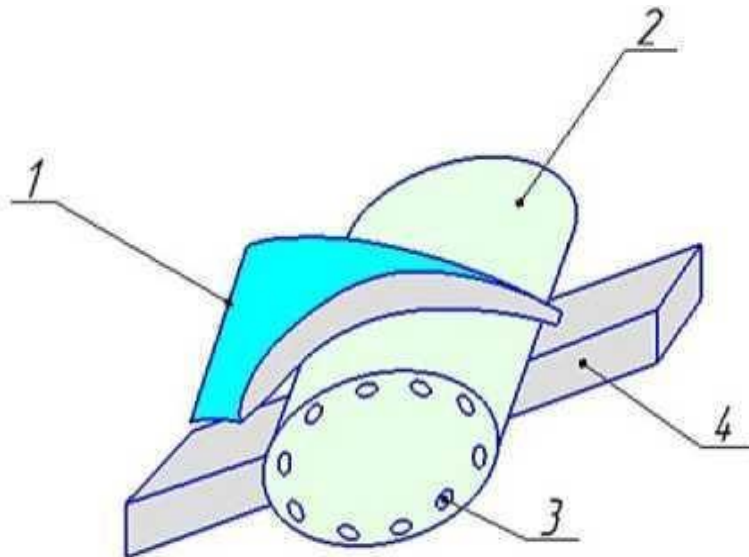


Рисунок 2.7 – Перетворення круглого перетину стебла в еліптичне: 1 – серповидне лезо комбінованого ножа; 2 – стебло; 3 – прожилки; 4 – протиризальна пластина

Для спрощення розглянемо заміну ріжучого елемента циліндричною поверхнею діаметром  $D$ , де  $D$  значно перевищує  $d$ . Оскільки вісь стебла практично збігається з віссю різальної поверхні, а співвідношення  $D \gg d$ , еліптична форма зрізу майже не проявляється, і наближається до площини. Схематичне зображення цього процесу наведено на рисунку 2.8.

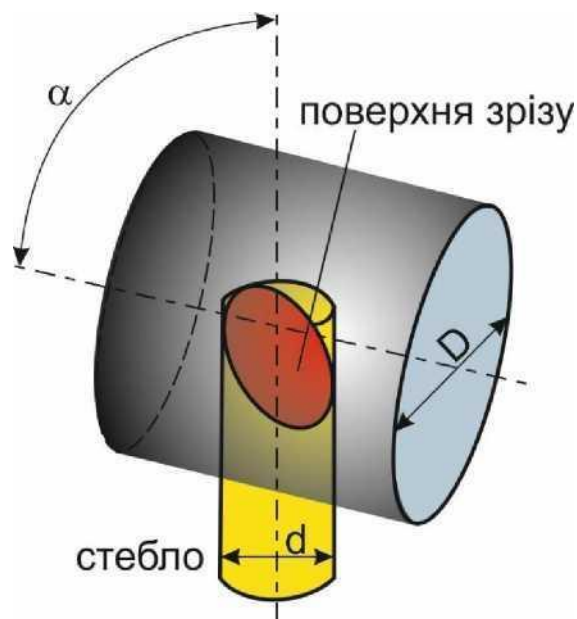


Рисунок 2.8 – Схема подрібнення

При таких умов завдання зводиться до обчислення об'єму фрагмента циліндричного тіла, обмеженого площиною зрізу, як це продемонстровано на рисунку 2.9:

$$V = S_{\text{осн}} h, \text{ м}^3, \quad (2.18)$$

де  $h$  – усереднене значення висоти циліндричного тіла.

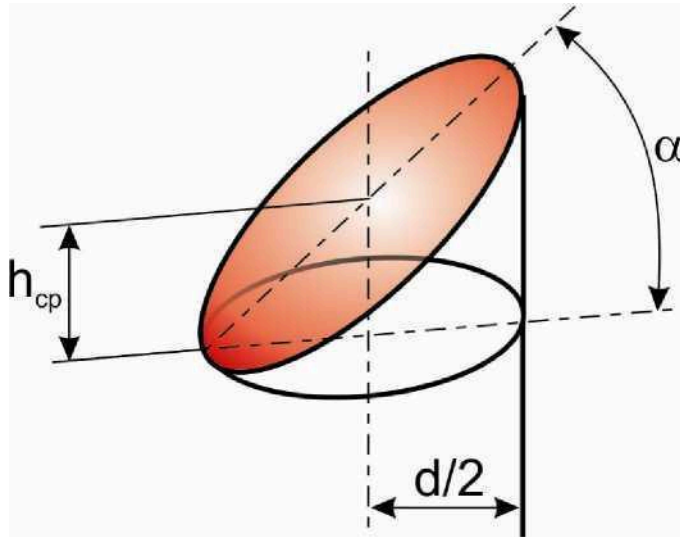


Рисунок 2.9 – Схема частки стебла, що відсікається

Будемо мати:

$$h_{\text{cp}} = \frac{d \sin \alpha}{2}, \quad (2.19)$$

$$S_{\text{осн}} = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (2.20)$$

Для даної ситуації величину зрізу можна встановити за наступним співвідношенням:

$$V = \frac{\pi d^2}{4} \frac{d \sin \alpha}{2} = \frac{\pi d^3}{48} \sin \alpha. \quad (2.21)$$

Як показано на рисунку 2.2. і встановлено з рівняння (2.1), протяжність різку складе:

$$l_0 = \frac{v_{\text{ш}}}{n_0 \cdot K_{\text{НП}}}, \text{ м}, \quad (2.22)$$

де  $v_{\text{ш}}$  – швидкість надходження матеріалу, м/с;

$l_0$  – проміжок між жолобом подавання матеріалу та ріжучою кромкою.

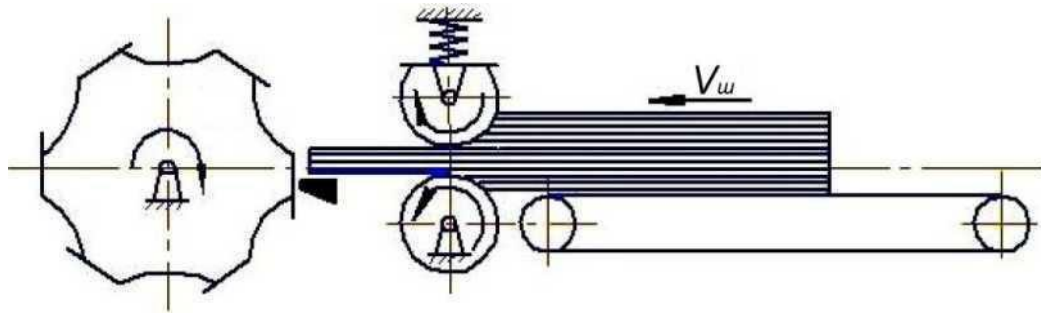


Рисунок 2.10 – Схема подачі шару на подрібнення

Інтенсивність зміни кутового переміщення елементів приводу

$$\omega_6 = v_{ш} \frac{\theta}{l_0}, \text{ с}^{-1} \quad (2.22)$$

де  $\theta$  – радіальний кут між суміжними ріжучими крайками.

За встановленим значенням об'ємних характеристик зрізаного матеріалу встановимо продуктивність установки:

$$W_{uv} = \rho_c \cdot K_{\text{НП}} \frac{\beta_1}{\beta_2} \cdot \frac{v_{\text{сл}} \cdot \theta}{l_0 \cdot 2\pi} \cdot \psi, \quad (2.23)$$

де  $\rho_c$  – густина матеріалу,  $\text{кг/м}^3$  (прийнято:  $54 \div 100 \text{ кг/м}^3$  – для солом'яного матеріалу;  $90 \div 120 \text{ кг/м}^3$  – для кормового матеріалу, що складається переважно із стебелів,  $405 \text{ кг/м}^3$  – для силосних мас);

$\beta_1$  – кут орієнтації лез верхнього ярусу відносно напрямку удару, градуси;

$\beta_2$  – кут розташування лез другого ярусу відносно напрямку дії після ударного руху, градуси;

$\psi$  – показник, який відображає зменшення продуктивності барабанного подрібнювача внаслідок недосконалої роботи подаючого механізму ( $\psi = 0,5 - 0,7$ ).

Оцінку зміни просторового положення лез на наступному рівні зіткнення виконують за допомогою класичних механічних співвідношень, що описують зміну імпульсу при ударній взаємодії. Рівняння (2.23) покладено в основу побудови теоретичної характеристики, яка відображає взаємозв'язок між продуктивністю вдосконаленого подрібнювального агрегату та частотою обертання його ріжучої системи, наведено нижче у графічному вигляді.

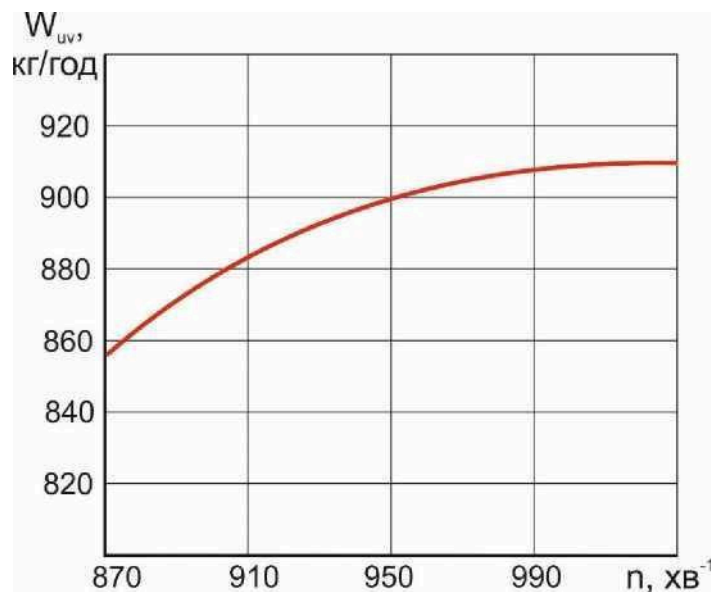


Рисунок 2.11 – Теоретична залежність продуктивності нового подрібнювача від частоти обертання його робочого органу

Встановлення математичної залежності продуктивності модернізованого подрібнювального агрегату від швидкості обертання його ріжучого вузла засвідчив, що найвищий показник продуктивності спостерігається в діапазоні 960÷1040 об/хв. За таких умов максимальна розрахункова продуктивність подрібнювача запропонованої конструкції становить приблизно 922 кг/год. водночас встановлено, що після досягнення частоти близько 990 об/хв подальше збільшення швидкості обертання майже не впливає на інтенсивність подрібнення. Це пояснюється тим, що наступний рівень елементів комбінованого типу поступово втрачає ефективність унаслідок збільшення кута їх установки після ударної взаємодії першого ярусу лез зі стебловою масою.

Перевищення оптимального кута спричиняє зміну робочої площини робочого елемента, а взаємодія з матеріалом відбувається площиною, утворюючи ефект удару, що зумовлює перехід від ковзного різання до ударного подрібнення. У таких умовах ефективність процесу суттєво зменшується, а енергетичні витрати зростають. Отже, частоти понад 1030 об/хв не забезпечують покращення продуктивності, тому їх використання є недоцільним, оскільки леза другого ярусу втрачають функціональність, а подрібнювальний механізм, не

витримуючи інтенсивності подачі, починає забиватися, що призводить до зниження загальної продуктивності установки.

### 2.3 Теоретичний аналіз енергоспоживання при подрібненні матеріалу

По інформації наведеній в дослідженнях, викладених у роботі професора Н. Є. Резніка «Кормозбиральні комбайни: теорія і розрахунок», встановлення необхідної потужності процесу подрібнення ножовим барабаном здійснюється за наступним рівнянням:

$$N_6 = q_y \cdot \frac{S_c \cdot K_{\text{НП}} \cdot n_6}{60}, \text{ Вт.} \quad (2.24)$$

де  $q_y$  – локалізований тиск, що створюється ріжучим елементом, Н/м;

$S_c$  – поверхня зрізу, сформована одним ріжучим елементом, м;

$n_6$  – частота обертального руху барабана, об/хв.

Схематичне представлення дії сил, прикладених до стеблової частинки наведена нижче.

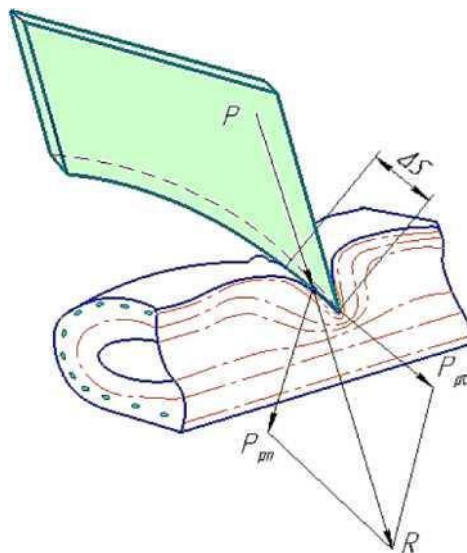


Рисунок 2.12 – До визначення питомого тиску ножа

Визначення питомий тиск тлумачиться як фізична величина, що виражає співвідношення між силою, яка діє перпендикулярно до поверхні леза  $P_{\text{пр}}$  до і площею його робочої ділянки, на яку ця сила спрямована  $\Delta S$ :

$$q_n = \frac{P_{pn}}{\Delta S}, \text{ Вт.} \quad (2.25)$$

За умови дії бокової сили  $P_{pn}$  та наявності ковзного переміщення ріжучого елемента потрібний тиск у нормальному напрямку зменшується. З урахуванням співвідношень (2.24) і (2.25) отримаємо:

$$N_6 = \frac{P_{pn} \cdot S_c \cdot K_{\text{НП}} \cdot n_6}{\Delta S \cdot 60}, \quad (2.26)$$

Після узгодження рівнянь (2.16) і (2.26) можна записати вираз у такій формі:

$$N_6 = \left( \frac{b}{2a} \left( x_a \sqrt{a^2 - x_A^2} + x_c \sqrt{a^2 - x_c^2} \right) + \frac{ab}{2} \left( \arcsin \frac{x_A}{a} + r \sin \frac{x_c}{a} \right) \right) \quad (2.27)$$

Беручи до уваги, що робочий процес взаємодії леза з матеріалом відбувається у дві послідовні стадії – попереднє ущільнення та безпосереднє зрізання:

$$P_{pn} = P_{pn1} + P_{pn2} + P_{pn3} + P_{pn4}, \text{ Н.} \quad (2.28)$$

де  $P_{pn1}$  – зусилля, яке спричиняє пружне деформування волокнистих елементів стебла, Н;

$P_{pn2}$  – зусилля, яке викликає пластичне деформування волокнистих структур стебла, Н;

$P_{pn3}$  – зусилля, яке зумовлює пружне деформування основної тканини стебла, Н;

$P_{pn4}$  – зусилля, яке спричиняє пластичне деформування сировини, Н.

Таким чином, зусилля, яке спричиняє руйнування волокнистих прожилок, дорівнює:

$$P'_{pn} = P_{pn1} + P_{pn2} \text{ Н.} \quad (2.29)$$

Зусилля, яке викликає руйнування основної тканини стебла:

$$P''_{pn} = P_{pn3} + P_{pn4} \text{ Н.} \quad (2.30)$$

Отже:

$$P_{pn} = P'_{pn} + P''_{pn} \text{ Н.} \quad (2.31)$$

При нормальному навантаженні стебла ріжучим елементом у місці взаємодії з матеріалом з'являються перпендикулярні зусилля. У поперечному

напрямку стебла вони розподіляються рівномірно як викладено в зазначених наукових працях, а їх величину визначають через співвідношення сили тиску до площі перерізу:

$$\sigma = \frac{P'_{pn}}{\Sigma S_{\Pi}} + \frac{P''_{pn}}{\Sigma S_0}, \text{ Па}, \quad (2.32)$$

де  $\Sigma S_{\Pi}$  – сумарна площа поперечного зрізу волокон,  $\text{м}^2$ ;

$\Sigma S_0$  – сумарна площа поперечного зрізу основної тканини стебла,  $\text{м}^2$ .

Тоді:

$$P_{pn} = \frac{\Delta h'_i \cdot E' \cdot \Sigma S_{\Pi}}{h'_i} + \frac{\Delta h''_i \cdot E'' \cdot \Sigma S_0}{h''_i}, \text{ Н}. \quad (2.33)$$

Враховуючи друге допущення, припускаємо, що повна деформація шару стеблового матеріалу, яка під час подрібнення спричиняє утворення розрізу, доцільно визначати на основі відомої теорії В. П. Горячкіна, використовуючи вираз для шляху зм'яття матеріалу:

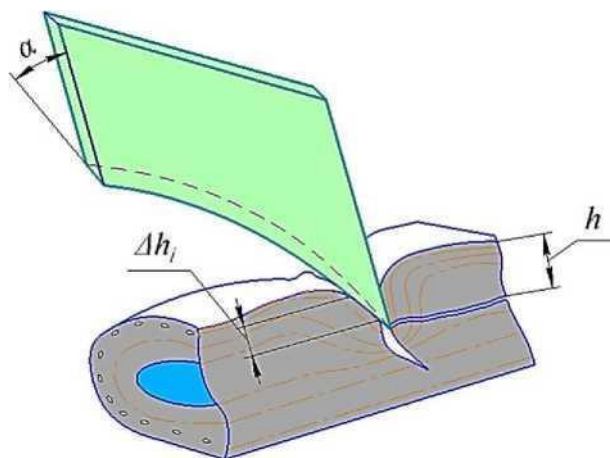


Рисунок 2.13 – Схема заглиблення клин в матеріал

$$\Delta h_i = h \frac{\cos \varphi_1 \cdot \sin^2 \left[ \frac{(90^\circ - \varphi_1)}{2} \right] \cos \left[ \frac{(\varphi_1 + \varphi_2 - \alpha)}{2} \right]}{\cos^3 \left( \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha}{2} \right)}, \text{ м}, \quad (2.34)$$

де  $h$  – товщина зрізаного шару матеріалу, м;

$\alpha$  – кут між ріжучою кромкою та напрямком руху леза, градус;

$\varphi_1$  – кут взаємодії матеріалу з боковими поверхнями різального інструмента,

градус;

$\varphi_2$  – кут опору зсуву матеріалу всередині його структури, градус.

Скомпонувавши результати (2.30) і (2.33) та беручи до уваги (2.34), дістанемо таку залежність:

$$N_6 = \frac{K_{\text{НП}} \cdot n_6}{\Delta S \cdot 60} \cdot \left( \frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{\text{П}}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_0}{h_i''} \right). \quad (2.35)$$

Формула (2.35) не бере до розгляду опір зсуву на бокових поверхнях  $F_1$  та  $F_2$ , а також контактне зчеплення  $F_3$  уздовж ріжучої кромки.

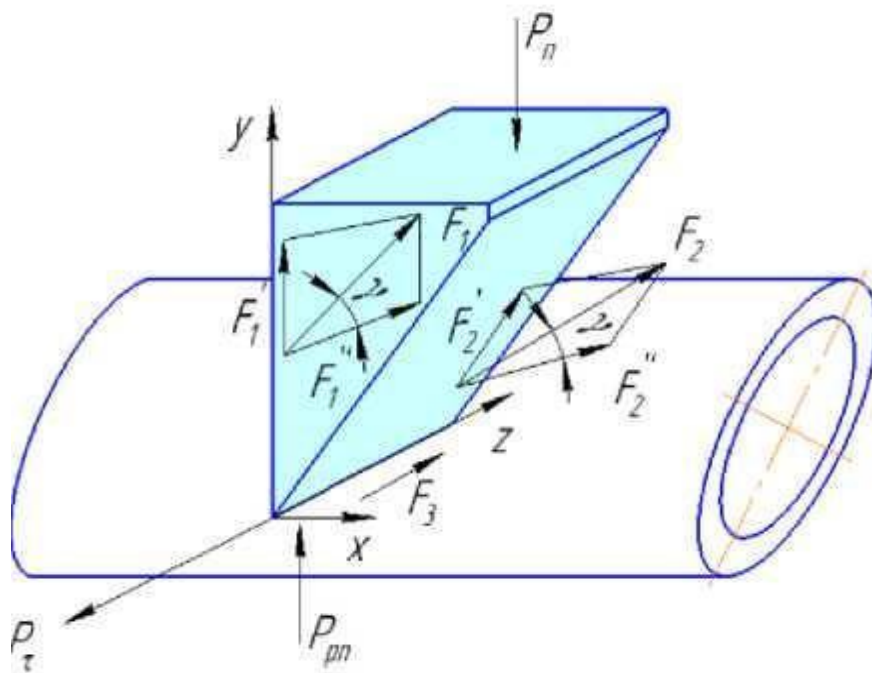


Рисунок 2.14 – Схема сил, що діють на лезо комбінованого ножа

$$N_6 = \frac{K_{\text{НП}} \cdot n_6}{\Delta S \cdot 60} \cdot \left( \frac{\Delta h_i' \cdot E' \cdot \Sigma S_{\text{П}}}{h_i'} + \frac{\Delta h_i'' \cdot E'' \cdot \Sigma S_0}{h_i''} + \sum_{i=1}^n F_i \right). \quad (2.36)$$

де  $F_1$  – значення сили опору руху в абсолютному вимірі, що виникає під час взаємодії матеріалу з тильною поверхнею ріжучого елемента, Н;

$F_2$  – значення сили опору руху в абсолютному вимірі, яке виникає під час взаємодії матеріалу з верхньою поверхнею ріжучого елемента, Н;

$F_3$  – абсолютна величина сили тертя об ріжучу крайку, Н.

На основі виразу (2.36) сформовано теоретичну залежність енергетичних витрат швидкості обертання ріжучого вузла подрібнювача.

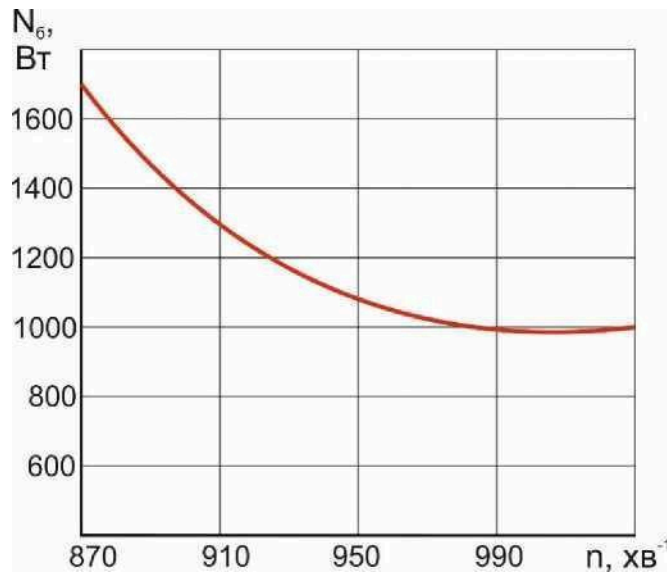


Рисунок 2.15 – Теоретична залежність витрат потужності на подрібнення стеблових кормів від частоти обертання його робочого органу

При аналізі отриманої графічної залежності впливає, що оптимальним діапазоном частот обертання ріжучого механізму є 950–1030 об/хв. У цьому робочому інтервалі крива енергоспоживання має мінімальне значення при швидкості обертання 990 об/хв, що відповідає нижньому екстремуму функції потужності.

Відхилення частоти в будь-який бік від цієї точки призводить до поступового збільшення витрат енергії. В результаті встановлено, що перебіг процесу подрібнення переходить від ковзного різання до переважання ударного (рубального) режиму. У такому випадку зменшується ефективна зона контакту леза з матеріалом і супротив через тертя. Наведені фактори знижують раціональність використання робочої частини ножа та енергетичну ефективність подрібнювача.

## Висновки до розділу 2

1. Проведені дослідження доводять, що підвищення ефективності

подрібнення жорстких стеблових кормових культур, зокрема кукурудзи, можливе завдяки застосуванню робочого органа, який поєднує імпульсна дія на матеріал з ковзним різанням. Такий ефект досягається шляхом застосування рухомо закріплені ріжучі елементи комбінованої конструкції, здатних забезпечити інтенсивніше руйнування матеріалу при одночасному зниженні енергетичних витрат процесу.

2. Розрахункові результати вказують, що найвища ефективність пристрою запропонованої конструкції становить 909–921 кг/год і досягається в межах частот обертання 950–1030 об/хв. Перевищення швидкості понад 990 об/хв є нераціональним, через те, що наступний ярус лез поступово втрачає ефективність унаслідок збільшення кута їх орієнтації після ударного впливу першого ярусу на стеблову масу. У зазначеному діапазоні швидкостей також забезпечується мінімальне енергоспоживання – 1,01–1,1 кВт.

3. За оптимальних режимів функціонування подрібнювального агрегату споживана потужність у холостому режимі становить 0,33 кВт. Беручи до уваги показник інерційного спротиву під час пуску необхідна потужність привідного електродвигуна дорівнює 1,6 кВт. При цьому енергетичні витрати, віднесені до одиниці подрібненої сировини є мінімальною й становить 1,1–1,2 кВт·год/т, а отже підтверджує підвищену енергетичну результативність функціонування модернізованого ріжучого вузла.

### **3 ПРАКТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИПРОБУВАННЯ**

#### **3.1 Методичне обґрунтування експериментальної частини дослідження**

Випробування були виконані для перевірки достовірності запропонованих у попередньому матеріалі теоретичних положень. З метою забезпечення системності досліджень була створена спеціальна програма, яка передбачала такі етапи:

1. Проведення налаштування, калібрування та перевірки точності контрольно-виміральної й реєструвальної апаратури.

2. У межах однофакторних експериментальних досліджень було проаналізовано вплив конструкційних та технологічних параметрів подрібнювача нового типу на результативність його функціонування, зокрема:

2.1 Оцінка продуктивності подрібнювального агрегату.

2.2 Аналіз енергетичних характеристик процесу подрібнення.

Як змінні фактори у другій частині досліджувалось:

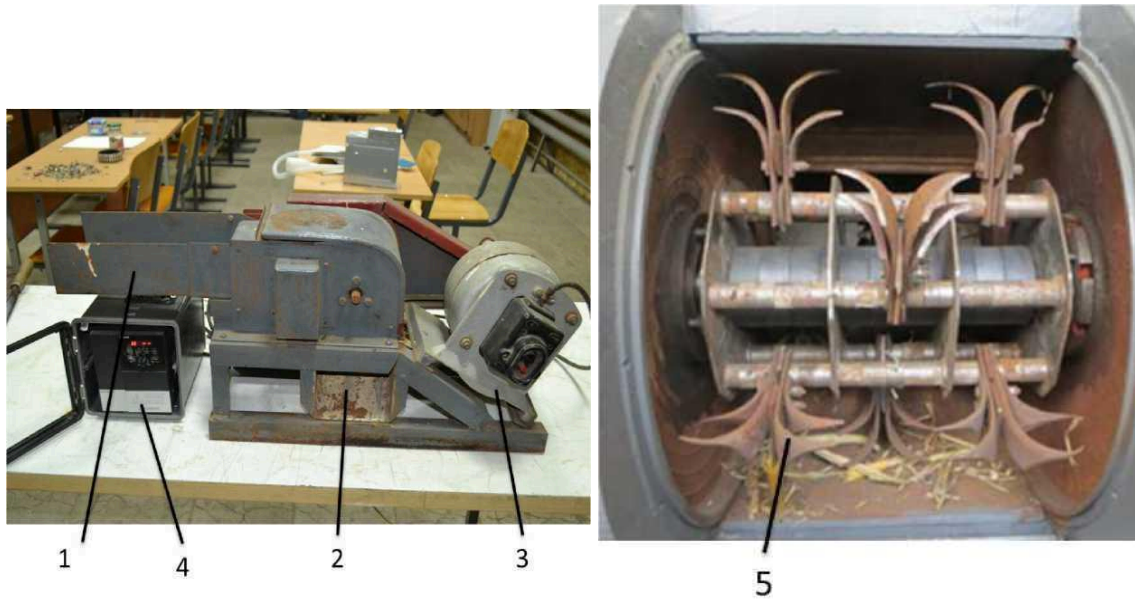
- швидкість обертального руху робочого органу;
- інтенсивність подачі кормового матеріалу в зону різання;
- число комбінованих лез із вільним кріпленням, установлених на поверхні робочого органу;
- ширина проміжку між серпоподібними ріжучими елементами.

3. Виконання графоаналітичної обробки одержаних експериментальних даних і формування обґрунтованих висновків.

Експериментальні випробування макетної моделі пристрою для подрібнення рослинних кормів проводилося на спеціально розробленому дослідному стенді..

#### **3.2 Експериментальна установка**

З метою здійснення експериментальних досліджень було спроектовано та виготовлено спеціальну установку, конструкція якої включає: живильний транспортер 1, розвантажувальний отвір 2, подрібнювальний барабан із комбінованими лезами 5, привід 3 та регулятор частоти Hyundai N700E-15SF (рис. 3.1).



а)

б)

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд експериментальної установки: 1 – живильний транспортер; 2 – розвантажувальна горловина; 3 – електродвигун приводу; 4 – частотний регулятор Hyundai N700E-015SF; 5 – комбіновані ножі:

а – розроблений барабан;

б – живильний транспортер;

Основний вузол установки являє собою барабан, обладнаний вільно закріпленими комбінованими ножами, які складаються з вертикальних клиноподібних та поперечних серпоподібних елементів (рис. 3.1,б). Така конструкція забезпечує одночасне подовжнє розщеплення матеріалу і його поперечне розрізання.

### 3.3 Аналіз і узагальнення експериментальних даних

#### 3.3.1 Підсумки однофакторних експериментів із визначення продуктивності подрібнювального агрегату

Метою експерименту було виявлення закономірностей зміни показників роботи ріжучого механізму залежно від частоти його обертання, кількості складених лез на роторі та величини подавання сировини у дробильний пристрій на його ефективність. Під час експериментів забезпечувалися різні рівні надходження маси корму – 0,15–0,30 кг/с з кроком 0,05 кг/с (що еквівалентно 540; 720; 900 і 1080 кг/год), тоді як швидкість обертання робочого вузла поступово змінювалася до значень 870–1030 об/хв з кроком 40 об/хв.

Дані, які відображають зміну продуктивності дробильного апарата залежно від швидкості обертання ротора та кількості комбінованих ріжучих елементів при різних рівнях подачі матеріалу, представлені на графіках 3.2–3.4.

Розгляд побудованих залежностей показав, що збільшення подавання понад 250 г/с є недоцільним, оскільки за даної швидкості надсилання сировини установка досягає максимальної ефективності, що становить 246 г/с і зробило недоцільним проведення випробувань при подачі 300 кг/с. Аналіз експериментальних результатів дав змогу визначити, що оптимальна зона частоти обертання ріжучого блока становить 910–1030 об/хв, у межах якої забезпечується найвищий показник ефективності подрібнення без перевантаження системи.

Висновками експериментальних спостережень встановлено, що за встановленого швидкісного режиму обертання ріжучого механізму дробильного агрегату демонструє максимальну продуктивність у межах 825–884 кг/год. За цього робочого стану роздроблений матеріал повністю видаляється струменем повітря крізь вихідний проріз. Підвищення швидкості обертання понад 1030 об/хв є нераціональним, при подачі 250 г/с з'являється дисонанс між

продуктивністю барабана та пропускною спроможністю решета, як наслідок нестача його пропускної здатності, що змушує збільшувати розмір його комірок. Однак це приводить до значного подовження січки, яка перестає відповідати зоотехнічним вимогам щодо фракційного складу.

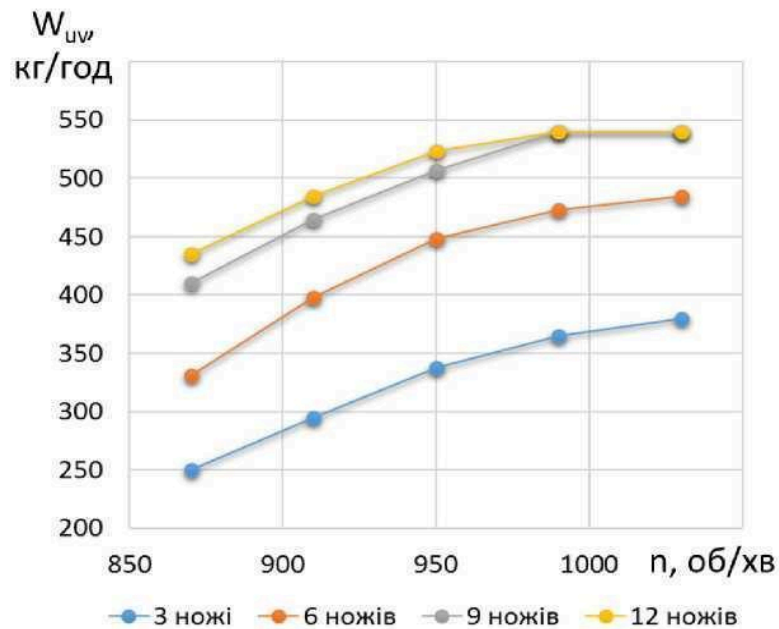


Рисунок 3.2 – Експериментальна залежність продуктивності подрібнювача від частоти обертання робочого органу і кількості комбінованих ножів при подачі стебел на подрібнення 0,15 кг/с (540 кг / год)

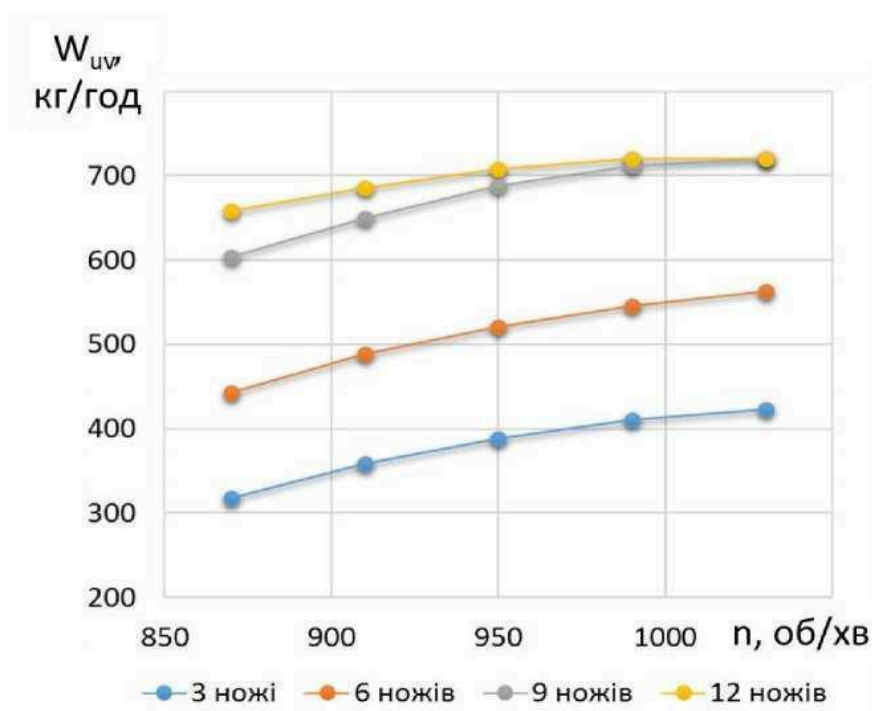


Рисунок 3.3 – Експериментальна залежність продуктивності подрібнювача

від частоти обертання робочого органу і кількості комбінованих ножів при подачі стебел на подрібнення 0,20 кг/с (720 кг/год)

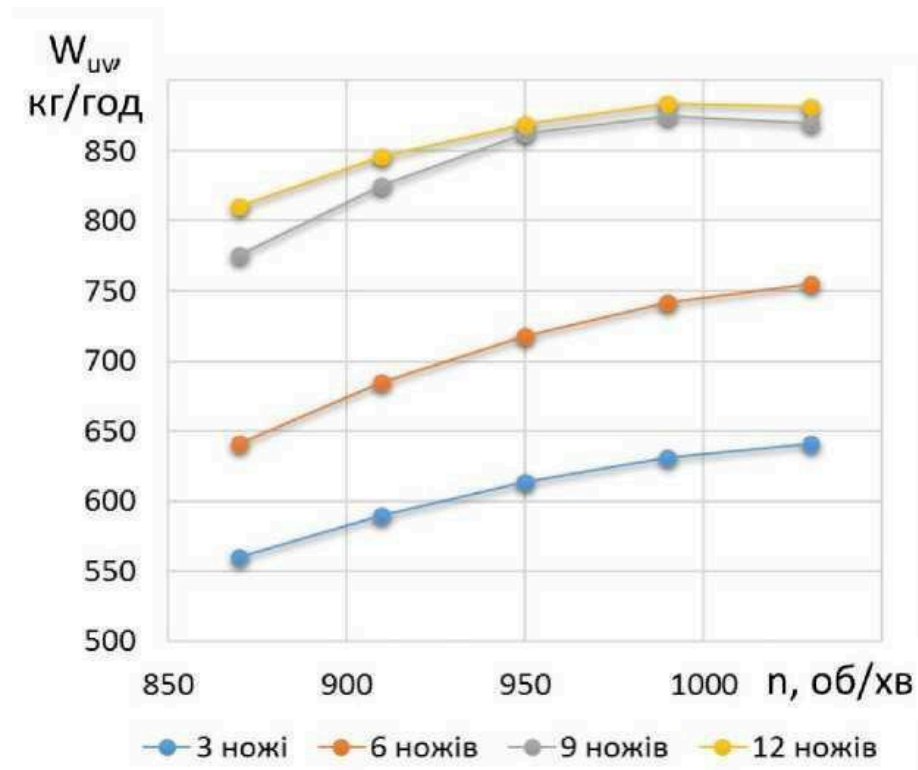


Рисунок 3.4 – Експериментальна залежність продуктивності подрібнювача від частоти обертання робочого органу і кількості комбінованих ножів при подачі стебел на подрібнення 0,25 кг/с (900 кг/год)

Аналіз графічних залежностей показує, що оптимальний діапазон частот обертання (950–1030 об/хв) забезпечує стабільну роботу подрібнювача при використанні дев'яти або дванадцяти шарнірно підвішених ножів. Кількість ножів доцільно визначати за критерієм мінімальних енергетичних витрат.

Разом з тим, при швидкості 1031 об/хв ударне навантаження робочих елементів настільки значне, що стебла відхиляються, і другий рівень ножів знижується продуктивність роботи механізму. Це спричиняє утворення надмірно довгої січки, яка не проходить крізь решето і повертається на повторне подрібнення, що, своєю чергою, знижує загальну продуктивність агрегату.

Довжина отриманої січки істотно залежить від зазору у зоні, розташованій між криволінійними лезами поперечного типу, який тісно пов'язаний із подачею матеріалу та швидкістю обертання барабана. Передбачається, що оптимальні

параметри зазору можуть бути встановлені шляхом оптимізації за методом планування багатofакторного експерименту.

Задля забезпечення сталого режиму подрібнення в зоні розвантаження змонтовано перфорований екран із квадратними отворами 40×40 мм.

### **3.3.2 Аналіз результатів досліджень енергетичних характеристик подрібнювального процесу за однофакторної методики**

Прогнозованим результатом стало визначення впливу швидкості обертання ріжучого блока, кількості багатofункційних ножів та інтенсивності подавання матеріалу до дробильної камери на енергоємність процесу.

У процесі експериментів забезпечували сталі умови подавання кормової суміші зі швидкістю 0,25 кг/с (що відповідає 900 кг/год). На роторний барабан послідовно монтували комплекти з 9 та 12 комбінованих лез, що дало змогу визначити вплив кількості різальних елементів на витрати енергії. Відстань між поперечними ножами підтримувалася на рівні 25 мм.

Робоча частота обертання роторного механізму варіювалася ступенево 870÷1030 об/хв з кроком 40 об/хв, що дало змогу визначити характер зміни потужності, необхідної для забезпечення стабільного процесу подрібнення у всьому досліджуваному діапазоні швидкостей.

Результати експериментальних вимірювань, що відображають залежність споживаної потужності за різних параметрів швидкості обертання та кількості ріжучих компонентів.

Детальний аналіз експериментальних даних, відображених на графіку рисунка 3.5, дало змогу встановити, що найраціональнішим є оснащення ріжучого вузла дев'ятьма комбінованими лезами. Подальше збільшення їх числа призводить до помітного зростання енергетичних витрат, що пояснюється низкою факторів:

- збільшенням маси барабана, що підвищує інерційне навантаження на привід;

- посиленням аеродинамічного опору створюваного рухом лез, що спричиняє додаткові втрати;
- зміною характеру взаємодії ножів із шаром матеріалу.

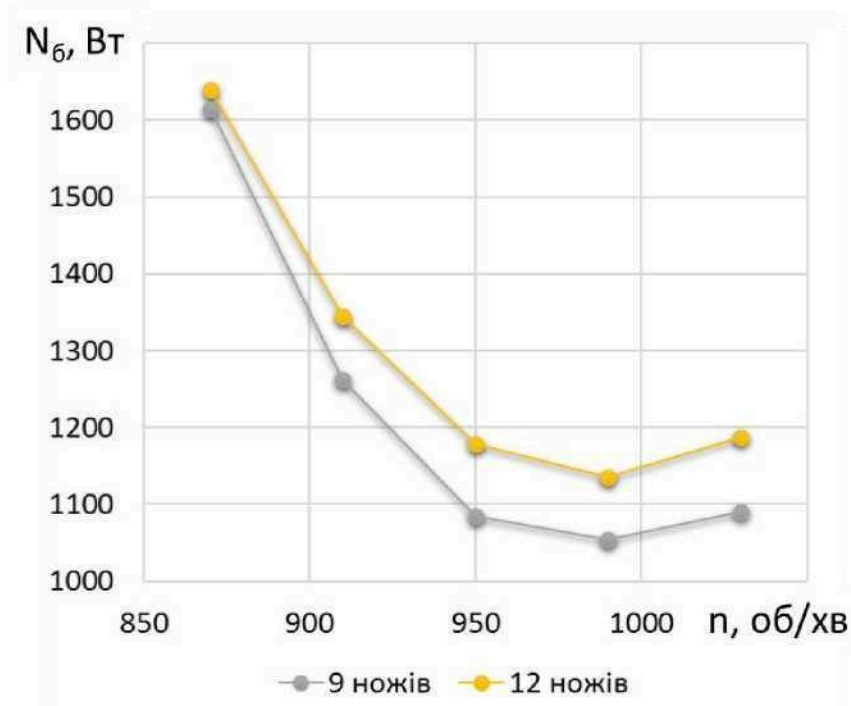


Рисунок 3.5 – Експериментальна залежність витрат потужності на подрібнення від частоти обертання робочого органу і кількості комбінованих ножів при подачі стебел на подрібнення 0,25 кг/с (900 кг/год)

У процесі функціонування установки, оснащеного дев'ятьма комбінованими лезами, крізь шар кормової маси послідовно проходять вісім серпоподібних різальних елементів, після чого діють ще чотири, створюючи періодичний силовий імпульс на матеріал. Така пульсуюча дія сприяє кращому руйнуванню стеблової структури. Коли ж кількість ножів збільшується до дванадцяти, взаємодія різальних крайок із масою стає безперервною, пульсація зникає, а опір подрібненню зростає, що негативно позначається на енергетичній результативності процесу.

Найменші показники споживаної потужності виявлено за швидкості обертання роторного вузла в межах 950–1030 об/хв, що свідчить про доцільність використання цього режиму. Водночас зазначений інтервал не охоплює раніше

визначену ефективну точку – 910 об/хв, характерну для досліджень продуктивності подрібнювального агрегату.

Найнижчі енергетичні витрати у межах інтервалу 950–1030 об/хв пояснюються тим, що при цих швидкостях забезпечується оптимальна сила удару комбінованого ножа по матеріалу, а також досягається збалансоване поєднання рубального й ковзного впливу. В таких умов відбувається одночасне розщеплення стебел уздовж волокон і перерізання їх у поперечній площині, що забезпечує максимальну ефективність подрібнення при мінімальних енерговитратах.

### **Висновки до розділу 3**

У результаті однофакторних дослідних перевірок було визначено оптимальні параметри функціонування модернізованого апарату:

- доцільна швидкість подавання кукурудзяної маси становить 0,25 кг/с;
- доцільний інтервал частот обертання роторного вузла – 950÷1030 об/хв;
- доцільна чисельність ріжачих елементів – дев'ять штук;
- ефективна продуктивність агрегату коливається в межах 825÷884 кг/год;
- середнє енергоспоживання знаходиться в діапазоні 1055–1090 Вт·год;
- питома енергоємність процесу за оптимальних умов дорівнює 1,193÷1,31 кВт·год/т.

Отримані значення визначено експериментальним підтверджують ефективність запропонованої конструкції та правильність обраних режимів експлуатації.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Загальні визначення та поняття

Комплекс заходів забезпечення безпеки праці являє собою сукупність правових, соціально-економічних, технічних, санітарно-гігієнічних, організаційних і профілактичних заходів, передбачених задля створення сприятливого середовища при виконанні робочих технологічних операцій.

Нормативними документами регламентується об'єкт підвищеної небезпеки. Ним може бути простір, на якому проводиться використання, виготовлення, транспортування, зберігання чи оброблення небезпечних речовин у кількостях, що дорівнюють або перевищують нормативні порогові значення. До цієї категорії також належать об'єкти, здатні створити загрозу виникнення надзвичайних подій техногенного або природного характеру.

Розроблений у межах дипломного проекту подрібнювач стеблових кормів не належить до об'єктів підвищеної небезпеки, оскільки під час його функціонування не застосовуються та не утворюються небезпечні речовини у критичних обсягах. Проте у процесі роботи агрегат взаємодіє з горючими рослинними матеріалами – сіном і соломою, які є компонентами кормових сумішей для тварин. Це створює потенційний ризик займання, що може стати причиною пожежі – неконтрольованого процесу горіння, який поширюється у просторі й часі, становить загрозу для людей, довкілля та матеріальних цінностей.

Враховуючи викладене резюмуємо, що дотримання вимог охорони праці стосується зокрема і для умов експлуатації устаткування, яке досліджується у даній роботі.

## **4.2 Дослідження факторів, що становлять загрозу для працівників у процесі виробництва**

Під час експлуатації подрібнювального обладнання на працівника можуть діяти різноманітні небезпечні та шкідливі фактори:

- рухомі та обертові вузли машини (робочий ротор, механізми приводу, транспортуючі системи);
- підвищений рівень звукового тиску;
- потужні повітряні потоки, що утворюються аспіраційної або пневмотранспортної системи;
- гострі краї, виступи та нерівності металевих поверхонь;
- недостатня інтенсивність освітлення робочої зони;
- надмірна концентрація вологи;
- слизьке або забруднене підлогове покриття;
- дія мікроорганізмів та можливий контакт із тваринами;
- наявність пилу, парів і летких хімічних речовин у повітрі;
- ризик ураження електричним струмом.

Для мінімізації можливих травм і професійних ризиків необхідно забезпечити справний технічний стан устаткування, ефективну роботу вентиляційних систем, достатнє освітлення робочих зон, а також застосовувати індивідуальні засоби захисту персоналу.

## **4.3 Система заходів, спрямованих на забезпечення безпеки оператора під час роботи з подрібнювачем**

Організаційно-технічні рішення:

- регулярне проведення навчання та інструктажів з питань безпеки праці. Початковий інструктаж здійснює фахівець, призначений відповідним наказом, який пройшов спеціальну підготовку та перевірку знань. Цей етап є

обов'язковим для всіх новоприйнятих працівників.

- після цього проводиться первинний інструктаж згідно з чинними внутрішніми положеннями вже на місці виконання робіт.

- до самостійного обслуговування установки допускаються працівники віком від 18 років, у яких відсутні обмеження щодо стану здоров'я і виконали такі вимоги:

- пройшли професійну підготовку, що включає модуль ОП;
- мають відповідну категорію для роботи з електроустаткуванням;
- мають позитивний висновок медогляду;
- пройшли регламентовані інструктажі та поставили свої підпису у відповідному журналі;
- склали іспити з питань ОП.

- повторні інструктажі проводяться не рідше одного разу на пів року.

Технічні заходи:

- драцівники мають бути забезпечені спецодягом, спецодягом та засобами захисту у суворій відповідності до встановлених галузевих норм безоплатної видачі.

- з метою недопущення електротравм у разі дефекту ізоляції проводів або короткого замикання корпус машини підключено до захисного заземлення, а також передбачено пристрій автоматичного відключення, який спрацьовує протягом 0,2 секунди.

- для зменшення концентрації пилу в повітрі використовується примусова витяжна система. При виконанні робіт в приміщенні за годину може накопичуватися близько 21 г звішених мілко дисперсних часток сіна, тому необхідно розрахувати необхідну продуктивність вентиляційного обладнання для його ефективного видалення.

Відповідно до державних норм насичення пиловими частками повітря в робочому просторі не повинно перевищувати десять відсотків.

У припливному повітрі при роботі системи аспірації частинки пилу відсутні, тобто ( $P_0 = 0$ ), а отже:

$$L = \frac{P}{P_1 - P_0} = \frac{20000}{4 - 0} = 5000 \text{ м}^3/\text{год.} \quad (4.1)$$

де  $P$  – питома концентрація пилю в робочому приміщенні, мг/год;

$P_1$  – гранично допустимий рівень запиленості повітря у робочому приміщенні, мг/м<sup>3</sup>;

$P_0$  – концентрація пилю в повітряних масах, що надходять ззовні, мг/м<sup>3</sup>.

Аналіз отриманих даних вказує на доцільність застосування вентиляційної установки ВО 06300, ефективність якої цілком задовольняє вимогам, та становить 5,2 тис. м<sup>3</sup>/год.

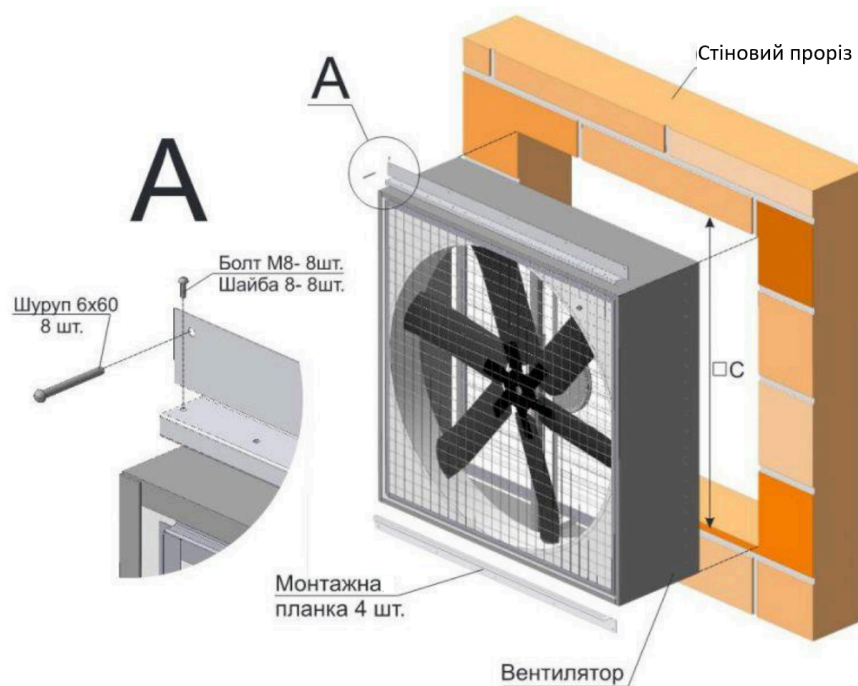


Рисунок 4.1 – Інструкція з монтажу вентилятора ВО 06-300

#### 4.4 Правила охорони праці під час експлуатації обладнання для подрібнення стеблових матеріалів

До початку виконання робіт:

- оператор повинен підготуватись до роботи, надягнувши спеціальний одяг і захисні пристосування згідно з установленими вимогами;
- увімкнути освітлення та вентиляцію;

- оглянути робочу зону, перевірити наявність і справність площадок, сходів, поручнів, а також вільність проходів і доступ до вимикачів;
- упевнитися у надійності кріплень, захисних кожухів, огорож, заземлення, приводів, шківів і муфт;
- перевірити, щоб на транспортерах і в бункерах не було сторонніх предметів;
- переконатися у наявності вогнегасників, аптечки та справності сигналізації;
- розкласти інструмент зручним для роботи чином;
- підготувати необхідну кількість кормової маси.

До увімкнення агрегату слід увімкнути транспортер у зворотному напрямку для видалення сторонніх предметів, після чого запустити подрібнювач у холостому режимі, перевірити відсутність шумів, вібрацій, перегріву підшипників і витоків мастила. Переконатися у правильному заточуванні та кріпленні ріжучих частин, та у відрегульованому зазорі між ними та протиризальною пластиною.

Забороняється при роботі механізму:

- просувати руки або предмети в зону подачі матеріалу;
- знаходитися перед вихідним отвором подрібнювача;
- торкатись рухомих частин під час обертання ротора;
- відкривати кришки, оглядати чи прочищати магнітні елементи;
- надсилати неочищений від металу матеріал;
- очищати або ремонтувати обладнання без повного зупинення машини й відключення електроживлення.

Очищення робочих елементів проводять лише після зупинки агрегату, використовуючи дерев'яні або пластикові інструменти. У разі ремонту на рубильник електроживлення вивішують відповідну табличку.

Вимоги при виконання регламентного сервісу:

- стояти праворуч від напрямку руху агрегату;
- працювати в шоломі;

- виключити перебування поблизу вихідного патрубка;
- при ущільненні або розрівнюванні подрібненої маси зупиняти подрібнювач або відводити дефлектор убік.

Після завершення роботи:

- вимкнути живлення всіх систем, перекрити подачу палива, пари та розчинів;
- перевірити відсутність залишкового тиску в системах;
- повністю видалити залишки маси з бункера;
- очистити робочі органи та приміщення від пилу й залишків кормів;
- прибрати інструмент і допоміжні пристрої;
- зняти спецодяг, здати його на зберігання й прийняти душ.

Таке дотримання правил гарантує безпечну експлуатацію подрібнювача та знижує ризик виробничого травматизму.

Оператор повинен дотримуватись таких вимог:

- виконувати розпорядження лише за дорученням безпосереднього керівника;
- знати методи безпечного виконання робіт і постійно вдосконалювати їх;
- дотримуватись установленої технології виробничого процесу та користуватись прийомами, що гарантують безпеку праці;
- застосовувати інструменти й обладнання тільки за прямим призначенням і повідомляти керівництво про будь-які їхні несправності;
- інформувати керівника при настанні нештатних ситуацій, що можуть загрожувати життю чи здоров'ю людей;
- мати відповідну теоретичну й практичну підготовку, вміти надавати домедичну допомогу потерпілим;
- у разі необхідності супроводжувати постраждалого до медичного закладу;
- дотримуватись правил та гігієнічних вимог;
- користуватись виданими ЗІЗ і негайно повідомляти про їхню відсутність або несправність.

Категорично забороняється:

– перебування працівників у виробничих приміщеннях під впливом заборонених речовин та інших психотропних препаратів;

– паління дозволяється виключно у спеціально відведених зонах, споряджених необхідним устаткуванням; наявність відкритого полум'я поза цими місцями не допускається.

Оператор установки зобов'язаний:

– взаємодіяти з адміністрацією підприємства для забезпечення належного стану ОП;

– негайно інформувати керівництво або відповідальних осіб про виявлені несправності обладнання, інструментів, захисних пристроїв чи транспортних засобів;

– повідомляти про хворобливий стан або самопочуття з метою запобігання аварійним ситуаціям і травмуванню.

#### **4.5 Дії працівників при виникненні аварій або пожежі**

НС, що найчастіше виникають у виробничому середовищі є займання, тому кожен працівник повинен чітко знати порядок дій у разі виникнення пожежі.

При виявленні вогню або ознак займання необхідно негайно:

- вимкнути устаткування і скористатись наявними засобами зв'язку для виклику пожежної служби за номером 101, залишивши свій номер телефону та всі необхідні дані;
- організувати евакуацію персоналу та майна;
- знеструмити обладнання;
- розпочати гасіння наявними засобами якщо це безпечно;
- у найкоротший термін повідомити керівника і колег;
- після сигналу тривоги залишити приміщення.

Особа, відповідальна за роботу підрозділу, дізнавшись про пожежу, повинна:

- викликати передбачену регламентом службу;
- сповістити підлеглих і персонал ферми;
- повідомити працівника, відповідального за пожежну безпеку;
- організувати допомогу у гасінні вогню;
- забезпечити контроль евакуаційних дій.

Особа, призначена відповідальною за пожежну безпеку, зобов'язана:

- повторно підтвердити виклик пожежної служби та повідомити власника підприємства (директора, засновника);
- у разі загрози життю негайно організувати порятунок людей усіма наявними засобами;
- відключити електроживлення та виконати дії, спрямовані на обмеження поширення вогню і диму;
- зупинити всі інші роботи, окрім тих, що спрямовані на ліквідацію займання;
- вивести сторонніх осіб за межі небезпечної зони;
- здійснювати загальне керівництво гасінням до прибуття пожежної частини;
- контролювати дотримання правил безпеки тими, хто бере участь у ліквідації;
- одночасно з гасінням організувати евакуацію тварин і матеріальних цінностей;
- забезпечити зустріч пожежних підрозділів, допомогти їм у виборі оптимального шляху під'їзду до осередку займання.

Відповідальний за пожежну безпеку повинен:

- надати керівнику гасіння інформацію про планування будівель, наявні пожежонебезпечні речовини, особливості конструкцій та комунікацій;
- сприяти взаємодії пожежних підрозділів з працівниками ферми, залучати необхідні ресурси для локалізації вогню та запобігання його поширенню.

Такий порядок дій дозволяє оперативно реагувати на пожежу, мінімізувати наслідки та зберегти життя людей, тварин і матеріальні ресурси.

## **Висновки до розділу 4**

На основі чинної нормативно-правової бази та вимог з питань охорони праці проведено оцінку безпеки експлуатації розробленого експериментального апарату з подрібнення кормів. У результаті обстеження визначено основні небезпечні та шкідливі чинники, що впливають на оператора, і розроблено комплекс профілактичних заходів, спрямованих на їх усунення або мінімізацію.

Розроблено та систематизовано правила безпечного виконання робіт, які включають організаційні, технічні та експлуатаційні вимоги до персоналу, а також порядок перевірки стану обладнання перед запуском і під час роботи.

Виявлено, що найімовірнішою надзвичайною ситуацією під час функціонування подрібнювача на фермі є пожежа, спричинена займистістю подрібнюваного матеріалу (соломи, сіна тощо). З цієї причини наведено чіткий алгоритм дій персоналу у разі виникнення загоряння: порядок оповіщення, евакуації, гасіння пожежі первинними засобами та взаємодії з підрозділами пожежної охорони.

Таким чином, проведене дослідження підтвердило відповідність запропонованої конструкції та умов її експлуатації вимогам безпеки праці за умови дотримання передбачених інструкцій і заходів.

## 5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

### 5.1 Початкові дані для моделювання

У розділі наведено оцінку очікуваної економічної ефективності впровадження розробленого подрібнювача стеблових кормів у виробничих умовах. Як базовий аналог для порівняння обрано серійний малогабаритний подрібнювач 9QZ-0,6, що випускається ТОВ «ТД»ДТЗ» і використовується як прототип при розробленні експериментальної моделі. Порівняльний аналіз економічних показників серійного та експериментального подрібнювачів здійснюється на прикладі малої сімейної ферми.

Відомості щодо складу кормових раціонів для тварин та річного обсягу виконання операцій із подрібнення стеблової маси в роботі не наводиться.

Систематизовані вихідні параметри, потрібні для виконання економічних обчислень наведено нижче.

**Таблиця 5.1 – Вихідні дані до розрахунку техніко економічних показників**

Показник	Варіанти	
	подрібнювач кормів 9Qz-0,6	експериментальний подрібнювач
Добовий об'єм робіт, кг	286,6	286,6
Річний об'єм робіт <sup>1</sup> , т	42,99	42,99
Продуктивність, кг/год.	600	800
Потужність приводу, кВт	2,2	2,0
Питома енергоємність, кВт год/т	3,7	2,6
Вага, кг	56,4	32,6

Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Вартість, грн.	3860	2740

Загальна тривалість виробничого циклу з подрібнення стеблових кормів упродовж літа близько 145 днів.

Головні техніко-економічні відмінності дослідного подрібнювача від стандартної моделі 9QZ-0,6 виражаються у таких показниках:

- зменшення енергоспоживання завдяки нижчій питомих витрат енергоресурсів, яке досягається раціональнішою взаємодією ножів зі стебловою масою.
- скорочення трудових витрат на обслуговування завдяки вдосконаленню конструкції робочих вузлів та зниженню матеріалоемності деталей.
- підвищення надійності електроприводу шляхом інтеграції електронної системи теплового захисту двигуна, що збільшує тривалість його експлуатації.
- зростання продуктивності внаслідок оптимізації кінематичних параметрів і конфігурації ножового барабана.

Оцінювання економічної ефективності використання експериментальної установки проводиться за такими узагальненими параметрами:

- експлуатаційні затрати, розраховані на одиницю виробленої продукції ( $EВ$ ) – характеризують щорічні витрати на експлуатацію одиниці обладнання;
- фінансові ресурси, спрямовані на придбання, реконструкцію чи оновлення обладнання ( $K$ ) – сума витрат на виготовлення або придбання машини;
- зведені витрати, скориговані до порівняльних умов і виражені в одиничному показнику ( $\Pi$ ) – інтегральний показник, який дозволяє комплексно оцінити економічну доцільність використання нової конструкції.

## 5.2 Експлуатаційні витрати в розрахунку на одиницю продукції

Експлуатаційні затрати, розраховані на одиницю виробленої продукції визначаються відповідно до формули:

$$EB = EB_3 + EB_a + EB_T + EB_e, \text{ грн./т.} \quad (5.1)$$

Де  $EB_3$  – питома заробітна плата, грн./т;

$EB_3$  – часткові відрахування вартості основних засобів, нормовані на одиницю продукції, грн./т;

$EB_T$  – витрати на утримання устаткування у справному стані у перерахунку на одиницю продукції, грн./т;

$EB_e$  – вартість енергоресурсів у перерахунку на одиницю продукції, грн./т.

Питома заробітна плата розраховується за формулою:

$$EB_3 = \frac{n \cdot D \cdot t \cdot f \cdot \delta}{P}, \text{ грн./т.} \quad (5.2)$$

де  $n$  – кількість робітників, що зайняті на обслуговуванні, люд.

$D$  – щорічна кількість робочих змін, діб ( $D = 150$  діб).

$t$  – період активної дії обладнання, год.;

$f$  – розмір погодинного заробітку працівника відповідно до встановленого тарифу, грн./год. Приймаємо ( $f = 22,41$  грн./год);

$\delta = 1,22$  – показник додаткових нарахувань до фонду оплати праці;

$P=42,99$  т – загальний обсяг виконаних робіт за календарний рік.

Час роботи протягом дня розраховується відповідно до добового виробничого навантаження:

$$t = \frac{G_{\text{доб}}}{Q}, \quad (5.3)$$

де  $G_{\text{доб}}$  – щоденний показник виробничого навантаження, кг;

$Q$  – кількість матеріалу, що переробляється установкою за одиницю часу, кг/год.

Серійний зразок:

$$t = \frac{286,6}{600} = 0,47 \text{ год.}$$

Дослідний зразок:

$$t = \frac{286,6}{800} = 0,36 \text{ год.}$$

Питомі показники:

Серійний зразок:

$$EB_{з.б} = \frac{1 \cdot 150 \cdot 0,47 \cdot 22,41 \cdot 1,22}{42,99} = 44,83 \text{ грн. /т;}$$

Дослідний зразок:

$$EB_{з.е} = \frac{1 \cdot 150 \cdot 0,36 \cdot 22,41 \cdot 1,22}{42,99} = 34,34 \text{ грн. /т;}$$

Амортизаційні відрахування, нормовані на одиницю продуктивності, обчислюються за виразом:

$$EB_a = \frac{C \cdot \alpha}{100 \cdot P}, \text{ грн. /т} \quad (5.4)$$

де  $C$  – залишкова ціна обладнання за даними бухгалтерського обліку, грн.

$\alpha$  – коефіцієнт, що визначає річну норму списання вартості подрібнювача, %.

( $\alpha = 10\%$  продовж 10 років).

Серійний:

$$EB_{a.б} = \frac{3860 \cdot 10}{100 \cdot 42,99} = 8,98 \text{ грн. /т}$$

Дослідний:

$$EB_{a.б} = \frac{2740 \cdot 10}{100 \cdot 42,99} = 6,37 \text{ грн. /т}$$

Розрахунок витрат на ремонт та обслуговування обладнання в перерахунку на одиницю продуктивності здійснюється за наступним виразом:

$$EB_{ТО} = \frac{C \cdot \beta}{100 \cdot P}, \text{ грн. /т} \quad (5.5)$$

де  $\beta$  – розрахунковий показник для визначення частини експлуатаційних витрат на ремонт і техобслуговування агрегату, %. ( $p = 12\%$ )

Серійний:

$$EB_{ТО.б} = \frac{3860 \cdot 12}{100 \cdot 42,99} = 10,77 \text{ грн. /т}$$

Дослідний:

$$EB_{ТО.е} = \frac{2740 \cdot 12}{100 \cdot 42,99} = 7,65 \text{ грн. /т}$$

Витрати на споживання енергоносіїв, приведені до одиниці продуктивності, визначаються за наступним співвідношенням:

$$EB_e = \frac{e \cdot t \cdot D \cdot c_e}{P}, \text{ грн. /т} \quad (5.6)$$

де  $e$  – показник енерговитрат на одиницю подрібненого матеріалу, кВт.

$c_e = 1,68$  грн/кВт·год – тариф на використання електроенергії.

Серійний:

$$EB_{e.б} = \frac{3,7 \cdot 0,47 \cdot 150 \cdot 1,68}{42,99} = 10,19 \text{ грн. /т;}$$

Дослідний:

$$EB_{e.б} = \frac{2,6 \cdot 0,36 \cdot 150 \cdot 1,68}{42,99} = 5,48 \text{ грн. /т;}$$

Загальні питомі експлуатаційні витрати (5.1) за варіантом складуть:

Базовий:

$$EB_б = 44,83 + 8,98 + 10,77 + 10,19 = 74,77 \text{ грн. /т;}$$

Експериментальний:

$$EB_п = 34,34 + 6,37 + 7,65 + 5,49 = 53,85 \text{ грн. /т}$$

Сума щорічного скорочення експлуатаційних витрат у разі використання створеного дослідного подрібнювального агрегату:

$$E_e = (EB_б - EB_п) \cdot P = (74,77 - 53,85) \cdot 42,99 = 1029,68 \text{ грн.} \quad (5.7)$$

### 5.3 Капітальні вкладення

Обсяг фінансових інвестицій у технічне оснащення за кожним із варіантів дорівнюватиме:

Серійний:

$$K_б = 3860,00 \text{ грн.} \quad (5.8)$$

Дослідний:

$$K_e = 2740,00 \text{ грн.} \quad (5.9)$$

Оскільки створений подрібнювач має повністю нову конструкцію, усі додаткові інвестиції на його впровадження дорівнюють його вартості. У такому разі термін повернення вкладених інвестицій у дослідний зразок, застосовуючи його в умовах малої сімейної ферми, становить час, необхідний для відшкодування вартості обладнання за рахунок отриманого щорічного економічного ефекту за рахунок зменшення витрат на енергоресурси, обслуговування та підвищення продуктивності, та складе:

$$T = \frac{K_e}{E_e} = \frac{2740,00}{1029,68} = 2,7 \text{ роки} \quad (5.10)$$

### 5.4 Зведені витрати в розрахунку на одиницю продукції

Показники узагальнених приведених витрат на одиницю результату обчислюють за наступним виразом

$$\Pi = \left( I + \frac{K}{\Pi} E \right), \text{ грн. /т} \quad (5.11)$$

де  $E = 0,15$  – коефіцієнт, що характеризує нормативну ефективність інвестованого капіталу.

Витрати, приведені до одиниці продуктивності для обох варіантів, розраховуємо за наступним співвідношенням:

Серійний:

$$\Pi_6 = \left( EB_6 + \frac{K_6}{\Pi} E \right) = \left( 74,77 + \frac{3860,0}{42,99} \cdot 0,15 \right) = 88,23, \text{ грн. /т}$$

Дослідний:

$$\Pi_{\Pi} = \left( EB_{\Pi} + \frac{K_{\Pi}}{\Pi} E \right) = \left( 53,85 + \frac{2740,0}{42,99} \cdot 0,15 \right) = 63,41 \text{ грн. /т}$$

Оцінимо щорічну економію від використання у виробництві розробленого варіанта конструкції

$$PE = (\Pi_6 - \Pi_{\Pi})P = (88,23 - 63,41) \cdot 42,99 = 1068,00 \text{ грн.}$$

Зведені дані, що характеризують економічну результативність, наведено в таблиці 5.2.

**Таблиця 5.2 – Показники економічної ефективності експериментального подрібнювача**

Показники	Варіанти	
	9Qz-0,6	експериментальний подрібнювач
1	2	3

Річний об'єм робіт, т	42,99	42,99
Добовий об'єм робіт, кг	286,6	286,6
Продуктивність, кг/год.	600	800
Потужність приводу, кВт	2,2	2,0
Питома енергоємність, кВт год/т	3,7	2,6
Вага, кг	56,4	32,6
Обслуговуючий персонал, люд.	1	1
Вартість, грн.	3860	2740
Питомі річні експлуатаційні витрати, грн./т	74,77	53,85
в т.ч.: витрати на електроенергію	10,19	5,49
витрати на ТО та ремонт	10,77	7,65
амортизаційні відрахування	8,98	6,37
заробітна платня	44,83	34,34
Додаткові капітальні вкладення, грн.	-	2740,00
Економія експлуатаційних витрат, грн.	-	1029,68
Строк окупності капітальних вкладень, років	-	2,7
Питомі приведені витрати, грн./т	88,23	63,41
Річний економічний ефект, грн.	-	1068,00

### Висновки до розділу 5

Результати порівняльного техніко-економічного дослідження свідчать, що запропонований подрібнювач має кращі показники експлуатаційної економічності, ніж модель 9QZ-0,6. Строк окупності модернізованого устаткування становить 2,7 року, а річна економія коштів досягає 1068,00 грн.

## ВИСНОВКИ

1. Ковзне різання вважається найбільш ефективним для оброблення твердих стеблових кормів, адже його реалізація у барабанних дробильних установках дозволяє скоротити енергоспоживання, уникнути складності конструкції ріжучого вузла та зменшити витрату матеріалу на виготовлення барабана.

2. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що найвища продуктивність експериментального подрібнювача (909–921 кг/год) досягається при частоті обертання ріжучого органу 950–1030 об/хв. Подальше збільшення частоти понад 990 об/хв є неефективним, через те, що другий ряд ножів позбавляється оптимального кута різання після дії першого. У цьому діапазоні швидкостей спостерігаються найнижчі енергетичні витрати –  $1,01 \div 1,1$  кВт.

3. Результати однофакторних експериментів дали можливість обґрунтувати ефективні робочі режими нового подрібнювача:

- найефективніша подача стебел кукурудзи – 0,25 кг/с;
- доцільна частота – 950–1030 об/хв;
- раціональна кількість комбінованих ножів – 9 шт.;
- продуктивність агрегату – 825–884 кг/год;
- потужність, споживана на подрібнення, –  $1055 \div 1090$  Вт·год;
- питома енергоємність процесу –  $1,193 \div 1,31$  кВт·год/т.

Усі наведені дані отримані в результаті експериментів зі стеблами кукурудзи.

4. Відповідно до чинних нормативів з охорони праці було проведено обстеження розробленого подрібнювача, визначено небезпечні та шкідливі чинники, що діють на оператора, та розроблено комплекс профілактичних заходів. Окрім цього, сформульовано правила безпечного виконання робіт. Найімовірнішою надзвичайною ситуацією на фермі є пожежа, тому наведено алгоритм дій персоналу у разі її виникнення.

5. Техніко-економічна оцінка експериментального зразка показала його переваги над базовою моделлю 9QZ-0,6 за показниками експлуатаційних витрат.

Строк окупності нового подрібнювача становить 2,7 року, а річний економічний ефект за проведеними розрахунками дорівнює 1067,00 грн.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Karthick, M. B. B., Susikaran, S., Parthiban, K. T., Vasanth, V. (2024). Mechanization in Moringiculture. *International Journal of Zoology and Applied Biosciences*, Vol. 9(3), pp. 46–50. DOI: <https://doi.org/10.55126/ijzab.2024.v09.i03.008>.
2. Mehta, C. R., Chandel, N. S., Jena, P. C. Jha, A. (2019). Indian agriculture counting on farm mechanization. *Agricultural Mechanization in Asia Africa and Latin America*, Vol. 50(1), pp. 84–89.
3. Padhiary, M. (2024). Status of farm automation, advances, trends, and scope in India. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, Vol. 13(7), pp. 737–745. DOI: <https://doi.org/10.21275/SR24713184513>.
4. Padhiary, M. (2024). The convergence of deep learning, IoT, sensors, and farm machinery in agriculture. *Designing Sustainable Internet of Things Solutions for Smart Industries*, pp. 109–142. DOI: <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-5498-8.ch005>.
5. Rafiq, R., Parihar, P., Ansari, M. M., Scholar, Ph. D. (2024). Constraints perceived by the farmers using farm mechanization under farm machinery banks (FMBs) in Jammu Division of Jammu and Kashmir. *Journal of Community Mobilization and Sustainable Development*, Vol. 2, pp. 432–436.
6. Rathinavel, S, Kavitha, R., Mohankumar, A. P., Suthakar, B., Surendrakumar, A. (2024). Mechanization challenges in selected distinct agricultural systems in India. *Journal of Experimental Agriculture International*, Vol. 46(9), pp. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i92811>.
7. Singh, Sh. P. (2024). Prospects of mechanization in animal husbandry. Conference: 36th National Convention of Agricultural Engineers At: IGKV Raipur.
8. Tufa, A., Arega, Ngoma, H., Marenya, P., Manda, J. (2023). Willingness to pay for agricultural mechanization services by smallholder farmers in Malawi. *Agribusiness*, Vol.1, pp. 1–29. DOI: <https://doi.org/10.1002/agr.21841>.
9. Verma, P., Kumar, H., Deo, M. M., Hashim, M. (2024). Farm

mechanization. *Current Trends and Advances in Agricultural Sciences*, pp. 248–263.

10. Nipa, J. F., Mondal, Md. H. T., Islam, Md. A. (2021). Design, development and performance evaluation of small-scale fodder chopping machine for farmers. *Research in Agricultural Engineering*, Vol. 67, No. 3, pp. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.17221/52/2020-RAE>.

11. Hashem, F. S., Ibrahim, M., Nasr, G. E. M. (2022). Modification of a machine for chopping rice straw using circular saw. *Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal*, Vol. 24, No. 4, pp. 230–243.

12. Li, W., Wen, B., Song, P., Shi, Ya., Zhang, J., Li, J., Liang, J., Li, T., Qu, B. (2021). Power consumption analysis and experimental study on the kneading and cutting process of licorice stem in horizontal total mixed ration mixer. *Processes*, Vol. 9(12), Article No. 2108. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9122108>.

13. Karim, M. A. Abd-El., Tawfik, M. A., Awny, A., Ahmed, T. H. (2025). Fabrication and evaluation the performance of a novel prototype combined machine for chopping and milling some agricultural residues. *Zagazig Journal of Agricultural Research*, Vol. 52(2). DOI: <https://doi.org/10.21608/zjar.2025.432984>.

14. Zhang, J., Xie, J., Du, Y., Huang, W., Yue, Y. (2025). Design and experimental evaluation of a rotary knife-type device for chopping film-mixed residues. *Agriculture*, Vol. 15(13):1370. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15131370>.

15. Bona, H., Abagissa, H., Wakeyo, T. (2025). Modification and performance evaluation of a multi-crop thresher for animal feed chopping purpose. *World Journal of Agricultural Science and Technology*, Vol. 3(3), pp. 77–82. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.wjast.20250303.14>.

16. Boratov, A. (2020). Cutting length, the fodders of green stalks by drum chopper. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, Vol. 883(1), Article No. 012160. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/883/1/012160>.

17. Mohamed, Ibrahim, M., Nasr, G. E. M., Hashim, F. (2021). Development of a machine for chopping wood residues. *Wood Research*, Vol. 66(6), pp. 1055–1063. DOI: <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/66.6.10551063>.

18. Liu, P., Song, Ch., He, J., Li, R., Cheng, M. (2025). Research and overview of crop straw chopping and returning technology and machine. *Machines*, Vol. 13(7), Article No. 564. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines13070564>.
19. Lin, H., He, J., Zhong, G., Yang, H. (2024). Design and testing of a low-speed, high-frequency straw chopping and returning machine using a constant breath cam mechanism. *Agriculture*, Vol. 14(12), Article No. 2293. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14122293>.
20. Liu, P., He, J., Yu, Ch., Shen, H. (2024). Distribution properties of airflow in the full envelope type maize stalk chopping chamber. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, Vol. 17(5), pp. 137–150. DOI: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20241705.8561>.

# ДОДАТКИ