

**ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра механічної та електричної інженерії**

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти  
*«магістр»*

на тему: «Оптимізація конструкції подрібнювальної шнекової машини»

КРМ.133ГМмд\_21.03.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
*«Машини і засоби механізації  
сільськогосподарського  
виробництва»*  
спеціальності *133 Галузеве  
машинобудування*  
ступеня вищої освіти *магістр*  
*групи 133ГМмд\_21*  
ЗІНЧЕНКО Сергій

Керівник: к.т.н., доцент  
ДУДНИК Володимир

Рецензент: к.т.н., доцент  
ЛАПЕНКО Тарас

## ВСТУП

В переробній промисловості важливе місце посідає м'ясна галузь. Для теперішніх м'ясопереробних підприємств і надалі лишається актуальним завдання подальшої оптимізації технологічних процесів та модернізації відповідного обладнання з метою зниження енергоємності, скорочення втрат сировини, підвищення продуктивності та покращення якості готової продукції.

Обладнання для подрібнення м'яса та м'ясних продуктів становить приблизно половину всього технічного парку м'ясної промисловості [1]. Вовчок є одним із ключових елементів технологічного оснащення підприємств м'ясопереробної галузі. Вони використовуються для дрібного та середнього подрібнення охолодженої яловичини, охолодженої яловичини, замороженої кускової яловичини, охолодженої жилуватої свинини, охолодженої свинини, замороженої кускової свинини, субпродуктів, вареного м'яса, м'яса птиці, риби, овочів.

Спад м'ясної промисловості та харчового машинобудування негативно впливає на економіку України [2]. Інвестування в імпортне обладнання та сировину забезпечує лише короткостроковий ефект – тимчасове насичення ринку продукцією та видиме покращення ситуації. Проте такий підхід не має довготривалої перспективи розвитку.

В даний час в літературі є досить великий матеріал, що відображає результати досліджень щодо оптимізації роботи м'ясоподрібнювальної шнекової машини. Більшість досліджень було направлено на вироблення рекомендацій щодо підвищення міцності, зносостійкості, експлуатаційної надійності деталей подрібнювального механізму, щодо зниження питомих витрат енергії на подрібнення м'ясної сировини. Але, до сих пір не була розкрита фізична сутність шляхів скорочення енерговитрат і підвищення якості фаршу при використанні змінного різання.

**Об'єкт розробки** – форма ріжучої кромки леза ножа вовчка, що використовується для подрібнення м'ясної сировини.

**Предмет розробки** – дослідження великого масиву статистичних матеріалів за основними даними показників для отримання рівняння, що буде описує взаємозв'язок між зусиллям різання, геометричними параметрами ножа і фізико-механічними властивостями матеріалу, що подрібнюється.

**Мета кваліфікаційної роботи магістра** – оптимізація конструкції подрібнювальної шнекової машини за допомогою профілювання форми ріжучої кромки леза ножа.

**Постановка актуальної технічної задачі** – вдосконалення технологічних процесів і відповідного обладнання під час переробки м'ясної сировини, що дозволить зниження енергоємності, втрат сировини, підвищення продуктивності, поліпшення якості продукції, що випускається.

**Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра** – полягає в практичному застосуванні отриманих результатів дослідження. Застосуванні ножів нової конструкції для вовчків, дозволить знизити експлуатаційні витрати за рахунок зменшення енергоспоживання і підвищення виходу і якості продукції.

**Практичні результати роботи** – отримано експериментальні залежності між швидкістю різання і зусиллям різання м'ясної сировини, визначено значення початкового кута ковзання при подрібненні м'ясної сировини.

**Рекомендації щодо використання результатів роботи** – отримано рівняння, що описує взаємозв'язок між зусиллям різання, геометричними параметрами ножа і фізико-механічними властивостями матеріалу, що подрібнюється, при квазістатичній деформації.

**Апробація.** Основні положення виконаної роботи доповідались і обговорювались:

- на VIII Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (Україна, Полтава, 04 грудня 2025 року);

- на XX Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції «Молодь і технічний прогрес в АПК» (Україна, Харків, 26-27 листопада 2025 року).

## 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 1.1 Огляд основних аспектів процесу подрібнення

Процес різання складається з [3]: роботи на об'ємні деформації матеріалу продукту, що подрібнюється і роботи на створення нових поверхонь.

Відповідно до теорії дроблення Кирпичова-Кіка [4], розвиненою надалі Стедлером [5], робота пружного деформування обсягу руйнування шматка пропорційна зміні обсягу або маси роздрібнюванню його. Цією гіпотезою не враховуються витрати енергії, пов'язаної з роботою, що витрачається на утворення нових поверхонь. Гіпотеза Ріттенгера [6], навпаки, відображає випадок, коли витрачена робота повністю витрачається на утворення нових поверхонь. Відповідно до цієї гіпотези робота дроблення пропорційна розміру новоствореної при подрібненні поверхні. Справедливість цього висновку підтверджується даними, представленими в роботах [7, 8]. Як можна бачити обидві ці гіпотези окремо не відображають повною мірою процеси, які відбуваються при подрібненні твердих тіл, тому як корисно витрачена на подрібнення продукту робота витрачається, як на об'ємну деформацію продукту, так і на утворення нових поверхонь [9]. Для випадку, коли необхідно отримати продукт із середнім ступенем подрібнення, [10] було запропоновано рівняння, згідно з яким робота дроблення шматка пропорційна середньгеометричному його обсягу і поверхні.

Незважаючи на безліч процесів, що протікають при різанні (стиснення, зрушення, зріз і т.д.), їх сумарна дія спрямована на здійснення процесу подрібнення, під яким розуміється поділ матеріалу на частини під дією зовнішніх механічних сил. Якщо цей процес зменшення розмірів вихідної сировини відбувається без додання певної форми готового продукту, то це дроблення, в іншому випадку – різання.

Різання – це технологічний процес обробки з метою поділу матеріалу на частини (порушенням цілісності), здійснюваний ріжучим інструментом, причому матеріалу надається задана форма, розмір і якість поверхні [11]. При різанні

відбувається відділення однієї частини матеріалу від іншої в результаті руйнування прикордонного шару. Руйнування в зоні контакту ріжучого інструменту з матеріалом передують пружна і пластична деформації, величина яких залежить від структури матеріалу, швидкості деформування, фізико-механічних властивостей і умов процесу. Руйнування відбувається по лінії найбільших напружень і настає тоді, коли напруження стає рівним тимчасовому опору (межі міцності) матеріалу. Робота різання витрачається на створення пружної і пластичної деформацій, а також на подолання сил тертя і інерційних сил опору. Специфічність поведінки матеріалів в процесі руйнування зумовлена великим числом класифікаційних ознак цього процесу. Однак запропонована вже в наш час класифікаційна схема найбільш повно відображає характерні особливості взаємодії інструменту і матеріалу, ефекти, зумовлені специфічними параметрами інструменту [12]. Відповідно до цієї схеми руйнування розглядається як різання пуансоном (перфорація, обрубка, розподіл, штампування), різцем (точіння, стругання, фрезерування, пиляння, свердління, довбання, шліфування, шабрування, лущення) і лезом (розрізання, нарізка, обрізка, зрізання) ( рис. 1.1).

### Рисунок 1.1

Для різних матеріалів в різній мірі застосовують, а в деяких випадках не можна застосовувати той чи інший вид різання. Таким чином, класифікація видів різання за технологічними ознаками передбачає ґрунтовне вивчення та облік фізико-механічних і, головним чином, реологічних властивостей матеріалів, дозволяє розглядати науку про різання, що складається з трьох відокремлених розділів: різання пуансоном, різання різцем, різання лезом. До кожного з цих розділів відноситься весь комплекс питань теорії та практики різання будь-яких

матеріалів, для яких можна застосувати даний вид різання. Наприклад, для процесу різання лезом всі основні закономірності, встановлені для одних матеріалів, повинні бути в силі для інших, звичайно, з урахуванням специфіки їх фізико-механічних властивостей [13]. Облік широкого діапазону властивостей різних матеріалів для даного виду різання полегшує визначення його універсальних закономірностей.

Важливою класифікаційною ознакою процесу різання є кут ковзання ножів. Основоположник теорії різання академік Горячкін В.Н. виділив два різновиди різання лезом: за допомогою нормального переміщення ріжучого інструменту і за допомогою переміщення його по двох взаємно перпендикулярним напрямкам (нормальному і дотичному), які в літературі відзначаються як статичне або нормальне різання (рубка) і ковзне різання (різання). При нормальному різанні ріжучий інструмент спочатку значно ущільнює матеріал, а потім руйнує його, при цьому утворюються нові поверхні зрізу. Спосіб придатний в тому випадку, коли до якості поверхні зрізу не пред'являють високого вимоги, тому що поверхня зрізу виходить рваною. При ковзному різанні ріжуча кромка інструменту створює місцеве ущільнення матеріалу, при цьому утворюється більш гладка поверхня зрізу.

Що ж стосується значення кута ковзання леза для роботи і, тим більше, питомої роботи різання, то на цей рахунок є різні точки зору. Дослідники [14] прийшов до висновку, що найменша питома робота має місце при рубаючій дії леза. За його даними, у міру збільшення кута ковзання питома робота зростає спочатку повільно, а після досягнення  $70^\circ$  все інтенсивніше.

Експериментальні дослідження [15] показали, що збільшення значення кута ковзання леза в певних межах вигідно в енергетичному відношенні. Робота і питома робота різання зі збільшенням кута до  $25^\circ$  падають, а при подальшому збільшенні цього кута – зростають.

За даними дослідників найменшу величину питома робота для різних матеріалів має в межах значення кута ковзання леза  $\beta=30\div 50^\circ$ , після чого відбувається поступово прискорюється збільшення питомої роботи [16].

За даними [17], при різанні м'яса, значне скорочення енерговитрат спостерігається при куті ковзання леза  $\beta=45\div 60^\circ$ .

## 1.2 Основні конструктивні особливості вовчка

Вовчок влаштований таким чином (рис. 1.2). Усередині корпусу вовчка 1 розташована робоча камера, що представляє собою порожнистий циліндр, внутрішня поверхня якого має прямі або гвинтові ребра 3, що перешкоджають прокручуванню м'яса при транспортуванні його обертовим шнеком 2 від завантажувальної горловини до ріжучого вузла, що сприяє підвищенню швидкості поступального руху продукції уздовж осі черв'яка.

Рисунок 1.2

Напрямок гвинтових ребер протилежно напрямку витків шнека. Циліндр вовчка, призначеного для подрібнення продукції, виготовляють з чавуну з подальшим гарячим лудінням. Ребра повинні рельєфно виступати над поверхнею циліндра головним чином при подачі кускової продукції без опору з боку виходу. В цьому випадку відставання шматків від теоретично можливої швидкості складає 10-15%, а за рахунок наявності канавок між ребрами збільшується загальний перетин для надходження маси і значно підвищується продуктивність

вовчка при розрахунку його по перетину черв'яка. Відставання при наявності з боку виходу подрібненої середньо кускової продукції опору в залежності від його величини становить 40-50%, при наявності опору 80-90%. Як видно в останньому випадку, коли продуктивність дорівнює 20-10% від теоретично можливої, ребра циліндра не впливають на неї, а канавки між ребрами сприяють збільшенню потужності зворотного потоку маси.

Знос ребер циліндра і зовнішньої кромки черв'яка призводить до зменшення продуктивності вовчка. Останнє пов'язано зі збільшенням щілини, через яку під тиском з робочої частини витісняється зворотна частина сировини і особливо «текуча фракція». Для нормальних умов подрібнення величина щілини, що залежить від діаметра черв'яка, не повинна перевищувати 1 мм. Проведеними дослідженнями, встановлено, що при подрібненні свинини найбільш ефективні спіральні ребра. Обертаючись шнек вовчка виконує дві функції: як уже зазначалося, транспортування м'ясної сировини всередині робочої камери і ущільнення продукту перед ріжучим вузлом для створення тиску продукту достатнього для проштовхування його через елементи різального вузла в процесі подрібнення, але без віджиму рідкої фази (соку), що міститься в продукті.

У зв'язку з цими обставинами шнек має змінний крок, що поступово зменшується від зони завантаження сировини до зони подрібнення. Ріжучий вузол вовчка складається з нерухомої підрізної решітки 4, ножів, що обертаються 5 і нерухомих ножових решіток 6 і 7 з отворами різних діаметрів. Нерухомі підрізні грати 4 являють собою зовнішнє і внутрішнє кільця, з'єднані трьома перемичками, заточеними з одного боку. Ріжуча кромка перемичок розташована під гострим кутом до радіусу. Оберткові ножі мають лопаті з двома ріжучими площинами (двосторонні ножі). Ріжучі кромки лопатей можуть бути виконані: прямолінійними; криволінійними частково в формі архімедової спіралі і частково логарифмічної спіралі; утворені відрізками дуг кіл, центри яких лежать на поруч розташованому пері на відстані, рівній половині радіусу кола торцевих граней, причому кут різання кожного леза становить 35-50°, утворює передню поверхню леза.

Нерухомі ножові решітки виконані у вигляді дисків з круглими отворами і є парними ріжучими деталями з обертовими ножами (рис. 1.2). Для підвищення ефективності роботи в ножовій решітці до подрібнювача м'ясо-кісткової сировини, з круглими отворами перфорації, розташованими рядами по концентричних колах робоча поверхня диска умовно розділена на концентричні кільця, радіуси яких визначаються за формулою [18]:

$$R_n = (1,272)^n R_o, n = 1,2,3,4. \quad (1.1)$$

де  $n$  - порядковий номер умовного кільця;

$R_o$  - радіус центрального посадкового отвору;

$R_n$  - зовнішній радіус умовного кільця.

Круглі отвори перфорації розташовані на центральних радіусах умовних кілець і їх кількість в кожному ряду визначається за формулою:

$$Z_{n+1} = [(1,618) Z_n]; n = 1,2,3,4. \quad (1.2)$$

де  $Z_n$  - кількість отворів на попередньому радіусі.

Квадратні дужки позначають цілу частину числа, кількість круглих отворів перфорації на  $n$ -му умовному кільці, при цьому зовнішній радіус диска решітки дорівнює зовнішньому радіусу останнього, вважаючи від осі диска, умовного кільця. Кількість круглих отворів перфорації в першому, рахуючи від осі диска, умовному кільці дорівнює одному з чисел Фібоначчі, починаючи з числа 5 або 8 або 13, або 21, або 34, і т.д. Круглі отвори перфорації в суміжних умовних кільцях розташовані в шаховому порядку.

З метою зменшення сили тертя подрібненого продукту об поверхню отворів, отвори виконуються концентричними рядами з кутом нахилу до площини решітки в сторону, протилежну напрямку обертання ножа, вісь кожного отвору одночасно нахилена під кутом  $\alpha$  до прямої в площині решітки, спрямованої в бік, протилежний обертанню ножа і під кутом  $\beta$  до прямої, спрямованої в бік осі решітки, при цьому кут  $\alpha$  обраний рівним:

$$\alpha = 90^\circ - \varphi. \quad (1.3)$$

де  $\varphi$  - кут внутрішнього тертя матеріалу, що подрібненого продукту м'ясорубкою, град, а кут  $\beta$  визначений із співвідношення:

$$\beta = \operatorname{arccctg}\left(\frac{(\pi f d + t)}{(\pi d - t)}\right). \quad (1.4)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя матеріалу подрібненого продукту по останньому витoku шнека;

$d$  - середній діаметр останнього витка шнека, мм;

$t$  - крок останнього витка шнека, мм.

### 1.3 Аналіз конструктивних особливостей різальної кромки леза ножа

Аналіз параметрів ріжучої пари апарату в площині різання вказує на велике значення форми лінії леза ножа для роботи апарату. Форма лінії леза повинна забезпечувати найменшу витрату енергії на різання матеріалу, мінімальну нерівномірність навантаження на вал диска і защемлення матеріалу ріжучими крайками пари по всій робочій довжині леза [19].

Для апарату з прямолінійними ножами рівняння лінії леза може бути представлено в наступному вигляді (рис. 1.3):

$$r \sin\beta = \operatorname{const}. \quad (1.5)$$

Кут ковзання зі зростанням радіуса убуває.

Рисунок 1.3

Для апарату з ножами, окресленими за формою гіперболічної спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.4):

$$r\varphi = \operatorname{const}. \quad (1.6)$$

## Рисунок 1.4

Для апарату з ножами, окресленими за формою логарифмічною спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.5):

$$r = r_o + e^{\varphi \operatorname{ctg} \beta}. \quad (1.7)$$

Кут ковзання залишається постійним [19].

## Рисунок 1.5

Для апарату з ножами, окресленими за формою архімедової спіралі, рівняння лінії леза буде (рис. 1.6):

$$r = r_o + A\varphi. \quad (1.8)$$

Кут ковзання збільшується зі збільшенням радіуса.

Німецька фірма Mado випускає вовчки з ножами, ріжуча кромка яких описує ексцентричну окружність (рис. 1.7). Кут ковзання такої кривої, як показано на рис. 5, змінюється від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Таким чином, значна частина ріжучої

кромки має кут ковзання близький до нуля [20].

Рисунок 1.6

Рисунок 1.7

#### Висновки і постановка завдань досліджень

1. Різні фірми виробники подрібнено-ріжучого обладнання використовують ту чи іншу форму ріжучої кромки для подрібнення однакової по фізико-механічними властивостями сировини. Різноманіття конструктивного виконання свідчить про відсутність єдиного і загальновизнаного підходу до вирішення такої наукової задачі як оптимізація форми ріжучої кромки.

2. Деякі дослідники пропонують виконувати ріжучу кромку у вигляді логарифмічної спіралі, з однаковим кутом ковзання в кожній точці різальної крайки. Однак такий підхід не цілком правомірний на увазі того, що швидкість різання збільшується зі збільшенням радіуса точок ріжучої кромки і відповідно змінюються характеристики міцності матеріалу, що подрібнюється. Кут ковзання повинен змінюватися.

3. За те, що існуюча теорія вимагає суттєвої корекції, говорить і той факт, що експериментальні дані по визначенню зусиль різання значно розходяться з розрахунковими. Коректне визначення зусиль різання дозволяє розрахувати оптимальний кут ковзання для кожної точки ріжучої кромки і тим самим визначить форму. Мінімізація зусилля різання не тільки скоротить енергоємність обладнання, а й збільшить термін служби ножа. Скорочення попередньої деформації скоротить руйнування клітинної структури харчового матеріалу.

Виходячи з цього, були сформульовані основна мета і завдання дослідження.

Мета дослідження – вдосконалення подрібнення м'ясної сировини через оптимізацію форми ріжучої кромки ножа.

Завдання дослідження:

1. Оптимізація форми ріжучої кромки леза ножа вовчка за критерієм сталості розподілу питомої об'ємної потужності уздовж довжини леза.

2. Формування моделі процесу силової взаємодії з матеріалом при квазістатичному режимі.

3. Розробка математичної моделі процесу різання, що визначає три характерних режиму: квазістатичний, ударний, хвильовий.

4. Отримання дослідних енергетичних характеристик процесу різання, у залежності від типу сировини і швидкості різання.

5. Визначення енергетичних характеристик подрібнення м'ясної продукту у вовчках.

6. Оптимізація кута ковзання зо критерієм мінімального зусилля при різанні.

## 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

### 2.1 Розподіл енергетичних затрат між тертям і подрібненням у вовчках

В роботі [21] отримані рівняння, які відображають механізм процесів подрібнення і придатні для характеристики розподілу енергії між ними.

Так, потужність, необхідна для подрібнення продукту виражається наступним чином:

$$P_1 = A_1 \cdot n = \int_{r_{1\min}}^{r_{1\max}} q_b \cdot z_n \cdot z_b \cdot \rho d\rho = 0,5q_b \cdot z_n \cdot z_b (r_{1\max}^2 - r_{1\min}^2)n. \quad (2.1)$$

де  $A_1$  - кількість подрібненого продукту за оборот шнека, Н·м;

$n$  - частота обертання шнека, с<sup>-1</sup>;

$q_b$  - питомий опір продукту до різання, Н/м;

$z_n$  - число лез підрізного ножа;

$z_b$  - число лез обертового ножа;

$r_{1\max}$  і  $r_{1\min}$  - відповідно максимальна і мінімальна відстань лез підрізного ножа від осі обертання шнека, м;

$\rho$  - поточна відстань лез підрізного ножа від осі обертання шнека, м.

Потужність, необхідна для подрібнення продукту лезами обертового ножа і крайками отворів решітки, також визначаються через роботу подрібнення продукту за один оберт валу шнека  $A_2$ :

$$P_2 = A_2 \cdot n = q_b \cdot \pi \cdot r_0^2 \cdot z_0 \cdot z_b \cdot \psi \cdot k_1 \cdot n. \quad (2.2)$$

де  $r_0$  - радіус отворів в решітці, м;

$z_0$  - число отворів в решітці;

$\psi$  - коефіцієнт використання площі отворів решітки;

$k_1$  - коефіцієнт, що враховує зміну висоти шару м'яса, впровадженого в отвори решітки, безпосередньо перед відсіканням його лезами обертового ножа.

Потужність, що витрачається на тертя в деталях подрібнювального механізму м'ясорубки, характеризується рівнянням:

$$P_3 = \pi \cdot n \cdot k_2 \cdot z_b \cdot f_1 \cdot p_1 \cdot a_2 (r_{2\max}^2 - r_{2\min}^2). \quad (2.3)$$

де  $k_2$  - число площини контакту ножів і решіток;

$f_1$  - коефіцієнт тертя ножів по решітці;

$p_1$  - питомий тиск в поверхні контакту ножів і ґрат м'ясорубки, Па;

$a_2$  - ширина задньої грані леза ножа, м;

$r_{2\max}$  і  $r_{2\min}$  - відповідно максимальна і мінімальна відстань лез обертового ножа від осі обертання шнека, м.

Для отримання рівнянь тертя продукту по робочих органах м'ясорубки за основу було взято рівняння, що характеризує тиск, необхідний для закінчення фаршу через отвір [21]:

$$p_2 = p_3 + p_4 = 790B^{0.4} \cdot d_0^{-0.86} \cdot W^{0.56} + 2600 \frac{l}{d_0} \cdot \eta_{ef} \cdot W. \quad (2.4)$$

де  $p_3$  і  $p_4$  - втрати тиску відповідно в місцевому опорі (при вході продукту в отвір) і по довжині отвору, Па;

$B$  - ефективна в'язкість при одиничній швидкості, тобто при швидкості  $W=1$  м/с, Па·с;

$d_0$  - діаметр отвору, м;

$W$  - швидкість екструдювання продукту через отвір, м/с;

$l$  - довжина отвору, м;

$\eta$  - коефіцієнт, що залежить від ефективної в'язкості фаршу.

Таким чином, використовуючи це рівняння, потужність, необхідна для подолання тертя продукту об торець шнека, дорівнює:

$$p_4 = M_4 \cdot \omega = \frac{4}{3} \pi^2 \cdot n [790B^{0.4} (d_{01}^{-0.86} \cdot W_1^{0.56} + d_{02}^{-0.86} \cdot W_2^{0.56}) + 2600Bl(d_{01}^{-1} \cdot W_1^{0.18} + d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0.18})] (r_3^3 - r_{en}^3) \operatorname{tg}(\beta + \rho). \quad (2.5)$$

де  $M_4$  - момент тертя продукту об шнек, Н·м;

$\omega$  - кутова швидкість обертання шнека, с<sup>-1</sup>;

$d_{01}$  і  $d_{02}$  - відповідно діаметри отворів в першій і другій ґратах м'ясорубки, м;

$r_{en}$  і  $r_n$  - відповідно зовнішній і внутрішній радіуси гвинтової нарізки останнього витка шнека;

$\beta_n$  - кут підйому гвинтової лінії останнього витка шнека;

$\rho$  - кут тертя продукту.

Потужність, що витрачається на екструдювання продукту, дорівнює:

$$P_5 = M_5 \cdot \omega = 3466,7\pi^2 B \cdot l \cdot n(r_3^3 - r_{\text{вн}}^3) \operatorname{tg}(\beta_n + \rho) \times \\ \times (d_{01}^{-1} \cdot W_1^{0,18} + d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18}). \quad (2.6)$$

де  $M_5$  - момент, який необхідно прикласти для безперервного витікання фаршу через отвори решіток м'ясорубки, Н·м.

Потужність, що витрачається на прокручування продукту обертовими ножами, виражається рівнянням [21]:

- при прокручуванні продукту ножом, розташованим між підрізним ножом і ґратами:

$$P'_6 = \frac{4}{3} \pi^2 n [790B^{0,4} (d_{01}^{-0,86} \cdot W_1^{0,56} + d_{02}^{-0,86} \cdot W_2^{0,56}) + 2600Bl (d_{01}^{-1} \cdot W_1^{0,18} + \\ + d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18})] \cdot \left\{ \frac{1}{\pi} (r_{2\min} - r_{2\max}) [\pi (r_{2\max} + r_{2\min}) - 4a_3] + \right. \\ \left. + r_{2\min}^2 \right\}^{1,5} - r_{2\min}^{30} \rangle f_3. \quad (2.7)$$

- при прокручуванні продукту, що знаходиться між двох решіток:

$$P''_6 = \frac{8}{3} \pi^2 n (790B^{0,4} \cdot d_{02}^{-0,86} \cdot W_2^{0,56} + 2600Bl d_{02}^{-1} \cdot W_2^{0,18}) \times \\ \times \left\{ \frac{1}{\pi} (r_{2\max} - r_{2\min}) [\pi (r_{2\max} + r_{2\min}) - 4a_3] + r_{2\min}^2 \right\}^{1,5} - r_{2\min}^{30} \rangle f_3. \quad (2.8)$$

де  $a_3$  - середня ширина лопаті обертового ножа, м;

$f_3$  - коефіцієнт тертя продукту по ґратах.

## 2.2 Визначення потужності, що витрачається на подрібнення продукту лезом ножа

Розрахуємо потужність, затрачену на подрібнення лезом ножа за такою формулою [22]:

$$N_{\text{под}} = N_0 - N_{a1} - N_{a2} - N_x - N_c, \quad (2.9)$$

де  $N_0$  - потужність, яка витрачається на подрібнення продукту і тертя продукту об робочі органи МІШМ;

$N_{a1}$  - потужність, яка витрачається на тертя об торець шнека;

$N_{a2}$  - потужність, яка витрачається на транспортування продукту шнеком;

$N_x$  - потужність, яка витрачається на перевертання продукту ножом;

$N_c$  - потужність, яка витрачається на екструдювання продукту через отвори решітки.

Потужність, яка витрачається на тертя об торець шнека:

$$N_{a1} = M_{a1}\omega, \quad (2.10)$$

де  $M_{a1}$  - момент тертя продукту об шнек, Н·м;

$\omega$  - кутова швидкість обертання шнека,  $c^{-1}$ .

$$M_{a1} = F r = 56,4 \cdot 0,0242 = 1,37 \text{ Нм.}$$

де  $F$  - окружна сила на шнеку, Н;

$r$  - плече прикладання сили  $F$ , м.

$$r = \frac{2}{3} \cdot \frac{r_3^3 - r_{BH}^3}{r_3^2 - r_{BH}^2} = 0,0242 \text{ м.}$$

де  $r_3$  - зовнішній радіус гвинтової нарізки останнього витка шнека;

$r_{BH}$  - внутрішній радіус гвинтової нарізки останнього витка шнека.

$$F = Q_2 \cdot \text{tg}(\beta_n + \rho) = 240,4 \cdot \text{tg}(10 + 21,8) = 56,4 \text{ Н.}$$

де  $\beta_n$  - кут підйому останнього витка шнека, град;

$\rho_n$  - кут тертя продукту, град.

$$Q_2 = p_2 \cdot (r_3^2 - r_{BH}^2) = 91 \text{ Н,}$$

де  $p_2$  - тиск продукту на шнек, Па.

$$p_2 = 790 \cdot V^{-0,4} \cdot d^{-0,86} \cdot w^{0,56} + 2600 \cdot V \cdot l \cdot d^{-1} \cdot w^{0,18} = 80000 \text{ Па,}$$

де  $V$  - ефективна в'язкість при фіксованому, одиничному, значенні швидкості деформації, Па·с;  $V = 10 \text{ Па·с}$ .

де  $d_p$  - діаметр отворів, м;

$l$  - товщина решітки, м;

$w$  - швидкість екструдювання продукту через отвори, м/с.

$$w = \frac{4 \cdot Q}{3600 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot z \cdot \psi \cdot \gamma}$$

де  $\psi$  - коефіцієнт використання площі отворів решітки (0,7-0,8);

$\gamma$  - об'ємна вага продукту (1048  $\text{кг/м}^3$ );

$z$ - число отворів решітки.

Потужність, що витрачається на транспортування продукту шнеком [23]:

$$N_{a2} = p^1 \cdot k^1 \cdot M_0 = 49,1 \text{ Вт},$$

де  $p^1$  - максимальний тиск, який розвиває шнек ( $p^1=p_2$ ), Па;

$k^1$  - коефіцієнт опору при транспортуванні кускового м'яса шнеком ( $8 \div 10$ );

$M_0$  - об'ємна продуктивність вовчка,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Потужність, яка витрачається на перевертання продукту ножом:

$$N_x = \frac{2}{3} \cdot \pi^2 \cdot n \cdot p_2 \cdot f \cdot \left( \left( \frac{S}{\pi} + r_{\text{вн}}^2 \right)^{1,5} + r_{\text{вн}}^3 \right) = 76(65) \text{ Вт},$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя;

$S$ - площа решітки, яка контактує з продуктом, який знаходиться між лопатями ножа, який обертається,  $\text{м}^2$ .

$$S = (r_3 - r_{\text{вн}}) \left( \pi(r_3 + r_{\text{вн}}) - \frac{4 \cdot a_3}{\cos \beta} \right) = 0,0034(0,0032) \text{ м}^2,$$

$a_3$  - середня ширина лопаті ножа, який обертається, м.

Потужність, яка витрачається на екструдування продукту через отвори решітки:

$$N_c = 3466,7 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot V \cdot l \cdot (r_3^3 - r_{\text{вн}}^3) \cdot \text{tg}(\beta_n + \rho) \cdot \frac{w^{0,18}}{d} = 46,4 \text{ Вт}.$$

Потужність, яка витрачається на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №1:

$$N_{\text{под1}} = 336,17 - 46,8 - 49,1 - 65 - 46,4 = 128 \text{ Вт}.$$

Питоме (середнє) зусилля різання 1630 Н/м.

Потужність, яка витрачається на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №2:

$$N_{\text{под2}} = 454,96 - 46,8 - 49,1 - 76 - 46,4 = 236 \text{ Вт}.$$

Питоме (середнє) зусилля різання 3004 Н/м.

Потужність, яка витрачається на подрібнення яловичини вищого сорту лезом ножа №1:

$$N_{\text{под3}} = 243,3 - 41 - 40 - 57 - 41 = 64,3 \text{ Вт}.$$

Питоме (середнє) зусилля різання 807 Н/м.

Потужність, яка витрачається на подрібнення яловичини вищого сорту лезом ножа № 2:

$$N_{\text{под4}} = 277,4 - 41 - 40 - 68 - 41 = 87,4 \text{ Вт.}$$

Питоме (середнє) зусилля різання 1113 Н/м.

Скорочення потужності, що витрачається на подрібнення яловичини вищого гатунку лезом ножа, становить понад 39%.

Розрахувавши зусилля різання для різних швидкостей отримали наступне [23]:

при подрібненні котлетної яловичини лезом ножа №1:

$$P_{\text{max}\#1} = 3330 \lg V + 1814;$$

при подрібненні котлетної яловичини лезом ножа №2:

$$P_{\text{max}\#2} = 4507 \lg V + 3265.$$

На рис 2.1 приведено графік залежності зусиль ріжучого леза від швидкості різання.

Рисунок 2.1

### 3 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Постановка експерименту та характеристика установки

Експеримент по визначенню повної споживаної потужності і потужності, що витрачається на тертя і подрібнення м'ясної сировини м'ясоподрібнювальною шнековою машиною при різній швидкості обертання робочих органів і різних формах ріжучої кромки ставив собі за мету з'ясувати, як змінюється характер розподілу енергії, споживаної вовчком, при використанні:

- а) прямолінійної ріжучої кромки;
- б) криволінійної ріжучої кромки.

На підставі експериментальних даних отримані залежності зусиль різання від швидкості різання.

Визначення потужності, споживаної м'ясоподрібнювальною шнековою машиною (вовчком) при різній швидкості обертання робочих органів і різних формах ріжучої кромки, проводилася за допомогою установки, структурна схема якої показана на рис. 3.1.

Рисунок 3.1

Експериментальна установка складається з: 1 - амперметра; 2 - перетворювача з просторовим векторним керуванням; 3 - вовчка.

Механічну потужність на валу електродвигуна вовчка знаходили за значенням споживаного струму за допомогою наступної формули [23]:

$$N = I U \cos \varphi \eta . \quad (3.1)$$

При невеликих відхиленнях  $\chi \approx \cos \varphi$ .

### Рисунок 3.2

Частота обертання робочих органів змінювалася за допомогою перетворювача з просторовим векторним керуванням. Частоту обертання робочих органів визначали за такою формулою:

$$n = \frac{60(i-s)f}{p}, \quad (3.2)$$

де  $n$  - частота обертання робочих органів,  $\text{хв}^{-1}$ ;

$f$  - частота струму, Гц;

$p$  - число пар полюсів електродвигуна;

$s$  - коефіцієнт ковзання ротора;

$i$  - передаточне число приводу (0,26);

$\chi$  - коефіцієнт потужності.

### 3.2 Умови виконання експериментальних досліджень

Експеримент по визначенню споживаної потужності складався з двох частин:

- визначалися витрати потужності при зміні частоти обертання робочих органів вовчка, що працює в режимі холостого ходу, тобто, без продукту;

- визначалися повні витрати потужності, тобто, при роботі вовчка з продуктом.

Потужність, що витрачається на тертя м'ясної сировини об робочі органи та його подрібнення, визначалася як різниця між повною витратою потужності і витратою потужності в режимі холостого ходу.

Використовувався ніж з криволінійною ріжучою кромкою (ніж №1) і ніж з прямолінійною осьовою ріжучою кромкою (ніж №2).

Потужність вимірювалася при сталому режимі.

Для проведення експерименту по визначенню повної споживаної потужності і потужності, що витрачається на тертя і подрібнення м'ясної сировини вовчка при різній швидкості обертання робочих органів і різних формах ріжучої кромки, використовувалася м'язова тканина охолодженої яловичини 3-ї категорії, так зване котлетне м'ясо, і охолоджена яловичина вищого сорту (м'язова тканина), тобто, без вмісту сполучної тканини.

### 3.3 Розрахунок похибок під час вимірювань

Відносні похибки визначаються експериментальним шляхом величин для прямих вимірювань розраховувалися за формулами:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_{cp}}, \quad (3.3)$$

Де:

$$\Delta x = \sqrt{\Delta_x^2 + (0,675\Delta_{ix})^2}, \quad (3.4)$$

$$\Delta_{cp} = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{cp} - x_i)^2}{n(n-1)}}, \quad (3.5)$$

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.6)$$

де  $\Delta_{ix}$  - інструментальна похибка;

$x_i$  - величина окремого вимірювання;

$n$  - число вимірювань.

## 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

### 4.1 Оптимізація профілю ріжучої кромки ножів подрібнювального обладнання

Велика кількість модифікацій ріжучого обладнання та його робочих органів вказує на відсутність цілісного системного підходу до фізичного моделювання, математичного опису процесів різання та конструювання робочих елементів такого обладнання.

З позиції зменшення енергоємності процесу різання та підвищення якості готової продукції й продуктивності обладнання, особливу актуальність набуває завдання удосконалення форми ріжучої кромки леза інструменту.

У праці [24] подано базове співвідношення, яке забезпечує сталість питомої об'ємної потужності, що виділяється в деформованому середовищі під час різання лезом. Такий режим є характерним для середніх кутових швидкостей обертання різального інструменту, коли об'єм деформованого матеріалу в прилеглий зоні залишається практично однаковим для всіх точок ріжучої кромки та не залежить від їхнього радіус-вектора.

У конкретних умовах, особливо при великих швидкостях різання, необхідно правильно враховувати енергію деформації. Потужність, котра виділяється на одиницю об'єму деформованої сировини, має залишатися сталою. Оскільки при високих швидкостях різального інструменту виникають динамічні ударні навантаження, з урахуванням теореми збереження імпульсу сили різання можна вважати, що об'єм деформації обернено пропорційний лінійній швидкості точки різальної кромки [24].

Справді, для будь-якої деформації  $\Delta l$  сировини, що подрібнюється у напрямку вектора швидкості різання  $v$  можна записати:

$$\Delta l = v \cdot \Delta t. \quad (4.1)$$

Отже, час деформації визначається наступним співвідношенням:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{v}. \quad (4.2)$$

Беручи до уваги, що при обертанні робочих органів з кутовою швидкістю  $w$ :

$$v = w \cdot r, \quad (4.3)$$

одержимо:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{wr}, \quad (4.4)$$

Отже, час впливу ріжучої кромки на сировину обернено пропорційний швидкістю, тоді як сила впливу визначається величиною  $P$  – силою різання даного матеріалу. З цього випливає, що з віддаленням від центру обертання леза, при однаковій лінійній деформації, час впливу на сировину зменшується, кількість руху, переданого матеріалу при постійній силі різання, також зменшується, і обсяг деформації матеріалу дійсно обернено пропорційний лінійній швидкості або радіус-вектору  $r$  точки ріжучої кромки.

Основні дослідження, присвячені процесам різання лезом [25, 26], спрямовані на вирішення завдання раціонального перерозподілу загального вектора швидкості різання на нормальну та тангенціальну складові, що дозволяє у необхідній мірі трансформувати процес рубання різанням у сковзаючий.

Аналіз розглянутої проблеми показує, що величина вектора швидкості різання має більш високий рівень ієрархії, ніж його напрямок. Детальне вивчення джерел з питання різання сировини лезом дозволило визначити наукове положення про існування двох характерних критичних значень швидкості різання.

Перша критична швидкість визначає таку частоту обертання різального інструменту, яка збігається з частотою особистих коливань деформованої маси матеріалу під час різання. Відповідно, при швидкостях, менших за першу критичну, спостерігається квазістатична деформація матеріалу, що подрібнюється, тоді як при швидкостях, більших за першу критичну, відбувається ударний вплив леза на продукт. У цьому випадку опис процесу різання базується на теорії удару.

У даному випадку існує ряд важливих особливостей, врахування яких дозволяє спростити математичне моделювання процесу. Дослідники [26] зазначається, що під час ударного впливу можна знехтувати всіма кінцевими

силами, котрі діють на об'єкт протягом того самого проміжку часу. Крім того, застосування теореми Кельвіна для визначення роботи сил різання виявляється надзвичайно ефективним, оскільки робота визначається як скалярний добуток імпульсу сили на пів суму початкової та кінцевої швидкості точки ріжучої кромки леза.

Друга критична швидкість пов'язана з утворенням ударних хвиль у подрібнюваній масі та характеризується швидкістю поширення звуку в матеріалі. Розгляд цього випадку є актуальним при описі процесу подрібнення у високошвидкісних кутерах. Наступним кроком проведемо оцінку величин першої та другої критичних швидкостей різання.

Перша критична швидкість.

Частота особистих коливань деформуючої під час різання маси матеріалу можна визначити, виходячи з таких міркувань.

З джерела [21], частоту власних коливань матеріалу  $M$  визначають:

$$K_{кр1} = \sqrt{\frac{C}{M}} \quad (4.5)$$

Для оцінки коефіцієнта пружності  $C$  напишем закон Гука в скалярній формі для пружної сили, деформуючої матеріал [21]:

$$F = Cx \quad (4.6)$$

В координатах напруга-деформація рівняння (4.6) має вигляд:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4.7)$$

Враховуючи, що

$$\sigma = \frac{F}{S}, \text{ а}$$

$$\varepsilon = \frac{x}{L},$$

отримаємо для  $C$  вираз:

$$G = \frac{ES_{л}}{L} \quad (4.8)$$

Для ріжучого леза можемо записати (рис. 4.1):

$$S_{л} = \frac{1}{2}A(d - d_o) \quad (4.9)$$

## Рисунок 4.1

Відмітимо, що із конструктивних міркувань можна покласти:

$$b = \frac{d_0}{2}; \quad d_0 = \frac{d}{4}; \quad b = \frac{d}{8}$$

Для ножа з  $z$  лезами можемо записати:

$$L = \frac{nd}{z} - b, \quad (4.10)$$

Тоді отримаємо:

$$G = \frac{z E A (d - d_0)}{2(\pi d - bz)}, \quad (4.11)$$

Оцінимо масу деформації в процесі різання матеріалу:

$$M = \rho V, \quad (4.12)$$

де  $\rho$  - щільність матеріалу;

$V$  - його об'єм.

Обсяг деформованого матеріалу визначимо за величиною його секторної площі  $\Pi$ :

$$V = A \Pi \quad (4.13)$$

Величину секторної площі оцінимо для  $z$  - лезового ножа по такому співвідношенню:

$$z\Pi = \frac{\pi d^2}{4} - \frac{\pi d_0^2}{4} - zd \frac{(d-d_0)}{2}, \quad (4.14)$$

Тому, в загальному випадку для  $m$  - лезового інструменту маємо:

$$\Pi = \frac{\pi}{4z}(d^2 - d_0^2) - \frac{b}{2}(d - d_0), \quad (4.15)$$

Тоді:

$$M = \rho A \left[ \frac{\pi}{4z}(d^2 - d_0^2) - \frac{b}{2}(d - d_0) \right], \quad (4.16)$$

З урахуванням ефекту приєднаних мас сил Басса і Саффмена [27], отримаємо:

$$M = \rho A \left[ \frac{\pi}{4z}(d^2 - d_0^2) - 2b(d - d_0) \right], \quad (4.17)$$

Вираз для власної частоти коливань матеріалу, який подрібнюється з - лезовим ножом, можна записати у вигляді:

$$K_{кр1} = \sqrt{\frac{z E (d - d_0)}{2(\pi d - bz) \rho \left[ \frac{\pi}{4z}(d^2 - d_0^2) - 2b(d - d_0) \right]}}. \quad (4.18)$$

Якщо  $\rho=10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=26400$  Па,  $d_0=0,028$  м,  $d=0,073$  м,  $b=0,003$ ,  $z=4$ , м, перша критична частота вовчка з ножом із чотирьох лез:

$$K_{кр1} = 57 \text{ с}^{-1}.$$

У перерахунку на частоту обертання ножа, першу критичну кутову швидкість прийме, як значення  $n_{кр1} = (60/2\pi)$  або  $n_{кр1} = 544$  хв<sup>-1</sup>.

Друга критична швидкість.

Як зазначалося, друга критична швидкість визначається величиною швидкості поширення ударних хвиль (звуку) в сировині, яка може бути обчислена наступним способом.

Лезо ножа деформує матеріал висотою рівною діаметру отвору перфорації в решітці  $h$ , перетином  $\delta\Delta l$  і щільністю  $\rho$ . До матеріалу додається сила  $P$ . За час під дією сили  $P$  матеріал буде деформуватися, і в процесі деформації стиснення в кінцевому підсумку переміститься, наприклад, на відстань  $\Delta h$  відносно його рівноважної відстані до удару. При деформації матеріалу відбувається зміщення частинок з початкового положення в нове положення. Стислий елемент обсягу в процесі стиснення «штовхає» (стискає) прикордонний з ним елемент обсягу, який, в свою чергу, стискає наступний, і. т. д. Іншими словами, виникає в результаті удару пружна деформація стиснення (ущільнення), що переміщається зі

швидкістю  $C$ . За час  $\Delta t$  кожна частка стиснутого елемента обсягу буде переміщатися зі швидкістю  $v_0 = \Delta h / \Delta t$ . За цей же час деформація стиснення пошириться на відрізок довжини отвору перфорації  $h^1$ , що відповідає рівності  $h^1 = C\Delta t$  (прийнемо в нашому випадку  $h^1 = h$ ). Виходячи з другого закону динаміки (Ньютона) можна записати для нашого випадку рівність

$$P\Delta t = mv_e = \rho\delta\Delta lhv_e = \rho\delta\Delta lh\frac{\Delta h}{h}, \quad (4.19)$$

де  $m$  - маса м'ясної сировини, яка прийшла в рух за час  $\Delta t$ .

Розділивши обидві частини рівності (4.19) на  $\delta\Delta l$ , потім помноживши чисельник і знаменник правої частини формули на величину  $h$ , можна записати:

$$\frac{P\Delta t}{\delta\Delta l\Delta t} = \frac{\rho\delta\Delta lh\Delta h}{\delta\Delta l\Delta t\Delta t} \frac{h}{h}. \quad (4.20)$$

Зробивши в останньому виразі нескладні перетворення, отримаємо:

$$\sigma^n = \rho \left(\frac{h}{\Delta t}\right)^2 \frac{\Delta h}{h}. \quad (4.21)$$

Звідки

$$C^2 = \frac{\sigma^n}{\varepsilon\rho}. \quad (4.22)$$

Під час удару м'ясна сировина проявляє властивості пружного тіла, тому:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.23)$$

Для визначення другої критичної частоти обертання ріжучого інструменту застосовується така формула:

$$n_{кр2} = \frac{60}{\pi d} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (4.24)$$

При відповідних значеннях факторів, отримуємо:

$$n_{кр2} = 1344 \text{ хв}^{-1}.$$

Таким чином, для забезпечення режиму ударного безхвильового різання частота обертання робочого леза повинна відповідати наступним значенням:

$$n_{кр1} > n > n_{кр2}, 544 \text{ хв}^{-1} > n > 1344 \text{ хв}^{-1}.$$

Як було продемонстровано раніше, обсяг матеріалу, що деформується лезом, обернено пропорційний радіус-вектору точки ріжучої кромки. Це

положення служить умовою, яка визначає форму ріжучої кромки.

Маса матеріалу, що деформується обчислюється (рис. 4.2):

$$dm = r \cdot dz \cdot dr \cdot d\delta. \quad (4.25)$$

Рисунок 4.2

$$w = \text{const.} \quad (4.26)$$

$$w_1 = \frac{P_1 \cos \beta_1 r_1 d\zeta \sin \frac{\delta}{2}}{dt m_1 v_1}. \quad (4.27)$$

$$w_2 = \frac{P_2 \cos \beta_2 r_2 d\zeta \sin \frac{\delta}{2}}{dt \rho ds r_2 d\zeta \omega r_2}. \quad (4.28)$$

де  $w$  - потужність, в одиниці об'єму матеріалу;

$\beta_1, \beta_2$  - ковзання кут;

$\frac{\delta}{2}$  - частина кута леза.

Зіставляючи  $w_1$  та  $w_2$ , отримаємо шукану умову:

$$P_1 \cos \beta_2 r_1 = P_2 \cos \beta_1 r_2 \quad (4.29)$$

Отже, співвідношення (4.29) визначає умову оптимізації форми ріжучої кромки подрібнювального обладнання з лезами.

#### 4.2 Оптимізація розташування перфораційних отворів у сітці подрібнювального пристрою

Відома решітка для подрібнення м'ясокісткової сировини, виконана у вигляді диска постійного розміру з плоскою робочою перфорованою поверхнею, з центральним посадковим отвором і з круглими отворами перфорації,

розташованими в рядках на концентричних кільцях, робоча поверхня диска умовно ділиться на концентричні кільця, круглі отвори перфорації розташовані на центральному радіусі умовних кілець, зовнішній радіус диска дорівнює зовнішньому радіусу останнього, підрахунок від осі диска умовного кільця, кількість круглих отворів перфорації в умовних кільцях дорівнює одній з чисел серії Фібоначчі.

Недоліком такої решітки є невідповідність місця розташування круглих отворів перфорації (по відношенню один до одного і по відношенню до ріжучої кромки), розташованих на центральному рівні умовних кілець, що одночасно змінює кількість одночасно створюваних порізів «т» в зоні отвору.

Технічне завдання полягає у скороченні пульсації зусиль різання.

З метою зниження енергоефективності процесу подрібнення і збільшення ресурсу роботи вовчка за рахунок зменшення пульсації ріжучих зусиль, в сітці, що виробляється у вигляді диска постійної товщини з плоскою робочою перфорованою поверхнею, з центральним посадочним отвором і з круглим отвором перфорації, розташованих рядами по концентричних колах, полярний кут розташування центру перфорації отвору визначається за формулою (початкове положення отворів):

$$\varphi_n = \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right) \operatorname{tg} \beta_{n \text{ cp}} + 2n \left(\frac{r_n}{r_1}\right) \arcsin\left(\frac{d_p}{4r_n}\right). \quad (4.30)$$

Координати подальших отворів:

$$\varphi_n = \ln\left(\frac{r_{n+1}}{r_n}\right) \operatorname{tg} \beta_{n \text{ cp}} + 2n \left(\frac{r_n}{r_1}\right) \arcsin\left(\frac{d_p}{4r_n}\right) + \Delta\varphi, \quad (4.31)$$

$$\Delta\varphi = 8n \arcsin\left(\frac{d_p}{4r_n}\right). \quad (4.32)$$

Таке розміщення отворів (рис 4.3) перфорації зменшує кількість порізів, виконаних одночасно і, відповідно, максимальний момент від зусиль різання. Це зменшує пульсацію ріжучих зусиль і, як наслідок, зменшує максимальне енергоспоживання і вібрації обладнання.

Рисунок 4.3

### 4.3. Підсумки експерименту з оцінки споживання енергії

Таблиця 4.1 - Залежність сили, витраченої на подрібнення продукту (котлетної яловичини) і тертя продукту по робочих органах МШМ з ножом № 1, від частоти обертання ножів

| Частота струму, Гц (частота обертання, хв <sup>-1</sup> ) | Значення N, Вт     |
|---|--------------------|
| 15(72)  | 40,18±2,73(6,8%)   |
| 20(95)  | 97,28±6,33(6,4%)   |
| 25(120)   | 107,86±4,46(4,4%)  |
| 30(143)   | 126,89±7,48(5,9%)  |
| 35(167)   | 154,3 8±7,87(4,9%) |
| 40(191)   | 183,99±8,24(4,4%)  |
| 45(215)   | 205,14±7,85(5,8%)  |
| 50(239)   | 230,51±8,07(5,4%)  |
| 55(263)   | 243,20±8,65(5,2%)  |
| 60(286)   | 260,12±8,32(4,8%)  |
| 65(310)   | 357,4±9,54(4,6%)   |

Таблиця 4.2 - Залежність живлення витраченого на рубку продукту (котлетної яловичини) і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом № 2, від частоти обертання ножів

| Частота струму, Гц (частота обертання, хв <sup>-1</sup> ) | Значення N, Вт     |
|---|--------------------|
| 15(72)  | 45,57±3,26(7,0%)   |
| 20(95)  | 107,94±7,12(6,6%)  |
| 25(120)   | 139,68±9,36(6,7%)  |
| 30(143)   | 152,39±7,41(4,9%)  |
| 35(167)   | 224,34±15,47(6,9%) |
| 40(191)   | 237,04±17,21(6,3%) |
| 45(215)   | 273,01±17,74(6,5%) |
| 50(239)   | 300,53±19,38(6,4%) |
| 55(263)   | 364,03±21,55(5,9%) |

Таблиця 4.3 - Залежність живлення витраченого на подрібнення продукту (яловичина вищого сорту) і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом №1, від частоти обертання ножів

| Частота струму, Гц (частота обертання, хв <sup>-1</sup> ) | Значення N, Вт     |
|---|--------------------|
| 15(72)  | 25,40±1,70(6,7%)   |
| 20(95)  | 50,79±3,40(6,7%)   |
| 25(120)   | 80,42±5,15(6,4%)   |
| 30(143)   | 84,66±5,33(6,2%)   |
| 35(167)   | 110,06±6,95(6,3%)  |
| 40(191)   | 148,15±9,04(6,1%)  |
| 45(215)   | 143,91±9,35(6,5%)  |
| 50(239)   | 169,31±11,51(6,8%) |
| 55(263)   | 194,71±13,43(6,9%) |
| 60(286)   | 211,64±14,39(6,8%) |
| 65(310)   | 220,10±14,49(6,6%) |
| 70(334)   | 241,27±16,86(7,0%) |

Таблиця 4.4 - Залежність живлення витраченого на подрібнення продукту (яловичина вищого сорту) і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом №2, від частоти обертання ножів

| Частота струму, Гц<br>(частота обертання, хв <sup>-1</sup> ) | Значення N, Вт       |
|--|----------------------|
| 15(72) 1   | 25,40±1,70(6,7%)     |
| 20(95)   | 42,33±2,75(6,5%)     |
| 25(120)  | 55,03±3,63(6,6%)     |
| 30(143)  | 105,82±6,56(6,2%)    |
| 35(167)  | 118,52±7,94(6,7%)    |
| 40(191)  | 156,6 ± 10,81(6,9%)  |
| 45(215)  | 148,15±10,31(7,0%)   |
| 50(239)  | 173,55±10,18(5,9%)   |
| 55(263)  | 182,01 ± 13,31(7,3%) |
| 60(286)  | 228,56±13,78(6,0%)   |
| 65(310)  | 253,97±13,23(5,2%)   |
| 70(334)  | 313,22±14,18(4,5%)   |

На рис. А1 Додаток А представлена залежність живлення, що витрачається на подрібнення продукту і його тертя об робочі органи, від частоти обертання робочих органів вовчка.

Потужність, витрачена на подрібнення котлетної яловичини і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом № 1.

$$N_1 = -28,7806 + 1,1059 \cdot n \text{ (при } 60 \leq n \leq 300 \text{ хв}^{-1}\text{)} .$$

Потужність, витрачена на подрібнення котлетної яловичини і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом № 2.

$$N_2 = -51,9117 + 1,536 \cdot n \text{ (при } 60 \leq n \leq 300 \text{ хв}^{-1}\text{)} .$$

Потужність, що витрачається на подрібнення яловичини вищого сорту і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом № 1.

$$N_3 = -24,8604 + 0,8126 \cdot n \text{ (при } 148 \leq n \leq 330 \text{ хв}^{-1}\text{)} .$$

Потужність, що витрачається на подрібнення яловичини вищого сорту і тертя продукту об робочі органи МШМ з ножом № 2.

$$N_4 = -52,6996 + 1,0002 \cdot n \text{ (при } 148 \leq n \leq 330 \text{ хв}^{-1}\text{)} .$$

Таблиця 4.5 - Залежність потужності, споживаної МШМ при подрібненні різноманітних видів сировини з прямолінійною і криволінійною ріжучою кромкою, від частоти обертання робочих органів

| Частота обертання<br>$n, \text{ хв}^{-1}$ . | $N_a, \text{ Вт.}$ | $N_б, \text{ Вт.}$ | $N_b, \text{ Вт.}$ | $N_r, \text{ Вт.}$ |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 72  | 129,10             | 135,45             | 110,06             | 110                |
| 95  | 146,03             | 152,34             | 84,66              | 97,06              |
| 120   | 160,85             | 182,01             | 122,75             | 114,28             |
| 143   | 177,77             | 203,18             | 126,98             | 148,15             |
| 167   | 211,64             | 283,59             | 156,61             | 165,07             |
| 191   | 253,97             | 304,76             | 190,48             | 203,18             |
| 215   | 277,25             | 355,55             | 198,94             | 211,64             |
| 239   | 302,64             | 406,35             | 232,80             | 245,50             |
| 263   | 323,80             | 482,53             | 258,21             | 258,21             |
| 286   | 347,09             |                    | 287,83             | 304,76             |
| 310   | 467,73             |                    | 287,85             | 334,39             |
| 334   |                    |                    |                    | 380,95             |

$N_a$  - потужність, витрачена на подрібнення яловичини, ножом № 1.

$N_б$  - потужність, витрачена на подрібнення яловичини, ножом № 2.

$N_b$  - потужність, що витрачається на подрібнення яловичини вищого сорту ножом № 1.

$N_r$  - потужність, що витрачається на подрібнення котлетної яловичини ножом № 2.

$$N_a = 13,9886 + 1,2584 \cdot n \text{ (при } 70 \leq n \leq 300 \text{ хв}^{-1}\text{)};$$

$$N_б = -24,7508 + 1,813 \cdot n \text{ (при } 70 \leq n \leq 300 \text{ хв}^{-1}\text{)};$$

$$N_B = 14,9583 + 0,9008 \cdot n \text{ (при } 100 \leq n \leq 330 \text{ хв}^{-1}\text{)};$$

$$N_T = -1,2734 + 1,063 \cdot n \text{ (при } 100 \leq n \leq 330 \text{ хв}^{-1}\text{)}.$$

На рис В.1 додаток В представлена залежність потужності, спожитої МШМ від частоти обертання робочих органів.

Таким чином, при подрібненні котлетної яловичини ножом №1, різниця в споживанні електроенергії в порівнянні з ножом №2 буде дорівнювати:

$$\Delta N_{a-b} = (-24,7508 + 1,813 \cdot n) - (13,9886 + 1,2584 \cdot n) = 0,5546 \cdot n - 38,739 = 144,28 \text{ Вт}$$

При подрібненні котлетної яловичини ножом №1 з частотою обертання ножів 330 хв<sup>-1</sup> скорочення енергоспоживання в порівнянні з ножом №2 буде рівне 25,1%.

При подрібненні яловичини вищого сорту ножом №1 різниця в енергоспоживанні в порівнянні з ножом №2 буде рівна:

$$\Delta N_{b-r} = (-1,2734 + 1,063 \cdot n) - (14,9583 + 0,9008 \cdot n) = 0,1622 \cdot n - 16,2317$$

При подрібненні яловичини вищого сорту ножом №1 з частотою обертання ножів 330 об/хв скорочення енергоспоживання в порівнянні з ножом №2 буде рівне 10,7%.

При подрібненні котлетної яловичини ножом №1 різниця в енергоспоживанні при подрібненні продукту і його тертя об робочі органи МШМ в порівнянні з ножом №2 буде рівна:

$$\Delta N_{1-2} = -51,9117 + 1,536 \cdot n + 28,7806 - 1,1059 \cdot n - 23,1311 = 118,8 \text{ Вт}$$

При подрібненні котлетної яловичини ножом №1 з частотою обертання ножів 330 хв<sup>-1</sup> скорочення енергоспоживання на подрібнення продукту та його тертя об робочі органи МШМ в порівнянні з ножом №2 складає 26,2%.

При подрібненні яловичини вищого сорту ножом №1 різниця в енергоспоживанні на подрібнення продукту та його тертя об робочі органи МШМ в порівнянні з ножом №2 буде рівна:

$$\Delta N_{3-4} = -52,6996 + 1,0002 \cdot n + 24,8604 - 0,8126 \cdot n = 0,1876 \cdot n - 27,8392$$

При подрібненні яловичини вищого сорту ножом №1 з частотою обертання ножів  $330 \text{ хв}^{-1}$  скорочення енергоспоживання на подрібнення продукту та його тертя об робочі органи МШМ в порівнянні з ножом №2 складає 12,3%.

Частка потужності, витраченої на подрібнення продукту і його тертя об робочі органи МШМ, при частоті обертання ножів  $330 \text{ хв}^{-1}$ , становить: 78,2% при подрібненні котлетної яловичини з вигнутим ножом; 79,3% при рубці котлетної яловичини з прямим ножом; 77,9% при подрібненні вищого сорту яловичини з вигнутим ножом; 79,4% при подрібненні вищого сорту яловичини з прямим ножом.

### Висновки за результатами експериментальних досліджень

1. Визначено залежності повних потужностей і потужностей, які витрачаються на подрібнення і тертя яловичини вищого і другого сорту об робочі органи МШМ з ножами №1 і №2, від частоти обертання ножів.

2. За експериментальними даними визначено потужності, що витрачаються: на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №1; на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №2; на подрібнення яловичини вищого гатунку лезом ножа №1; на подрібнення яловичини вищого гатунку лезом ножа №2.

3. Порівняльна оцінка показала, використання ножа №1 в порівнянні з використанням ножа №2 при частоті обертання робочих органів  $330 \text{ хв}^{-1}$  скорочує: споживання повної потужності МШМ на 25,1% при подрібненні котлетної яловичини; споживання повної потужності МШМ на 10,7% при подрібненні яловичини вищого гатунку; потужність, затрачену на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа, більш ніж на 45%; потужність, затрачену на подрібнення яловичини вищого гатунку лезом ножа, більш ніж на 39%.

4. З урахуванням збільшення зусиль різання при збільшенні швидкості різання, для подрібнення котлетної яловичини, при частоті обертання робочих

органів  $300 \text{ хв}^{-1}$ , отримали ріжучу кромку з кутом ковзання, зменшеним від  $52,6^\circ$  при радіусі ріжучої кромки 14 мм до  $42^\circ$  при радіусі ріжучої кромки 36,5 мм.

5. Розташування отворів в решітці вовчка має бути погоджено з формою ріжучої кромки таким чином, щоб скоротити число одночасно здійснюваних різів. Це знижує пульсацію ріжучих зусиль і, як наслідок, зменшує максимальну енергоємність процесу, а також знос робочих органів.

## 5 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

### 5.1 Екологічна експертиза

Екологічна експертиза – це регламентована нормами діяльність фахівців, спрямована на аналіз, перевірку та оцінку документації щодо об'єктів і рішень з метою визначення їх відповідності вимогам охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів.

Основні цілі екологічної експертизи [28]:

наукове обґрунтування відповідності проектних рішень сучасним екологічним вимогам перед їх затвердженням у компетентних державних органах; попередження потенційного шкідливого впливу на екосистему під час реалізації або функціонування об'єктів.

Екологічна експертиза може бути державною, громадською чи іншого виду. Її проведення є обов'язковою умовою для будь-якої діяльності, яка може впливати на стан довкілля. Через погіршення екологічної ситуації в останні десятиліття в Україні було прийнято ряд законодавчих актів: Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (25 червня 1991 р.) та Закон «Про екологічну експертизу» (9 лютого 1995 р.). Ці документи визначають правові, екологічні та соціальні засади охорони довкілля та регулюють вимоги до проведення екологічної експертизи [28].

Громадська екологічна експертиза проводитиметься за ініціативою громадських організацій або об'єднань у будь-якій сфері, де необхідне екологічне обґрунтування діяльності. Вона може здійснюватися паралельно з державною експертизою шляхом створення добровільних тимчасових чи постійних еколого-експертних груп.

Процес проведення екологічної експертизи складається з трьох основних етапів [28]:

підготовчий – перевірка наявних даних та проектних матеріалів на відповідність законодавчим вимогам;

основний – аналітична обробка інформації щодо об'єкта експертизи;  
заключний – узагальнення результатів, оцінка отриманих даних та складання підсумкового акту.

У сфері сільськогосподарського виробництва екологічна експертиза має особливе значення, адже саме аграрна діяльність істотно впливає на стан довкілля. Сучасні технології, нова техніка та інтенсифікація виробництва потребують ретельного екологічного контролю.

Екологічна експертиза спрямована на формування висновків щодо відповідності запланованої або чинної діяльності вимогам природоохоронного законодавства, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки.

Основні завдання екологічної експертизи:

регулювання громадських відносин у сфері охорони довкілля;

забезпечення екологічної безпеки;

охорона довкілля;

раціональне використання та відтворення природних ресурсів;

захист екологічних прав та законних інтересів громадян.

Мета екологічної експертизи полягає у запобіганні негативного впливу людської діяльності на природу та здоров'я людей, а також у визначенні рівня екологічної безпеки господарських процесів та стану довкілля на певних територіях чи об'єктах.

Основні вимоги до проведення екологічної експертизи: пріоритет права людини та суспільства на безпечне екологічне середовище, узгодження екологічних та економічних інтересів, врахування екологічної сутності об'єктів та дотримання природоохоронних вимог, комплексна еколого-економічна оцінка існуючого чи потенційного впливу на навколишнє середовище, розгляд альтернативних варіантів мінімізації шкідливих впливів, неухильне дотримання законодавчих норм природокористування.

Порядок проведення екологічної експертизи включає:

перевірку повноти матеріалів та реквізитів об'єкта експертизи;

аналітичну обробку поданих даних;  
узагальнення результатів окремих досліджень;  
підготовку залишкових висновків.

Отже, технологія сільськогосподарського виробництва повинна ґрунтуватися на екологічно обґрунтованих та раціональних засадах природокористування [28].

Відповідно до теми роботи об'єктом забруднення навколишнього середовища на підприємствах м'ясної промисловості є викиди в атмосферу: парогазові і газопилові, бувають при роботі котельних, димогенераторів, барометричних конденсаторів. Крім того, джерелами забруднення повітря являється автотранспорт.

Тому, щоб запобігти забрудненню навколишнього середовища, викиди піддають очищенню. Концентрація шкідливих речовин в повітрі, які видаляються вентиляцією із приміщення, не повинна перевищувати встановлених санітарних норм проектування м'ясної промисловості.

Забруднене повітря, видалене із виробничих приміщень місцевими механічними вентиляційними установками, перед викидом піддається очищенню в циклонах і фільтрах. Парогазові суміші (сокові пари) піддаються очищенню водою в барометричних конденсаторах і адсорберах. Замість води застосовують також хлоровмісні розчини (хлорне вапно, гіпохлорид кальцію). Гази, що погано пахнуть, піддаються обробленню термічним методом в топках котелень чи спеціальних печах.

Для того щоб зменшити забруднення навколишнього середовища, необхідно не допускати неповного згорання палива котелень, встановити газоочисні фільтри, золоуловлювачі, використовувати тільки рідке і газоподібне паливо.

Автотранспорт, що використовується на підприємстві, повинен мати справні системи запалювання і живлення, глушники обладнують фільтрами очищення вихлопних газів.

Позитивний вплив на стан внутрішнього середовища має озеленення території підприємства. Вся територія, яка не занята будівлями і дорогами, повинна бути озеленена. Зелені насадження збагачують повітря киснем, а також здатні поглинати велику кількість шкідливих газів і очищати повітря від пилу.

Отже, дані заходи забезпечать мінімальний вплив на екологічну систему під час переробки м'ясної сировини.

## **5.2 Охорона праці**

### **5.2.1 Актуальність проблеми безпеки людини у виробничому середовищі**

Охорона праці в Україні охоплює комплекс заходів, спрямованих на постійне удосконалення умов роботи шляхом механізації важких та негативних виробничих процесів, впровадження сучасних засобів безпеки, а також усунення факторів, що спричиняють травматизм та професійні захворювання працівників. Вона нерозривно пов'язана з умовами праці.

Умови праці – це складне соціально-економічне явище, яке формується в процесі трудової діяльності під впливом різноманітних взаємопов'язаних факторів. Вони впливають на стан здоров'я, працездатність, ставлення людини до праці, рівень задоволення від роботи, а також на продуктивність та економічні показники виробництва [29].

Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях у сільському господарстві є одним із пріоритетних напрямів забезпечення стабільної роботи галузі. Її головна мета – створення безпечних та комфортних умов праці для працівників. Це передбачає реалізацію заходів, спрямованих на покращення та оздоровлення робочої середовища, запровадження сучасних засобів захисту, усунення причин травматизму, а також забезпечення належних санітарно-

гігієнічних та побутових умов на виробництві.

### **5.2.2 Вимоги з охорони праці при роботі зі м'ясною сировиною**

Вовчок використовують для подрібнення м'яса та жиросировини. Небезпечною зоною вовчка являється шнек і ножі.

Для уникнення попадання рук до шнека сировина в вовчок подається за допомогою спусків або механізовано. Конструкція завантажувального механізму повинна забезпечувати безпеку в роботі. Завантажувальна головка вовчка, який завантажується вручну, забезпечується завантажувальним кільцем. Подавати в нього м'ясо слід товкачем із дерева твердих порід. Велику небезпеку представляють ножі, що обертаються, тому для зняття решіток передбачено спеціальний засіб для виймання із горловини вовчка решіток і ріжучого механізму.

Перед роботою перевіряють справність пристосування для виймання ріжучого механізму, відсутність тріщин на циліндрі, шнеці, на ножах і решітці; якість заточування ножів і решіток, справність затворів бункера або іншого завантажувального механізму [30].

Перед пуском в роботу вовчка завантажувальну воронку заповнюють м'ясом. Для уникнення перегріву електродвигуна вовчок завантажують рівномірно і однорідною сировиною.

Під час роботи вовчка забороняється опускати в завантажувальну воронку руки для утримання, направлення або витискування сировини, а також очищати руками решітку вовчка.

Розбирати і збирати вовчок можна тільки при відключеному пусковому механізмі і закінченні обертання по інерції.

Зберігати під час перерви в роботі вовчка будь-які предмети в його циліндрі і завантажувальній воронці заборонено.

### 5.2.3 Аналіз формування травмонебезпечних ситуацій

Аналіз потенційно небезпечних умов, які існують або можуть виникати безпосередньо в процесі виробництва, показав, що їх можна поділити на кілька основних груп [29]:

умови, що визначають рівень небезпеки виробничого обладнання або робочого місця, пов'язані з конструктивними недоліками окремих вузлів чи машин;

фактори, що призводять до помилок працівників у процесі роботи – зокрема, низький рівень кваліфікації та недостатні знання з питань охорони праці;

обставини, що створюють ризик потрапляння працівників у небезпечну зону через відсутність належного контролю за дотриманням вимог безпеки, а також інші подібні причини.

Будь-яке порушення цілісності організму або порушення його функцій під впливом небезпечного фактора визначається як травма.

Якщо травмування людей стало наслідком аварії технічної системи, то цей випадок слід розглядати як подію, спричинену аварійною ситуацією. Це особливо актуально для систем, у складі яких одночасно функціонують людина та машина.

У разі виходу з ладу обладнання чи його окремих елементів, що призвело до раптової зупинки роботи та значних матеріальних збитків, таке явище визначається як аварія.

Оскільки в людино-машинних системах механізми виникнення травм та аварій мають спільні риси, надалі ці процеси розглядаються паралельно.

#### Висновки та пропозиції

Розроблення на підприємстві планів запобігання, локалізації та ліквідації пожеж, а також регулярне проведення тренувань персоналу дає змогу уникнути надзвичайних ситуацій або мінімізувати їх наслідки.

### 5.3 Оцінка економічної ефективності впровадження проектних рішень

#### 5.3.1. Розрахунок капітальних вкладень

Таблиця 5.1 - Розрахунок вартості основних матеріалів для виготовлення ножів для вовчка з діаметром ножової решітки 82 мм

| Найменування | Ціна за одиницю, грн. | Кількість одиниць на один виріб | Сума, грн. |
|--------------|-----------------------|---------------------------------|------------|
| Сталь 40 X   | 440                   | 2                               | 880        |

Таблиця 5.2 - Розрахунок заробітної плати робітників з виготовлення ножів

| Зміст робіт     | Норма часу на 1 кг металу, н. г. | Маса металу, кг | Загальна трудоемність, н. г. | Годинна тарифна ставка, грн. | Сума Основної заробітної плати, грн. |
|-----------------|----------------------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Станкові роботи | 1,5                              | 1,376           | 2,064                        | 83                           | 171,3                                |
| Термообробка    | 0,5                              | 1,376           | 0,688                        | 83                           | 57,1                                 |
| Всього          |                                  |                 |                              |                              | 228,4                                |

Таблиця 5.3 - Витрати на виготовлення ножів

| № п/п | Витрати                             | Сума, грн |
|-------|-------------------------------------|-----------|
| 1     | Основні матеріали                   | 2125      |
| 2     | Транспортні витрати                 | 200,1     |
| 3     | Основна і додаткова заробітна плата | 1640,2    |
| 4     | Відрахування                        | 425,2     |
| 5     | Накладні витрати                    | 500       |
| 6     | Всього                              | 4895,5    |
| 7     | Інші витрати                        | 200       |
| 8     | Капітальні витрати                  | 4915,5    |

Оптова ціна 2-х ножів [31]:  $C_0 = K_3 + \Pi = 8180$  грн.

#### 5.3.2. Розрахунок зміни собівартості продукції (експлуатаційних затрат)

Таблиця 5.4 - Вихідні дані

| Показники                          | Од. вим. | Базове обладнання | Проектувальне обладнання |
|------------------------------------|----------|-------------------|--------------------------|
| Продуктивність                     | кг/год   | 200               | 200                      |
| Річний об'єм продукції (вихід 0,7) | т        | 87,5              | 87,5                     |
| Чисельність робітників             | осіб     | 1                 | 1                        |
| Середньогодинна тарифна ставка     | грн.     | 83                | 83                       |
| Потужність електродвигуна          | кВт      | 1,1               | 0,75                     |
| Балансова вартість обладнання      | грн.     | 17452             | 16500                    |

Таблиця 5.5 - Зміна собівартості 1 т продукції

| № п/п | Статті витрат                | Од. вим. | Базовий варіант | Проектний варіант | АС        |
|-------|------------------------------|----------|-----------------|-------------------|-----------|
| 1     | Сировина і основні матеріали | грн.     | 1500000         | 1479000           | 21000     |
| 2     | Транспортні витрати          | грн.     | 450000          | 443700            | 6300      |
| 3     | Заробітна плата робітників   | грн.     | 200000          | 197200            | 2800      |
| 4     | Відрахування                 | грн.     | 52000           | 51272             | 728       |
| 5     | Енерговитрати                | грн.     | 8750            | 6570              | 2180      |
| 6     | Амортизація обладнання       | грн.     | 2618            | 2440              | 178       |
| 7     | Утримання і поточний ремонт  | грн.     | 10000           | 10000             |           |
|       | Всього на 1 т                | грн.     | 157060/224370   | 15486/22123       | 2202/3146 |

Річний економічний ефект [31]:

$$E = (\Delta C + 0,15 \cdot \Delta K) \cdot A_p = 275417 \text{ грн.}$$

де  $\Delta C$  – різниця між собівартістю одиниці продукції по базовому і проектуваному варіанті, грн.;

$\Delta K$  – річна економія капітальних вкладень, грн.;

$A_p$  – річний об'єм виробництва продукції за допомогою нових засобів праці в розрахунковому році в натуральних одиницях, кг.

Таблиця 5.6 - Техніко-економічні показники проекту

| Затрати   | Од. вим. | Базовий варіант | Проектний варіант | Економія |
|---|----------|-----------------|-------------------|----------|
| Оптова ціна одного ножа   | грн.     | 3550            | 4090              | -540     |
| Балансова вартість вовчка   | грн.     | 81500           | 92000             | 10500    |
| Річне виробництво продукції                                       | т        | 87,5            | 87,5              |          |
| Потужність електродвигуна   | кВт      | 1,1             | 0,75              |          |
| Енерговитрати   | грн./т   | 900,9           | 700,26            | 200,64   |
| Собівартість 1 т продукції  | грн./т   | 224370          | 221230            | 3146     |
| Річний економічний ефект від використання експериментальних ножів | грн.     |                 |                   | 275417   |

Економічний ефект від впровадження експериментальних ножів становить 275417 грн. в рік.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено наукове положення, що полягає у виявленні двох критичних швидкостей різання і трьох режимів процесу подрібнення: квазістатичний, ударний, хвильовий.

2. Визначено залежності повних потужностей і потужностей, які витрачаються на подрібнення і тертя яловичини вищого і другого сорту об робочі органи МШМ з ножами №1 і №2, від частоти обертання ножів.

3. За експериментальними даними визначено потужності, що витрачаються: на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №1; на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа №2; на подрібнення яловичини вищого ґатунку лезом ножа №1; на подрібнення яловичини вищого ґатунку лезом ножа №2.

4. Порівняльна оцінка показала, використання ножа №1 в порівнянні з використанням ножа №2 при частоті обертання робочих органів  $330 \text{ хв}^{-1}$  скорочує: споживання повної потужності МШМ на 25,1% при подрібненні котлетної яловичини; споживання повної потужності МШМ на 10,7% при подрібненні яловичини вищого ґатунку; потужність, затрачену на подрібнення котлетної яловичини лезом ножа, більш ніж на 45%; потужність, затрачену на подрібнення яловичини вищого ґатунку лезом ножа, більш ніж на 39%.

5. Величина попередньої деформації  $h$  прямопропорційна питомої площі контакту леза і матеріалу, що ріжеться. Зменшення зусилля різання при ковзному різанні пояснюється зменшенням попередньої деформації матеріалу. Таким чином, при збільшенні кута ковзання, напруження, створювані лезом в місці контакту з матеріалом, будуть збільшуватися, що зумовить собою скорочення зусиль різання.

6. З урахуванням збільшення зусиль різання при збільшенні швидкості різання, для подрібнення котлетної яловичини, при частоті обертання робочих органів  $300 \text{ хв}^{-1}$ , отримали ріжучу кромку з кутом ковзання, зменшеним від  $52,6^\circ$  при радіусі ріжучої кромки 14 мм до  $42^\circ$  при радіусі ріжучої кромки 36,5 мм.

7. Розташування отворів в решітці вовчка має бути погоджено з формою ріжучої кромки таким чином, щоб скоротити число одночасно здійснюваних різів. Це знижує пульсацію ріжучих зусиль і, як наслідок, зменшує максимальну енергоємність процесу, а також знос робочих органів.

8. Аналітично отримано рівняння, що описує взаємозв'язок між зусиллям різання, геометричними параметрами ножа і фізико-механічними властивостями матеріалу, що подрібнюється, при квазістатичній деформації.

9. Отримано експериментальні залежності між швидкістю різання і зусиллям різання м'ясної сировини, визначено значення початкового кута ковзання при подрібненні м'ясної сировини.

10. Економічний ефект від впровадження експериментальних ножів становить 275417 грн. в рік.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шляхтунов В. Технологія виробництва м'яса і м'ясних продуктів: навч. посібник. Київ: Техноперспектива, 2010. 472 с.
2. Ускова С.О. Аналіз стану харчової промисловості та харчового машинобудування. Харків: ХНТУ, 2023. 76 с.
3. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв: підручн. Харків: Світ Книг, 2014. 495 с.
4. Газука Т. А., Плуток О. В. Процеси та апарати харчових виробництв: навчально-метод. рекомендації до виконання практичних робіт. Чернігів: НУЧК, 2025. 72 с.
5. Панасюк С. Г. Процеси і апарати харчових виробництв : методичні вказівки до виконання практичних робіт для здобувачів. Луцьк: ЛНТУ, 2025. 92 с.
6. Кравець О. І., Куц В. П. Методичний посібник до виконання лабораторних робіт з курсу “Процеси та апарати харчових виробництв”: методичний посібник. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2021. 89 с.
7. Закалов О., Бортник А. Дослідження процесу подрібнення м'яса у ножовому подрібнювачі періодичної дії. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. 2008. № 2 (Т.14). С. 85-91.
8. Шибка В. О., Костенко О. М., Дрожчана О. У. Визначення енерговитрат на подрібнення м'ясної сировини з використанням хрестоподібних ножів з різальними лезами на задній поверхні. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: Мат-ли IV всеукр. інтернет-конф., м. Полтава, 02-03 груд. 2021 р.* 2021. С. 46-49.
9. Дуб В. В., Терешкін О. Г., Пазюк В. М. Зниження енергоємності процесу подрібнення м'ясної сировини на підприємствах ресторанного господарства. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки: наук. зб.* 2025. Вип. 11(42). Ч. 1. С. 84-91.
10. Сухенко Ю., Сухенко В., Муштрук М., Васильів В., Бойко Ю. Changing the quality of ground meat for sausage products in the process of grinding.

*Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. № 4(11(88)). С. 56-63.

11. Aliyu U. S. Design, construction and testing of manual and motorized meat slicing/drying machine: a review. *European Journal of Mechanical Engineering Research*. 2020. Vol. 7, No. 2, P. 1-4.

12. Hammer G., Stoyanov S. Uber das Kuttern von Bruhwurstbrat. *Mitteilungsblatt der Fleischforschung Kulmbach*. 2008. (47), P. 243-251.

13. Самойчук К. О. *Основи розрахунку та конструювання обладнання переробних і харчових виробництв*. Київ: ПрофКнига, 2020. 428 с.

14. Некоз О.І., Литовченко І.М., Батраченко О.В., Микитюк С.І. Дослідження умов контакту ножів кутера із сировиною з метою підвищення їх міцності. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. №1. С. 108-114.

15. Новицький В.С., Чепелюк О.М., Чепелюк О.О. Імітаційне моделювання процесу тонкого подрібнення м'ясної сировини. *Тренди Lean-виробництва та пакування харчової продукції: Мат-ли 13-ї Міжн. спеціалізованої наук.-практ. конф., 17 вересня 2024 р.* 2024. С. 12-14.

16. Закалов О.В., Бортник А.І. Універсальний енергозберігаючий ніж для кутерів періодичної дії. *Журнал Вісник ТДТУ*. 2004. №1, С. 25-31.

17. Віннікова Л.Г. Теорія і практика переробки м'яса. Ізмаїл: СМНЛ, 2000. 172 с.

18. Клименко М.М., Віннікова Л.Г., Береза І.Г. Технологія м'яса і м'ясних продуктів. Київ: Вища освіта, 2006. 640 с.

19. Власенко В.В., Машкін М.І., Береза І.Г. Технологія продуктів забою тварин. Вінниця: РВВ ВАТ «Віноблдрукарня», 1999. 448 с.

20. Мирончук В.Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.

21. Батраченко О.В. Науково-практичні основи вдосконалення машин для подрібнення м'ясної сировини: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12. Харків, 2021. 574 с.

22. Осипенко В.І., Філімонова Н.В., Батраченко О. В. Чисельне

моделювання подачі м'ясної сировини шнеком вовчка. Вісник Хмельницького національного університету. 2017. № 3. С. 73-77

23. Некоз О.І., Батраченко О.В. Проектування м'ясорізальних вовчків. Черкаси: ЧДТУ, 2014. 221 с.

24. Некоз О.І., Батраченко О.В. Вдосконалення різального інструменту м'ясорізальних машин. *Актуальні проблеми харчової промисловості: тези доп. всеукр. наук.-техн. конф., 8-9 жовт. 2013 р.* 2013. С. 37-38.

25. Некоз О.І., Батраченко О.В., Осипенко В.І. Підвищення ефективності різальної дії ножів кутера. *Вісник Черкаського державного технологічного університету.* 2013. № 4. С. 120-126.

26. Некоз О.І., Батраченко О.В., Литовченко І.М. Дослідження умов контакту ножів кутера із сировиною з метою підвищення їх міцності. *Вісник Черкаського державного технологічного університету.* 2012. № 1. С. 108-114.

27. Haack E., Schnackel W., Haack O. Optimal Fördern und Zerkleinern - Grundlagen und Vorgänge bei der Fleischbearbeitung mit Maschinen der Wolfstechnologie. *Fleischwirtschaft.* 2003. Vol. 6. P. 41-47.

28. Закон України «Про екологічну експертизу»: за станом на 9 лютого 1995р. Верховна Рада України. Офіц. вид. Київ: Парлам. вид-во, 1995. 36 с.

29. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці. Київ: Каравела, 2011. 384 с.

30. Геврик Є.О., Сомар Г.В., Пешко Н.П. Техніка безпеки. Київ: Ельга, 2006. 316 с.

31. Шваб Л.І. Економіка підприємства. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: Каравела. 2004, 568 с.