

УДК 664.013

О. Закалов, канд. техн. наук; З. Мазяк, докт. техн. наук; А. Бортник

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## ВПЛИВ ФОРМИ ЛЕЗА НОЖІВ НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КУТЕРА

*Резюме.* Проведено аналіз розподілу силових факторів по ріжучій кромці та бічних поверхнях ножа для робочих органів кутера з різними формами ріжучої кромки. Виявлено переваги та недоліки процесу подрібнення з використанням таких ножів. Запропоновано заходи щодо зменшення енергоспоживання подрібнювачів м'яса.

*Ключові слова:* ножі кутера, м'ясна сировина, фарш, робочі органи, подрібнення, різання.

O. Zakalow, Z. Mazyak, A. Bortnyk

## INFLUENCE OF FORM OF KNIFE-BLADE IS ON THE ENERGY CONSUMPTION OF CUTTER

*The summary.* In the article the analysis of division of power factors is conducted on a cutting edge and lateral surfaces of knife for the workings organs of cutter with the different forms of cutting edge. Found out advantages and lacks of process of grinding down with the use of such knives. Measures are offered on diminishing of energy consumption of grindings down of meat.

*Key words:* knives of cutter, meat raw material, stuffing, workings organs, grindings down, cutting.

### Умовні позначення:

- $a$  – постійна величина;
- $\phi$  – кут повороту променя;
- $v_n$  – нормальна складова швидкості різання в розглядуваній точці;
- $v_t$  – тангенціальна складова швидкості різання в розглядуваній точці;
- $\omega$  – кутова швидкість обертання робочого органу;
- $k$  – параметр;
- $\psi$  – кут між променем і дотичною до кривої в розглядуваній точці;
- $\delta_0$  – кут ковзання леза;
- $\rho_{\min}$  – початковий радіус-вектор променя;
- $z$  – кількість ножів;
- $P_n$  – нормальна складова сили різання;
- $P_t$  – тангенціальна складова сили різання;
- $\eta$ ,  $\eta_1$  – коефіцієнти втрат при передаванні крутного моменту;
- $P_1$  – сила, яка виникає при розділенні матеріалу;
- $P_2$  – сила, яка виникає при проникненні ножа у матеріал;
- $P_3$ ,  $P_4$  – сили тертя та адгезії, які виникають на ріжучій поверхні й паралельних площинах ножа;
- $\sigma_{\max}$  – максимальне напруження зсуву для фаршу;
- $\beta$  – кут загострення леза;
- $f$  – коефіцієнт тертя для фаршу та ножа;
- $S$  – площа бічної поверхні розглядуваного сектора ножа (обмежена між променями та спіраллю леза);
- $A$  – адгезій на здатність фаршу.

**Постановка проблеми.** Тонкоподрібнений фарш є основною складовою для виготовлення більшості ковбасних виробів, а також паштетів та консерв. У даний час на м'ясопереробних підприємствах фарш переважно подрібнюють у кутерах і ножових подрібнювачах безперервної дії.

У кутерах фарш подрібнюється багатоножовими кутерними головками. Ножі у кутері можуть обертатися з різною швидкістю, залежно від потрібного ступеня подрібнення фаршу. При цьому якість фаршу залежить від [1]: ступеня загострення ножів, тобто гостроти ріжучої кромки; зазору між ножами і чашею кутера; коефіцієнта завантаження чаші; кількості доданої у чашу води; ступеня подрібнення фаршу при попередній обробці; кількості обертів кутерної головки; кількості обертів чаші; кількості ножів у кутерній головці.

Варто додати, що якість фаршу, тривалість подрібнення та енергоспоживання досить суттєво залежать від конструкції самих ножів, а саме від таких конструктивних особливостей: товщини леза ножа, чистоти поверхні ножа, форми різальної кромки та її кількості, площі бічної поверхні ножа [2].

Загальновідомо, що тонке подрібнення м'яса за допомогою серпоподібних ножів – досить енергоємний і малопродуктивний процес, оскільки при протіканні процесу на високих швидкостях ріжучому інструменту необхідно подолати значні сили міжмолекулярної взаємодії матеріалу, а також сили тертя та адгезії.

Мало дослідженою на сьогодні є можливість зменшення енергоспоживання ножових подрібнювачів за рахунок оптимізації форми ріжучої кромки леза робочого органу та зменшення площі контакту бічної поверхні ножа з фаршем. Тому актуальним питанням на сьогодні є пошук шляхів зменшення енергоємності процесу кутерування та покращення якості фаршу. З позиції ресурсозбереження, даний процес досліджений недостатньо. Ці недоліки призводять до нераціонального використання енергії, яка витрачається на подрібнення, зниження якості готової продукції. Питання енерго- та ресурсозбереження для економіки України в даний час і на найближчу перспективу будуть актуальними.

**Аналіз останніх результатів досліджень.** Урахування всіх факторів, які впливають на енерговитрати під час різання, має вирішальне значення при розробленні конструкцій робочих органів технологічного обладнання для подрібнення м'ясної сировини. Вирішення поставлених завдань можливе на основі ретельного вивчення суті процесів, що відбуваються під час подрібнення м'яса. Питанням подрібнення м'яса присвячені роботи О.І. Пелєєва, А.А. Іванова, Т.В. Чижікової, М.М. Кліменка, А.В. Горбатова, А.М. Познишева, А.Н. Дуди [2, 3, 4] та ін. Проблемі зменшення енергоспоживання присвячені також роботи [5, 6, 7]. Однак, як показує практика, процеси подрібнення м'ясної сировини досліджені недостатньо.

**Метою даної роботи** є встановлення закономірностей впливу форми леза ножа на енергоспоживання кутера.

**Матеріали і результати дослідження.** Відомо, що на ефективність різання впливає його кінематика, яка визначається швидкостями руху точок леза. Умови деформації м'ясної сировини, що відповідають необхідній якості подрібнення, визначають вимоги до конструктивних та геометричних параметрів різального інструменту. Деформація м'яса при різанні залежить від кута загострення ріжучої частини інструменту, кінематичних та динамічних характеристик системи машина – інструмент – матеріал, що впливають на ефективність подрібнення, оскільки вони зумовлюють витрати енергії на тертя і пластичні деформації [4].

Для теоретичного дослідження процесу подрібнення використано ножі з формою леза, виконаною по спіралі Архімеда, логарифмічній спіралі та евольвенті кола. Площу бічної поверхні ножів зменшено [5].

Ріжучі робочі органи мають серпоподібну форму у вигляді спіралі Архімеда, логарифмічній спіралі або евольвенти кола з ріжучою кромкою, загостреною під кутом  $16^\circ$  (рис. 1). На бічній поверхні ножа виконано профільний отвір.

Для робочого органу з лезом, виконаним по спіралі Архімеда, рівняння кривої, записане у полярних координатах, має вигляд

$$\rho(\phi) = a\phi \quad (1)$$

Для логарифмічній спіралі рівняння відповідно

$$\rho(\phi) = \rho_{\min} e^{k \cdot \phi} \quad (2)$$

де  $k = \text{ctg}(\psi)$  – параметр.

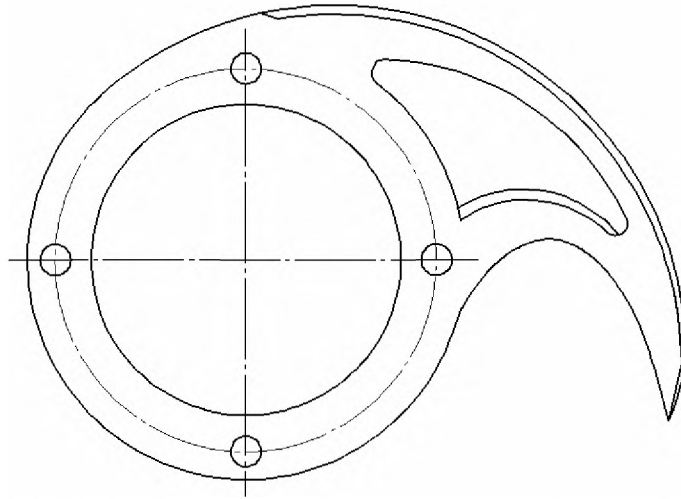


Рисунок 1 – Робочий орган подрібнювача періодичної дії з серпоподібним лезом та зменшеною площею бічної поверхні

Для евольвенти кола рівняння в полярних координатах має вигляд

$$\rho(\phi) = \rho_{\min} \phi \quad (3)$$

Довжину дуги спіралі Архімеда обчислюємо за формулою

$$b = a \cdot \int_0^{\phi} \sqrt{1 + \phi^2} d\phi \quad (4)$$

Для логарифмічної спіралі довжину дуги відповідно

$$b = \int_{\frac{\pi}{8}}^{\phi_{\max 2}} \sqrt{a^{2 \cdot \phi} + a^{2 \cdot \phi} \cdot (\ln(a))^2} d\phi \quad (5)$$

де  $a = \rho_{\min} \cdot e^k$  – введений параметр.

Відповідно для евольвенти кола

$$b = \int_0^{\phi} \rho_{\min} \phi d\phi \quad (6)$$

Кут ковзання леза виражений через кут повороту променя становить

$$\delta_o = \text{atan}(\phi) \quad (7)$$

Потужність, необхідна для різання [4],

$$N = z \cdot b \cdot \frac{(P_n \cdot v_n + P_t \cdot v_t)}{\eta \cdot \eta_1} \quad (8)$$

Загальновідомо, що

$$v_n = v \cdot \cos(\delta_o), \quad v_t = v \cdot \sin(\delta_o), \quad P_n = P \cdot \cos(\delta_o), \quad P_t = P_n \cdot \tan(\delta_o)$$

На м'язове волокно в процесі кутерування діє сила  $P$ , спрямована перпендикулярно радіусу обертання ножа. Ця сила складається з нормальної  $P_n$  і дотичної (тангенціальної)  $P_t$  складових. Співвідношення цих двох сил залежить від кута  $\delta_o$  між дотичною в даній точці леза і радіусом обертання ножа  $R$ . Очевидно, чим менший кут  $\delta_o$ , тим більшою буде нормальна складова різання  $P_n$ , тому що  $P_n = P \cos \delta_o$ . І навпаки,

якщо кут  $\delta_0$  збільшується, то нормальна складова сили різання зменшується, а дотична складова зростає, оскільки  $P_\tau = P \sin \delta_0$ .

Відомо, що дотична складова сили різання  $P_\tau$  сприяє подрібненню сполучної тканини, яка міцніша м'язевої тканини і її обробляти різанням важче.

Силу  $P$ , яка діє на ніж при різанні, в усіх випадках можна обчислювати за формулою [5]

$$P = P_1 + P_2 \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) + (P_{31} + P_{32}) \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + 2 \cdot (P_{41} + P_{42}) \quad (9)$$

Силу  $P_1$  можна визначити, знаючи радіус зкруглення різальної кромки та максимальне напруження міцності для матеріалу, що розрізається. Приймаючи, як припущення, що розподіл напружень по довжині леза рівномірний, можна записати залежність

$$P_1 = \int_{\frac{\beta}{2}}^{\pi - \frac{\beta}{2}} \sigma_{\max}(\sin(\beta))^2 \cdot b \cdot r \, d\beta \quad (10)$$

Силу  $P_2$  можна обчислити, знаючи напруження зсуву для фаршу

$$P_2 = \int_0^h \sigma_{\max} \cdot b \cdot K \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \, dh \quad (11)$$

Сили  $P_3$  та  $P_4$  визначаємо, як суму сил тертя ( $P_{31}$  і  $P_{41}$ ) та адгезії ( $P_{32}$  і  $P_{42}$ ).

Сили тертя  $P_{31}$  і  $P_{41}$  можна визначити за залежностями, знаючи площу їх дії:

$$P_{31} = \int_0^h \sigma_{\max} \cdot b \cdot K \cdot f \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \, dh \quad ; \quad (12)$$

$$P_{41} = 2 \cdot \int_0^S \sigma_{\max} \cdot K \cdot f \, dS \quad (13)$$

Сили адгезії  $P_{32}$  та  $P_{42}$  знаходимо, маючи адгезійну здатність фаршу  $A$  та площу контакту сировини з ріжучим інструментом:

$$P_{32} = 2A \cdot b \cdot h, \quad (14)$$

$$P_{42} = A \cdot S \quad (15)$$

На рис. 2 (а, б, в) побудовано ріжучі кромки відповідно: у формі спіралі Архімеда, логарифмічної спіралі, евольвенти кола.

Робоча частина ріжучої кромки для спіралі Архімеда починається з кута повороту променя  $\phi = \frac{\pi}{8}$  і закінчується на  $\phi = \frac{7\pi}{16}$ . Також змінюється величина відрізка  $\rho$ .

Для логарифмічної спіралі ці межі становлять від  $\phi = 0$  до  $\phi = \frac{7\pi}{8}$  і для евольвенти

відповідно від  $\phi = 0$  до  $\phi = \frac{11\pi}{16}$ .

Дані у математичну модель підставляємо для робочих органів, попередньо досліджених у подрібнювачі [6]. Підставляючи дані з рис. 2, отримуємо графіки залежності, зображені на рис. 3 і 4.

Для зображеного на рис. 1 ножа з лезом, побудованим по кривих рис. 2, проведено розрахунок розподілу сили та потужності по поверхні за наведеною математичною моделлю та побудовано графіки зміни цих показників по ріжучій кромці та бічних поверхнях.

Як бачимо, логарифмічна спіраль має найбільшу довжину ріжучої кромки. Далі за нею йдуть евольвента та спіраль Архімеда. Відповідно до цього і розподіл

навантажень по ріжучій кромці аналогічний, тобто найбільші силові фактори виникають на поверхнях ножа з лезом у формі логарифмічної спіралі, а найменші – з лезом у формі спіралі Архімеда. Розподіл силових факторів по евольвенті займає середнє місце на вказаних графіках.

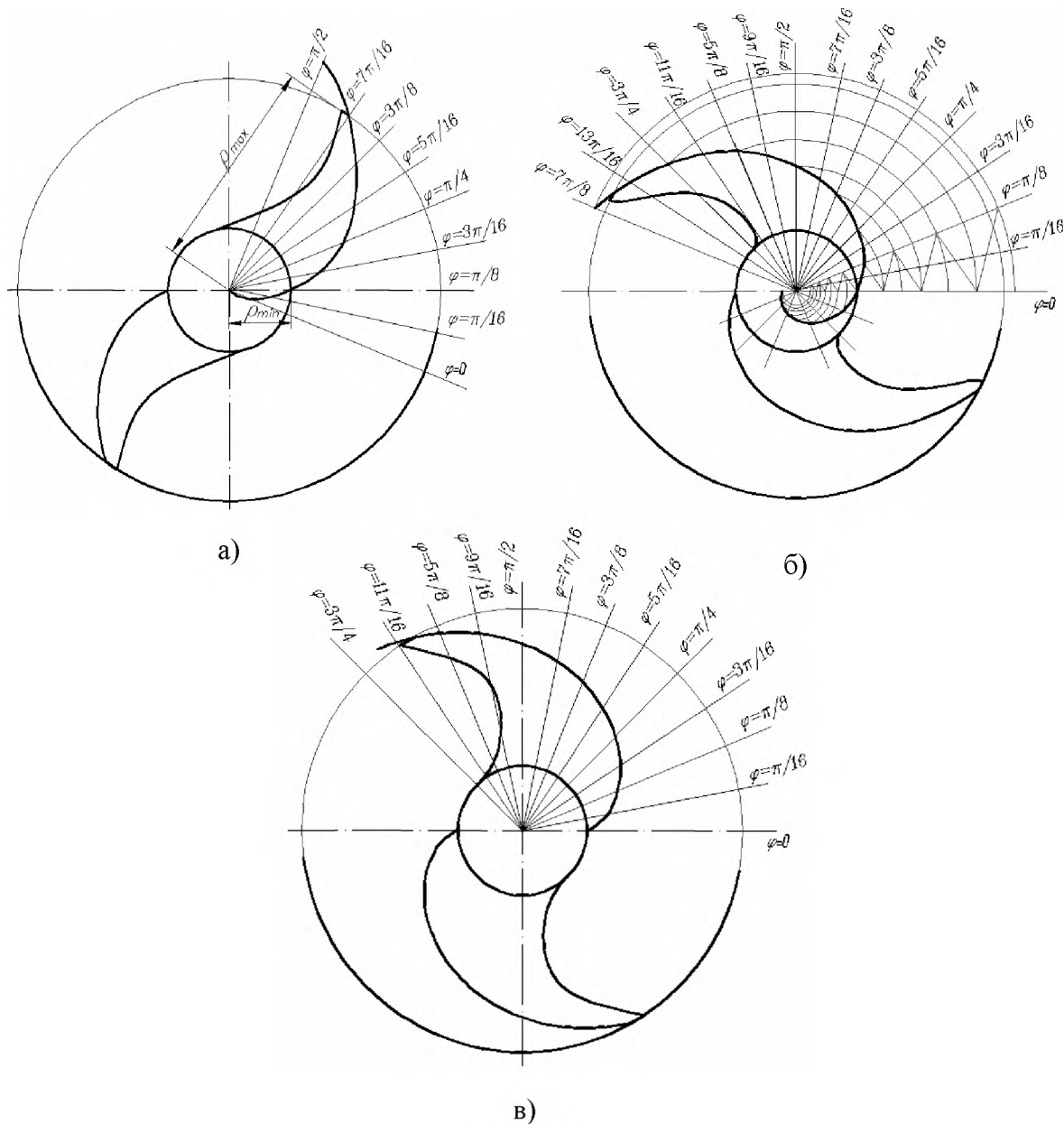


Рисунок 2 – Ріжуча кромка ножа побудована:

а) у формі спіралі Архімеда; б) у формі логарифмічної спіралі; в) у формі евольвенти кола

Отже, з точки зору енергозбереження відповідь однозначна. Найбільше енергоспоживання буде у кутера з робочими органами, ріжуча кромка яких виконана по логарифмічній спіралі; трохи менше – для кутера з евольвентними робочими органами; найменше – для подрібнювача з ножами, ріжуча кромка яких виконана по спіралі Архімеда.

Однак з точки зору якості подрібнення м'яса висновки можуть бути неоднозначними. Відомо, що сировина для подрібнення може бути різної якості і, відповідно до сорту, містити у своєму складі, крім м'язової тканини, ту чи іншу кількість сполучної та хрящової тканини, жиру, шкіри і навіть кісток.

Досвід експлуатації показав, що застосування ножів з формою леза у вигляді спіралі Архімеда та евольвенти доцільне при подрібненні м'яса з низьким умістом

сполучної та хрящової тканини, а використання ножів з формою леза у вигляді логарифмічної спіралі – для подрібнення м’яса з високим умістом сполучної тканини.

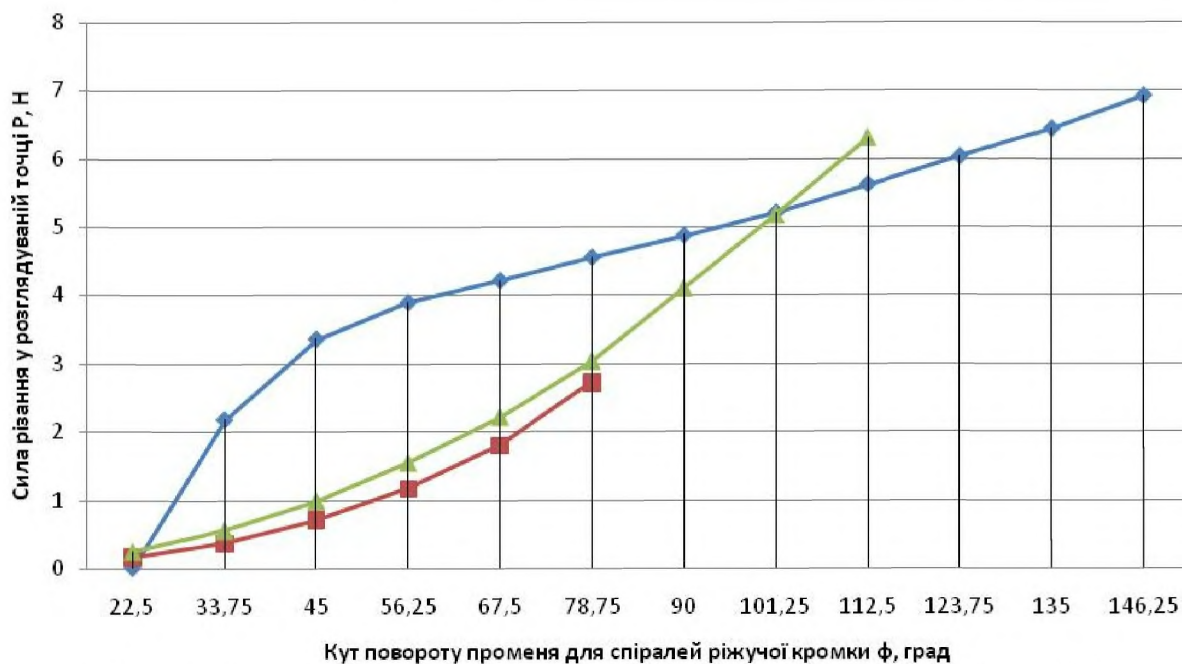


Рисунок 3 – Розподіл зусилля різання по довжині ріжучої кромки, побудованої по спіралі Архімеда (—■—), логарифмічній спіралі (—◆—) та евольвенти кола (—▲—)

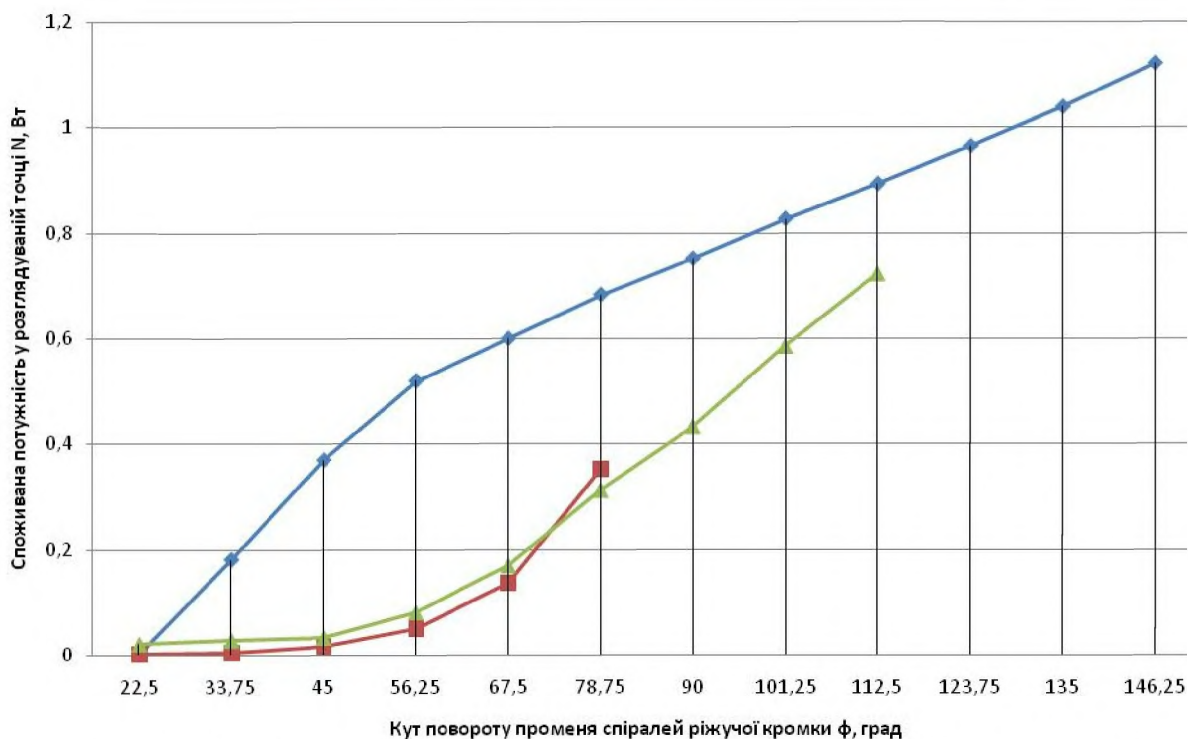


Рисунок 4 – Розподіл споживаної потужності різання по довжині ріжучої кромки, побудованої по спіралі Архімеда (—■—), логарифмічній спіралі (—◆—) та евольвенти кола (—▲—)

Встановлено [5], що мінімальна необхідна робота на різання затрачається, якщо ножі прямі і кут між дотичною до кола та лезом  $90^0$ , тобто різання рубаюче без тангенціальної складової. Теоретично таке різання є найбільш економічно вигідним, однак на практиці воно дає добрий результат лише при подрібненні м’яса I сорту (майже без умісту сполучної тканини) і лише при стовідсотковому загостренні леза. Незначне затуплення ріжучої кромки (яке відбувається вже через кілька хвилин кутерування) одразу ж погіршує якість подрібнення й підвищує енергоспоживання.

Відповідно, подрібнення м'яса з деяким умістом сполучної тканини при незначному затупленні ріжучої кромки є проблематичним для цих ножів, тому різання такими ножами у кутерах практично не застосовують.

Усе ж сировина для ковбасного виробництва є неоднорідною за своїм складом і вимагає наявності значної тангенціальної складової сили різання, що можливо при значному нахилі леза ножа чи застосуванні математичних кривих.

Найкращими у співвідношенні якості та енергоспоживання є ножі, у яких ріжуча кромка поєднана зі спіраллю Архімеда та логарифмічною спіраллю [7]. Таке поєднання покращує якість продукції та зменшує силові фактори, які діють на ніж. Для зменшення металомісткості ніж виконують зі зменшеною площею бічної поверхні пластини. Це рішення значно зменшує сили тертя, що діють на ніж у процесі подрібнення, внаслідок чого зменшується зношування ножа, значно знижується нагрівання фаршу, покращуються техніко-економічні показники машини в цілому.

На дані конструкції ножів оформлено деклараційні патенти на корисну модель [8, 9]. Перевагою запропонованих ножів є не тільки їх універсальність, але й значне зменшення енергоспоживання машини та скорочення тривалості кутерування.

Таким чином, при подрібненні у кутерах м'ясосировини різних сортів необхідний індивідуальний підхід до вибору ріжучого інструмента. Це може дати суттєву економію електроенергії і робочого часу на м'ясопереробних підприємствах, скоротити виробничі втрати і зменшити собівартість готової продукції.

**Висновки.** На основі дослідження та аналізу розподілу силових факторів по поверхні ножа встановлено, що найменші сили різання виникають на поверхнях робочих органів з лезом, виконаним по спіралі Архімеда. Відповідно для ножів з лезом у формі евольвенти та логарифмічної спіралі ці сили зростають. При цьому зростає і енергоспоживання подрібнювача. З боку якості подрібнення на основі проведених досліджень [6] спостерігається протилежна картина. Отже, для забезпечення оптимальної якості подрібнення та невисокого енергоспоживання рекомендується використовувати ножі з лезом, виконаним поєднанням двох і більше математичних кривих [8, 9], або ж постійно підбирати та замінювати ножі відповідно до складу подрібнюваної сировини.

В перспективі планується подальше дослідження процесів, що відбуваються під час подрібнення м'ясної сировини з внесенням відповідних коректив у математичну модель для найбільш адекватного їх висвітлення.

#### **Література**

1. Топаж Х.И. Модернизация куттера ЯЗ-ФКШ / Х.И. Топаж // Мясная индустрия. – 2003. – №8 – С. 33.
2. Пелеев И.О. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности / И.О. Пелеев. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 519 с.
3. Иванов В.И. Новые режущие устройства куттеров / В.И. Иванов [и др.]. – М.: Колос, 1986.
4. Клименко М. М. Технологическое оборудование для тонкого измельчения мяса / М. М. Клименко, А.В. Горбатов. – М.: Пищ. пром-сть, 1972. – 236 с.
5. Закалов О.В. Універсальний енергозберігаючий ніж для кутерів періодичної дії / О.В. Закалов, А.І. Бортник // Вісник ТДГУ. – 2004. – №1.
6. Закалов О.В. Дослідження процесу подрібнення м'яса у ножовому подрібнювачі періодичної дії / О.В. Закалов, А.І. Бортник // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: Східноукраїнський національний університет ім. В. Даля, 2008.
7. Закалов О.В. Оптимізація форми і розмірів кутерних ножів з метою підвищення їх довговічності та зменшення енергоспоживання / О.В. Закалов, А.І. Бортник // Збірник наукових праць «Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі». – Харків: Харківський державний університет харчування і торгівлі, 2008.
8. Декларац. пат. Корисна модель «Ніж для кутера» / Закалов О.В., Бортник А.І. Циць В.М. – №20041210970 кл. В02С18/20 від 05.03.2005.
9. Декларац. пат. Корисна модель «Ніж для кутера» / Закалов О.В., Бортник А.І. – №27741 кл. В02С18/20 від 12.11.2007.

*Одержано 05.05.2010 р.*