МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

УДК 664-4/ 66-963

Сухенко В.Ю.

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИ ПОДРІБНЕННІ СИРОВИНИ ДЛЯ КОВБАСНИХ ВИРОБІВ

Запропонована методика аналітичної оцінки силових і енергетичних показників процесу вільного різання м'яса, наприклад, в кутперах.

Ключові слова: *різання м'яса, ніж, кут загострення, сили різання, оптимізація.*

Постановка проблеми. У складі агропромислового комплексу України м'ясна промисловість є однією з ведучих галузей. Значний об'єм серед готових до споживання м'ясопродуктів займають ковбасні вироби. Під час приготування фаршу для ковбас м'ясо піддають інтенсивному ручному і машинному обробленню. Ряд конструкцій м'ясоподрібнюючих машин запозичений з інших галузей промисловості, де необхідне подрібнення, наприклад, мінеральної сировини [1-3].

Інтенсивна механічна дія робочих органів м'ясоподрібнюючих машин на сировину призводить до втрат нативних властивостей м'яса і навіть до його фізико-хімічної деструкції [3,4]. Фарш ковбас, отриманий за допомогою таких машин має рихлу консистенцію, спонукає жирово-водяні підтікання в батонах при термічній обробці, а готовий продукт має незадовільні органолептичні показники. Тому при конструюванні м'ясоподрібнювальних машин потрібно враховувати біологічне походження м'яса і його складну фізико-хімічну будову. У зв'язку з цим робочі органи м'ясорізальних машин повинні мати геометричні параметри і забезпечувати такі режими подрібнення, які б не впливали на хімічний склад сировини і подрібнювали її високоякісно, з необхідним ступенем дисперсності та при мінімальними затратами енергії.

Значна частина енергії, яка витрачається на процес подрібнення, розсіюється в продукті і перетворюється у теплоту, яка провокує зміни нативних властивостей м'ясопродуктів. Білки м'ясного фаршу частково денатуруються, інколи коагулюються, що негативно впливає на якість готового продукту [3,5]. Тому розробка м'ясоподрібнюючих машин має проводитись на підґрунті детальних досліджень процесів різання м'яса з урахуванням діючих силових та енергетичних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій процесів різання м'яса [1,3-6,14,15] показує, що більшість з них направлені на оптимізацію загальних енергетичних показників процесу для конкретних умов роботи м'ясоподрібнюючих інструментів. Разом з тим установлено [1,3-5], що складний процес різання м'ясопродуктів можна розділити на ряд більш простих: руйнування структури сировини, деформування продукту в зоні різання, тертя інструментів між собою і по сировині та ін. Якраз детальне вивчення основних елементарних складових процесу різання сприятиме поглибленню знань в області біологічної сировини і більш цілеспрямованій роботі над створенням та удосконаленням м'ясорізальних машин з метою впровадження енергозберігаючих технологій приготування високоякісних фаршів для ковбас.

Мета роботи полягає в аналітичній оцінці енергетичних показників вільного різання м'яса, зокрема в куттерах, і визначення напрямів подальшого удосконалення робочих органів

подрібнюючих машин для зменшення енергоспоживання і забезпечення високої якості фаршу.

Методика досліджень ґрунтується на аналітичному узагальненні знань з областей фізики твердого тіла, фізико-хімічної механіки матеріалів, теорії різання органічних і синтетичних матеріалів для оцінки впливу вагомих чинників на енергетичні показники різання м'ясної сировини.

Результати аналітичних досліджень. В процесі різання м'ясопродуктів до різальних органів машини безперервно підводиться енергія від її приводу. Таким чином, у локальну область взаємодії ножа і продукту підводиться зовнішня сила і таку систему «ніж-продукт» не можна вважати замкнутою. Крім того відбувається значна дисипація енергії в прилеглих до зони різання об'ємах продукту. Це значить, що до відокремленої системи «ніж-продукт» не може бути застосований закон збереження енергії [7]. Разом з тим різання лезом можна подати як процес утворення тріщини, бокові поверхні якої навантажені розподіленим напруженням, яке зумовлене силами, виникаючими при дії клина ножа на продукт. Для такої тріщини можна застосовувати умови класичної рівноваги та рівняння імпульсів [8,9]. Сили, що виникають при контакті клиноподрібного інструменту з продуктом, під час його руху виконують деяку роботу і передають енергію розрізаним частинкам м'яса.

Згідно з теоремою «живих» сил для суцільного середовища повний приток зовнішньої енергії можна подати як суму робіт для виконання елементарних процесів, супроводжуючих подрібнення (розривання структурних зв'язків, деформування, тертя та ін.).

Виходячи з аналізу рівнянь, приведених у монографії Л.С. Мороза [10], що описують подрібнення твердих тіл, а також на підґрунті інших досліджень [3,11] можна зробити висновок, що загальна робота, що витрачається на різання м'яса, є сумою таких складових:

$$\sum_{i=1}^{5} dA = dA_1 + dA_2 + dA_3 + dA_4 + dA_5, \qquad (1)$$

де dA_1 - елементарна робота на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту;

dA_2 - елементарна робота на в'язкопластичну деформацію продукту, розташованого в зоні радіуса округлення різального леза інструмента перед розрізом;

dA_3 - елементарна робота на зміщення боковин розтину і деформування продукту поблизу цих боковин;

dA_4 - елементарна робота на переборення сил тертя інструмента по боковинах розтину;

dA_5 - елементарна робота на надання кінетичної енергії відрізаним кускам продукту.

Очевидно, що елементарна робота dA_5 виконується лише при різанні твердих м'ясопродуктів (наприклад заморожених), коли подрібненні куски викидаються з зони різання з деякою швидкістю.

Роботу на переборення сил зчеплення структурних зв'язків продукту можна визначити зі співвідношення:

$$A_1 = \sum_{i=1}^{n} dA_1 = \int_0^l \int_0^\tau \sigma_H(l) \cdot dl \cdot V_n \cdot d\tau, \qquad (2)$$

де $\sigma_H(l)$ - питоме зусилля розривання структурних зв'язків, Н/м;

l – довжина різального леза, м;

V_n – швидкість впровадження різального леза в продукт, м/с;

τ – швидкість впровадження різального леза в продукт, м/с.

За міру величини питомого зусилля руйнування структурних зв'язків прийнята середня інтегральна величина зусилля розривання структурних зв'язків, яка може бути найбільш точно визначена емпіричним шляхом. Але в самій природі його визначення закладено надзвичайно багато чинників (ступінь затуплення різального інструменту, його форма, шорсткість поверхні тощо), які дозволяють провести розрахунки лише для конкретної ситуації і за наявності експериментальних даних.

Швидкість впровадження інструмента в продукт може бути постійною по всій довжині леза і тоді процес схожий на рубання, або змінною при деяких видах ковзного різання.

При ударних режимах взаємодії різального інструмента з продуктом сила в зоні контакту зростає скачкоподібно (рис. 1).

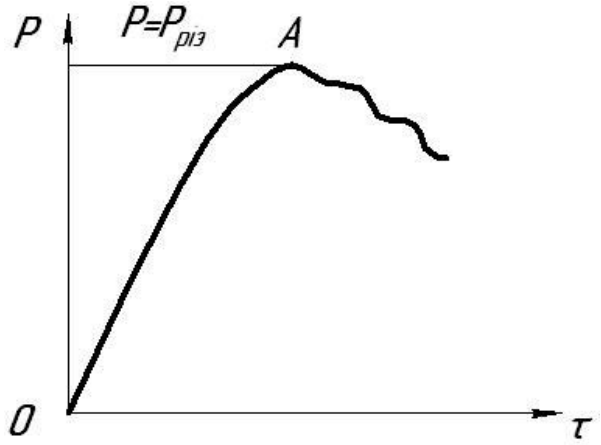

Рис. 1. Зростання зусилля при ударній взаємодії інструмента з продуктом

Для наближеної оцінки зусилля в довільний момент пере різання продукту дільницю наростання сили ОА можна апроксимувати четвертою частиною синусоїди гармонічного закону злитної сировини [12]

$$P = P_0 \cdot \sin \omega t \tag{3}$$

де $P_0 = \sigma_H(l) \cdot l,$ - величина сили різання, Н;

$\sigma_H(l)$ - питоме зусилля різання, Н/м;

l – довжина різального леза, що приймає участь у різанні, м;

ω – поточна величина кутової швидкості, рад/с.

Враховуючи, що девіатор тензора напружень при деформуванні в'яко-пружніх тіл пропорційний девіатору тензора переміщень [2,13] будемо вважати, що переміщення таких тіл при деформуванні перед перерізанням також має гармонічний характер, а тому

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega t - \varphi), \tag{4}$$

де x_0 – шлях, який проходить лезо при зануренні його в продукт перед перерізанням;

φ – відставання деформації від фази росту сили.

ω – поточна величина кутової швидкості різального леза, рад/с.

Робота, яку виконує гармонічна сила на малому переміщенні dx дорівнює $P \cdot dx$, або

$$P \cdot \frac{dx}{dt} \cdot dt.$$

Очевидно, що робота на попередню деформацію продукту перед пере різанням при гармонічному законі зміни сили різання дорівнює:

$$A_2 = \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot \sin\omega t \cdot x_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot dt =$$
$$= P_0 \cdot x_0 \cdot \int_0^{\pi/2} \sin\omega t \cdot \cos(\omega t - \varphi) \cdot d(\omega t) = \tag{5}$$
$$= \int_0^{\pi/2} P_0 \cdot x_0 \cdot \sin\omega t \cdot (\cos\omega t \cdot \cos\varphi + \sin\omega t \cdot \sin\varphi) \cdot d(\omega t)$$

Враховуючи, що $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$ та інтегруючи рівняння (5) по частинах отримаємо: $A_2 = \frac{\pi}{4} \cdot P_0 \cdot x_0 \cdot \sin\varphi.$

Величина φ постійна для заданих режимів різання, але вона залежить від швидкості взаємодії різального леза з продуктом. За допомогою метода накатаних сіток [3] було встановлено, що для статистичних режимів різання $\varphi = 90°$, а зі зменшенням швидкості різання φ поступово зменшується і при переміщенні гострого леза з швидкістю більшою за 3…5 м/с величина φ наближається до нуля $(\varphi \approx 0)$.

Робота по ущільненню продукту перед перерізанням є змінною величиною. Вона найбільша при статичних режимах різання, коли величина деформації сягає найбільшого значення, і зменшується при збільшенні швидкості різання [1,14,15]. Крім того, величина зовнішньої сили достатня для перерізання продукту залежить від ряду чинників, зокрема від радіуса заокруглення різального леза. Експериментально установлено [1,3], що величина зусилля різання при впровадженні різального леза у продукт поступово збільшується до забезпечення руйнування структурних зв'язків. Робота цієї сили може бути знайдена із співвідношення:

$$A_2 = \sum_{i=1}^{n} dA_2 = \int_0^{\pi} \sigma_H(\rho, l) \cdot V_n \cdot d\tau \cdot dl, \tag{7}$$

де $\sigma_H(\rho, l)$- питома величина лінійної сили пере різання, Н/м;

τ - термін занурення різального леза до пере різання структурних зв'язків продукту за даних режимів, с

l – довжина різального леза, м;

ρ – радіус заокруглення леза інструменту, м.

Робота на переміщення боковин продукту при перерізанні в основному витрачається на деформування прилеглих до зони різання об'ємів. Величина цієї роботи визначається добутком сил, розподілених по робочих гранях клина різального леза, на величину прилеглих до цих граней поверхонь розтину:

$$dA_3 = P_{ij} \cdot V_i \cdot ds \cdot d\tau,$$

або $$A_3 = \oiint_S \overline{P_n} \cdot \overline{V_i} \cdot d\tau \cdot ds = \oiint_S P_{ij} \cdot \overline{n_j} \cdot \overline{V_i} \cdot ds \cdot d\tau, \quad (8)$$

де $\overline{V_i} \cdot d\tau$ - величина переміщення поверхні розтину;

ds - елементарна площа на робочій грані клина;

$\overline{P_n} = P_{ij} \cdot n_j$ - величина напружень вподовж нормалі до бокової грані, викликаючих переміщення поверхні розтину.

Величина роботи на переміщення боковин розтину продукту у загальному випадку дорівнює роботі сил, затраченій на деформування об'єму продукту, що прилягає до зони розтину [7]:

$$A_3 = \oiiint_V P_{ij} \cdot \xi_{ij} \cdot d\tau \cdot dV, \quad (9)$$

де ξ_{ij} - тензор швидкостей деформацій в об'ємі *V*;

$\xi_{ij} \cdot d\tau$ - тензор деформацій в об'ємі *V*.

Враховуючи, що час релаксації напружень значно більший за час контакту інструмента з продуктом, умовно вважаємо, що сили стиснення м'ясопродукту лезом інструмента залишаються постійними при подальшому (після занурення леза у продукт) русі різального інструмента у в'язко-пластичному середовищі.

Очевидно, що розподілені сили P_{ij} викликають при зміщенні бокових поверхонь різального клина відносно продукта сили тертя, які також виконують деяку роботу:

$$A_4 = A_4^{'} + A_4^{''}, \quad (10)$$

де $A_4^{'}$ - робота сил тертя продукту по робочих гранях леза;

$A_4^{''}$ - робота сил тертя продукта по бокових гранях тіла різального інструмента.

Або $$A_4 = 2\left(\oiint_{S_1} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_1 + \oiint_{S_2} f \cdot P_{ij} \cdot n_j \cdot V_i \cdot d\tau \cdot dS_2 \right), \quad (11)$$

де S_1, S_2 - площі, відповідно, бокової грані леза і бокової поверхні тіла різального інструмента;

$f \cdot P_{ij} = \sigma_\tau$ - інтенсивність сил тертя ковзання.

Очевидно, що площі S_1 і S_2 залежать від геометричних параметрів інструмента, а довжина $V_i \cdot d\tau$ взаємного контакту різального інструменту і продукту визначається з урахування площі перетину продукту. Величина P_{ij} також може бути визначена експериментально. Сили тертя легко визначаються дослідним ляхом в умовах, що відповідають умовам тертя при різанні.

Робота на надання кінетичної енергії відрізаним шматкам продукту визначається з урахуванням їх маси і швидкості руху:

$$A_5 = \iiint\limits_V dA_5 = \iiint\limits_V m_i \cdot V_i \cdot dV \cdot dV = mV_0^2/2, \quad (12)$$

де V_0 - швидкість центра маси відрізаного шматочка;

m - маса відрізаного шматочка продукту;

V_i - швидкість руху і-го шматочка;

V - об'єм шматочка.

Треба пам'ятати, що кінетична енергія окремим кусочкам продукту передається при подрібнення крихких тіл, наприклад, замороженого м'яса.

Висновки. При різанні м'ясопродуктів різальний інструмент виконує роботу, пов'язану з попереднім деформуванням сировини, розриванням її структурних зразків, зміщенням поверхні розрізання від площини різання і всі ці елементарні процеси супроводжуються тертям продукту по поверхнях інструментів. Очевидно, що кожний процес впливає не лише на фізико-хімічні властивості продукту, але і на трансформацію геометричних параметрів інструментів та кінетику різання. Причому вплив кожного з цих чинників на всі складові виконуваної роботи далеко неоднозначний.

Тому для оптимізації роботи м'ясорізальних машин, інструменти яких здійснюють вільне різання м'яса, по кількості витраченої на різання енергії необхідно аналізувати вплив кінетичних і геометричних параметрів на кожну складову виконаної інструментом роботи та впровадити оптимізацію процесу за сумарними витратами роботи, або енергії. Не менш важливим показником є якість подрібнення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Пелеев А.И. Технологическое оборудование предприятий мясной промышленности. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 519 с.
2. Гольберг И.И. Механическое поведение полимерных материалов. – М.: Химия, 1970. – 190 с.
3. Технологія м'яса і м'ясних продуктів: Підручник / М.М. Клименко, Л.Г. Віннікова, І.Г. Береза та ін.; За ред. М.М. Клименка. – К.: Вища освіта, 2006. – 640 с.
4. Віннікова Л.Г. Теорія і практика переробки м'яса. – Ізмаїл: СМНЛ, 2000. – 172 с.
5. Корнюшко Л.М. Оборудоване для производства колбасных изделий. Справочник. – М.: Колос, 1993. – 304 с.
6. Машини та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, Д.С. Чубов та ін.; За ред. О.В. Дацишина. – К.: Вища освіта, 2005. – 159 с.
7. Седов Л.И. Механика сплошной среды. – М.: Наука, т.1, т.2, 1976. – 576 с.
8. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругости пластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 504 с.
9. Слепян Л.И. Механика трещин. – Л.: Судостроение, 1981. – 296 с.
10. Мороз Л.С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
11. Чижова Т.В. Машины для измельчения мяса и мясных продуктов. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 302 с.
12. Приборы и системы для измерения вибрации, шума, удара. Справочник. В 2-х кн. Под ред. В.В. Клюева. – М.: - Машиностроение, кн.1, 1978. – 448 с.
13. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. Пер. с англ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1963 – 535 с.
14. Сухенко Ю.Г., Некоз О.І., Стечишин М.С. Технологічні методи забезпечення довговічності обладнання харчової промисловості. – К.: Елерон, 1993. – 107 с.
15. Сухенко В.Ю., Таран В.М., Сухенко Ю.Г. Застосування плазмового напилення для підвищення довговічності м'ясорізальних вовчків // Харчова промисловість. Міжвідомчий тематичний наук. зб. – К.: УДУХТ, вип. 45, 2000. – С. 229-234.

Сухенко В. Ю.

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПОКАЗНИКИ ПРОЦЕСУ ВІЛЬНОГО РІЗАННЯ М'ЯСОПРОДУКТІВ ДЛЯ КОВБАСНИХ ВИРОБІВ

Предложена методика аналитической оценки силовых и энергетических показателей процесса свободного резания мяса, например, в кутперах.

Ключевые слова: *Резание мяса, нож, угол заточки, силы резания, оптимизация.*

V. Sukhenko

POWER INDEXES OF PROCESS OF THE FREE CUTTING ARE MEAT OF PRODUCTS FOR SAUSAGE WARES

The method of analytical estimation of power and power indexes of process of the free cutting of meat is offered, for example, in cutter.

Keywords: *Cutting of meat, knife, sharpening corner, cutting forces, optimization.*

Рецензент: Тупкало В. Н., д.т.н., проф.,
Київський інститут інтелектуальної власності
і права Національного університету «Одеська
юридична академія», м.Київ