

Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

ISSN 2306-8744

DOI: 10.37128/2306-8744-2024-1

Вібрації в техніці та технологіях



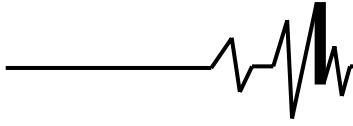
Всеукраїнський науково-технічний журнал

Ukrainian Scientific & Technical Journal

Вібрації в техніці та технологіях

№ 1 (112)

Вінниця 2024

**ВІБРАЦІЇ В
ТЕХНІЦІ ТА
ТЕХНОЛОГІЯХ**

Журнал науково-виробничого та навчального
спрямування Видавець: Вінницький національний
аграрний університет

Заснований у 1994 році під назвою “Вібрації в техніці та
технологіях”

Свідоцтво про державну реєстрацію засобів масової
інформації

КВ № 16643-5115 ПР від 30.04.2010 р.

Всеукраїнський науково-технічний журнал “Вібрації в техніці та технологіях” / Редколегія: Калетнік Г.М. (головний редактор) та інші. – Вінниця, 2023. – 1 (112) – 89 с.

Друкується за рішенням Вченої ради Вінницького національного аграрного університету (протокол № 10 від 22.04.2024 р.)

Періодичне видання включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук (Категорія «Б» Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. № 886)

Головний редактор

Калетнік Г.М. – д.е.н., професор,
академік НААН України, Вінницький
національний аграрний університет

Заступник головного редактора

Адамчук В.В. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Інститут механіки та
автоматики агропромислового виробництва
НААН України

Відповідальний секретар

Солона О.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Члени редакційної колегії

Булгаков В.М. – д.т.н., професор, академік
НААН України, Національний університет
біоресурсів і природокористування України

Дерезенько І. А. – к.т.н., доцент,
Національний університет «Львівська
політехніка»

Купчук І.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Матвєєв В.В. – д.ф.-м.н., професор,
академік НАН, Інститут проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України

Полєвода Ю.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Твердохліб І.В. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Токарчук О.А. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Цуркан О.В. – д.т.н. професор, Вінницький
національний аграрний університет

Яропуд В.М. – к.т.н., доцент, Вінницький
національний аграрний університет

Зарубіжні члени редакційної колегії

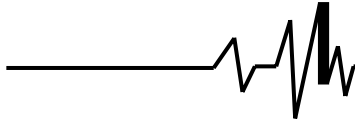
Максімов Джордан Тодоров – д.т.н., проф., Технічний Університет Габрово (Болгарія)

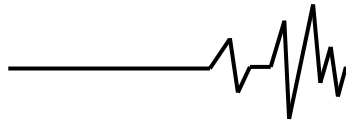
Технічний редактор **Зампій М.А.**

Адреса редакції: 21008, Вінниця, вул. Сонячна 3, Вінницький національний аграрний
університет, тел. 46 – 00– 03

Сайт журналу: <http://vibrojournal.vsau.org/>

Електронна адреса: vibration.vin@ukr.net

**З М І С Т****1. ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ТА МАШИН***Коробко Б.О., Бугров Д.М.***РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ
ДЕКОРАТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ5***Козаченко О.В., Волковський О.М.***МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРУЖНОГО СТОЯКА
ДИСКАТОРА З РЕГУЛЯТОРОМ ЖОРСТКОСТІ11***Бурлака С.А.***ВПЛИВ ВІБРАЦІЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРАННЯ..23****2. МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАТЕРІАЛООБРОБКА***Веселовська Н.Р., Возняк О.М., Богатюк М.О., Тихоненко С.В.***РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВАГИ РУДИ У СКІПІ ШАХТНОЇ
ПІДЙОМНОЇ УСТАНОВКИ.....28***Швец О.П., Коруняк П.С., Березовський С.А.***ПРИСТРІЙ ДЛЯ ПОДАЧІ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ В ПРОЦЕСАХ MIG/MAG ТА TIG
ЗВАРЮВАННЯ.....41***Fedirko P., Kubai M.***JUSTIFICATION OF NOZZLE PARAMETERS OF JET-TYPE WASHING MACHINES FOR
CLEANING AGRICULTURAL MACHINES AND UNITS.....47***Грабко В.В., Бартецький А.А., Чмих К.В.***КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ГАЛЬМІВНИХ КІЛ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ.....60****3. ПЕРЕРОБНІ ТА ХАРЧОВІ ВИРОБНИЦТВА***Гуць В.С., Полевода Ю.А., Ткачук І.В., Коваль О.А.***МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СОЛІННЯ М'ЯСА В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ БАРАБАНАХ72****4. ДУМКА МОЛОДОГО ВЧЕНОГО***Дубровіна О.О.***ВІБРАЦІЙНІ СУШАРКИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ
У ВИРОБНИЦТВІ.....81**

**Гуць В.С.**

д.т.н., професор

Полевода Ю.А.

к.т.н., доцент

Ткачук І.В.

студент

**Вінницький національний
аграрний університет****Коваль О.А.**

к.т.н., доцент

**Національний університет
Харчових технологій****Goots V.**Doctor of Technical Science,
Professor**Polievoda Y.**

Ph.D., Associate Professor

Tkachuk I.

student

**Vinnitsia National Agrarian
University****Koval O.**

Ph.D., Associate Professor

**National University of Food
Technology****УДК 641.512****DOI: 10.37128/2306-8744-2024-1-8**

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СОЛІННЯ М'ЯСА В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ БАРАБАНАХ

У статті приведено нові математичні моделі необхідні для встановлення оптимальних режимів масажування м'яса в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються. Наведено результати їх аналітичного дослідження потрібні для отримання солоних м'ясних виробів з підвищеним виходом та ніжною структурою.

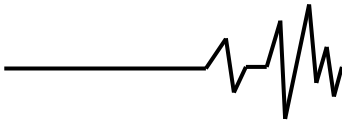
Наведено нові результати аналітично-теоретичних та експериментальних досліджень траєкторій руху шматків м'яса в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються, встановлено умови і раціональні режими використання їх при масажуванні різного за структурно-механічними властивостями м'яса, яке використовують у виробництві солоних м'ясних виробів. Доведено що обладнання, робочі органи якого мають форму барабана з гладкою обичайкою, наявністю в середині барабана пристроїв-активаторів різної форми, дозволяє прискорити процес масажування м'яса ударом при падінні з висоти. Отримані математичні моделі дають можливість розрахувати витрати енергії на масажування м'яса, позитивно впливати на технологію солоних м'ясних виробів.

Вперше отримані математичні моделі траєкторії руху шматка м'яса різною маси при падінні з висоти, з урахуванням адгезії його до металевої поверхні барабана. Аналітичні дослідження їх, з використанням методів символічної комп'ютерної математики, дали можливість встановити місце відриву шматка м'яса від обичайки, висоту падіння його в середині барабана та розрахувати енергію удару. Вона є основним критерієм оптимізації процесу масажування м'яса та інших технологічних процесів пов'язаних з використанням барабанних робочих органів в виробничій діяльності харчових підприємств. Запропоновані комп'ютерні методи графоаналітичного дослідження отриманих математичних моделей, дозволяють спростити проектування інноваційного обладнання для масажування м'яса, оптимізувати процес насичення його розсолоним та розрахувати витрати енергії на пом'якшення структури.

Ключові слова: механічні процеси, масажування м'яса, переміщення продукту в барабані, енергія масажування м'яса.

Постановка проблеми. У виробництві харчових продуктів широко використовують технологічне обладнання робочий орган якого має форму циліндричного барабану, що обертається повільно і, в більшості випадків, має в середині активатори різної форми та розмірів.

Конструкція горизонтального або нахиленого під невеликим кутом до горизонту барабана, дозволяє реалізувати велику кількість технологічних операцій рушійною силою яких є механічний вплив на різні харчові дисперсії



системи, які потрапляють в його середину, поведінку яких слід глибше дослідити.

Об'єктом дослідження є механічні процеси при солінні м'яса, теорія, механізм переміщення та деформування харчових структурованих дисперсних систем в барабанах, що повільно обертаються, а предметом дослідження є математичні моделі соління м'яса в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. При моделюванні і оптимізації процесів, які відбувається при обробленні харчових продуктів в барабанах що повільно обертаються з різною швидкістю в різних за розмірами барабанах, виникають значні труднощі визначення траєкторії руху шматка продукту у зв'язку зі зміною його структурно-механічних властивостей та сили прилипання до внутрішньої поверхні барабана. Це, в свою чергу, впливає на ефективність і якість технологічних процесів оснований на механічному, силовому деформуванні структурованих харчових дисперсних систем у формі шматків різної маси [1, 2, 10, 11].

Результати аналітичних і експериментальних досліджень довели, що принцип роботи технологічного обладнання з барабаними циліндричною або наближеною до циліндричної формою, активаторами різної форми, покладено в основу конструкцій машин для механічного деформування стисканням та ударом, зневоднення, переміщення, змішування, масажування, подрібнення, миття, сортування по фракціях різних подрібнених харчових продуктів [3].

Масажування м'яса в барабанах, що повільно обертаються, є складним технологічним процесом, який відбувається шляхом механічного його оброблення деформуванням, стисканням або ударом. Він потребує узгодження режимів обертання барабана, розташування різноманітних за формою пристроїв-активаторів закріплених в середині його, зі структурно-механічними властивостями продукту, вагою шматка [5].

Необхідною умовою ефективного використання робочого органу у формі барабана, що повільно обертається при масажуванні м'яса, є визначення траєкторії руху шматка в середині його. Вихід на його поверхню липких білкових речовин призводить до зміни сили адгезії на поверхні контакту м'яса з обичайкою барабана. Як наслідок, змінюється траєкторія руху різних за розмірами і реологічними властивостями шматків м'яса. При різних величинах сили адгезії та швидкостях обертання барабана відповідно змінюється і енергетична складова процесу масажування, яка характеризує ступінь структурно-механічних

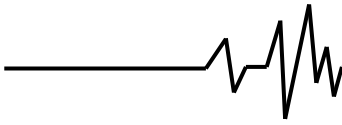
змін в м'ясі, величину насичення його розсоллом, показника пом'якшення структури - сили різання.

Технологічний процес масажування м'яса в обладнанні з барабаними робочими органами, що повільно обертаються, реалізують наступним чином. Сировина у вигляді шматків м'яса завантажується в середину барабана і, залежно від його форми, розмірів, швидкості обертання, наявності в середині барабана пристроїв – активаторів, структурно-механічних властивостей і багатьох інших факторів, обробляється шляхом переміщення і деформування з різною інтенсивністю залежно від технологічних потреб. Ефект масажування досягається завдяки деформуванню шматка, яке відбувається при контакті його з внутрішньою поверхнею барабану і конструктивними елементами в середині його: активаторами, рифленою або голчастою тендеризуючою поверхнею, полицями та з іншими продуктами, які завантажують в барабан разом з м'ясом. Це може бути сольовий розчин чи суміш спецій [2].

Деформування, яке отримують шматки м'яса, відбувається при перекочуванні, стисканні, підйомі його без зміщення вздовж осі обертання, чи зі зміщенням, і наступним падінням вниз барабана. Тому при масажуванні м'яса його структурно-механічні властивості змінюються. Ефективність обробки залежить, у першу чергу, від кількості енергії і швидкості її поглинання продуктом при його деформуванні. Зміна внутрішньої структури шматка м'яса у процесі масажування механічним деформуванням, впливає на вихід і якість готових солоних м'ясних виробів [8].

Коли м'ясо поглинає малу кількість механічної енергії, його внутрішня структура практично не руйнується або руйнується частково. Зі збільшенням кількості енергії, величина деформації і відповідно ступінь руйнування структури збільшуються, що в свою чергу призводить до інтенсифікації фільтраційно-дифузійних процесів насичення м'яса розсоллом, зміні в'язко-пружних реологічних характеристик його в результаті чого і відбувається зменшення жорсткості.

Коли шматки харчових продуктів знаходяться у барабанах, що повільно обертаються, виникають значні труднощі у визначенні траєкторій їх руху [4-7]. Для м'яса це пов'язано, перш за все, зі зміною адгезійних властивостей тобто здатністю прилипати до внутрішньої поверхні барабана, змінювати структуру та масу в зв'язку з втратою вологи або навпаки збільшенням її [7]. Залежно від вимог до якості і виходу солоних м'ясних продуктів, при механічній обробці різної м'ясної сировини, в барабанах у процесі масажування, можливі різні режими деформування, які залежать від траєкторії руху шматка продукту.



Для різних харчових продуктів, які потрапляють в барабани, що повільно обертаються, можливі наступні режими руху:

- переміщення шматка по внутрішній поверхні (обичайці), частковий підйом його з наступним, скочуванням або сповзанням в нижню частину барабана;
- підйом шматка і падіння його в нижню частину барабана на шар продукту, в розчин чи на оголену металеву поверхню;
- максимально можливий підйом шматка в крайню верхню точку барабана з наступним падінням його на металеву вигнуту, рифлену або голчасту поверхню.
- максимально можливий підйом шматка в крайню верхню точку барабана з наступним постійним притисканням його відцентровою силою до обичайки.

Теоретичні дослідження механізму масажування м'яса в будь яких за конструкцією барабанах, що повільно обертаються, засвідчили, що на траєкторію руху шматка впливають наступні основні фактори: швидкість обертання барабана, адгезія м'яса до внутрішній металевій поверхні, геометричні розміри барабана такі як діаметр та форма, наявність вид, форма і кількість активаторів. Рух продукту в гладких барабанах, що повільно обертаються, різних за вагою шматків харчових продуктів, без урахування адгезії, досліджений достатньо повно [9, 10]. Теоретично розраховано критичну швидкість обертання барабана при якій шматок будь якої маси і будь якого продукту, що знаходиться під дією відцентрової сили, не зможе відірватись від обичайки. Критична швидкість обертання барабана приблизно дорівнює:

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{R}} \approx 30 \sqrt{\frac{\sin \alpha}{R}} \quad (1)$$

де n – швидкість обертання барабана об/хв.; R – радіус барабана, м; α – кут розташування шматка на обичайці барабана, коли він знаходиться у верхній частині барабана першій чверті кола його обертання.

Мета роботи. Метою статті є математичне моделювання та дослідження траєкторій руху і енергії деформування шматків м'яса, різних за структурно – механічними властивостями та масою, залежно від конструктивних особливостей барабана і режимів обертання його. Використано методи системного аналізу, математичного моделювання і оптимізації механічних процесів з використанням символічної комп'ютерної математики, графічного представлення результатів дослідження.

Виклад основного матеріалу.

Рівняння (1) не враховує адгезійні властивості продукту і надає наближений результат при

виконанні розрахунків технологічних режимів процесу масажування. Для харчових продуктів з високою міцністю адгезії, які знаходяться в барабані і легко деформуються, розрахунки критичної швидкості обертання, визначення траєкторії руху, висоти падіння, енергії деформування різних за масою продуктів відсутні. За результатами аналітичних досліджень, слід вважати, що дослідження і математичне моделювання траєкторії руху різних продуктів в барабанах, що повільно обертаються, є актуальною задачею покращення якості готових виробів. Розв'язання її необхідне не тільки для моделювання процесу масажування м'яса, але і проектування нового технологічного обладнання, оптимізації багатьох технологічних процесів харчових виробництв.

Як показують дослідження [5] падіння шматка продукту масою m , для більшості харчових продуктів, буде можливе тільки з верхньої частини барабана після точки з координатою N (рис. 1). Для встановлення місця підйому до точки A і подальшого падіння з якої досягається оптимальний або необхідний технологічний ефект масажування, доцільно розглядати поведінку шматка масою m в зоні дуги $N - M$. В цьому випадку на шматок м'яса будуть діяти такі сили:

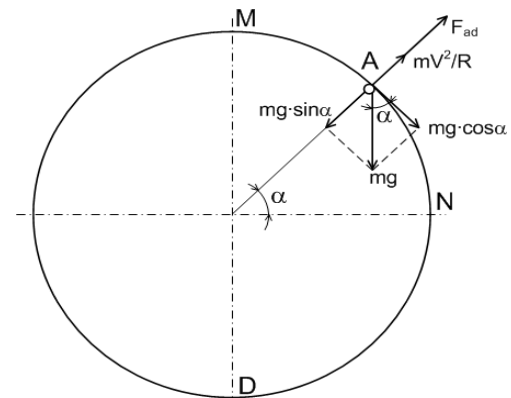
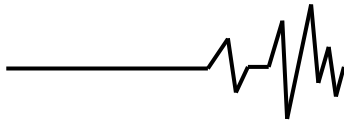


Рис. 1. Сили, що діють на шматок м'яса масою m в барабані, який повільно

обертається: $\frac{mv^2}{R}$ – відцентрова сила; $mg \sin \alpha$ і $mg \cos \alpha$ – проекції вектору сили тяжіння, F_{ad} – сила адгезії.

В інженерних розрахунках траєкторій руху продукту в барабані, коли має місце прилипання його до металевій поверхні, використовують експериментальні дані величини міцності адгезії – відношення сили відриву F_{ad} до площі контакту. Її розмірність n/m^2 . Експериментально міцність адгезії F_{ot} визначають на різних приладах при різних умовах відриву [6, 7]. Для побудови рівняння



силової рівноваги, необхідно знати величину сили адгезії, розмірність якої h . Приблизно зв'язок між міцністю адгезії F_{ot} і силою адгезії F_{ad} для шматків м'яса масою m можна знайти з рівняння:

$$F_{ad} = \frac{F_{ot} \cdot m}{h \cdot \rho} = F_{ot} \sqrt[3]{\frac{m^2}{\rho^2}}, \text{ Н} \quad (2)$$

де h – прийнятий розрахунковий розмір шматка м'яса масою m , ($h = \sqrt[3]{\frac{m}{\rho}}$, м), щільність м'яса $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$.

Для виконання інженерних розрахунків промислових масажерів побудовано рівняння рівноваги сил. У випадку, коли м'ясо почне відриватися від обичайки барабана, воно має вигляд:

$$\frac{mv^2}{R} + F_{ad} = mg \sin \alpha. \quad (3)$$

Рівняння (3) дає можливість розрахувати ефективну для отримання солоних м'ясних виробів високої якості швидкість ω обертання барабана в обертах за хвилину, з відомої залежності $v = \omega R$. Для того щоб шматок продукту відривався від обичайки барабана сила F_{ad} адгезії повинна буде менше $mg \sin \alpha - mv^2/R$.

Для вибору оптимальних режимів процесу масажування м'яса, виконано графоаналітичний аналіз математичної моделі (3). Сучасна комп'ютерна техніка дозволяє розрахувати числові значення характеристик, які необхідні для проектування різних за конструкцією масажерів та визначення ефективних режимів експлуатації існуючих, представити їх в графічному вигляді. Графічне представлення рівняння (3) дано на рис. 2 та рис. 3. На графіках легко дослідити зв'язок між кутом α відриву шматка м'яса від обичайки барабана, швидкістю ω його обертання та силою F_{ad} адгезії. Для шматка м'яса масою $m = 1 \text{ кг}$; при масажуванні його в барабані радіусом $R = 0,4 \text{ м}$; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, скориставшись символічною комп'ютерною математикою «Maple» [1], ($\text{plot3d}([mg \cdot \sin(\alpha)m\omega^2R], \alpha=2 \cdot \text{Pi}..0, \omega=5..1, \text{labels} = [\alpha, \omega, F_{ad}])$), побудовано 3D графік. Аналітичні дослідження його дозволили встановити зв'язок сили адгезії F_{ad} зі швидкістю ω обертання барабана та кутом α відриву шматка м'яса від обичайки. 3D графік дає можливість визначити оптимальні режими експлуатації різних барабанних масажерів при масажуванні м'яса різного за структурно-механічними властивостями.

Коли за технологічних потреб необхідно отримати солоні м'ясні вироби з підвищеним виходом (масою) і м'якої структури, при використанні масажера, барабан якого обертається з постійною швидкістю $\omega = 20 \text{ об/хв}$, необхідно знайти зв'язок між масою m шматка, силою F_{ad} адгезії та кутом α відриву.

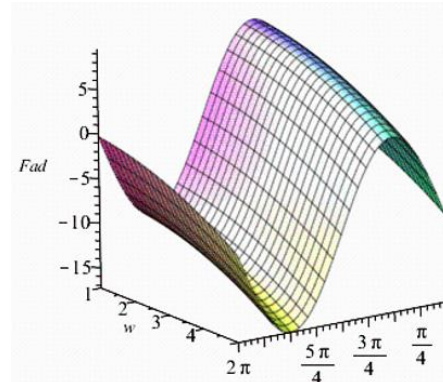


Рис. 2. Графік зв'язку сили адгезії F_{ad} шматка м'яса свинини нежирної вагою 1кг. зі швидкістю обертання барабана ω об/хв. ($\omega = 10$) та кутом відриву α м'яса від обичайки.

Для цього скориставшись командою $\text{plot3d}([\arcsin((Rm \cdot w^2 + F)/(gm))], F=0..2, w=5..1, \text{labels}=[F_{ad}, w, \alpha])$, побудовано новий 3D графік. На рис. 3 графічно показано зв'язок сили F_{ad} адгезії до нержавіючої сталі шматків м'яса свинини нежирної з різними масами m та кутами α відриву їх від обичайки барабана.

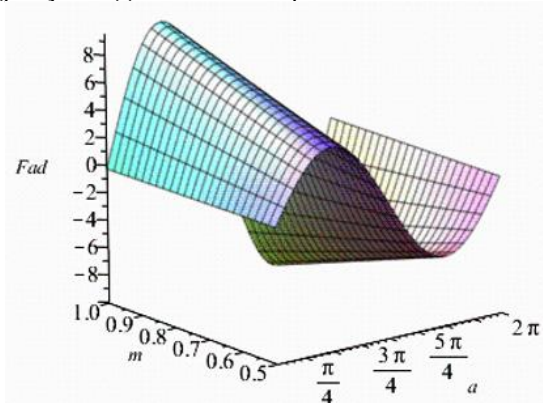
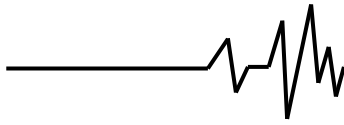


Рис.3. Графік зв'язку сили адгезії F_{ad} до нержавіючої сталі шматків м'яса свинини з різними масами m та кутами α відриву їх від обичайки при постійній швидкості $\omega = 20 \text{ об/хв}$ обертання барабана радіусом $R = 0,4 \text{ м}$.

Після відокремлення продукту від обичайки барабана, він падає під дією сили тяжіння в нижню частину масажера. Траєкторію падіння, знання якої необхідно для регулювання інтенсивності та тривалості масажування, запропоновано знаходити розв'язавши систему диференціальних рівнянь.



Вони описують рух шматка масою m в напрямку осі координат $x(t)$ та осі $y(t)$.

Розв'язок системи диференціальних рівнянь та графічне представлення траєкторії руху виконано за допомогою програми символічної комп'ютерної математики «Maple»

$$m \left(\frac{d^2}{dt^2} x(t) \right) = -k_1 \left(\frac{d}{dt} x(t) \right) \quad (4)$$

$$m \left(\frac{d^2}{dt^2} y(t) \right) = -k_1 \left(\frac{d}{dt} y(t) \right) - mg$$

де m – маса шматка; k_1 – коефіцієнт опору руху шматка; x та y – осі декартової системи координат в точці відриву; g – прискорення вільного падіння; t – тривалість падіння.

Візуально на рис. 4 представлено графік траєкторій падіння шматка м'яса масою 0,6 кг та шматка масою 1 кг, коли ($V_{ox}=V_o \cdot \cos\beta$; $V_{oy}=V_o \cdot \sin\beta$, де початкова V_o – швидкість руху шматка $V_o = \omega \cdot R = 0,4$ м/с; $k_1=0,05$; $g=9,8$; $\beta=90^\circ - \alpha$. Кут β це кут між дотичною до початку лінії траєкторії руху в точці відриву шматка м'яса та віссю x . Його розрахували з рівняння $90^\circ + \alpha + \beta = 180^\circ$.

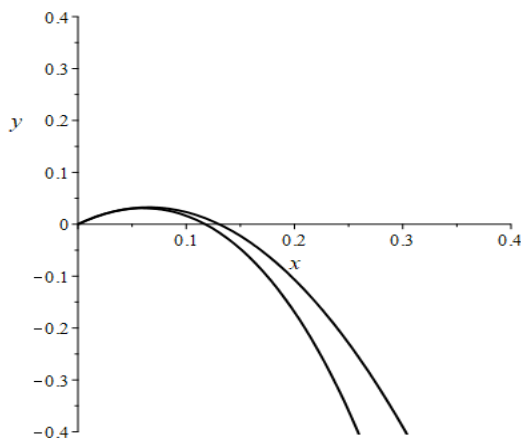


Рис. 4. Траєкторії падіння шматка м'яса свинини нежирної масою 0,6 кг (верхня крива) та шматка масою 1 кг (нижня крива) в барабані $R=0,4$ м, що повільно обертається з швидкістю 25 об/хв.

Провівши з точки 0,11, яка розташована на координаті x , коло радіусом що дорівнює радіусу барабана 0,4 м, отримуємо місце падіння шматка в нижню частину барабана.

В багатьох конструкціях масажерів для інтенсифікації процесу масажування м'яса, всередині барабана встановлюють додаткові пристрої у вигляді різноманітної форми пластин, голчастих поверхонь, спіралей та інших пристроїв. Швидкість обертання барабана, структурно-механічні властивості м'яса, маса впливають на інтенсивність масажування.

Технологічна ефективність масажування м'яса в барабанах, що повільно

обертаються, залежить від кількості енергії, яка витрачається на зміну структурно - механічних властивостей його при деформуванні. Важливим є інтенсивність поглинання енергії деформування шматком. Тобто повільне плавне деформування та деформування ударом по різному впливають на зміну структури м'яса, насичення його сольовим розчином.

Кількість енергії, яку отримує шматок м'яса при падінні з висоти h , дорівнює потенціальної енергії. Її величину можна знайти з відомої залежності:

$$An = m \cdot g \cdot h. \quad (5)$$

Рівняння (5) дає наближений результат так як не враховує траєкторію і умови руху шматка м'яса в барабані з різним рівнем завантаження. Для визначення кількості енергії, яку отримує шматок м'яса при падінні з висоти h , побудовано диференціальне рівняння вертикального падіння шматка масою m після відокремлення від обичайки барабана:

$$m \left(\frac{d^2}{dt^2} h(t) \right) + k \left(\frac{d}{dt} h(t) \right) = mg, \quad (6)$$

де h – висота падіння. Її знаходимо з графіка траєкторії руху шматка, величини радіуса барабана та t – тривалість падіння шматка, k – коефіцієнт, який характеризує умови падіння шматка м'яса в барабані.

За результатами експериментальних досліджень, для барабана діаметром до 1 м приймаємо $k=0,8$.

Розв'язок рівняння (6) при початкових умовах $h(0)=0, D(h)(0)=0$ має вигляд:

$$h(t) = g \left(\frac{t m}{k} - \frac{m^2 \left(1 - e^{-\frac{k t}{m}} \right)}{k^2} \right) \quad (7)$$

Графічно залежність (7) представлено на рис. 5.

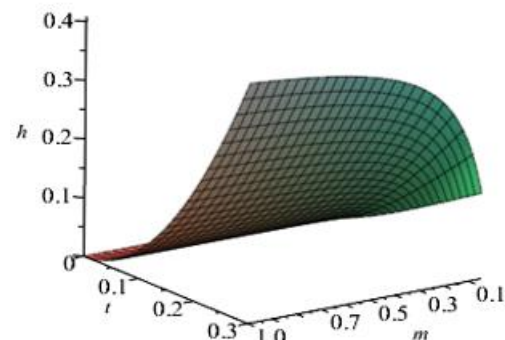
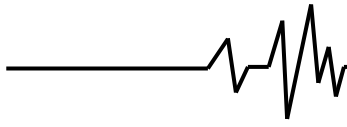


Рис. 5. 3D графік функціонального зв'язку між висотою h та тривалістю t падіння шматка м'яса масою m в нижню частину барабана.

З рівняння (7) та 3D графіка падіння шматка м'яса масою m , знаючи висоту h з якої він падає в нижню частину барабана, можна



розрахувати тривалість t падіння. Вона необхідна для розрахунку енергетичних характеристик процесу масажування м'яса, енергії деформування його.

Після диференціювання рівняння (7) отримаємо швидкість v руху шматка в момент контакту його з обичайкою барабана (рівняння 8) та, знайшовши другу похідну, прискорення w (рівняння 9):

$$\frac{d}{dt} h(t) = g \left(\frac{m}{k} - \frac{m e^{-\frac{kt}{m}}}{k} \right) \quad (8)$$

Виконувати інженерні розрахунки, візуально аналізувати математичні моделі швидкості v руху і прискорення w краще якщо представити їх у вигляді 3D графіка функціонального зв'язку між висотою h та тривалістю t падіння шматка м'яса масою m в нижню частину барабана. На рис. 6. показано 3D графік функціонального зв'язку між швидкістю v , тривалістю t падіння шматка м'яса масою m на обичайку барабана.

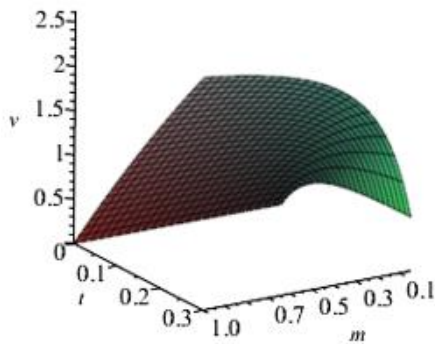


Рис. 6. 3D графік зв'язку між швидкістю v та тривалістю t падіння шматка м'яса масою m в нижню частину барабана.

Математична залежність для розрахунку прискорення w руху шматка м'яса має вигляд:

$$\frac{d^2}{dt^2} h(t) = g e^{-\frac{kt}{m}} \quad (9)$$

Візуальне представлення рівняння (9) у вигляді 3D графіка дано на рис. 7.

Силу, яка діє на шматок м'яса в результаті чого відбувається деформування його, знайдемо помноживши прискорення на масу.

$$Q = g e^{-\frac{kt}{m}} m \quad (10)$$

Її величину отримаємо, підставивши в вище наведене рівняння (10) значення k , m , t . 3D графік залежності $Q(m, t)$ має вигляд (рис. 8).

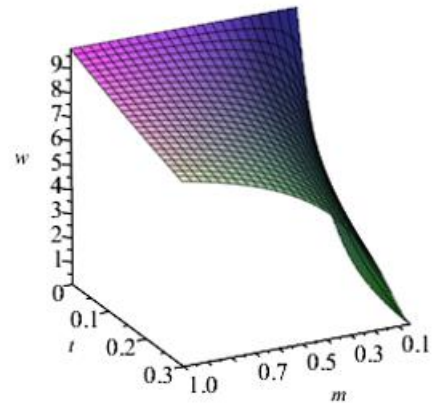


Рис. 7. 3D графік зв'язку між прискоренням w та тривалістю t падіння шматка м'яса масою m в нижню частину барабана.

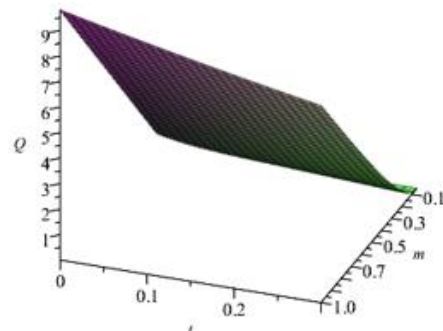


Рис. 8. 3D графік зв'язку між силою Q , яка діє на шматок м'яса масою m , тривалістю t падіння його в нижню частину барабана.

Енергію (роботу) деформування знайдемо використавши рівняння:

$$A := Q g \left(\frac{m t}{k} + \frac{m^2 e^{-\frac{kt}{m}}}{k^2} \right) \quad (11)$$

Графік залежності $A(m, t)$ має вигляд (рис. 9):

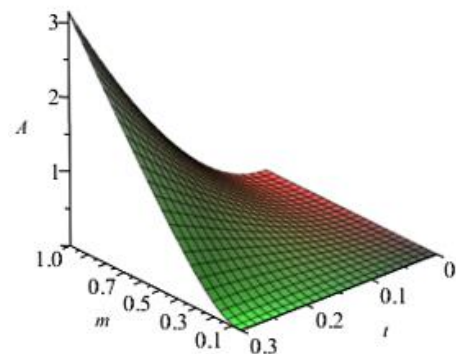
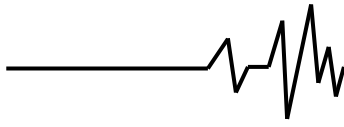


Рис. 9. 3D графік зв'язку між роботою (енергією) A деформування шматка м'яса масою m , тривалістю t падіння його в нижню частину барабана.

Витрати енергії (потужність N) на деформування шматка м'яса масою m ,



тривалістю t падіння його в нижню частину барабана знайдемо з рівняння:

$$N := g^2 e^{-\frac{kt}{m}} m \left(\frac{m}{k} - \frac{m \epsilon}{k} - \frac{kt}{m} \right) \quad (12)$$

Графік залежності $N(m,t)$ має вигляд (рис. 10):

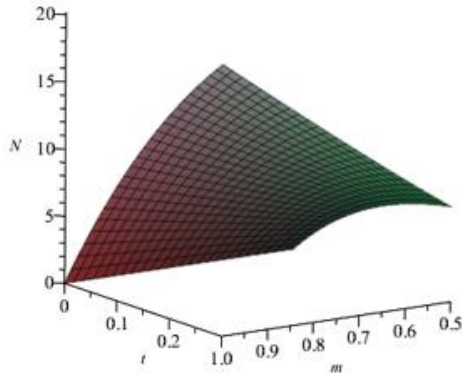


Рис. 10. 3D графік зв'язку між витратою енергії (потужність) N на деформування шматка м'яса масою m та тривалістю t падіння його в нижню частину барабана.

Аналітичні дослідження графіків $A(m,t)$ та $N(m,t)$ дозволяють визначити оптимальні режими масажування м'яса в різних конструкціях масажерів з робочими органами у формі барабанів що повільно обертаються, та впровадити інноваційну технологію виробництва солоних м'ясних виробів високої якості.

Висновок. Оброблення структурованих харчових продуктів у формі шматків різної маси в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються, поширений процес в харчових технологіях, він потребує вдосконалення на основі фундаментальних теоретичних досліджень при виконанні яких треба враховувати структурно-механічні властивості сировини і конструктивні особливості обладнання. З метою отримання солоних м'ясних виробів високої якості необхідні якісні математичні моделі для встановлення оптимальних режимів масажування м'яса в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються.

В роботі вперше представлено математичні моделі які описують траєкторії руху шматка м'яса різною маси, з урахуванням прилипання (адгезії) його до металевої поверхні барабана. Аналітичні дослідження їх з використанням методів символічної комп'ютерної математики, дали можливість встановити місце відриву шматка м'яса від обичайки в середині барабана, висоту падіння його та розрахувати енергію удару, яка є основним критерієм оптимізації процесу

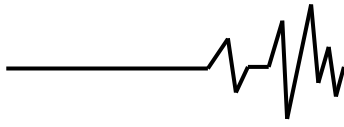
масажування м'яса та інших технологічних процесів пов'язаних з використанням барабанних робочих органів в виробничій діяльності харчових підприємств.

Список використаних джерел

1. Гуць В. С., Припик О. С., Коваль О. А. Комп'ютерні програми аналітичних розрахунків процесів харчових виробництв. *Наукові праці УДУХТ*. 2001. № 10 (2). С. 135–139.
2. Крижська Т. А. Розробка технології сиров'яленого суцільном'язового продукту із м'яса птиці: дис. ... канд. техн. наук : 05.18.04 / Крижська Тетяна Анатоліївна. Київ : Національна академія аграрних наук України інститут продовольчих ресурсів. 2016. 208 с.
3. Процеси і апарати харчових виробництв. Підручник / За ред. проф. І. Ф. Малежика. К.: НУХТ, 2003. 400 с.
4. Василенко П. М. Про рух матеріальних часток. *Праці лабораторії машинобудування та проблем сільськогосподарської механіки*. АН УРСР, т.1. К. 1950. С. 18–24.
5. Гуць В. С. Математичне моделювання руху харчових продуктів в барабанах, що повільно обертаються. *Наукові праці УДУХТ*. 2001. № 10. Ч.1. С. 124–125.
6. Гуць В. С., Коваль О. А. Визначення міцності адгезії. *Матеріали ІХ міжнародної науково-технічної конференції «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості»*. К.: НУХТ, 2005. С. 122–124.
7. Гуць В. С., Коваль О. А. Адгезія харчових продуктів в процесах пакування. *Національний університет харчових технологій. Упаковка*. 2006. № 2. С. 39–43.
8. Кишенько І., Мусієнко І. Удосконалення технології солоних м'ясних виробів з використанням функціонально-технологічних сумішей. *Харчова промисловість*. 2005. № 4. С. 24–27.
9. Marleen M. H. D. Arntz Modeling of particle segregation in a rotating drum. PhD thesis. Wageningen University. 2010. The Netherlands. 156 p.
10. Zeki Berk. Food Process Engineering and Technology. TECHNION. Israel Institute of Technology. 2009. 605 p.
11. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Коваль О. А. Визначення структурно-механічних характеристик в'язкісних дисперсних систем. *Упаковка*. 2011. № 1. С. 46–47.

References

1. Huts, V. S., Prypik, O. S., Koval, O. A. (2001). Kompiuterni prohramy analitychnykh rozrakhunkiv protsesiv kharchovykh vyrobnytstv.



[Computer programs for analytical calculations of food production processes]. *Naukovi pratsi UDUKht – Scientific works of UDUHT*, № 10 (2), 135-139. [in Ukrainian].

2. Kryzhska, T. A. (2016). Rozrobka tekhnologii syrovalenoho sutsilnomiazovoho produktu iz miasa ptytsi. [Development of the technology of raw dried whole muscle product]: dys...kand. tekhn. nauk : 05.18.04 / Kryzhska Tetiana Anatoliivna : Natsionalna akademiia ahrarykh nauk Ukrainy instytut prodovolchyykh resursiv, 208. Kyiv [in Ukrainian].

3. Malezhyk, I. F. (2003). Protsey i aparaty kharchovykh vyrobnytstv. Pidruchnyk [Processes and devices of food production], 400, Kyiv [in Ukrainian].

4. Vasylenko, P. M. (1950). Pro rukh materialnykh chastok. [On the movement of material particles]. *Pratsi laboratorii mashynobuduvannia ta problem silskohospodarskoi mekhaniky – Proceedings of the laboratory of mechanical engineering and problems of agricultural mechanics*, t. 1.18-24. [in Ukrainian].

5. Huts, V. S. (2001). Matematychno modeliuвання rukhu kharchovykh produktiv v barabanakh, shcho povilno obertaiutsia. [Mathematical modeling of the movement of food products in slowly rotating drums]. *Naukovi pratsi UDUKht. – Scientific works of UDUHT*, № 10 (1), 124-125. [in Ukrainian].

6. Huts, V. S., Koval, O. A. (2005). Vyznachennia mitsnosti adhezii. Materialy IX mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Novi tekhnologii ta tekhnichni rishennia v kharchovii ta pererobnii promyslovosti» [Materials of the IX international scientific and technical conference «New technologies and technical solutions in the food and processing industry»], 122-124. [in Ukrainian].

7. Huts, V. S., Koval, O. A. (2006). Adheziia kharchovykh produktiv v protsesakh pakuvannia. [Adhesion of food products in packaging processes]. *Natsionalnyi universytet kharchovykh tekhnologii – National University of Food Technologies*, № 2, 39-43. [in Ukrainian].

8. Kyshenko, I., Musiienko, I. (2005). Udoshkonalennia tekhnologii solenykh miasnykh vyrobiv z vykorystanniam funktsionalno-tekhnolohichnykh sumishei. [Improvement of the technology of salted meat products using functional-technological mixtures]. *Kharchova promyslovist – Food Industry*, № 4, 24-27. [in Ukrainian].

9. Marleen, M. H. D. (2010). Arntz Modeling of particle segregation in a rotating drum. PhD thesis. Wageningen University, 156. The Netherlands [in English].

10. Zeki, Berk. (2009). Food Process

Engineering and Technology. *TECHNION*. Israel Institute of Technology. 605. [in English].

11. Huts, V., Polievoda, Y., Koval, O. (2011). Vyznachennia strukturno-mekhanichnykh kharakterystyk, vyazkisnykh dyspersnykh system [Determination of structural and mechanical characteristics of viscous dispersed systems]. *Upakovka – Packing*, № 1, 46-47 [in Ukrainian].

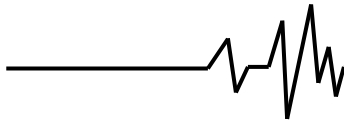
MODELING THE PROCESS OF SALING MEAT IN HORIZONTAL DRUMS

The article presents new mathematical models necessary for establishing optimal modes for massaging meat in horizontal drums that are completely wrapped. The results of their analytical investigation of the requirements for extracting salted meat products with increased yield and tender structure were presented.

The new results of analytical-theoretical and experimental studies of the trajectories of the movement of pieces of meat in slowly rotating horizontal drums are presented, the conditions and rational modes of their use during massaging of meat with different structural and mechanical properties, which are used in the production of salted meat, are established products It has been proven that the equipment, the working organs of which have the shape of a drum with a smooth surface, the presence of activator devices of different shapes in the middle of the drum, allows you to speed up the process of massaging meat with a blow when falling from a height. The resulting mathematical models make it possible to calculate energy consumption for massaging meat, to positively influence the technology of salted meat products.

The new results of analytical-theoretical and experimental studies of the trajectories of the movement of pieces of meat in slowly rotating horizontal drums are presented, the conditions and rational modes of their use during massaging of meat with different structural and mechanical properties, which are used in the production of salted meat, are established. products It has been proven that the equipment, the working organs of which have the shape of a drum with a smooth surface, the presence of activator devices of different shapes in the middle of the drum, allows you to speed up the process of massaging meat with a blow when falling from a height. The resulting mathematical models make it possible to calculate energy consumption for massaging meat, to positively influence the technology of salted meat products.

Keywords: mechanical processes, meat massaging, movement of the product in the drum, energy of meat massaging.

**Відомості про авторів**

Гуць Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: goots@ukr.net).

Коваль Ольга Андріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій (вул. Володимирська, 68, м. Київ-33, 01601, Україна, e-mail: Koval_andreevna@ukr.net).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com).

Ткачук Ігор Васильович – магістр зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка інженерно-технологічного факультету Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: igortkachuk1990@gmail.com).

Goots Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Bioengineering, Bio- of Food Technologies, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: goots@ukr.net).

Koval Olga – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Restaurant Technology and Ayurvedic Products, National University of Food Technologies (Volodymyrska st. 68, Kiev-33, 01601, Ukraine, e-mail: Koval_andreevna@ukr.net).

Polievoda Yurii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- of Food Technologies, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st, 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com).

Tkachuk Igor – Master of Science 141 Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna st., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: igortkachuk1990@gmail.com).