



## KAPITEL 2 / CHAPTER 2<sup>2</sup> GRAVITY-MECHANICAL PROCESSING OF MEAT

DOI: 10.30890/2709-2313.2024-29-00-003

### Вступ

В роботі розглянуто механічне оброблення м'яса в процесі соління. Вдосконалення технологічних процесів, випуск якісної продукції, економія сировинних та енергетичних ресурсів можливі за умови всебічного дослідження явищ, що відбуваються при виробництві м'ясних продуктів та напівфабрикатів.

При виготовленні солоних делікатесних м'ясопродуктів, шинкових та інших м'ясних виробів посол м'ясної сировини є обов'язковою технологічною операцією, багато в чому визначає якість, собівартість продукції. З технологічної точки зору, посол м'ясної сировини є складним комплексом різних за своєю природою процесів: масообміну, перетворень білкових речовин, зміни його мікроструктури, вологоутримуючої здатності м'яса та ін. Розуміння теоретичних основ процесу посолу, зміни властивостей дозволяє раціонально організувати виробництво м'ясних продуктів шляхом застосування нових технологічних прийомів та спеціального обладнання для покращення консистенції, виходу готових продуктів, а також скорочення часу технологічної обробки

Важливим етапом технології м'ясних виробів є соління м'яса. Воно представляє собою сукупність різних процесів: утворення первинних зон накопичення посолочних речовин; рівномірного розподілу їх в об'ємі напівфабрикату фільтрацією та дифузиею через пори та капіляри, осмотично через мембрани та оболонки волокон; проходження масообмінних процесів вирівнювання концентрацій сольових розчинів.

В результаті взаємодії посолочних речовин з білками змінюються фізико-хімічні властивості протеїнів, що призводить до набухання білків, підвищенню вологозв'язуючої здатності, зміни структурно-механічних властивостей, консистенції, пластичності м'яса, утворення адгезивного шару водо- та солерозчинних білків. Мікроструктура продукту змінюється в результаті

---

<sup>2</sup>Authors: Koval Olga, Goots Victor



розвитку ферментативних процесів. Цьому сприяє наявність посолочних речовин та механічна дія. Відбувається утворення смаку і аромату шинковості через ферментативні і мікробіологічні процеси, зміни складу мікрофлори.

При мокрому солінні якість виробів в основному залежить від концентрації і складу засолювальних розчинів та рівномірності розподілу останніх в сировині. Доведено що тривалість процесу і способи засолювання м'яса впливають на якість готової продукції, економічну ефективність виробництва і, відповідно, на вартість готових виробів, тому доцільним є їх оптимізація та вдосконалення.

Враховуючи різноманіття м'ясної сировини, для визначення оптимальних режимів засолювання м'яса необхідно виконати експериментальні дослідження. Перед початком експерименту доцільно виконати теоретичне обґрунтування процесів механічного оброблення м'яса, побудувати математичну модель. Остання надасть можливість підібрати технологічне обладнання, інтенсифікувати його роботу, оптимізувати процес механічного оброблення масажуванням (розм'якшення і насичення розчином) різного за видом і структурою м'яса.

В технології м'яса перспективним є використання механічного деформування сировини ударом. Для оптимізації механічного масажування м'яса даним способом важливо знати механізм насичення його розчином. Запропоновано розглядати м'ясо як реологічну систему з різним набором в'язких, пластичних і пружних властивостей що деформується рушійною силою.

В роботі представлено результати дослідження соління м'яса шляхом аналізу змін структури його під дією зовнішнього збудника - рушійної сили механічної природи, з використанням теорії моделювання та комп'ютерної символічної математики. Для експериментальних досліджень використовували м'ясо свинини з ознаками NOR .

Об'єктом дослідження є процеси деформування м'яса при механічній обробці під час соління, предметом дослідження є математичні моделі обробки м'яса в горизонтальних барабанах, що повільно обертаються.



## 2.1. Режими обробки м'яса.

Значним попитом у населення користуються солоні або шинкові м'ясні вироби. Їх технологія базується на складних процесах при яких на сировину діють зовнішні фактори різноманітної природи. Процес засолювання м'яса можна розглядати як фільтраційно-дифузійне насичення шматка розчином солі. Сіль проникає у товщу м'яса дуже повільно, тому для прискорення цього процесу шматок періодично деформують, використовуючи різні фізичні методи. Одним з методів інтенсифікації є механічний вплив, а також періодичне деформування – масажування або тендеризація. Оптимізувати ці процеси можна шляхом дозованої механічної дії ударом або короткочасним стисканням чи розтягуванням.

На вітчизняних підприємствах застосовували різні режими обробки м'ясної сировини в масажі:

Кісткова сировина. Одноразове масажування кісткової сировини при малій швидкості обертання барабана до 8 об./хв, впродовж 10–20 хв, з подальшим вистоем – 50 хв.

Безкісткова сировина. Масажування сировини при швидкості обертання барабана до 16 об./хв, впродовж 20-30 хв, подальший вистій від 45 до 60 хв; повторення циклу до 24 год.

Для виготовлення копчено-вареного балика в оболонці масажування проводять при швидкості обертання барабана як для безкісткової сировини 16 об./хв, впродовж 15–20 хв, вистій – 45–60 хв, повторення циклу від 24 до 48 год.

Іноземні науковці рекомендують [1] масажувати м'ясну сировину в таких режимах для яловичини заповнення ємності робочого барабана 70%, почергово через кожні 30 хв проводять обробку впродовж 30 хвилин, загальний час обробки становить 4 год при швидкості 20 об./хв, або 8 год при швидкості 5 об./хв.

Для обробки свинини рекомендують виконати до 2400 ударів при швидкості обертання до 6 об./хв, коефіцієнті заповнення барабана 0,7. [2].

Прискорення процесу рівномірного розподілення розчину солі в товщі



продукту досягають використанням багатоголкового шприцювання і масажування м'яса циклічним деформуванням. В результаті періодично розширюються та стискаються пори і капіляри, в них змінюється тиск рідини, тим самим інтенсифікується перш за все процес фільтрації. При деформуванні також змінюється внутрішня структура м'яса [3].

Оптимізувати процес масажування можливо використавши механічне періодичне короткочасне стискання м'яса. Перспективним є використання удару, який здійснюють різними способами. Найбільш поширеним є падіння м'яса з висоти в барабанах, що повільно обертаються, або короткочасне стискання чи розтягування в іншому обладнанні.

## **2.2. Масажери барабанного типу.**

Масажери м'яса, являють собою циліндричні барабани, що обертаються, в яких проводиться обробка шматків м'яса. Зазначені машини також називають тумблерами м'яса (від англійського "to tumble" - перевертатися, перекидатися). Сучасні конструкції барабанних масажерів в цьому плані мало ефективні, тому що працюють в режимі занадто великих інтервалів між деформуванням і вистоем [4].

Масажер барабанного типу, який використовують на підприємствах малої і середньої потужності. Зокрема для ресторанів пропонують маринатор(масажер) вакуумний для м'яса 4ALL об'ємом 40л швидкістю обертання до 50 об/хв. об'ємом барабана 40 л (рис.1), компанією Rakitov, ChP пропонується розмірний ряд маринаторів-масажерів від 100 до 1000 л з діаметром барабана 600 мм. В ресторанному господарстві, домашніх умовах застосовують міні-маринатори від 2,5 до 6 л. ( Маринатор Supretto 9 хвилин 2,5 л; Маринатор для м'яса Vitalex VL-5800 об'ємом 6 л з таймером до 30 хвилин.)

В масажерах барабанного типу при повільному обертанні барабану можливі наступні основні режими руху шматка м'яса:



<p><b>Рис. 1 - Маринатор(масажер) вакуумний для м'яса 4ALL, 40л</b></p>	<p><b>Рис. 2 - Міні-маринатори (2,5л)</b></p>

- переміщення шматка ковзанням 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 в розчин.

Залежно від вимог технологічного регламенту при механічній обробці різної м'ясної сировини в барабанах можливо реалізовувати різні види деформування. Інтенсивність деформування залежать від траєкторії руху продукту. Вона пов'язана зі швидкістю обертання, наявністю, виду і форми активаторів (полиць) та розмірів барабана. Об'єктивною характеристикою, що визначає ефективність обробки м'ясної сировини при її масажуванні, є зміна структури продукту. Вона безпосередньо пов'язана з кількістю поглинутої шматком енергії. Поширеним способом визначення структурно- механічних властивостей продукту є метод гравітаційної пенетрації [5].

Залежно від технологічних потреб використовують різні режими масажування. При м'якому масажуванні, мають місце малі деформації продукту, відбуваються незначні зміни в структурі. Вони проявляються в набряканні м'язових волокон, збільшенні кількості поперечно-щілинних порушень,



руйнуванні мембранних структур, розпушенні і набряканні міофібрилярних білків, порушенні зв'язків між актином і міозином. Зміна структури, ніжність і вологозв'язуюча здатність м'яса на цій стадії обробки підвищується повільно.

Зі збільшенням тривалості механічної обробки або переході на інший більш жорсткий режим шляхом збільшення зусиль деформування, м'язові волокна набрякають по всьому об'єму шматка, відбувається утворення білкової маси, яка заповнює внутрішній поровий простір. Він збільшується з подальшим порушенням структури м'язових волокон. У цьому випадку частина білкової маси виходить на поверхню шматка. Після такої обробки вологоутримуюча здатність м'яса збільшуються, а жорсткість зменшується. Ця стадія класифікується як помірне масажування.

Помірне масажування межує зі стадією оптимального масажування, коли з'являються ділянки значної деструкції міофібрил і відбувається збільшення кількості вільних молекулярних зв'язків, здатних утримувати додаткову кількість вологи.

При подальшій обробці і переході на жорсткий режим, відбувається розпад протофібрилярної субстанції міофібрил по всій масі шматка, що призводить до виходу її на поверхню з подальшим переходом у розчин. Така обробка призводить до зменшення вологоутримуючої здатності м'яса, погіршення органолептичних властивостей і зменшення виходу готових виробів. Режим обробки класифікується, як надлишкове масажування. При визначенні консистенції такого м'яса голка пенетрометра максимально занурюється в продукт.

В існуючих конструкціях масажерів реалізують, як правило, один із вищенаведених режимів обробки. Регулюють його збільшуючи або зменшуючи тривалість обробки продукту в масажері, рідше змінюючи швидкість обертання барабану.

Основною причиною недостатнього або надмірного масажування м'яса є відсутність методів визначення енергії механічного впливу на продукт з різними початковими структурно-механічними властивостями. Це не дає змогу



визначити оптимальний режим деформування і відповідно регулювати ефективність масажування.

### 2.3. Математичне моделювання процесу масажування.

Механічне оброблення м'яса має свої особливості. В сучасних конструкціях масажерів деформування м'яса відбувається, як правило, під дією змінної у часі рушійної сили  $P(t)$  спрямованої на розтягування або стискання його.

Характер зміни структури продукту можна дослідити шляхом визначення реологічних коефіцієнтів – характеристик пружних  $c$  і в'язких властивостей  $\mu$  в'язко-пружного тіла яким є м'ясо. Коефіцієнти змінюються під дією різних умов деформування, перш за все рушійної сили  $\tau(t)$  і характеризують здатність продукту опиратися зовнішньому впливу та енергією яку витрачено на деформування.

Для визначення структурно-механічних властивостей м'яса його можна представити як реологічне тіло з в'язко-пружними характеристиками. Механічна модель такого тіла має вигляд послідовно з'єданого в'язкого елемента  $\mu$  з пружним  $c$ . Під дією змінної у часі напруги  $\tau(t)$  м'ясо деформується за законом, який можна описати диференціальним рівнянням

$$\tau(t) + \frac{\mu}{c} \dot{\tau}(t) = \mu \dot{x}(t), \quad (1)$$

де  $x$  – відносна деформація (безрозмірна величина),

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt} \text{ - швидкість деформування, (1/c),}$$

$$\dot{\tau}(t) = \frac{d\tau}{dt} \text{ - швидкість зміни напруги (Па/с).}$$

Якщо протягом деякого часу (циклу) при масажуванні має місце періодичний вакуум або тиск, тоді відбувається періодичне стискання або розтягування м'яса і можна важать в даному випадку  $\tau(t) = \text{const}$ . Врахувавши це і прийнявши початкові умови  $t = 0 \Rightarrow x(0) = x_0$ , та тривалість  $t$  дії напруги,



розв'язок диференціального рівняння (1) буде:

$$x(t) = \frac{1}{\mu} \tau t + x_0 \quad (2)$$

Виконавши диференціювання рівняння (2), отримаємо швидкість деформування

$$\frac{dx}{dt} = V = \frac{\tau}{\mu} \quad (3)$$

Енергія (робота)  $A$  деформування буде:

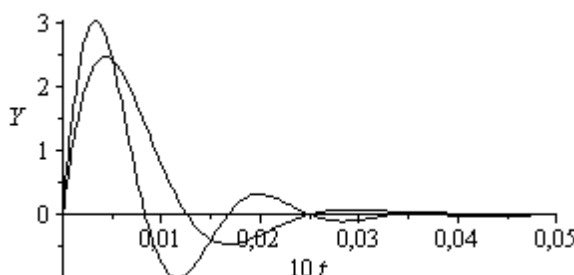
$$A = A_1 + A_2 = \frac{\tau^2 t}{\mu} + \tau x_0, \quad (4)$$

Де  $A_1$  – енергія необхідна на пужне деформування;  $A_2$  – енергія необхідна на в'язке деформування.

Витрати енергії  $N$  при тривалості деформування  $t$  складуть

$$N = \frac{A}{t} = \frac{\tau^2}{\mu} + \frac{\tau x_0}{t_1} \quad (5)$$

Коли відома тривалість  $t$  деформування шматка м'яса, яке знаходиться під постійним навантаженням  $\tau$ , з рівнянь (4), (5) можна визначити енергетичні параметри процесу масажування за один цикл. Якщо помножити на кількість циклів обробки, то можна розрахувати загальні (сумарні) енерговитрати і відповідно ефективність масажування, розм'якшення сировини та насичення її розсоллом[6].



**Рис.3 - Кінетична крива деформування м'яса ударом.**

В сучасних конструкціях масажерів оброблення м'яса відбувається при





$\tau \neq \text{const}$ . Наприклад, коли воно падає з висоти. В цьому випадку ефективність масажування - консистенцію (жорсткість) продукту, можна визначити дослідивши кінетичну криву деформування його при імпульсному навантаженні (ударі), представлена на рис. 3 [7, 8].

Описати криву деформування можна рівнянням

$$Y(t) = Pe^{kt} \sin(\omega t), \quad (6)$$

де  $Y(t)$  – деформація;  $P$ - показник амплітуди кривої;  $k$  - характеристика, яка визначає темп спадання кривої;  $\omega$  – частота коливань. Величини коефіцієнтів  $\omega$ ;  $P$ ;  $k$  дають можливість встановити характер руйнування структури м'яса - ступінь його розм'якшення залежно від тривалості масажування.

Аналіз кривої деформування (пружна хвиля деформування), яка виникає в м'ясі при швидкому деформуванні, наприклад, ударі, показує що процес деформування триває біля  $3,5 \cdot 10^{-3}$  секунд [8]. Він короткочасний. Це дає можливість зробити висновок, що за період удару відбувається швидке стиснення пор та капілярів з подальшою релаксацією під час якої проходить головним чином фільтраційне насичення шматка м'яса розсоллом. Рідина всмоктується та проштовхується по порах та капілярах. В період вистою відбувається розподіл її шляхом дифузії за рахунок різниць концентрацій.

Більшість конструкцій сучасних барабанних масажерів мають всередині полички, ребра, рифлену пластину. На практиці для визначення швидкості обертання, критичного кута зі збільшенням якого шматок м'яса не відривається від обичайки без полок, можливе за рівнянням:

$$n = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{R}} \approx 30 \sqrt{\frac{\sin \alpha}{R}}, \quad (7)$$

де  $n$  – швидкість обертання барабана об/хв.;  $R$ –радіус барабана, м;  $\alpha$  – кут відривання м'яса від обичайки барабана.

Сучасні конструкції масажерів в середині барабана мають радіальні поличі. Визначення швидкості обертання барабана за умови відривання шматка м'яса від поличі і падіння його на дно барабана з максимальної висоти, потребує



проведення спеціальних розрахунків.

Диференціальне рівняння руху м'яса по полиці запишемо:

$$m \frac{d^2 s(t)}{dt^2} + F_{on} = mg \sin(\omega t), \quad (8)$$

де  $m$  – маса шматка;  $s(t)$  – довжина полиці;  $t$  – тривалість руху шматка м'яса починаючи з горизонтального положення полиці;  $\omega$  – частота обертання барабана масажера;  $F_{on}$  – опір руху шматка.

Прийmemo  $F_{on}=fmg$ , де  $f$  – коефіцієнт опору (середнє значення з урахуванням тертя, відцентрової сили, кута нахилу полиці). Запропонований підхід до визначення  $F_{on}$  дає можливість не враховувати масу шматка, що значно спрощує розрахунки при незначній похибці.

Розв'язок рівняння (8) при початкових умовах  $t=0 \Rightarrow s(0)=0; V(0)=0$ :

$$s(t) = g \left( \frac{t}{\omega} - \frac{\sin(\omega t)}{\omega^2} - \frac{ft^2}{2} \right). \quad (9)$$

Підставивши в рівняння значення  $g=9.8 \text{ м/с}^2$ ;  $f=0,12$ ;  $\omega=0,4 \text{ об/с}$ ;  $m=0,7 \text{ кг}$ , побудуємо графік залежності  $s(t)$ .

Графік функціональної залежності  $s(t)$  представлено на рис. 4.

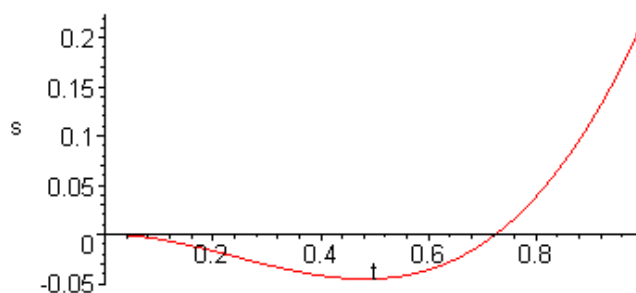


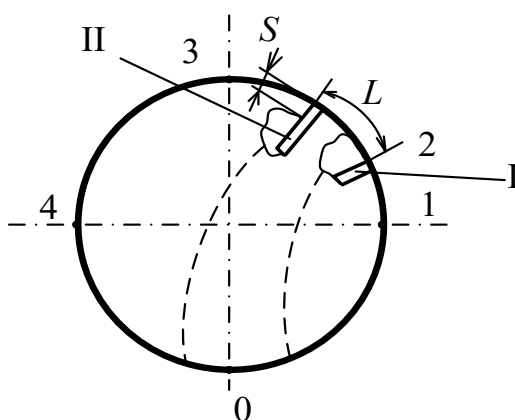
Рис.4 - Функціональна залежність  $s(t)$ .

Аналіз залежності  $s(t)$  показує, що рух шматка по полиці барабана, який обертається зі швидкістю 24 об/хв починається через 0,75 секунди після того як полиця прийме горизонтальне положення. Потрапляння його на полицю відбувається в нижній частині барабана в точці 0 (Рис.5). Спочатку на відріжку дуги 0 – 1 шматок силою тяжіння та відцентровою силою притискається до обичайки барабана, на відріжку дуги 1 – 2 лежить на полиці, в точці 2 починає



зміщуватись по полиці до центра барабана. Для короткої полиці він практично зразу відривається від неї і падає вниз, для довшої - ковзає по ній, а потім, змістившись на відстань  $s$ , зривається і падає вниз барабана. За цей період барабан встигне обернутися на довжину дуги  $L$ . Для полиці довжиною 100 мм це відбудеться через 0,92 секунди (Рис.4).

З рівняння (8) можна знайти, знаючи довжину полиці та швидкість обертання барабана, тривалість руху по ній шматка і, відповідно, довжину дуги  $L$ . На рис.5 показано барабан з різними по довжині полицями умовно розбитий на ділянки 0 – 1; 1 – 2; 2 – 3; 3 – 4; 4 – 0.



**Рис. 5 - Розташування шматків м'яса в барабані з різними по довжині полицями.**

Шматок м'яса, розташований на короткій полиці 1, шматок м'яса розташований на довгій полиці 2 зі зміщенням  $s$  перед падінням з полиці.

За результатами теоретичних розробок в умовах виробництва проведено експериментальні дослідження. Використовували м'ясо свинини з ознаками NOR масою 0,7 кг. Шматок шприцювали розсолем, після чого його піддавали механічному обробленню в масажері з діаметром барабана 1 метр протягом 2 год. Швидкість обертання барабана масажера – 24 об/хв., коефіцієнт завантаження – 0,6. Масажування проводили за циклом: 20 хвилин обертання барабана та 10 хвилин спокою. По закінченню механічного оброблення м'ясо зважували. Його вага збільшилась на 18%. Потім гравітаційним пенетрометром вимірювали ступінь penetрації. Цей показник дозволяє судити про консистенцію,



або використовуючи технологічний термін - ніжність м'яса. Результати дослідження - залежність жорсткості  $P$  м'яса від тривалості  $t$  масажування представлені в графічному вигляді на рис.6.

Аналіз кривої  $P=f(t)$  дозволив зробити висновок, що за 120 хв. перебування м'яса в масажері з діаметром барабана 1 м величина  $P$  м'яса зменшилась на 28 %. За різні проміжки часу її можна визначити використавши рівняння апроксимації функції

$$P = e^{-0,002t}. \quad (10)$$

Візуальне дослідження під мікроскопом показало, що механічне оброблення м'яса супроводжується глибокими змінами його реологічних властивостей, впливає на мікроструктуру. В м'язових волокнах відбулося збільшення числа поперечно-щелевидних порушень, місця проколів мало помітні, відбулося набухання м'язових волокон. В той же час має місце часткове механічне пошкодження м'язових волокон, яке приводить до інтенсифікації більшості масообмінних процесів, що протікають при солінні м'яса. В результаті біохімічних процесів, спільної дії тканинних ферментів і мікроорганізмів, селективних молочнокислих бактерій, в присутності кухонної солі відбулося утворення смаку та так званого аромату шинковості в готовому продукті.

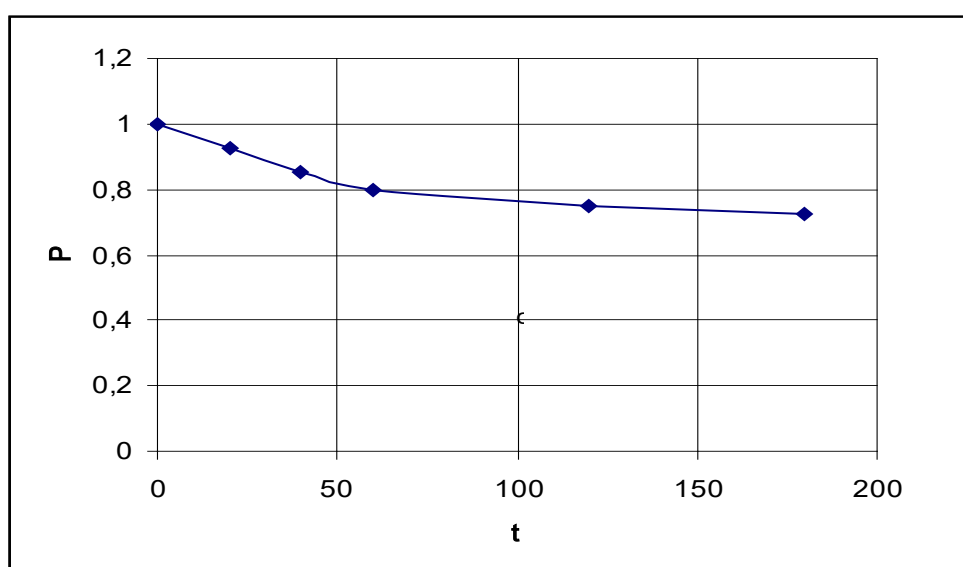


Рис. 6 - Залежність жорсткості  $P$  м'яса від тривалості  $t$  масажування.



## **Висновки.**

Механічне оброблення м'яса при солінні – складний технологічний процес. В результаті якого відбуваються зміни його структури, зменшується жорсткість, прискорюються фільтраційні та дифузійні процеси, що приводить до проникнення і рівномірного розподілу солі в товщі продукту та прискорення біохімічних перетворень. Механічне оброблення м'яса впливає на якість продукції.

В технології м'яса перспективним є використання механічного деформування шматків м'яса, яке відбувається як при постійно діючому навантаженні, так і змінному - ударом. Для оптимізації процесу масажування м'яса важливо знати механізм деформування, який залежить від обладнання, режимів його роботи і може змінюватися в широких межах. Приведено математичні моделі, які дають можливість розрахувати енергетичні характеристики процесу масажування, оптимізувати його.

За результатами експериментальних досліджень методом голчатої пенетрації встановлено ступінь зміни консистенції м'яса, отримано криву деформування його при ударі. Аналіз її засвідчує, що процес деформування короткочасний, триває біля  $3,5 \cdot 10^{-3}$  секунд. Це дає можливість оптимізувати технологічний процес соління м'яса шляхом використання спеціального технологічного обладнання в якому реалізуються ударні режими механічного впливу на продукт.