

Гуць В.С.

д.т.н., професор

Яропуд В.М.

д.т.н., доцент

Полевода Ю.А.

к.т.н., доцент

Токарчук О.А.

к.т.н., доцент

**Вінницький національний
аграрний університет****Goots V.**Doctor of Technical Sciences,
Professor**Yaropud V.**Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor**Polievoda Y.**

Ph.D., Associate Professor

Tokarchuk O.

Ph.D., Associate Professor

**Vinnitsia National Agrarian
University**

ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ПРОЦЕСУ
ДЕФОРМУВАННЯ М'ЯСНОГО
ФАРШУ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ
ВИРОБІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ
ОБЛАДНАННІ © 2026 by Гуць В.С.,
Яропуд В.М., Полевода Ю.А.,
Токарчук О.А. is licensed under CC BY
4.0

УДК 664:532**DOI: 10.37128/2306-8744-2026-3-18**

ЕНЕРГЕТИЧНА ОЦІНКА ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ М'ЯСНОГО ФАРШУ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ У ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ОБЛАДНАННІ

У статті розглянуто питання визначення енергетичних витрат під час деформування м'ясного фаршу в процесах формування, дозування та ущільнення харчових продуктів. М'ясний фарш представлено як складну в'язко-пружну дисперсну систему, для якої характерне поєднання пружних, в'язких і пластичних властивостей, що суттєво впливають на характер перебігу деформаційних процесів та енергетичні показники роботи технологічного обладнання. Проведено аналіз основних факторів, які визначають величину роботи деформування, зокрема внутрішнього опору матеріалу, сил тертя між продуктом і робочими поверхнями, швидкості навантаження та зміни структурно-механічних характеристик фаршу в процесі ущільнення.

Запропоновано математичний підхід до оцінювання питомої роботи деформування, що враховує сумарний вплив роботи стискування та роботи, витраченої на подолання сил тертя. Для опису поведінки фаршу використано в'язко-пружну модель, яка дозволяє враховувати зміну реологічних властивостей продукту під дією навантаження. Розроблено послідовність розрахунку енергетичних параметрів процесу, яка дає можливість визначати питому роботу, потужність та характер зміни навантаження залежно від кінематичних параметрів робочих органів обладнання.

Встановлено, що підвищення ступеня ущільнення супроводжується зменшенням пористості продукту, збільшенням опору деформуванню та зростанням питомих енергетичних витрат. Показано, що важливим завданням під час проектування формувального обладнання є визначення максимального технологічно допустимого тиску, за якого подальша лінійна деформація продукту практично припиняється, а додаткові витрати енергії стають малоефективними. Отримані залежності можуть бути використані для обґрунтування раціональних режимів роботи обладнання та вибору його конструктивних параметрів.

Ключові слова: фарш, формування, стискування, деформація, питома робота, потужність, тертя, моделювання, реологія, структурно-механічні властивості.

Вступ. У технології виробництва м'ясних виробів значна кількість операцій пов'язана з механічним впливом на фаршеву масу. До таких операцій належать перемішування, вакуумування, шприцювання, дозування, пресування, формування котлет, фрикадельок, ковбасних батонів та інших виробів. Під час цих процесів

м'ясний фарш стискається, переміщується, ущільнюється і взаємодіє з поверхнями робочих органів обладнання.

Енергетичні витрати на виконання цих операцій залежать не лише від конструкції машини, а й від властивостей самого продукту. М'ясний фарш має неоднорідну структуру, а його поведінка



під навантаженням визначається співвідношенням м'язової тканини, жиру, вологи, сполучної тканини, солі та функціональних добавок. У процесі стискання (деформація) змінюється пористість фаршу, відбувається перерозподіл вологи, ущільнення частинок і зростання внутрішнього опору деформуванню [1, 2, 10].

При проектуванні технологічного обладнання важливо не тільки забезпечити необхідну форму виробу, а й мінімізувати витрати енергії, запобігти перегріванню продукту та зберегти його якісні показники. Тому виникає потреба у створенні розрахункових моделей, які дозволяють визначати питому роботу, потужність деформування та вплив тертя на загальні енергетичні витрати [1, 2, 5, 6].

Об'єктом дослідження є процес деформування м'ясного фаршу під час формування виробів у технологічному обладнанні. Як модельний продукт розглянуто подрібнену м'ясну систему фаршевого типу, що характеризується в'язко-пружними, пластичними та адгезійними властивостями [12].

Постановка проблеми. У виробничих умовах процес формування м'ясного фаршу часто здійснюється при фіксованих налаштуваннях обладнання, без точного врахування зміни реологічних властивостей продукту [11]. Однак фарш на початку стискання і після часткового ущільнення має різні структурно-механічні характеристики. На початковій стадії він деформується легше, оскільки містить більшу кількість пор і повітряних включень. Після ущільнення опір деформуванню зростає, а подальше стискання потребує значно більшої енергії.

Недостатнє врахування цієї особливості призводить до неправильного вибору потужності привода, перевантаження робочих органів, підвищеного зношування деталей, нерівномірної щільності виробів і зниження якості готової продукції. Крім того, під час контакту робочого органу з фаршем виникає сила тертя, яка також збільшує енергетичні витрати.

Проблема полягає у розробці такого підходу до розрахунку енерговитрат, який враховує не лише стискання м'ясного фаршу, а й тертя, зміну тиску, зміну пористості та зміну реологічних характеристик на різних етапах деформування.

Мета статті. Метою статті є розроблення науково обґрунтованого підходу до визначення питомої роботи та питомої потужності деформування м'ясного фаршу під час формування виробів з урахуванням в'язко-пружних властивостей продукту, сили тертя та поетапної зміни тиску.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У науковій літературі з харчової інженерії реологія (реологічні властивості) продуктів розглядаються як основа для проектування обладнання, що виконує операції

переміщення, змішування, стискання, пресування та формування. У працях М. А. Rao систематизовано підходи до опису реологічної поведінки харчових систем, зокрема напівтвердих і структурованих продуктів. М. С. Bourne підкреслював зв'язок між текстурою продукту, його механічною поведінкою та споживчими властивостями [1, 2].

Для м'ясних продуктів важливими є дослідження, присвячені формуванню білково-жирових структур, в'язко-пружним властивостям фаршу, ковбасних емульсій і готових виробів. У роботах Bruno і Moresi досліджено в'язко-пружні властивості ковбасних виробів динамічними методами. Karaman та співавтори вивчали динамічні зсувні властивості модельних м'ясних емульсій і вплив температури та концентрації олійної фази на формування білкової сітки [4, 9, 10].

Дослідження Cevik і İcier підтверджують, що в'язко-пружні властивості подрібненого м'яса залежать від вмісту жиру та попереднього оброблення. Це має значення для розрахунку режимів формування, оскільки фарш із різним вмістом жиру, вологи та білка має різну здатність до ущільнення і релаксації [3].

Особливого значення реологічні характеристики набувають під час проектування технологічного обладнання для виробництва м'ясних продуктів. Робота формувальних машин, дозаторів, шприців, пресувальних та пакувальних установок безпосередньо залежить від структурно-механічних властивостей фаршу, які визначають величину сил опору переміщенню та деформуванню продукту. У процесі формування відбувається складна взаємодія між робочими органами обладнання та харчовою масою, що супроводжується ущільненням продукту, зміною його пористості, виникненням сил тертя та нерівномірним розподілом напружень у об'ємі фаршу. Недостатнє врахування цих факторів на етапі проектування призводить до перевитрат енергії, погіршення якості сформованих виробів, зниження продуктивності обладнання та прискореного зношування його робочих органів. Тому визначення енергетичних характеристик процесу деформування є важливим етапом розрахунку потужності приводів, вибору раціональних кінематичних параметрів машин та обґрунтування конструктивних схем обладнання для формування і дозування м'ясних продуктів.

Водночас у практиці проектування обладнання для м'ясної промисловості недостатньо уваги приділяється комплексному врахуванню роботи стискання, сил тертя та зміни пористості фаршу під час ущільнення. Більшість відомих досліджень зосереджена на визначенні реологічних характеристик продукту, тоді як питання енергетичної оцінки процесів формування залишаються недостатньо дослідженими. Саме зазначені параметри значною мірою визначають

повні енергетичні витрати процесу, необхідну потужність приводів, продуктивність обладнання та якість готових виробів, що обумовлює актуальність проведення відповідних досліджень і розроблення інженерних методів їх розрахунку [7, 8].

Виклад основного матеріалу. Процес формування м'ясного фаршу можна розглядати як послідовність механічних дій, під час яких продукт стискається робочим органом машини. У найпростішому випадку фарш моделюється як в'язко-пружна система, що складається з пружного елемента та в'язкого елемента, з'єднаних паралельно. Така модель дозволяє описати одночасно здатність фаршу чинити опір деформації та здатність частково релаксувати після зняття навантаження (рис. 1).

У сучасному обладнанні для виробництва м'ясних напівфабрикатів процес формування реалізується за допомогою поршневих, шнекових, роторних, кулачкових та комбінованих механізмів. Вибір конструкції робочих органів визначається реологічними властивостями фаршу, продуктивністю обладнання та вимогами до якості готових виробів. Під час роботи формувальних машин навантаження на привод має циклічний характер і змінюється залежно від ступеня ущільнення продукту та швидкості переміщення робочого органу. Тому під час проектування обладнання важливим є визначення енергетичних витрат на окремих стадіях формування, що дозволяє обґрунтувати потужність привода, раціональні кінематичні параметри механізму та геометричні характеристики формувальної камери. Особливого значення це набуває для високопродуктивних автоматизованих ліній, де навіть незначне зменшення питомих енерговитрат забезпечує суттєву економію енергетичних ресурсів [5, 7, 8].

Під час формування м'ясного фаршу механічна енергія робочих органів обладнання витрачається не лише на надання продукту певної форми, а й на подолання його внутрішнього опору. Оскільки м'ясний фарш є в'язко-пружною дисперсною системою, у процесі стискання в ньому виникають деформації, внутрішні напруження та сили тертя між окремими частинками продукту [1-3].

Основна частина енергії витрачається на стискання фаршевої маси. При цьому зменшується об'єм пор, ущільнюється структура продукту, частинки м'язової та жирової тканини зближуються між собою, а фарш набуває необхідної форми. Такий процес є важливим під час виробництва котлет, биточків, фрикадельок, ковбасних виробів та інших м'ясних напівфабрикатів.

Крім енергії, що витрачається на стискання, частина енергії йде на подолання тертя. Тертя виникає між частинками фаршу, а також між фаршевою масою і поверхнею робочих органів машини – штовхача, поршня, формувальної пластини, шнека або стінок формувальної камери.

Чим вища в'язкість фаршу, щільність продукту та сила притискання до робочих поверхонь, тим більшими є витрати енергії на подолання тертя.

Для опису деформування м'ясного фаршу використано модель Кельвіна-Фойгта, у якій пружний і в'язкий елементи з'єднані паралельно [1, 2, 8]. У такому випадку сила деформування визначається сумою пружної та в'язкої складових.

Напруга або зусилля деформування може бути подане рівнянням:

$$F(t) = \mu \frac{dx(t)}{dt} + c \cdot x(t), \quad (1)$$

де $F(t)$ – сила деформування, Н;

μ – коефіцієнт в'язкого опору (в даному випадку фаршу), Н·с/м;

c – коефіцієнт пружності (пружна характеристика), Н/м;

$x(t)$ – переміщення робочого органу, м.

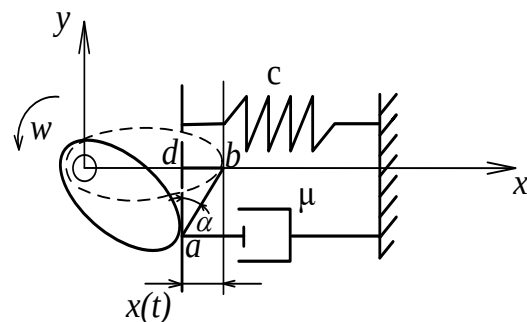


Рис. 1. Деформування в'язко-пружної системи кулачковим механізмом

Отримаємо його розв'язок при початкових умовах $t = 0 \Rightarrow x(0) = 0$.

$$x(t) = F(t)(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}) \quad (2)$$

Переміщення робочого органу задається законом $x(t)$, який визначається кінематикою кулачкового механізму. Підставлення цього закону у рівняння в'язко-пружного деформування дозволяє визначити силу, роботу та потужність процесу.

Кулачок ковзає по катету ad трикутника abd . Довжина $y(t)$ катету ad дорівнює:

$$\frac{x(t)}{y(t)} = \operatorname{tg} \alpha \Rightarrow y(t) = \frac{x(t)}{\operatorname{tg} \alpha} = x(t) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (3)$$

Підставимо в рівняння (3) значення $x(t)$:

$$y(t) = F(t)(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Після диференціювання рівняння (4) отримаємо:

$$\begin{aligned} \frac{dy(t)}{dt} &= \frac{dx(t)}{dt} \operatorname{ctg} \alpha = R \omega \sin \omega t \operatorname{ctg} \alpha \\ dy(t) &= R \omega \sin \omega t \operatorname{ctg} \alpha dt \end{aligned} \quad (5)$$

Зусилля $F(t)$ знайдемо з рівняння (1):

$$F(t) = \frac{x(t)}{(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}})} = \frac{R(1 - \cos \omega t)}{(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}})} \quad (6)$$

Сила тертя може бути визначена через коефіцієнт тертя і зусилля нормального тиску:

$$P_{tr} = fF(t), \quad (7)$$

де f – коефіцієнт тертя.

Роботу сили тертя запишемо:

$$A_m = 2 \int_0^{t_1} fF(t)dy(t) = 2 \int_0^{t_1} f \frac{R^2(1 - \cos \omega t)}{(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}})} \omega \sin \omega t \, dt. \quad (8)$$

З урахуванням сили тертя енергетичні витрати зростають. Для обладнання, яке працює з м'ясним фаршем, це має практичне значення, оскільки фарш є липкою, вологою і структурованою масою. Він може прилипати до поверхонь, утворювати шар продукту на робочих органах і збільшувати опір руху. Тому при проектуванні машин необхідно враховувати матеріал поверхонь, шорсткість, наявність антипригарних покриттів, спосіб подавання фаршу та режим змащування або зволоження робочих поверхонь.

Для оцінювання енергетичних витрат важливо визначити роботу деформування. Робота стискання може бути записана як:

$$A_{cm} = \int F(t) dx(t), \quad (9)$$

де A_{cm} – робота стискання, Дж.

Питому роботу деформування подамо (робота на одиницю площі деформування) як:

$$A_{num} = \int_0^{t_1} F(t) dx(t) = \int_0^{t_1} [\mu R w \sin w t + cR(1 - \cos t)] (Rw \sin w t) dt = \mu R + \frac{cR^2}{2} - \mu R \cos w t_1 - cR^2 \cos w t_1 + \frac{1}{2} cR^2 (\cos w t_1)^2, \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \quad (10)$$

Для проведення математичного моделювання прийнято такі параметри процесу: площа контакту робочого органу з фаршевою масою $S = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, коефіцієнт тертя між фаршем і робочою поверхнею $f = 0,28$, коефіцієнт пружності фаршу $c = 1,8 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$, коефіцієнт в'язкого опору $\mu = 4,5 \cdot 10^3 \text{ Н·с/м}$, кутова швидкість кулачка $\omega = 2-12 \text{ рад/с}$, тривалість циклу навантаження $t = 1,0 \text{ с}$. Розрахунки виконували для температури фаршу 4°C , характерної для промислового формування охолоджених м'ясних напівфабрикатів [3, 4, 9, 10].

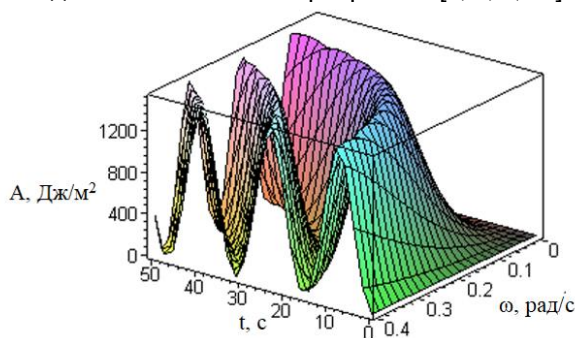


Рис. 2. Залежність питомої роботи деформування м'ясного фаршу від часу та кутової швидкості кулачка

Аналіз наведеної залежності показує, що питома робота деформування зростає зі збільшенням кутової швидкості руху кулачкового механізму та тривалості дії навантаження. Це пояснюється тим, що при інтенсивнішому стисканні м'ясний фарш чинить більший внутрішній опір, а частина енергії витрачається на подолання в'язкого тертя між частинками продукту. Для зменшення енерговитрат необхідно узгоджувати швидкість деформування і реологію (реологічні властивості фаршевої маси).

Повні енергетичні витрати повинні враховувати тертя кулачка об поверхню штовхача. Тоді повна робота деформування з урахуванням сили тертя визначається як сума роботи стискання та роботи тертя:

$$A = A_{mp} + A_{cm}, \quad (11)$$

де A_{mp} – робота сили тертя, Дж.

Потужність процесу визначається як швидкість зміни роботи: $N = dA/dt$.

Після диференціювання рівняння (10)

маємо витрати енергії (потужність), $\frac{Bm}{\text{м}^2}$.

$$N = \frac{dA(t_1)}{dt_1} = \mu R w \sin(w t_1) + cR^2 w \sin(w t_1) - cR^2 w \cos(w t_1) \sin(w t_1). \quad (12)$$

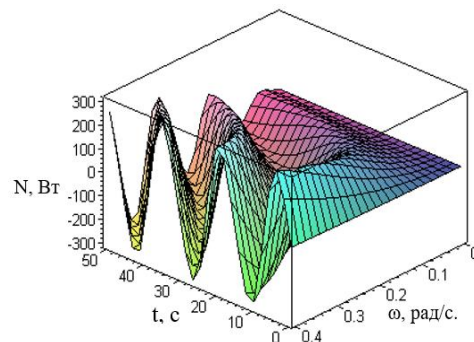


Рис. 3. Залежність питомої потужності деформування м'ясного фаршу від часу дії навантаження та кутової швидкості кулачка

Із графічної залежності видно, що питома потужність процесу має змінний характер і залежить від режиму роботи механізму. Найбільші значення потужності відповідають періодам активного стискання фаршу, коли швидкість деформації є максимальною. У періоди зменшення навантаження потужність знижується, що пов'язано з частковою релаксацією напружень у продукті. Це підтверджує необхідність урахування циклічності роботи формувального обладнання під час вибору привода.



Наявність від'ємних значень потужності на окремих ділянках циклу пояснюється зниженням навантаження та частковим пружним відновленням системи. Однак для вибору привода обладнання доцільно враховувати максимальне додатне значення потужності та середню потужність за цикл.

Потужність є основним параметром для вибору привода машини. Якщо потужність вибрана недостатньо, обладнання працюватиме з перевантаженням, що призведе до зниження продуктивності та підвищення ризику поломок. Якщо потужність завищена, зростають капітальні та експлуатаційні витрати. Тому розрахунок питомої потужності має виконуватися з урахуванням реальних реологічних властивостей фаршу.

$$A = 2 \int_0^{t_1} f P_{cp} dy(t) = 2 \int_0^{t_1} f P_{cp} R \omega \sin \omega t c t g \alpha dt = 2 f P_{cp} R c t g \alpha (1 - \cos \omega t_1). \quad (13)$$

Після диференціювання розв'язку рівняння отримаємо витрати енергії:

$$N = \frac{dA}{dt} = 2 f P_{cp} R \omega c t g \alpha \sin \omega t_1. \quad (14)$$

Питома робота сили тертя:

$$A_n = \frac{A}{S} = 2 \frac{f}{S} P_{cp} R c t g \alpha (1 - \cos \omega t_1). \quad (15)$$

Питома потужність

$$N_n = \frac{N}{S} = 2 \frac{f}{S} P_{cp} R \omega c t g \alpha \sin \omega t_1. \quad (16)$$

де S – площа рухомої пластини, яка тисне на в'язко-пружний елемент.

Наведені залежності дозволяють уточнити енергетичні витрати з урахуванням сили тертя та площі контакту робочого органу з фаршевою масою. Це має практичне значення для формувальних і пакувальних машин, у яких продукт стискається пластиною, поршнем або іншим робочим органом. Збільшення площі контакту, коефіцієнта тертя або тиску формування призводить до зростання питомої роботи та питомої потужності процесу.

Особливістю м'ясного фаршу є зміна пористості під час стискання. На початку процесу фарш має певну кількість повітряних пор і проміжків між частинками. Під дією тиску ці пори зменшуються, фарш ущільнюється, а його опір подальшому стисканню зростає. За результатами попередніх експериментальних досліджень для подрібненого м'яса після оброблення на вовчку зменшення пористості приблизно в 1,5 разів може відбуватися при тиску 10^4 - $2 \cdot 10^4$ Па. Це значення є важливим орієнтиром для визначення технологічно допустимого тиску формування [7, 8].

Якщо тиск є надто малим, виріб може мати нестабільну форму, крихку структуру та нерівномірну щільність. Якщо тиск є надмірним, можливе надмірне ущільнення, виділення вологи, погіршення соковитості, руйнування структури білково-жирової системи та підвищення енергетичних витрат. Тому оптимальний тиск формування має забезпечувати достатню

структурну міцність виробу без погіршення його якості.

Для точнішого розрахунку процес деформування м'ясного фаршу доцільно розділяти на окремі етапи: $0-t_1$; t_1-t_2 ; t_2-t_3 ; t_3-t_4 .

У разі деформування в'язко-пружної системи, яка включає паралельно з'єднані пружний та в'язкий елементи, тиском, що змінюється за нелінійним законом, математична модель деформування у вигляді диференціального рівня має вигляд.

$$c y(t) + \mu \frac{dy(t)}{dt} = k t. \quad (17)$$

На кожному етапі приймається своє середнє значення тиску, а також відповідні значення в'язкої та пружної характеристик фаршу. Такий підхід є більш точним, ніж розрахунок за одним середнім значенням, оскільки враховує зміну структури продукту під час ущільнення.

При початкових умовах $t=0 \Rightarrow y(0)=0$ отримаємо розв'язок рівняння.

$$y(t) = \frac{k}{c^2} (t c - \mu + e^{-\frac{ct}{\mu}} \mu). \quad (18)$$

Виконавши диференціювання рівняння знайдемо швидкість деформування

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{k}{c} (1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (19)$$

На першому етапі деформування фарш стискається легше, тому питома робота є меншою.

На інтервалі $0-t_1$ початку деформування маємо:

$$A = \int_0^{t_1} F_{\partial} dy(t) = \int_0^{t_1} F_{\partial c} \frac{k}{c} (1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}) dt = \frac{F_{\partial c} k}{c^2} (c t_1 - \mu + \mu e^{-\frac{ct_1}{\mu}}). \quad (20)$$

Виконавши диференціювання рівняння знайдемо витрату енергії – питому потужність на даному етапі деформування:

$$N = \frac{F_{\partial c} k}{c} (1 - e^{-\frac{ct_1}{\mu}}), \quad (21)$$

де F_{∂} – середнє значення навантаження деформування в інтервалі від нуля до t_1 .

На другому етапі стискання враховуємо початкову відносну деформацію h_0 від першого етапу. Тоді початкові умови для розв'язку диференціального рівняння (1) будуть $t=0 \Rightarrow y(0)=h_0$. Також для другого етапу деформування будуть інші реологічні характеристики μ і c та величина середнього тиску.

На наступних етапах, коли пористість зменшується, збільшується опір деформуванню, а відповідно зростає питома робота і потужність.

Для другого етапу деформування маємо розв'язок диференціального рівняння:

$$y(t) = \frac{k}{c^2} \left[t c - \mu + e^{-\frac{ct}{\mu}} (h_0 + \frac{k \mu}{c^2}) \right]. \quad (22)$$

Відповідно швидкість деформування:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{k}{c} - \frac{c e^{-\frac{ct}{\mu}} (h_0 + \frac{k \mu}{c^2})}{\mu}. \quad (23)$$

Питома робота деформування буде з урахуванням нового значення середнього тиску $F_{\partial c} = k(t_2 - t_1)/2$ та нових значень реологічних

характеристик μ і c на другому етапі t_1 - t_2 деформування.

$$A = \frac{F_{\partial c}}{c^2} (kct - h_0 c^2 - \mu k + h_0 c^2 e^{-\frac{ct}{\mu}} + \mu k e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (24)$$

Швидкість витрачання енергії, тобто питома потужність:

$$N = \frac{dA}{dt} = \frac{F_{\partial c}}{c^2} (kc - \frac{c^3 h_0 e^{-\frac{ct}{\mu}}}{\mu} - c k e^{-\frac{ct}{\mu}}). \quad (25)$$

Це означає, що енергетичний розрахунок обладнання повинен враховувати не тільки початковий стан фаршу, але і його стан наприкінці формування.

Практично запропонований підхід може бути використаний для розрахунку обладнання таких типів:

- формувальні машини для котлет і биточків;
- дозувальні пристрої для фаршу;
- шприци для ковбасного виробництва;
- пресувальні пристрої для м'ясних напівфабрикатів;
- пакувальні машини з ущільненням продукту;
- обладнання для виробництва структурованих м'ясних виробів.

Під час проектування такого обладнання необхідно враховувати:

- в'язкість і пружність фаршу (структурно-механічні властивості);
- температуру продукту;
- ступінь подрібнення м'яса;
- вміст жиру і вологи;
- наявність білкових або рослинних добавок;
- коефіцієнт тертя між фаршем і робочою поверхнею;
- тиск формування;
- тривалість дії навантаження;
- можливість релаксації після стискання.

Отримані розрахункові залежності дають змогу оцінити вплив реологічних характеристик м'ясного фаршу, сили тертя, тиску та тривалості навантаження на енергетичні параметри процесу формування. Поетапний підхід є доцільним, оскільки структура фаршу під час стискання змінюється: зменшується пористість, зростає щільність і підвищується опір подальшій деформації.

Таким чином, енергетична оцінка процесу деформування м'ясного фаршу є важливим етапом проектування (моделювання) сучасного енергоощадного обладнання. Вона дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю, якістю готових виробів і мінімальними витратами енергії.

Висновки

1. М'ясний фарш є в'язко-пружною дисперсною системою, енергетичні витрати на деформування якої залежать від тиску, пористості, в'язкості, пружності та умов тертя.

2. Повна питома робота формування фаршу повинна враховувати не лише роботу стискання, а й роботу сили тертя, яка виникає під час контакту продукту з робочими органами обладнання.

3. Питома потужність процесу є важливим параметром для вибору привода формувальних, дозувальних і пакувальних машин.

4. Для фаршу після подрібнення на вовчку орієнтовне зменшення пористості в 1,5 раза може відбуватися при тиску 10^4 - $2 \cdot 10^4$ Па, що доцільно враховувати під час вибору технологічно допустимого тиску формування.

5. Поетапний розрахунок процесу деформування дозволяє точніше визначати енергетичні витрати, оскільки враховує зміну реологічних характеристик фаршу на різних стадіях ущільнення.

6. Запропонований підхід може бути використаний для проектування енергоощадного обладнання для виробництва котлет, ковбасних виробів, м'ясних напівфабрикатів і пакованих фаршевих продуктів.

7. Раціональний вибір режимів формування м'ясного фаршу повинен базуватися на узгодженні швидкості деформування, тиску, тривалості навантаження та реологічних властивостей продукту, що дозволяє зменшити енергетичні витрати і забезпечити стабільну якість готових виробів.

Список використаних джерел

1. Rao M. A. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications. 3rd ed. New York : Springer, 2014. 482 p.
2. Bourne M. C. Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. 2nd ed. San Diego : Academic Press, 2002. 427 p.
3. Cevik M., Icier F. Characterization of viscoelastic properties of minced beef meat thawed by ohmic and conventional methods. Food Science and Technology International. 2020. Vol. 26, Issue 4. P. 277–289. <https://doi.org/10.1177/1082013219888300>.
4. Bruno M., Moresi M. Viscoelastic properties of Bologna sausages by dynamic methods. Journal of Food Engineering. 2004. Vol. 63, Issue 3. P. 291–298. DOI:[10.1016/j.jfoodeng.2003.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.08.012).
5. Полевода Ю. А., Волинець Є. О. Аналіз розвитку технологічного обладнання для виробництва харчових сумішей. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2020. № 4 (111). С. 72–79. DOI: 10.37128/2520-6168-2020-4-8.
6. Полевода Ю. А., Волинець Є. О. Дослідження віброреологічних моделей шару сипкого середовища. Техніка, енергетика,

транспорт АПК. 2021. № 1 (112). С. 1–10. DOI: 10.37128/2520-6168-2021-1-8.

7. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Ткачук І. В., Коваль О. А. Моделювання процесу соління м'яса в горизонтальних барабанах. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. № 1 (112). С. 72–80. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-1-8.

8. Goots V., Solona O., Polievoda Y., Symonik B. Rheology in standardized food formation processes. Вібрації в техніці та технологіях. 2025. № 1 (116). С. 112–119. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-1-15

9. Karaman S., Yilmaz M. T., Dogan M., Yetim H., Kayacier A. Dynamic oscillatory shear properties of O/W model system meat emulsions: linear viscoelastic analysis for effect of temperature and oil concentration on protein network formation. *Journal of Food Engineering*. 2011. Vol. 107, Issue 2. P. 241–252. doi: [10.1007/s13197-014-1434-3](https://doi.org/10.1007/s13197-014-1434-3).

10. Ahmed J., Ramaswamy H. S. Dynamic rheology and thermal transitions in meat-based strained baby foods. *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 78, Issue 4. P. 1274–1284. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2005.12.035](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.035)

11. Leygonie C., Britz T. J., Hoffman L. C. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review. *Meat Science*. 2012. Vol. 91, Issue 2. P. 93–98. [10.1016/j.meatsci.2012.01.013](https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.01.013).

12. ДСТУ 4437:2005. Напівфабрикати м'ясні та м'ясо-рослинні посичені. Технічні умови. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 21 с.

References

1. Rao, M. A. 2014. Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications. 3rd ed. New York : Springer, 482 p. [in English].

2. Bourne, M. C. 2002. Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement. 2nd ed. San Diego : Academic Press, 427 p. [in English].

3. Cevik, M., Icier, F. 2020. Characterization of viscoelastic properties of minced beef meat thawed by ohmic and conventional methods. *Food Science and Technology International*. Vol. 26, Issue 4. P. 277–289. [in English].

4. Bruno, M., Moresi, M. 2004. Viscoelastic properties of Bologna sausages by dynamic methods. *Journal of Food Engineering*. Vol. 63, Issue 3. P. 291–298. [in English].

5. Polievoda, Yu. A., Volynets, Ye. O. 2020. Analiz rozvytku tekhnolohichnoho obladnannia dlia vyrobnytstva kharchovykh sumishei. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 4 (111). S. 72–79. [in Ukrainian].

6. Polievoda, Yu. A., Volynets, Ye. O. 2021. Doslidzhennia vibroelohichnykh modelei sharu

sypkoho seredovyscha. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 1 (112). S. 1–10. [in Ukrainian].

7. Huts, V. S., Polievoda, Yu. A., Tkachuk, I. V., Koval, O. A. 2024. Modeliuvannia protsesu solinnia miasa v horyzontalnykh barabanakh. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 1 (112). S. 72–80. [in Ukrainian].

8. Goots, V., Solona, O., Polievoda, Y., Symonik, B. 2025. Rheology in standardized food formation processes. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 1 (116). S. 112–119. [in English].

9. Karaman, S., Yilmaz, M. T., Dogan, M., Yetim, H., Kayacier, A. 2011. Dynamic oscillatory shear properties of O/W model system meat emulsions: linear viscoelastic analysis for effect of temperature and oil concentration on protein network formation. *Journal of Food Engineering*. Vol. 107, Issue 2. P. 241–252. [in English].

10. Ahmed, J., Ramaswamy, H. S. 2007. Dynamic rheology and thermal transitions in meat-based strained baby foods. *Journal of Food Engineering*. Vol. 78, Issue 4. P. 1274–1284. [in English].

11. Leygonie, C., Britz, T. J., Hoffman, L. C. 2012. Impact of freezing and thawing on the quality of meat: review. *Meat Science*. Vol. 91, Issue 2. P. 93–98. [in English].

12. DSTU 4437:2005. 2006. Napivfabrykaty miasni ta miaso-roslynni posicheni. Tekhnichni umovy. Kyiv : Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 21 s. [in Ukrainian].

ENERGY ASSESSMENT OF THE DEFORMATION PROCESS OF MINCED MEAT DURING PRODUCT FORMING IN TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

The article addresses the issue of determining energy consumption during the deformation of minced meat in food product forming, dosing, and compaction processes. Minced meat is considered as a complex viscoelastic dispersed system characterized by a combination of elastic, viscous, and plastic properties that significantly influence the nature of deformation processes and the energy performance of technological equipment. An analysis of the main factors affecting the deformation work has been carried out, including the internal resistance of the material, friction forces between the product and working surfaces, loading rate, and changes in the structural and mechanical characteristics of minced meat during compaction.

A mathematical approach for evaluating the specific deformation work is proposed, taking into account the combined effect of compression work and the work required to overcome friction forces. A viscoelastic model was used to describe the behavior of minced meat, making it possible to consider changes in the rheological properties of the product under loading. A sequence for calculating the energy

parameters of the process has been developed, enabling the determination of specific work, power consumption, and the nature of load variation depending on the kinematic parameters of the machine working elements.

It has been established that an increase in the degree of compaction is accompanied by a decrease in product porosity, an increase in resistance to deformation, and a rise in specific energy consumption. It is shown that an important task in the design of forming equipment is the determination of the

maximum technologically permissible pressure at which further linear deformation of the product practically ceases and additional energy consumption becomes inefficient. The obtained relationships can be used to substantiate rational operating modes of equipment and to select its design parameters.

Keywords: minced meat, forming, compression, deformation, specific work, power, friction, modeling, rheology, structural and mechanical properties..

Відомості про авторів

Goots Viktor – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies, Faculty of Production, Processing and Robotics in Animal Husbandry, Vinnytsia National Agrarian University (8, Yunosti Avenue, Vinnytsia, 21008, Ukraine, 21021, e-mail: Goots@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-3874-5609>).

Yaropud Vitalii – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Engineering and Technology, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, yaropud77@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Polievoda Yurii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Tokarchuk Oleksii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, head of the Department of Engineering Mechanics and Technological Processes at the Agricultural Complex, Leading Researcher of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, e-mail: tokarchyk08@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

Гуць Віктор Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (проспект Юності, 8, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: Goots@ukr.net, <http://orcid.org/0000-0003-3874-5609>).

Яропуд Віталій Миколайович – доктор технічних наук, доцент, декан «Інженерно-технологічного факультету» Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна. yaropud77@gmail.com <https://orcid.org/0000-0003-0502-1356>).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Токарчук Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри Інженерної механіки та технологічних процесів в АПК, провідний науковий співробітник Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: tokarchyk08@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

Стаття надійшла 24.06.2026

Стаття прийнята 05.07.2026

Опубліковано 12.10.2026