

**Полевода Ю.А.**

к.т.н., доцент

Симонік Б.В.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Polievoda Y.**

Ph.D., Associate Professor

Symonik B.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 664:532****DOI: 10.37128/2306-8744-2026-2-15****ОБҐРУНТУВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ТА
ТРИБОТЕХНІЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК РОБОЧОЇ
КАМЕРИ НАГНІТАЛЬНИХ СИСТЕМ**

У статті розглянуто науково-прикладні аспекти обґрунтування геометричних і триботехнічних параметрів робочої камери шнекових нагнітальних систем, призначених для транспортування та формування м'ясних фаршів із різними реологічними властивостями. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності процесів переробки харчової сировини та забезпечення збереження структурно-механічних характеристик білкової матриці продукту.

У роботі проаналізовано вплив контактної взаємодії між фаршем і поверхнями шнека та робочої камери, зокрема співвідношення коефіцієнтів тертя, на формування стабільного транспортного потоку. Встановлено, що визначальним чинником ефективного нагнітання є забезпечення фрикційної асиметрії, яка запобігає явищу пристінного проковзування та баластного обертання продукту. Для підвищення тягової здатності камери запропоновано модифікацію її внутрішньої поверхні шляхом формування поздовжніх пазів, які сприяють переходу від зовнішнього тертя «продукт-метал» до внутрішнього зсуву «продукт-продукт».

Обґрунтовано доцільність застосування конфузорної (конічної) геометрії у передматричній зоні робочої камери, що забезпечує поступове зростання тиску, герметизацію робочого простору та зменшення зворотних перетоків фаршу через радіальний зазор. Доведено, що геометрична трансформація каналу сприяє стабілізації швидкісного поля та зниженню гідравлічних втрат.

Розроблено математичну модель процесу транспортування в'язко-пружного середовища. Встановлено закономірності впливу радіального зазору, швидкісних параметрів і реологічних характеристик сировини на інтенсивність дисипації енергії та тепловий режим процесу. Показано, що надмірне зменшення зазору призводить до локального перегріву та деградації білкових структур, тоді як його оптимізація дозволяє мінімізувати втрати енергії.

Проведений кінематичний аналіз дозволив визначити залежності, що описують режим транспортування фаршу, зокрема співвідношення швидкостей і умови безперервності потоку. Встановлено відмінності у поведінці фаршів різних реологічних груп та їх вплив на конструктивні параметри шнекових систем.

Запропоновані підходи можуть бути використані при проектуванні та модернізації обладнання харчової промисловості.

Ключові слова: шнековий нагнітач, робоча камера, м'ясний фарш, реологічні властивості, триботехнічні характеристики, радіальний зазор, масоперенос, дисипація енергії, енергоефективність.



Постановка проблеми. У механіці гвинтового нагнітання м'ясних компонентів робоча камера виконує функцію силового демпфера та стабілізуючого спрямовувача. Її роль полягає у забезпеченні ефективної трансформації обертального моменту шнека в аксіальне переміщення продукту шляхом керування фрикційними характеристиками на контактних поверхнях. Для в'язко-пружних середовищ (група В) критичним фактором є ефект пристінного ковзання, що дестабілізує потік. Недостатній рівень коефіцієнту тертя фаршу об стінку камери, характерний для жиромісних фаршів (група А), призводить до явища «баластного обертання» маси разом зі шнеком, що генерує дисипативний нагрів без корисного переміщення. Для подолання цього ефекту внутрішня поверхня камери модифікується поздовжніми пазами, параметри яких корелюють із межею текучості σ_{max} . Заповнення канавок фаршем створює шар стаціонарної субстанції, замінюючи зовнішнє тертя «фарш-метал» на енергетично більш смне внутрішнє тертя «фарш-фарш».

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблематика транспортування в'язко-пружних харчових середовищ у шнекових системах є предметом активних досліджень у галузях харчової інженерії, реології та трибології. У сучасних роботах значна увага приділяється встановленню взаємозв'язку між геометрією робочих органів і реологічними характеристиками сировини [1].

Класичні дослідження шнекових транспортувальних систем базуються на теорії гвинтового нагнітання, де процес розглядається як суперпозиція прямого та зворотного потоків. При цьому визначальним фактором ефективності є співвідношення сил тертя на поверхнях «продукт-шнек» та «продукт-стінка камери». У низці робіт показано, що недостатнє тертя на стінці призводить до явища проковзування та зниження об'ємного ККД системи [2, 3].

Сучасні дослідження у сфері переробки м'ясної сировини акцентують увагу на складній в'язко-пружній природі фаршевих систем. Встановлено, що такі середовища характеризуються наявністю межі текучості, нелінійною залежністю напруження від швидкості зсуву та схильністю до структурних змін під дією температури і механічних навантажень. Це обумовлює необхідність адаптації конструкції робочих органів до конкретних реологічних груп продукту.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із триботехнічними характеристиками контактних поверхонь. Доведено, що мікрогеометрія стінок робочої камери суттєво

впливає на режим течії продукту. Використання текстурованих поверхонь, зокрема поздовжніх пазів, дозволяє змінити характер взаємодії з продуктом, переводячи зовнішнє ковзання у внутрішній зсув, що підвищує ефективність транспортування [4, 5, 6].

У працях, присвячених енергетичному аналізу процесу, встановлено, що основними джерелами енерговитрат є подолання в'язкого тертя та дисипація енергії у зоні радіального зазору. При цьому надмірне зменшення зазору призводить до локального перегріву продукту та його структурної деградації, тоді як збільшення – до зростання зворотних перетоків.

Останні дослідження також підтверджують ефективність використання конфузурних каналів у формувальних зонах шнекових машин. Така геометрія забезпечує плавне зростання тиску, зменшення гідравлічних втрат та стабілізацію потоку, що особливо важливо для високов'язких білкових систем [7].

Незважаючи на значну кількість наукових робіт, питання комплексного врахування геометричних, кінематичних та енергетичних параметрів у поєднанні з реологічними властивостями фаршу залишаються недостатньо дослідженими. Це обумовлює актуальність подальшого розвитку моделей, що дозволяють оптимізувати конструкцію нагнітальних систем [8].

Виклад основного матеріалу. Зона стабілізації тиску піддається інтенсивним радіальним навантаженням (P_r). Враховуючи високий модуль пружності сировини групи В ($E = 12,7$ кПа/мм), робоча камера розраховується як товстостінна циліндрична судина. Модернізація вузла передбачає перехід від циліндричної до конфузурної (конічної) геометрії у передматричній зоні. Така трансформація забезпечує герметизацію робочого простору та мінімізацію зворотних витоків через радіальний зазор. Гомогенне ущільнення структури фаршу та нівелювання ефекту пружного післядії (розширення) сировини, що стабілізує швидкість витікання.

Питома енергоємність процесу E_{spec} прямо залежить від інтенсивності зсувних напружень у зазорі δ між гребенем шнека та камерою. Для запобігання термічній деградації білків і руйнування когезійних зв'язків, величина зазору δ повинна задовольняти умову обмеження температурного градієнта ($\Delta T \leq 2-4$ К):

$$\delta \geq \frac{\nu^2 \mu}{\lambda \Delta T}, \quad (1)$$



де δ – радіальний зазор між шнеком і робочою камерою, м;

v – колова швидкість шнека, м/с;

μ – динамічна в'язкість фаршу, Па·с;

λ – коефіцієнт теплопровідності сировини, Вт/(м·К);

ΔT – допустимий температурний градієнт (перепад температур), К.

Для механічно резистентної сировини групи В доцільним є збільшення зазору для зниження локальних напружень зсуву. Натомість для групи А зазор мінімізується для запобігання фазовій сепарації жиру.

Синтез макрогеометрії (конічний тракт) та мікрогеометрії (шорсткість $R_a = 1,6-3,2$ мкм) дозволяє адаптувати нагнітальну систему до реологічних особливостей групи В. Це гарантує структурну цілісність білкової матриці при одночасному зниженні енерговитрат на 12-15 % внаслідок оптимізації сил тертя та усунення зворотних перетоків [9].

Проведемо моделювання взаємодії фаршу у зазорі «шнек-камера». Питома енергоємність процесу E_{spec} визначається сумарною потужністю, що витрачається на нагнітання продукту та подолання сил в'язкого тертя. Математично потужність дисипації N_{dis} у зазорі δ при зсувній течії в'язко-пружного фаршу описується інтегральним рівнянням:

$$N_{dis} = \int_0^L \int_0^{\pi D} \tau v dz dx \frac{Q}{N_{frict}} \approx \frac{\mu_{ef} (\pi D)^2}{\delta} L e_{zp}, \quad (2)$$

де τ – дотичне напруження зсуву в зазорі, Па;

dz, dx – змінні інтегрування вздовж поздовжньої та поперечної осей каналу, м;

Q – об'ємна витрата продукту, м³/с;

N_{frict} – коефіцієнт енергетичних втрат (безрозмірна величина);

μ_{ef} – ефективна динамічна в'язкість фаршу, Па·с;

D – діаметр шнека, м;

L – довжина робочої зони ділянки нагнітання, м;

e_{zp} – коефіцієнт ширини гребеня;

З цього рівняння випливає, що при зменшенні зазору δ потужність дисипації зростає гіперболічно ($N_{sim} \sim 1/\delta$), що призводить до локального перегріву фаршу.

Введення конічної насадки до камери змінює градієнт тиску dP/dz . Геометрія коносоїдальної вставки – осесиметричний звужувальний канал, визначається виразом:

$$r(z) = r_0 \left(1 - \frac{z}{L_k} \right)^n, \quad (3)$$

де: r_0 – радіус камери;

z – поточна осьова координата вздовж вставки, м;

L_k – довжина конічної частини;

$N=1,2-1,5$ – параметр плавності (коносоїдальна форма).

Оптимальні параметри для фаршу кут конусності: 6-12°; довжина вставки: 2-4 D ; коефіцієнт звуження: 2-4. На основі запропонованих даних і проведеного моделювання (рис.1) точки зору силового аналізу:

$$\Delta P \approx \zeta \frac{\rho v_1^2}{2}, \quad (4)$$

стає:

$$\Delta P = \int_0^{L_k} \tau_w(z) \frac{2}{R(z)}, \quad (5)$$

де ΔP – втрати тиску у конфузорній вставці, Па;

ζ – коефіцієнт структурної нестабільності (безрозмірна величина);

ρ – густина середовища (фаршу), кг/м³;

v_1 – середня швидкість потоку фаршу в каналі, м/с;

$\tau_w(z)$ – дотичне напруження зсуву на стінці каналу в поточному перерізі z , Па;

$R(z)$ – поточний радіус конфузорного каналу, м;

Тобто замість ударного гідравлічного опору – розподілений.

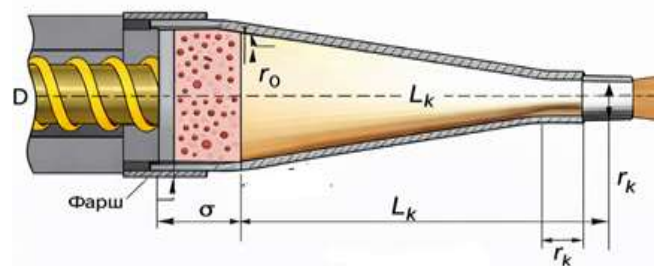


Рис. 1. Коносоїдальна вставка для формування виробу

Для конфузорного каналу з кутом конусності φ рівняння балансу витрат набуває вигляду:

$$Q_{real} = Q_d - Q_p = \frac{\pi D^2}{4} h n \eta_{eff} - \frac{\pi D h^3 \sin^2 \alpha}{12 \mu_{eff} \cos \varphi} \cdot \frac{\Delta P}{L}, \quad (6)$$

Q_{real} – дійсна об'ємна витрата шнекового нагнітача, м³/с;

Q_d, Q_p – відповідно напірний та зворотний потоки фаршу, м³/с; або

Q_d – прямий (напірний) потік продукту, м³/с;

Q_p – зворотний потік (перетоки через зазор), м³/с;

h – середня глибина каналу шнека, м;



(кроку шнека), що призводить до зростання градієнта тиску ΔP .

Для аналізу динаміки переміщення точки в робочому каналі встановлено залежності для розрахунку шляху частинки. Вираз для осьової координати x_1 враховує накопичену деформацію в міжвитковому просторі за час t_1 :

$$x_1 = U_{os} t_1 + R\sqrt{\Omega^2 - 1}, \quad (11)$$

Фізичний зміст складової $R\sqrt{\Omega^2 - 1}$ полягає у врахуванні додаткового зміщення, викликаного різницею між швидкістю обертання шнека та поступальним рухом продукту (ефект проковзування). Шлях, який долає точка витка за півоберту шнека з урахуванням кінематичного режиму, описується як:

$$x_2 = \pi R \Omega, \quad (12)$$

Ця величина характеризує крок гвинтової траєкторії частинки сировини, що безпосередньо пов'язано з часом релаксації в'язко-пружних напружень. Фундаментальною умовою стабільного функціонування нагнітача є дотримання безперервності потоку, що виражається сталістю об'ємної витрати Q в кожному перерізі робочої камери висотою H :

$$Q = \iint F(x, y, z) dV = const, \quad (13)$$

Процес транспортування сировини в робочій камері, як показано на кінематичній схемі (рис. 2), детермінується суперпозицією двох потоків. Прямий потік формується завдяки обертанню шнека (функція параметрів n , D , α), тоді як зворотний потік виникає під дією градієнта тиску $\Delta P/L$ уздовж осі транспортування.

Зростання градієнта тиску, характерне для щільної структури фаршу групи В, створює ризик локальної стагнації продукту. Це призводить до дисипативного саморозігріву та стрибкоподібного зростання питомої енергоємності. Схематично цей ефект відображається зменшенням фактичного осьового зміщення Δx відносно теоретичного кроку шнека S .

За основу аналізу контактної взаємодії прийнято енергетичну модель, адаптовану з теорії руху гранульованих середовищ [11]. Стан переміщення елементарної маси фаршу описується залежністю, що пов'язує тиск та кінетичну енергію:

$$P\varepsilon = Cv^2, \quad (14)$$

де: P – аналог гідростатичного тиску в камері, Па;

ε – коефіцієнт дилатації структурної матриці фаршу (безрозмірна величина);

C – емпіричний коефіцієнт інерційного опору структурної матриці, кг/м^3 ;

Сумарна кінетична енергія переміщення елементарної маси $E_{заз}$ представлена сумою трьох компонент:

$$E_{заз} = E_{tr} + E_{fl} + E_{rot}, \quad (15)$$

де E_{tr} – трансляційна енергія, що зумовлює корисне осьове переміщення на відстань $x_1 = U_{os}$. Кут нахилу цієї траєкторії α_1 визначає ефективність нагнітання;

E_{fl} – флуктуаційна енергія, що відображає внутрішню дисипацію та мікрозсуви білкових фібрil, що призводить до саморозігріву.

E_{rot} – енергія поперечного масопереносу, що визначає інтенсивність циркуляції у міжвитковому просторі та шлях $x_2 = R\Omega$, що відповідає за гомогенізацію.

Для кількісної оцінки роботи нагнітача використано коефіцієнт ефективності транспортування:

$$\eta_{tr} = \frac{x}{S}, \quad (16)$$

де x – фактичне осьове зміщення;
 S – теоретичний крок шнека.

Встановлено, що для фаршу групи В показник η_{tr} лімітується інтенсивним в'язко-пластичним опором, що математично виражається через зростання частки енергії E_{fl} у загальному балансі. Геометричний крок витка S з урахуванням кількості заходів z та енергетичного стану середовища визначається як:

$$S = \frac{\pi D z}{\Omega K_{stab}}, \quad (17)$$

де $K_{stab} = \tan \alpha_1 / \tan \alpha$ – коефіцієнт кінематичної стабільності.

Виходячи з адитивності складових енергій, підставимо розгорнуті значення швидкостей для кожної компоненти у базове рівняння сумарної енергії $E_{заз}$. Поступальна швидкість v_{tr} враховує реальний шлях частинки Δx за час t . Ми пов'язуємо її з осьовим переміщенням x_1 та кутом α_1 .

$$v_{tr} = x_1 / t \cos \alpha_1, \quad (18)$$

Флуктуаційна швидкість v_{fl} у в'язко-пружному середовищі пропорційна градієнту швидкості в зазорі та реологічному чиннику μ_{eff} .

$$v_{fl} = \zeta \frac{\pi D n \delta}{\mu_{eff}}. \quad (19)$$

Швидкість поперечного переносу v_{rot} визначається через циркуляційний крок x_2 та кут α_2 :

$$v_{rot} = x_2 / t \cos \alpha_2, \quad (18)$$

Підставляючи дані вирази у вихідне рівняння $E_{заз}$, отримуємо розгорнуту модель для елементарної маси фаршу m :

$$E_{заг} = \frac{m}{2} \left[\left(\frac{x_1}{t \cos \alpha_1} \right)^2 + \left(\zeta \frac{\pi D n \delta}{\mu_{eff}} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{t \sin \alpha_2} \right)^2 \right],$$

Для фаршів групи В (високов'язких) домінуючим стає другий доданок (флуктуаційна енергія E_{fl}). Через високе значення μ_{eff} у знаменнику, система вимагає критичного зростання тиску P , щоб підтримати трансляційну складову. Якщо μ_{eff} занадто велика, енергія флуктуацій перетворюється на теплоту, що веде до денатурації білків. Роль кутових параметрів α_1, α_2 встановлює, що енергія E_{tr} та E_{rot} обернено пропорційні тригонометричним функціям кутів траєкторії. Це математично доводить, що мінімізація кута підйому гвинтової лінії α , яку обґрунтували раніше, є необхідною для стабілізації знаменників і максимізації корисного переміщення x_1 . Зміна величини зазору δ у другому доданку безпосередньо впливає на баланс енергії. Для фаршів рупи В маємо знайти такий зазор δ , при якому сума $E_{fl} + E_{rot}$ забезпечує гомогенність, але не спричиняє структурного руйнування білкової матриці. Суть побудованої моделі полягає в енергетичному балансі транспортування високов'язкого фаршу (група В) у шнеку, подана на рис.3.

Запропонована модель та графічне зображення дозволяє розраховувати питому енергоємність процесу не як емпіричну сталу, а як динамічну функцію від реології сировини (μ_{eff}), геометрії шнека (x_1, α_1) та стану робочої камери (δ, ζ). Це забезпечує обґрунтування конструктивних параметрів, що гарантують

зниження енерговитрат на 12-15 % при збереженні нативної білкової матриці фаршу.

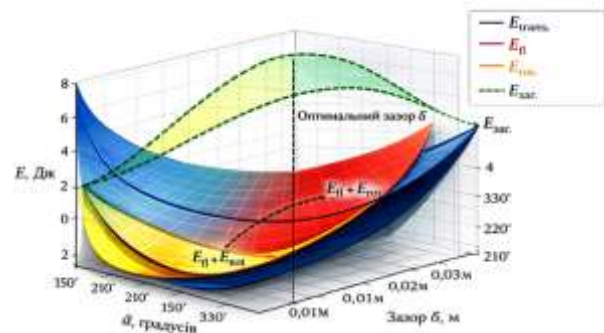


Рис. 3. Енергетичний баланс під час транспортування вязко-пружної фаршової маси

На основі проведеного аналізу сформуємо порівняльну таблицю, яка наочно демонструє, як реологічні особливості фаршів різних груп трансформують кінематичні та енергетичні показники вашої моделі.

Для групи А основною проблемою є низьке значення K_{stab} через ефект U_{slip} . Енергія витрачається не на нагнітання, а на баластне обертання. Тому для цієї групи критичним є мінімальний зазор δ та гостра кромка витка. Для групи В бачимо високу частку E_{fl} (дисипації). Це підтверджує теорію про те, що для таких фаршів не можна просто підвищувати частоту обертів n , оскільки енергія E_{fl} зростає пропорційно квадрату швидкості.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика параметрів масопереносу для фаршів груп А і В

Параметр / характерист.	Група А (жировмісні, низьков'язкі)	Група В (високов'язкі, білкові)	Вплив на конструкцію
Ефективна в'язкість μ_{eff}	Низька / Середня	Висока (резистентна)	Визначає опір зсуву
Коефіцієнт K_{stab}	0,55 - 0,68	0,82 - 0,92 (з пазами)	Потребує шліців у камері
Енергія флуктуації E_{fl}	Мінімальна	Максимальна (дисипативна)	Ризик термічної деградації
Енергія переносу E_{tr}	Обмежена проковзуванням	Домінуюча (при D пряме до max)	Визначає продуктивність
Кут траєкторії α_1	$\alpha_1 \ll \alpha$	$\alpha_1 \approx \alpha$	Показник "відставання" потоку
Ефект проковзування U_{slip}	Високий (жирова плівка)	Низький (заклинювання)	Впливає на ККД нагнітання
Радіальний зазор δ	Мінімальний	Збільшений (адаптивний)	Знижує локальні напруження

Оптимальний шлях – збільшення діаметра D при стабільному n , що дозволяє тримати E_{tr} на високому рівні без перегріву. Узагальнена формула $E_{заг}$ чітко показує, що для групи В фізика зерна (дилатація ϵ) працює на створення внутрішнього тиску, що дозволяє частинкам рухатися більш спрямовано (x_1 пряме до max).

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що ефективність роботи шнекових нагнітальних систем визначається комплексною взаємодією

геометричних параметрів робочої камери, триботехнічних характеристик контактних поверхонь та реологічних властивостей м'ясної сировини.

Доведено, що ключовим фактором стабільного транспортування є забезпечення фрикційної асиметрії, за якої сили тертя на стінці камери перевищують сили тертя на поверхні шнека. Реалізація цього принципу досягається шляхом модифікації внутрішньої поверхні камери поздовжніми пазами, що забезпечує перехід від зовнішнього ковзання до



внутрішнього зсуву.

Обґрунтовано доцільність використання конфузornoї геометрії у передматричній зоні, яка дозволяє мінімізувати зворотні перетоки, стабілізувати тиск та забезпечити рівномірне ущільнення продукту. Встановлено, що радіальний зазор між шнеком і камерою є визначальним параметром регулювання теплового режиму та інтенсивності дисипації енергії.

Розроблена енергетична модель процесу транспортування дозволила врахувати співвідношення трансляційної, флуктуаційної та циркуляційної складових енергії. Показано, що для високов'язких фаршів домінуючою є флуктуаційна складова, що обумовлює необхідність оптимізації геометрії та режимів роботи для запобігання термічній деградації продукту.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості цілеспрямованого вибору конструктивних параметрів шнекових систем залежно від реологічних характеристик сировини. Це забезпечує зниження енерговитрат при збереженні структурної цілісності білкової матриці та підвищенні якості готового продукту.

Список використаних джерел

1. Sokolenko V. et al. Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. 2020. Vol. 14. P. 915–924. DOI: 10.5219/1436
2. Черевко О. І., Поперечний А. М., Фролов О. В. та ін. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. Харків : ХДУХТ, 2016. 390 с.
3. Полевода Ю. А., Симонік Б. В. Обґрунтування параметрів гвинтових нагнітачів фаршових систем на основі моделювання реологічної поведінки м'ясної сировини. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2026. № 1 (120). С. 148–153. DOI: 10.37128/2306-8744-2026-1-16
4. Wang Z., Ye R., Xiang J. The performance of textured surface in friction reducing: a review. *Tribology International*. 2023. Vol. 177. P. 108010. DOI:10.1016/j.triboint.2022.108010
5. Sose A. T., Joshi S. Y., Kunche L. K., Wang F., Deshmukh S. A. A review of recent advances and applications of machine learning in tribology. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2023. Vol. 25. P. 4408–4443. DOI: 10.1039/D2CP03692D
6. Марчук Р. М., Мнацаканов Р. Г. Аналіз та інтерпретація зносу полімерних матеріалів на основі трибометричних досліджень. *Проблеми тертя та зношування*. 2023. № 4 (101). С. 52–60. DOI: 10.18372/0370-2197.4(101).18079
7. Huang T., Jiang X., Wang S., Peng Z., Jian R. Continuous fabrication of oriented rubber nanocomposites with improved thermal conductivity via torsion-induced extrusion processing. *Physics of*

Fluids. 2025. Vol. 37, Iss. 7. P. 073125. DOI: 10.1063/5.0273014

8. Гуць В. С., Полевода Ю. А., Симонік Б. В. Деформування в'язко-пружних систем в харчових технологіях. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2025. № 3 (118). С. 113–119. DOI: 10.37128/2306-8744-2025-3-13

9. Abeykoon C., Kelly A. L., Brown E. C., Coates P. D. The effect of extrusion variables on the process energy consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 71. P. 139–153. DOI: 10.1007/s00170-013-5481-9

10. Бандура В. М., Філоненко О. М. Математичне моделювання процесу нагнітання в'язко-пластичних мас у шнекових апаратах харчових виробництв. *Наукові праці НУХТ*. 2021. Т. 27, № 1. С. 112–119. DOI: 10.24263/2225-2924-2021-27-1-14

11. Coetzee C. J. Calibration of the discrete element method and the Hertz-Mindlin contact model for granular materials. *Powder Technology*. 2017. Vol. 310. P. 104–142. DOI:10.1016/j.powtec.2017.01.015

References

1. Sokolenko, V. et al. 2020. Mathematical modeling of the oil extrusion process with pre-grinding of raw materials in a twin-screw extruder. *Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences*. Vol. 14. P. 915–924. [in English].
2. Cherevko, O. I., Poperechnyi, A. M., Frolov, O. V. та ін. 2016. *Protsesy i aparaty kharchovykh vyrobnytstv : pidruchnyk*. Kharkiv : KhDUKHT, 390 s. [in Ukrainian].
3. Polievoda, Yu. A., Symonik, B. V. 2026. Obgruntuvannia parametriv hvyntovykh nahnitachiv farshovykh system na osnovi modeliuвання reolohichnoi povedinky miasnoi syrovyny. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 1 (120). S. 148–153. [in Ukrainian].
4. Wang, Z., Ye, R., Xiang, J. 2023. The performance of textured surface in friction reducing: a review. *Tribology International*. Vol. 177. P. 108010. [in English].
5. Sose, A. T., Joshi, S. Y., Kunche, L. K., Wang, F., Deshmukh, S. A. 2023. A review of recent advances and applications of machine learning in tribology. *Physical Chemistry Chemical Physics*. Vol. 25. P. 4408–4443. [in English].
6. Marchuk, R. M., Mnatsakanov, R. H. 2023. Analiz ta interpretatsiia znosu polimernykh materialiv na osnovi trybometrychnykh doslidzhen. *Problemy tertia ta znoshuvannia*. 4 (101). S. 52–60. [in Ukrainian].
7. Huang, T., Jiang, X., Wang, S., Peng, Z., Jian, R. 2025. Continuous fabrication of oriented rubber nanocomposites with improved thermal conductivity via torsion-induced extrusion processing. *Physics of Fluids*. 37, 7. P. 073125. [in English].



8. Huts, V. S., Polievoda, Y. A., Symonik, B.V., 2025. Deformuvannya viazkopruznykh system v kharchovykh tekhnolohiiakh. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. 3 (118). P. 113–119. [in Ukrainian].

9. Abeykoon, C., Kelly, A. L., Brown, E. C., Coates, P. D. 2014. The effect of extrusion variables on the process energy consumption. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 71. P. 139–153. [in English].

10. Bandura, V. M., Filonenko, O. M. 2021. Matematyчне modeliuvannya protsesu nahnitannia viazko-plastychnykh mas u shnekovykh aparatakh kharchovykh vyrobnystv. *Naukovi pratsi NUKhT*. 27, 1. S. 112–119. [in Ukrainian].

11. Coetsee, C. J. 2017. Calibration of the discrete element method and the Hertz-Mindlin contact model for granular materials. *Powder Technology*. Vol. 310. P. 104–142. [in English].

JUSTIFICATION OF THE GEOMETRY AND TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE WORKING CHAMBER OF PUMPING SYSTEMS

The article considers the scientific and applied aspects of substantiating the geometric and tribotechnical parameters of the working chamber of screw pumping systems designed for the transportation and forming of minced meat with different rheological properties. The relevance of the research is driven by the need to improve the energy efficiency of food raw material processing while ensuring the preservation of the structural and mechanical characteristics of the product's protein matrix.

The paper analyzes the influence of contact interaction between the minced meat and the surfaces of the screw and the working chamber, in particular the ratio of friction coefficients, on the formation of a stable transport flow. It has been established that the determining factor of efficient pumping is the provision

of frictional asymmetry, which prevents the phenomenon of wall slip and ballast rotation of the product. To increase the traction capacity of the chamber, it is proposed to modify its inner surface by forming longitudinal grooves, which promote the transition from external friction "product-metal" to internal shear «product-product».

The expediency of using a confuser (conical) geometry in the pre-die zone of the working chamber is substantiated, which ensures a gradual increase in pressure, sealing of the working space, and reduction of backflows of minced meat through the radial clearance. It is proven that the geometric transformation of the channel contributes to the stabilization of the velocity field and the reduction of hydraulic losses.

A mathematical model of the process of transporting a viscoelastic medium has been developed. The regularities of the influence of the radial clearance, velocity parameters, and rheological characteristics of the raw material on the intensity of energy dissipation and the thermal regime of the process have been established. It is shown that excessive reduction of the clearance leads to local overheating and degradation of protein structures, while its optimization allows minimizing energy losses.

The conducted kinematic analysis made it possible to determine the relationships describing the mode of minced meat transportation, in particular the ratio of velocities and the conditions of flow continuity. Differences in the behavior of minced meat of various rheological groups and their influence on the design parameters of screw systems have been established.

The proposed approaches can be used in the design and modernization of food industry equipment.

Keywords: screw pump, working chamber, minced meat, rheological properties, tribotechnical characteristics, radial clearance, mass transfer, energy dissipation, energy efficiency.

Відомості про авторів

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>).

Symonik Bogdan – recipient of a Doctor of Philosophy degree in specialty 181 Food Technologies of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: symonikbohdan@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0004-4864-9711>).

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>).

Симонік Богдан Володимирович – здобувач наукового ступеня доктора філософії спеціальності 181 Харчові технології Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: symonikbohdan@ukr.net, <https://orcid.org/0009-0004-4864-9711>).

Стаття надійшла 27.04.2026

Стаття прийнята 05.05.2026

Опубліковано 28.05.2026