

## ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПАРОКОНТАКТНОГО ТЕРМО-КОАГУЛЯТОРА З РОЗПОДІЛЕНИМ ВВОДОМ ПАРИ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Ощипок І. М. д-р техн. наук, професор  
Львівський національний університет ім. Івана Франка, м. Львів

**Анотація.** У роботі розглянуто процес коагуляції білка та його вплив на якісні характеристики і структуру поліпшених ліверно-паштетних виробів при використанні одного з перспективних методів термічної обробки — прямого контакту пари з м'ясним фаршем. Внутрішня, безумовна, перебудова молекули білка - сама денатурація - виявляється в агрегації поліпептидних ланцюгів. Визначено ключові аспекти теплообміну у паро-контактних термокоагуляторах (ТК) з розподіленим введенням пари, що безпосередньо впливають на однорідність прогріву та якість готового продукту. Підкреслено важливість оптимального добору температури, тиску та швидкості пари для різних видів м'ясної сировини з метою уникнення переварювання, втрати поживних речовин та погіршення органолептичних властивостей. Основну увагу приділено необхідності забезпечення високої швидкості теплообміну і рівномірної коагуляції білків для досягнення бажаної текстури, вологості й смаку готової продукції. Показана важливість забезпечення правильного поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Одержання продукту з певною текстурою або вмістом води вимагає специфічних умов проведення процесу. Кінцевий продукт з найкращою текстурою має забезпечувати правильну вологість, яка залежить від температури пари і її розподілу в ТК. Надмірне зневоднення призводить до втрати якості м'яса. Показано важливий фактор який має контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, що вирішальним чином впливає на текстуру і смакові якості виробу. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.

**Ключові слова:** коагуляція, білок, термокоагулятор, пара, вироб

**Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями** На нинішній день, на ринку устаткування для м'ясної промисловості лідируючі позиції обіймають закордонні компанії. Підприємства м'ясопереробної галузі, за різними оцінками, на 85–90 % оснащені імпортним устаткуванням. З іншого боку справді, на багатьох м'ясопереробних підприємствах потрібна повна модернізація виробничих потужностей. В поточних умовах конкурентної боротьби на ринку збуту готової продукції пріоритет мають ті підприємства, які випускають продукцію, що відповідає сучасним мінливим вимогам щодо якості, гігієни і безпеки. Висока якість устаткування, його технічна досконалість, енергоощадність дуже сильно впливають на ці показники. Важливим чинником стає розробка та удосконалення вітчизняного устаткування [2,14].

Інтенсифікація попередньої термообробки м'ясної сировини актуальне завдання подальшого удосконалення технологічних ліній з поліпшення ліверних і-паштетних виробів. Одним з перспективних способів термообробки є прямий контакт пари з продуктом [3,4].

Процес нагрівання білків супроводжується розгортанням глобул і вивільненням вільних радикалів, що сприяє утворенню міжмолекулярних зв'язків, агрегації частинок і їх осадження. Це, у свою чергу, призводить до зниження розчинності білків [6,9]. Внутрішня перебудова молекули білка, тобто власне денатурація, проявляється в агрегації поліпептидних ланцюгів. Цей процес відбувається у два етапи: спочатку збільшується розмір білкових частинок без їх виходу з розчину, а потім настає етап згортання.

Агрегація денатурованих молекул або, інакше кажучи, зміна їхньої четвертинної структури, що є наслідком попередніх змін у вторинній та третинній структурі, супроводжується зменшенням кількості ліофільних центрів молекули білка. Це знижує здатність м'ясної тканини утримувати воду. Агрегація і згортання білків сприяють формуванню безперервного просторового каркасу у готовому продукті [13].

Перебудова білкової молекули під час денатурації знижує її гідрофільність і посилює гідрофобні властивості тканин. Унаслідок цього ослаблюється стабілізуючий ефект гідратаційних шарів поблизу полярних груп. Внутрішньо-молекулярні зв'язки замінюються на міжмолекулярні, в результаті чого утворюється нерозчинний згусток — відбувається згортання білків. У розведених розчинах білки випадають у вигляді пластівців, а в концентрованих — утворюють коагель [2,9].

Денатурація білка також супроводжується порушенням структури води. У результаті зростає значення вторинних сил (зокрема, Ван - дер - Ваальсових), що діють між протофібрилами, і молекула міозину набуває більш компактної форми. Частина води при цьому виділяється.

Внаслідок денатурації та згортання м'язових білків підвищуються міцнісні властивості м'яса. Натомість варіння колагену та його подальший гідроліз мають протилежний ефект — знижують ці властивості, робля-

чи продукт більш м'яким.

Теплообмінні процеси в пароконтактних термокоагуляторах (ТК) з розподіленим вводом пари для обробки м'ясної сировини є важливим чинником, оскільки від ефективності цих процесів залежить якість кінцевого продукту [2,4,6]. Ось кілька ключових аспектів та важливих питань, які слід враховувати рис 1.



**Рис. 1 – Ключові аспекти забезпечення роботи пароконтактних термокоагуляторів з розподіленим вводом пари**

Важливим фактором роботи устаткування є забезпечення рівномірного розподілу пари в ТК. Неоднорідний її розподіл може призвести до нерівномірного прогріву м'ясної сировини, що, в свою чергу, погіршує якість оброблюваного продукту [2,6,9]. Температура, тиск і швидкість пари повинні бути обґрунтовані для кожного виду сировини та виду обробки, щоб досягти бажаного результату. Занадто висока температура може спричинити переварювання або втрату поживних речовин [7,8].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним з основних завдань, під час роботи ТК, є досягнення високої швидкості теплообміну між парою та сировиною яка обробляється, щоб мінімізувати теплову обробку, заощаджуючи енергоресурси і зберігаючи органолептичні властивості продукту [5-7]. При цьому, важливо забезпечити правильне поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Наприклад, обробка для одержання продукту з певною текстурою або вмістом вологи вимагатиме специфічних умов проведення процесу.

Для отримання кінцевого продукту з найкращою текстурою важливо забезпечити відповідну вологість, яка може залежати від температури пари і її розподілу в ТК. Надмірне зневоднення може призвести до втрати якості м'яса. Важливим є контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, оскільки це визначає текстуру і смакові якості продукту [9]. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.

Для підвищення ефективності процесу обробки важливо зменшити енергетичні витрати [8,14]. Використовуючи, ефективні теплообмінні елементи і розраховані параметри паропостачання для обробки м'ясної сировини. Під час обробки парою важливо забезпечити відповідний рівень температури для знищення патогенних мікроорганізмів, що гарантує безпечність продукту для споживання [11-13]. Ентерококи в продуктах харчування – дилема безпеки харчових продуктів. Застосування лізоциму, нізину та ЕДТА у присутності нітриту та хлориду натрію при 24 °C для інтерактивного пригнічення псування м'яса та патогенних бактерій. Врахування впливу температури та активності води на швидкість росту плісняви, що спричиняє псування харчових продуктів.

Кількість тепла пароутворення ( $g$ ) впливає на конденсацію пари передає приховану теплоту і є дуже ефективним джерелом нагрівання. Використання пари з високим  $g$  дозволяє досягти швидкої коагуляції без перегрівання [1].

Впровадження високоефективного тепло- та масообмінного обладнання у виробництво з удосконаленням технологічних процесів переробки харчових продуктів, зокрема при виробництві паштетної – і ліверної продукції, вимагає впровадження сучасного обладнання з підвищеними показниками теплової та масообмінної ефективності. Одним із перспективних напрямів є розробка і впровадження теплообмінних систем на

основі використанням водяної пари як теплоносія та масообмінного агента. Механізм впливу водяної пари на масообмін у системі "тверде тіло – розчин – пара". У процесі обробки фаршевої маси водяна пара здійснює інтенсивний теплоперенос і масообмін завдяки фазовому переходу (конденсації) на межі твердої та рідкої фаз. Пара проникає в структуру продукту, сприяючи активному витісненню вологи, підвищенню температури та прискоренню коагуляції білків. Відбувається одночасна передача тепла та маси, що суттєво покращує однорідність термічної обробки [2,3,4,8 ].

Фізичні властивості рідин (вода, пара, емульсії тощо) у термокоагуляторах безпосередньо впливають на ефективність теплопередачі, швидкість і повноту коагуляції білків, однорідність термічного впливу та енергоефективність процесу. Правильний підбір рідини з урахуванням її теплопровідності, в'язкості, густини та теплоємності є критичним для якісної роботи термокоагуляторів.

**Постановка завдання.** Одним з основних завдань, під час роботи ТК, є вивчення умов досягнення високої швидкості теплообміну між парою та сировиною яка обробляється, щоб мінімізувати теплову обробку і зберегти органолептичні властивості продукту. Важливо забезпечити правильне поєднання температури та часу обробки, оскільки для різних видів м'ясної сировини потрібні різні режими. Одержання продукту з певною текстурою або вмістом вологи вимагає специфічних умов проведення процесу. Необхідно забезпечувати відповідну вологість, яка залежить від температури пари і її розподілу в ТК для отримання кінцевого продукту з найкращою текстурою. Надмірне зневоднення може призвести до втрати якості м'яса. Важливим також є контроль за коагуляцією білків під час теплової обробки, оскільки це визначає текстуру і смакові якості продукту. Швидка і рівномірна коагуляція дозволить досягти бажаних властивостей.. Використання ефективних теплообмінних елементів і обґрунтування параметрів паропостачання можуть значно зменшити витрати енергії на обробку. Під час обробки м'ясної сировини парою також важливо забезпечити відповідний рівень температури для знищення патогенних мікроорганізмів, що гарантує безпечність продукту для споживання. Усі ці фактори взаємопов'язані, і правильний підбір кожного з них є важливим для досягнення високої якості кінцевого продукту, збереження його харчової цінності і енергоефективності обладнання.

Пароконтактні апарати які експлуатуються з розподіленим вводом пари в подрібнену на вовчку сировину, при її транспортуванні шнеком, забезпечують рівномірне прогрівання маси, покращують теплообмінні процеси та сприяють більш повній обробці білкових фракцій завдяки ефективнішому контакту пари з сировиною протягом усього шляху транспортування. Аналітичний опис теплообміну в таких апаратах є дуже складним через труднощі визначення фактичної поверхні взаємодії сировини з парою.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Оцінку енергоефективності пароконтактного термокоагулятора розглянемо на моделі теплообміну в апараті з розподіленим вводом пари у фарш, який розглядається як квазітверда структура потоку в гвинтовому каналі за умови пристінного ковзання м'ясної сировини. При цьому передбачається, що сировина в шнековому апараті рухається у вигляді спіралі.

Типову діаграму швидкості побудуємо у вигляді графіка, де по осі  $x$  відображено положення частин фаршу в перерізі апарату (від осі шнека до стінок апарату), а по осі  $y$  — швидкість руху частинок фаршу. Форма кривої руху може бути з різким зменшенням швидкості до периферії.

У межах шнекової зони, де частини фаршу контактують безпосередньо з шнеком, швидкість їх руху буде максимальною через механічне обертання шнека, ближче до виходу з апарату швидкість частин зазвичай зменшується, оскільки вони втрачають енергію через тертя та інші фактори. Розглянемо основні складові руху частин фаршу з квазітвердою структурою, які зображені на діаграмі рис 2. При цьому будь-яка його частина переміщається вздовж гвинтового каналу з швидкістю  $\omega_k$  і одночасно обертається з шнеком з швидкістю  $\omega_{ш}$ , ( $\alpha$  – кут нахилу гвинтової лінії шнека),  $\omega_x$  проекція швидкості  $\omega_k$  на вісь  $x$ .

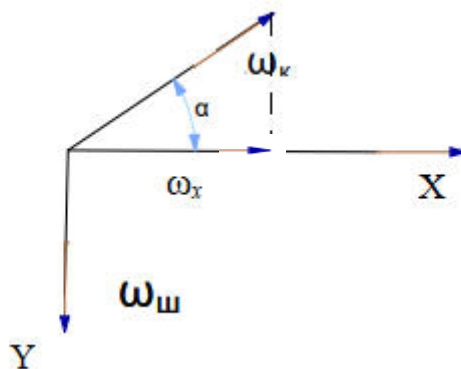
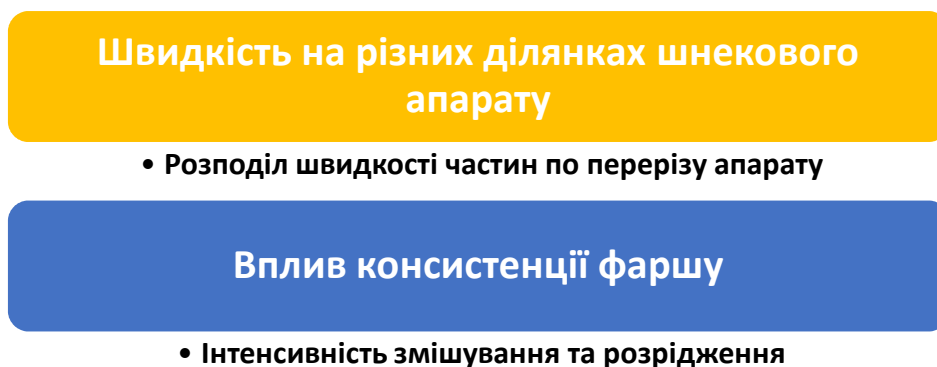


Рис. 2 – Діаграма швидкостей руху частин фаршу з квазітвердою структурою в шнековому апараті

Для точнішого моделювання такої діаграми потрібно враховувати різні фактори: коефіцієнт тертя, геометрію шнека та взаємодію між частинами фаршу.

Діаграма швидкостей частин фаршу при русі з квазітвердою структурою в шнековому апараті зазвичай відображає залежність швидкості руху різних його частин від розташування в апараті та від характеристик самого апарату. Для шнекових апаратів, де фарш має квазітвердий характер, важливо враховувати деякі фізичні і технологічні площини, такі як зміщення і взаємодія частин фаршу з шнеком і стінками апарату.

Характеристику швидкостей руху частин фаршу в термокоагуляторі зобразимо на рис. 3



**Рис. 3 – Характеристика швидкості частин фаршу при русі з квазітвердою структурою в шнековому апараті**

В шнекових апаратах як правило спостерігається різниця у швидкостях частин фаршу в залежності від їхнього розташування в потоці. Фарш з квазітвердою структурою має властивості, схожі на тверді тіла, тому частини можуть рухатися не так вільно, як у рідких або м'яких середовищах. Це може призводити до більш нерівномірного розподілу швидкостей в потоці. Швидкість також залежить від того, наскільки добре змішується фарш і чи виникає додаткове розрідження через тертя, зминання або подрібнення частин фаршу

Для точного математичного чи числового моделювання цієї діаграми, можна застосувати рівняння для потоку в шнекових апаратах, наприклад, рівняння Нав'є-Стокса для густих матеріалів або відповідні емпіричні моделі для потоку квазітвердих речовин.

Температурне поле в фарші при підведенні теплоти парою можна описати за допомогою рівнянь теплопередачі, зокрема рівняння дифузії тепла. Для цього використаємо математичні вирази, які враховують теплообмін між паром та продуктом (фаршем) і розподіл температури в ньому.

Під час приготування виробів можуть відбуватися різні види тепло-масопередачі: в твердих або рідких середовищах з одного боку та на межі між ними з іншого. Коли йдеться про передачу теплоти на межі між двома матеріальними частинами, можна записати тепловий потік  $Q$  за загальним рівнянням:

$$Q = hA\Delta T \quad (1)$$

де  $\Delta T$  — це різниця температур з обох боків межі, °C;

$A$  — площа межі, м<sup>2</sup>

$h$  — коефіцієнт теплопередачі між фаршем і паром.

Саме цей коефіцієнт теплопередачі може бути більш або менш простою функцією, яка залежить від багатьох фізичних параметрів, зокрема від різниці температур.

Загальне рівняння для температурного поля в безперервному середовищі (рівняння дифузії теплоти) має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T, \quad (2)$$

де:  $T$  — температура (функція простору та часу), °C,

$t$  — час,

$\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності фаршу,

$\nabla^2$  — оператор Лапласа (який визначає просторове розподілення температури).

Для задачі з підведенням теплоти паром температура в різних точках фаршу змінюватиметься з часом, і цей процес можна описати за допомогою рівняння з граничними умовами. Якщо фарш знаходиться в контакті з паром, температура на межі контакту буде визначатися температурою пари. На поверхні фаршу, де є контакт з навколишнім середовищем (простір апарату), можна використати умови теплообміну з навколишнім середовищем.

Граничні умови першого роду запишемо наступним чином:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{поверхня}}^{\text{фаршу}} = -h(T_{\text{пари}} - T_{\text{фаршу}}) \quad (3)$$

де:  $T_{\text{пари}}$  — температура пари, °C,

$T_{\text{фаршу}}$  — температура на поверхні фаршу, °C.

Для моделювання температурного поля в середині фаршу можна використати числові методи, наприклад, методи кінцевих елементів або методи кінцевих різниць, щоб обчислити температурне поле на різних глибинах фаршу. Температура в середині буде залежати від теплопередачі через молекули фаршу і змінюватиметься з часом, поки не досягне стаціонарного розподілу. При цьому вектор швидкості сировини буде направлений вздовж гвинтового каналу під кутом  $\alpha$  до осі шнека. Проекція  $\omega_k$  на вісь  $x$  (рис. 2) становитиме вектор поздовжньої швидкості сировини  $\omega_x$ , яку визначимо з виразу.

$$\omega_x = \frac{G_s}{3600 F_c \rho \phi}, \quad (4)$$

де  $G_s$  — витрата сировини (продуктивність апарату), кг/г;

$\rho$  — щільність продукту, кг/м<sup>3</sup>;

$\phi$  — коефіцієнт, враховуючий умови руху сировини;

$F_c$  — площа поперечного січення апарату, м<sup>2</sup>.

$$F_c = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} - \frac{b \sqrt{S^2 + (\pi d)^2} (D - d)}{2S}, \quad (5)$$

де  $D$  — діаметр шнека, м;

$d$  — діаметр вала шнека, м;

$b$  — товщина витка шнека;

$S$  — крок шнека, м.

Прийняті допущення про розподіл сировини яка обертається в нерухомих напрямних на елементи гвинтового потоку (елементарні прошарки або умовні сферичні частинки) з товщиною  $\delta$  дозволяють оцінити геометричні характеристики термооброблюваної сировини.

$$\delta = \frac{w_x}{n \bullet m}, \quad (6)$$

де  $n$  — частота обертання шнека, с<sup>-1</sup>;

$m$  — число напрямних з форсунками в поперечному січенні корпусу.

З урахуванням припущення про можливе дроблення елементарних шарів при їх ефективному перемішуванні в апараті задача теплообміну зводиться до розгляду нагрівання умовної сферичної частинки з характерним розміром  $\delta$ . Оскільки має місце конденсація пари безпосередньо у фарш, то нагрівання прошарку проходить при граничних умовах першого роду (тобто температуру поверхні сировини приймаємо рівною температурі пари). Розраховуємо тривалість прогріву залежно від радіусу частинок  $\tau = f(R)$ , де  $R = \delta/2$ .

Тоді довжину апарата, на якій продукт нагрівається до заданої температури, визначимо співвідношенням  $L_H = w_x \tau$ .

В результаті наближеного аналітичного розв'язку задачі про нагрівання сферичної частинки радіусом  $R$  з застосуванням гіпотези про наявність «температурного фронту», опускаючи громіздкі математичні викладки, отримаємо вираз для визначення тривалості прогрівання центру частинки до заданої температури

$$\tau = \frac{R^2 [29 - 48 \ln(1 - U)]}{720a}, \quad (7)$$

де  $U = \frac{u_k - u_n}{u_p - u_n}$  — відносна температура;

$u_k$  — кінцева температура центра частинки, °C;

$u_n$  — початкова температура фаршу, °C;

$u_p$  — температура пари на вході в апарат, °C;

$a$  — температуропровідність оброблюваної сировини м<sup>2</sup>/с.

Враховуючи конструктивні особливості апарату, розмір частинок і виконуючи деякі перетворення, отримаємо вираз, зручний для розрахунку і аналізу

$$L_H = \frac{\Psi K G_s^2}{4 a n \rho^2}, \quad (8)$$

де  $\Psi = 0,04 - 0,067 \ln(1_f - Y)$  — технологічний параметр, який залежить від початкової і кінцевої темпера-

тури фаршу і від температури пари на вході в апарат;

$K$  – конструктивний параметр апарату;

$l_f$  – відстань між напрямними з форсунками, м;

$Y$  – конструктивний параметр відхилення відстані, м.

Середньо-масову температуру визначимо за формулою

$$u = \frac{2u_c + 3u_p}{5}, \quad (9)$$

де  $u_c$  – температура центра чистинки, °С;

$u_p$  – температура поверхні чистинки, °С.

Таким чином, отриманий вираз для розрахунку довжини апарату, який враховує теплофізичні характеристики термооброблюваної сировини, технологічні параметри нагрівання, конструктивні особливості апарату.

Отримані результати розрахунку узгоджуються з експериментальними даними (рис. 4) з точністю до 18 %.

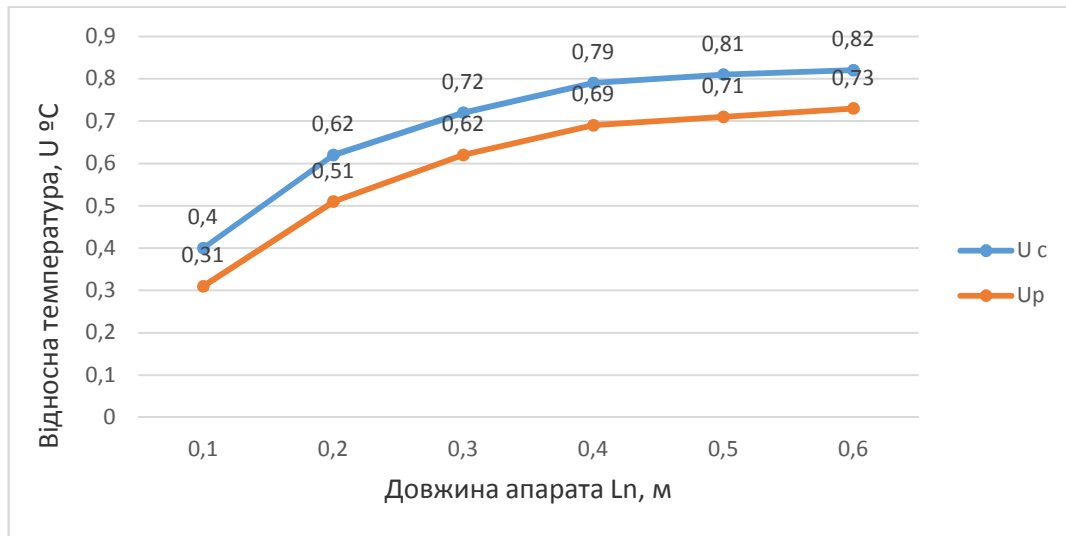


Рис. 4 – Експериментальні і розрахункові дані відносної температури від довжини апарату

Отриманий вираз (8) може бути використаний для розрахунку при проектуванні пароконтактних термокоагуляторів з розподіленим вводом пари в сировину.

Для розрахунку температурного поля в фарші з урахуванням заданих параметрів можна взяти типові значення для теплових характеристик, наприклад курячого м'яса (фаршу).

Задані параметри:

Температура пари:  $T_{\text{парі}}=110$  °С;

Початкова температура фаршу:  $T_{\text{поч}}=20$  °С;

Кінцева температура фаршу:  $T_{\text{кін}}=80$  °С;

Товщина фаршу:  $B=30$  мм=0.03 м

Температурна теплоємність курячого м'яса (в середньому):  $c_p=3.7$  кДж/(кг °С)

Теплопровідність курячого м'яса:  $a=0.5$  Вт/м °С)

Коефіцієнт теплообміну між парою та поверхнею фаршу (для м'яса):  $h=50$  W/(м² °С).

1. Тепловий потік через конвекцію (від пари до поверхні фаршу):

$$Q=50 \cdot 1 \cdot (110-20)=50 \cdot 90=4500 \text{ Вт}$$

2. Температурна зміна в середині фаршу:

Рівняння теплопередачі для простого одномірного потоку тепла має вигляд:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

де  $\gamma$  — температурна дифузія фаршу:

$$\gamma = \frac{a}{\rho * C_p} = \frac{0.5}{1030 * 3.7} = 1.31 * 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$$

де:  $\rho$  — густина фаршу (курячого м'яса), приблизно  $\rho=1030$  кг/м³

3. Оцінимо час до досягнення кінцевої температури за товщиною фаршу. Для простоти можна зробити грубу оцінку часу, необхідного для досягнення кінцевої температури в середині фаршу, використовуючи час

теплопереносу для однотипного процесу:

$$t = \frac{B^2}{\gamma} = \frac{0.0009}{1.31 \cdot 10^{-4}} = 6.87 \text{ с}$$

Ми отримали дуже грубу оцінку часу, що потрібен для досягнення рівноважної температури в середині фаршу через теплопровідність.

Тепловий потік через конвекцію (від пари до фаршу) при заданих параметрах становитиме 4500 Вт. Груба оцінка часу для досягнення кінцевої температури в середині фаршу є близько 6,87 секунд (але на практиці час буде значно більшим через більш складні процеси теплопередачі, які вимагають числового моделювання).

Розглянутий підхід дає основу для подальших точних розрахунків із використанням числових методів для більш складних сценаріїв.

Простежимо необхідні конструктивні і геометричні параметри апарата. Наприклад:  $D=100$  мм,  $d=40$  мм,  $S=50$  мм,  $b=2$  мм,  $l_f=80$  мм,  $m=3$ .

Приймаючи  $\phi=0,80$ , визначаємо конструктивний параметр,  $K=7,77 \cdot 10^{-5}$

Визначаємо технологічний параметр попередньо розрахувавши  $U$ :  $U=0,67$ ,  $\psi=0,114$ .

Приймаючи,  $a=12,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с і  $\rho=1030$  кг/м<sup>3</sup>. за рівнянням (8) розрахуємо довжину апарата

$$L_n = \frac{0,114 \cdot 7,77 \cdot 10^{-5} \cdot 9 \cdot 10^4}{4 \cdot 12,2 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 1,06 \cdot 10^6} = 0,77 \text{ м}$$

Встановлено, що при максимальному збереженні поживної цінності фаршу пароконтактне нагрівання збільшує вихід сировини на 4-6 %, зменшує тривалість термообробки в порівнянні з традиційною в 20-25 разів, скорочує чисельність обслуговуючого персоналу в 2,5 разів, зменшує витрату пари до 20 %.

**Висновок.** Удосконалення технологічних процесів переробки ковбасних виробів, зокрема при виробництві паштетної продукції, вимагає впровадження сучасного енергоощадного обладнання з підвищеними показниками теплової та масообмінної ефективності. Одним із перспективних напрямів є розробка і впровадження теплообмінних систем на основі використанням водяної пари як теплоносія та масообмінного агента. У процесі обробки паштетної маси водяна пара здійснює інтенсивний теплоперенос і масообмін завдяки фазовому переходу (конденсації) на межі твердої та рідкої фаз. Пара проникає в структуру продукту, сприяючи активному витісненню вологи, підвищенню температури та прискоренню коагуляції білків. Відбувається одночасна передача тепла та маси, що суттєво покращує однорідність термічної обробки.

Отриманий вираз для розрахунку довжини апарата з урахуванням енергоефективної роботи ТК, який враховує теплофізичні характеристики термо-оброблюваної сировини, технологічні параметри нагрівання його конструктивні особливості. Для більш точного результату розрахунку, фаршевої системи таких апаратів, необхідно використовувати числові методи, наприклад, метод кінцевих різниць або кінцевих елементів і розв'язку рівняння теплопередачі і опису температурного поля в кожній точці фаршу та відслідковувати зміну його температури.

Розраховано температурне поле в фарші з урахуванням заданих параметрів для типових значень теплових характеристик курячого фаршу. Встановлено, що при максимальному збереженні поживної цінності фаршу пароконтактне нагрівання збільшує вихід сировини на 4-6 %, зменшує тривалість термообробки в порівнянні з традиційною в 20-25 разів, скорочує чисельність обслуговуючого персоналу в 2,5 разів, зменшує витрату пари до 20 %.

## References

1. Ponomarenko, V. V., Pushanko, M. M., Slyusenko, A. M., & Yeshchenko, O. A. (2019). *Influence of the physical properties of liquids on the operation of liquid-gas ejectors*. *Naukovi pratsi Natsionalnogo universytetu kharkovykh tekhnologii*, 25(2), 111–120.
2. Melnyk, V. A., Boiko, V. O., Pryadko, M. O., Naumchyk, S. A., et al. (2017). *Experience in introducing high-efficiency heat and mass transfer equipment into production: From theory to implementation*. *Tsukor Ukrainy*, (2[134]), 12–17.
3. Myronchuk, V. H. (1998). *Mechanism of the influence of water vapor on mass transfer in the solid-solution-vapor system*. *Kharkova promyslovist*, (43–44), 150–154.
4. Petrenko, V. P., Riabchuk, O. M., Pylypenko, O. Yu., & Myroshnyk, M. M. (2015). *Modeling of thermohydrodynamic processes in boiling downward annular flows of sugar solutions*. *Tsukor Ukrainy*, (8[116]), 20–25.
5. Moklyak, V. F., Forsyuk, A. V., & Vasylenko, S. M. (2014). *Study of the average volumetric vapor content of a dynamic two-phase layer in closed thermosiphons*. *Tsukor Ukrainy*, (6[102]), 20–23.
6. Petrenko, V. I., Pryadko, M. O., Riabchuk, O. M., & Myroshnyk, M. M. (2017). *Features of calculation of heat exchangers using rarefied steam from the tail part of the evaporation plant*. *Tsukor Ukrainy*, (3[135]), 6–10.



7. Petrenko, V. P., Pryadko, M. O., & Riabchuk, O. M. (2013). *Efficiency of using film evaporators and calculation of heat transfer intensification to boiling sugar solutions in them. Tsukor Ukrainy, (6[90])*, 21–25.
8. Pohorilyi, T. M., Myronchuk, V. H., & Shtangeiev, K. O. (2016). *Analytical expressions for determining the contact time of cell systems with the surface of the heating tube of the vacuum apparatus heating chamber. Naukovi pratsi Natsionalnogo universytetu kharchovykh tekhnologii, 22(1)*, 119–128. [Electronic resource].
9. Prylipko, T. M., Kutsyi, V. M., & Yanovych, V. P. (2014). *Justification of operating parameters for the sterilization process of turkey meat pâtés. Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnologii, 2(46)*, 177–182.
10. Publications Office of the European Union. (2011). *Food: From farm to fork statistics*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
11. Franz, C., Stiles, M. E., Schleifer, K. H., & Holzapfel, W. H. (2003). Enterococci in foods – A conundrum for food safety. *International Journal of Food Microbiology, 88*, 105–122.
12. Gill, A. O., & Holley, R. A. (2003). Interactive inhibition of meat spoilage and pathogenic bacteria by lysozyme, nisin, and EDTA in the presence of nitrite and sodium chloride at 24°C. *International Journal of Food Microbiology, 80(3)*, 251–259.
13. Sautour, M., et al. (2002). Comparison of the effects of temperature and water activity on growth rate of food spoilage moulds. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 28(6)*, 311–315.
14. Leistner, L. (2002). Hurdle effect and energy saving. In *Food Quality and Nutrition* (pp. 345–350). London: Applied Science Publishers. [Available at <https://rrbusiness.ru/journal/article/347/>].

## JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A STEAM CONTACT THERMOCOAGULAR WITH DISTRIBUTED STEAM INPUT TAKING INTO ACCOUNT ENERGY EFFICIENCY

**Oshchypok I.M. Dr. Sciences, Professor**  
Lviv National University named after Ivan Franko, Lviv, Ukraine

**Abstract.** *The paper considers the process of protein coagulation and its effect on the quality characteristics and structure of improved liver-pâté products when using one of the promising methods of heat treatment - direct contact of steam with minced meat. The internal, unconditional, restructuring of the protein molecule - denaturation itself - is manifested in the aggregation of polypeptide chains. The key aspects of heat transfer in steam-contact thermal coagulators (TC) with distributed steam injection are determined, which directly affect the uniformity of heating and the quality of the finished product. The importance of optimal selection of temperature, pressure and steam speed for different types of meat raw materials is emphasized in order to avoid over-digestion, loss of nutrients and deterioration of organoleptic properties. The main attention is paid to the need to ensure a high rate of heat transfer and uniform coagulation of proteins to achieve the desired texture, moisture and taste of the finished product. The importance of ensuring the correct combination of temperature and processing time is shown, since different types of meat raw materials require different modes. Obtaining a product with a certain texture or moisture content requires specific process conditions. The final product with the best texture must provide the correct moisture, which depends on the temperature of the steam and its distribution in the TC. Excessive dehydration leads to a loss of meat quality. An important factor has been shown to control the coagulation of proteins during heat treatment, which decisively affects the texture and taste of the product. Fast and uniform coagulation will allow to achieve the desired properties.*

**Keywords:** coagulation, protein, thermal coagulator, steam, products

### Список використаної літератури

1. Вплив фізичних властивостей рідин на роботу рідинно-газових ежекторів / В. В. Пономаренко, М. М. Пушанко, А. М. Слюсенко, О. А. Єщенко // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 111–120.
2. Досвід впровадження в виробництво вискоєфективного тепло- та масообмінного обладнання. Від теорії до впровадження / В. А. Мельник, В. О. Бойко, М. О. Прядко, С. А. Наумчик та ін. // Цукор України. – 2017. – № 2 (134). – С. 12–17
3. Мирончук, В. Г. Механізм впливу водяної пари на масообмін в системі тверде тіло - розчин- пара / В. Г. Мирончук // Харчова промисловість. – 1998. – Вип. 43-44. – С. 150–154
4. Моделювання теплогідродинамічних процесів в киплячих низхідних кільцевих потоках цукрових розчинів / В. П. Петренко, О. М. Рябчук, О. Ю. Пилипенко, М. М. Мирошник // Цукор України – 2015. – № 8 (116). – С. 20–25.



5. Мокляк, В. Ф. Дослідження середнього об'ємного паровмісту динамічного двофазного шару в замкнутих термосифонах / В. Ф. Мокляк, А. В. Форсюк, С. М. Василенко // Цукор України. – 2014. – № 6 (102). – С. 20–23.
6. Особливості розрахунку теплообмінних апаратів, що споживають розріджену пару хвостової частини випарної установки / В. І. Петренко, М. О. Прядко, О. М. Рябчук, М. М. Мирошник // Цукор України. – 2017. – №3 (135). – С. 610.
7. Петренко, В. П. Ефективність застосування плівкових випарних апаратів та розрахунок інтенсифікації тепловіддачі до киплячих цукрових розчинів в них / В. П. Петренко, М. О. Прядко, О. М. Рябчук // Цукор України. – 2013. – № 6 (90). – С. 21–25.
8. Погорілий, Т. М. Аналітичні вирази для визначення часу контакту систем комірок з поверхнею гріючої трубки нагрівальної камери вакуумапарата [Електронний ресурс] / Т. М. Погорілий, В. Г. Мирончук, К. О. Штангеев // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2016. – Т. 22, № 1. – С. 119–128.
9. Приліпко, Т. М. Обґрунтування режимних параметрів процесу стерилізації паштетів із м'яса індиків / Т. М. Приліпко, В. М. Куций, В. П. Янович // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2014. – Т. 2 : Актуальні проблеми зберігання та переробки рослинної сировини і гідробіонтів, Вип. 46. – С. 177–182.
10. Food: from farm to fork statistics // Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011. 164 p.
11. Franz C. Enterococci in foods – a conundrum for food safety / C. Franz, M.E. Stiles, K.H. Schleifer, W. H. Holzapfel // Int. J. Food Microbiol, 2003. – Vol. 88. – P. 105–122.
12. Gill A. O. Interactive inhibition of meat spoilage and pathogenic bacteria by lysozyme, nisin, and EDTA in the presence of nitrite and sodium chloride at 24 C / A. O. Gill, R. A.Holley// Int. J. of Food Microbiology. 2003. 80 (3). P. 251-259.
13. Sautour M. Comparison of the effects of temperature and water activity on growth rate of food spoilage moulds / M. Sautour at al. //J. of Industrial Microbiology and Biotechnology. 2002. №28 (6). P. 311-315.
14. Leistner L. Hurdle effect and enrgy saving. In: Food Quality and Nutrition / L. Leistner. London:Applied Science Publishers, 2002. P. 345-350. [URL: <https://rrbusiness.ru/journal/article/347/>].

Отримано в редакцію 26.06.2025

Прийнято до друку 02.09.2025

Received 26.06.2025

Approved 02.09.2025