

УДК 536.7

THERMODYNAMIC DETERMINATION OF
PARAMETERS OF PHASE TRANSITIONS
IN THE CONDITIONS OF VACUUM TECHNOLOGIES

A. Sokolenko, I. Maksymenko

National University of Food Technologies

Key words:

*Thermal pasteurization
Sterilization
Parameters of phase
transitions
Vacuum technologies*

Article history:

Received 08.07.2019
Received in revised form
05.08.2019
Accepted 15.08.2019

Corresponding author:

A. Sokolenko
E-mail:
npnuht@ukr.net

ABSTRACT

The paper provides information about modern technologies of application of vacuum processing of media in the processes of phase transitions in the modes of evaporation, crystallization, drying, food packaging etc. A common ground of these technologies is universal for the relationship between pressure and temperature of phase transitions. The latter led to the creation of discrete-impulse technologies, closed energy circuits, methods of intensification of mass and energy exchange processes, etc.

The parameters of transition processes at variable pressures in liquid media of food production are theoretically substantiated. The differences of technologies of vacuum processing of media on the basis of regularities of phase transitions, energy and material balances in the conditions of adiabatic processes have been determined.

The modern directions of combination of vacuum and other physical methods of processing of food media with the purpose of obtaining and stabilizing aseptic states have been generalized. The possibility of estimation of the boundaries of thermodynamic transformations of constituent media with the use of tabular data of water and water vapor and ratios relating to adiabatic compression of gases has been determined.

It has been found that for the wet saturated vapor zone, the determination of adiabat analogues requires a new proposed computational model. Data on energy costs for secondary vapor compression and energy recovery efficiency are given. The transient processes of vacuum packaging of products are related to the variable dynamics of the pressures and temperatures of the liquid and vapor phases, the regularities of which require further investigation.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-4-16

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФАЗОВИХ ПЕРЕХОДІВ В УМОВАХ ВАКУУМНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

А. І. Соколенко, І. Ф. Максименко

Національний університет харчових технологій

У статті наведено інформацію про сучасні технології застосування вакуумної обробки середовищ у процесах фазових переходів в режимах випарювання, кристалізації, сушіння тощо та за пакування харчової продукції. Загальним у названих технологіях є спільне підґрунтя, яке стосується залежностей між тиском і температурою фазових переходів. Останнє привело до створення дискретно-імпульсних технологій, замкнених енергетичних контурів, методів інтенсифікації масо- і енергообмінних процесів тощо.

Теоретично обґрунтовано параметри перехідних процесів за змінних тисків у рідинних середовищах харчових виробництв. Визначено відмінності технологій вакуумної обробки середовищ на основі закономірностей фазових переходів, енергетичних і матеріальних балансів в умовах адіабатних процесів.

Узагальнено сучасні напрями поєднання вакуумних та інших фізичних методів оброблення харчових середовищ з метою одержання і стабілізації асептичних станів. Визначено можливість оцінок меж термодинамічних трансформацій складових середовищ з використанням табличних даних води і водяної пари та співвідношень, які стосуються адіабатного стискання газів.

З'ясовано, що для зони вологої насиченої пари визначення аналогів показників адіабат потребує нової запропонованої розрахункової моделі. Наведено дані щодо енергетичних витрат на стискання вторинної пари та ефективності енергетичної рекуперації. Перехідні процеси вакуумного упакування продукції пов'язані зі змінною динамікою тисків і температур рідинної та парової фаз, закономірності перебігу яких потребують подальших досліджень.

Ключові слова: теплова пастеризація, стерилізація, параметри фазових переходів, вакуумні технології.

Постановка проблеми. Беззаперечним лідером серед технологій, що забезпечують виробництво продукції довготермінового зберігання, до останнього часу були методи теплової пастеризації та стерилізації. Їхньою головною перевагою є стовідсоткова гарантія отримання заданого результату за всіма показниками харчових продуктів, а до недоліків відносяться значні енергетичні витрати.

Забезпечення екологічної безпеки продуктів харчування є одним з найважливіших завдань будь-якої технології. З цієї точки зору представляють інтерес вакуумні технології пакування, промислове становлення яких відбулося у 50-х роках минулого сторіччя. Сфера їх використання стосується значного переліку продукції (м'ясо, риба, овочі, фрукти, соки, сири, ковбасні вироби, морепродукти тощо) [1—5]. Таке поширення пов'язане з гарантованою

безпекою вакуумного пакування і достатньо високим технічним рівнем універсального обладнання.

Проте, незважаючи на існуючі досягнення вакуумних технологій упакування, до останнього часу не розроблена завершена теорія фізичних, хімічних, гідро- та аеромеханічних явищ, що визначають стан продукції в періоди перехідних процесів і для їх завершення, а також стан мікрофлори, що супроводжує цю продукцію [6—10].

Відомо, що терміни зберігання продукції в багатьох випадках пов'язують з рівнем їх вологості. На вакуумне упакування продукція подається в стані рівноважної вологості з повітрям оточуючого середовища. Величина останньої, як відомо, визначається для кожного продукту з урахуванням відносної вологості повітря ϕ . Діапазон зміни вологості продукції достатньо великий, але в промислових умовах він суттєво обмежений коливаннями відносної вологості ϕ . Однак рівноважна вологість продукту повинна враховуватись при виборі параметрів вакуумування й упакування.

В умовах вакуумування продукту найбільшій дії слід очікувати на вологу з механічною формою зв'язку (міжклітинну вологу). Волога з абсорбційним та осмотичним зв'язком найчастіше взагалі не реагує на вакуумування. Внутрішньоклітинну вологу вакуумуванням перевести до метастабільного стану значно складніше [11; 12].

Додатковим фактором, що впливає на стан вакуумованого матеріалу, є подовженість процесу. Феноменологічні міркування приводять до висновку, що збільшення часу витримки при інших рівних умовах повинно збільшувати кількість парової фази, що утворюється згідно з наслідками. Крім того, подовжений час вакуумування призводить до зниження температури матеріалу в умовах обмеженого теплопритоку від внутрішніх шарів. У результаті парутворення в локальних зонах наближається до адіабатного процесу. Однак граничні стани між ізотермічним і адіабатним процесами практично не вносять помітних впливів на фізику процесів, що відбуваються.

Отже, визначальними факторами вакуумування є тиск у камері, температура продукту і час процесу. Сукупність цих факторів закладається, як правило, в технологічні можливості обладнання для виробництва вакуумних упаковок. Подальше удосконалення технологій і обладнання для вакуумного упакування продукції пов'язано з пошуком оптимальних співвідношень параметрів по кожному виду продукції, у тому числі з комбінаціями з іншими фізичними впливами [13—16].

Поява в моделюванні процесів вакуумування термодинамічних характеристик пояснюється тим, що частіше за все продукти харчування мають у своєму складі тверду, рідку і газову фракції, дві останні з яких миттєво реагують на зміну тиску. Це пояснюється взаємозв'язком між тиском і температурою ізольованого газового об'єму і залежністю температури кипіння рідкої фази від тиску.

Швидке падіння тиску під час вакуумування продукції, яка містить велику кількість води, призводить до порушення стану її термодинамічної рівноваги з навколишнім середовищем, що відповідає початку переходу до нового

стану рівноваги. У зв'язку з цим існує необхідність уточнити можливі і доцільні межі глибини вакуумування.

За визначеного тиску вакуумування досягається температура адіабатного кипіння середовища, а активне перетворення супроводжується стрімким падінням її температури. При цьому енергетичне забезпечення пароутворення відбувається за рахунок енергетичного потенціалу самого середовища.

Пароутворення стосується міжклітинної й обмежено внутрішньоклітинної вологи продукції рослинного або тваринного походження та супроводжується руйнуванням міжклітинних структур і цитоплазматичних оболонок. Руйнування цитоплазматичних оболонок клітин стосується також і мікрофлори, яка супроводжує продукцію. Це забезпечує досягнення асептичного стану продукції, яка підлягає вакуумній обробці.

Важливо відмітити при цьому відносно низькі температури середовищ, за яких незмінними залишаються вітамінні та інші комплекси, цінні біологічні структури, органолептичні й ароматичні речовини. При застосуванні класичних технологій теплової пастеризації або стерилізації продукції втрати вказаних речовин неминучі. Тому до відмічених двох позитивів вакуумної обробки продукції додається третій, пов'язаний з летальними ефектами мікроорганізмів на поверхні або в об'ємі (вода, напої) оброблених середовищ.

Наступний позитивний вплив вакуумування пов'язаний з видаленням з середовищ, що обробляються, повітря (кисню), розчиненого в рідинній фракції. Причиною такого впливу є відома залежність між розчинністю газу C_n у рідинній фазі і його парціальним тиском P у газовій фазі (закон Генрі):

$$C_n = kP, \quad (1)$$

де k — коефіцієнт пропорційності, відомий як константа Генрі.

Константа Генрі залежить від фізичних і хімічних властивостей рідинної фази, газів і температури середовища. Зменшення останньої збільшує розчинність газів і навпаки.

На основі вказаного закону відбуваються процеси дегазації, деаерації води і розчинів на її основі. З точки зору інтересів цих процесів, температуру середовищ доцільно підвищувати, а тиск вакуумування — зменшувати.

Але взаємозв'язок між тиском і температурою середовища в режимі адіабатного кипіння відомий і не сприяє глибині видалення газової фази, оскільки розчинність останньої зростає зі зниженням температури. Тому, вибираючи термодинамічні параметри вакуумної обробки, необхідно визначитися з набором тих процесів, які бажано (або небажано) мати при пакуванні продуктів.

Якщо режими адіабатного кипіння бажані для збільшення соковіддачі від продукції рослинного походження, то до початку вакуумної обробки її доцільно підігріти до $t = 35\text{—}40^\circ\text{C}$. За умови обмеження на поверхні м'ясних продуктів утворень у вигляді залишкових деформацій плівкових структур, їх перед вакуумним пакуванням, навпаки, доцільно охолодити, щоб температура адіабатного кипіння не досягалася.

Як бачимо, температура оброблюваного середовища і тиск виступають у ролі факторів впливу. При цьому для більшості зразків техніки для вакуум-

ного пакування за рахунок вибору відповідного режиму можливо посилювати або нівелювати ефекти адіабатного кипіння.

Як висновки до цієї частини огляду приведемо сконцентрований перелік позитивних результатів вакуумних технологій, зокрема і технологій вакуумного пакування харчової продукції:

- з навколишнього середовища, яке оточує продукт, видаляються кисень і мікрофлора повітря;

- при організації режимів адіабатного кипіння рідинної фракції мають місце летальні ефекти по мікрофлорі і досягається наближення до асептичного стану продукції;

- руйнування міжклітинних і клітинних структур сировини рослинного походження інтенсифікує процеси соковіддачі і підвищує вихід рідинної фракції;

- доповнення ефектів вакуумного пакування в режимах адіабатного кипіння рідинної фракції осмомолекулярною дифузиею створює можливість отримання високоякісних продуктів харчування.

Фазові переходи від рідинної складової до пари мають широке розповсюдження в харчових і мікробіологічних технологіях і стосуються процесів випарювання, перебігу окремих процесів дискретно-імпульсних технологій, вакуумного упакування продукції тощо.

Зниження тисків у системі парорідинного середовища приводить до обмеження температур його кипіння, що може мати різне призначення. Так, за використання кількості каскадної випарної станції 1 кг первинної пари дає змогу отримати 5...6 кг вторинної, що слід вважати важливим технічним результатом. Технології вакуумної обробки і вакуумного упакування продукції супроводжуються фізичними, термодинамічними і навіть летальними явищами по мікрофлорі, які потребують поглиблення інформації щодо перебігу їх перехідних процесів. Хоча загальні положення фізики перебігу названих процесів відомі, однак особливості їх організації потребують окремих уточнень і визначення термодинамічних параметрів.

Мета дослідження: теоретичне обґрунтування параметрів перехідних процесів за змінних тисків у рідинних середовищах харчових виробництв.

Матеріали і методи. Дослідження стосувалися особливостей і відмінностей технологій вакуумної обробки середовищ з відносно подовженим підтриманням у часі термодинамічних параметрів і за відповідного енергетичного забезпечення на основі створення замкнутих енергетичних контурів і перетворення внутрішньої енергії на основі закономірностей фазових переходів, енергетичних і матеріальних балансів в умовах процесів, наближених до адіабатних.

Результати і обговорення. Вакуумне випарювання рідинної фази супроводжується необхідністю безперервного підведення енергетичного потоку, який повинен компенсувати втрату теплової енергії у зв'язку з генеруванням парової фази. Така компенсація доповнюється енергетичними витратами, пов'язаними з виведенням з системи утвореної парової фази за рахунок використання вакуумних насосів або термобарометричних конденсаторів.

При цьому очевидно, що за використання вакуумних насосів парова фаза повинна стискатися мінімально до величини атмосферного тиску або до показника, що атмосферний тиск перевищує. За вказаних умов виникає можливість використання вторинної пари в локальному енергетичному контурі для подальшого підтримання її генерування. Доцільність створення локального енергетичного контуру визначається показниками енергетичного балансу. Відомо, що теплота утворення парової фази і теплота її конденсації залежать від тисків, зі збільшенням яких вона зменшується. Це означає, що зі зближенням тисків випаровування середовищ і тисків виведення пари з системи різниця між теплою пароутворення і конденсації пари зменшується. З точки зору інтересів оцінки термодинамічних параметрів скористаємося умовами енергетичних балансів. При цьому враховується стан вологої насиченої пари за показниками тиску, температури і ступеня сухості x . Температура вологої пари є функцією тільки тиску, а величина ступеня сухості має визначальний вплив в енергетичних трансформаціях, що видно з діаграми $i-s$ (рис. 1), де i — ентальпія водяної пари, кДж/кг; s — ентропія пари, кДж/(кг·К) [17]. Пунктирними кривими тут позначені ізохори, а також представлені ізобари, ізотерми і лінії рівної сухості пари. Лінія ВВ — верхня гранична крива, нижче якої розташована зона вологої насиченої пари, а вище — зона перегрітої пари.

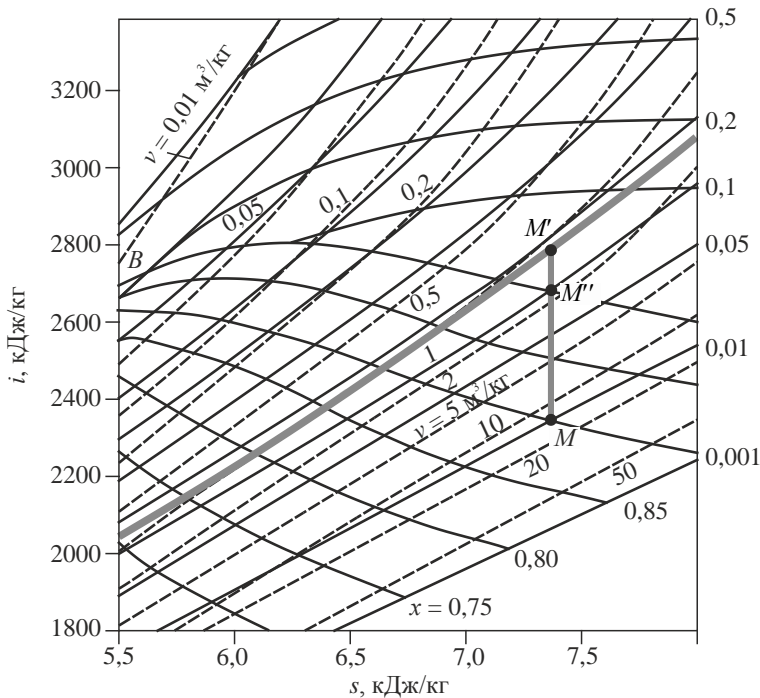


Рис. 1. $i-s$ діаграма для водяної пари

Ізобари в зоні вологої насиченої пари є прямими лініями, які одночасно є ізотермами, але в зоні перегрітої пари ізобари та ізотерми не збігаються. Стан

вологої насиченої пари визначається її тиском або температурою і ступенем сухості x . Температура вологої пари є функцією тільки тиску. Питомий об'єм вологої пари v_x залежить від тиску і ступеня сухості. Для тисків до 3 МПа і за умови $x \geq 0,8$ використовується з достатньою для технічних розрахунків точністю залежність:

$$v_x = v''x, \quad (2)$$

де v'' — питомий об'єм насиченої пари.

У зв'язку з відміченим в зоні вологої насиченої пари її термодинамічним параметрам відповідають точки перетину ізобар або ізотерм і кривих однакової сухості. Наприклад, режиму адіабатного стискання від параметрів в точці M відповідає відрізок $M - M'$ і точка M' розташована в зоні перегрітої пари. За ізобари, що відповідає тискам 0,1 та 1,0 і ступеня сухості $x = 0,9$, за діаграмою $i-s$ визначаємо ентальпії:

$$i_{0,1} = 2364 \text{ кДж/кг}; \quad i_{1,0} = 2684 \text{ кДж/кг}.$$

Для адіабатного процесу стискання пари пропонується залежність [17]:

$$pv^k = const. \quad (3)$$

Однак в останній умові k не є відношенням теплоємностей, а лише експериментально визначеним коефіцієнтом і для вологої пари:

$$k = 1,035 + 0,1x, \quad (4)$$

для сухої насиченої пари $k = 1,135$, а для перегрітої пари $k = 1,3$.

За наших умов при $x = 0,9$ отримаємо:

$$k = 1,035 + 0,1 \cdot 0,9 = 1,125. \quad (5)$$

Оскільки адіабата $M - M'$ перетинає лінію сухості $x = 1$, то це означає необхідність використання двох умов для визначення коефіцієнта k . Тоді для ділянки $M - M''$ маємо $k = 1,125$, а для ділянки адіабати $M'' - M' - k = 1,3$.

На основі принципу суперпозиції і з урахуванням знайдених значень k звернемося до оцінки можливості використання теоретичних співвідношень, які стосуються адіабатних процесів у теорії газів. Відомими є співвідношення між тисками і температурами газових середовищ в адіабатних процесах:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad (6)$$

$$\ell = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1), \quad (7)$$

де P_1 і P_2 — відповідно, початковий і кінцевий тиски; T_1 і T_2 — початкова і кінцева абсолютні температури пари відповідно.

Для зазначеного тиску $P_1 = 0,1$ бара знайдемо [17] $t_1 = 45,83^\circ\text{C}$ або $T_1 = 318,98 \approx 319 \text{ К}$, а точці M'' відповідає тиск 0,9 бара.

З урахуванням умови (6) знайдемо:

$$T_2 = 319 \left(\frac{0,9}{0,1} \right)^{\frac{1,125-1}{1,125}} = 406,2 \text{ K} = 133,2^\circ\text{C}.$$

Однак тиску насиченої пари $P = 0,9$ бара відповідає температура $t = 96,71^\circ\text{C}$. Похибка визначення температури в точці M'' складає близько 38%, що не може вважатися задовільним результатом і, очевидно, що вона пов'язана з коефіцієнтом k , значення якого може бути уточненим за відомих термодинамічних параметрів. У зв'язку з цим запишемо:

$$\lg T_2 = \lg T_1 + \frac{k-1}{k} \lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right). \quad (8)$$

Звідси отримаємо:

$$\frac{k-1}{k} = \frac{\lg T_2 - \lg T_1}{\lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}. \quad (9)$$

І остаточно:

$$k = \frac{1}{1 - \frac{\lg T_2 - \lg T_1}{\lg \left(\frac{P_2}{P_1} \right)}}. \quad (10)$$

Підстановка значень T_1 , T_2 , P_1 та P_2 приводить до результату: $k = 1,073$.
За такого значення одержуємо:

$$T_2 = 319 \left(\frac{0,9}{0,1} \right)^{0,068} = 370,4 \text{ K} = 97,4^\circ\text{C}$$

і похибка визначення температури T_2 тепер складає 0,7%.

Виконаємо перевірку можливості використання визначеного параметра $k = 1,073$ в умовах стискання, що відбувається в зоні вологої насиченої пари. Нехай при цьому $P_1 = 0,5$ бара, $x = 0,9$, $T_1 = 354,5 \text{ K}$ і $P_2 = 1,0$ бара. Тоді

$$T_2 = 354,5 \left(\frac{1,0}{0,5} \right)^{0,068} = 411,62 \text{ K} = 99^\circ\text{C}.$$

У цьому різі відхилення значення T_2 складає 1% від табличного, що дає змогу вважати результат визначення показника k задовільним і таким, що може використовуватися в залежностях, які відповідають адіабатним процесам.

На цій основі визначимо роботу стискання 1 кг пари:

$$\ell = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) = \frac{0,461}{0,073} (373 - 354,5) = 116,9 \text{ кДж/кг}.$$

Ентальпія вологої пари визначається з урахуванням ступеня сухості

$$i_x = i' + rx,$$

де i' — ентальпія води; r — теплота пароутворення.

Для наших умов визначаємо [17]: $P_1 = 0,5$ бара; $i'_1 = 340,57$ кДж/кг; $r_1 = 2305,4$ кДж/кг; $x_1 = 0,9$; $P_2 = 1,0$ бара; $i'_2 = 417,51$; $r_2 = 2258,2$ кДж/кг; $x_2 = 0,93$. Тоді за формулою для вологої пари:

$$i''_1 = i'_1 + r_1 x_1 = 340,57 + 2305,4 \cdot 0,9 = 2415,73 \text{ кДж/кг};$$

$$i''_2 = i'_2 + r_2 x_2 = 417,51 + 2258,2 \cdot 0,93 = 2517,6 \text{ кДж/кг},$$

а зростання ентальпії становитиме:

$$\Delta i'' = i''_2 - i''_1 = 2517,6 - 2415,73 = 101,87 \text{ кДж/кг}.$$

Порівняння розрахункової величини ℓ і одержаного перепаду ентальпій $\Delta i''$ є підставою для ствердження, що стосовно зони вологої насиченої пари використання формули для визначення роботи адіабатного стиснення газів можливе, як і оцінка ефективності створення локального замкнутого енергетичного контуру. Вторинна пара з тиском P_2 повинна повертатися в систему нагрівання середовища і віддавати його теплоту конденсації. За ізобарного процесу в результаті конденсації кількість повернутої теплової енергії становитиме:

$$q = i''_2 - i'_2,$$

а ефективність введення в контур роботи ℓ стиснення пари визначається показником:

$$\beta = \frac{i''_2 - i'_2}{\ell}.$$

За обраних умов в останньому випадку отримуємо:

$$\beta = \frac{2517,6 - 417,51}{116,2} = 18,07.$$

Висновки

У зв'язку з існуючими залежностями між тиском і температурою кипіння розчинів та харчових середовищ доцільним є поєднання режимів вакуумування з адіабатними фазовими переходами в пошуках можливостей досягнення летальних ефектів по мікрофлорі і для створення замкнутих енергетичних контурів.

Визначення меж термодинамічних трансформацій складових середовищ доцільно здійснювати з використанням табличних даних властивостей води і водяної пари. Водночас підтверджено можливість використання термодинамічних співвідношень, які стосуються адіабатних процесів стиснення водяної пари газових середовищ. Стиснення вторинної пари прийнято вважати адіабатним на основі його швидкоплинного перебігу.

Визначено, що стосовно зони вологої насиченої пари рекомендоване в літературі значення аналогів показників адіабат приводять до помітних відхилень від реальних термодинамічних параметрів їх трансформацій, у зв'язку з чим запропоновано нову розрахункову модель.

Література

1. Zahra Hassan Mohammad, Elsa Murano, Rozana G. Moreira, Alejandro Castillo (2019), Effect of air- and vacuum-packaged atmospheres on the reduction of *Salmonella* on almonds by electron beam irradiation, *LWT*, Available online 13 July 2019, 108389. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108389> (дата звернення 05.07.2019).
2. Hasan Koruk, Kenan Y. Sanliturk (2019), Detection of air leakage into vacuum packages using acoustic measurements and estimation of defect size, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 114, 1 January 2019, P. 528—538, URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.023> (дата звернення 05.07.2019).
3. Damian Frank, Yimin Zhang, Yutao Li, Xin Luo, Xue Chen, Mandeep Kaur, Glen Mellor, Janet Stark, Joanne Hughes (2019), Shelf life extension of vacuum packaged chilled beef in the Chinese supply chain. A feasibility study, *Meat Science*, Volume 153, July 2019, P. 135—143. URL: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.03.006> (дата звернення 05.07.2019).
4. Davor Daniloski, Anka Trajkovska Petkoska, Kata Galič, Mario Ščetar, Mia Kurek, Rozita Vaskoska, Tatjana Kalevska, Daniela Nikolovska Nedelkoska (2019), The effect of barrier properties of polymeric films on the shelf-life of vacuum packaged fresh pork meat, *Meat Science*, Available online 17 July 2019, 107880. URL: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107880> (дата звернення 05.07.2019).
5. Qinxin Sun, Fangda Sun, Dongmei Zheng, Baohua Kong, Qian Liu (2019), Complex starter culture combined with vacuum packaging reduces biogenic amine formation and delays the quality deterioration of dry sausage during storage, *Food Control*, Volume 100, June 2019, P. 58—66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.01.008> (дата звернення 05.07.2019).
6. Hsien-Feng Kung, Yi-Chen Lee, Chiang-Wei Lin, Yu-Ru Huang, Chao-An Cheng, Chia-Min Lin, Yung-Hsiang Tsai (2017), The effect of vacuum packaging on histamine changes of milkfish sticks at various storage temperatures, *Journal of Food and Drug Analysis*, Volume 25, Issue 4, P. 812—818. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfda.2016.12.009> (дата звернення 05.07.2019).
7. Ioanna N. Gertzou, Ioannis K. Karabagias, Panagiotis E. Drosos, Kyriakos A. Riganakos (2017), Effect of combination of ozonation and vacuum packaging on shelf life extension of fresh chicken legs during storage under refrigeration, *Journal of Food Engineering*, Volume 213, November 2017, P. 18—26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.026> (дата звернення 05.07.2019).
8. Phillip E. Strydom, Michelle Hope-Jones (2014), Evaluation of three vacuum packaging methods for retail beef loin cuts, *Meat Science*, Volume 98, Issue 4, December 2014, P. 689—694. URL: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.05.030> (дата звернення 05.07.2019).
9. Jian Ju, Li Liao, Yu Qiao, Guangquan Xiong, Dongsheng Li, Chao Wang, Jianzhong Hu, Lan Wang, Wenjin Wu, Anzi Ding, Liu Shi, Xin Li (2018), The effects of vacuum package combined with tea polyphenols (V+TP) treatment on quality enhancement of weever (*Micropterus salmoides*) stored at 0 °C and 4°C, *LWT*, Volume 91, May 2018, P. 484—490. URL: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.056> (дата звернення 05.07.2019).
10. Jasna Djordjević, Marija Bošković, Marija Starčević, Jelena Ivanović, Nrdjeljko Karabasil, Mirjana Dimitrijević, Ivana Branković Lazić, Milan Ž. Baltić, Survival of *Salmonella* spp. in minced meat packaged under vacuum and modified atmosphere, *Brazilian Journal of Microbiology*, Volume 49, Issue 3, July-September 2018, P. 607—613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.09.009> (дата звернення 05.07.2019).
11. Бурдо О. Г., Калинин Л. Г. Прикладное моделирование процессов переноса в технологических системах. Одесса: «Друк», 2008. 348 с.
12. Бут С. А. Удосконалення процесів і обладнання у виробництвах солодів і пива. Київ: Кондор, 2016. 262 с.
13. Luc Lagacé, Mariane Camara, Nathalie Martin, Fadi Ali, Jessica Houde, Stéphane Corriveau, Mustapha Sadiki (2019), Effect of the new high vacuum technology on the chemical

composition of maple sap and syrup, *Heliyon*, Volume 5, Issue 6, Jun 2019. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01786> (дата звернення 05.07.2019).

14. Abdulla Al Faruq, Min Zhang, Benu Adhikari (2019), A novel vacuum frying technology of apple slices combined with ultrasound and microwave, *Ultrasonics Sonochemistry*, Volume 52, April 2019, P. 522—529. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.12.033> (дата звернення 05.07.2019).

15. Malgorzata Nowacka, Artur Wictor, Aleksandra Anuszevska, Magdalena Dadan, Katarzyna Rybak, Dorota Witrova-Rajchert (2019), The application of unconventional technologies as pulsed electric field, ultrasound and microwave-vacuum drying in the production of dried cranberry snacks, *Ultrasonics Sonochemistry*, Volume 56, September 2019, P. 1—13. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.03.023> (дата звернення 05.07.2019).

16. Mozetič M., Vesel A., Primc G., Eisenmenger-Sittner C., Bauer J., Eder A., Schmid G.H.S., Ruzic D.N., Ahmed Z., Barker D., Douglass K.O., Eckel S., Fedchak J.A., Hendricks J., Klimov N., Ricker J., Scherschligt J., Stone J., ... Montelius L. (2018), Recent developments in surface science and engineering, thin films, nanoscience, biomaterials, plasma science, and vacuum technology, *Thin Solid Films*, Volume 660, 30 August 2018, P. 120—160. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.05.046> (дата звернення 05.07.2019).

17. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка: підручник для студентів енергетичних спеціальностей ВНЗ. 2. вид., випр. Київ: Техніка, 2006. 319 с.