

Удосконалення вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну для виробництва плодоовочевих пастоподібних напівфабрикатів

А. М. Загорулько, О. Є. Загорулько, Н. В. Федак, С. М. Сабадаш,
Д. Д. Казаков, В. М. Колодненко

Більшість конструкцій вакуум-випарних апаратів для концентрування мають проблему стабілізації теплопідведення по всій поверхні теплообміну. Це пояснюється наявністю парової оболонки, що ускладнює рівномірне теплопідведення. Також серед недоліків є відсутність можливості раціонального збільшення поверхні теплообміну, що в свою чергу впливає на тривалість термічної обробки та якість продукції. Із метою усунення основних недоліків вакуум-випарних апаратів запропоновано спосіб теплопідведення зі збільшеною поверхнею обігрівання. Для розв'язання поставлених завдань з удосконалення запропоновано використовувати сучасні гнучкі плівкові резистивні електронагрівачі випромінювального типу (ГПРЕНВТ). Вони характеризуються низькою інерційністю, металоємністю, простотою автоматизації та обслуговування. Такий електронагрівач здатен забезпечувати рівномірність теплового потоку та приймати будь-яку геометричну форму теплопередавальної поверхні.

Відповідно до конструктивно-технологічного рішення замість парової оболонки обігрівання пропонується здійснювати теплоізолюваним ГПРЕНВТ, який також розташовується у порожнистому просторі вала мішалки та лопатей. Таким чином забезпечується збільшення поверхні теплообміну від $3,7 \text{ м}^2$ до $4,15 \text{ м}^2$, тобто на 12 %.

Виявлено зменшення граничної напруги зсуву зі збільшенням температури: якщо $t=10 \text{ }^\circ\text{C}$, то $\theta_0=79 \text{ Па}$; відповідно $t=70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\theta_0=12 \text{ Па}$. Ефективна в'язкість для $t=10 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $\eta_{\text{еф}}=392 \text{ Па}\cdot\text{с}$, для $t=70 \text{ }^\circ\text{C}$ $\eta_{\text{еф}}=2 \text{ Па}\cdot\text{с}$. У ході апробації модельного зразка ВВаПТ під час концентрування ($50\text{...}65 \text{ }^\circ\text{C}$) визначено швидкість зсуву: $0,5\text{...}2,5 \text{ с}^{-1}$. Ефективна в'язкість перебуває в межах $2,0\text{...}4,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$. Удосконалений ВВаПТ характеризується скороченням тривалості виходу на стаціонарний режим порівняно з прототипом (МЗС-320) на 29 %. Ефективність конструктивно-технічного рішення підтверджується й зменшенням ваги апарата на 35 %, питомої металоємності на 42 %, тривалості обробки на 12 %

Ключові слова: концентрування, органічна продукція, вакуум-випарний апарат, пастоподібний напівфабрикат, гнучкий плівковий резистивний електронагрівач

1. Вступ

Концентровані напівфабрикати на основі природної органічної сировини становлять значну частку ринку харчової індустрії завдяки широкому спектру застосування. Зокрема, для забезпечення щоденно зростаючого попиту населення у природних продуктах харчування. Цей попит обумовлено стрімким по-

гіршенням екологічного стану багатьох країн за останні десятиріччя та бажанням споживати якісну продукцію з обґрунтованою складовою: якість – ціна. Це підтверджує доцільність пошуку інноваційних підходів з інтенсифікації процесу концентрування за рахунок удосконалення обладнання для його реалізації [1]. Основою для виробництва концентрованих напівфабрикатів є природна, зокрема органічна сировина, що зумовлює необхідність її переробки безпосередньо в місцях зростання. Це пояснюється насамперед швидкими неминучими фізико-хімічними реакціями, пов'язаними з втратами її початкових властивостей, зокрема природної цінності, та зменшенням витрат на транспортування [2].

З метою забезпечення якісних характеристик харчової сировини, що переробляється, постійно вдосконалюються відповідні технології, що дозволяє значною мірою зменшити тривалість обробки.

Забезпечення якості сировини, що переробляється в харчову продукцію, потребує постійного вдосконалення відповідних технологій, що дозволять значною мірою зменшити тривалість обробки. Використання нового енергоощадного обладнання забезпечить збереження початкових властивостей сировини та надасть конкурентоспроможні здібності отримуваним виробам [3]. Значний вплив на якість отримуваних органічних концентрованих напівфабрикатів чинить безпосередньо конструктивно-технологічна складова. Під час виробництва якісних природних концентрованих напівфабрикатів значну увагу слід приділяти тепломасообмінним процесам, які здебільшого реалізуються у високопродуктивному та металоємному обладнанні. У багатьох випадках конструктивна реалізація не забезпечує повною мірою належної якості отримуваної продукції через складні інженерно-технічні комунікації та ресурсозатратність. Це обумовлює необхідність пошуку інноваційних рішень з вдосконалення процесів концентрування, зокрема внаслідок збільшення площі поверхонь теплообміну.

Актуальним завданням є впровадження новітніх конструктивно-технологічних рішень, пов'язаних з удосконаленням процесу концентрування природної сировини для подальшого виробництва на її основі різноманітних продуктів харчування. Розв'язання завдання можливе шляхом вдосконалення базових конструкцій вакуумних-випарних апаратів за рахунок збільшення поверхні теплообміну та зміні способу обігріву робочої камери. В свою чергу, це забезпечить термічну стабілізуючу дію процесу та ресурсоефективність стосовно зменшення металоємності обладнання, що дозволить отримати конкурентоспроможний якісний асортимент концентрованих напівфабрикатів природного походження.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

У роботі [4] підтверджено необхідність розширення ринку якісної рослинної продукції природного походження. Ця сировина володіє природним вмістом біологічно активних речовин (БАР) та має оригінальні смакові властивості. Тим самим вона здатна забезпечити отримання конкурентоспроможної продукції рослинного походження функціонального призначення та розширити її асортимент. Це стосується не лише виробництва готової до вживання харчової продукції, але й концентрованих напівфабрикатів високого ступеня готовності.

Використання концентрованих пастоподібних напівфабрикатів з плодово-ягідної сировини забезпечує розширення асортименту продуктів харчування та дозволяє створювати оригінальні смакові властивості отримуваної продукції. Для реалізації вище зазначеного необхідно впроваджувати обґрунтовані технологічні режими та сучасне обладнання, що забезпечить максимальне збереження природних властивостей отримуваних напівфабрикатів.

Останнім часом все більш уваги приділяється розробки та впровадженню функціональних продуктів з вмістом рослинної сировини. У роботі [5] досліджується роль довіри, свідомості здоров'я та цін у формуванні наміру споживачів щодо функціональних продуктів. Встановлено, що сформоване ставлення споживачів на придбання такої продукції виникає у зв'язку з її високою якістю. Це зумовлює необхідність впровадження новітніх способів та апаратурних рішень щодо розповсюдження рослинних напівфабрикатів під час подальшого виробництва функціональних продуктів на її основі.

В роботі [6], аналізується ефективність використання різноманітних рослинних напівфабрикатів під час купажування в єдиний функціональний напівфабрикат підвищеної якості. З зазначенням необхідності врахування властивостей кожного компоненту та дотримання обґрунтованих технологічних операцій при її переробці, оскільки сировина швидко втрачає свої початкові властивості. Відповідно до наведених даних в роботі [7] більшість тепломасообмінних процесів реалізуються на застарілому технологічному обладнанні з використанням високих температур та є ресурсозатратними. Причиною цього є висока продуктивність, безперервність технологічних процесів, складність технічних комунікацій, що ускладнює їх обслуговування [8]. В роботі [9] зазначається необхідність виробництва концентрованих ягідних виробів для отримання функціонально-фізіологічних напівфабрикатів, що забезпечать підвищення рівня імунітету споживача. Це обумовлює необхідність інноваційного підходу до розв'язання технологічно-конструктивних завдань з удосконалення виробництва концентрованих напівфабрикатів для виробництва функціональної продукції.

Концентрування природних напівфабрикатів здійснюється в однокорпусних та багатокорпусних вакуум-випарних апаратах, роторно-плівкових апаратах і сушарках [10]. Більшість із них мають промислові недоліки: ускладнений температурний контроль, наявність теплових магістралей, недостатня поверхня теплообміну – через необхідність розміщення сепарувальних зон. Це обумовлює складність техніко-технологічного обслуговування, низьку ресурсоефективність, конкурентоспроможність і якість отримуваної продукції. Сьогодні доцільними для виробництва концентрованих напівфабрикатів є різноманітні ресурсоефективні конструкції інфрачервоних сушарок [11], використання яких дозволить отримувати порошкоподібний напівфабрикат високого ступеня готовності із заданими геометричними розмірами та функціональними властивостями.

У роботі [12] проведені дослідження з визначення впливу якості отримуваної продукції та користь від її споживання. У роботі [13] проведені дослідження з сенсорного визначення впливу якості отримуваної продукції на раціональну ефективність споживання. Зазначено, що в більшості саме колір є першим чинником, що впливає на вибір споживача, а потім вже смакові та фізіологічні влас-

тивості. Це обумовлює необхідність максимального збереження початкових властивостей природної сировини при термічній обробці, а також обґрунтоване їх рецептурне купажування в композиції. З метою надання привабливого кольору та штучного підвищення фізіологічних властивостей природної сировини. Головною проблемою залишається морально застаріле технологічне обладнання для виробництва концентрованих якісних напівфабрикатів. Українські вакуум-випарні апарати характеризуються складною стабілізацією термодинамічних параметрів: тиску та температури в робочій камері апарата. Це значною мірою впливає на якість отримуваної продукції. Обумовлюючи необхідність вдосконалення способів з їх стабілізації для забезпечення гарантованої якості харчової маси за умов рівномірного нагрівання. Одним зі шляхів вирішення цього питання є заміна парових оболонки на сучасні електричні нагрівальні елементи, які здатні забезпечувати якісний рівень стабілізації температури при концентруванні та покращити експлуатаційні показники отримуваного обладнання.

У роботі [14] розглянуті питання з технології селективного енергопостачання при концентруванні харчових розчинів. Врахування наведеного в роботі матеріалу дозволило авторам створити сучасну низькотемпературну конструкцію вакуум-випарного апарата. В якому процес може реалізовуватися з використанням температури до 35 °С. Однак складність обслуговування електромагнітних генераторів, потребує використання кваліфікованого персоналу та ускладнює експлуатацію апарата. Отже на сьогодні залишається відкритим питання з пошуку інноваційних сучасних методів обігріву вакуум-випарних апаратів.

На сьогодні відкритими залишаються питання з впливу процесу концентрування на хімічні, реологічні, мікроструктурні та термічні властивості харчової сировини, зокрема сиропу з груші, що наведено в роботі [15]. Наведені результати досліджень підтверджують необхідність визначення структурно-механічних властивостей сировини при концентруванні. Оскільки це забезпечить якісний конструктивний підхід до реалізації тепломасообмінної обробки та дозволить удосконалити конструктивну складову процесу. Так, дослідженням авторів [16] визначено поведінку потоку дитячих пюре на основі рослинних рослин при різних температурах (5...65 °С), приділяючи особливу увагу їх часовим властивостям у діапазоні швидкості зсуву (5...200 с⁻¹). А у роботі [17] встановлено вплив рН, температури та додавання глюкози на реологічну поведінку фруктових пюре з персика, папаї та манго. Що підтверджує необхідність досліджень структурно-механічних характеристик, як з точки зору якості продукту так і з метою достовірних розрахунків вузлів розробляемого апарату.

Дослідження з розробки способу низькотемпературного концентрування яблуневого соку, в тому числі заморожуванням, що наведено в роботі [18] обумовлюють необхідність саме низькотемпературної обробки сировини з чіткою стабілізацією температурного поля. Це в свою чергу попередньо підтверджує доцільність використання сучасних нагрівальних елементів з високою якістю регулювання температури.

Сучасне рішення з реалізації процесу концентрування наведено в роботі [19]. Являє собою систему концентрування соку із закритим циклом, забезпечену рідким осушуваним шаром. Для досліджень використовували сік барбарис-

су та порівнювали зі звичайним процесом концентрування. Із метою одночасної регенерації розчину для осушення використовувався неглазурований сонячний колектор із плоскою пластинкою. Експериментальна оцінка проєктованої системи проводилася за різних витрат циркуляційного повітря. Результати показали зменшення тривалості концентрування від 480 хв до 360 хв при швидкості потоку 0,014 кг/с, зниження ефективності зневоднення на 40 % і збільшення швидкості випаровування вологи на 33 %. Це підтверджує ефективність запропонованої системи, але залишаються не вирішеними питання з модернізації існуючих вакуум-випарних апаратів

Так, у роботі [20] наведено результати узагальненої тепломасообмінної обробки з зазначенням небажаного утворення киплячої плівки при уварюванні. Це пов'язано з перегріванням поверхневих шарів та швидкою зміною фізико-хімічних властивостей сировини, отже її якості. Для запобігання цього пропонується збільшення поверхні теплообміну, за рахунок забезпечення обігріву перемішувального пристрою та збільшення поверхні теплообміну. Це підтверджує доцільність досліджень в цьому напрямку.

Сучасним конструктивно-технологічним рішенням з удосконалення базових конструкцій вакуум-випарних апаратів є збільшення поверхнями теплообміну, що забезпечить ресурсоефективність, а саме зменшення тривалості процесу та конструктивної металоємності апарата. Підвищення конкурентоспроможності отримуваних якісних концентрованих напівфабрикатів органічного походження, які можуть виступати в якості добавок при виробництві нової продукції. Зокрема внесення концентрованих напівфабрикатів до рецептурного складу кондитерських та хлібобулочних виробів може забезпечити підвищення харчової та біологічної цінності [21].

У роботі [22] проаналізовано доцільність переробки плодоягідної сировини в концентрований напівфабрикат з подальшим внесенням його до рецептури харчових виробів. Саме таке рішення забезпечувало підвищення харчової цінності готових виробів, тим самим підтверджуючи необхідність пошуку шляхів з удосконалення процесу концентрування. Перш за все, за рахунок конструктивного удосконалення.

В результаті аналізу встановлено основні проблематичні складові виробництва якісних концентрованих напівфабрикатів. Серед них питання, пов'язані зі стабілізацією теплового впливу (тиск – температура), температура обробки та деформуючі зусилля під час перемішування сировини, а також обґрунтування технологічних режимів в цілому. Також необхідним є врахування структурно-механічних властивостей сировини, її компонентного складу та дисперсної фази в цілому. Вирішення зазначених конструктивно-технологічних недоопрацювань при вдосконаленні та проєктуванні сучасного обладнання дозволить забезпечити оптимальний процес концентрування зі зменшеною металоємністю, тривалістю обробки та покращить умови експлуатації. Шляхами вирішення цих недоліків може слугувати заміна нагрівальної парової оболонки низькоенергійними електронагрівачами, збільшення поверхні теплообміну, удосконалення перемішувального пристрою і забезпечення його обігрівання. Удосконалення найбільш використовуваної на консервних підприємствах України базової

комплектації МЗС-320 за рахунок збільшення поверхні теплообміну підвищить ресурсоефективність переробки сировини, забезпечить належну якість отримуваних напівфабрикатів та їх конкурентоспроможність.

3. Мета та завдання дослідження

Метою дослідження є удосконалення вакуум-випарного апарата шляхом збільшення поверхні теплообміну для виробництва харчових напівфабрикатів високого ступеня готовності з визначенням ефективності прийнятого конструктивно-технологічного рішення.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- розробити вдосконалену модельну конструкцію вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну;
- провести експериментально-розрахункові дослідження з використанням модельної конструкції вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну (ВВаПТ) для підтвердження її ефективності.

4. Матеріали, методи дослідження концентрування органічної сировини та експериментальна установка

Реалізація зазначених завдань відповідно до мети дослідження здійснювалася на базі Науково-дослідного центру «Новітні біотехнології та обладнання для виробництва харчової продукції з високими оздоровчими властивостями» Харківського державного університету харчування та торгівлі (Україна). Експерименти проведено на розробленій удосконаленій модельній конструкції ВВаПТ. У роботі наведено детальний опис експериментальної моделі ВВаПТ, а також матеріали та методи дослідження концентрування. Під час проведення цього тепломасообмінного процесу застосовувалися стандартні розрахункові й експериментальні методики з використанням автоматичних вимірювальних пристроїв фірми «ОВЕН» (Україна).

Реологічні властивості модельних зразків пюре визначали на ротаційному віскозиметрі “Реотест-2” у циліндричному вимірювальному пристрої по Куєту.

5. Вакуум-випарний апарат зі збільшеною поверхнею теплообміну для реалізації тепломасообмінного процесу

5. 1. Розробка вдосконаленої модельної конструкції вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну

Для забезпечення вдосконалення ВВаПТ попередньо були враховані основні конструктивно-технологічні недоліки наявних на ринку України вакуум-випарних апаратів, а саме:

- значну метало- та енергоємність мережі систем паропостачання, зокрема наявність парової оболонки в апаратах;
- тривалість технологічного процесу тепломасообмінної обробки за умов використання стандартної поверхні теплообміну та конструкції мішалки.

Для усунення вищезазначених недоліків запропоновано конструктивно-технологічне рішення зі збільшення поверхні теплообміну шляхом модернізації

конструкції мішалки. Крім того, передбачено заміну парової оболонки сучасними електронагрівачами.

Для вирішення першого завдання досліджень здійснено вдосконалення моделі конструкції вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну (ВВаПТ) має вертикальну робочу технологічну ємність 1 (рис. 1). Модель призначена для концентрування. Із метою зменшення металовитрат обігрівання здійснюється лише гнучким плівковим резистивним електронагрівачем випромінювального типу з теплоізолюючою зовнішньою поверхнею 2 (ГПРЕНВТ) [23]. Використання електронагрівача не потребує додаткового використання пари, наявності будь-яких нагрівальних оболонок, мереж трубопроводів та генераторів тепла.

Верхня частина апарата являє собою теплоізолюваний сепарувальний простір для конденсації та відведення вторинної пари. Кришка апарата 3 має стандартну контрольно-запобіжну арматуру 4, установлену в базовій комплектації вакуум-випарних апаратів марки МЗС, у тому числі оглядове віконце 5.

Поверхня теплообміну збільшується в наслідок удосконалення конструкції перемішувального пристрою 6 шляхом його обігрівання ГПРЕНВТ та розміщення шістьох розділювачів потоку 7. Покращення перемішування пристінного шару сировини на основних поверхнях концентрування (циліндрична стінка та днище) забезпечувалося підпружинюванням ребер 8. При цьому шість розділювачів потоку забезпечують інтенсивне перемішування внутрішньої маси концентрованої сировини. Живлення нагрівання перемішувального пристрою 6 підключається за рахунок порожнистого внутрішнього простору та контактної платформи 9 у верхній частині апарата. Запропоноване конструктивне рішення дозволило отримати та збільшити корисну поверхню теплообміну на $0,45 \text{ м}^2$.

Розвантажуються ВВаПТ автоматичним пристроєм 10, змонтованим у нижній його частині, навколо обертового вала перемішувального пристрою 6, що дозволяє автоматичне відкривання запірної засувки 11. Тим самим реалізується відведення концентрату напрямними 12 на подальшу реалізацію напівфабрикату.

Обертання вдосконаленого перемішувального пристрою 6 здійснюється від електроприводу з черв'ячним редуктором 13. ВВаПТ розміщено на стійках 14. Отримувана вторинна пара в процесі уварювання по трубопроводу надходила до кожухотрубчастого конденсатору або ж використовувалася для підігрівання технічної рідини відповідно до санітарних потреб лінії. Принцип реалізації технологічного процесу у ВВаПТ характерний для базової комплектації МЗС-320, відмінність полягає лише в системі обігрівання зі збільшеною поверхнею теплообміну та зменшеною його тривалістю.

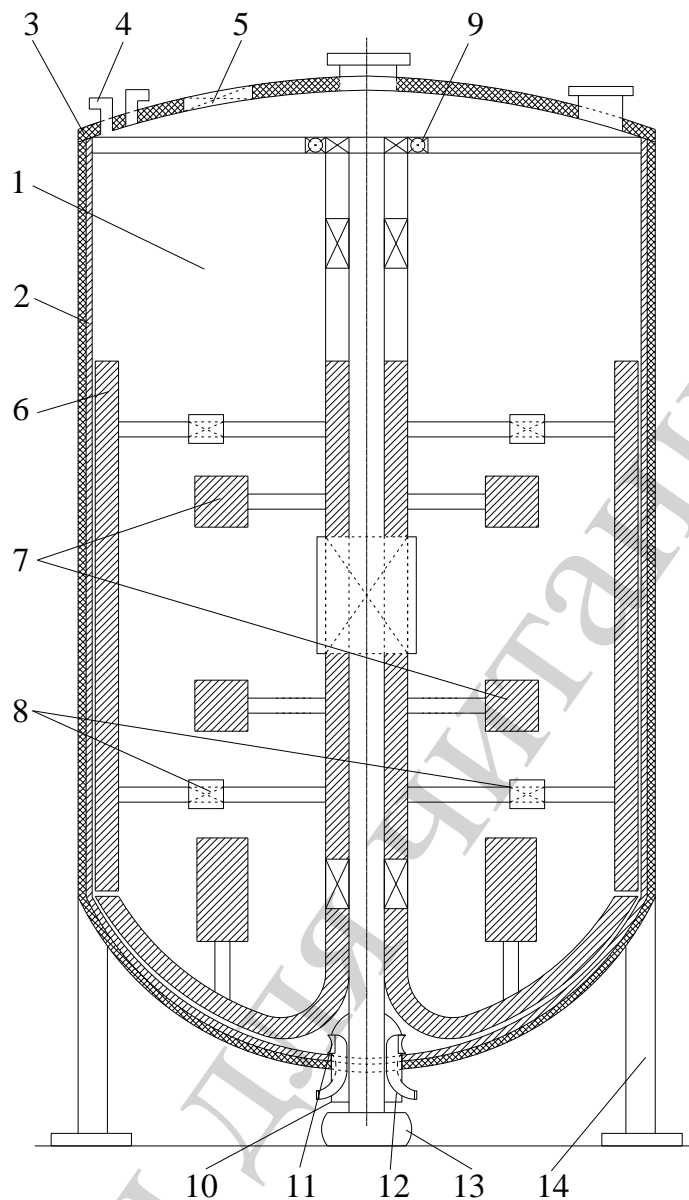


Рис. 1. Схема вдосконаленого модельного вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну (ВВаПТ): 1 – вертикальна робоча технологічна ємність; 2 – гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінювального типу з теплоізолюючою зовнішньою поверхнею (ГПРЕнВТ); 3 – кришка апарата; 4 – контрольно-запобіжна арматура; 5 – оглядове віконце; 6 – удосконалений перемішувальний пристрій; 7 розділювачі потоку (6 шт.); 8 – підпружинені ребра; 9 – контактна платформа живлення ГПРЕнВТ; 10 – розвантажувальний автоматичний пристрій; 11 – автоматична запірна засувка; 12 – напрямні для відведення продукту; 13 – електропривід із черв'ячним редуктором; 14 – стійки

5. 2. Експериментально-розрахункові дослідження модельної конструкції вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну.

На другому етапі завдання для апробації вдосконаленої конструкції ВВаПТ було визначено структурно-механічні характеристики пореподібного напівфабрикату залежно від температури (рис. 2). Оскільки узгодження взаємо-

дії реологічних властивостей з конструктивними особливостями (перемішувальним пристроєм) є невід'ємною складовою під час уварювання рослинної сировини. Аналіз отриманих даних підтверджує зменшення граничної напруги зсуву у вимірюваних межах із підвищенням температури в шість разів. Якщо $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, то $\theta_0=79\text{ Па}$; відповідно $t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\theta_0=12\text{ Па}$. Це також дозволило визначити значення ефективної в'язкості (η_{ef}) від температури. Так, для $t=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\eta_{\text{ef}}=392\text{ Па}\cdot\text{с}$, а для $t=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\eta_{\text{ef}}=2\text{ Па}\cdot\text{с}$. Слід зазначити, що збільшення температури спричиняє значне погіршення всіх реологічних характеристик зменшення показників динамічної в'язкості пюреподібного напівфабрикату.

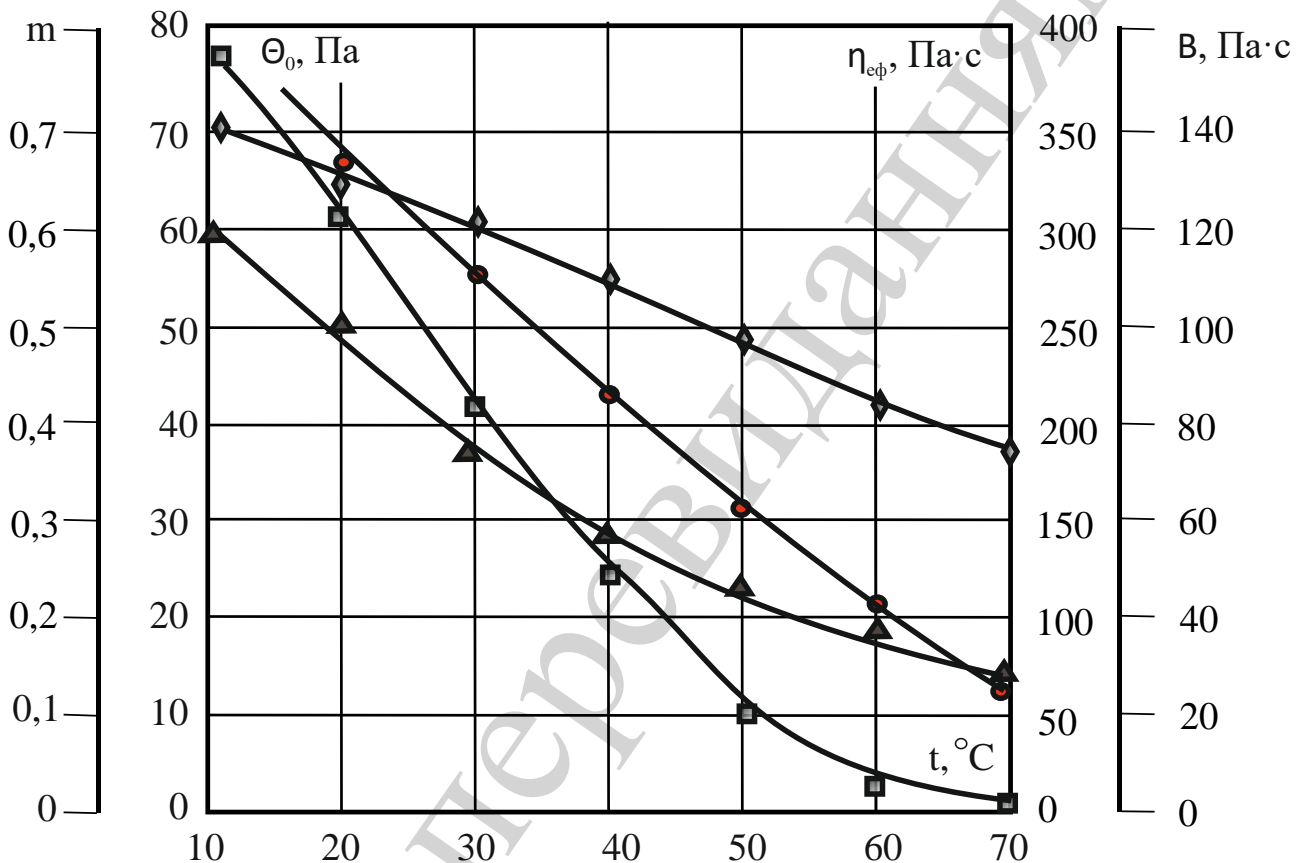


Рис. 2. Залежність структурно-механічних властивостей пюре від температури: ● – гранична напру́га зсуву (θ_0); ■ – пластична деформація (η_{ef}); ▲ – ефективна в'язкість за одиничного значення градієнта швидкості (В); ◆ – темп руйнування структури (m)

У ході апробації модельного зразка ВВаПТ під час концентрування ($50\text{...}65\text{ }^{\circ}\text{C}$) встановлено, що швидкість зсуву становила $0,5\text{...}2,5\text{ с}^{-1}$, а ефективна в'язкість в межах $2,0\text{...}4,5\text{ Па}\cdot\text{с}$. Таким чином, встановлено реологічні властивості пюреподібного напівфабрикату за попередньо обраними режимними параметрами.

Для визначення ефективності запропонованих конструктивно-технологічних рішень відповідно до другого завдання попередньо встановлена кінетика нагрівання пюреподібного напівфабрикату у вдосконаленому ВВаПТ та базовій конструкції МЗС-320 (рис. 3). Аналіз наведених кривих підтверджує ефективність запропонованих конструктивно-технічних рішень стосовно збіль-

шення поверхні теплообміну. Тривалість виходу на стаціонарний режим (52 °С) удосконаленого ВВаПТ становить 575 с, отже забезпечується скорочення тривалості виходу на стаціонарний режим на 29 % порівняно з прототипом. Це підтверджує зменшення тривалості нагрівання та відповідно тривалості обробки пореподібного напівфабрикату за рахунок збільшення поверхні теплообміну.

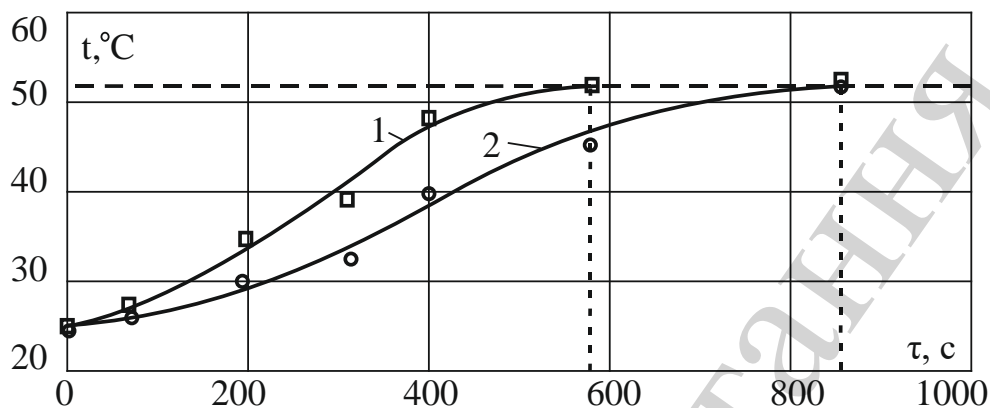


Рис. 3. Кінетика нагрівання пореподібного напівфабрикату:
1 – ВВаПТ; 2 – МЗС-320

Завдяки зменшенню енерговитратної складової вдосконалений ВВаПТ окрім ресурсоефективності характеризується екологічністю. Це обумовлено зниженням обсягів споживання електроенергії теплових електростанцій, унаслідок чого зменшуються викиди CO₂ в атмосферу.

У табл. 1 наведена порівняльна характеристика базової конструкції МЗС-320 та вдосконаленого модельного прототипу ВВаПТ.

Внаслідок аналізу даних табл. 1 доведено ефективність запропонованого конструктивного рішення зі збільшення поверхні теплообміну та підвищення ресурсоефективності в цілому. Це підтверджується зменшенням ваги апарата на 35 %, питомої металоємності апарата на 42 %, тривалості обробки на 12 %; збільшенням поверхні теплообміну на 12 %. За іншими конструктивно-технічними показниками вдосконалений ВВаПТ також має істотні переваги в технічному обслуговуванні та експлуатації. Забезпечує вирішення головної проблеми вакуум-випарних апаратів зі стабілізації теплопідведення по всій поверхні теплообміну. Збільшення поверхні теплообміну забезпечує скорочення тривалості виходу на стаціонарний режим (нагрів до 52 °С протягом 575 с) та термічної обробки в цілому (рис. 3), дозволяючи опосередковано вважати про забезпечення отримання високоякісних концентратів. Уварювання в межах 50...65 °С, забезпечує максимальне збереження вітаміну С, а отже й інших фізико-хімічних сполук.

Під час дослідження були визначені основні технічні параметри вдосконаленого ВВаПТ (табл. 2).

Під час експериментально-практичних досліджень отримано основні техніко-експлуатаційні показники вдосконаленого ВВаПТ, які підтверджують ефективність його подальшого впровадження. Результатом цього стане покращен-

ня конструктивно-технологічних параметрів існуючих ліній із концентрування природної сировини. Крім того, буде забезпечено ресурсоефективність і рівномірний вплив на сировину з чіткою стабілізацією температурного поля внаслідок використання ГПРЕнВТ. Зазначене, у свою чергу, забезпечить високу якість отриманого напівфабрикату та відповідність ціни якості.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика вдосконаленого ВВаПТ порівняно з базовою конструкцією МЗС-320

Втрати енергії	МЗС-320	ВВаПТ
Вага апарата	$m^*=1700$ кг	$m=m_{\text{МЗС-320}}-m_{\text{сорочки}}+m_{\text{ГПРЕнВТ}}=1700-620+20=1100$ кг
Питомі витрати	$q_{\text{п}}=Q/m=1120798/1600=700$ кДж/кг	$q_{\text{п}}=Q/m=651137/1600=406$ кДж/кг
Тривалість обробки	$\tau=Q/F \cdot k \cdot \Delta t=1191033/3,7 \cdot 145 \cdot 4 \cdot 91=4065$ с	$\tau=Q/F \cdot k \cdot \Delta t=1969245/4,15 \times 1454 \cdot 91=3586$ с
Площа поверхні теплообміну	$F^*=3,7$ м ³	$F=F_{\text{МЗС-320}}+F_{\text{мішалки}}=3,7+0,45=4,15$ м ³
Нагрівання апарата	$Q_{\text{нагр.}} = m_1 \cdot c_c \cdot (t_2' - t_1') + m_1 \cdot c_c \cdot (t_2'' - t_1'') = 900 \cdot 0,48 \times (52 - 25) + 620 \cdot 0,48 \times (142 + 80) = 33452$ кДж	$Q_{\text{нагр.}} = m_1 \cdot c_c \cdot (t_2' - t_1') = 900 \cdot 0,48 \cdot (52 - 25) = 11664$ кДж
Нагрівання продукту	$Q_{\text{пр}}=m \cdot c \cdot (t_k - t_{\text{н}})=1600 \cdot 3,7 \cdot (52 - 40)=2552$ кДж	$Q_{\text{пр}}=m \cdot c \cdot (t_k - t_{\text{н}})=1600 \cdot 3,7 \cdot (52 - 40)=72552$ кДж
Загальна кількість	$Q_{\text{заг}}=2053504$ кДж	$Q_{\text{заг}}=2009433$ кДж
Питома металоемність апарата	$m=M/F=1700/3,7=459$ кг/м ²	$m=M/F=1100/4,15=265$ кг/м ²

Примітка: * Порівняльні данні базової конструкції МЗС-320 взято з літературного джерела [24]

Таблиця 2

Технічні параметри вдосконаленого вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну

Технічний параметр	Значення
Об'єм технологічної ємності, м ³	1,0
Потужність двигуна обертового приводу, кВт	0,35
Температура теплопередавальної поверхні від ГПРЕнВТ, °C	до 150
Частота обертання мішалки, хв ⁻¹	47
Вага (без завантаження), кг	1100

6. Обговорення отриманих результатів концентрування органічної сировини в удосконаленому вакуум-випарному апараті зі збільшеною поверхнею теплообміну

Головною проблемою під час виробництва високоякісних концентратів є використання морально застарілого технологічного обладнання зі складною стабілізацією термодинамічних параметрів: тиску та температури в робочій камері апарата. Це значною мірою впливає на якість отримуваної продукції. Сьогодні тривають дослідження теплообміну під час уварювання природної сировини, зокрема овочевого соку. Удосконалено пристрій для перемішування з паровим обігрівом теплопередавальної оболонки та одночасним нагнітанням пари в перемішувальний пристрій [25]. Недоліком парової системи обігріву є металоємність, інерційна нерівномірність нагрівання. Рішення з нагнітання пари в нижню частину порожнистого перемішувального пристрою з великою ймовірністю призведе до гідродару, через конденсацію пари під час нагрівання овочевого соку. Усе це значною мірою ускладнює експлуатацію та автоматизацію технологічного процесу й апарата в цілому. Одним зі шляхів вирішення цього питання є заміна парових оболонок на сучасний електронагрівач з якісним рівнем стабілізації температури при концентруванні. Використання ГПРЕНВТ дозволяє ліквідувати нагрівальну парову оболонку, мережі та парогенератор.

Забезпечення обігріву удосконаленого перемішувального пристрою з шістьма розділювачами потоків – ГПРЕНВТ – збільшує загальну корисну поверхню теплообміну на $0,45 \text{ м}^3$ (табл. 1). Збільшення поверхні теплообміну забезпечує скорочення тривалості виходу на стаціонарний режим ($52 \text{ }^\circ\text{C} - 575 \text{ с}$) ВВаВТ та термічної обробки в цілому (рис. 3), дозволяючи опосередковано вважати про забезпечення отримування високоякісних концентратів. Уварювання в межах $50...65 \text{ }^\circ\text{C}$, забезпечує максимальне збереження вітаміну С, а отже й інших фізико-хімічних сполук.

Також на сьогодні залишаються відкритими питання з впровадження низкотемпературного уварювання та визначення структурно-механічних властивостей в умовах перемішування. Це обумовило необхідність досліджень структурно-механічних властивостей під час апробації ВВаПТ з удосконаленим перемішувальним пристроєм. Встановили, що в діапазоні від $10...70 \text{ }^\circ\text{C}$ забезпечується зменшення напруги зсуву від 79 до 12 Па. При цьому ефективна в'язкість при $t=10 \text{ }^\circ\text{C}$ становить $\eta_{\text{еф}}=392 \text{ Па}\cdot\text{с}$, при $t=70 \text{ }^\circ\text{C}$ $\eta_{\text{еф}}=2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (рис. 2).

Порівняння кінетичних кривих нагрівання пореподібного напівфабрикату вдосконаленого ВВаПТ з прототипом (МЗС-320) підтверджує забезпечення скороченням тривалості виходу на стаціонарний режим на 29 % (рис. 3). Зокрема й ефективність конструктивно-технічних показників: зменшення ваги апарата на 35 %, питомої металоємності на 42 %, тривалості обробки на 12 %. Поверхня теплообміну збільшилась на 12 % (табл. 1).

Головною перевагою конструктивно-технологічного рішення є впровадження сучасних інженерних розробок з інтенсифікації процесів концентрування. Це приведе до покращення технічних параметрів вакуум-випарних апаратів, підвищення їх конкурентоспроможності й зменшення собівартості з гарантованою якістю отримуваної продукції. Слід відзначити, що ефективність ВВаПТ отримується за

рахунок використання ГПРЕНВТ, який в комплексі впроваджених конструктивних рішень забезпечить чітку стабілізацію температурного впливу, простоту обслуговування й спрощення автоматизації процесу уварювання.

Упровадження ВВаПТ рекомендується лише в запропонованих температурних діапазонах (50...65 °С) для забезпечення ресурсоефективної обробки сировини у високоякісні концентровані напівфабрикати високого ступеня готовності. Нехтування рекомендаційними параметрами призведе до неминучого зниження якості отримуваних виробів.

У подальшому планується проведення детального дослідження з реалізації процесу концентрування в удосконаленому апараті. Визначатиметься можливість виведення узагальненої структури змін структурно-механічних властивостей залежно від різновиду сировини та технологічних режимів. Буде досліджено вплив реалізації запропонованого рішення на отримувану якість концентрованих напівфабрикатів високого ступеня готовності шляхом визначення зміни кольороутворення продукції.

7. Висновки

1. Запропоноване обігрівання технологічної ємності розробленої моделі конструкції вакуум-випарного апарата зі збільшеною поверхнею теплообміну гнучким плівковим резистивним електронагрівачем випромінювального типу з теплоізолюючою зовнішньою поверхнею. Таким же чином здійснюється обігрів перемішувального пристрою, що забезпечує збільшення корисної поверхні теплообміну на 0,45 м³.

2. Визначені структурно-механічні властивості підтверджують зменшення граничної напруги зсуву у вимірюваних межах: якщо $t=10$ °С, то $\theta_0=79$ Па; відповідно $t=70$ °С, $\theta_0=12$ Па. Ефективна в'язкість для $t=10$ °С становить $\eta_{\text{ef}}=392$ Па·с, для $t=70$ °С $\eta_{\text{ef}}=2$ Па·с. У ході апробації модельного зразка ВВаПТ під час концентрування (50...65 °С) встановлено швидкість зсуву: 0,5...2,5 с⁻¹. Ефективна в'язкість перебуває в межах 2,0...4,5 Па·с. Аналіз кінетичних кривих нагрівання пореподібного напівфабрикату свідчить, що вдосконалений ВВаПТ характеризується скороченням тривалості виходу на стаціонарний режим порівняно з прототипом (МЗС-320) на 29 %. Ефективність конструктивно-технічного рішення підтверджується зменшенням ваги апарата на 35 %, питомої металоємності на 42 %, тривалості обробки на 12 %. Поверхня теплообміну збільшилась на 12 %.

Література

1. Алабина, Н. М., Дроздова, В. И., Володзько, Г. В. и др. (2006). Плодоовощные консервы профилактического назначения. Пищевая промышленность, 11, 78–79.
2. Виробництво органічної сільгосппродукції та сировини. Агробізнес сьогодні. URL: <http://agro-business.com.ua/agro/u-pravovomu-poli/item/1858-vyrobnytstvo-orhanichnoi-silhospproduktsii-ta-syrovyny.html>
3. Misra, N. N., Koubaa, M., Roohinejad, S., Juliano, P., Alpas, H., Inácio, R. S. et. al. (2017). Landmarks in the historical development of twenty first century

food processing technologies. *Food Research International*, 97, 318–339. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.05.001>

4. Пилипенко, О. Є. (2017). Розвиток харчової промисловості України. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, 23 (3), 15–25.

5. Huang, L., Bai, L., Zhang, X., Gong, S. (2019). Re-understanding the antecedents of functional foods purchase: Mediating effect of purchase attitude and moderating effect of food neophobia. *Food Quality and Preference*, 73, 266–275. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.001>

6. O'Shea, N., Ktenioudaki, A., Smyth, T. P., McLoughlin, P., Doran, L., Auty, M. A. E. et. al. (2015). Physicochemical assessment of two fruit by-products as functional ingredients: Apple and orange pomace. *Journal of Food Engineering*, 153, 89–95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.12.014>

7. Marco, S.-C., Adrien, S., Isabelle, M., Manuel, V.-O., Dominique, P. (2019). Flash Vacuum-Expansion Process: Effect on the Sensory, Color and Texture Attributes of Avocado (*Persea americana*) Puree. *Plant Foods for Human Nutrition*, 74 (3), 370–375. doi: <https://doi.org/10.1007/s11130-019-00749-3>

8. Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S. et. al. (2018). Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (96)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.148443>

9. Habanova, M., Saraiva, J. A., Holovicova, M., Moreira, S. A., Fidalgo, L. G., Haban, M. et. al. (2019). Effect of berries/apple mixed juice consumption on the positive modulation of human lipid profile. *Journal of Functional Foods*, 60, 103417. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.103417>

10. Cherevko, O., Mykhaylov, V., Zagorulko, A., Zahorulko, A. (2018). Improvement of a rotor film device for the production of high-quality multicomponent natural pastes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (92)), 11–17. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126400>

11. Kiptelaya, L., Zagorulko, A., Zagorulko, A. (2015). Improvement of equipment for manufacture of vegetable convenience foods. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (10 (74)), 4–8. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.39455>

12. Boesveldt, S., Bobowski, N., McCrickerd, K., Maître, I., Sulmont-Rossé, C., Forde, C. G. (2018). The changing role of the senses in food choice and food intake across the lifespan. *Food Quality and Preference*, 68, 80–89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.02.004>

13. Burdo, O. G., Burdo, A. K., Sirotyuk, I. V., Pour, D. R. (2017). Technologies of Selective Energy Supply at Evaporation of Food Solutes. *Problemele energeticii regionale*, 1, 100–109. URL: http://journal.ie.asm.md/assets/files/12_01_33_2017.pdf

14. Borchani, M., Masmoudi, M., Ben Amira, A., Abbès, F., Yaich, H., Besbes, S. et. al. (2019). Effect of enzymatic treatment and concentration method on chemical, rheological, microstructure and thermal properties of prickly pear syrup. *LWT*, 113, 108314. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108314>

15. Taskila, S., Ahokas, M., Järvinen, J., Toivanen, J., Tanskanen, J. P. (2017). Concentration and Separation of Active Proteins from Potato Industry Waste Based on Low-Temperature Evaporation and Ethanol Precipitation. *Scientifica*, 2017, 1–6. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5120947>
16. Dolores Alvarez, M., Canet, W. (2013). Time-independent and time-dependent rheological characterization of vegetable-based infant purees. *Journal of Food Engineering*, 114 (4), 449–464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.08.034>
17. Guerrero, S. N., Alzamora, S. M. (1998). Effects of pH, temperature and glucose addition on flow behaviour of fruit purees: II. Peach, papaya and mango purées. *Journal of Food Engineering*, 37 (1), 77–101. doi: [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(98\)00065-x](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(98)00065-x)
18. Ding, Z., Qin, F. G. F., Yuan, J., Huang, S., Jiang, R., Shao, Y. (2019). Concentration of apple juice with an intelligent freeze concentrator. *Journal of Food Engineering*, 256, 61–72. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.03.018>
19. Hobold, G. M., da Silva, A. K. (2019). Visualization-based nucleate boiling heat flux quantification using machine learning. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 134, 511–520. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.12.170>
20. Shydakova-Kamieniuka, E., Novik, A., Zhukov, Y., Matsuk, Y., Zaparenko, A., Babich, P., Oliinyk, S. (2019). Estimation of technological properties of nut meals and their effect on the quality of emulsion for butter biscuits with liquid oils. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (11 (98)), 56–64. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.159983>
21. Samokhvalova, O., Chernikova, Y., Oliinyk, S., Kasabova, K. (2015). The effect of microbial polysaccharides on the properties of wheat flour. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (10 (78)), 11–15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56177>
22. Chen, X., Gao, Z., McFadden, B. R. (2020). Reveal Preference Reversal in Consumer Preference for Sustainable Food Products. *Food Quality and Preference*, 79, 103754. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103754>
23. Загорулько, А. М., Загорулько, О. Є. (2016). Пат. № 108041 UA. Гнучкий плівковий резистивний електронагрівач випромінюючого типу. МПК G05D 23/19, B01D 1/22, H05B 3/36. № u201600827; заявл. 02.20.2016; опубл. 24.06.2016, Бюл. № 12.
24. Пищевое промышленное оборудование. URL: <https://besteq.ru/>
25. Черевко, О. І., Маяк, О. А., Костенко, С. М., Сардаров, А. М. (2019). Експериментальне та імітаційне дослідження теплообміну під час уварювання овочевого соку. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 1 (29), 75–85.