

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

РИБІНА ОЛЬГА БОРИСІВНА

УДК 637.142.2:66.086.4:004.942

**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ
МОЛОЧНОЇ СИРОВАТКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових,
мікробіологічних і фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Бурдо Олег Григорович,
Одеська національна академія
харчових технологій, кафедра
процесів та апаратів, завідувач
кафедри.

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, доцент
Білонога Юрій Львович,
Львівській національній університет
ветеринарної медицини та
біотехнології імені С.З. Гжицького,
кафедра молока і молочних
продуктів, завідувач кафедри;

- кандидат технічних наук, доцент
Бошкова Ірина Леонідівна,
Одеська державна академія холоду,
кафедра тепломасообміну, доцент
кафедри.

Захист відбудеться 30 жовтня 2009 р. о 10.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.01 в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса-39, вул. Канатна, 112 в ауд. А-234.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії харчових технологій за адресою: 65039, м. Одеса-39, вул. Канатна, 112.

Автореферат розісланий 28 вересня 2009 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
д. т. н., професор

К.Г. Іоргачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В епоху світової кризи досить гостро стає питання розробки новітніх високих технологій та нанотехнологій, які можуть дозволити зробити процес обробки харчових продуктів менш енергоємним та ефективним. У харчових виробництвах задачами високих технологій є вплив на природні наномасштабні об'єкти: клітину, пори, капіляри. Реалізація новітніх технологій дозволить отримати принципово нові, неенергоємні харчові продукти, збільшити вилучення цільових компонентів, запровадити ресурсозберігаючі процеси. Перспективним об'єктом для залучення новітніх технологій є молочна сироватка, попит на яку динамічно зростає у різних галузях: в медичній, косметологічній, а також її використовують як харчові добавки для спортсменів. Температура, при якій починається денатурація сироваточних білків, менша, ніж температура пастеризації тепловими методами. Відповідно, зростає зацікавленість виробників сироваточнобілкових препаратів в зниженні температури обробки.

В останній час велика увага приділяється дослідженню застосування мікрохвильового нагріву для пастеризації і стерилізації харчових продуктів. Найбільш активно такі роботи ведуться у США. Військове відомство США фінансує дослідження до застосування мікрохвильового нагрівання для збільшення строків збереження продуктів харчування. Цей напрям розглядається як можлива альтернатива звичайному їх охолодженню.

Слід відмітити, що робіт з мікрохвильової обробки молочної сироватки фактично не існує. Новий метод має багато переваг перед традиційними методами. Він дозволяє пом'якшити параметри пастеризації, а саме обробка продукту може проводитися крізь упаковку або крізь його оболонку. Незважаючи на переваги, промислових застосувань мікрохвильової пастеризації мало. Це пояснюється складністю процесів, що протікають при мікрохвильовому нагріві і залежністю результатів мікрохвильового впливу від великої кількості параметрів. Відповідно, актуальним є побудова моделей процесів, що протікають при мікрохвильовому нагріванні, порівняння між собою різних режимів та визначення впливу окремих факторів на кінцевий результат.

Саме створення аналітичних та експериментальних моделей процесів, що відбуваються при мікрохвильовій обробці рідких продуктів, перевірка цих моделей на молочної сироватці, вибір доцільних режимів буде головним результатом цієї роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота відповідає тематиці № 5/03 – П "Розробка стратегії, принципів та методології удосконалення енерготехнологій АПК", № держреєстрації 0103U003436.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є науково-технічне обґрунтування режимних параметрів процесів та конструктивних характеристик апаратів для комбінованої обробки сироватки в мікрохвильовому полі.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити деякі окремі завдання:

- скласти модель, що дозволяє розраховувати діелектричні характеристики різних харчових продуктів;
- скласти теоретичну математичну модель вибіркового нагрівання. Вивести формули для перегріву мікроорганізмів з урахуванням теплообміну між ними і середовищем;
- провести аналітичні дослідження розподілу мікрохвильового поля при дискретному та безперервному режимах його обробки;
- виготовити експериментальні стенди для дослідження комбінованої обробки сироватки, провести їх тарування. Розробити режими комбінованої обробки нерухомої згущеної сироватки та сироватки, що рухається по трубопроводах під час обробки. Розробити методики і провести комплексні експериментальні дослідження процесу комбінованої обробки в мікрохвильовому полі, встановити вплив режимних і конструктивних параметрів на рівень температури відмирання мікроорганізмів (найменшої температури, при якій кількість загинувших мікроорганізмів дорівнює 100 %);
- дослідити залежність температури відмирання мікроорганізмів від товщини шару та концентрації продукту, що оброблюється, від швидкості протікання по трубопроводу та від форми трубопроводу;
- на підставі отриманих експериментальних даних скласти рівняння в узагальнених змінних, які будуть описувати процес комбінованої обробки сироватки у мікрохвильовому полі;
- розробити конструкції й провести в умовах виробництва випробування лабораторної установки мікрохвильового пастеризатора, провести мікробіологічні дослідження сироватки після її обробки в мікрохвильовому пастеризаторі, встановити доцільні режими його експлуатації за умов економічних витрат і якості продукту.

Об'єкт дослідження – процес комбінованої обробки молочної сироватки з використанням мікрохвильового поля.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів комбінованої обробки мікрохвильовим полем, механізм, кінетика та апарат для комбінованої обробки молочної сироватки в умовах мікрохвильового поля.

Методи дослідження – аналітичні методи з використанням ПЕОМ, методи теорії подібності, теплофізичного експерименту, дослідження з використанням контрольно-

вимірювальної апаратури та мікробіологічні методи.

Наукова новизна отриманих результатів. В роботі сформульовані і доведені нові наукові положення:

- комбінування нестационарної моделі теплопереносу в системі «сироватка – оболонка мікроорганізму – ядро мікроорганізму» при уявленні ядра з зосередженими параметрами та дистрибутивною моделлю електрофізичних властивостей ядра дозволяє визначити ступінь його перегрівання відносно об'єму сироватки, тобто оцінити рівень температури відмирання мікроорганізмів;

- узгодження структурних характеристик потоку з потужністю мікрохвильового поля, тривалістю обробки продукту та його електрофізичними властивостями сприяє зниженню рівня температури відмирання.

В роботі вперше:

- обгрунтовано механізм процесу мікробіологічної стабілізації мікрохвильовим полем для продукту в нерухомому шарі та в потоці;

- заявлено спосіб низькотемпературної пастеризації рідких харчових продуктів;

- розроблено модифіковану дистрибутивну модель визначення діелектричних характеристик різних харчових продуктів;

- визначено розподіл напруженості мікрохвильового поля в камері обробки;

- визначено розподіл температурних полів в продукті при його обробці мікрохвильовим полем;

- розроблено математичну модель процесу комбінованої обробки продукту мікрохвильовим полем при різних варіантах дії поля;

- обгрунтовано структуру рівняння в узагальнених змінних, що встановлює залежність безрозмірного параметру комбінованої обробки від чисел подібності, які враховують конструктивні і режимні параметри процесу;

- отримано залежності температур відмирання від ступені концентрації сироватки, конструктивної форми трубопроводу, об'ємних витрат продукту та потужності мікрохвильового поля;

- розроблено алгоритм розрахунку тривалості обробки рідини до умов мікробіологічної стабілізації в залежності від теплофізичних характеристик продукту, потужності мікрохвильового поля, конструктивних параметрів установки та гідродинамічних режимів продукту;

- встановлено експериментально та науково обгрунтовано режими комбінованої обробки сироватки та конструктивні і теплотехнічні характеристики пастеризаційної установки.

Практичне значення отриманих результатів. В результаті комплексних аналітичних і експериментальних досліджень розроблено технологічні режими процесів та схеми апаратів для мікрохвильової комбінованої обробки концентрованої (сгущеної) та не сгущеної сироватки, які забезпечують м'які режими і підвищують якість обробки продукту. Технології рекомендовані для підприємств молочної промисловості. Проведено випробування апарату в умовах виробництва на «Салюс» ТОВ «Агроком».

Особистий внесок здобувача. В процесі виконання дисертаційної роботи автором самостійно виконано огляд наукової літератури за темою дослідження. Разом з науковим керівником сформульовані наукові положення з комбінованої обробки сироватки мікрохвильовим полем і програма експериментальних досліджень, поставлені задачі математичного моделювання мікрохвильової комбінованої обробки рідких харчових продуктів. Дисертантом самостійно виконані аналітичні та експериментальні дослідження за темою дисертації, науковий аналіз, математична обробка і узагальнення їх результатів, формулювання висновків та пропозицій.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались на наукових конференціях ОНАХТ у 2005...2009 рр.; Міжнародній науково-практичній конференції «Пищевые технологии – 2005» (Одеса, 2005); XI Міжнародній науковій конференції «Совершенствование процессов и оборудования пищевых и химических производств» (Одеса, 2006); на Міжнародній науково-практичній конференції «Повышение энергетической эффективности пищевых и химических производств» (Одесса, 2007); «Обладнання та технології харчових виробництв» (Донецьк, 2005); III Міжнародній конференції «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Варна, 2007); конференції «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі» (Харків, 2007); V Міжнародній конференції «Проблемы промышленной теплотехники» (Київ, 2007).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи, одержані результати та рекомендації з їх використання повністю відображені у 21 друкованій праці, з них 12 публікацій у фахових виданнях, 3 деклараційні патенти України на корисну модель, 1 стаття у науковому виданні та тези 5-ти доповідей на науково-технічних та міжнародних конференціях.

Структура та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, який включає 170 найменувань (з них 94 іноземних) і 6 додатків (на 24 сторінках). Матеріал дисертації викладено на 188 сторінках, містить 68 рисунків (26 сторінок), 22 таблиці (18 сторінок).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульовані мета і завдання досліджень, наукові положення, показана наукова новизна й практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, апробація результатів, публікації за темою дисертації.

В першому розділі «Склад, використання та методи обробки молочної сироватки» на підставі аналізу літературного огляду було виявлено, що сироватка, як продукт, має високу цінність. Самий цінний її компонент – сироваточні білки – використовується в медицині, косметології і т. і. Їх денатурація починається при температурі, нижчій, ніж температура пастеризації. Сам процес теплової пастеризації молочної сироватки має свої недоліки, такі як, висока температура або тривалість. При пастеризації з використанням енергії мікрохвильового поля температура і тривалість процесу менші, ніж при теплових методах. Також було виявлено, що мікрохвильове поле може чинити не тільки тепловий вплив на мікроорганізми, що в ньому знаходяться, воно може діяти безпосередньо. Разом з цим єдиної теорії мікрохвильової пастеризації не існує, так як це дуже складний процес. В Росії питаннями мікрохвильової обробки харчових продуктів займаються професор Рогов І.А., професор Остапенков А.М. та їх учні. В Україні дослідження з цієї тематики проводять вчені школи професора Бурдо О.Г., професора Калініна Л.Г.

У другому розділі «Методи дослідження процесів комбінованої обробки» аналітичними методами проведені дослідження процесів вибіркового нагрівання мікроорганізмів в умовах електромагнітного поля. Розглянуто вплив теплообміну між мікроорганізмами та оточуючим їх середовищем на величину перегріву мікроорганізмів. Було розглянуто два види теплообміну: конвективний (за рівнянням Ньютона – Ріхмана) та теплообмін за рівнянням теплопровідності. У випадку теплообміну за рівнянням Ньютона – Ріхмана було отримано диференційне рівняння для перегріву:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = A - \alpha \cdot B \cdot \theta, \quad (1)$$

де θ – перегрів мікроорганізмів, °С; α – коефіцієнт температуропровідності продукту, м²/с.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0 \cdot E_2^2 \left(\frac{\varepsilon_1'' \cdot \gamma^2}{c_1 \cdot \rho_1} - \frac{\varepsilon_2''}{c_2 \cdot \rho_2} \right) = p_2 \left(\frac{\varepsilon_1'' \cdot \gamma^2}{\varepsilon_2'' \cdot c_1 \cdot \rho_1} - \frac{1}{c_2 \cdot \rho_2} \right) \quad - \text{ величина, яка}$$

характеризує потужність електромагнітного поля (де f – частота поля, Гц;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ – електрична стала, Ф/м; E – напруженість поля у середовищі, В/м;
 $\varepsilon_1'', \varepsilon_2''$ – відповідно дійсна та уявна складова діелектричної проникності для мікроорганізму та оточуючого середовища; γ – коефіцієнт, що залежить від геометричної форми мікроорганізму; C_i – питома теплоємність при сталому об'ємі, Дж/кг·К; ρ_i – густина мікроорганізмів і середовища, кг/м³.

$$B = F \left(\frac{1}{\chi_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + \frac{1}{\chi_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2} \right),$$

де F – площа поверхні теплообміну, м²; χ_i – відношення об'єму фази i до повного об'єму діелектрика.

Рішення рівняння (1) отримано у вигляді

$$\theta(\tau) = \int_0^t A(\tilde{\tau}) \cdot \exp[-\alpha \cdot B(\tau - \tilde{\tau})] d\tilde{\tau} \quad (2)$$

У випадку теплообміну за моделлю теплопровідності Фур'є розв'язувалося рівняння теплопровідності

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_i}{\partial \tau} = a_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \theta_i}{\partial r} \right) + A_i \\ \text{де } 0 \leq r < R \text{ для } i = 1; \quad R \leq r < \infty \text{ для } i = 2 \\ A_1 = A \quad \text{та} \quad A_2 = 0 \\ \theta_i(r, 0) = 0; \quad \theta_2(\infty, \tau) = 0; \quad \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

На межі між включенням і середовищем виконуються граничні умови IV роду:

$$\theta_1(R, \tau) = \theta_2(R, \tau); \quad \lambda_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \Big|_{r=R} \quad (4)$$

В (4) R – радіус включення, м; λ_i – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);
 r – радіальна координата, м.

Для обох випадків теплообміну розглядалося два режими: безперервний та імпульсний. Показано, що при зменшенні тривалості імпульсу зменшується теплообмін між мікроорганізмом і середовищем і відповідно перегрів зростає. Якщо $Fo < 0,1$, то теплообмін не перевищує 5 % від повної енергії, що виділяється в мікроорганізмі.

Було розглянуто вплив оболонки мікроорганізмів на їх перегрів. Показано, що додатковий перегрів, обумовлений наявністю оболонки, визначається формулою:

$$\Delta \theta_{cm} = A \cdot \frac{h \cdot R}{3 \cdot a_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \quad (5)$$

де h – товщина оболонки, м; λ_0 – коефіцієнт теплопровідності оболонки.

Для застосування математичних моделей для молочної сироватки необхідно знати значення її діелектричних сталих ε' , ε'' . Відповідні дані в літературі відсутні. В роботі була модифікована дистрибутивна модель і за допомогою модифікованої моделі знайдені значення $\varepsilon' = 73,1$ та $\varepsilon'' = 15,8$ для молочної сироватки.

Ефективність процесу мікрохвильової обробки суттєво залежить від однорідності розподілу поля і температури всередині продукту. В роботі проведені розрахунки, які показали, що розподіл поля в продукті залежить від товщини останнього. При товщинах, значно більших глибини проникнення поля d (для сироватки $d=20$ мм) поле проникає тільки в поверхневі шари продукту (рис. 1). При товщинах, значно більших d , поле пронизує весь продукт, розподіляючись в ньому приблизно рівномірно (рис. 2). Нарешті, якщо товщина продукту кратна половині довжини хвилі (для сироватки довжина хвилі $\lambda=14$ мм) виникають стоячі хвилі (рис.3). Вони характеризуються чергуванням максимумів та мінімумів інтенсивності поля.

Розподіл інтенсивності поля залежить від об'єму, форми продукту та його положення в камері. Аналіз показав, що концентрація поля має місце поблизу гострих кутів або загострень на поверхні продукту. Крім того, інтенсивність поля в продукті збільшується, якщо об'єм продукту зменшується.

Криві, що описують розподіл температур в продукті (рис. 4), були отримані в результаті розв'язання рівняння теплопровідності з внутрішніми джерелами теплоти і відповідними крайовими умовами. Якщо тривалість обробки невеликий (відповідно швидкість нагрівання висока), температурний профіль приблизно повторює розподіл поля в продукті. Якщо тривалість обробки велика (швидкість нагріву мала або після нагрівання застосовується витримка продукту), температура всередині його вирівнюється.

В усіх випадках температура на поверхні продукту дещо нижча, ніж у його середині (при звичайному нагріванні температура на поверхні завжди більша, ніж у середині).

При експериментальному моделюванні процесів використано загальноприйняті в техніці теплофізичного експерименту методи вимірювання температур, витрат продукту

(ваговий метод), теплових балансів (метод ентальпій).

Для визначення кількості мікроорганізмів використовували метод посіву на поживне середовище – м'ясопептонний та сусло агар з подальшим підрахунком в препараті їх кількості за допомогою камери Горяєва, а їх життєздатність спостерігали в “роздавленій краплі”.

У **третьому розділі** «Дослідження впливу мікрохвильової обробки молочної сироватки на відмирання мікроорганізмів та їх узагальнення» наведені результати експериментальних досліджень процесу комбінованої обробки сироватки в умовах мікрохвильового поля. В результаті експериментів необхідно було підтвердити (або скасувати) запропоноване наукове положення про те, що узгодження структурних характеристик потоку з потужністю мікрохвильового поля, тривалістю обробки продукту та його електрофізичними властивостями сприяє зниженню рівня температури відмирання. Також наведено модель у критеріальній формі для режимних розрахунків пристрою для комбінованої обробки сироватки.

Дослідження процесу комбінованої обробки проводились на двох стендах (№ 1 і № 2). Перший – термостат, усередині якого розміщувався продукт. Вимір температури проводився хромель-копелевою термопарою в комплекті із цифровим мікрровольтметром РТ-0193. На стенді № 1 встановлено, що температура відмирання складала 77...79 °C, що узгоджується з літературними даними.

Другий стенд (рис.5) – камера обробки (1), в якій розміщувалися ємність з сироваткою (для дискретного режиму її обробки) або трубопроводи, по яких протікав продукт, що підлягав комбінованій обробці (для безперервного режиму) (2), блок електроніки (3), блок керування (4). Витрати продукту визначалися ваговим методом. На виході з камери всередині злиального трубопроводу (7) розміщувалася мідь-константанова термопара, показання якої реєструвалося цифровим мікрровольтметром Щ-300 (8). Система забезпечувала вимір температури з точністю 0,2 °C. Середньоквадратична похибка експерименту не перевищувала 4 %. Трубопроводи, по яких протікала сироватка, були двох видів: прямі та у вигляді змійовиків.

Діапазон першої серії експериментальних досліджень (для дискретного режиму обробки) наведено в табл. 1. Визначався вплив на рівень температури відмирання мікроорганізмів потужності мікрохвильового поля, концентрації сухих речовин, товщини шару продукту.

Вплив потужності поля характеризує залежність на рис. 6.

Таблиця 1

Діапазон експериментальних досліджень

для дискретного режиму обробки.

	min	max
U, %	6	50
h, мм	0,2	100
t, °C	42	62
φ, с	2	300

Примітки: U – концентрація сухих ре-

човин, h – товщина шару, t – температура,
φ – час обробки.

Результати досліджень вказують на збільшення відсотка загиблих мікроорганізмів із зменшенням товщини шару продукту для всіх досліджених концентрацій сухих речовин (рис. 7).

При другій серії досліджень (для безперервного режиму обробки в прямих трубопроводах) встановлено, що температура відмирання зменшується зі зменшенням діаметру трубопроводу та при збільшенні швидкості руху продукту (рис. 8, 9, 10).

Дослідження залежності температури відмирання від діаметрів трубопроводів у вигляді змійовика (рис. 11, 12) показали, що доцільним є діаметр змійовика 8 мм. Подальше зниження його величини не давало зменшення рівня температури відмирання, а призводило до збільшення гідравлічного опору.

За результатами експериментальних досліджень було виявлено, що на рівень температури відмирання впливають концентрація сухих речовин продукту (температура знижується зі збільшенням концентрації); товщина шару продукту (температура знижується при зменшенні товщини шару); швидкість протікання (температура знижується при збільшенні швидкості) та форма трубопроводу (температура відмирання була найменшою для трубопроводу у вигляді змійовика при інших рівних умовах).

Узагальнення експериментальних досліджень було проведено у критеріальній формі. Так як на процес комбінованої обробки в умовах мікрохвильового поля мають вплив потужність поля, тривалість обробки, концентрація сухих речовин (при дискретній обробці), швидкість протікання продукту та геометрична форма трубопроводу (при безперервній обробці), то рівняння в узагальнених змінних повинні мати вигляд

$$B = \frac{N_{yb}}{N_o}$$

залежності безрозмірного параметра мікрохвильової обробки () від традиційних

чисел $Fo = \frac{a\tau}{d^2}$), $Re = \frac{d \cdot V}{\nu}$) та безрозмірного вологовмісту продукту u , числа

енергетичного впливу $Bu = \frac{c \cdot \Delta t}{u \cdot r}$) і параметра, що відповідає за геометрію

трубопроводу $\left(1 + \frac{d}{D} \right)$. В наданих вище рівняннях r – питома теплота пароутворення,

Дж/кг; Δt – різниця між кінцевою та початковою температурою продукту, °C; $N_{уб}$ –

кількість загиблених мікроорганізмів; N_o – початкова кількість мікроорганізмів.

Рівняння для дискретного режиму обробки має форму

$$B = 5900 \cdot Bu^{2,9} \cdot Fo^{0,2} \cdot u^{-0,74} \quad (6)$$

та для безперервного режиму обробки

$$B = 3350 \cdot Bu^{2,9} \cdot u^{-0,74} \cdot Fo^{0,25} \cdot Re^{0,15} \cdot \left(1 + \frac{d}{D} \right)^{1,25} \quad (7)$$

Співвідношення (6) та (7) використовувались для проектування та оптимізації мікрохвильових пристроїв для комбінованої обробки.

У розділі 4 «Інженерні методи розрахунку електромагнітних пастеризаторів» проводиться розрахунок та оптимізація запропонованої установки для комбінованої обробки сироватки в умовах електромагнітного поля.

За допомогою алгоритму, в якому задавалися початкові параметри продукту (питома теплоємність, густина, концентрація, коефіцієнти температуропровідності та пароутворення), отримували значення режимних параметрів (товщини шару продукту, тривалості обробки, температури відмирання, значення питомих витрат та потужності), проводився розрахунок апарату для комбінованої обробки концентрованої сироватки. Результати отримані у вигляді номограм (рис. 13, 14, 15).

Аналогічно розраховувався апарат для обробки сироватки у потоці. Принципова різниця методик розрахунку пастеризаційно-охолоджувальної установки з використанням енергії електромагнітного поля в порівнянні з розрахунком існуючої пастеризаційно-охолоджувальної установки полягає у розрахунку потужності, що витрачається, завдяки зниженню температури обробки у секції пастеризації, у розрахунку витрат охолоджуючої води. В апараті, що проектується, відсутня секція витримки продукту.

В розділі проводився розрахунок конструктивних параметрів установки, теплових

навантажень, витрат тепло- та холодоносіїв, коштів енергії на пастеризацію сироватки, гідравлічні розрахунки. Також проводився розрахунок економічної ефективності та ціни установки.

В результаті розроблено експериментальну установку для комбінованої обробки сироватки електромагнітним полем. Випробування установки підтвердили коректність інженерної методики, яку було використано для порівняння мікрохвильового пастеризатора (МХП) з пастеризаційно-охолоджувальною установкою ОКЛ (табл. 2).

Таблиця 2

Техніко-економічна характеристика замінюемого та впроваджуемого обладнання

	Продуктивність, л/г	Температура пастеризації, °C	Витримка при температурі пастеризації, с	Витрати артезіанської води, л/г	Витрати льодяної води, л/г	Витрати гарячої води, л/г
ОКЛ	4000	72	20	9750	8640	10800
МХП	4000	42	-	5832	8640	-

Загальна економія за рік на запропонованій установці в порівнянні з установкою ОКЛ складає 280872 грн. Термін окупності запропонованої установки складає приблизно 1 рік.

ВИСНОВКИ

1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволяють обґрунтувати режими процесів та конструктивні характеристики апаратів для комбінованої обробки сироватки мікрохвильовим полем. Результати аналітичного дослідження підтверджуються результатами експериментів.

2. Запропоновано модифіковану дистрибутивну модель, за допомогою якої були розраховані значення діелектричних характеристик молочної сироватки.

3. Виведено формули для перегріву мікроорганізмів внаслідок вибіркового нагріву при різних умовах теплообміну на поверхні мікроорганізм – середовище. Знайдені умови ($F_0 < 0,1$), при яких теплообміном між мікроорганізмами та середовищем можна знехтувати.

4. Встановлено, що поле і температура розподіляються в продукті рівномірно, якщо його товщина є значно меншою ніж глибина проникнення поля у продукт. Для молочної сироватки товщина повинна бути меншою 6 мм. При зменшенні діаметра трубопроводу

інтенсивність поля і, відповідно, швидкість нагріву збільшуються.

5. Експериментально встановлено, що відсоток загиблих мікроорганізмів при дискретному режимі обробки залежить від (в порядку зменшення впливу) температури, концентрації сухих речовин, тривалості обробки і товщини шару продукту. При безперервному режимі до цих параметрів слід додати швидкість протікання, діаметр трубопроводу та його геометричну форму. Температура відмирання для мікроорганізмів *Saccharomycetes cerevisiae* залежить від умов мікрохвильового нагрівання і складає 42...55 °С. Вона знижується зі збільшенням концентрації, при зменшенні товщини шару, при збільшенні швидкості протікання. Також вона залежить від форми трубопроводу.

6. Виведено критеріальні рівняння для безперервного та дискретного режимів обробки, які узагальнюють експериментальні залежності між головними параметрами мікрохвильової обробки сироватки. Вони мають вигляд залежності безрозмірного параметра комбінованої обробки В від чисел Фур'є, Рейнольдса, числа енергетичного впливу та параметричних комплексів, які відповідають за вологовміст та геометричні параметри змішувача.

7. Економічний ефект від впровадження нового способу комбінованої обробки молочної сироватки на промисловій установці продуктивністю 4000 л/г очікується 280872 грн за рік. Строк окупності установки складає приблизно 1 рік.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Бурдо О.Г. Дослідження процесів низькотемпературної пастеризації / О.Г. Бурдо, О.Б. Рибіна // Обладнання та технології харчових виробництв. Тематичний збірник наукових праць, Донецьк-2005. -Вип. 13, Том 2. -С. 133-140.

Особистий внесок здобувача: складення моделей вибіркового нагрівання, підготовка матеріалів до публікації.

2. Бурдо О.Г. Тепловые режимы при избирательном микроволновом нагреве ди-электриков / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2006. -Вип. 28, Том 2. -С. 256-265.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичного моделювання, підготовка матеріалів до публікації.

3. Бурдо О.Г. Перспективи низькотемпературної стерилізації харчових продуктів / О.Г. Бурдо, О.Ф. Терзман, О.Б. Рибіна // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2006. -Вип. 28, Том 2. -С. 83-88.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

4. Бурдо О.Г. Энергетическая эффективность пищевых нанотехнологий / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина, А.С. Сталымбовская // Інтегровані технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-практичний журнал.-Харків: НТУ "ХПІ". -2006. -№ 2. -С. 7–11.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичного моделювання, розробка режимів, підготовка матеріалів до публікації.

5. Бурдо О.Г. Дослідження процесів мікрохвильової стерилізації та пастеризації / О.Г. Бурдо, О.Б. Рибіна // Зб. наук. праць «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі», Харків-2006. -Вип. 1 (3). -С. 203-210.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичного моделювання, розробка режимів, підготовка матеріалів до публікації.

6. Бурдо О.Г. Теплові режими при вибіркового нагріванні у процесах пастеризації / О.Г. Бурдо, О.Б. Рибіна // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2007. -Вип. 31, Том 2. -С. 83-88.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

7. Бурдо О.Г. Теоретичне моделювання та експериментальне дослідження процесу пастеризації електромагнітним полем. / О.Г. Бурдо, О.Б. Рибіна // Збірник наукових праць «Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі», Харків-2007. -Вип. 1 (5). -С. 306-314.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

8. Бурдо О.Г. Математическое моделирование процессов низкотемпературной пастеризации / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2007. -Вип. 30, Том 1. -С. 54-57.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

9. Рыбина О.Б. Экспериментальные исследования процесса пастеризации в электромагнитном поле / О.Б. Рыбина, Е.Ф. Терзезман // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2007. -Вип. 30, Том 1. -С. 149-154.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

10. Рыбина О.Б. Инженерная методика расчета микроволнового нанопастеризатора сгущенных растворов / О.Б. Рыбина // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2008. -Вип. 32. -С. 204-208.

Особистий внесок здобувача: розрахунок мікрохвильового пастеризатору, підготовка матеріалів до публікації.

11. Бурдо О.Г. Инженерная методика расчета микроволнового нанопастеризатора / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // «Наукові праці» ОНАХТ, Одеса-2008. -Вип. 33. -С. 78-82.

Особистий внесок здобувача: розрахунок мікрохвильового пастеризатору, підготовка матеріалів до публікації.

12. Бурдо О.Г. Применение методов теории подобия в пастеризации пищевых продуктов / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // Збірник наукових праць Луганського аграрного національного університету. Серія: технічні науки, Луганськ-2008. -№ 87. -С. 305-310.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

13. Патент на корисну модель 26425 Україна, МПК A23C 3/00. Спосіб пастеризації рідких харчових продуктів / О.Г.Бурдо, О.Б.Рибіна. -№ у 2007 03090; заявл. 23.03.2007; опубл. 25.09.2007, Бюл. № 15.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

14. Патент на корисну модель 35815 Україна, МПК A23L 3/32. Пристрій для стерилізації та пастеризації рідких харчових продуктів / О.Г.Бурдо, С.В.Семков, О.Б.Рибіна (Україна). -№ у 2008 04319; заявл.07.04.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

15. Патент на корисну модель 35816 Україна, МПК A23C 3/00. Спосіб пастеризації рідких харчових продуктів./ О.Г.Бурдо, С.В.Семков, О.Б.Рибіна (Україна). -№ у 2008 04321; заявл.07.04.2008; опубл. 10.10.2008, Бюл. № 19.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

16. Бурдо О.Г. Исследования низкотемпературной пастеризации молочных продуктов / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина, Е.Ф. Терземан // Стратегия качества в промышленности и образовании: материалы III Международной конференции, Варна, Болгария, 1-8 июня 2007г. -Том 1. -С. 447-449.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

17. Бурдо О.Г. Наномасштабные процессы в пищевых энерготехнологиях / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина, А.С. Сталимбовская // V Международная конференция «Проблемы промышленной теплотехники», Институт технической теплофизики: тезисы докладов, Киев, 22-26 мая 2007г., -К., 2007. -С. 176-178.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних

досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

18. Burdo O. G . , Nanoscale processes in food energotechnologies / O. G. Burdo, O.B. Rybina, A .S. Stalimbovskaya // V-th international conferense «Problems of industrial heat engineering»: The Abstracts , Kyiv, May 22–26 2007. -К., 2007. -Р. 161-162.

Особистий внесок здобувача: проведення аналітичних та експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

19. Бурдо О.Г. Перспективи низькотемпературної пастеризації молочних продуктів / О.Г. Бурдо, О.Б. Рибіна, О.Ф. Терземан // Міжнародна науково-практична конф. «Харчові технології – 2005» ОНАХТ: тези доповідей. -С. 108.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

20. Рыбина О.Б. Экспериментальные исследования низкотемпературной стерилизации молочных продуктов./ О.Б Рыбина, Е.Ф. Терземан, С.А. Малашевич // II Міжнародна науково-практична конференція “Харчові технології –2006”: тези доповідей. -С. 96.

Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень, їх узагальнення, підготовка матеріалів до публікації.

21. Бурдо О.Г., Применение методов теории подобия для решения задач нанопастеризации / О.Г. Бурдо, О.Б. Рыбина // II Міжнародна науково-практична конференція “Харчові технології – 2006”: тези доповідей. -С. 66.

Особистий внесок здобувача: складення критеріальних рівнянь, підготовка матеріалів до публікації.

АНОТАЦІЯ

Рибіна О.Б. «Моделювання процесів комбінованої обробки молочної сироватки електромагнітним полем». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв, Одеська національна академія харчових технологій, Міністерство освіти і науки України, Одеса, 2009.

Дисертація присвячена дослідженню мікрохвильової обробки рідких харчових продуктів. Показано, що температури відмирання мікроорганізмів при мікрохвильовій обробці молочної сироватки менші, ніж при звичайному нагріванні. Одною з причин цього може бути вибіркове нагрівання. Розглянуто різні моделі вибіркового нагрівання і виведені формули для перегріву мікроорганізмів. Другою ймовірною причиною є

комбінована дія нагрівання і електромагнітного поля. В роботі отримані формули для розподілу поля і температури в продукті, проаналізовано вплив на нього складу, форми і розмірів продукту. Знайдені умови, при яких розподіл поля і температур стає практично рівномірним. За допомогою модифікованої дистрибутивної моделі отримані значення діелектричних сталих для молочної сироватки. Експериментально досліджено залежність кількості загиблих мікроорганізмів від температури, концентрації сухих речовин, тривалості обробки, товщини шару (діаметру трубопроводу), швидкості руху. Доведено, що найбільший вплив на відмирання мікроорганізмів має температура. Наступними за ступенем впливу йдуть концентрація сухих речовин, тривалість обробки, товщина продукту і його швидкість. Розраховано мікрохвильовий пастеризатор для обробки молочної сироватки.

Ключові слова: моделювання, комбінована обробка, молочна сироватка, мікрохвильове поле, селективне нагрівання.

АННОТАЦИЯ

Рыбина О.Б. «Моделирование процессов комбинированной обработки молочной сыворотки электромагнитным полем». – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.18.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств, Одесская национальная академия пищевых технологий, Министерство образования и науки Украины, Одесса, 2009.

Диссертация посвящена исследованию микроволновой обработки жидких пищевых продуктов, и, в частности, молочной сыворотки, с целью уничтожения находящихся в них микроорганизмов. Показано, что температуры отмирания при микроволновом воздействии оказываются ниже, чем при традиционном нагреве.

Одной из причин этого может являться избирательный нагрев, заключающийся в том, что благодаря различию в электромагнитных свойствах микроорганизмы могут нагреваться сильнее, чем окружающая их среда. В работе предложено несколько математических моделей избирательного нагрева: адиабатический нагрев, нагрев с теплообменом по уравнению Ньютона-Рихмана, теплообмен по уравнению Фурье, теплообмен при наличии термоизолирующей оболочки на поверхности микроорганизма. Рассмотрены случаи непрерывной и импульсной подачи энергии. В каждом случае получены формулы для величины перегрева. Выведено условие, при котором импульсный нагрев можно считать адиабатическим.

Другой причиной, в связи с которой температура отмирания уменьшается, может

являться комбинированное действие на микроорганизм температуры и электромагнитного поля. Соответственно, существенным является равномерность распределения поля и температур в продукте. Теоретически проанализировано влияние различных факторов на равномерность распределения поля и температур в продукте. Показано, что основным параметром является толщина продукта. При толщинах, больших глубины проникновения поля, во внутренние слои поле не проникает, концентрируясь в приповерхностных слоях. Кроме того, поле концентрируется в местах резкого изменения формы поверхности – угловых точках и заострениях. Показано, что интенсивность поля, при прочих равных условиях, возрастает обратно пропорционально площади поперечного сечения трубопровода, по которому течет продукт. Следовательно, уменьшая диаметр трубопровода (или толщину слоя для неподвижного продукта), можно увеличить интенсивность поля в продукте, не увеличивая мощность, подаваемую в рабочую камеру.

Получены кривые для распределения температур в продукте. Показано, что при микроволновом нагреве молочной сыворотки (или молока), в стационарном режиме температура распределяется в продукте приблизительно равномерно, несколько уменьшаясь вблизи поверхности продукта. Отсюда сделаны два практически важных вывода. Во-первых, если поле во внутренние части продукта не проникает, то эти части подвергаются воздействию только температуры, в то время как наружные части подвергаются воздействию и температуры, и поля. Соответственно, уничтожение микроорганизмов во внешних частях продукта должно проходить лучше, чем во внутренних. Во-вторых, если продукт течет по трубопроводу, то скорость внутренних слоев больше, чем внешних. И внутренние слои, по сравнению с внешними, находятся при более высокой температуре, однако время их обработки меньше. Это способствует более эффективной обработке всей массы продукта.

Полученные теоретические результаты применены к молочной сыворотке. В литературе отсутствуют значения диэлектрической постоянной и фактора потерь для молочной сыворотки. Была модифицирована дистрибутивная модель для определения диэлектрических констант, после чего были рассчитаны значения ϵ' и ϵ'' для сыворотки. Это позволило определить основные параметры, характеризующие поведение электромагнитного поля в сыворотке – длину волны, глубину проникновения и коэффициент отражения от границы сыворотка – воздух.

Экспериментально была исследована зависимость количества погибших микроорганизмов от разных параметров, характеризующих процесс – температуры, концентрации сухих веществ, времени, скорости нагрева, толщины обрабатываемого слоя. При движении сыворотки по трубопроводу к этим параметрам добавляются скорость, диаметр трубо-

провода и его геометрическая форма. Опыты показали, что наиболее сильное влияние на процесс микроволновой обработки оказывает температура. Затем в порядке убывания следуют влагосодержание, время, толщина слоя (диаметр трубопровода), форма трубопровода, скорость протекания.

Исследовалась зависимость температуры отмирания от условий микроволнового нагрева сыворотки. Оказалось, что с уменьшением толщины слоя (диаметра трубопровода) температура отмирания уменьшается, с уменьшением концентрации сухих веществ растёт, с увеличением времени обработки и скорости температура отмирания понижается. Количество погибших микроорганизмов достигало 100 % при температурах 42...55 °С в зависимости от диаметра трубопровода, концентрации сухих веществ, времени обработки и скорости продукта.

Полученные экспериментальные результаты были представлены в обобщенном виде в форме критериальных уравнений. Одно – для дискретного режима – представляет собой зависимость безразмерного параметра микроволновой обработки B от числа энергетического влияния B_u , безразмерного влагосодержания u и числа Фурье Fo . Во второе уравнение (для непрерывного режима), кроме вышеперечисленных чисел подобия вошли также число Рейнольдса Re и безразмерный комплекс, характеризующий геометрическую форму трубопровода.

На основании полученных теоретических и экспериментальных данных разработана лабораторная экспериментальная установка для комбинированной обработки молочной сыворотки, которая прошла апробацию в производственных условиях. Там же были проведены микробиологические исследования, свидетельствующие о том, что сыворотка, обработанная в микроволновой экспериментальной установке не отличается от сыворотки, обработанной в пастеризационно-охладительной установке ОКЛ.

В работе приводится расчет микроволнового пастеризатора производительностью 4000 л/час. По результатам расчета было получено, что срок окупаемости такой установки ≈ 1 год, а ожидаемый экономический эффект составляет 280872 грн. в год.

Ключевые слова: моделирование, комбинированная обработка, молочная сыворотка, микроволновое поле, селективный нагрев.

ANNOTATION

Rybina O.B. Simulating of processes of combined treatment of whey by electromagnetic field.

The dissertation for obtaining of scientific degree of Candidate of the Technical Science on the specialty 05.18.12 – Processes and Inventory of Food, Microbiologic and Pharmaceutical

Engineering, Odessa National Academy of Food Technologies of the Ministry of education and science of Ukraine, Odessa, 2009.

It is proved for whey that temperatures causing 100 % - destruction in microwave heating are lower than those are in conventional heating. One of the likely reasons for this is selective heating. Different models of selective heating are considered. Equations for microorganisms overheating are deduced in every case. Another likely reason is the combined action of microwave electromagnetic field and high temperatures. Formulas for field and temperature distributions in the interior of dielectric product (whey) have been obtained. The influence of the composition, shape and size of the product on those distributions are analyzed. The conditions for uniformity of field and temperature are derived. Using modified distributive model, dielectric constants of whey are calculated. Experimentally, it has been examined the dependence of inactivation on temperature, the concentration of dry components, time, product thickness in discrete treatment and in addition on speed and tube diameter in continuous treatment. The maximum effect on microorganism destruction has temperature. Then follows the concentration of dry substance, time and thickness. 100 % - death temperature decreases when concentration, time and speed rise but thickness (diameter) grows smaller.

Key words: simulating, models, microorganism, whey, microwave, electromagnetic field, combined action, selective heating.

Підписано до друку 25.09.2009 р. Формат 60х90/16.

Умовн. друк. арк. 0,9. Тираж 100 прим. Зам. № 10

Видавничий центр Одеської національної академії харчових технологій

65039, м. Одеса, вул. Канатна, 112