УДК 637.127.6

НАДВИСОКОЧАСТОТНИЙ ПРИСТРІЙ ПАСТЕРИЗАЦІЇ ТА СТЕРИЛІЗАЦІЇ РІДКИХ РЕЧОВИН

Ю. К. Сидорук, А. М. Нікітенко

Білоцерківський національний аграрний університет

Наведені обґрунтування доцільності застосування енергії електромагнітних хвиль надвисоких частот (НВЧ) для пастеризації і стерилізації рідких продуктів і середовищ. Розглянуто режими роботи пристрою пастеризації і необхідні концентрації енергії в зоні взаємодії рідини з електромагнітним полем. Запропоновано конструкцію пристрою взаємодії рідини з електромагнітним полем. Наведено результати вимірювань КСХ і коефіцієнта передачі.

Ключові слова: НАДВИСОКОЧАСТОТНЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ (НЕВ), ПАСТЕРИЗАЦІЯ, СТЕРИЛІЗАЦІЯ, МАГНЕТРОН, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Незважаючи на суб'єктивні причини, через які НВЧ-пастеризація (стерилізація) не набула широкого застосування, зацікавленість у розвитку цього напряму досліджень не зникає. Пояснюється це можливістю створити в НВЧ-пристроях енергетичний режим, який неможливий у традиційних теплових пастеризаторах, тобто забезпечити високу концентрацію енергії в малих об'ємах і надзвичайно короткий час дії на об'єкт. Крім того, вплив НВЧ-енергії на мікроорганізми має особливу специфіку, яка полягає в розігріванні мікроорганізму з середини і одночасній силовій дії на клітинні мембрани і на весь організм, що, в результаті, приводить до його швидкого руйнування. Що вища концентрація енергії, то швидше руйнуються і гинуть мікроорганізми. Важливо зазначити, що існує нижня межа щільності енергії в активній зоні, за якої згаданий вище процес реалізується. Ця межа становить 680–700 Вт/см^3.

Під час розробки НВЧ-пастеризаторів необхідно врахувати, що щільність енергії в активній зоні пристрою взаємодії НВЧ-поля з рідиною повинна бути не менше зазначеної вище і забезпечити таку щільність необхідно джерелами НВЧ-енергії, потужність яких не перевищує 2000 Вт, оскільки саме такі промислові джерела, магнетрони випускаються серійно, мають високу надійність в роботі, досить довговічні, недорогі і не потребують складних систем живлення та обслуговування. Необхідно також врахувати, що магнетрони досить чутливі до коефіцієнта стоячої хвилі (КСХ), і при КСХ $\geq$ 1,2 енергія, що генерується магнетроном може суттєво зменшуватися, тобто магнетрон потребує ретельного узгодження його з лінією передачі і лінії з навантаженням.

Метою роботи був пошук високоефективних, енергозберігаючих і таких, які не впливають на якість продукції, технологій пастеризації коров'ячого молока, стерилізації та знезараження рідких продуктів, стічної води і розрідженого мулу.

Матеріали і методи

При виконанні роботи були використані загальноприйняті методики (густина молока, кислотність, кількість соматичних клітин, вміст жиру, молочного цукру, білка, сухої речовини тощо).

Порівняння процесів пастеризації в теплових і НВЧ-пастеризаторах

У молоці, що надходить безпосередньо з ферм, у більшості випадків налічується близько 500 000 бактерій в 1 мл. Традиційною тепловою пастеризацією (у трубчатих,

пластинчатих пастеризаторах) знищується до 90 % бактерій. Залишається у молоці приблизно 500 000 бактерій в 1 мл. Для високоякісного молока, особливо того, що призначено для дитячого харчування, залишкова кількість мікроорганізмів не повинна перевищувати 100–200 в 1 мл. Швидкість нагрівання рідини в згаданих вище пастеризаторах не перевищує 1–4 ºС за секунду. Щоб знищити більше 90 % бактерій за такої швидкості нагрівання, необхідна тривала, декілька хвилин, витримка за температури рідини близько 100 °С (зазвичай 94–96 °С). Такий режим негативно впливає на споживчі характеристики продукту, оскільки при цьому руйнується більшість важливих біологічно активних ферментів, збільшуються розміри жирових шариків тощо.

В активній зоні НВЧ-пастеризатора, завдяки високій концентрації енергії електромагнітного поля 800–1000 Вт/см^3 темп нагрівання становить 200–400 °С за секунду і більше, достатній час витримки становить 0,05–0,08 секунди, при цьому середня температура рідини не перевищує 65 °С. Як згадувалося раніше, цей режим забезпечує 99,9 % знищення бактерій і іншої мікрофлори, залишаючи неушкодженими важливі компоненти продукту.

Концепція побудови пристрою пастеризації електромагнітним полем НВЧ Варіант пристрою, що досліджується в роботі, наведено на рисунку 1. Основою НВЧ-частини пристрою є відрізок прямокутного хвилеводу **2** з розмірами поперечного перетину 90 х 45, закороченого з обох сторін. На кінцях хвилеводу розташовані два магнетрони **1** та **5** потужністю 2000 Вт НВЧ-енергії кожен і узгоджені з ним шляхом підбору положення стінки, що утворює коротке замикання.

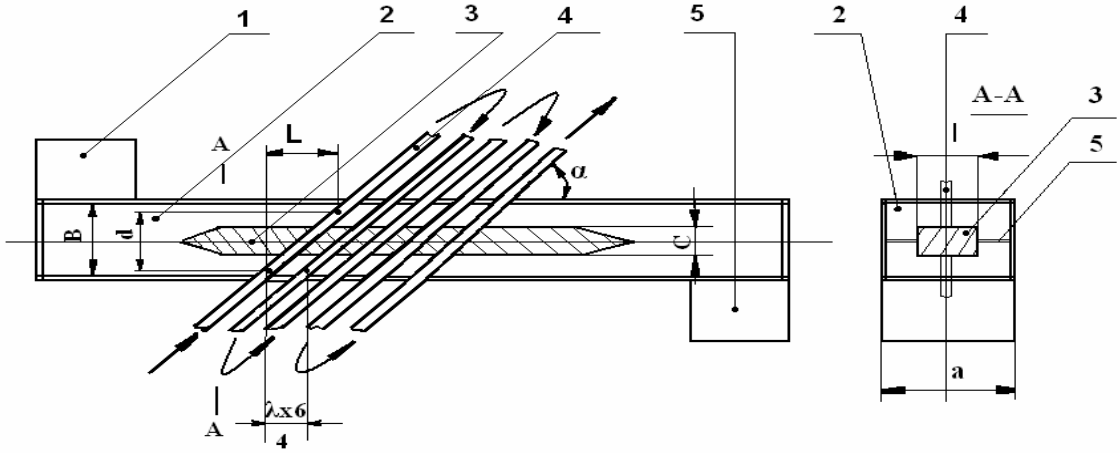

Рис. 1. Пристрій обробки рідини електромагнітним полем:
1 та 5 — магнетрони; 2 — прямокутний хвилевод; 3 — металева вставка; 4 — радіопрозорі трубки.

Для підвищення щільності енергії і, відповідно, напруженості електричного поля в активній зоні використано металеву вставку **3** та металеву пластинку **6,** що перетворюють прямокутний хвилевод на два **П**-подібні хвилеводи. У зоні розташування радіопрозорих трубок **4,** по яких рухається рідина що пастеризується, концентрація енергії підвищується в декілька разів залежно від розмірів **c** та **l** металевої вставки. Кінці металевої вставки мають у перехідній частині клиноподібну або ступінчату форму. Довжина переходу вибирається так, щоб в межах $\pm$ **2 %** від середньої частоти **КСХ** вставки не перевищувало **1,1**. Радіопрозорі трубки **4** розташовані під кутом α до подовжньої осі хвилевода на відстані $\Lambda_{хв}$ **/4** одна від одної, де $\Lambda_{хв}$ — довжина хвилі в хвилеводі. Кут $\alpha = arctg$d/L і розраховується з умови мінімального значення КСХ. При малих внутрішніх діаметрах трубок D$\leq$1 см, L$\approx \Lambda_{хв}$/4; тоді $\alpha = arctg$2(c+b)/$\Lambda_{хв}$.

Таким чином, якщо відстань між металевою вставкою і широкою стінкою хвилеводу, що визначається як (b – c)/2, дорівнює 1см і внутрішній діаметр радіопрозорих кварцових

трубок не більше 1см, а l = (3–4) см, то за потужності магнетрона 2 кВ, концентрація енергії в зоні першої трубки досягає 1000 Вт/см^3, тобто умови, необхідні для ефективної пастеризації будуть виконуватися, якщо система трубок з рідиною узгоджена так, що КСХ не перевищує 1,2.Магнетрони, що випускаються для промислового використання, мають розбіжності генерованого сигналу за частотою в межах 50 МГц (± 1 %), то НВЧ-пристрій має бути узгоджений в дещо ширшій смузі ± 50 МГц, або ± 2 %.

Вимірювання основних характеристик НВЧ-пристрою

Експериментальні залежності КСХ та коефіцієнта передачі від частоти вимірювалися за допомогою приладу Р4-38. Характеристики КСХ, як функції частоти в діапазоні частот від 2350 до 2550 МГц і залежно від кількості радіопрозорих трубок з рідиною наведені на рис. 2. Крива 1 відповідає системі з двох трубок, крива 2 знята за наявності 4 трубок і крива 3 належить до системи, в якій застосовано 6 трубок. В останньому випадку КСХ в діапазоні 2400–2500 МГц не перевищує 1,2.

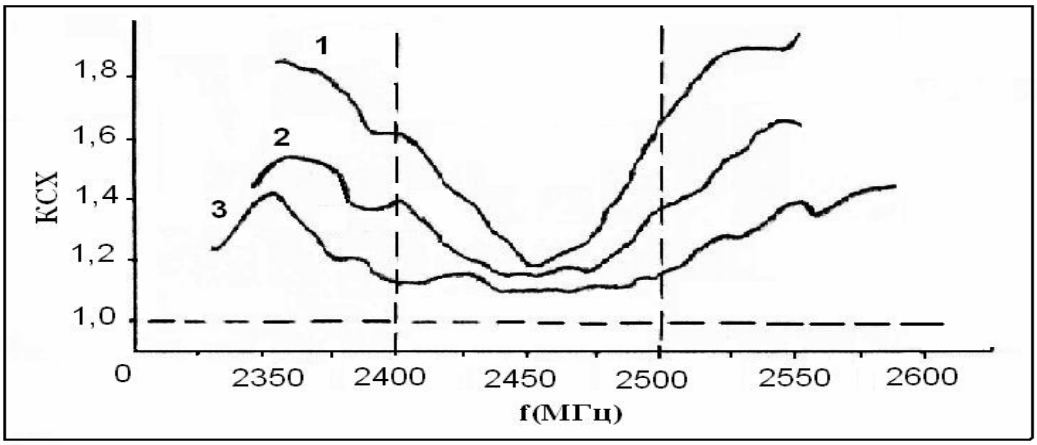

Рис. 2. Залежність коефіцієнта стоячої хвилі від частоти для двох (крива 1), чотирьох (крива 2) та шести (крива 3) радіопрозорих трубок з водою.

При застосуванні двох, включених зустрічно, магнетронів необхідно запобігти взаємному впливу і максимально використати їх НВЧ-енергію, що підвищить надійність роботи і коефіцієнт корисної дії пристрою. Для цього необхідно, щоб електромагнітна хвиля, яка рухається в одному напрямку, повністю поглиналася. Очевидно, що поглинання електромагнітної енергії залежить від кількості трубок і характеризується коефіцієнтом передачі. Залежність коефіцієнта передачі від частоти і кількості трубок у пристрої наведена на рис. 3.

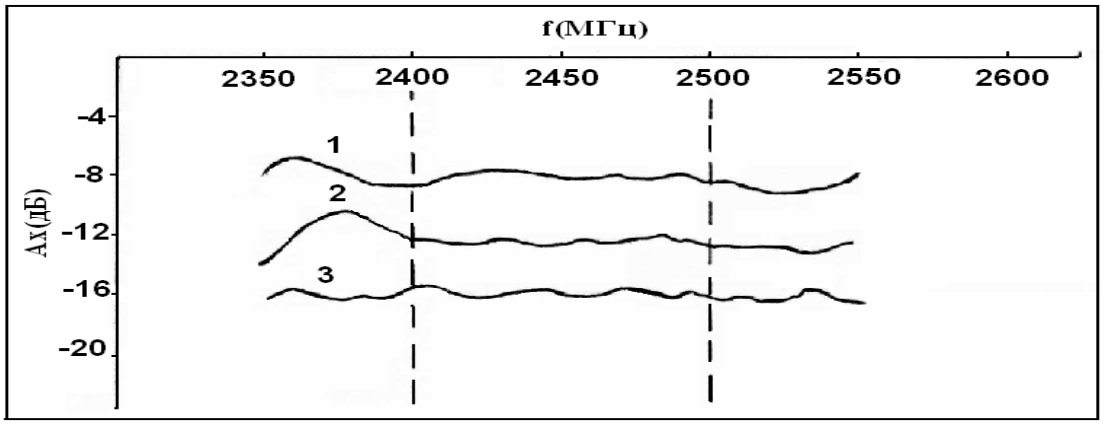

Рис. 3. Залежність коефіцієнта передачі від частоти для двох (крива 1), чотирьох (крива 2) та шести (крива 3) радіопрозорих трубок, заповнених водою.

Як і на попередньому рисунку крива 1 відповідає двом трубкам, крива 2 — чотирьом і крива 3 — шести. Очевидно, що за наявності в пристрої більше шести трубок електромагнітна хвиля практично повністю поглинається рідиною.

Якщо з'єднати всі трубки послідовно, то рідина, що пастеризується (стерилізується), за наявності шести трубок у пристрої, 12 разів проходить зону високої концентрації поля, що гарантує надвисокий ступінь знезараження рідини. Швидкість проходження рідини через активну зону розраховується так, щоб загальний час дії НВЧ-енергії не перевищував 0,1–0,15 секунди.

Результати та обговорення

Відібрані проби досліджувались таким чином: 15 проб піддавались пастеризації, а 15 — були контрольними. Після досліджень проводилась порівняльна оцінка показників якості непастеризованого молока та молока, яке піддавалось пастеризації на установці з використанням ВЧ-струмів. Результати досліджень наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Вплив пастеризації із застосуванням ВЧ-струмів на показники якості молока, (n=15)

Показники	Молоко	
	не пастеризоване, (M ± m)	пастеризоване, (M ± m)
Жир, %	3,16 ± 0,12	3,21 ± 0,18
Білок, %	2,82 ± 0,06	2,91 ± 0,08
Лактоза, %	4,35 ± 0,03	4,52 ± 0,07
СЗМЗ, %	7,12 ± 0,16	8,18 ± 0,32
Суха речовина, %	11,26 ± 0,24	11,46 ± 0,42
Соматичні клітини, тис/см'	265,8 ± 52,44	Сліди
К-сть жирових кульок в 1 мл, млрд.шт	3,12 ± 0,26	3,36 ± 0,18
Діаметр жирових кульок, мкм	2,62 ± 0,24	2,68 ± 0,07

Дані досліджень (табл. 1) свідчать, що вміст основних складових компонентів після пастеризації молока достовірних змін не мав. Деяке підвищення вмісту сухого знежиреного молочного залишку та сухих речовин пояснюється випаровуванням води при пастеризації молока (пастеризацію проводили у відкритій широкій посудині). Велика різниця спостерігалась між пастеризованим і непастеризованим молоком по вмісту у ньому соматичних клітин. Так, у непастериованому молоці міститься 265.8 тис/см^3 соматичних клітин (в середньому), а в пастеризованому — сліди, кількість їх визначити не можливо.

Пастеризація суттєво не вплинула на дисперсність жиру в молоці. Так, в 1 мл непастеризованого молока в середньому нараховувалось 3,12 млрд. шт жирових кульок, діаметр яких становив 2,62 мкм, після пастеризації кількість живих кульок незначно збільшилась і становила 3,36 млрд. шт. Це також очевидно пов'язано з випаровуванням води при пастеризації. При цьому відзначена тенденція до незначного збільшення жирових кульок (середній діаметр 2,68 мкм), що, можливо, можна пояснити коалесценцією скупчень жирових кульок у молоці.

На густину молока та органолептичні показники пастеризація суттєво не вплинула. Кислотність в пастеризованому молоці дещо знизилась (на 0,25°Т), це пояснюється вивітрюванням газів під час пастеризації.

Сичужна і бродильна проби показали таке: молоко пастеризоване і непастеризоване зверталось після внесення сичужного ферменту через 36,2 хвилини, згусток утворювався

щільний без бульбочок газу, з приємним чистим запахом і смаком. Це вказує на те, що технологічні якості молока після пастеризації не погіршилися, мікрофлора в молоці в основному молочнокисла.

Бродильна проба теж засвідчила добрі технологічні якості пастеризованого молока: молоко непастеризоване в термостаті зсідалося в середньому протягом 8 годин, а пастеризоване — протягом 29–33 годин, згусток утворювався щільний, без виділення газів (в пастеризованому молоці — без виділення сироватки). Смак кислого пастеризованого молока був чистим, приємним, кисломолочним, запах — також. Непастеризоване молоко утворило згусток менш щільний, з бульбочками газу, з виділенням сироватки, що свідчить про наявність в ньому газоутворюючої мікрофлори, яка при пастеризації цього молока була знешкоджена.

Клас молока за бродильною пробою: пастеризованого — перший; непастеризованого — другий.

Висновки і перспективи подальших досліджень.

1. Для реалізації ефективної пастеризації (стерилізації) рідини, необхідно створити в активній зоні пастеризатора щільність енергії, що перевищує 680–700 Вт/см^3.

2. При НВЧ потужності магнетронів 2000 Вт, розмірах хвилевода, металевої вставки і радіопрозорих трубок, які вказані в тексті, а також при відповідному узгодженні, ефективний режим пастеризації забезпечується.

3. Для досягнення необхідного значення КСХ і ефективної розв'язки магнетронів у робочій смузі частот, кількість радіопрозорих трубок повинна бути не менше шести штук.

4. Пастеризація молока з використанням високочастотних струмів не погіршує поживні, смакові та технологічні якості тому доцільно продовжити дослідження по удосконаленню пастеризаторів з використанням магнетронів.

Yu. Sydoruk, A. Nikitenko

HIGH FREQUENCY DEVICE OF PASTEURIZATION AND STERILIZATION OF LIQUID MATTERS

S u m m a r y

It is substantiation expediency of usiog electromagnetic fields of super high frequency (SHF) for pasteurization and sterilization of liquid products and surroundings. It's considered of working conditions of pasteurization device and necessary energy concentration in zone of interaction of liquid and electromagnetic field. It's given measuring results of standing wave coefficient and transmission coefficient.

Ю. К. Сидорук, А. М. Никитенко

НАДВЫСОКОЧАСТОТНОЕ УСТРОЙСТВО ПАСТЕРИЗАЦИИ И СТЕРИЛИЗАЦИИ ЖИДКИХ ВЕЩЕСТВ

А н н о т а ц и я

Приведены обоснования применения электромагнитных волн сверхвысоких частот (СВЧ) для пастеризации и стерилизации жидких продуктов и сред. Рассмотрены режимы работы устройства пастеризации и необходимые концентрации энергии в зоне взаимодействия жидкости с электромагнитным полем. Предложена конструкция устройства

взаимодействия жидкости с электромагнитным полем. Приведены результаты измерений КСВ и коэффициента передачи.

1. *Остапенко А. М.* Методика расчёта режимов сверхвысокочастотной пастеризации плодово-ягодных соков и винодельческой продукции / Остапенко А. М., Абу-Тавахин. / Виноград и вино России. — Москва, 1995 г. — № 1.

2. *Панасенок В. Н.* Применение микроволнового нагрева для инактивации микроорганизмов : VI Всесоюзная научно-техническая конф. «Электрические методы обработки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья». / В. Н. Панасенко. — Москва : Изд. МИПБ., 1989 г.

3. Пат. № 25505 Україна, МПК(2006) H05B 6/64, C02F 1/469. Мікрохвильовий пристрій знезараження води, рідкого мулу, пастеризації молока та інших рідких речовин / Сидорук Ю. К. — 2007 ; бюл. № 12.

Рецензент: кандидат біологічних наук, завідувач лабораторії ембріональної біотехнології І. І. Гевкан.