

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2026.01.031

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПЛОДООВОЧЕВИХ КОНСЕРВІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ АВТОКЛАВАХ

Дукач А.Ю.¹ [ORCID], Рудакова Г.В.² [ORCID], Поліщук В.М.³ [ORCID]

¹Херсонський національний технічний університет, аспірант, Україна

²Херсонський національний технічний університет, д.т.н., професор, Україна

³Херсонський національний технічний університет, ³к.т.н., доцент, Україна

Анотація. У роботі проведено аналіз існуючих методів керування процесами термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах. Розглянуто проблеми використання традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, зумовлені значною тепловою інерційністю об'єкта та складністю налаштування під різні типи і маси завантаження. Проаналізовано перспективні підходи до автоматизації, зокрема прогнозує керування на основі моделей (MPC), яке дозволяє оптимізувати процес безпосередньо за цільовим показником накопиченої мікробіологічної летальності (F_0) з урахуванням технологічних обмежень. Окрему увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних методів, таких як адаптивні нечіткі регулятори (Fuzzy-PID) та штучні нейронні мережі (ANN), що виконують функцію віртуальних "м'яких сенсорів" для прогнозування температури всередині тари. За результатами аналізу обґрунтовано необхідність переходу до гібридних інтелектуальних систем керування для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

Ключові слова: вертикальний автоклав, термічна обробка, ПІД-регулятор, прогнозує керування, нечітка логіка, штучні нейронні мережі, накопичена летальність, оптимізація керування.

Вступ. Процес консервації харчових продуктів спрямований на збереження їхньої якості та безпечності протягом тривалого часу. Основним завданням є запобігання розвитку мікроорганізмів і сповільнення біохімічних змін, що призводять до псування [1]. Саме термічна обробка в автоклавах забезпечує надійну стерильність та тривалий термін зберігання консервів без застосування штучних добавок [2]. Але цей процес є досить складним і потребує точного контролю температурних режимів та тривалості впливу.

Недотримання оптимальних параметрів може призвести як до втрати поживних і смакових властивостей продукції, так і до загрози мікробіологічної небезпеки. Використання традиційних систем керування вертикальними автоклавами часто супроводжується значними енерговитратами, нерівномірністю теплових режимів та ризиками зниження якості кінцевого продукту. Саме тому важливим завданням є оптимізація комп'ютеризованих систем управління процесом термічної обробки плодоовочевих консервів з метою підвищення ефективності роботи обладнання, зменшення енерговитрат, забезпечення належної якості та безпечності готової продукції [3].

Метою дослідження є проведення аналізу методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах.

Основна частина. Використовувані в промисловості автоклави являють собою складні високотехнологічні агрегати, що працюють із великою продуктивністю. В даний час існує багато різновидів автоклавів, є серед них спеціалізовані моделі, та, не дивлячись на це все, вони працюють за одним принципом: нагрів продукту, що піддається стерилізації, в фасованих ємностях до високої температури при певному тиску. Тиск має підвищене значення в порівнянні з атмосферним, в результаті чого запобігається руйнування (розрив) тари (посуду) за рахунок компенсації температурного розширення консервів, що нагріваються. Схему компонентів комплексу термічної обробки наведено на рис. 1.

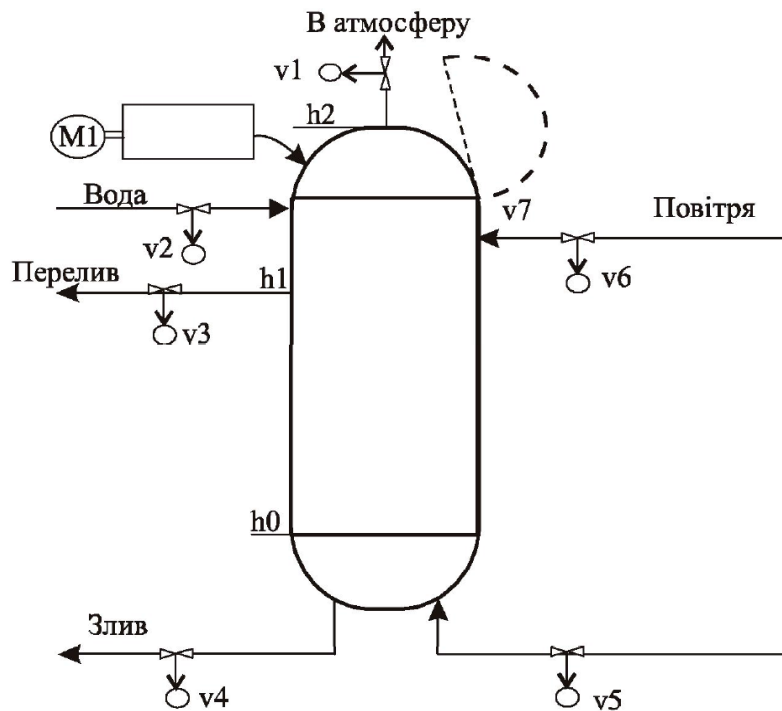


Рисунок 1 – Автоклав з протитиском

Двома основними компонентами комплексу, що розглядається, є апарат періодичної дії (АПД) і контролер. Контролер надсилає об'єкту сигнали керування вентилями V1-V6, кришкою V7 і тельфером M1. Для правильного керування об'єктом контролеру необхідно врахувати значення рівнів, температур, тиску та інтервалів часу [4].

Системи керування процесами стерилізації та пастеризації у вертикальних автоклавах використовують комплексний підхід, що базується на поєднанні термодинамічного моделювання, класичних алгоритмів регулювання та інтелектуальних систем. Кожен з існуючих підходів має свої технологічні особливості, переваги та критичні обмеження щодо забезпечення необхідного рівня летальності мікроорганізмів (коефіцієнт F_0) при збереженні харчової цінності продукту.

1. Традиційні методи керування базуються на використанні пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, які є промисловим стандартом для підтримання заданої температури та тиску в автоклаві. Дані методи ґрунтуються на безперервному обчисленні помилки між бажаною температурою середовища (уставки) та фактичною температурою, що вимірюється термодатчиками (РТ100 або термопарами).

Головною проблемою традиційних ПІД-регуляторів у контексті вертикальних автоклавів є значна теплова інерційність та нелінійність процесу. Завантажений плодовоочевими консервами автоклав має велику теплоємність. Оскільки класичний ПІД-регулятор налаштовується на фіксовані коефіцієнти, він не може гнучко адаптуватися до зміни маси завантаження або типу консервів. Це часто призводить до перерегулювання або занадто повільного виходу на режим стерилізації, що збільшує енерговитрати та може погіршити органолептичні властивості (смак, колір) і харчову цінність продукту.

2. Прогнозуюче керування на основі моделей Model Predictive Control (MPC).

Метод MPC являє собою один із найбільш перспективних напрямків сучасної теорії автоматичного керування для складних теплотехнічних об'єктів. На відміну від класичних ПІД-регуляторів, які обчислюють керуючий сигнал лише на основі поточного відхилення температури, MPC використовує динамічну математичну модель автоклава для передбачення його поведінки в майбутньому на певний проміжок часу (горизонт прогнозування). Система розраховує цілий план дій на майбутнє (H_c кроків), але на виконавчий механізм подається лише перший крок цього плану. На наступному такті система отримує нові дані з датчиків, горизонт зсувається на один крок вперед, і весь процес оптимізації повторюється. Критичною перевагою алгоритмів MPC для процесів консервування є їхня здатність системно враховувати жорсткі технологічні та апаратні обмеження прямо під час розрахунку функції J .

На відміну від класичних ПІД-регуляторів, які обмежуються жорстким підтриманням заданого графіка температури теплоносія (пари або води), системи прогнозного керування (MPC) дозволяють оптимізувати процес, орієнтуючись на головний кінцевий результат – мікробіологічну безпеку [5].

Ключова проблема промислової стерилізації полягає в тому, що розмістити фізичні термодатчики в кожній банці під час реального виробництва неможливо. Тому метод MPC використовує теплофізичну математичну модель для "віртуального" розрахунку $T(t)$ у режимі реального

часу [6]. Алгоритм безперервно прогнозує, як тепло передається від середовища автоклава через стінку тари вглиб продукту.

Такий підхід прямого керування за летальністю (Lethality-based control) має дві вагомі переваги порівняно з традиційними методами:

– енергоефективність: процес нагрівання не триває довше, ніж це мінімально необхідно для знезараження, що суттєво економить пару та електроенергію.

– збереження якості продукту: мінімізується термічна деградація поживних речовин. Уникнення "переварювання" дозволяє зберегти більше вітамінів (зокрема термолабільного вітаміну С) та покращує органолептичні властивості овочів (їхню структуру, колір та хрусткість).

3. Інтелектуальні методи (Нечітка логіка та Нейронні мережі)

Процес термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах характеризується високим ступенем нелінійності, нестаціонарністю теплофізичних параметрів (залежно від типу продукту: горошок, кукурудза тощо) та змінною масою завантаження. Для подолання цих проблем традиційні математичні моделі все частіше замінюються або доповнюються системами штучного інтелекту – нечіткою логікою та штучними нейронними мережами [7].

1). Адаптивні нечіткі-PID регулятори.

Класичний ПІД-регулятор має жорстко задані коефіцієнти налаштування. Натомість нечіткий регулятор використовує базу експертних знань для безперервної адаптації цих коефіцієнтів у режимі реального часу. Такий підхід дозволяє системі керування автоклавом поводитися подібно до досвідченого оператора, плавно знижуючи потужність нагріву при наближенні до уставки та повністю усуваючи проблему перерегулювання.

2). Нейромережеве прогнозування та "м'які сенсори".

Головна технологічна проблема стерилізації – неможливість прямого вимірювання температури всередині кожної банки в промислових умовах. Впровадження фізичних термопар руйнує герметичність тари і застосовується лише в лабораторних цілях.

Для вирішення цієї проблеми використовують штучні нейронні мережі, які виконують роль "м'якого сенсора" (віртуального датчика).

У контексті керування автоклавом розробляються багат шарові перцептрони або рекурентні нейронні мережі, де:

– вхідні дані: поточна температура та тиск середовища в автоклаві, час від початку процесу, початкова температура продукту, тип тари;

– прихований шар: витягує складні нелінійні залежності процесу теплообміну.

– вихідні дані: прогнозована температура в "холодній точці" банки T_{core} або безпосередньо розрахований показник накопиченої летальності F_0 .

Навчання такої мережі відбувається на великих історичних датасетах, зібраних під час лабораторних прогонів з реальними датчиками. Після навчання (мінімізації функції втрат) нейромережа здатна з високою точністю, а саме з похибкою менше 0.5°C прогнозувати температуру продукту виключно на основі показників середовища автоклава.

Незважаючи на високу гнучкість, системи на базі ANN критично залежать від репрезентативності навчальних даних. Якщо на завод надійде партія кабачків з іншою щільністю або вологістю, ніж ті, на яких навчалася модель, точність віртуального датчика може суттєво знизитись. Саме тому найперспективнішим напрямком є створення гібридних нейро-нечітких мереж (ANFIS).

Висновки. Проведений аналіз існуючих технологічних рішень дозволяє стверджувати, що на сьогодні відсутній єдиний універсальний підхід до керування режимами стерилізації у вертикальних автоклавах. Хоча класичні контури регулювання на базі ПД-законів продовжують масово експлуатуватися на підприємствах харчової промисловості завдяки своїй простоті, вони фактично вичерпали свій оптимізаційний потенціал. Такі системи гарантують базову мікробіологічну безпеку, проте не здатні забезпечити гнучке енергозбереження та максимальне збереження харчової цінності (зокрема термолабільних вітамінів) у плодоовочевій продукції.

Окремою науково-практичною проблемою залишається термічна обробка складноструктурної консервації. Більшість існуючих прогностичних моделей показують високу точність лише для гомогенних середовищ (наприклад,

фруктових соків або пюре). Водночас значна частина плодоовочевих консервів (овочеві рагу, лечо, багатокомпонентні салати) є складними гетерогенними системами зі змінними теплофізичними властивостями. Використання стандартних алгоритмів для таких продуктів призводить до значних похибок у розрахунках накопиченої летальності та, як наслідок, до термічного пошкодження сировини (переварювання).

Виходячи з виявлених недоліків, найбільш перспективним вектором розвитку автоматизації в цій галузі є відмова від ізольованих методів на користь синергії класичної теорії керування та технологій штучного інтелекту. Впровадження гібридних комплексів – зокрема, адаптивних нечітких регуляторів (Fuzzy-PID) або систем предиктивного керування з елементами нейромережевої корекції – дозволить компенсувати нелінійність процесів теплообміну та індивідуальні властивості різної плодоовочевої сировини.

ЛІТЕРАТУРА

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Трєгуб В.Г. Побудова математичної моделі автоматизованого апарата періодичної дії / В.Г. Трєгуб // Харчова промисловість. — 2004. — № 3. — С. 165–169.
5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.
6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review. IoT and AI in Agriculture. Springer, 2024. P. 311–341. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21.

ANALYSIS OF CONTROL METHODS FOR THERMAL PROCESSING OF CANNED FRUITS AND VEGETABLES IN VERTICAL AUTOCLAVES

Andriy Dukach, Hanna Rudakova, Valentyn Polishchuk

Abstract. *The paper examines the features of the process of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves aimed at preserving their quality and safety for a long time. An analysis of existing methods of controlling the processes of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves is carried out. The problems of using traditional proportional-integral-differential (PID) controllers are considered, due to the significant thermal inertia of the object and the complexity of setting it up for different types and masses of loading. Promising approaches to automation are analyzed, in particular model-based predictive control (MPC), which allows optimizing the process directly according to the target indicator of accumulated microbiological lethality (FO) taking into account technological limitations. Special attention is paid to the possibilities of using intelligent methods, such as adaptive fuzzy controllers (Fuzzy-PID) and artificial neural networks (ANN), which perform the function of virtual "soft sensors" for predicting the temperature inside the container. It was found that the use of standard algorithms for such products leads to significant errors in the calculations of accumulated lethality and, as a result, to thermal damage to raw materials (digestion). The results of the analysis substantiate the need to transition to hybrid intelligent control systems to ensure energy efficiency, compensate for the nonlinearity of heat exchange processes and preserve the nutritional value of complex heterogeneous products.*

Keywords: *vertical autoclave, heat treatment, PID controller, predictive control, fuzzy logic, artificial neural networks, accumulated lethality, control optimization.*

REFERENCE

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Trehub V.H. Pobudova matematychnoi modeli avtomatyzovanoho aparata periodychnoi dii / V.H. Trehub // Kharchova promyslovist. — 2004. — № 3. — S. 165–169. [in Ukrainian].

5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. *Food Science & Nutrition*. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.
6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. *IntechOpen*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review. *IoT and AI in Agriculture*. Springer, 2024. P. 311–341. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21.