

А.Ю. Дукач, Г.В. Рудакова, В.М. Поліщук

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПЛОДООВОЧЕВИХ КОНСЕРВІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ АВТОКЛАВАХ

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. Особливу 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.

Постановка проблеми. 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].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. 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.

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 керування об'єктом контролеру необхідно врахувати значення рівнів, температур, тиску та інтервалів часу [4].

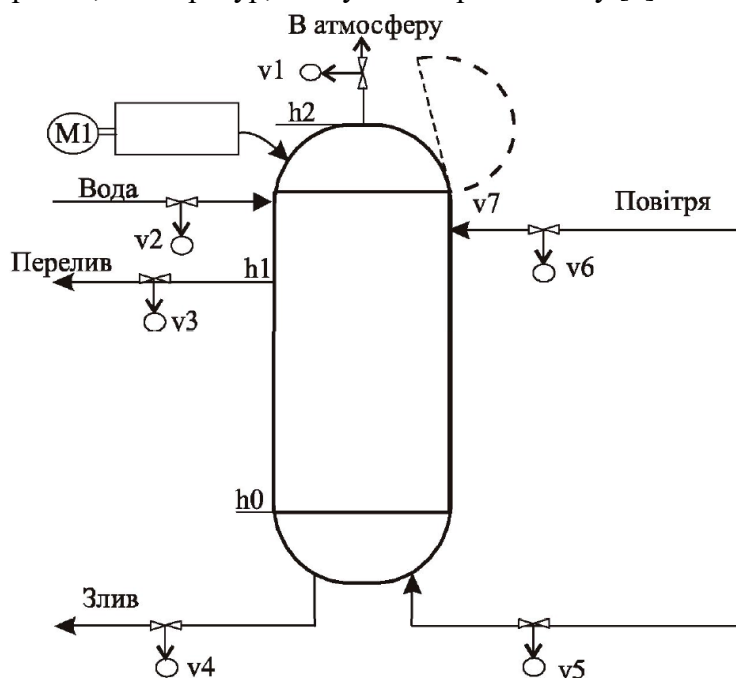


Рисунок 1 – Автоклав з протитиском

Мета досліджень. Метою дослідження є проведення аналізу методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах та обґрунтування перспективних підходів до автоматизації для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

Викладення основного матеріалу дослідження. 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 (PID-регулювання). 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).

Процес регулювання описується наступними базовими елементами та сигналами:

– $r(t)$ (задавальний вплив) – уставка системи. У контексті даного дослідження це необхідна температура стерилізації плодоовочевих консервів (наприклад, 120 °С), яку має підтримувати автоклав згідно з технологічною картою;

– $y(t)$ (вихідний сигнал) – фактична поточна температура в апараті, яка вимірюється датчиком і передається через лінію зворотного зв'язку;

– $e(t)$ (сигнал похибки) – різниця між заданою температурою $r(t)$ та фактичною температурою $y(t)$. Саме з цим відхиленням працює регулятор.

– $u(t)$ (керуючий вплив) – загальний сигнал, який є сумою впливів усіх трьох ланок ПІД регулятора і подається на об'єкт керування. Загальне математичне рівняння має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де K_p , K_i та K_d - коефіцієнти налаштування відповідних ланок регулятора (пропорційній, інтегральній та диференціальній).

Головною проблемою традиційних ПІД-регуляторів у контексті вертикальних автоклавів є значна теплова інерційність та нелінійність процесу. Завантажений плодоовочевими консервами автоклав має велику теплоємність. Оскільки класичний ПІД-регулятор налаштовується на фіксовані коефіцієнти (K_p , K_i , K_d), 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). Основна ідея алгоритмів предиктивного керування базується на принципі "ковзного горизонту" (receding horizon). На кожному такті часу контролер розв'язує задачу оптимізації в режимі реального часу. Він розраховує таку послідовність майбутніх керуючих впливів (наприклад, положень клапана подачі пари), яка б мінімі-

зувала спеціальну функцію цілі J (cost function). Типова квадратична функція цілі для мінімізації похибки температурного режиму автоклава має вигляд:

$$J = \sum_{i=1}^{H_p} w_y [y(t+i|t) - r(t+i)]^2 + \sum_{j=0}^{H_c-1} w_u [\Delta u(t+j|t)]^2, \quad (2)$$

де H_p – горизонт прогнозування (кількість кроків у майбутнє, на які математична модель передбачає зміну температури в апараті); H_c – горизонт керування (кількість кроків, для яких оптимізатор розраховує зміну стану виконавчих механізмів); $y(t+i|t)$ – прогнозоване значення температури в автоклаві на i -му кроці; $r(t+i)$ – задана технологічна траєкторія температури (ідеальний графік нагріву та стерилізації); $\Delta u(t+j|t)$ – зміна керуючого впливу (наприклад, відсоток відкриття парового клапана); w_y, w_u – вагові коефіцієнти, що визначають компроміс між точністю підтримання заданої температури та плавністю роботи механізмів (мінімізацією зносу арматури та економією теплоносія).

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 . Оптимізатор гарантує, що розрахований план керування не порушить фізичних меж:

- тиск в автоклаві не вийде за межі допустимого діапазону ($P_{min} \leq P(t) \leq P_{max}$), що запобігає зриву кришок з банок;
- швидкість нагрівання ($\Delta T/\Delta t$) не перевищить межі, при якій можливий термічний шок для скляної тари;
- ступінь відкриття клапанів лежить у фізично можливих межах від 0 до 100%.

На відміну від класичних ПД-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. Цільовою функцією в таких алгоритмах виступає накопичена летальність (стерилізуючий ефект) F_0 (рис. 2), що обчислюється за рівнянням Бігалоу [5]:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T(t) - T_{ref}}{z}} dt, \quad (3)$$

де $T(t)$ – поточна температура в "найхолоднішій точці" (зазвичай геометричному центрі) банки з консервами в момент часу t , °C; T_{ref} – референсна температура (базова температура стерилізації, яка традиційно приймається рівною 121,1 °C); z – константа термостійкості цільових мікроорганізмів, що показує, на скільки градусів потрібно змінити температуру, щоб час відмирання бактерій змінився в 10 разів (наприклад, для спор збудника ботулізму *Clostridium botulinum* $z = 10^\circ\text{C}$).

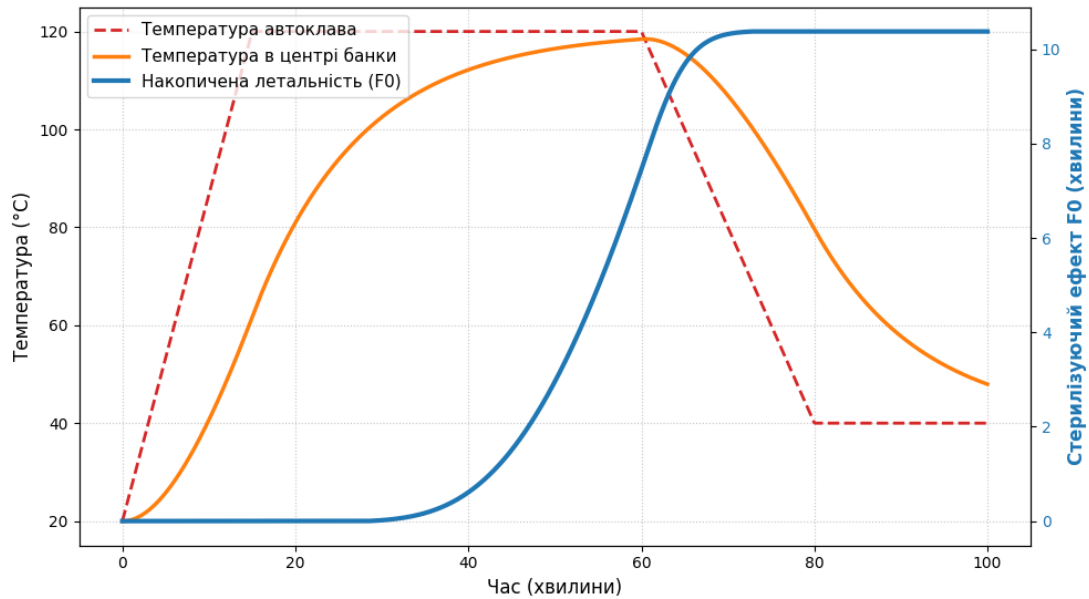


Рисунок 2 – Динаміка термічної обробки консервів та накопичення F_0

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.

Як тільки розрахунковий інтеграл F_0 досягає нормативного значення (наприклад, необхідних 4-6 хвилин для конкретного виду плодоовочевих консервів), система автоматично подає сигнал на припинення подачі пари та ініціює фазу охолодження.

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 C) 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 ПД-регулятор має жорстко задані коефіцієнти налаштування. Натомість нечіткий регулятор використовує базу експертних знань для безперервної адаптації цих коефіцієнтів у режимі реального часу.

Робота такого регулятора складається з трьох основних етапів: фазифікація, База правил, дефазифікація.

1 етап. Фазифікація. Чіткі вхідні сигнали системи – поточна похибка $e(t)$ та швидкість зміни похибки $\Delta e(t)$ – перетворюються на лінгвістичні змінні.

Наприклад, замість точного значення відхилення "-5°C", система оперує поняттями: "Негативна Велика" (NB), "Негативна Мала" (NS), "Нуль" (ZE), "Позитивна Мала" (PS).

2 етап. База правил. Обробка даних відбувається за допомогою логічних правил "ЯКЩО-ТО". Наприклад:

ЯКЩО $e(t)$ є Позитивною Великою (температура сильно не дотягує до норми) та $\Delta e(t)$ є Нульовою (температура не зростає), ТО коефіцієнт K_p має бути Великим.

3 етап. Дефазифікація.

Перетворення логічних висновків назад у чіткий керуючий сигнал (наприклад, використовуючи метод центру ваги), що визначає точний відсоток відкриття парового клапана.

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).

Математично робота базового нейрона описується функцією активації f , яка застосовується до зваженої суми вхідних сигналів:

$$y = f \left(\sum_{i=0}^n w_i x_i + b \right), \quad (4)$$

де x_i – вхідні параметри, w_i – синаптичні ваги, b – зміщення.

У контексті керування автоклавом розробляються багатoshарові персептрони 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 визначений показник накопиченої летальності F_0 .

Навчання такої мережі відбувається на великих історичних датасетах, зібраних під час лабораторних прогонів з реальними датчиками. Після навчання (мінімізації фу-

нкції 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 (табл.1) дозволяє стверджувати, що на сьогодні відсутній єдиний універсальний підхід до керування режимами стерилізації у вертикальних автоклавах.

Хоча класичні контури регулювання на базі ПІД-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 плодово-овочевій продукції.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів керування автоклавами

Технологія керування	Метод регулювання	Ступінь інерційності	Основні виклики
Класичні (PID)	Регулювання за відхиленням	Високий	Перерегулювання, складність налаштування під різні консерви
Предиктивні (MPC)	Оптимізація за моделлю	Низький	Високі вимоги до обчислювальних потужностей, залежність від точності моделі
Інтелектуальні (Fuzzy/ANN)	Адаптивне/Навчальне	Середній	Складність отримання якісних даних для навчання

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 плодовоовочевих 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 комплек-

сів – 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. Трегуб В.Г. Побудова математичної моделі автоматизованого апарата періодичної дії / В.Г. Трегуб // 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.

REFERENCES

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 avtomatyzyvanoho aparata periodychnoi dii / V.H. Trehub // Kharchova promyslovisht. — 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.

Received 21.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

Analysis of control methods for thermal processing of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves

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 (F0) 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.

Дукач Андрій Юрійович – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7319-6196>

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8053-4218>

Поліщук Валентин Мойсейович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8775-4977>

Dukach Andriy – Postgraduate student of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7319-6196>

Rudakova Hanna – Doctor of Engineering sciences, Professor, Professor of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8053-4218>

Polishchuk Valentyn – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8775-4977>