

## ТЕХНІЧНІ НАУКИ

УДК 66.046.8 (088.8)

### ВИБІР АЛГОРИТМУ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ БАРОТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ В ТЕПЛОВІЙ КАМЕРІ З АЕРОДИНАМІЧНИМ НАГРІВАННЯМ

**Берник І. М.**, к.т.н., доцент,  
завідувач кафедри харчових технологій і мікробіології  
Вінницький національний аграрний університет, м.Вінниця, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-1367-3058

**Коц І. В.**, к.т.н., доцент,  
завідувач НДЛ гідродинаміки  
Вінницький національний аграрний університет, м.Вінниця, Україна  
ORCID ID: 0000-0003-0870-6385

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-01>

Однією з основних виробничих витрат при реалізації технологічного процесу баротермічної обробки харчової сировини є енергетичні витрати. Теплові технологічні процеси оброблення під надлишковим тиском і необхідною температурою харчової сировини є одними з найбільш енергоємних етапів, при яких споживається понад 60 % від загальної кількості енерговитрат. В статті пропонується аналіз алгоритмів управління технологічними процесами баротермічної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу. Автоматична система управління підтримує задані параметри пароповітряного середовища в теплових камерах шляхом регулювання частоти обертів ротора аеродинамічного нагрівача та управління дистанційно керованою жалюзійною ґраткою, яка регулює поперечний переріз всмоктуючого повітропроводу аеродинамічного нагрівача. Розроблено алгоритми для регулювання та підтримання заданих параметрів пароповітряного середовища: дросельний, якісний, комбінований. При дросельному регулюванні прохідний отвір жалюзійних ґраток закривається рядом приводних лопаток, які при цьому накладаються одна на одну. Якісний алгоритм забезпечує регулювання температури зміною частоти обертання двигуна. Алгоритм забезпечує програмне формування профілю температури в період нагрівання, ізотермічної витримки і охолодження. Комбінований алгоритм програмного регулювання поєднує елементи дросельного і якісного управління. В першому варіанті шляхом пошуку максимально можливого кута відкриття жалюзійних ґраток за відсутності перевантаження за струмом асинхронного двигуна. В іншому – шляхом регулювання частоти обертання роторних нагрівачів максимально допустимим струмом двигуна. Складено блок-схеми алгоритмів послідовного управління технологічними етапами баротермічної обробки. Зменшення енерговитрат досягається шляхом оптимізації роботи приводу за допомогою регулювання швидкості обертання ротора аеродинамічного нагрівача роторного типу.

**Ключові слова:** баротермічна обробка, тепла камера, аеродинамічний нагрівач роторного типу, алгоритм управління, пароповітряне середовище, харчова сировина.

**SELECTION OF THE ALGORITHM OF THE MANAGEMENT OF THE BAROTHERMIC PROCESSING OF FOOD RAW MATERIAL IN THE THERMAL CAMERA WITH AERODYNAMIC HEATING**

**Bernyk Iryna**, Ph.D., Associate Professor,  
Head of Microbiology and Processing Technology Department  
Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, Ukraine

**Kots Ivan**, Ph.D., Associate Professor,  
Head of Research Laboratory for Hydrodynamics  
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

<https://doi.org/10.31073/foodresources2019-13-01>

*One of the main production costs in the implementation of the technological process of barothermal processing of food raw materials is energy costs. Thermal technological processes of processing under excess pressure and the required temperature of food raw materials are one of the most energy-intensive stages, in which more than 60% of the total amount of energy consumption is consumed. In the article the analysis of algorithms for control of technological processes of barothermal processing of food raw materials in a thermal chamber with an aerodynamic rotor-type heater is offered. The automatic control system maintains the set parameters of the steam-air environment in the thermal chambers by adjusting the rotation speed of the rotor of the aerodynamic heater and controlling the remote-controlled louvre lattice, which regulates the cross-section of the suction duct of the aerodynamic heater. Algorithms for regulation and maintenance of the set parameters of the steam-air environment are developed: throttle, high-quality, combined. At throttle adjustment the aperture opening of louver lattices is closed by a number of drive blades which thus are superimposed on each other. The qualitative algorithm provides temperature control by varying the engine speed. The algorithm provides software formation of the temperature profile during heating, isothermal holding and cooling. The combined algorithm of software regulation combines the elements of throttle and quality control. In the first embodiment, by finding the maximum possible opening angle of the louver lattices in the absence of overcurrent induction motor. In another, by adjusting the rotational speed of the rotary heaters, the maximum allowable motor current. The block diagrams of algorithms for sequential control of technological stages of barothermal treatment are drawn up. Reduction of energy consumption is achieved by optimizing the operation of the actuator by adjusting the rotor speed of the aerodynamic rotor type heater.*

**Keywords:** barothermal treatment, thermal chamber, aerodynamic rotary heater, control algorithm, steam-air environment, food raw materials.

**Постановка проблеми.** В харчовій, як і у інших галузях промисловості зменшення енерговитрат досягається в результаті застосування енергозберігаючих технологій та оптимізації складових технологічного процесу. Одним із способів виготовлення харчової продукції, зокрема, консервних виробів є їх баротермічна обробка (БТО), тобто теплове оброблення харчової сировини герметично укладеної до посуду-тари для подальшого зберігання під необхідною за санітарно-гігієнічними вимогами температурою та тиском. Весь цикл баротермічної обробки розподіляють на чотири періоди: попередня витримка, підігрів до максимальної температури, ізотермічна витримка, охолодження. Запропонований нами спосіб дозволяє створювати сприятливі умови для дотримання необхідного технологічного регламенту та відповідного управління цими процесами [1].

За останні роки розроблено і впроваджено цілий ряд новітнього обладнання з метою вдосконалення існуючих систем управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини [2, 3]. Незважаючи на це, враховуючи появу нового

обладнання для більш якісного управління, подальше удосконалення автоматичної системи управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагріванням і під необхідним надлишковим тиском залишається актуальною задачею.

**Мета статті.** Метою роботи є вибір та розробка алгоритмів управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу. Предметом дослідження є система управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини, що здійснюється в тепловій камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу (АНРТ).

Виклад основного матеріалу. Тривалість БТО визначається фізико-механічними та органолептичними характеристиками харчової сировини. Під час кожного періоду баротермічної обробки в тепловій камері повинне бути відповідне пароповітряне середовище з керованими параметрами (температура, вологість). Пароповітряне середовище, яке взаємодіє з оброблюваною харчовою сировиною суттєво впливає на тривалість та якість проходження процесу стерилізації сировини сприяє отриманню харчової продукції із заданими фізико-механічними та органолептичними властивостями [5, 7]. Для отримання якісних виробів необхідно дотримуватись відповідних технологічних режимів на всіх періодах технологічного процесу баротермічної обробки харчової сировини, а також оперативно управляти температурою і вологістю пароповітряного середовища з дотриманням заданої тривалості кожного періоду [5, 7].

Система здійснює управління (вмикання/вимикання) теплогенеруючим пристроєм – АНРТ, який приводить в рух електродвигун приводу роторного рециркуляційного нагрівача. Відповідно до ТП БТО автоматична система управління підтримує задані параметри пароповітряного середовища в ТК з АНРТ за рахунок:

- регулювання частоти обертів ротора аеродинамічного нагрівача;
- управління дистанційно керованою жалюзійною ґраткою, яка регулює поперечний переріз всмоктуючого повітропроводу аеродинамічного нагрівача.

Розвиток автоматизації аеродинамічного нагріву на базі наукоємних математичних моделей дозволяє підвищити надійність операції баротермічної обробки. Для регулювання теплового режиму агрегатів аеродинамічного нагріву розроблено ряд алгоритмів [6]: дросельний (рис. 1), якісний (рис. 2), комбінований (рис. 3, 4). Запропоновані алгоритми є досить гнучкими, що дозволяє використати їх під час розробки алгоритмів управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини в тепловій камері з аеродинамічним нагрівачем роторного типу. Для ілюстрації алгоритмів програмного управління ТП БТО в ТК з АНРТ згідно дросельного та якісного алгоритмів використаємо блок-схеми, які наведено на рисунку 1 та 2.

Дросельний алгоритм. При дросельному регулюванні прохідний отвір жалюзійних ґраток закривається рядом приводних лопаток [5], які при цьому накладаються одна на одну. Лопатки отримують рух від приводу регулятора через приводний шток і перехідні ланки.

У початковий момент часу жалюзійні ґратки повністю закриті ( $\tau = 0$ ), АНРТ плавно набирає оберти до максимальної частоти обертання ( $n_{\text{тах}}$ ). Далі за кожен обчислювальний цикл відбувається регулювання швидкості нагріву (рис. 1). Поточна швидкість  $\theta_i$  порівнюється зі встановленою  $\theta_{\text{вст}}$ :

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} - \kappa_1(\theta_n - \theta_{\text{вст}}) \quad \text{при} \quad \theta_n > \theta_{\text{вст}} \quad (1)$$

$$\varphi_n = \varphi_{n-1} + \kappa_1(\theta_{\text{вст}} - \theta_n) \quad \text{при} \quad \theta_n < \theta_{\text{вст}} \quad (2)$$

де  $\varphi_n, \varphi_{n-1}$  – кут нахилу жалюзійних ґраток, відповідно, в поточний та попередній обчислювальні цикли;

$\kappa$  – коефіцієнт посилення сигналу неузгодженості за швидкістю нагрівання.

Досягнувши необхідної за технологією температури  $t_{вст}$  закон регулювання кута ґрат здійснюється за наступними формулами [6]:

$$t_n = t_{n-1} - \kappa_2(t_n - t_{вст}) \quad \text{при} \quad t_n > t_{вст} \quad (3)$$

$$t_n = t_{n-1} + \kappa_2(t_{вст} - t_n) \quad \text{при} \quad t_n < t_{вст} \quad (4)$$

де  $t_n, t_{n-1}$  – температура пароповітряного середовища, відповідно, в поточний та попередній обчислювальні цикли;

$\kappa_2$  – коефіцієнт посилення сигналу неузгодженості за температурою пароповітряного середовища.



Рис. 1. Блок-схема алгоритму управління ТП БТО БВ за дросельним алгоритмом

Якісний алгоритм. Якісний алгоритм забезпечує регулювання температури зміною частоти обертання двигуна (рис. 2).



**Рис. 2. Блок-схема алгоритму управління ТП БТО БВ за якісним алгоритмом**

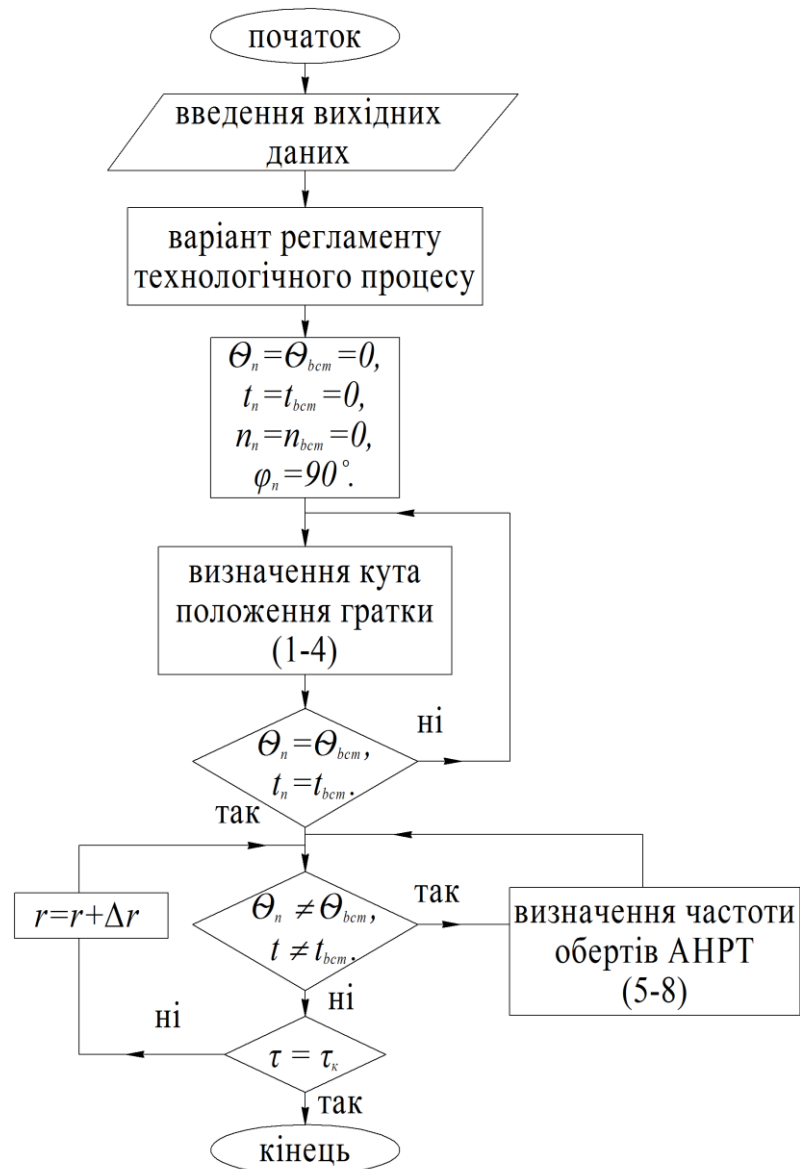
Алгоритм забезпечує програмне формування профілю температури в період нагрівання, ізотермічної витримки і охолодження. Відразу після завантаження герметизованої посудини із харчовою сировиною виробів в теплову камеру вмикається АНРТ на частоту обертання  $n_{поч}$  і певний час взагалі не здійснюється регулювання температури. Цей період називається адаптацією: робочий простір пропарювальної камери повинен прогрітися, контролер - отримати інформацію від сенсорів температури і пристосуватися до зовнішніх умов. Після закінчення періоду адаптації для кожного обчислювального циклу визначається дійсна швидкість нагрівання як різниця між поточною температурою в робочому просторі пропарювальної камери та її попереднім значенням. Ці значення порівнюються зі встановленою швидкістю нагріву  $t_{bcm}$ .

Залежно від знаку і величини неузгодженості здійснюється зміна частоти обертання АНРТ згідно наступних залежностей [6]:

$$n_n = n_{n-1} - \kappa_1(\theta_n - \theta_{bcm}) \quad \text{при} \quad \theta_n > \theta_{bcm} \quad (5)$$

$$n_n = n_{n-1} + \kappa_1(\theta_{bcm} - \theta_n) \quad \text{при} \quad \theta_n < \theta_{bcm} \quad (6)$$

де  $n_n, n_{n-1}$  – частота обертання нагрівача у даний момент часу і в попередній обчислювальний цикл.



**Рис. 3. Блок-схема управління ТП БТО БВ  
згідно з комбінованим алгоритмом №1**

Після досягнення заданого значення температури розрахунок поточної швидкості обертання АНРТ здійснюється за наступними формулами [6]:

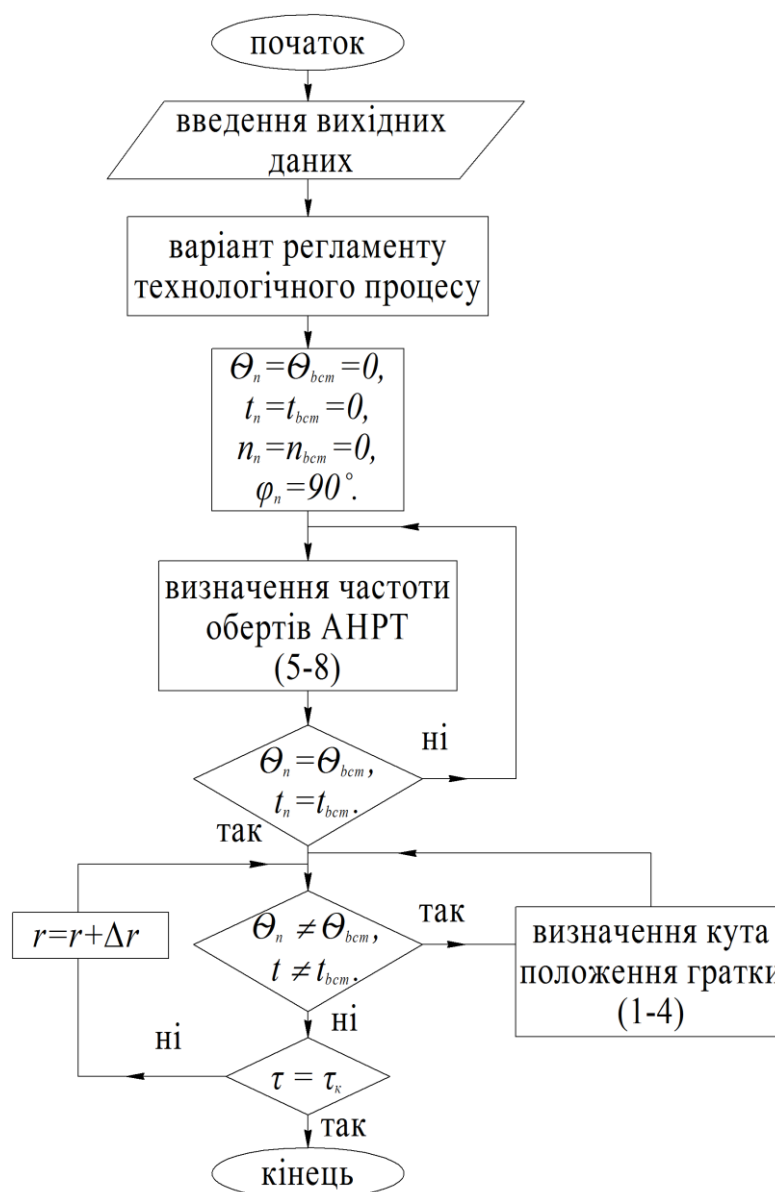
$$n_n = n_{n-1} - \kappa_3(t_n - t_{bcm}) \quad \text{при} \quad t_n > t_{bcm} \quad (5)$$

$$n_n = n_{n-1} + \kappa_3(t_{bcm} - t_n) \quad \text{при} \quad t_n < t_{bcm} \quad (6)$$

де  $\kappa_3$  – коефіцієнт посилення помилки за неузгодженням температури;

$t_n, t_{bcm}$  – поточна і задана температура після досягнення заданого значення температури.

Регулювання температури в період охолодження - програмно-кероване, аналогічне періоду нагрівання.



**Рис. 4. Блок-схема управління ТП БТО БВ згідно з комбінованим алгоритмом №2**

Комбінований алгоритм. Комбінований алгоритм програмного регулювання поєднує елементи дросельного і якісного управління, розглянутих раніше:

- алгоритм № 1 забезпечує пошук максимально можливого кута відкриття жалюзійних ґраток за відсутності перевантаження за струмом асинхронного двигуна. Подальший процес регулювання швидкості наростання температури відбувається згідно залежностей якісного алгоритму (рис. 3);

- алгоритм №2 спочатку регулює частоту обертання роторних нагрівачів максимально допустимим струмом двигуна, потім процес регулювання швидкості наростання температури відбувається відповідно до залежностей дросельного алгоритму (рис. 4).



### Висновки

1. Система автоматизованого управління технологічним процесом баротермічної обробки в тепловій камері з використанням аеродинамічного нагрівача роторного типу забезпечує нагрівання, ізотермічну витримку та охолодження, із заздалегідь заданою тривалістю, швидкістю нагріву та температурою для кожного періоду технологічного процесу. В основу системи управління технологічним процесом баротермічної обробки харчової сировини, відповідно до заданого технологічного регламенту, покладено принцип безперервного контролю температури, стану виконавчих пристроїв одночасно за всіма об'єктами регулювання і управління згідно заданих режимів.

2. Зменшення споживаної потужності і економія електроенергії досягається в результаті оптимізації роботи приводу за допомогою регулювання швидкості обертання ротора АНРТ. При зниженні швидкості знижуються також тиск і механічне навантаження на деталі машини. Усе це збільшує термін служби устаткування, скорочує потребу в ремонті і знижує витрати на технічне обслуговування теплової камери.

### Бібліографія

1. Черевко О. І., Михайлов В. М., Загорулько О. Є. Автоматизація виробничих процесів. Харків: ХДУХТ. 2014. 186 с.
2. Бобух А. О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Харків: ХНАМГ, 2006. 185 с.
3. Патент 40453 Україна. МТК С04В 40/00. Пропарювальна камера. Колісник О. П., Коц І. В. № u200812905. Заявлено 05.11.2008. Опубл. 10.04.2009. Бюл. № 7.
4. Ковалюк Д. О., Москвіна С. М. Моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами. Вінниця: ВНТУ. 2010. 182 с.
5. Подгорный С. А. Термовлагодомеханические процессы и перенос потенциалов тепла и массы при сушке зерновых материалов. Автореферат диссертации доктора технических наук. Краснодар: Кубанский государственный технологический университет. 2015. 44 с.
6. Векторная оптимизация регулирования температуры процесса аэродинамического нагрева. URL: <http://www.plcsystems.ru/article/detail>.
7. Закируллин Р. С. Оптимизация и автоматизация тепломассообменных технологических процессов конвективной сушки промышленных изделий. Диссертация кандидата технических наук. Оренбург, 2000. 158 с.

### References

1. Cherevko O., Mykhaylov V., Zahorulko O. (2104). Avtomatyzatsiya vyrobnychych protsesiv. [Automation of viral processing processes]. Kharkiv: KHDUKHT. 186 p. [in Ukrainian].
2. Bobukh A. (2006). Avtomatyzovani systemy keruvannya tekhnolohichnymy protsesamy. [Automated system of technological processes]. Kharkiv: KHNAMH. 185 p. [in Ukrainian].
3. Patent 40453 Ukrayina. MTK S04V 40/00. Proparyuvalna kamera. [Steam chamber]. Kolisnyk O. P., Kots I. V. № u200812905. Zayavleno 05.11.2008. Opubl. 10.04.2009, Byul. №7. [in Ukrainian].
4. Kovalyuk D., Moskvina S. (2010). Modelyuvannya teplotekhnolohichnykh obyektiv z rozpodilenyi parametry.[Model of heat engineering technology with various parameters]. Vinnytsya: VNTU. 182 p. [in Ukrainian].
5. Podhorney S. (2015). Termovlahomekhanicheskiye protsessy y perenos potentsyalov tepla y massy pry sushke zernovykh materyalov. [Thermo-moisture-mechanical processes and transfer of heat and mass potentials during drying of grain materials]. Avtoreferat dyssertatsyy doktora tekhnicheskyykh nauk. Krasnodar: Kubanskyi gosudarstvennyy tekhnolohicheskyy unyversytet. 44 p. [in Russian].



6. Vektornaya optymyzatsyya rehulyrovanyya temperatury protsessa aэrodynamycheskoho nahreva. [Vector optimization of temperature control of the aerodynamic heating process]. URL: <http://www.plcsystems.ru/article/detail>. [in Russian].

7. Zakyrullyn R. (2000). Optymyzatsyya y avtomatyzatsyya teplomassoobmennyykh tekhnolohycheskykh protsessov konvektyvnoy sushky promyshlennykh yzdelyy. [Optimization and automation of heat and mass transfer technological processes of convective drying of industrial products]. DySSERTatsyya kandydata tekhnicheskykh nauk. Orenburh. 158 p. [in Russian].